Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

[1] *Norén, O. u. Th. Lindvall:* Heat relief in tractor cabs. ASAE Paper No. 81-1539; St. Joseph 1981.

[2] *O'Neill, D.H.:* The effects of solar energy on the thermal environment in an enclosed tractor cab. National Institute of Agricultural Engineering. Departm. Note No. DN/E/867/02001 Silsoe, Bedford, 1979.

[3] *Batel, W., J. Janssen u. R. Möller:* Klimabelastung auf Schleppern und Mähdreschern und Maßnahmen zur Klimagestaltung. Landbauf. Völkenrode, Sonderheft 52 (1980) S. 157/70.

[4] *Wenzel, H.G. u. D. Piekarski:* Klima und Arbeit. Herausgegeben vom Bayerischen Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung, München, 1980.

[5] *Madsen, T.L.:* Messen des Raumklimas. In: *Krause, Pillat, Zander (Hrsg.):* Arbeitssicherheit. Freiburg: R. Haufe Verlag 1976, S. 9/149–9/198.

[6] *Browén, A.:* Värmeavlastning i förarhytter – Studier av avvikelser från optimal klimatkomfort. JTI-rapport Nr. 25; Ultuna/Uppsala: Jordbrukstekniska institut, 1978.

[7] *Eissing, G.:* Verfahren zur Bewertung des Klimas am Arbeitsplatz. Klima–Kälte–Heizung (Ki) Bd. 8 (1980) Nr. 3, S. 113/17.

[8] *Yaglou, C.P.:* Temperature, humidity and air movement in industries. The effective temperature index. J. industr. Hyg. Bd. 9 (1927) S. 297/309.

[9] *Vogt, J.J., V. Candas, J.P. Libert u. A. Hoeft:* Die erforderliche Schweißabgabe als Index der Wärmebelastung. Zeitschr. für Arbeitswissenschaft Bd. 32 (1978) Nr. 4, S. 241/44.

[10] •*Fanger, P.O.:* Thermal comfort. New York: McGraw-Hill Book Co., 1973.

[11] *Fanger, P.O.:* Thermische Behaglichkeit am Arbeitsplatz. In: *Hettinger, T., B. Müller u. G. Eissing (Hrsg.):* Symposium Klima, Behaglichkeit–Erträglichkeit–Zumutbarkeit. Dokumentation Arbeitswissenschaft Bd. 3 (1980) S. 3/26.

[12] *Jahns, G. u. F.J. Thomé:* Beanspruchung des Menschen durch verschiedene Klimafaktoren – Versuche im Arbeitsplatzsimulator. Bericht aus den Instituten für Betriebstechnik und landtechnische Grundlagenforschung der FAL, Nr. 50/1979.

[13] *Graef, M., G. Jahns, J. Janssen, G.-J. Mejer, R. Möller, H. Speckmann u. E. Witte:* Arbeitsplatzbelastungssimulator. Bericht aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der FAL, Nr. HdA 78/1 (1978).

[14] *Janssen, J. u. R. Möller:* Versuchseinrichtung zum Messen des Temperaturfeldes und der Luftgeschwindigkeit in Fahrerkabinen. Bericht aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der FAL, Nr. Jn 03 (1982).

Gasförmige Brenn- und Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen - Herstellung und Verwendung

Von Wilhelm Batel, Michael Graef, Gerd-Jürgen Mejer, Frithjof Schoedder und Gerhard Vellguth, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 662.6:662.76

Für die Herstellung gasförmiger Brenn- und Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen stehen thermochemische und biochemische Verfahren zur Verfügung, mit denen ein breites Spektrum von Rohstoffen umgewandelt werden kann.
Dieser Beitrag gibt zunächst einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der Gase sowie die vorgeschlagenen und verfügbaren nachwachsenden Rohstoffe und stellt dann die Grundvorgänge der Gaserzeugung, die apparative Gestaltung der Verfahren, die Verwendungsmöglichkeiten der Gase und Stoff- und Energiebilanzen für die Gaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen dar.

**) Prof. Dr.-Ing. W. Batel ist Leiter des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung, Dipl.-Ing. M. Graef, Dipl.-Ing. G.-J. Mejer, Dr. F. Schoedder und Dipl.-Ing. G. Vellguth sind wissenschaftliche Mitarbeiter in diesem Institut der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.*

Inhalt

1. Nutzung nachwachsender Rohstoffe für Brenn- und Kraftstoffe
   - 1.1 Übersicht
   - 1.2 Wertigkeit von Energie
2. Eigenschaften der Gase im Hinblick auf ihre Nutzung als Brenn- und Kraftstoff
3. Erzeugung der nachwachsenden Rohstoffe, Gasausbeute und Herstellung der Gase
   - 3.1 Erzeugung der nachwachsenden Rohstoffe
   - 3.2 Herstellung der Gase durch thermochemische Prozesse
     - 3.2.1 Physikalisch-chemische Grundvorgänge
     - 3.2.2 Apparative Ausführungsbeispiele
   - 3.3 Gasherstellung durch biochemische Prozesse
     - 3.3.1 Biochemische Grundvorgänge
     - 3.3.2 Apparative Ausführungsbeispiele

4. Verwendung der Gase
4.1 Verwendung von Generatorgas und Biogas als Brennstoff
4.1.1 Generatorgas als Brennstoff
4.1.2 Biogas als Brennstoff
4.2 Verwendung von Generatorgas und Biogas als Kraftstoff
4.2.1 Generatorgas als Kraftstoff
4.2.2 Biogas als Kraftstoff
5. Stoff- und Energiebilanzen
5.1 Generatorgas
5.1.1 Abschätzung der Potentiale der gegenwärtig verfügbaren landwirtschaftlichen Rohstoffe
5.1.2 Stoff- und Energiebilanz am Beispiel Strohbriketts
5.1.3 Kosten
5.2 Biogas
5.2.1 Abschätzung der Potentiale der gegenwärtig verfügbaren landwirtschaftlichen Rohstoffe
5.2.2 Stoff- und Energiebilanz am Beispiel Grassilage
5.2.3 Kosten
6. Konkurrierende Gase
7. Zusammengefaßte Ergebnisse

1. Nutzung nachwachsender Rohstoffe für Brenn- und Kraftstoffe

1.1 Übersicht

Die im vergangenen Jahrzehnt auf dem Gebiet der Energieversorgung aufgetretenen Entwicklungen haben Überlegungen zur verstärkten Ausschöpfung eigener Energiequellen mit Nachdruck gefördert. In diesem Rahmen sind die Arbeiten des Instituts zu sehen, die sich mit den Möglichkeiten der Nutzung nachwachsender Rohstoffe für Kraft- und Brennstoffe befassen. Daß dabei flüssige Kraftstoffe besondere Beachtung erfahren, liegt darin begründet, daß diese Produkte aus Erdöl sich schwer substituieren lassen. Entsprechend befaßten sich erste Berichte mit der Herstellung und Eignung von Dieselkraftstoffen aus Ölpflanzen [1] und von Ethanol aus zucker- und stärkehaltigen Rohstoffen als alternativer Kraftstoff [2]. Dieser Bericht hat zum Ziel, den derzeitigen technischen Stand bei der Erzeugung und Verwendung gasförmiger Brenn- und Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in einer Übersicht darzustellen.
Für einen direkten Einsatz als Kraftstoff ist keiner der nachwachsenden Rohstoffe, als Brennstoff sind nur Pflanzen und Pflanzenteile mit niedrigem Wassergehalt geeignet, wie Holz, Stroh und einige Pflanzenfrüchte. Mit wenigen Ausnahmen sind die Pflanzenfrüchte, auch wenn sie einen hohen Trockensubstanzgehalt und großen Wert als Nahrungs- und Futtermittel besitzen, für technische Verwendungen als Energieträger niedriger Wertigkeit einzustufen. Der Hauptanteil der nachwachsenden Rohstoffe insgesamt ist wegen des hohen Wassergehaltes als Energieträger für technische Zwecke direkt überhaupt nicht geeignet.

So beinhaltet die Frage der Verwendung nachwachsender Rohstoffe für Energiezwecke im wesentlichen die Frage nach den technischen Möglichkeiten und Aufwendungen zur Umwandlung dieser Rohstoffe in Energieträger höherer Wertigkeit. Grundsätzlich strebt man dabei einen hohen Aufstufungsgrad an, wie in flüssige Brenn- und Kraftstoffe, die dem Otto- und Dieselkraftstoff entsprechen. So haben Pflanzenöle etwa die Wertigkeit von Dieselkraftstoff und Derivate dieser Öle, wie Pflanzenölester, Eigenschaften, die den Normenanforderungen für Dieselkraftstoff nahekommen.

Das durch mikrobielle Umwandlung von zucker- und stärkehaltigen nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Ethanol läßt sich als Otto-Kraftstoff verwenden.

In der Bundesrepublik sind diese flüssigen Kraftstoffe derzeit noch nicht konkurrenzfähig, so daß sich die Entwicklungen darauf richten, die Flächenerträge der Rohstoffe möglichst ohne höheren Bedarf an variablen Produktionsmitteln zu steigern und den Verarbeitungsaufwand für die Rohstoffe zu senken.

Andere wirtschaftliche Rahmenbedingungen, wie beispielsweise in Brasilien, können dazu führen, daß auch derzeit schon ein beachtlicher Anteil von Automobilen mit Ethanol-Otto-Motoren ausgerüstet und ein entsprechendes Tankstellennetz vorhanden ist.

Für den mobilen Einsatz werden fast ausnahmslos flüssige Kraftstoffe verwendet. Für stationäre Anlagen dagegen haben auch gasförmige Brenn- und Kraftstoffe eine hohe Wertigkeit. Es ist daher weiter zu fragen, wie gasförmige Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen zu bewerten sind. Dazu liegt bereits ein breites Erfahrungsmaterial vor.

Zur Herstellung von gasförmigen Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen sind gegenwärtig thermochemische und biochemische Verfahren vorherrschend.

Bei den thermochemischen Verfahren werden geeignete Rohstoffe in einem Gasgenerator auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Dabei entsteht durch Entgasung und Reaktion mit Sauerstoff ein Mischgas, das sog. Generatorgas. Dieser Prozeß wird allgemein als Vergasung bezeichnet. Die Rohstoffe sollten einen mittleren Feuchtegehalt wie beispielsweise bei lufttrockenem Holz oder Stroh nicht überschreiten.

Die Herstellung von Generatorgas und die Verwendung dieses Gases in Gas-Otto-Motoren ist Stand der Technik. Daß dieses Verfahren derzeit wenig verbreitet ist, liegt daran, daß die Gesamtkosten den Einsatz außer in Sonderfällen nicht rechtfertigen. Bei den biochemischen Verfahren werden organische Stoffe in wäßriger Lösung durch Mikroorganismen umgewandelt. Am bekanntesten ist die anaerobe Methangärung. Dabei entsteht das Klär- oder Biogas. Hinsichtlich des Wassergehaltes der Rohstoffe liegen keine Begrenzungen vor, da in wäßriger Lösung gearbeitet wird. In kommunalen Abwasseranlagen wird seit Jahrzehnten Klärgas erzeugt, mit dem man u.a. Gasmotoren zur Elektrizitätserzeugung antreibt. In der Landwirtschaft gab es in den 50er Jahren eine erste Welle der Biogaserzeugung. Das Verfahren ist aus ökonomischen Gründen in größerem Umfang nicht zum Tragen gekommen.

Ausgehend von dieser Situation ist zu fragen, ob infolge des technischen Fortschritts und bei veränderten Rahmenbedingungen auch gasförmige Brenn- und Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen ein breiteres Interesse finden können. Die Beantwortung dieser Frage unter technischen Aspekten ist Hauptinhalt dieser Arbeit, wobei eine Wertung auch über Energiebilanzen erfolgt.

1.2 Wertigkeit von Energie

Energie ist gespeicherte Arbeit oder Arbeitsfähigkeit eines Stoffes. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dem Satz von der Erhaltung der Energie, kann Energie weder entstehen noch verschwinden, sondern nur in eine andere Form umgewandelt werden. Wenn trotzdem allgemein von Energieerzeugung oder Energieverbrauch gesprochen wird, so ist damit nicht die Erzeugung bzw. der Verbrauch von Energie, sondern von bestimmten Energieformen oder von Energieträgern gemeint.

Energie-In- und Outputs lassen sich über die Angabe der Energiemengen beschreiben. Im Zusammenhang mit den gestellten Aufgaben ist diese Angabe der (evtl. bezogenen) Energiemengen in Joule oder Wattsekunde notwendig, aber allein nicht ausreichend. Vielfach ist nämlich die Wertigkeit von Energie ein gleichrangiger, wenn nicht sogar ein entscheidender Faktor.

Die Wertigkeit oder auch der Nutzen von Energie läßt sich nur in Verbindung mit dem jeweiligen Anwendungsfall darstellen. Damit beinhaltet die Wertigkeit keine eindeutige physikalische Größe, sondern ein objektbezogenes Kriterium, das sich vielfach mit dem Preis ausdrücken läßt. Da aber Energiepreise oft Mittelwerte auch für sehr unterschiedliche Verwendungszwecke sind, bedarf es zusätzlich zum Preis als Kriterium oft weiterer Bewertungen.

Die Produktion nachwachsender Rohstoffe hat im wesentlichen zwei Energie-Inputs:

Erstens die Sonnenenergie, mit der die Pflanze über die Photosynthese Biomasse erzeugt. Auf diese Weise wird Strahlungs-

energie der Sonne in stofflich gebundene Energie umgewandelt. Der zweite Zweig betrifft technische Energie. Diese umfaßt die Kraft- und Brennstoffe, Energie für die Erzeugung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln oder für die Herstellung von Maschinen und Gebäuden, um die wichtigsten zu nennen.

Im Bereich der technischen Energie ist die Wertigkeit der verschiedenen Energieformen zu beachten. Mit **Tafel 1** wird ein Beispiel für die Bewertung verschiedener Energieträger beim Einsatz für ortsfeste und mobile Produktionsmittel gezeigt. Als Kriterien dienen die Nichtsubstituierbarkeit, die Energiedichte, die Handhabung und die Speicherfähigkeit. Eine technisch genutzte Energieform, die nicht oder nur sehr aufwendig substituierbar ist, hat eine hohe Wertigkeit. Die Energiedichte läßt sich bei Brenn- und Kraftstoffen durch den volumen- oder massebezogenen Brenn- oder Heizwert beschreiben, die Handhabung über den Aggregatzustand. Von entscheidendem Gewicht kann auch die Speicherfähigkeit sein.

Wird die Wertigkeit grob durch die Anzahl von Kreuzen beschrieben, so zeigt sich, daß die elektrische Energie für ortsfeste Produktionsmittel die höchste Wertigkeit besitzt. Elektrische Energie ist für viele Anwendungsfälle überhaupt nicht substituierbar, so in der Nachrichtenübermittlung oder der Datenverarbeitung. Die hieraus resultierende hohe Wertigkeit wird noch durch die sehr große Anwendungsbreite und Energiedichte verstärkt. Der Nachteil der geringen Speicherfähigkeit wirkt sich für ortsfeste Anlagen am Netz nicht aus, ist aber entscheidend für mobile Produktionsmittel, wie Land-, Luft- und Wasserfahrzeuge und damit auch für mobile landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen. Für den Antrieb von Luft- und nicht netzgebundenen Landfahrzeugen haben flüssige Kraftstoffe die höchste Wertigkeit. Sie lassen sich nicht oder nur äußerst aufwendig substituieren, besitzen eine hohe Energiedichte und gute Speicherfähigkeit. Die Handhabung ist wesentlich einfacher als die fester Brennstoffe.

Es ist offenkundig, daß das Beispiel nur einige von vielen möglichen Kriterien der Wertigkeit berücksichtigt. Von Fall zu Fall können weitere Kriterien, beispielsweise notwendige Sicherheitsvorkehrungen bei der Handhabung, langfristige Verfügbarkeit, Umweltaspekte u.ä. von entscheidender Bedeutung sein.

	Nicht-substituier-barkeit	Energie-dichte	Hand-habung	Speicher-fähigkeit	Gesamt-wertigkeit
für stationäre Anlagen					
elektrische Energie	+++	+++	+++	+	
flüssige Brennstoffe	+	+++	++	+++	
feste Brennstoffe	+	+++	+	+++	
gasförmige Brennst.	+	+++	++	++	
für fahrende Produktionsmittel mit Eigenantrieb					
flüssige Kraftstoffe	+++	+++	+++	+++	
gasförmige Kraftst.	+	++	++	++	
feste Kraftstoffe	+	+	+	+++	
elektrische Energie	+	+	++	+	

Tafel 1. Diskussion der Wertigkeit verschiedener Energieformen und -träger für die Verwendung in ortsfesten und mobilen Produktionsmitteln.

2. Eigenschaften der Gase im Hinblick auf ihre Nutzung als Brenn- und Kraftstoff

Zur Bewertung von Gasen für ihre Verwendung als Brenn- und Kraftstoff sind bestimmte Eigenschaften [3 bis 19] von Bedeutung, deren wichtigste in **Tafel 2** zusammengestellt sind.

Die praktisch verwendeten Gase sind meist Mischgase, d.h. Mischungen verschiedener brennbarer und inerter Gase, so daß die Eigenschaften sich aus der Zusammensetzung ergeben. Ein Schwanken in der Zusammensetzung macht in der Regel zusätzliche Maßnahmen und damit apparativen und investiven Aufwand erforderlich, wenn ein konstantes Brennverhalten erreicht werden soll (s.a. Wobbezahl).

Ein Hauptkriterium für Energieträger ist der Heizwert, der von der chemischen Zusammensetzung der brennbaren Gase abhängt. Entsprechend dem Heizwert werden die Mischgase in Schwach-, Mittel-, Stark- und Reichgase aufgegliedert. Danach ist Biogas ein Stark- und Generatorgas ein Schwachgas.

Die Nutzung des als Heizwert bezeichneten Energieinhalts der Gase setzt eine vollständige Verbrennung voraus. Hierfür ist eine Mindestmenge an Sauerstoff erforderlich, die meist mit der Verbrennungsluft dem Prozeß zugeführt wird. Die für die stöchiometrische Verbrennung notwendige Luftmenge ist der Luftbedarf.

Der auf die Menge des stöchiometrischen Gas/Luft-Gemisches bezogene Heizwert ist der Gemischheizwert. Er ist ein Maß für die Energiemenge, die bei einem bestimmten Brennerdurchsatz oder Motorhubvolumen dem Brennraum zugeführt werden kann. Die Werte der Tafel lassen erkennen, daß sich die verschiedenen Gase im Gemischheizwert weniger unterscheiden als im Heizwert. Wird der Heizwert nicht für das stöchiometrische Gemisch, sondern für Gemische mit Luftüberschuß oder -mangel angegeben, muß dies besonders vermerkt werden, z.B. durch Angabe der Luftzahl.

Zur Entzündung und Verbrennung muß das Gemisch zumindest an einer Stelle auf eine Mindesttemperatur, die Zündtemperatur, gebracht werden. Diese Größe ist abhängig von der Reinheit der Gase bzw. der Zusammensetzung der Mischgase, dem Druck und der Versuchsanordnung bei der Bestimmung. Die in Tafel 2 angegebenen Temperaturbereiche gelten für stöchiometrische Gas Luft-Gemische bei Normaldruck und wurden aus den teilweise sehr unterschiedlichen Werten des Schrifttums gebildet.

Zündung und Verbrennung sind abhängig von der Gasart nur innerhalb bestimmter Grenzen des Mischungsverhältnisses, den Zündgrenzen, möglich. Die "untere Zündgrenze" stellt das Gas/Luft-Gemisch mit dem geringsten Gasgehalt dar, das unter Normalbedingungen noch zündfähig ist. Höherer Druck und höhere Temperaturen, wie sie z.B. in Verbrennungsmotoren herrschen, erweitern in der Regel den Zündbereich.

Ein weiterer Kennwert ist die relative Dichte (Dichteverhältnis), d.h. das Verhältnis der Dichte des Gases zu Dichte von Luft unter den gleichen Bedingungen. Mit der Kenntnis der relativen Dichte d_v und des Heizwertes H_u läßt sich die Wobbezahl nach der Gleichung $W_u = H_u/\sqrt{d_v}$ errechnen.

Haben unterschiedliche Gase die gleiche Wobbezahl, so ist gewährleistet, daß ein Gerät (z.B. ein Brenner) bei Betrieb mit jedem dieser Gase die gleiche Wärmeleistung erbringt. Die Wobbezahl ist also vorteilhaft anzuwenden, wenn Anlagen auf ein anderes Gas umgestellt oder alternativ mit verschiedenen Gasen betrieben werden sollen.

Die bei vollkommener Verbrennung ohne Berücksichtigung der Dissoziation durch die Energie aus der Verbrennungsreaktion theoretisch erreichbare Temperatur der Abgase ist die theoretische Verbrennungstemperatur. Sie läßt sich näherungsweise berechnen, wenn die Brenngaszusammensetzung bekannt ist. Die theoretische Verbrennungstemperatur steigt mit dem Heizwert des Brennstoffes und mit der Temperatur des Gemisches vor der Verbrennung und sinkt mit zunehmender Luftzahl. Infolge von Dissoziation und Wärmeabgabe an die Umgebung z.B. durch Strahlung ist die wirkliche Verbrennungstemperatur um ca. 200 bis 300 K niedriger als die theoretische [20]. Sie ist u.a. von Einfluß auf den Wärmeübergang an der Heizfläche einer Feuerung, die Abgasverluste und die Abgasschadstoffe.

Speziell für die Verwendung als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren sind neben den bereits aufgeführten Eigenschaften die Klopf-

Tafel 2. Eigenschaften gasförmiger Brenn- und Kraftstoffe[1].

Brenn- bzw. Kraftstoff u. Zusammensetzung[2]		Dichte[3]	Heizwert		Luftbedarf		Gem.-heizw.	Zünd-temp.	Zünd-grenze[4]	Rel. Dichte[5]	Wobbe-zahl	Theor. Verbr.-temp.	Me-than-zahl	Oktanzahl[6]		Kritische Werte		
																Druck	Temp.	Dichte
		kg/m^3_n	MJ/m^3_n	MJ/kg	m^3/m^3	kg/kg	MJ/m^3_n	°C	%		MJ/m^3_n	°C		ROZ	MOZ	bar	°C	kg/m^3
1. Mischgase aus nachwachsenden Rohstoffen																		
Generatorgas	N_2 48 % CO 22 % H_2 16 % CO_2 12,5 % CH_4 1,5 %	1,15	5,1	4,4	1,05	1,18	2,5	≈600	19–71	0,89	5,4	1600		>100		51	- 130	315
Biogas	CH_4 60 % CO_2 40 %	1,2	21,5	17,9	5,7	6,1	3,2	650 –750	6–12	0,93	22,3	1900	133	>120	>120	81	- 30	320
	CH_4 67 % CO_2 33 %	1,13	23,5	20,8	6,35	7,3	3,2	≈700	6–12	0,87	25,2	1900	130	>120	>120	76	- 36	290
2. Mischgase aus nicht nachwachsenden Rohstoffen																		
Erdgas	CH_4 84 % N_2 15 % CO_2 1 %	0,81	30,2	37,2	8,0	12,8	3,4		5–15	0,63	38,1	2000	90	(132)	(125)	44	- 89	188
Synthesegas	H_2 50 % CO_2 5 % CO 40 % CH_4 1 % N_2 4 %	0,70	10,8	15,4	2,2	4,1	3,4		6,5–74	0,54	14,7	2170						
Stadtgas	H_2 54 % CO_2 3 % CH_4 30 % C_3H_6 2,5 % CO 9 % N_2 1,5 %	0,50	19,9	39,8	4,92	12,7	3,4	560 –600	5–30	0,39	31,9	2090	33	90				
Gichtgas	N_2 59,5 % CO_2 8 % CO 29,5 % H_2 3 %	1,27	4,1	3,2	0,77	0,78	2,3		32–74	0,98	4,1	1500						
3. Reine Gase																		
Acetylen	C_2H_2	1,171	56,9	48,59	11,9	13,1	4,4	355 –425	2,3–83	0,91	59,6	2700				61	36	231
Aethan	C_2H_6	1,356	64,5	47,57	16,7	15,9	3,6	515 –630	3–16	1,05	62,9	2140	43,5	112	101	50	32	210
n-Butan	C_4H_{10}	2,703	123,7	45,76	31,0	14,8	3,9	365 –490	1,5–8,5	2,09	85,6	2220	10,5	96	90	37	153	230
Kohlenmonoxid	CO	1,250	12,64	10,11	2,38	2,5	3,7	605 –650	12–80	0,97	12,8	2400	73	100		35	- 140	301
Methan	CH_4	0,717	35,9	50,07	9,52	17,2	3,4	540 –750	5–15	0,55	48,4	2050	100	115 (133)	(130)	47	- 82,5	162
Propan	C_3H_8	2,019	93,0	46,06	23,8	15,2	3,75	450 –525	2,1–9,5	1,56	74,5	2170	35	112	96	43	96	226
Propylen	C_3H_6	1,915	88,7	46,32	21,42	14,5	4,0	455	2,2–9,7	1,48	72,9	2280				45	92	220
Schwefelwasserstoff	H_2S	1,54	23,4	15,2	7,14	6,0	2,9	270	4–45	1,2	21,4	1800				90	100	349
Wasserstoff	H_2	0,090	10,8	120	2,38	34,2	3,2	510 –585	4–80	0,07	40,8	2260	0	65	62,5	13	- 240	31

1) Alle Werte für wasserfreie Gase; ermittelt durch Auswertung des Schrifttums [3 bis 18]

2) Die Zusammensetzungen der aus mehreren Komponenten bestehenden Gase unterliegen Schwankungen. Die angegebenen Anteile sind als beispielhaft und typisch anzusehen

3) Werte bei Normzustand (t_n = 0 °C, p_n = 1,0135 bar), Dichte von Luft: 1,293 kg/m^3_n

4) Obere bzw. untere Zündgrenze; Volumenanteil von Gas in Luft

5) Dichte des Gases bezogen auf Dichte von Luft, jeweils bei Normzustand (Dichteverhältnis)

6) Klammerwerte nach Modified ASTM-Methode [18]

festigkeit und die Zündwilligkeit aufschlußreich. "Klopfen" wird durch einen plötzlichen, steilen Druckanstieg im Brennraum von Motoren verursacht, der meistens auf eine unerwünschte Selbstzündung des Gemisches zurückzuführen ist und wegen hoher mechanischer und thermischer Beanspruchungen schädlich für die Motoren sein kann. Kraftstoffe mit hoher Klopffestigkeit erlauben hohe Werte des Verdichtungsverhältnisses, die zu besseren Wirkungsgraden der Energieumwandlung führen. Entsprechend den zur Ermittlung der Bewertungszahlen verwendeten Vergleichskraftstoffen wird die Klopffestigkeit durch die Methanzahl (bei gasförmigen Kraftstoffen) bzw. durch die Oktanzahl (bei flüssigen Kraftstoffen) ausgedrückt.

Die Zahlenwerte der Methan- bzw. Oktanzahl sind nicht gleichwertig in bezug auf die Charakterisierung der Klopffestigkeit, und die Methanzahl darf nicht mit dem Methangehalt eines Mischgases gleichgesetzt werden, ausgenommen beim Methan-Wasserstoff-Prüfgemisch. Das Vorhandensein inerter Gase kann Methanzahlen über 100 bewirken. So hat z.B. Biogas trotz eines Methangehaltes von nur 55–70 % eine Methanzahl von etwa 130, vor allem aufgrund seines Kohlendioxid-Gehalts. Gemische von Methan und Kohlendioxid werden deshalb als Vergleichsgase für die Bestimmung von Methanzahlen über 100 benutzt, wobei der um 100 verminderte Zahlenwert der Methanzahl den Kohlendioxid-Anteil in Prozent angibt.

Die Zündwilligkeit kennzeichnet die Eignung von Kraftstoffen für das dieselmotorische Prinzip. Das Maß der Zündwilligkeit ist die Cetanzahl. Die Dieselkraftstoffe müssen nach der geltenden DIN-Norm eine Cetanzahl von mindestens 45 haben; Biogas hat eine Cetanzahl unter 10. Auch bei den anderen Gasen ist die Zündwilligkeit für einen Betrieb im reinen Dieselverfahren bei den üblichen Verdichtungsverhältnissen nicht ausreichend, so daß der Verbrennungsvorgang durch zusätzliche Maßnahmen eingeleitet werden muß.

Über die Grenzbedingungen für die Verflüssigung von Gasen als Verfahren zur raumsparenden Speicherung geben die kritischen Werte von Temperatur und Druck Aufschluß. Gase lassen sich nur verflüssigen, wenn die kritische Temperatur unter- und gleichzeitig der kritische Druck überschritten wird. Oberhalb der kritischen Temperatur ist auch mit noch so hohen Drücken eine Verflüssigung nicht möglich, sondern nur eine Verdichtung. Die kritischen Werte der brennbaren Komponenten von Biogas und Generatorgas zeigen, daß diese Gase nur mit hohem Aufwand zu verflüssigen und nur bei tiefen Temperaturen und hohen Drücken in entsprechenden Behältern flüssig zu speichern sind. Die Dichte, die der kritischen Temperatur und dem kritischen Druck zugeordnet ist, wird als kritische Dichte bezeichnet. Sie ist für verflüssigtes Generatorgas oder Biogas 200–300fach größer als die Dichte in gasförmigem Zustand bei Normbedingungen.

3. Erzeugung der nachwachsenden Rohstoffe, Gasausbeute und Herstellung der Gase

3.1 Erzeugung der nachwachsenden Rohstoffe

Da für die Umwandlung von nachwachsenden Rohstoffen in gasförmige Energieträger sowohl Verfahren für Rohstoffe mit niedrigem Feuchtegehalt ($U < 25$ %; Generatorgas) als auch Verfahren für Rohstoffe mit mittlerem und höherem Feuchtegehalt erprobt sind, bei denen Biogas in wäßrigen Lösungen mit etwa $U = 90$ % gewonnen wird, läßt sich hier prinzipiell ein weites Spektrum von Verfahren der Biomassegewinnung einsetzen.

Naheliegend ist der Einsatz bisher ungenutzter oder nur teilweise genutzter Reststoffe der landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Produktion, von Abfallstoffen der Holzverarbeitung sowie von energiereichen Siedlungsabfällen zur Gewinnung gasförmiger Brenn- und Kraftstoffe. Daneben werden als Verfahren speziell zur Erzeugung von Biomasse für die energetische Nutzung die landwirtschaftliche Erzeugung von "Energiepflanzen", die forstwirtschaftliche Erzeugung von Biomasse durch gezielten Anbau von schnellwachsenden Holzarten im Kurzumtrieb und Verfahren der Biomasseerzeugung in Wasserkulturen diskutiert [21 bis 23].

3.1.1 Landwirtschaftliche Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung

Die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion umfaßt eine große Zahl von Pflanzenarten mit der Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln, Obst, Gemüse, Genußmitteln und gewerblichen Rohstoffen. Der großen Zahl der Arten ist ein breites Spektrum der Anbauintensität überlagert.

Wenn die Erzeugung von Biomasse, d.h. von nachwachsenden Rohstoffen, zur stofflichen und energetischen Nutzung ein neuer, aussichtsreicher Produktionsbereich der Landwirtschaft werden soll [24], dann ist vordringlich die Frage zu klären, ob eine solche Produktion mit den bisher angebauten Pflanzenarten und Sorten zweckmäßig ist oder ob früher schon kultivierte oder bisher nicht kultivierte Arten mehr Erfolg erwarten lassen. Daß andere Produktionsziele auch andere Pflanzen und Produktionsverfahren erfordern können, ist wiederholt dargestellt worden [u.a. 25].

Für die Auswahl der Pflanzen sind allgemein die zu erzielenden Erträge und die Eignung für die Umsetzung in Energieträger maßgebend, betriebsspezifisch wirken sich daneben Einflüsse von Klima, Bodenart, Nährstoff- und Wasserversorgung aus.

Neue Pflanzenarten mit den entsprechenden Anbauverfahren wirken ihrerseits zurück auf den Bodenzustand, die Fruchtfolge, auf Düngungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen und insgesamt auf die Betriebsorganisation. Generell ist von einem vergrößerten Pflanzenspektrum eine positive Wirkung auf die Bodenfruchtbarkeit und den Betriebsablauf zu erwarten. Aufgrund dieser vielfältigen Abhängigkeiten ist eine optimale Gestaltung und Einbindung von Verfahren zur landwirtschaftlichen Produktion nachwachsender Rohstoffe erst nach einer Phase der Entwicklung und Erprobung zu erreichen.

In bezug auf die gegenwärtig angebauten Nutzpflanzen ist die Auswahl der in Frage kommenden Pflanzen leichter zu treffen, insbesondere wenn es sich um Rohstoffe für die Gaserzeugung handeln soll:
Die Eignung verschiedener landwirtschaftlicher Stoffe für die Biogasgewinnung wurde von *Reinhold u. Noack* [26] und von *Schuchardt* [27] untersucht, so daß für eine ganze Reihe grüner Pflanzen Ergebnisse über Gasausbeute und zeitlichen Verlauf der Gasbildung vorliegen, **Bild 1**.

Mit diesen Werten und Daten für die landwirtschaftliche Erzeugung der verschiedenen Stoffe lassen sich anhand von Modellrechnungen die ökonomischen Bedingungen für die Erzeugung von Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen herleiten, so daß mit dem Kriterium der Wirtschaftlichkeit die Pflanzenauswahl leichter zu treffen ist.

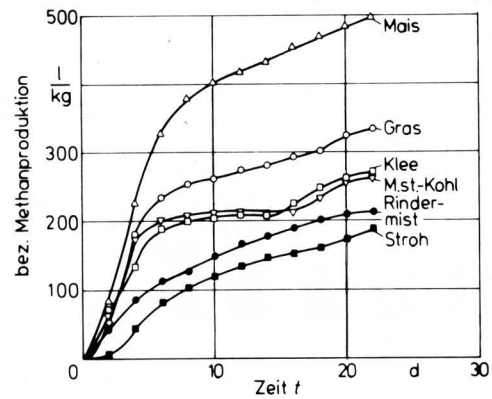

Bild 1. Auf organische Trockensubstanz der Substrate bezogene Methanproduktion verschiedener Stoffe in Abhängigkeit von der Zeit; nach *Schuchardt* [27].

Eine umfangreiche Modellrechnung dieser Art liegt von *Kleinhanß* [28] vor, aus der **Bild 2 und 3** entnommen sind. Bild 2 gibt als Bruttogasmenge die Energiemenge im Biogas an, die von 1 ha Fläche bei unterschiedlicher Intensität der Grünlandbewirtschaftung und über verschiedene geeignete Ackerfutterpflanzen gewonnen werden kann.

Erwartungsgemäß steigen die flächenbezogenen Energiemengen mit zunehmender Intensität der Bodennutzung stark an, während die Energieaufwendungen nur unbedeutend anwachsen. Für die im Zwischenfruchtbau (Landsberger Gemenge) bzw. aus dem Nebenprodukt Zuckerrübenblatt erzielbaren Energiemengen ergeben sich deutlich geringere Werte, aber auch der Energieaufwand ist sehr viel kleiner. Unter dem Aspekt der flächenbezogenen Energiemenge sind die Varianten Grassilage mit einer Ernte von 60 t/ha und Silomais nahezu gleichwertig.

Die nutzbare Gasmenge in Bild 2 gibt an, welche Gasmenge – flächenbezogen – bei unterschiedlicher Anpassung von Biogaserzeugung und Verbrauch genutzt werden kann. Vom Nutzungsgrad stark abhängig sind die Kosten des Biogases und die auf die genutzte Energiemenge bezogenen Rohstoffkosten.

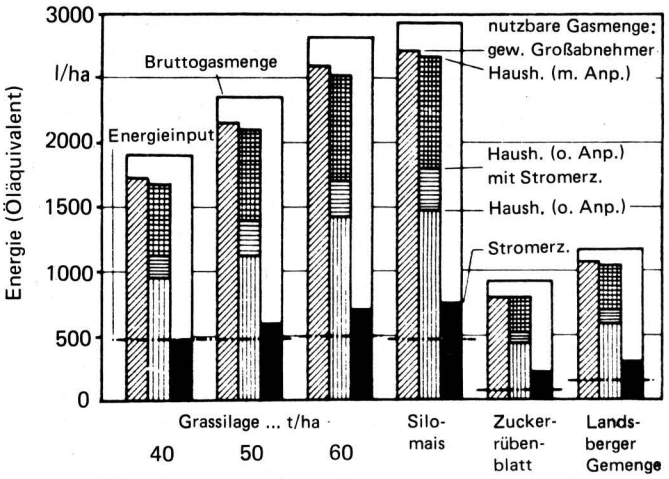

Bild 2. Bruttogasmengen und netto nutzbare Gasmengen, ausgedrückt als Öläquivalent (l/ha), bei verschiedenem Niveau des Grünlandertrags und bei verschiedenen Ackerfutterpflanzen; nach *Kleinhanß* [28].

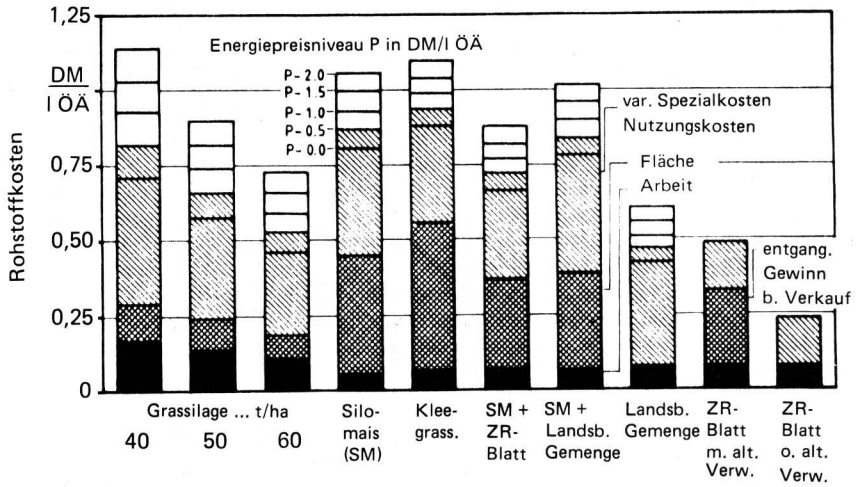

Bild 3. Rohstoffkosten, bezogen auf 1 l Öläquivalent, bei der Biogaserzeugung aus verschiedenen Feldfrüchten (volle Gasnutzung, optimale Anlagengröße und Verweildauer); nach *Kleinhanß* [28].

Bild 3 gibt die bezogenen Rohstoffkosten bei voller Gasausnutzung an. Die Varianten mit der höchsten flächenbezogenen Energiemenge sind bezüglich der bezogenen Rohstoffkosten recht unterschiedlich. Die geringsten bezogenen Rohstoffkosten ergeben sich für Zuckerrübenblatt bei Fehlen einer anderweitigen Verwertung. Auch für Zuckerrübenblatt mit anderweitiger Verwertungsmöglichkeit und für Zwischenfrüchte entstehen niedrige Rohstoffkosten. Wie die kreuzweise schraffierten Säulenabschnitte ausweisen, bestimmen die Nutzungskosten für die Fläche (die für Grünland und Ackerland unterschiedlich sind) bzw. der entgangene, bei Verkauf des Rohstoffes mögliche Gewinn die Rohstoffkosten ganz wesentlich.

Aus dieser Darstellung ergeben sich für die landwirtschaftliche Erzeugung von Rohstoffen für die Biogaserzeugung wichtige Konsequenzen:

- Die geringsten Rohstoffkosten ergeben sich bei Nutzung von Nebenprodukten und bei Erzeugung von Rohstoffen im Zwischenfruchtbau.
- Bei den Hauptfrüchten ist ein mit geringen Kosten belasteter Rohstoff nur mit ausgefeilter Produktionstechnik bei hohem Ertragsniveau zu erreichen.

Für den gezielten Anbau von Pflanzen für die Rohstoffgewinnung sind demnach die gleichen intensiven Produktionsverfahren einzusetzen wie bei der Pflanzenproduktion für konventionelle Nutzungen. Daten zu Erträgen und Aufwendungen der verschiedenen Kulturen sind in entsprechenden Fachbüchern und Datensammlungen [29] verfügbar.

Die für ein hohes Ertragsniveau notwendige Zufuhr hinreichender Düngergaben ist hier bezüglich des Aufwandes dann weniger kritisch zu bewerten, wenn bei der Biogaserzeugung im Sinne des Nährstoffkreislaufs die Mineralstoffe mit dem ausgefaulten Ablauf der Anlage (Faulschlamm) auf alle Flächen der nachwachsende Rohstoffe erzeugenden Betriebe zurückgebracht werden, wobei nur ein Teil des Stickstoffs über die Gasphase bzw. über leicht lösliche Ammoniumverbindungen durch Auswaschung verloren geht. Bei einem solchen Verfahren werden Abwasserprobleme vermieden, doch sind wegen des Transportaufwandes enge wirtschaftliche Grenzen gesetzt.

Sind für die Ausbringung des Faulschlammes – beispielsweise bei der Biogasgewinnung im Anschluß an einen Gewerbebetrieb (Brennerei) – nicht hinreichende Flächen verfügbar oder ist die Ausbringung nicht wirtschaftlich durchzuführen, so muß der Ablauf der Biogasanlage bis zur Vorfluterreife geklärt werden. In diesem Fall geht der größte Teil der Mineralstoffe für die Düngung verloren.

Bei der Planung des Anbaus von Rohstoffen für die Gaserzeugung ist zu berücksichtigen, daß eine möglichst gleichmäßige und verlustarme Versorgung der Gaserzeugungsanlage über den ganzen Jahresablauf sichergestellt wird. Damit kommt Pflanzen, die über einen längeren Zeitraum abgeerntet werden können und mit geringen Verlusten zu konservieren und zu lagern sind, eine besondere Bedeutung zu. Als ein schlagkräftiges Konservierungsverfahren mit geringem Energieaufwand und günstigem Einfluß auf den Verlauf der Biogas-Fermentation ist das Silieren anzusehen.

Neben dem Material aus dem gezielten Anbau nachwachsender Rohstoffe stehen für die Biogas- und Generatorgasgewinnung Reststoffe der pflanzlichen und tierischen Produktion und gewerblichen Wirtschaft zur Verfügung, die mit geringem Aufwand für diese Verwendung nutzbar gemacht werden können.

3.1.2 Forstwirtschaftliche Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung

Die forstwirtschaftlich genutzte Fläche in der Bundesrepublik beträgt 6,82 Mill. ha, das ist etwas mehr als die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Fläche [30]. Der Holzeinschlag betrug im Durchschnitt der Jahre 1978/82 28,82 Mill. m^3, so daß sich statistisch ein flächenbezogener Holzertrag von 4,2 m^3/ha Jahr entsprechend einer Trockenmasse von 1,87 t/ha Jahr ergibt. Im Vergleich mit der durchschnittlich in der Bundesrepublik bei Weizen geernteten Trockenmasse von etwa 9,5 t/ha Jahr (Korn und Stroh) nimmt sich der Betrag für das Holz sehr bescheiden aus, auch wenn berücksichtigt wird, daß die Forstflächen im allgemeinen die schlechteren Böden umfassen.

Für die forstwirtschaftliche Produktion werden aber durch Anbau und Nutzung schnellwachsender Baumarten erheblich höhere Erträge für möglich gehalten. Als schnellwachsende Baumarten im konventionellen Forstbetrieb werden Arten bezeichnet, die bis zu einem Alter von 30 Jahren einen durchschnittlichen Trockenmasse-Zuwachs von etwa 4 t/ha Jahr und bis zum Alter von 50 Jahren etwa 5,2 t/ha Jahr erreichen [23]. *Patzak* nennt eine Produktionsleistung an Trockenmasse von 12 t/ha Jahr [31].

Ausgehend von der jetzigen Bestockung der Waldfläche und den langen Umtriebszeiten, ist in näherer Zukunft nicht mit einer den genannten Zahlen entsprechenden Steigerung der Holzerträge zu rechnen. Für die Spanne von 1976 bis 2000 wird eine Steigerung um 20 % in Aussicht gestellt.

Die höheren Holzerträge werden wahrscheinlich nicht zu einer energetischen Nutzung verfügbar sein, weil der Holzbedarf schon heute nur etwa zur Hälfte aus inländischer Produktion gedeckt werden kann.
Eine energetische Nutzung über die Gaserzeugung wird auch für einen großen Teil des Restholzes auszuschließen sein, da, wenn Restholz wirtschaftlich geworben werden kann, andere Nutzungen wie die Herstellung von Zellulose und Spanplatten konkurrenzstärker sind.

Der Anbau von schnellwachsenden Holzarten im Kurzumtrieb stellt hinsichtlich der Intensität eine Betriebsweise zwischen Landwirtschaft und konventioneller Forstwirtschaft dar. Das drückt sich in der notwendigen Bodenvorbereitung, der Düngung und den Bodenansprüchen aus. Nur wenn günstige Verhältnisse vorliegen, kann mit einem Trockensubstanzzuwachs von bis zu 21 t/ha Jahr gerechnet werden, wie er in Versuchen ermittelt wurde.

Bei den vergleichsweise hohen Ansprüchen an die Bodenqualität wird eine starke Verbreitung der Kulturen für Kurzumtrieb schnellwachsender Baumarten nicht erwartet. Es ist beispielsweise vor allem daran zu denken, daß ein geeigneter Anteil der nicht mehr genutzten landwirtschaftlichen Nutzfläche – absolutes Grünland – einer solchen Nutzung zugeführt wird.

3.1.3 Biomasseerzeugung in Wasserkulturen

Diese Verfahren werden u.a. wegen der hohen Erträge an Biomasse diskutiert, die flächenbezogen sehr viel höher liegen als die Erträge der leistungsfähigen Landpflanzen in Land- und Forstwirtschaft. Bei den Wasserkulturen wird an drei Bereiche gedacht:

1. Meereskulturen – Tang und Algen
2. Kulturen im Süß- und Brackwasser – Wasserhyazinthen
3. Kulturen in nährstoffreichen Süßwasserteichen – Kleinalgen.

Zwar werden bestimmte Vorkommen von Tang und Algen genutzt zur Gewinnung besonderer Stoffe (z.B. Agar), doch sind zuverlässige Aussagen über die langfristig erzielbaren Erträge bei einer energetischen Nutzung noch nicht verfügbar. Das Interesse für diese Kultur ergibt sich nicht aus entsprechenden Erfahrungen, sondern vielmehr aus der Möglichkeit, weite Flächen des Ozeans für die Gewinnung von Energieträgern zu nutzen.

Gedacht ist dabei an große Plattformen als Teile von Meeres-Farmen, an denen Tangpflanzen befestigt sind. Voraussetzung für ein ausreichendes Wachstum ist die Nährstoffversorgung durch eine starke natürliche Wasserbewegung oder das Heraufpumpen nährstoffreichen Wassers aus größerer Tiefe. Der Zuwachs an den Tangpflanzen soll periodisch geerntet und in Biogasanlagen zu Methan umgesetzt werden. Die Angaben über den Zuwachs an Trockenmasse schwanken in weiten Grenzen (16–130 t/ha Jahr), die jährliche Ernte an Trockenmasse für Tangvorkommen in kalifornischen Gewässern liegt bei 1–2 t/ha Jahr [32]. Diese Werte können sich auf das Zwei- bis Vierfache erhöhen, wenn eine gute Nährstoffversorgung gesichert ist.

Projekt-Analysen sind bisher mit großen Unsicherheiten behaftet, weil bezüglich der Erträge, der apparativen Ausstattung, der Kosten und der eventuellen Nebenerträge nur wenig fundierte Annahmen gemacht werden können.

Als Kultur für das Brack- und Süßwasser in tropischen und subtropischen Regionen wird die Wasserhyazinthe untersucht, eine Pflanze, die sich durch ein sehr intensives Wachstum auszeichnet und deswegen in vielen Gebieten als ausgesprochene Problempflanze anzusehen ist. Eine Nutzung, die zu einer Reduzierung der Pflanzenmasse in den Gewässern führt, könnte hier eine Lösung bringen.

Die anaerobe Umsetzung von Wasserhyazinthen in Methangas ist bezüglich Gasertrag und Umsetzungsrate mit den Werten bei der Abwasserfermentation vergleichbar [33]. Als Ertrag an Trockensubstanz kann mit bis zu 80 t/ha Jahr gerechnet werden; bei günstigen Wachstumsbedingungen und Entwicklung eines auf diese Nutzung ausgerichteten Produktionsverfahrens mit noch höheren Werten.

Bisher aber sind detaillierte Untersuchungen zum wirtschaftlichen Einsatz von Wasserhyazinthen für die Gasgewinnung nicht verfügbar, u.a. weil geeignete billige Verfahren für das Ernten der Biomasse bislang nicht gefunden wurden. Da Wasserhyazinthen nur bei Wassertemperaturen im Bereich 15–34 °C wachsen, ist der Anwendungsbereich für diese Kultur sehr eingeschränkt [33].

Die Kultur von Kleinalgen in nährstoffreichen Süßwasserteichen kann eine Biomasse von 40–50 t/ha Jahr ergeben [33]. Die Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Nährstoffversorgung, weshalb diese Algen bei der Abwasserbehandlung eingesetzt werden und hier bei der Photosynthese den zum Abbau der organischen Substanz des Abwassers benötigten Sauerstoff liefern. Die Algen ihrerseits nehmen das beim Abbau anfallende CO_2 auf. Zu geringer CO_2-Gehalt im Wasser schränkt das Algenwachstum ein.

Die Biomasse wird zusammen mit Feststoffen aus dem Abwasser zu Methan umgesetzt. Durch eine Kreislaufführung soll erreicht werden, daß der Prozeß einerseits zur Nutzung der Mineralstoffe des Abwassers und andererseits über die Photosynthese der Algen zur Energieträgergewinnung dient [34]. Die Abtrennung der Biomasse über Siebe oder durch Ausfällen ist bisher nicht zufriedenstellend gelöst [33], so daß eine Anwendung des Verfahrens in praktischem Maßstab noch nicht wirtschaftlich ist.

Allen Verfahren der Kultur von Wasserpflanzen ist bislang gemeinsam, daß sie zu wirtschaftlicher Reife noch nicht entwickelt werden konnten. Da flächenbezogen sehr große Mengen an Biomasse erzeugt werden können auf Flächen, die einer Nutzung durch Landpflanzen im allgemeinen nicht unterliegen, ist die weitere Entwicklung der Verfahren sinnvoll.

3.2 Herstellung der Gase durch thermochemische Prozesse

3.2.1 Physikalisch-chemische Grundvorgänge

Bei jeder thermochemischen Behandlung von Biomasse läuft eine Reihe physikalisch-chemischer Grundreaktionen ab, die für alle Prozesse grundsätzlich gleich sind. Bedingt durch die konstruktive Gestaltung der Apparate einerseits und die Prozeßführung andererseits, können aber ihre örtliche und zeitliche Zuordnung sehr unterschiedlich sein, ebenso wie die Bedingungen, welche bestimmte Reaktionen bevorzugt ablaufen lassen und andere ganz oder teilweise unterdrücken.

3.2.1.1 Trocknung

Der thermochemische Prozeß beginnt mit der Zufuhr von Wärme in das Material. Bevor es in nennenswertem Umfang zum Ablauf der im folgenden beschriebenen chemischen Reaktionen kommen kann, muß erst bei Materialtemperaturen bis etwa 200 °C das in der Biomasse enthaltene Wasser ausgetrieben werden.
Es ist evident, daß die Menge des dabei entstehenden Wasserdampfes und die für diese Verdampfung erforderliche Wärmemenge von dem Ausgangswassergehalt der Biomasse abhängig sind, weshalb im allgemeinen nur Material mit geringem Wassergehalt (lufttrokken) für thermochemische Prozesse (Vergasung) geeignet ist.

3.2.1.2 Entgasung (Schwelung, Verkohlung, Pyrolyse)

Bei weiterer Zufuhr von Wärme beginnt oberhalb einer Materialtemperatur von etwa 250 °C die Entgasung der Biomasse, auch Schwelung, Verkohlung, Verkokung, trockene Destillation und Pyrolyse genannt. Dieser Vorgang ist besonders für das Ausgangs-

material Holz, z.B. bei der Holzkohleherstellung, näher untersucht, und da molekularer Aufbau und Heizwert ähnlich sind, läuft er auch bei anderer lignocellulosehaltiger Biomasse vergleichbar ab. Es handelt sich um eine chemische, exotherme Reaktion, bei der etwa 1 000 kJ/kg Biomasse als Wärme freiwerden [35], weshalb nach Erreichen einer Temperatur von etwa 275 °C diese Reaktion als sogeannnte Selbstkohlung von selbst weiterläuft.

Nach *Kollmann* [36] und *Klason* [37] erfolgt sie in zwei wesentlichen Abschnitten, **Tafel 3**. Im ersten Abschnitt zerfallen die zumeist hochpolymeren Moleküle des Holzes (Biomasse) unter Abspaltung von Wasser, CO_2 und CO in Feststoffe, sogenannte Primärkohle (etwa 20 %), in ein Spektrum niedermolekularer organischer Verbindungen und in hochmolekulare Verbindungen, die als Pech oder auch teerbildende Substanzen bekannt sind.

In einem zweiten Abschnitt kann, je nach den Reaktionsbedingungen und der zur Verfügung stehenden Zeit, auch noch ein Großteil dieser hochmolekularen Verbindungen unter weiterer Abspaltung von CO_2 und Wasser in die sogenannte Sekundärkohle als Feststoff und niedermolekulare Verbindungen zerfallen.

Auf diesem klassischen Ablauf der Entgasung basieren auch alle Angaben über den Gehalt sogenannter "flüchtiger" Bestandteile in Holz und anderen Brennstoffen, der für Biomasse sehr unterschiedlich mit 60–90 % angegeben wird.

Nach neueren Untersuchungen [38, 39] erfolgt letztlich bei hinreichend großer Erwärmungsgeschwindigkeit die Umsetzung der gesamten organischen Substanz in die gasförmige Phase. Werte über den Gehalt an "flüchtigen Bestandteilen" bzw. die Ausbeute an Kohle oder Koks sind also stark von der Untersuchungsmethode bzw. der Prozeßführung abhängig.
Ein Großteil der flüchtigen Bestandteile ist nur bei entsprechend hohen Temperaturen gasförmig, d.h. sie kondensieren bei einer z.B. für den motorischen Einsatz notwendigen Abkühlung des Gases. Das so entstehende Kondensat enthält dann außer Wasser eine Reihe von Stoffen, von denen in Schema I und II der Tafel 3 nur einige genannt sind. Insbesondere entstehen auch Formaldehyd, das giftig und umweltschädlich ist, und teerbildende Bestandteile, die z.T. cancerogen und schädlich für den Motor sind. Einen Abbau all dieser Substanzen erreicht man durch starkes Erhitzen, z.B. indem sie durch die heiße Verbrennungszone geleitet werden.

I. Schema der primären Reaktion:

$$2\,C_{42}H_{60}O_{28} \rightarrow \begin{cases} 3\,C_{10}H_5O + 19\,H_2O + 3\,CO_2 + 3\,CO \\ \text{Primärkohle, Wasser, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid} \\ 20{,}8 \quad 16{,}8 \quad 6{,}5 \quad 4{,}1\,\% \\ + 2{,}5\,CH_3{\cdot}COOH + H{\cdot}COOH + CH_3OH \\ \text{Essigsäure, Ameisensäure, Methanol} \\ 7{,}5 \quad 2{,}2 \quad 1{,}6\,\% \\ + C_{36}H_{43}O_{16} + C_5H_8O \\ \text{Pech, Formaldehyd, Öle usw.} \\ 36 \quad 4{,}5\,\% \end{cases}$$

Holz

II. Schema der sekundären Reaktion:

$$C_{36}H_{43}O_{16} \rightarrow C_{30}H_{20}O_3 + 9\,H_2O + 2\,CO_2 + C_4H_9$$

Pech, Sekundärkohle, Wasser, Kohlendioxid, Öle

36, 21,1, 8, 4,3, 2,8 %

Tafel 3. Schema der Selbstkohlung von Holz (primäre und sekundäre Reaktion); nach *Kollmann* [36].

3.2.1.3 Oxidation und Reduktion

Da die meisten Vorgänge bei der thermochemischen Gaserzeugung endotherm sind, deckt man den Wärmebedarf des Prozesses meistens durch die – exotherme – Verbrennung eines Teils des eingesetzten Vergasungsmaterials, vorzugsweise von Kohlenstoff, dem Hauptbestandteil der bei der Entgasung entstehenden (Holz-)Kohle und des (Teer-)Kokses.

$$1\,kg\,C + 2{,}67\,kg\,O_2 = 3{,}67\,kg\,CO_2 + 33{,}85\,MJ \qquad (1).$$

Üblicherweise wird als Sauerstoffquelle Luft genommen, wodurch auch Luftstickstoff in den Gaserzeuger geführt wird. Dieser Stickstoff durchläuft den Gaserzeuger praktisch unverändert als Ballast und verringert letztlich den Heizwert des erzeugten Gases.

Die Temperatur, bei der die Verbrennung abläuft, liegt etwa im Bereich 700–1400 °C. Sie ist eine wichtige Prozeßgröße und kann sowohl über die konstruktive Gestaltung des Vergasungsapparates als auch über die Prozeßführung erheblich beeinflußt werden. Hohe Temperaturen beanspruchen das Baumaterial des Gaserzeugers und können zum Schmelzen der Asche und damit zu störender Schlackenbildung führen.

Hohe Temperaturen begünstigen aber auch die nachfolgend beschriebenen temperatur- und zeitabhängigen Gleichgewichtsreaktionen, welche den Hauptteil der brennbaren Bestandteile des erzeugten Gases liefern:

$$1\,kg\,C + 3{,}67\,kg\,CO_2 + 13{,}4\,MJ = 4{,}67\,kg\,CO \qquad (2),$$

$$1\,kg\,C + 1{,}5\,kg\,H_2O\,(Dampf) + 9{,}87\,MJ = 2{,}33\,kg\,CO + 0{,}17\,kg\,H_2 = 1{,}87\,m_n^3\,CO + 1{,}87\,m_n^3\,H_2 \qquad (3),$$

$$1\,kg\,C + 3\,kg\,H_2O\,(Dampf) + 6{,}3\,MJ = 3{,}67\,kg\,CO_2 + 0{,}33\,kg\,H_2 = 1{,}87\,m_n^3\,CO_2 + 3{,}73\,m_n^3\,H_2 \qquad (4).$$

Während der Kohlenstoff aus dem eingesetzten Vergasungsmaterial stammt, das CO_2 sowie die erforderliche Reaktionswärme aus der teilweisen Verbrennung desselben geliefert werden, kann der Wasserdampf entweder aus der Trocknung und Schwelung kommen oder – z.B. bei der Vergasung wasser- und wasserstoffarmer (Holz-)Kohle – von außen dem Prozeß zugeführt werden.

3.2.2 Apparative Ausführungsbeispiele

Es ist die Aufgabe einer jeden Gaserzeugerkonstruktion, angepaßt an die Brennstoffeigenschaften und an die Betriebsbedingungen, optimale Bedingungen für den Ablauf der o.g. Reaktionen der Umwandlung fester Brennstoffe in brennbare Gase zu schaffen. Das hat zu einer Vielzahl von Bauarten der Gaserzeuger (Gasgeneratoren) geführt, für die es, abgesehen von konstruktiven Details, grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale bei der Brennstoff- und Gasführung gibt:

a) Gegenstromvergasung
b) Gleichstromvergasung
c) Wirbelschicht- und Flugstromvergasung.

Daneben ist eine Reihe von Mischformen bekannt.

a) Gegenstromgaserzeuger, auch Gaserzeuger mit aufsteigender Vergasung genannt, sind dadurch gekennzeichnet, daß alle Gase im Gegenstrom zum Festbrennstoffstrom geführt werden. **Bild 4** zeigt die klassische Grundform eines solchen Schachtgenerators,

der ursprünglich für die stationäre Erzeugung von Brenngas für Heizzwecke entstand. Es kommt zur Ausbildung von Zonen unterschiedlicher Temperatur, in denen überwiegend folgende Vorgänge ablaufen: Die Verbrennungszone liefert das CO_2 und die Wärmeenergie für die Bildung von CO und H_2 in der Reduktionszone. Die aus dieser Zone ausströmenden Gase haben noch eine Temperatur von 600–800 °C und damit eine entsprechende Wärmeenergie. Durch das Gegenstromprinzip wird die Wärmeenergie direkt in die jeweils darüberliegende kältere Zone übertragen und damit zur Deckung des erforderlichen Wärmeenergiebedarfs für die Aufheizung, Schwelung und Trocknung ausgenutzt.

Die Gegenstromvergasung zeichnet sich somit durch einen guten Wärmehaushalt, eine gute Ausnutzung des Festbrennstoffes und damit durch einen guten Wirkungsgrad aus. Vorteilhaft ist auch die weitgehende Unempfindlichkeit des Verfahrens, besonders bezüglich Struktur und Feuchte des Festbrennstoffes, da die Trocknung praktisch mit Abwärme erfolgt und die Trocknungsbrüden nicht den Wärmehaushalt des eigentlichen Vergasungsvorgangs belasten.

Sogenannte teerreiche Festbrennstoffe, das sind auch alle lignocellulosehaltigen Biomassen wie z.B. Holz und Stroh, entwickeln bei der Schwelung u.a. Phenol-, Aldehyd- und Teerdämpfe (vgl. Tafel 3), die hier unverändert in das Gas übertreten. Bei sofortiger Verbrennung zu Heizzwecken ist dies weniger störend, im Gasmotor führen Teerniederschläge aber zu schweren Funktionsstörungen, denen nur durch eine wirkungsvolle Teerabscheidung aus dem Gas zu begegnen ist. Die Abscheidung und die umweltneutrale Beseitigung des Kondensates sind sehr aufwendig [40]. Um diesen gravierenden Nachteil zu vermeiden, wird für die Vergasung von Biomasse für Motorzwecke im allgemeinen die Gleichstromvergasung bevorzugt.

b) Gleichstromgaserzeuger, auch Gaserzeuger mit absteigender Vergasung genannt, sind dadurch gekennzeichnet, daß Trocknungsbrüden und Schwelgase im Gleichstrom mit dem Festbrennstoff und der Verbrennungsluft durch die bis zu 1400 °C heiße Verbrennungszone und die nachfolgende Reduktionszone geführt werden. Dabei werden die motor- und umweltschädlichen Bestandteile, insbesondere Teer, Phenole und Aldehyde, verbrannt oder vollständig abgebaut (gekrackt), so daß im Idealfall ein teerfreies Gas entsteht, bei dessen Abkühlung auch ein ungiftiges Kondensat anfällt.

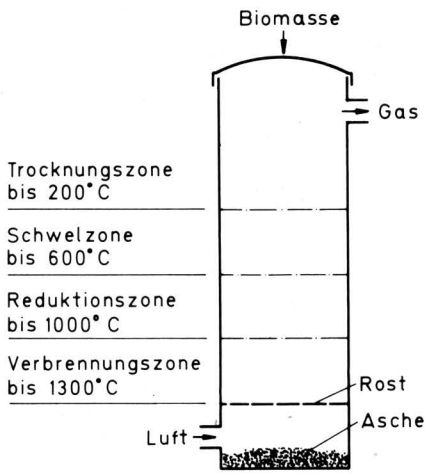

Bild 4. Schema der Gegenstromvergasung; nach *Jantsch* [19].

Mit diesem für die Vergasung von Biomasse sehr wichtigen Vorteil sind allerdings Einschränkungen verbunden: Es können nur stückige Brennstoffe, die ein Glutbett mit gleichmäßiger Durchströmung bilden, teerfrei vergast werden. Der Brennstoff muß hinreichend trocken sein, weil der bei der Trocknung entstehende Wasserdampf

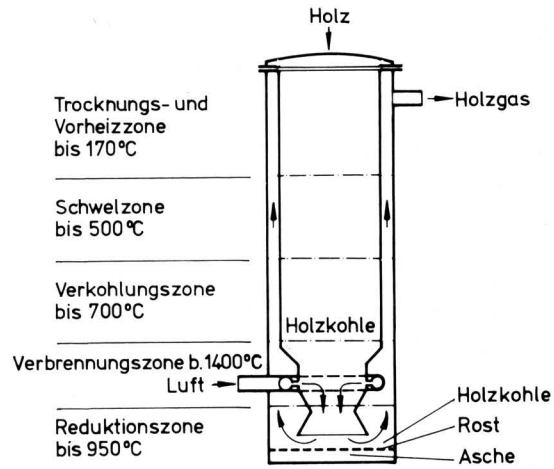

Bild 5. Schema der Gleichstromvergasung am Beispiel des Imbert-Holzgasgenerators.

als Ballast den Wärmehaushalt des Vergasungsvorgangs beeinträchtigt und weil die Wärmeenergie des mit 600–800 °C aus der Reduktionszone austretenden Gases nur noch teilweise über Wärmetauscher, z.B. Doppelmantel, für die Gaserzeugung genutzt werden kann. Die Asche enthält meist noch unverbrannten Kohlenstoff, so daß die Brennstoffausnutzung unvollkommen ist.

Trotz dieser Einschränkungen war der Gleichstromgaserzeuger für Holz, Torf und Braunkohle (-Briketts) in den 40er Jahren als Fahrzeuggaserzeuger weit verbreitet, **Bild 5**, und auch alle neueren Fahrzeuggaserzeuger für Biomasse basieren auf diesem Konstruktionsprinzip.

c) Wirbelschicht- und Flugstromgaserzeuger, **Bild 6**, bieten gute Voraussetzungen, um auch feinkörnige Biomasse zu vergasen. Im Gegensatz zu den Festbettgaserzeugern gibt es hier keine ausgeprägten Temperatur- und Reaktionszonen. Vielmehr herrscht im ganzen Vergasungsapparat eine nahezu gleichmäßige, sehr gut regelbare Temperatur von etwa 750 °C [41]. Die relativ große spezifische Oberfläche der feinkörnigen Feststoffteilchen und die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Feststoff und Gas bewirken einen sehr guten Wärme- und Stoffübergang, also schnelle Erwärmung und hohe Reaktionsgeschwindigkeiten. Dadurch wird ein hoher Stoffumsatz auch bei kleinen Abmessungen des Gaserzeugers ermöglicht.
Trotz dieser günstigen Voraussetzungen sind über den Einsatz als Fahrzeuggaserzeuger bisher keine Ergebnisse veröffentlicht. Vielmehr konzentrieren sich die Entwicklungsarbeiten auf die Herstellung von Brenngas zu Heizzwecken und von Synthesegas für die Methanolerzeugung [42].

Abhängig von den Eigenschaften des Festbrennstoffes, der Bauart und Betriebsweise der Gaserzeuger schwanken die Zusammensetzung des Generatorgases und der Gehalt an staubförmigen und kondensatbildenden Verunreinigungen (N_2: 45–60 %, CO: 20 bis 30 %, H_2: 10–25 %, CO_2: 2–15 %, CH_4: < 4 %, staubförmige Verunreinigungen: 0,5–5 g/m_n^3, Kondensatbildende Verunreinigungen: 100–200 g/m_n^3). Werte für die Eigenschaften eines Generatorgases mit typischer Zusammensetzung, erzeugt aus gemischtem Hackholz mit etwa 15 % Feuchte, sind in Tafel 2 angegeben. Die Temperatur des erzeugten Gases liegt im Bereich von 150–600 °C und der Heizwert im Bereich von 4,2–5,5 MJ/m_n^3. Dies ist bei der Verwendung des Gases zu berücksichtigen.

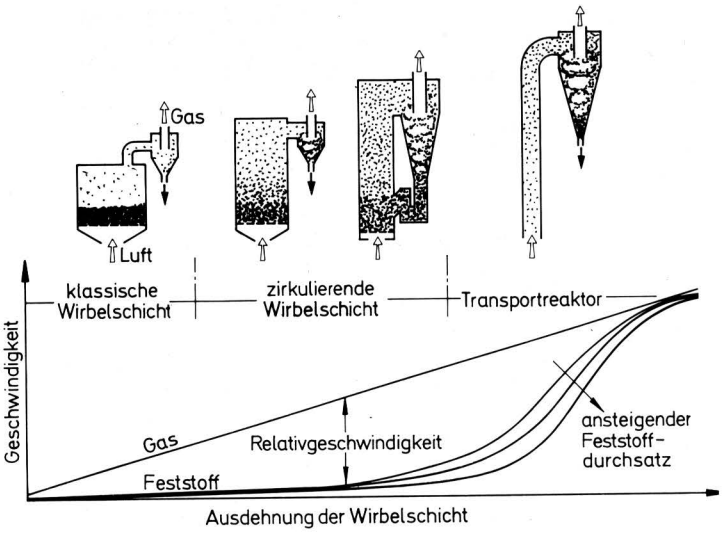

Bild 6. Schematische Darstellung der Grundsysteme für Wirbelschicht- bzw. Flugstromvergaser und der Geschwindigkeit von Gas und Feststoffen bei verschiedener Ausdehnung der Wirbelschicht; nach *Lindner* [41].

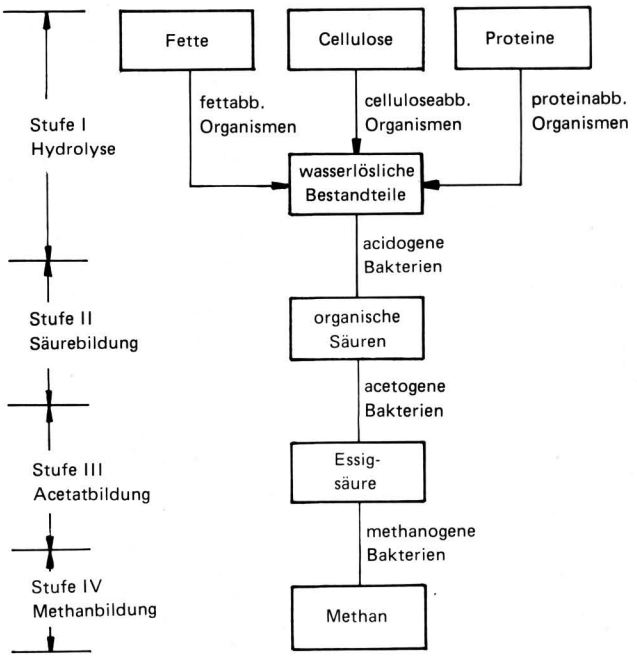

Bild 7. Anaerober mikrobieller Abbau organischer Stoffe zu Methan; in Anlehnung an *Baader* [45].

3.3 Gasherstellung durch biochemische Prozesse

3.3.1 Biochemische Grundvorgänge

Für biochemische Prozesse zur Gewinnung von gasförmigen Brenn- und Kraftstoffen sind im Prinzip alle organischen Stoffe tierischen und pflanzlichen Ursprungs geeignet, insbesondere feuchtes organisches Material. An energetisch nutzbaren Gasen entstehen durch derartige Prozesse Methan, Schwefelwasserstoff und Wasserstoff. Der wichtigste derartige Prozeß ist die bakterielle Methanproduktion [43, 44]. Sie wird mit methanbildenden Mikroorganismen unter Sauerstoffabschluß in wäßrigem Milieu durchgeführt und liefert als Nutzprodukt Biogas, das sich durch seinen anderen Aggregatzustand von selbst aus der wäßrigen Lösung abtrennt. Die Zusammensetzung des Biogases ist abhängig vom Gärungsverlauf und der Art der eingesetzten Rohstoffe (CH_4: 55–70 %, CO_2: 27 bis 44 %, H_2: < 1 %, H_2S: < 3 %). Werte für die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Biogas sind für zwei Beispiele in Tafel 2 angegeben. Der Vergleich der spezifischen Heizwerte zeigt, daß 1 m_n^3 (1,11 kg) Biogas 0,62 l (0,51 kg) Dieselkraftstoff ersetzen kann.

Bei der anaeroben Methan-Gärung werden die meist komplexen organischen Stoffe, im wesentlichen bestehend aus Kohlehydraten wie Cellulose, Stärke und Zucker sowie Fetten und Eiweißstoffen, durch das Zusammenwirken verschiedener Bakteriengruppen zu niedermolekularen Verbindungen abgebaut. Dieser Abbau, **Bild 7**, erfolgt nach dem heutigen Erkenntnisstand in vier ineinandergreifenden Prozeßstufen [45]:

I. Hydrolyse: Enzymatische Zerlegung von meist ungelösten Polymeren in gelöste Stoffe.
II. Säure-Bildung (acidogene Stufe): Umsetzung gelöster organischer Verbindungen zu organischen Säuren, wie Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, und niederen Alkoholen, Aldehyden sowie H_2 und CO_2.
III. Acetat-Bildung (acetogene Stufe): Weitere Umwandlung der in der Säure-Stufe neben Essigsäure gebildeten organischen Säuren und organischen Verbindungen zu Essigsäure, H_2 und CO_2.
IV. Methan-Bildung (methanogene Stufe): Erzeugung von Methan aus Essigsäure, H_2 und CO_2 in streng anaerobem Milieu bei einem pH-Wert von 6,7 bis 8,0.

Entsprechend ihrem chemischen Aufbau werden die Stoffe in unterschiedlichen Zeitspannen abgebaut. Mit Rücksicht auf die Größe der Gärbehälter wird im allgemeinen die Verweilzeit auf etwa 20 Tage beschränkt. Zur Einhaltung der für den Gärprozeß optimalen Temperatur von 33 °C ist eine Wärmedämmung des Gärbehälters und eine Beheizung erforderlich. Für die Heizung ist je nach Verfahrensgestaltung etwa ein Sechstel bis ein Viertel der anfallenden Gasmenge oder eine entsprechende Wärmemenge aufzuwenden. Zur Abschätzung der Ausbeuten sind in **Tafel 4** die erzeugten Gasmengen und der Biokonversionsgrad (Verhältnis der Energiemenge im Gas zur Energiemenge im eingesetzten Rohstoff) für verschiedene Stoffe angegeben.

Das in Volumenanteilen < 3 % entstehende Schwefelwasserstoffgas setzt bei der Verbrennung auch Energie frei, ist aber aus Umweltschutz- und Korrosionsgründen (SO_2- bzw. SO_3-Bildung) als Brenn- und Kraftstoff ungeeignet und sollte vor der Verbrennung aus dem Biogas entfernt werden. Der auf den Heizwert bezogene Schwefelgehalt von Biogas ist mit bis zu 1900 mg/MJ verglichen mit anderen Energieträgern recht hoch, schweres Heizöl enthält bis zu 700 mg/MJ, leichtes Heizöl und Dieselkraftstoff bis zu 70 mg/MJ.

Gemessen am Umfang der mikrobiellen Methanerzeugung in Klärgas- und Biogasverfahren ist die Bedeutung weiterer mikrobieller Verfahren der Gaserzeugung bislang noch gering. Bei dem biochemischen Prozeß der Butanol-Aceton-Gärung durch Clostridium-Bakterien entsteht als Nebenprodukt Wasserstoffgas [47], das als Brenn- und Kraftstoff geeignet ist. Bei der industriellen Vergärung von beispielsweise Mais entstehen aus 100 kg Stärke etwa 36,2 kg Lösungsmittel – 22,5 kg Butanol, 11 kg Aceton und 2,7 kg Nebenprodukte, überwiegend Äthanol – und etwa 32 m_n^3 CO_2 und 21 m_n^3 H_2.

Wasserstoff wird von Pflanzen unter üblichen physiologischen Verhältnissen nicht entwickelt. Bei Bakterien ist eine Photoproduktion von Wasserstoff aber bekannt. Sie können das Enzym Hydrogenase besitzen. Aus organischen Substanzen wird durch schwefelfreie Purpurbakterien Wasserstoff und CO_2 freigesetzt. Auch eine Blaualgenart, anabaena cylindrica kann bei Belichtung Wasserstoff und Sauerstoff bilden [48].

Substrat	Erzeugte Gasmenge		Biokonvers.-grad [2]
	m^3/d GV	m^3/t [1]	
Tier. Exkremente			
Rind	0,6	13,5	0,16
Schwein	0,6	16,2	0,25
Huhn	2,5	51,5	0,36
Pflanzl. Stoffe			
Stroh	–	240	0,35
Rübenblätter	–	97,5	0,58

[1] bezogen auf feuchte Gesamtmasse des Rohstoffs

[2] Energie im Biogas bezogen auf Energie im Rohstoff

Tafel 4. Richtwerte zur Biogasgewinnung; nach *Baader u.a.* [46].

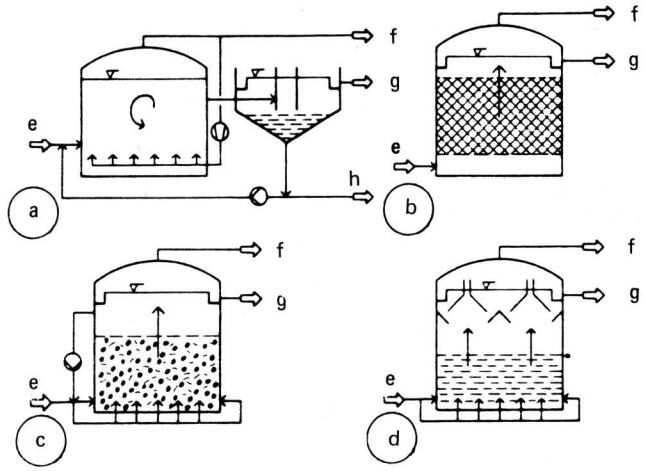

Bild 8. Verfahren der anaeroben Fermentation von organischen Stoffen zu Methan; nach *Baader* [45].

a Kontaktverfahren
b Festbettreaktor (anaerober Filter)
c Wirbelbettreaktor
d Schlammbettreaktor
e mit organischen Stoffen beladene Flüssigkeit
f Biogas
g Flüssigkeitsablauf nach Fermentation (Faulschlamm)
h Faulschlamm mit erhöhtem Trockenmassegehalt

3.3.2 Apparative Ausführungsbeispiele

Es ist die Aufgabe der Apparate, für die biochemischen Vorgänge optimale Reaktionsbedingungen zu schaffen. Dabei sind neben dem Gasertrag eine Reihe weiterer Aspekte zu berücksichtigen:

- Substrateigenschaften; die mikrobiell schwer abbaubaren Substanzen suspendierter Feststoffe müssen vor der Vergärung einer Hydrolyse unterzogen werden, nicht vergärbare Lignocellulosekomplexe sind als Ballast zu betrachten.
- Anforderungen an den Gärrückstand, z.B. bezüglich Lagerfähigkeit, Geruch, Düngewert und Restgehalt chemisch und biologisch abbaubarer Substanzen (CSB, BSB).
- Betriebstechnische Eigenschaften, wie Schaum-, Schwimmdecken- und Sedimentbildung, Energiebedarf von Pumpen, Rührwerken und Heizung.
- Wirtschaftliche Aspekte; Abbaugeschwindigkeit und Abbaugrad bestimmen die erforderlichen Verweilzeiten und damit Behältergrößen.

Die Vielzahl dieser Aspekte hat entsprechend der jeweiligen Bewertung zu einer Reihe unterschiedlicher Bauformen geführt: Die Grundform ist der absätzig beschickte Gärbehälter, in dem die Entwicklung der jeweiligen Mikroorganismen und die Entfaltung ihrer Abbau-Aktivitäten z.T. nebeneinander, z.T. zeitlich nacheinander erfolgt, was zu dem charakteristischen Verlauf der Gasentwicklung, Bild 1, führt, die z.T. bis zu einigen Wochen dauert und entsprechend dieser langen Verweilzeit oft unerwünscht große Gärbehältervolumen erfordert.

Um durch Steigerung der Abbauleistung eine Verringerung der erforderlichen Verweilzeiten und Behältervolumen zu erreichen, werden Verfahren eingesetzt, bei welchen die aktive Biomasse im Reaktionsraum angereichert wird, **Bild 8**. Dies kann, wie beim Kontaktverfahren, dadurch erreicht werden, daß aus einer dem Faulraum nachgeordneten Absetzstufe Schlamm in den Faulraum wieder rückgeführt wird. Beim Festbettreaktor (anaerober Filter) werden die Bakterien und die Schwebstoffe durch Adhäsion an inerten Füllkörperoberflächen zurückgehalten. Beim Wirbelbettreaktor wird der gleiche Effekt erzielt wie beim Festbettreaktor, jedoch mit dem Vorteil, daß auch Substrate mit höheren Gehalten an suspendierten Feststoffen ohne Verstopfungsgefahr verwendet werden können. Allerdings sind diesem System durch den Energiebedarf für die Erhaltung des Wirbelbetts wirtschaftliche Grenzen gesetzt.

Im Schlammbettreaktor reichert sich der Schlamm durch Sedimentation unmittelbar im Reaktionsraum an. Bei Substraten mit überwiegend gelöster abbaubarer organischer Substanz entsteht dabei ein körniger und dadurch sich gut absetzender Schlamm aus Biomasse, durch den das frische Substrat hindurchgeleitet wird. Eine weitere Erhöhung des Abbaugrades stellt sich bei einer räumlichen Trennung der Versäuerungsstufe von der Methanstufe ein. Bei der konstruktiven Ausführung der Apparate stehen betriebstechnische Aspekte im Vordergrund. Hinweise für Lösungs- und Anwendungsmöglichkeiten werden von *Baader* angegeben [45].

4. Verwendung der Gase

Die gasförmigen Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen (Generatorgas, Biogas) sind technisch sowohl für die Verwendung als Brennstoff in Feuerungsanlagen als auch als Kraftstoff für mobile und stationäre Motoren (Gasmotoren, Zweistoffmotoren) geeignet.

4.1 Verwendung von Generatorgas und Biogas als Brennstoff

Die Verbrennung von Generatorgas ist bei trockener Biomasse wie Holz und Stroh eine Alternative zur direkten Verbrennung. Zielsetzungen sind hier eine Verbesserung der Regelungsmöglichkeiten im Teillastbereich und eine Reduzierung von Schadstoffemissionen in den Abgasen.

Die Erzeugung und Verbrennung von Biogas bietet die Möglichkeit, auch feuchte organische Rohstoffe, die für eine direkte Verbrennung nicht geeignet sind, für die Wärmeerzeugung zu nutzen.

4.1.1 Generatorgas als Brennstoff

Es ist ein Kennzeichen der Generatorgaserzeugung, daß sie sich in einem weiten Bereich dem jeweiligen Gasverbrauch leicht anpassen läßt. Die unmittelbare Verbrennung des erzeugten Rohgases ohne Gasbehandlung und -speicherung ist deshalb allgemein üblich. Um einer Verschmutzung der Rohgasleitung vorzubeugen, bietet sich die Anordnung des Gaserzeugers nahe am Gasverbraucher an. Als Beispiel zeigt **Bild 9** eine moderne Klein-Kesselanlage für die Verbrennung von Holz, Torf und Braunkohlenbriketts, bei der das im Vergasungsschacht (Gaserzeuger) gebildete Gas in einem direkt angebauten Ausbrandkanal (Heizkessel) verbrannt wird. Hier ergeben sich deutliche Vorteile gegenüber der unmittelbaren Biomasseverbrennung, weil durch die gezielte Zuführung von Sekundärluft in den räumlich getrennten Ausbrandkanal auch im Teillastbereich eine vollständige Verbrennung der aus dem Brennstoff gebildeten Gase erreicht wird. Unter anderem kann so auch das durch Drosselung der Primärluftzuführung im Vergasungsteil unter Luftmangel erzeugte giftige Kohlenmonoxid schadstoffarm und mit hohem Wirkungsgrad verbrannt werden.

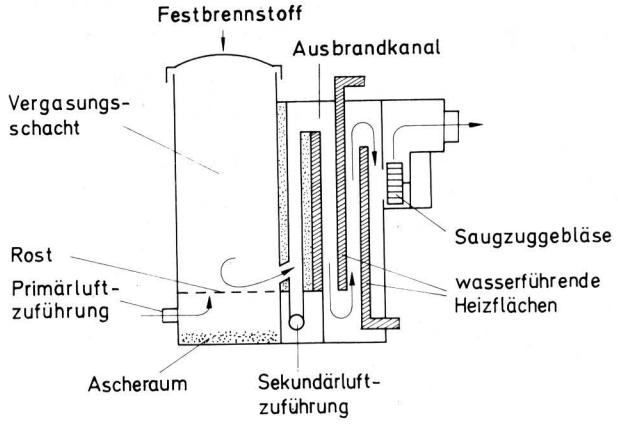

Bild 9. Heizanlage mit räumlicher Trennung von Gaserzeugung (Vergasungsschacht) und Verbrennung (Ausbrandkanal) für die Verwendung von Holz, Torf und Braunkohlenbriketts; nach [49].

Anwendungsbeispiele für größere Anlagen sind die Vergasung von Holzabfällen in Holzverarbeitungsbetrieben und die Verbrennung des Gases zur Wärme- und Dampferzeugung sowie die Vergasung von Maiskolbenspindeln und Verbrennung des Gases zur Getreidetrocknung [50, 51].

4.1.2 Biogas als Brennstoff

Für die Verwendung von Biogas als Brennstoff stellen sich im wesentlichen zwei Fragen, nämlich die nach der Anpassung von Erzeugung und Verbrauch und die nach der Behandlung der Gase.

Das aus nachwachsenden Rohstoffen bzw. Reststoffen der pflanzlichen und tierischen Produktion und gewerblichen Wirtschaft erzeugte Biogas läßt sich beim Betrieb von Heiz- und Trocknungsanlagen und zur Prozeßwärme- bzw. Dampferzeugung [52 bis 56] einsetzen.

Besonders landwirtschaftliche Betriebe mit Viehhaltung werden hinsichtlich der Biogaserzeugung als prädestiniert angesehen, weil die Rückstände aus der Tierproduktion sowie das Einstreumaterial ohne besonderen Bereitstellungsaufwand als Rohstoff im Betrieb verfügbar sind [57]. Während das Biogas in diesen Fällen über das ganze Jahr mit einem konstanten Mengenstrom zur Verfügung steht, ist für seine Verwendung zur Wärmeenergieerzeugung im Betrieb – besonders auch wegen des Wärme-Eigenbedarfs der Anlage – mit großen jahreszeitlichen bzw. täglichen Schwankungen des Bedarfs zu rechnen, **Bild 10** [55, 58].

Mit dem im landwirtschaftlichen Einzelbetrieb über das ganze Jahr benötigten konstanten Energiestrom für Warmwasserbereitung und Kochen läßt sich nur ein Bruchteil des erzeugten Biogases nutzen. Die anderen betrieblichen Nutzungsmöglichkeiten von Biogas zur Wärmeerzeugung wie Hausheizung, Melkstandheizung und Stallheizung [57] sind an die Heizperiode gebunden, was bei entsprechender Auslegung der Biogasanlage besonders in den Sommermonaten zu einem Gasüberschuß führt. Dieser ist nur zum Teil für die Trocknung einsetzbar, so daß für eine bessere Nutzung des vorhandenen Gaspotentials weitere Anwendungsmöglichkeiten zu suchen sind [58], z.B. außer der Wärmeerzeugung die Erzeugung elektrischer Energie für die Milchgewinnung und Stallüftung [57], weiterhin der Einsatz des Biogases zum Betrieb stationärer Motoren oder als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge (siehe Kap. 4.2). Das Problem der Anpassung des Gasbedarfs an die Gaserzeugung ist aber auf diese Weise derzeit selten wirtschaftlich zu lösen [59, 60].

Ein hoher Nutzungsgrad des erzeugten Biogases und die damit verbundene Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung scheint am leichtesten erreichbar durch eine überbetriebliche Nutzung von Biogas durch den Anschluß von Verbrauchern mit hohem gleichmäßigem Bedarf an Wärmeenergie. Hier ist an eine Zusammenarbeit mit Industrie- und Gewerbebetrieben, mit Verbrauchern aus dem öffentlichen Bereich wie Schulen, Krankenhäuser, Hallenbäder und beheizte Freibäder zu denken [61, 62], wobei es das Ziel sein muß, den unterschiedlichen Wärmeenergiebedarf der einzelnen Abnehmer zu einem der Biogaserzeugung angepaßten, über die Zeit gleichmäßigen Verbrauch zu kombinieren.

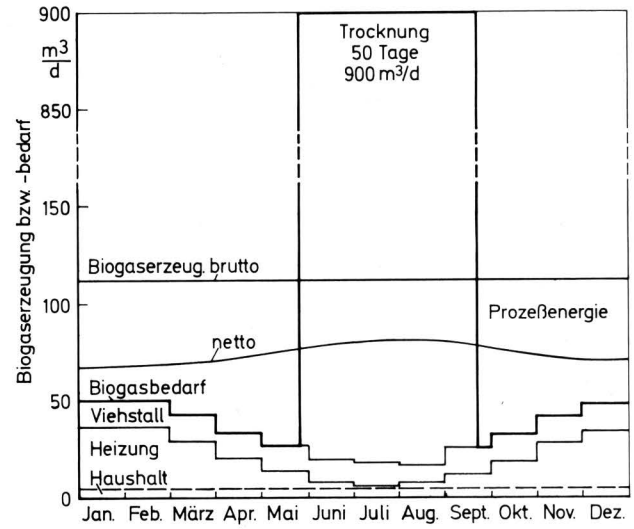

Bild 10. Biogaserzeugung und Biogasbedarf eines landwirtschaftlichen Betriebs mit 75 GV Rindvieh, 4-Personen-Haushalt, Grünfuttertrocknung; nach [55].

Auch landwirtschaftliche und gewerbliche Brennereien mit ihrem hohen Bedarf an Dampf und Wärme können geeignete Abnehmer für Biogas sein [63, 64], dabei kann die in der Brennerei anfallende Schlempe verfüttert und die Gülle aus der Tierhaltung zur Biogaserzeugung eingesetzt werden [64] oder beispielsweise in Obstbrennereien die Schlempe direkt der Biogaserzeugung dienen [65]. Voraussetzung der Wirtschaftlichkeit ist auch hier ein hoher Nutzungsgrad des Biogases, d.h. ein möglichst ganzjähriger Betrieb der Brennerei [64].

Dem Einsatz von Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung steht man auch bei solchem Einsatz von Biogas kritisch gegenüber, da es derzeit durch Eigenstromerzeugung kaum möglich ist, die Wirtschaftlichkeit derartiger Biogasanlagen zu verbessern [66].

Als Austrag aus den Biogasanlagen fällt als Nebenprodukt geruchsarmer Faulschlamm [67] an, der als Dünger landwirtschaftlich zu nutzen ist. Die mit dem Biogasverfahren verbundenen Vorteile einer geringeren Umweltbelastung und evtl. besseren Düngerwirkung sind bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit zu berücksichtigen.

Biogas kann als Brennstoff im Grundsatz wie Erdgas eingesetzt werden [55]. Bei einer Umstellung auf Biogas (Eigenschaften in Tafel 2) sind Wobbezahl, spezifischer Luftbedarf, Flammengeschwindigkeit und die Anpassung in bezug auf Flammengeometrie und Strahlungseigenschaften zu beachten [13]. Die Veränderung dieser Kennwerte ergibt sich primär durch die andere Gaszusammensetzung und die dadurch bedingten brenntechnischen Eigenschaften. Die theoretische Verbrennungstemperatur liegt für Biogas mit 1900 °C nur wenig niedriger als für Erdgas. Atmosphärische Brenner, **Bild 11**, müssen durch die Wahl der Düsen und Strömungsquerschnitte recht genau auf das jeweilige Brenngas und die geforderte Heizleistung abgestimmt werden, ein Teillastbetrieb ist nur beschränkt möglich.

Bei Gasgebläsebrennern, **Bild 12**, ist eine intensive Vermischung und eine sehr genaue Dosierung des unter Druck zugeführten Gas/Luft-Stroms gegeben. Mit diesem technischen Aufwand wird ein

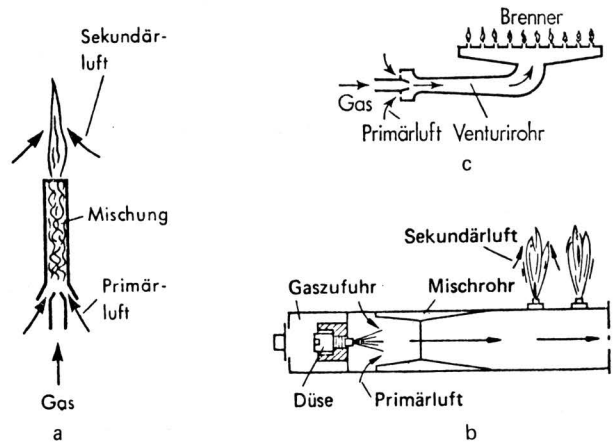

Bild 11. Beispiele atmosphärischer Brenner; nach *Recknagel/Sprenger* [68].

a Bunsenbrenner
b Injektorbrenner
c Brenner mit Venturirohr

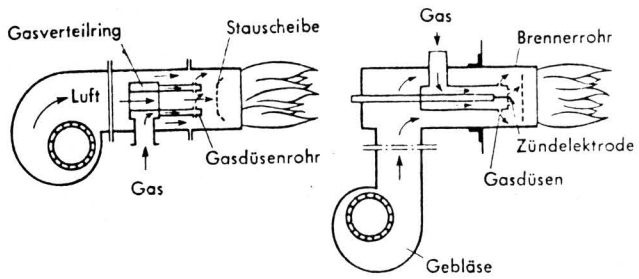

Bild 12. Gasgebläsebrenner; nach [68].

hoher Wirkungsgrad erzielt und eine stufenlose Leistungsregelung ebenso wie eine Anpassung an die schwankende Gasqualität von Biogas [7, 69] ermöglicht. Zur Verbesserung der Einsatzsicherheit wird wegen des schwankenden Betriebsdrucks bei Biogasanlagen der Einbau von Druckregulereinrichtungen empfohlen [69]. Die durch Biogaskomponenten wie Schwefelwasserstoff verursachte stärkere Korrosion erfordert die Verwendung hochwertiger Werkstoffe, wenn auf eine Reinigung des Gases verzichtet werden soll [70].

Eine Abtrennung unerwünschter Gaskomponenten wie Wasser, Schwefelwasserstoff oder auch Kohlendioxid ist durch die bewährten Verfahren der Gasreinigung und Gastrocknung (s. auch Abschn. 4.2.2) oder der Membrantechnik für die Separation von Gasgemischen [71, 72] technisch möglich, bedingt u.U. aber beachtliche Kosten.

Bei Einsatz der Membrantechnik erhält man aus Biogas einen erdgasähnlichen Energieträger, der mehr als 85 % Methan enthält und in jedem für Erdgas ausgelegten Brenner zu verwenden ist. Auch ist es technisch vertretbar, aufbereitetes Biogas bei der vorhandenen Qualität in eine Erdgasleitung einzuspeisen [72]. Jedoch ist zu fragen, ob die für eine solche Aufbereitung entstehenden Kosten zu tragen sind.

4.2 Verwendung von Generatorgas und Biogas als Kraftstoff

Die Umwandlung der in den Gasen gebundenen Energie mit Hilfe von Motoren in mechanische Energie zum Antrieb von Fahrzeugen, Pumpen, Elektrogeneratoren usw. stellt eine hochwertige Nutzung dar. Als Motoren werden im Prinzip die gleichen Bauarten wie für andere gasförmige oder für flüssige Kraftstoffe verwendet, d.h. sowohl Otto- als auch Dieselmotoren.

Die Kraftstoffeigenschaften der Gase (Abschn. 2) stellen aber für einen optimalen Betrieb an Konstruktion und Einstellung von Gasmotoren entsprechende Anforderungen. Sie beeinflussen insbesondere das Verdichtungsverhältnis, die Zündung, die Luftzahl, die Regelung, die Leistung, den Verbrauch und die Abgaszusammensetzung.

Wegen der hohen Klopffestigkeit und geringen Zündwilligkeit von Generatorgas und Biogas muß der Verbrennungsvorgang in den Motoren durch Zündvorrichtungen eingeleitet werden. Ein Betrieb von Motoren im reinen Dieselverfahren mit Generator- oder Biogas als Alleinkraftstoff ist nicht möglich. Im "Diesel-Gasmotor" wird deshalb ein Zündstrahl benutzt, d.h. eine gewisse Menge Dieselkraftstoff wird wie beim Betrieb mit Flüssigkraftstoff eingespritzt, entzündet sich in dem durch Kompression erhitzten Brenngas/Luft-Gemisch und leitet damit dessen Verbrennung ein (Zündstrahl- oder Zweistoffverfahren).

Die hohe Klopffestigkeit von Generatorgas und Biogas ermöglicht hohe thermische Wirkungsgrade der Motoren durch Verdichtungsverhältnisse bis zu $\epsilon = 17$, wie sie bei direkteinspritzenden Dieselmotoren üblich sind. Derart hohe Verdichtungsverhältnisse erfordern jedoch einerseits bei Otto-Gasmotoren besonders leistungsfähige Zündanlagen, ermöglichen andererseits das Zündstrahlverfahren bei Diesel-Gasmotoren.
Die gute Vermischung der gasförmigen Kraftstoffe mit der Verbrennungsluft erlaubt den verbrauchsgünstigen Betrieb mit Luftzahlen nahe $\lambda = 1$.

Die meist schwankende Gaszusammensetzung sowie die zahlreichen gegenseitigen Beeinflussungen von Kraftstoffeigenschaften und Motoreigenschaften in den Verbrennungsvorgängen bei unterschiedlichsten Betriebszuständen und die Berücksichtigung der Anforderungen an hohe Leistung, geringen Kraftstoffverbrauch und geringe Schadstoffabgabe stellen so vielfältige Aufgaben an die Regelung, daß es heute sinnvoll und wirtschaftlich erscheint, die Möglichkeiten elektronischer Regler zu nutzen. Das gilt insbesondere für instationären oder mobilen Einsatz. Hierfür sind bereits Ansätze zu erkennen [73].

Die Gemischheizwerte von Generatorgas ($\approx$ 2,5 MJ/m^3_n) und von Biogas ($\approx$ 3,2 MJ/m^3_n) lassen im Vergleich zu Vergaser- und Dieselkraftstoff (Gemischheizwerte $\approx$ 3,75 MJ/m^3_n) eine geringere spezifische Motorleistung erwarten. Dieser Leistungsunterschied wird durch konstruktive Maßnahmen teilweise kompensiert, so daß mit Biogas im Otto-Motor und im Diesel-Gasmotor die für Vergaser- bzw. Dieselkraftstoff angegebenen Nennleistungen in etwa erreicht werden, während mit Generatorgas Unterschiede von mindestens 25 % verbleiben.

Die Abgaszusammensetzung beim Betrieb von Motoren mit Generator- und mit Biogas unterscheidet sich z.T. stark von der beim Betrieb von Dieselmotoren mit Dieselkraftstoff. Bei Generatorgas als Kraftstoff treten im Vergleich zum Betrieb mit Dieselkraftstoff 10- bis 50mal höhere CO-Gehalte im Abgas auf [74], und auch beim Gehalt an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und zyklischen Kohlenwasserstoffen ist mit erhöhten Werten zu rechnen. Andererseits wurden für den Gehalt an Stickoxiden in allen Betriebszuständen deutlich niedrigere Werte als im Dieselkraftstoffbetrieb festgestellt. Nach [18] sind bei Biogas-Ottomotoren die Werte für Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide allgemein niedriger als bei Dieselmotoren mit Dieselkraftstoff. Dies trifft i.a. auch für Biogas-Zündstrahlmotoren zu, jedoch mit der Ausnahme, daß im Teillastgebiet der Gehalt an unverbranntem Methan ansteigt.

4.2.1 Generatorgas als Kraftstoff

Das Schema einer Gasgenerator-Motor-Anlage zeigt **Bild 13.** Die motorische Verwendung von Generatorgas setzt eine Gasbehandlung (Reinigung und Kühlung) voraus: Wasserdampf und hohe Gastemperaturen verringern die Füllung der Motoren und damit die erreichbare Motorleistung. Teernebelniederschläge, die bei der Abkühlung des Gases während der Vermischung mit der relativ

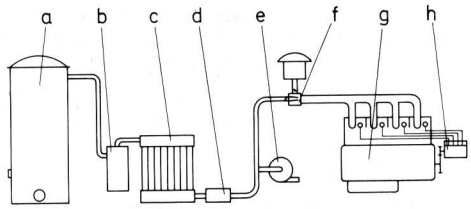

Bild 13. Schema einer Gasgenerator-Motor-Anlage.

a Gasgenerator
b Vorreiniger
c Kühler
d Nachreiniger
e Anfachgebläse
f Mischer
g Motor
h Einspritzpumpe (oder Zündanlage)

kalten Verbrennungsluft entstehen, verunreinigen die gasführenden Misch- und Regelorgane sowie die Gaskanäle der Motoren. Staubförmige Bestandteile führen zu Ablagerungen und zu erhöhtem Verschleiß. Das im Generator a (Bild 13) erzeugte Generatorgas wird deshalb zunächst durch einen **Vorreiniger** b, dann einen Kühler c und einen Nachreiniger d geleitet, bevor es im Mischer f mit der Verbrennungsluft vermischt wird. Prinzipiell unterscheiden sich ortsfeste Anlagen hierin nicht von Anlagen, die für den Fahrzeugantrieb auf den Fahrzeugen montiert sind, **Bild 14.** Für ortsfeste Anlagen steht auf dem Gebiet der Entstaubungstechnik eine Vielzahl gut geeigneter Verfahren und Geräte zur Verfügung [75]. Hier werden in neuerer Zeit mit guten Ergebnissen auch Elektrofilter verwendet.

Bei Fahrzeuganlagen werden die konstruktiven Möglichkeiten durch die Raum- und Massenverhältnisse und durch die wechselnde Motorauslastung, die zu schwankenden Gasdurchsätzen führt, beschränkt. Es werden vielfach sehr einfache Geräte zur Reinigung und Kühlung des Gases verwendet [19, 74, 76]. Eine Vorabscheidung von Grobstaub und eine gewisse Abkühlung des Gases findet bereits im Doppelmantel des Generators statt. Der Vorreiniger wird allgemein als Absitzbehälter ausgebildet, an dessen Umlenkblechen eine kombinierte Schwerkraft- und Fliehkraftabscheidung von Staub und Kondensat stattfindet. Der Gaskühler wird als Lamellen- oder Röhrenkühler ausgeführt. Der Nach- oder Feinreiniger ist ein einfacher Behälter, der mit Korkschnitzeln, Holzwolle o.ä. als Filtermaterial gefüllt ist. Bei der Konstruktion der einzelnen Apparate und der Gesamtanlage ist besonders Wert auf gute Reinigungsmöglichkeiten zu legen, um die wegen der Rückstände schmutzige und zeitaufwendige Wartungsarbeit möglichst einfach zu gestalten.

Die Unterbringung der zwischen 265 und 500 kg wiegenden Anlagen auf landwirtschaftlichen Schleppern erfordert Zugeständnisse in bezug auf die freie Sicht des Fahrers, die Anbauräume für Arbeitsgeräte, die Zugänglichkeit des Motors, die Achslasten und ihre Verteilung und die Kippstabilität des Schleppers. Beispielsweise zeigt Bild 14 einen mit einer Gasgeneratoranlage ausgerüsteten Schlepper (in Anlehnung an eine Ausführung der Fa. Imbert), bei dem der Generator a an der Frontseite, der Vorreiniger b seitlich, der Gaskühler c vor dem Motorkühler und der Nachreiniger d an der Stelle des Kraftstofftanks angeordnet sind. Andere Ausführungen (Fa. Fritz Werner und FAT Tänikon) bevorzugen die seitliche Anbringung des Generators zwischen den Achsen.

Die Größe des Generators richtet sich nach dem Gasbedarf des Motors. Für 1 kW Gasmotorleistung werden ca. 2 m_n^3/h Holzgas benötigt, zu dessen Erzeugung ca. 1 kg/h Holz erforderlich ist [74, 77]. Bei einem Versuchsschlepper von 25 kW maximaler Motorleistung ist je nach Arbeitseinsatz nach 1–2 h der Generator wieder zu befüllen. Für den Ersatz von 50 l Dieselkraftstoff im Tank sind elf Säcke a 70 l bzw. a 20 kg Hackholz mitzuführen bzw. an der Arbeitsstelle bereitzuhalten [74]. Das Fassungsvermögen des Generators bestimmt damit die Häufigkeit des Nachfüllens. Die Größe des Herdes im Generator muß jedoch sehr sorgfältig auf die Leistung des Motors abgestimmt werden [19, 76], da bei einem zu klein gewählten Generator die Gefahr der Überhitzung besteht, während ein zu großer Generator nicht die erforderliche Betriebstemperatur erreicht.

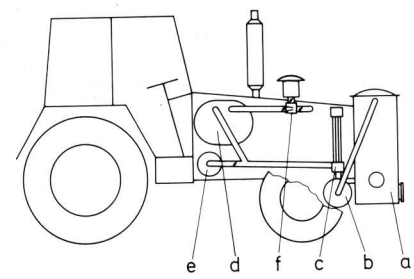

Bild 14. Schlepper mit Gasgenerator-Anlage.

a Gasgenerator
b Vorreiniger
c Kühler
d Nachreiniger
e Anfachgebläse
f Mischer

Trotz des relativ großen baulichen Aufwandes für eine Generatorgasanlage wird die Gaserzeugung auf dem Fahrzeug der stationären Gaserzeugung und dem Mitführen eines Gasvorrats auf dem Fahrzeug vorgezogen, da Generatorgas sehr schlechte Speichereigenschaften (s. Abschn. 2) und einen im Verhältnis zu anderen Gasen geringen Energiegehalt aufweist:
Der Heizwert für Generatorgas beträgt mit 4,2–5,5 MJ/m_n^3 nur etwa 1/4 bis 1/5 des Wertes für Biogas. Ein Mitführen von verdichtetem Generatorgas auf dem Fahrzeug in Hochdruckflaschenbatterien als Speicher erfordert somit, wenn dieselben Voraussetzungen wie beim Biogasschlepper angenommen werden (s. Abschn. 4.2.2), etwa das 1,5fache Einbauvolumen und die 3fache Masse einer Fahrzeug-Generatorgasanlage mit Speicherung von Festbrennstoff auf dem Schlepper. Zusätzlich ist der Aufwand für die Verdichtung und Druckspeicherung bei der stationären Generatorgasanlage und das Betanken der Hochdruckflaschenbatterie zu berücksichtigen.

4.2.2 Biogas als Kraftstoff

Den Aufbau einer Biogasanlage mit Verwendung des Biogases zum Antrieb von Motoren zeigt **Bild 15.** Zur Anpassung von Gaserzeugung und Gasverbrauch dient dabei ein Teil des Gärraums im Biogasreaktor a oder ein separater Speicher (zumeist Niederdruckspeicher) c.

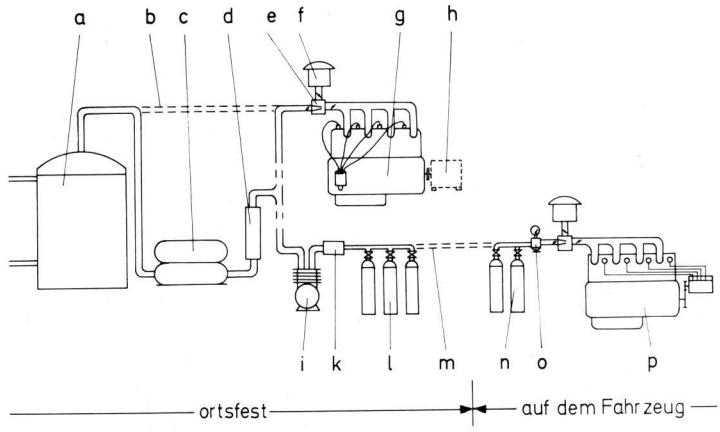

Bild 15. Schema einer Anlage zur Biogaserzeugung und -nutzung als Kraftstoff im stationären und Fahrzeugbetrieb.

a Biogasreaktor
b Verbindungsleitung bei Betrieb ohne Speicher
c Speicher
d Gasreiniger
e Mischer
f Luftfilter
g stationärer Motor
h Elektrogenerator
i Kompressor
k Trockner
l Hochdruck (HD)-Flaschenbatterie (ortsfest)
m lösbare Fülleitung
n HD-Flaschenbatterie
o Druckminderer
p Fahrzeugmotor

Der Betrieb einer Gasmotor-Elektrogenerator-Anlage mit Abgabe der Elektroenergie an das öffentliche Netz und Bezug von elektrischer Energie aus dem Netz – je nach Bedarf – ist wegen der Differenz zwischen Abgabe- und Bezugspreis der Elektroenergie ungünstig. Wird eine Motor-Elektrogenerator-Anlage aber nur zur Deckung des Eigenbedarfs betrieben, so läuft der Motor die meiste Zeit im Teillastbereich und, bezogen auf Nennlast, bei geringerem Motorwirkungsgrad. Dieser kann jedoch durch den Einsatz eines Mikroprozessors zur Regelung des Gas/Luft-Verhältnisses, der Gemischmenge und des Zündzeitpunktes in Abhängigkeit von der Gasqualität und der Motorleistung bzw. der abgenommenen elektrischen Leistung verbessert werden [78].

Häufiger Betrieb im Teillastbereich des Motors ergibt sich auch beim Biogaseinsatz für den Antrieb von Fahrzeugen, z.B. landwirtschaftlichen Schleppern. Im Praxistest eines Schleppers mit Otto-Gasmotor wurde für Biogas mit 67 % Methan-Gehalt bei Vollast je nach Drehzahl ein spezifischer Gas-Verbrauch von 0,56 bis 0,6 m_n^3 pro kWh, gemessen an der Zapfwelle, ermittelt [18]. Bei Teillast steigt der spezifische Gasverbrauch und beträgt nach den Ergebnissen der gleichen Untersuchung bei einer durchschnittlichen Auslastung von 40 % im praktischen, landwirtschaftlichen Einsatz ca. 0,8 m_n^3 Biogas je kWh. Entsprechend ist bei Zweistoffverfahren (ausgehend von einer Zündstrahlmenge von etwa 15 % der Vollastmenge bei Dieselbetrieb), je nach Art der Regelung, mit einem Biogasverbrauch von 0,5–0,7 m_n^3/kWh zu rechnen. Das bedeutet, daß unter diesen Bedingungen die Dieselkraftstoffmenge 25–35 % des gesamten Energieeinsatzes deckt bzw. der Dieselkraftstoffverbrauch 25–35 % des Verbrauchs bei reinem Dieselbetrieb beträgt. **Bild 16** zeigt beispielhaft den im Vergleich zum reinen Dieselbetrieb ungünstigen Teillastverbrauch eines Motors beim Zweistoffbetrieb.

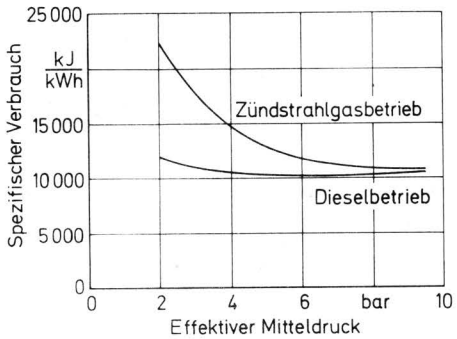

Bild 16. Spez. Verbrauch eines Zweistoffmotors in Abhängigkeit vom effektiven Mitteldruck bei Zündstrahl-Gas-Betrieb mit Methan im Vergleich zum Betrieb mit Dieselkraftstoff; nach *Leiker* [79].

Bei der Verwendung von Biogas als Kraftstoff für Fahrzeuge ist in jedem Fall eine Speichermöglichkeit an der Biogasanlage und auf dem Fahrzeug erforderlich, Bild 15. Für landwirtschaftliche Schlepper werden hierfür Hochdruckflaschenbatterien mit je 50 bis 60 l Flascheninhalt und 200–300 bar Fülldruck, **Tafel 5**, gewählt, die auf dem Kabinendach [80, 81] oder der Hilfsladefläche [82] angebracht sind und sich durch ihr Bauvolumen und ihre Masse u.a. in erhöhtem Schwerpunkt des Schleppers und verminderter Standsicherheit nachteilig bemerkbar machen. Diese Nachteile begrenzen die mitführbare Gasmenge, so daß wegen der geringeren Energiedichte bei Biogas wesentlich häufiger als bei einem vergleichbaren Einsatz mit Dieselkraftstoff nachgetankt werden muß. Überschlägig erfordert die Kraftstoffbevorratung auf dem Fahrzeug (Kraftstoff und Behälter) bei verdichtetem Biogas den 7fachen Aufwand an Volumen und den 6fachen Aufwand an Masse, bezogen auf Dieselkraftstoff und einen vergleichbaren Schleppereinsatz.

Der Energieaufwand für die Verdichtung zur Druckspeicherung wird außer vom Enddruck von der Bauart und Größe des Gas-Kompressors und der Gas-Kühlung bestimmt. Kleinanlagen mit einem Durchsatz von 5 m^3/h benötigen für die Verdichtung von 1 m^3 Gas von 1 bar auf 10 bar etwa 0,13 kWh bzw. auf 200 bar etwa 0,3 kWh für den Antrieb des Kompressors. Erfolgt der Antrieb durch einen Biogasmotor, so ist bei großen Kompressoren für die Verdichtung auf 200–300 bar mit einem Verbrauch von etwa 15–20 % der Gasmenge zu rechnen.

		Konventionelle Schweißgas-flasche		Ital. Fahrzeug-Erdgas-flasche 1)	
Nutzinhalt	l	50		60	
Durchmesser	mm	230		316	
Länge ohne Armatur ca.	mm	1520		975	
Länge mit Armatur ca.	mm	1650		1000	
Masse (leer)	kg	64		55	
Volumen ohne Armatur	l	63		76,5	
Volumen mit Armatur ca.	l	87		100	
Betriebsdruck	bar	200		200	
Prüfdruck	bar	300		300	
Fülldruck	bar	200	300 1)	200	300 1)
Füllmenge Biogas	m_n^3	15	19	18	22,8
Füllmenge Methan	m_n^3	12,5	16,5	15	19,8
Energieinhalt Biogas	MJ	360	456	432	547
Energieinhalt Methan	MJ	448	591	537	709
Energiedichte 2) Biogas	MJ/l	4,1	5,2	4,3	5,5
Energiedichte 2) Methan	MJ/l	5,1	6,8	5,4	7,1
spez. Energieinhalt 3) Biogas	MJ/kg	4,4	5,3	5,7	6,8
spez. Energieinhalt 3) Methan	MJ/kg	6,1	7,8	8,2	10,2

1) ohne Berücksichtigung gesetzlicher Vorschriften (zum Vergleich)
2) bezogen auf Einbauraum
3) bezogen auf Masse von Gas und Stahlflasche ohne Armaturen

Tafel 5. Zusammenstellung der Daten von Hochdruckflaschen zur Speicherung von Biogas (67 % CH_4; H_u = 24 MJ/m_n^3) und Methan (H_u = 35,8 MJ/m_n^3); nach *Fankhauser u. Moser* [18].

Wegen des Gefährdungspotentials von Druckgasen allgemein und von brennbaren Gasen im besonderen sind bei der Verdichtung von Biogas umfangreiche Sicherheitsvorschriften [5, 68, 83] zu beachten.

Neben der Gefahr durch Undichtigkeiten und der Berstgefahr infolge des Druckes sind Funktionsstörungen durch Kondenswasserbildung aus der Gasfeuchtigkeit und die Korrosion durch den Schwefelwasserstoffgehalt von Bedeutung, weshalb ihnen besondere Aufmerksamkeit seitens des Herstellers und des Betreibers der Anlagen zu schenken ist.
Im Biogasreaktor ist das Gas praktisch wasserdampfgesättigt und hat bei einer Temperatur von 35 °C einen Wasserdampfgehalt von etwa 40 g/m^3. Bei der Abkühlung auf Umgebungstemperatur sowie bei Verdichtung bildet sich Kondenswasser, zu dessen Vermeidung bzw. Beseitigung verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen, von denen die Adsorptionstrocknung i.a. bevorzugt angewendet wird. Das Vorhandensein bzw. die Beseitigung des Kondenswassers ist auch von großem Einfluß auf die Korrosionsgefahr durch Schwefelwasserstoff. So wurde als Vorbeugungsmaßnahme gegen Korrosion von Hochdruckstahlflaschen für die Biogasspeicherung vom Technischen Überwachungs-Verein die Trocknung als allein ausreichende Maßnahme angesehen [84].
Bei Motorbetrieb mit Biogas wirkt sich ein Schwefelwasserstoffgehalt durch die Korrosivität vor allem auf die Buntmetalle enthaltenden Bauteile wie Misch- und Regelorgane, elektrische Bauteile und Gleitlager aus. Ein häufigerer Wechsel des Schmieröls oder die Verwendung spezieller Öle sind dagegen nur beschränkt wirksam. Von Motorenherstellern werden deshalb Schwefelwasserstoffgehalte von weniger als 0,1–0,2 % gefordert [85].

Praktikable, bei Klärgas bewährte Entschwefelungsverfahren basieren auf der chemischen Bindung des Schwefelwasserstoffs an das z.B. in Eisenerz (Brauneisenstein) oder Rost vorkommende Eisenoxidhydrat. Dieses kann durch Luftsauerstoff regeneriert werden, jedoch ist die Wiederverwendbarkeit durch den entstehenden elementaren Schwefel begrenzt, so daß 1 kg Entschweflermasse mit maximal 300 g Schwefel beladen werden kann.

5. Stoff- und Energiebilanzen

5.1 Generatorgas

5.1.1 Abschätzung der Potentiale der gegenwärtig verfügbaren landwirtschaftlichen Rohstoffe

Von den nachwachsenden Rohstoffen sind für die Erzeugung von Generatorgas verfahrensbedingt vorzugsweise die Stoffe mit geringem Feuchtegehalt einzusetzen. Die umfangreichen Erfahrungen mit der Generatorgaserzeugung aus Holz [19, 76] im und nach dem Krieg lassen zunächst an Holz als nachwachsenden Rohstoff denken [74], doch auch der Einsatz von Stroh [40] erscheint dann erfolgversprechend, wenn es für diese Anwendung aufbereitet wird. Das Verfahren der Gaserzeugung aus Stroh bedarf jedoch weiterer Entwicklung, da bisher die erreichten Umwandlungs-Wirkungsgrade nicht befriedigen und der Anfall von organischen Substanzen im Kondensat zu hoch liegt.

Als weitere nachwachsende Rohstoffe kommen Nußschalen, Hülsen, Spelzen und ähnliche Abfallprodukte der gewerblichen Bearbeitung der Nahrungsmittel in Betracht, wobei auch hier eine entsprechende Vorbereitung der Stoffe für die Gaserzeugung notwendig ist. Die Menge dieser Stoffe ist bei der Verschiedenartigkeit nur schwer abzuschätzen, ist aber im Vergleich mit den in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion unmittelbar verfügbaren Mengen an Restholz, Stroh und Maisspindeln gering, und zudem ist zu beachten, daß die gewerblichen Abfälle zum großen Teil im Sinne einer wirtschaftlichen Entsorgung schon zur Energienutzung eingesetzt werden.

Damit sind nur für Holz und Stroh, als den wesentlichen nachwachsenden Rohstoffen für die Erzeugung von Generatorgas, die gegenwärtig verfügbaren Potentiale abzuschätzen.

Für die Bundesrepublik Deutschland wird das nutzbare Potential an Holzabfällen, die bei der jährlichen Holzernte im Wald anfallen, auf eine Trockensubstanzmasse von 4 Mio. t/Jahr geschätzt [24, 31]. Dabei wird von einem mittleren jährlichen Einschlag von 30,6 Mio. m^3/Jahr ausgegangen und eine Reihe von ökologischen und technischen Einschränkungen berücksichtigt.

Der jährliche Einschlag entspricht nicht dem tatsächlichen nachhaltigen Zuwachs von geschätzt etwa 35 Mio. m^3/Jahr, so daß bei entsprechender Steigerung des Einschlags die Menge an Restholz (Trockensubstanz) 4,5 Mio. t/Jahr betragen würde [24]. Außerdem wären noch 0,75 Mio. t/Jahr an Restholz (Trockensubstanz) jährlich verfügbar, wenn Durchforstungsrückstände in einer Rate von 2,5 Mio. m^3/Jahr an Derbholz aufgeholt würden. Aus nachwachsenden Rohstoffen gespeist wird auch der Anfall an Altholz aus Abbruch, das bislang überwiegend ungenutzt auf Deponien verbracht und auf eine Menge von 1 Mio. t/Jahr geschätzt wird [86]. Da dieses Material minderwertig ist, kommt nur die Verbrennung bzw. Vergasung als Nutzung in Betracht.

Das in der Holzbe- und -verarbeitung anfallende Rest- und Abfallholz wird bereits zu 90 % genutzt. Die hier noch zu nutzende Menge wird auf 0,85 Mio. t/Jahr geschätzt [24], wovon gut die Hälfte nicht verwertete Rinde betrifft. Wieweit diese ein geeigneter Einsatzstoff für die Gaserzeugung sein kann oder ob sie sinnvoller zur Herstellung von Bodenverbesserungsmitteln einzusetzen ist, verbleibt zu klären.

Unter den günstigsten Voraussetzungen, d.h. wenn die Gesamtmenge als Rohstoff für die Vergasung bereitsteht, ergibt sich ein Potential an Holz- und Rindentrockenmasse von etwa 7 Mio. t/Jahr, das eine Energiemenge von 132 · 10^6 GJ/Jahr darstellt und nach Umwandlung in Generatorgas ($\eta_G \approx 0{,}75$) etwa 100 · 10^6 GJ/Jahr liefert. Hier ist allerdings nochmals darauf hinzuweisen, daß besonders für das Restholz beim Holzeinschlag andere Nutzungen konkurrieren werden, sobald brauchbare Verfahren zu seiner wirtschaftlichen Gewinnung gefunden sind.

Diese Abschätzung des Gaspotentials von 100 · 10^6 GJ/Jahr, entsprechend einer Dieselölmenge von 2,3 Mio. t/Jahr (69 % der jährlich in der Landwirtschaft eingesetzten Menge an Dieselkraftstoff und Heizöl), stellt somit eine obere Grenze dar, die vermutlich bei weitem nicht erreicht werden kann.

Für Stroh wird allgemein bei einer Gesamtstrohernte von 23,5 Mio. t/Jahr in der Bundesrepublik das nutzbare Potential an "Reststroh" mit 5 Mio. t/Jahr angegeben [24, 86]. Das entspricht einer Energiemenge von etwa 75 · 10^6 GJ/Jahr. Die Vergasung von Stroh ist bislang nur mit einem Wirkungsgrad von bis zu 60 % möglich, so daß in Gasform eine Energiemenge von höchstens 45 · 10^6 GJ/Jahr vorliegen würde. Im Vergleich mit der aus Holz gewinnbaren Gasmenge fällt diese Menge sehr viel kleiner aus, jedoch ist der Rohstoff mit den bekannten Verfahren der Strohbergung einfacher zu gewinnen.

5.1.2 Stoff- und Energiebilanz am Beispiel Strohbriketts

Für die Stoff- und Energiebilanz, **Bild 17**, wird die Strohmenge von 1 ha Weizen mit 64,35 dt/ha, entsprechend einem Energieäquivalent von 95,1 GJ/ha (Heizwert der wasserfrei gedachten Substanz), zugrunde gelegt.

Bei der Zurechnung der Energieäquivalente der in der landwirtschaftlichen Produktion eingesetzten technischen Mittel sind zwei unterschiedliche Wege denkbar:

1. Das Stroh wird als Abfallprodukt der Körnerernte angesehen, und es werden für die Energiebilanz der Gaserzeugung nur die Energieäquivalente für die zusätzlichen Arbeiten wie Strohsammeln und Transport angesetzt.
2. Die Erzeugung von Weizenkorn und -stroh wird als ein Komplex angesehen, das Energieäquivalent für die insgesamt aufgewendeten technischen Mittel wird auf die beiden Produktströme Korn und Stroh entsprechend den in diesen Strömen enthaltenen Energiemengen aufgeteilt.

Bei einer energetischen Betrachtung scheint der zweite Weg sinnvoller, so daß hier diese Aufteilung gewählt wird, womit sich für die landwirtschaftliche Erzeugung des Rohstoffes ein Energieäquivalent für technische Mittel von 15,15 GJ/ha ergibt. Dazu ist die hochwertige Antriebsenergie für den Brikettierprozeß mit 1,74 GJ pro ha zu rechnen.

Versuche zur Vergasung von Stroh [40] haben gezeigt, daß besonders bei wechselnder Auslastung des Gasgenerators das Brikettieren zu einem besseren Wirkungsgrad der Gaserzeugung führt. Bei dem bezogen auf den Energieinhalt des Strohs relativ geringen Prozeßenergieaufwand stellt das Brikettieren somit eine energetisch effiziente Maßnahme dar.

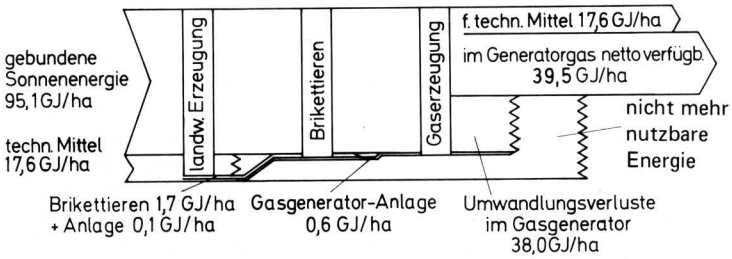

Bild 17. Energieflußbild für die Erzeugung von Generatorgas aus brikettiertem Stroh.

Das Energieäquivalent für die Brikettierausrüstung ist mit weniger als 0,1 GJ/ha und das für die Gasgenerator- und Gasreinigungsanlage mit etwa 0,6 GJ/ha anzusetzen, wenn man von dem von *Heyland u. Solansky* [87] angegebenen Energieäquivalent für maschinelle Ausrüstung ausgeht. Insgesamt ergeben sich als Energieäquivalent für technische Mittel 17,6 GJ/ha.

Der Wirkungsgrad der Gaserzeugung aus Strohbriketts ist bisher wenig untersucht und zunächst maximal mit 0,6 anzusetzen [40], im Vergleich mit der Vergasung von Holz (η = 0,75–0,80) ein niedriger Wert, der vermutlich über die Weiterentwicklung des Verfahrens noch erhöht werden kann. Unter den gegenwärtigen Bedingungen tritt bei der Vergasung ein Umwandlungsverlust von 38,0 GJ/ha auf, der sich zusammensetzt aus Wärmeverlusten des Apparates und den Verlusten über den Gasstrom, die sensible und latente Wärme sowie bisher auch einen merkbaren Austrag unvergaster Strohteilchen umfassen.

Insgesamt wird bei der Vergasung der Strohbriketts aus einer Strohmenge von 64,35 dt/ha (95,1 GJ/ha) eine Energiemenge von 57,1 GJ/ha im Generatorgas erzeugt; bei einem Heizwert von 4,9 bis 5,9 MJ/m_n^3 [40] sind das pro ha etwa 10000 m_n^3 Generatorgas. Dabei ist mit einem Anfall von etwa 2490 kg Kondensat zu rechnen, dessen CSB-Wert, bezogen auf die Kondensatmasse, 0,141 kg pro kg beträgt [40]. Zieht man das Energieäquivalent für den Aufwand an technischen Mitteln (17,6 GJ/ha) von der gleichwertigen Energie im erzeugten Generatorgas ab, so verbleiben als netto verfügbar 39,5 GJ/ha, entsprechend einer Gasmenge von 6918 m_n^3.

5.1.3 Kosten

Die Kosten für den Generatorgasbetrieb sind hauptsächlich zwei Bereichen zuzuordnen:

1. Kosten der apparativen Anlage
2. Kosten für Werbung und Aufbereitung des Energieträgers aus nachwachsenden Rohstoffen.

Daten zu beiden Bereichen sind in neuerer Zeit von *Stadler u. Studer* angegeben worden [74], die im Versuchsbetrieb einen Ackerschlepper der Leistungsklasse 30–40 kW betreut haben und zu der folgenden Kalkulation (1980) kamen:

Die Kosten für den Einbau einer Holzgasanlage (Gaserzeuger, Gasreiniger und Gaskühler, Mischventil und Steuergestänge, Anbauplatte) sind einschließlich der Anpassungs- und Montagearbeiten auf 8700 sFr. zu veranschlagen, wenn von einer serienmäßigen Herstellung von mindestens 1000 Anlagen ausgegangen wird.

Mit diesem Wert lassen sich die Kosten berechnen, die bezogen auf 1 *l* ersetzten Dieselkraftstoff anfallen, wobei eine Nutzungsdauer der Holzgasanlage von 8 Jahren mit einer jährlichen Betriebszeit von 850 h – entsprechend einem Treibstoffverbrauch (ohne Zündöl) von 3000 *l*/Jahr – angesetzt werden. Aus Amortisation, Verzinsung, Reparaturkosten, Kosten der Wartung und zeitweiser Minderleistung gegenüber dem Betrieb mit Dieselkraftstoff werden Anlage- und Betriebsmehrkosten von 1,40 sFr./*l* abgeleitet.

Als Brennstoff wurden zwei verschiedene Holzaufbereitungen untersucht: Hackholz (mit dem Buschholzhacker aufbereitetes Astholz) und Klötzchenholz (mit einer Brennholzsäge und Klötzchenmaschine aufbereitetes Schichtholz). Wenn 4,5 kg Holz im Gasgeneratorbetrieb 1 *l* Dieselkraftstoff äquivalent sind, ergeben sich, bezogen auf 1 *l* ersetzten Dieselkraftstoff, Brennstoffkosten von 0,56 sFr./*l* bei Hackholz und 0,97 sFr./*l* für Klötzchenholz. Bei beiden Holzaufbereitungen entfällt die Hälfte der Kosten auf den Holzpreis und die andere Hälfte auf die Kosten der Aufarbeitung.

Mit diesen Werten ergeben sich Gesamtkosten für den Generatorgasbetrieb von 1,96 sFr./*l* bei Hackholz und 2,37 sFr./*l* bei Klötzchenholz, bezogen auf 1 *l* ersetzten Dieselkraftstoff.

Die sehr ähnlichen wirtschaftlichen Verhältnisse in der Schweiz und der Bundesrepublik Deutschland machen die Zahlen bei Berücksichtigung des Wechselkurses 1 sFr. = 1,18 DM direkt übertragbar. Die bei *Stadler u. Studer* detailliert ausgeführte Rechnung macht deutlich, daß auch bei vergleichsweise geringen reinen Holzkosten von 0,28 sFr./*l* (Hackholz) bzw. 0,49 sFr./*l* (Klötzchenholz) der Generatorgasbetrieb bislang bei weitem nicht konkurrenzfähig ist. Das ist zurückzuführen auf die Kosten der Holzaufbereitung (0,28 sFr./*l* bzw. 0,48 sFr./*l*), besonders aber auf hohe Kosten für Amortisation (0,36 sFr./*l*) und Instandhaltung (0,54 sFr./*l*) der Gaserzeugungsanlage.

Wird die Gaserzeugungsanlage mit Strohbriketts betrieben, so ist mit einem Brikettpreis von 0,10–0,20 DM/kg zu rechnen [88]. Bei einem Wirkungsgrad des Gaserzeugers bei Strohbetrieb von η_G = 0,6 [40] und bei Berücksichtigung der Erfahrungswerte von *Stadler u. Studer* (η_G = 0,8; 4,5 kg Holz $\hat{=}$ 1 *l* Dieselkraftstoff) ist hier etwa anzusetzen: 6,0 kg Strohbriketts $\hat{=}$ 1 *l* Dieselkraftstoff. Damit ergeben sich Brennstoffkosten für das Energieäquivalent von 1 *l* Dieselkraftstoff von 0,60–1,20 DM/*l* und somit Werte, die denen für Holz vergleichbar sind.

5.2 Biogas

5.2.1 Abschätzung der Potentiale der gegenwärtig verfügbaren landwirtschaftlichen Rohstoffe

Als bevorzugter Rohstoff zum Betrieb von Biogasanlagen in der Landwirtschaft sind Rest- und Abfallstoffe der tierischen Produktion anzusehen, weil durch Biogasverfahren neben der Gewinnung eines hochwertigen Energieträgers bei diesen Stoffen auch Vorteile in Hinsicht auf geringere Umweltbelastung zu erreichen sind. Das Gesamtpotential der Energie in Biogas aus tierischen Exkrementen läßt sich bestimmen aus der Gesamttrockenmasse der tierischen Exkremente von 18 · 10^6 t/Jahr [89] und den auf organische Trockensubstanz bezogenen Werten der Methanproduktion beispielsweise von *Schuchardt* [27] zu etwa 115 · 10^6 GJ/Jahr. Dieses Potential der tierischen Exkremente liegt somit höher als das für die Gesamtmenge an Rest- und Abfallholz (Abschn. 5.1.1) in Form von Generatorgas anzusetzende Potential von 100 · 10^6 GJ/Jahr. *Wenner* [89] geht davon aus, daß dieses Potential für Biogas kurzfristig nur zu etwa 5 % und langfristig zu 10 % genutzt wird. Dabei werden zunächst die Betriebe beteiligt sein, bei denen die wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Voraussetzungen besonders günstig sind: Betriebe mit überdurchschnittlichem Tierbestand, mit Flüssigmistverfahren, aber auch Betriebe, in denen Emissionsverminderung bedeutsam ist.

Neben den tierischen Exkrementen stellen die in der Tierhaltung als Einstreu eingesetzten Strohmengen das gegenwärtig wichtigste Potential für die Biogaserzeugung dar. Wenn von der Strohernte bisher nur 5 · 10^6 t/Jahr auf dem Felde verbleiben, so werden immerhin etwa 80 % des Strohs geborgen. Davon geht ein geringer Anteil in Nutzungen außerhalb der Tierhaltung und ein weiterer nicht exakt zu erfassender Anteil wird als Futterstroh verwendet – und ist daher schon in der Trockenmasse der tierischen Exkremente erfaßt. Unter großzügiger Berücksichtigung dieser Anteile ist die zur Einstreu verwendete Strohmenge mit etwa 15 · 10^6 t pro Jahr abzuschätzen, entsprechend einem Energiepotential in Biogas von 83 · 10^6 GJ/Jahr. Zusammen mit dem Potential in Biogas aus tierischen Exkrementen ergeben sich etwa 200 · 10^6 GJ/Jahr, das Doppelte des für Generatorgas aus Rest- und Abfallholz mit 100 · 10^6 GJ/Jahr abgeleiteten Wertes. Die Möglichkeiten einer weitgehenden Nutzung dieses Potentials werden bislang aber gering eingeschätzt [89].

An frischer Pflanzensubstanz für die Biogasgewinnung steht das gegenwärtig nicht genutzte Zuckerrübenblatt zur Verfügung, dessen Menge im allgemeinen auf 1,5 · 10^6 t/Jahr entsprechend 10 % der Gesamtmenge geschätzt wird. Setzt man für die Umwandlung, bezogen auf die Frischmasse, eine Energieausbeute von 2,096 GJ pro t an [46], dann stellt das Rübenblatt ein Potential von 3,14 · 10^6 GJ/Jahr dar.

Neben den genannten Rohstoffen, die gegenwärtig verfügbar sind, lassen sich weitere nachwachsende Rohstoffe speziell zur Biogasgewinnung erzeugen. Es wird geschätzt, daß unter bestimmten Annahmen gegenwärtig 2,5 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche

in der EG für eine solche Produktion eingesetzt werden können und dieser Wert bei weiter anhaltendem agrartechnischen Fortschritt bis Ende der 80er Jahre zu verdoppeln ist [24].
Für die Bundesrepublik ergeben diese letzteren Anteile, wenn von einer anderweitigen Verwendung der nachwachsenden Rohstoffe abgesehen wird, mit den von *Kleinhanß* angegebenen Werten, Bild 2, maximale Energiemengen von 0,877 · 10^9 *l* Öläquivalent (31,7 · 10^6 GJ/Jahr) bzw. 1,755 · 10^9 *l* Öläquivalent (63,4 · 10^6 GJ/Jahr). Bei einem Kraftstoffverbrauch der Landwirtschaft von 2,317 · 10^9 *l*/Jahr [30] entsprechen diese Mengen 37,8 % bzw. 75,7 % des landwirtschaftlichen Verbrauchs oder max. 3,83 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs [90] der Bundesrepublik.

5.2.2 Stoff- und Energiebilanz am Beispiel Grassilage

Die Bilanz wird für die Biogasgewinnung aus Grassilage dargestellt, weil über Grassilage eine im Jahresablauf gleichmäßige Rohstoffversorgung der Biogasanlage sichergestellt werden kann und an diesem Verfahren die energetischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten einer solchen Nutzung freiwerdender landwirtschaftlicher Flächen abzuschätzen sind [28, 91].

Der Energiebilanz, **Bild 18**, liegen weitgehend die von *Schuchardt* [91] in seiner etwas anders aufgebauten Energiebilanz angegebenen Daten zugrunde:
Bei der Produktion von Feldgras wird bei mittlerer Intensität mit einem Ertrag von 50 t/ha gerechnet, entsprechend einer Trockenmasse von 10 t/ha, was bei einem trockenmassebezogenen Energieinhalt von 17 GJ/t eine Energiemenge am Eingang der Bilanz von 170 GJ/ha ergibt.

Das Energieäquivalent für die bei der landwirtschaftlichen Rohstoffgewinnung einzusetzenden technischen Mittel umfaßt:
- Bodenbearbeitung, Pflege- und Erntearbeiten 6,12 GJ/ha
- Transportfahrten des Frischgutes zum Siloplatz und des Faulschlammes zurück aufs Feld 2,72 GJ/ha
- Düngebedarf der Fläche 16,5 GJ/ha (dabei wird eine Düngung von N: 160 kg/ha; P_2O_5: 70 kg/ha; K_2O: 200 kg/ha und CaO + MgO: 380 kg/ha zugrunde gelegt.)
- Energieäquivalent für landwirtschaftliche Gebäude, Maschinen und Geräte ca. 2 GJ/ha.

Das Energieäquivalent der Reaktoranlage wird auf 2,4 GJ/ha geschätzt. Das Energieäquivalent für techn. Mittel beträgt damit insgesamt 29,8 GJ/ha.

Silieren ist ein weitgehend wetterunabhängiges, wirtschaftliches Konservierungsverfahren mit geringem Aufwand an techn. Energie, das aber mit relativ hohen Verlusten verbunden ist. Die Verluste für Ernte, Konservierung und Lagerung sind hier mit 33 %, entsprechend 56,1 GJ/ha, angesetzt.

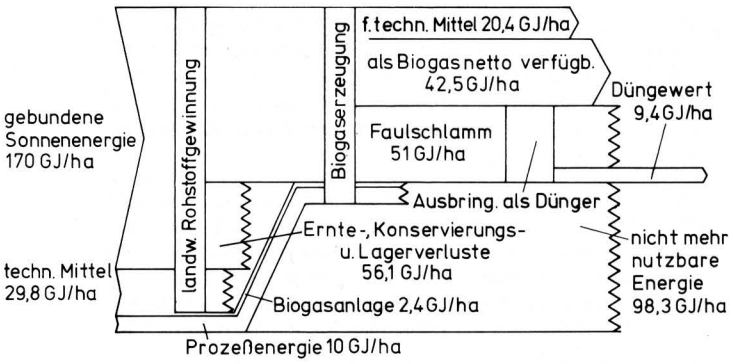

Bild 18. Energieflußbild für die Erzeugung von Biogas aus Grassilage; in Anlehnung an *Schuchardt* [91].

Die Umsetzung der organischen Substanz in Methan ist nicht vollständig, weil nicht alle Stoffe fermentierbar sind und die Verweilzeit im Hinblick auf eine wirtschaftliche Nutzung des Reaktorvolumens auf 20 Tage begrenzt wird. Hier wird mit einer Ausbeute von 0,27 m_n^3 Methan aus 1 kg organischer Trockensubstanz gerechnet. So verbleibt im Faulschlamm eine Energiemenge von 51 GJ/ha (30 % der Energie des Rohstoffs). Im Biogas fallen 62,9 GJ/ha an, für deren Erzeugung Prozeßenergie für Pumpen und zur Aufheizung des Substrates sowie zum Ausgleich der Wärmeverluste des Reaktors in Höhe von 10 GJ/ha (16 % der im Biogas enthaltenen Energiemenge) aufgewendet werden muß.

Bei Ausbringen des Faulschlammes als Dünger auf die Feldgrasfläche kann die Stickstoffversorgung zu 50 %, die Kalkversorgung zu etwa 20 % und die Versorgung mit den übrigen Nährstoffen voll erreicht werden. Das Energieäquivalent dieser Mineralstoffe im Faulschlamm beträgt 9,4 GJ/ha. Bei der Kreislaufführung der Nährstoffe ist der Aufwand für techn. Mittel entsprechend auf 20,4 GJ/ha zu reduzieren.
Wird dieses Energieäquivalent für techn. Mittel von der in Form von Biogas gewonnenen Energie abgezogen, so verbleiben als netto verfügbar 42,5 GJ/ha. Von dieser Menge ist, soweit nicht eine bessere Möglichkeit zur Beheizung der Anlage besteht, auch noch der Energieaufwand an Prozeßenergie abzuziehen. Dann wären nur 32,5 GJ/ha verfügbar.

5.2.3 Kosten

Die Kosten für Biogas werden in komplexer Weise durch eine große Zahl von Einflußgrößen bestimmt, so daß bisher brauchbare Angaben der Kosten aus der Praxis kaum verfügbar sind. Schon die Kosten für die zur Biogaserzeugung eingesetzten Rohstoffe schwanken beträchtlich, je nachdem, ob die Rohstoffe eigens zur Biogaserzeugung angebaut werden, ob es sich um Nebenprodukte der pflanzlichen Produktion handelt, für die neben der Biogaserzeugung eine anderweitige Nutzung gegeben ist oder nicht, oder ob es sich um Abfallprodukte der Tierhaltung handelt, für deren Verwendung bei Berücksichtigung einer besseren Düngerwirkung und einer Verminderung der Umweltbelastung ein zusätzlicher Ertrag gegeben sein kann [5].

Auch die Investitionskosten, bezogen auf die Volumeneinheit der Anlage, zeigen nicht zuletzt infolge der Kostendegression mit wachsender Anlagengröße beträchtliche Schwankungen. Für die sich von den Investitionskosten ableitenden Einzelposten ergibt sich, bezogen auf das erzeugte Biogasvolumen, eine noch größere Schwankungsbreite, weil sich Unterschiede im Nutzungsgrad der Anlage überlagern. Hier wirkt sich entscheidend aus, ob die Anlage auf eine gleichmäßig volle Nutzung über den Jahresablauf oder auf die Deckung des Spitzenbedarfs ausgelegt ist. Für die Planung von Biogasanlagen [60] ist es daher notwendig, die spätere Nutzung des Biogases möglichst exakt zu erfassen bzw. durch Modelluntersuchungen die Kombinationen von Rohstoffversorgung, Nutzungsarten des Biogases und Anlagengröße zu bestimmen, die die größte Wirtschaftlichkeit versprechen [28, 60, 92].

Die Modellrechnungen haben ergeben, daß – bei einer auf die organische Trockenmasse bezogenen Gasausbeute von 0,3 m_n^3/kg – in Anlagen, die auf den betrieblichen Heizenergiebedarf im Winter ausgelegt sind, die Erzeugung von Biogas aus Gülle mit etwa 0,67 bis 0,83 DM/m_n^3 (entsprechend einem Preis des Heizöläquivalents von 1,00–1,25 DM/*l*) zu veranschlagen ist, und zwar in rinderhaltenden Betrieben von 65 bis 240 GV bzw. schweinehaltenden Betrieben mit 90 GV [92].

Auch für Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Nutzpflanzen wird ein Gleichgewichtspreis des Öläquivalents von 1,25 DM/*l* ermittelt, wenn günstige Bedingungen (u.a. Grünmasse-Verarbeitungskapazität 25000–100000 t/Jahr, Grünmasseertrag 50 t/ha, gleichmäßiger und vollständiger Absatz des Biogases an gewerbliche Großabnehmer) zugrunde gelegt werden. Von den gesamten Kosten entfallen auf die Anlage- bzw. Transportkosten je 25 % und auf die Rohstoffkosten 50 %. Unter den günstigsten untersuchten

Bedingungen wird bei Biogasgewinnung aus Zuckerrübenblatt ohne anderweitige Verwendung ein Gleichgewichtspreis des Öläquivalents von 0,98 DM/*l* errechnet [28].

Für schweizerische Verhältnisse werden die Produktionskosten des Biogases in gleicher Größenordnung wie zuvor angegeben. *Fankhauser u. Moser* [18] führen für das genutzte Biogas in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad die in **Tafel 6** angegebenen Kosten in sFr./m_n^3 an. Bei Umrechnung mit dem Kurswert (1 sFr. = 1,18 DM) ergeben sich für das Energieäquivalent an Heizöl (1,5 m_n^3 Biogas = 1 *l* Heizöl) die angegebenen Preise in DM/*l*.

Zu den angegebenen Kosten kann das Biogas als Brennstoff genutzt werden, ein Speicher, der etwa den Gasanfall eines Tages aufnehmen kann, ist in den Anlagekosten enthalten. Wird Biogas in größerem Umfang als Brennstoff eingesetzt, dann sollte auf eine Trocknung und Entschwefelung nicht verzichtet werden, für die in Abhängigkeit von der Anlagengröße und dem Nutzungsgrad 0,13 bis 0,31 DM/m_n^3 anzusetzen sind (Trocknung 0,05–0,19 DM/m_n^3; Entschwefelung 0,08–0,12 DM/m_n^3) [18].

Für den Einsatz von Biogas als Kraftstoff in Fahrzeugen ist neben der Trocknung und Entschwefelung eine Hochdruckverdichtung und Hochdruckspeicherung erforderlich, und zusätzlich fallen Kosten für den Umbau der Motoren an. Die Motoren können (Abschn. 4.2) als Zündstrahl- oder als Otto-Gasmotoren arbeiten. Nach den Untersuchungen von *Fankhauser u. Moser* [18] ist zwar der Umbau auf Otto-Gasmotoren erheblich teurer (7500 sFr. gegenüber 2800 sFr.), doch ergeben sich für das Verdichten und die Hochdrucklagerung, bezogen auf das verbrauchte Gasvolumen, geringere Kosten, so daß beide Verfahren hinsichtlich der gesamten Kosten gleichwertig sind.
Abhängig von der Anlagengröße und dem Nutzungsgrad ist für das Verdichten mit 0,42–0,81 DM/m_n^3 zu rechnen. Bei Schlepperumbaukosten zwischen 0,21 und 0,50 DM/m_n^3 ergeben sich insgesamt Kosten beim Biogasbetrieb im Bereich 1,86–2,69 DM/m_n^3 – entsprechend einem Preis des Öläquivalents von 2,79–4,04 DM/*l*.

Beim Einsatz von Biogas in stationären Motoren entfallen die Kosten für Verdichter, Hochdruckspeicher und Speicher auf dem Fahrzeug, so daß sich hier die Kosten bei Biogasbetrieb auf etwa 0,88–1,52 DM/m_n^3 entsprechend 1,32–2,28 DM/*l* Öläquivalent reduzieren. Eine vielseitige Verwendung der Energie ist im stationären Betrieb nur über die Umwandlung in Elektroenergie und damit über zusätzliche Investitionen zu erreichen. Andererseits ist es bei stationärem Betrieb möglich, die bei der Umwandlung in mechanische Energie auftretenden Wärmemengen durch "Kraft-Wärme-Kopplung" für Heizzwecke (Biogasanlage, Warmwasserbereitung u.a.) zu nutzen, so daß die zuvor genannten Kosten weiter gesenkt werden können. Bei Ausschöpfung der mit der Kraft-Wärme-Kopplung gegebenen Möglichkeiten (Gutschrift für Wärmenutzung) werden für Anlagen mit 18–35 kVA die Kosten der Elektroenergie mit etwa 0,20 DM/kWh angegeben, wovon jeweils etwa die Hälfte auf die Maschinenanlage (Motor/Elektrogenerator) und die Kosten des Biogases entfällt [93].

Anlagengröße in Großvieheinheiten (GV)	Produktionskosten von Biogas			
	Nutzungsgrad 100 %		Nutzungsgrad 50 %	
	sFr./m_n^3	DM/l	sFr./m_n^3	DM/l
25	0,77	1,36	1,54	2,73
50	0,60	1,06	1,20	2,12

Tafel 6. Produktionskosten von Biogas in sFr./m_n^3 und in DM/*l* Öläquivalent in Abhängigkeit von Anlagengröße und Nutzungsgrad; nach *Fankhauser u. Moser* [18].

6. Konkurrierende Gase

Die zur Herstellung von gasförmigen Kraft- und Brennstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen konkurrierenden Verfahren gehen derzeit von Kohle, Erdöl und Naturgas aus. Es ist auch an die Erschließung bisher ungenutzter Lagerstätten von Ölschiefer und Ölsanden zu denken, des weiteren an die Vergasung von kohlenstoffhaltigen Rest- und Abfallstoffen aus Deponien (Müll).

Die für die Gewinnung der gasförmigen Kraft- und Brennstoffe notwendige Prozeßenergie wird entweder von den Rohstoffen selbst beim Umwandlungsprozeß bereitgestellt (energetischer Wirkungsgrad bei der Umwandlung) oder durch Nutzung anderer Energiequellen (Prozeßwärme aus Kohle- und Kernkraftwerken, wärmetechnische Nutzung von Reststoffen) aufgebracht.

Im landwirtschaftlichen Bereich konkurrieren die gasförmigen Kraft- und Brennstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen mit den durch die öffentliche Gasversorgung bereitgestellten Gasen (Erdgas, Stadtgas) und mit Flüssiggasen (Propan, Butan). Diese werden sowohl für den stationären Einsatz (Heizung, Trocknung, stationäre Gasmotoren) als auch für den mobilen Einsatz (Flüssiggasbetrieb von Fahrzeugen) angewendet.

Erdgas deckt derzeit rund 15 % des westdeutschen Primärenergiebedarfs, was einem Energieäquivalent von $1{,}613 \cdot 10^{18}$ J (55 Mill. t SKE) entspricht und liegt damit bei der Energieversorgung an dritter Stelle nach Öl und Kohle.

Unter zukünftigen Aspekten kommt auch Wasserstoffgas als Sekundär-Energieträger in Betracht. Dessen konventionelle Herstellung für Synthese- und Hydrierzwecke in der chemischen Industrie geht u.a. von der Kohlevergasung aus, wobei ein Vergasungsgas mit den wesentlichen Bestandteilen Wasserstoff und Kohlenoxid entsteht. Aus dem Kohlenoxid und Wasserdampf wird unter Verwendung von Katalysatoren Kohlendioxid und Wasserstoff gebildet und das Kohlendioxid durch Waschen mit Wasser oder Lauge [3] bzw. mit Membranverfahren [71, 72] aus dem Gas entfernt.

Zukünftig ließe sich der benötigte Wasserstoff durch Anwendung biologischer Prozesse, der Elektrolyse des Wassers (el. Energie aus Sonnenenergie) oder der thermolytischen Wasserspaltung mit Prozeßwärme aus Wärmekraftwerken erzeugen [48].

Für den Einsatz von Wasserstoff zur wärmeenergetischen Versorgung sind nur geringe Änderungen an den Brennanlagen für Erdgas erforderlich. Der Unterschied in der Wärmebelastung der Vormischbrenner ist zwar bei Methangas- und Wasserstoffgasbetrieb nur unwesentlich, die Flammengeschwindigkeit von Wasserstoff ist jedoch sehr viel größer als die von Methan. Dies stellt nach dem heutigen Stand der Technik allerdings kein Problem mehr dar [94]. Eine gezielte Beeinflussung der Brenntemperaturen ist durch die Entwicklung von katalytischen Brennern gegeben.

Wasserstoff als gasförmiger Kraftstoff kann zur Reduzierung der Schadstoffemissionen beitragen. Dazu müßte jedoch für den mobilen Einsatz eine bessere Speichermöglichkeit für Kraftfahrzeuge entwickelt werden. Die derzeit in Versuchsfahrzeugen erprobten Möglichkeiten Druckgasspeicher, Hydridspeicher [95] und Flüssigwasserstoffspeicher weisen gegenüber dem konventionellen Benzin- bzw. Dieseltank noch zu große Nachteile im Hinblick auf das Gewicht und Volumen auf [96, 97], **Bild 19**.

Die Kosten für die Herstellung und Verteilung von Wasserstoff als Energieträger, bezogen auf gleiche Energiewerte, würden, wenn die erforderlichen Mengen hergestellt werden könnten, abhängig von der Art des Rohstoffs, der Prozeßenergie und des Herstellungsverfahrens, etwa zwei- bis dreimal so hoch sein wie derzeit für Benzin [96].

Auch der Einsatz von Acetylen [98] als gasförmiger Kraftstoff ist für mobilen Einsatz grundsätzlich möglich, wobei das Gas aus Calciumcarbid und Wasser im Fahrzeug in einem entsprechenden Reaktor zu erzeugen ist [99]. Nachteile aus energetischen, umweltrelevanten und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten, die bei der Herstellung des Carbids, seiner Umsetzung in Acetylen und dem Betrieb von Kraftfahrzeugen vorhanden sind, stehen jedoch einer allgemeinen Verwendung entgegen.

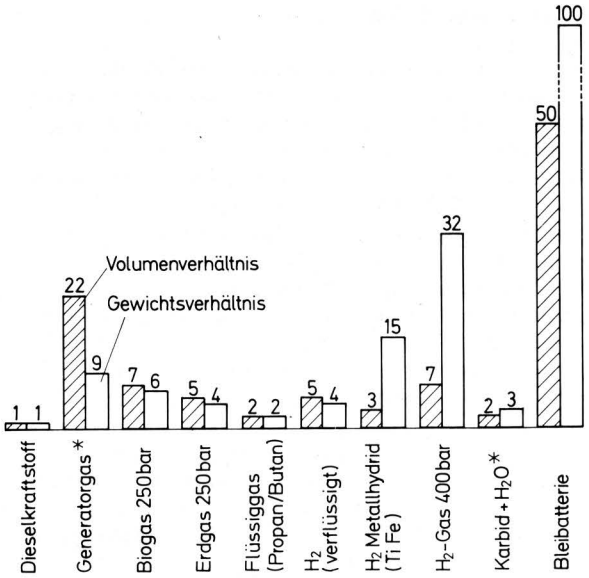

Bild 19. Richtwerte für Volumen (Einbauraum) und Gewicht (Behälter und Kraftstoff) von Speichern für verschiedene Energieträger im Vergleich zu Dieselkraftstoff; gleiche Einsatzzeit, bei * Behälter einschließlich Gaserzeugungsanlage.

7. Zusammengefaßte Ergebnisse

Von den gasförmigen Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen haben derzeit eine praktische Relevanz nur das Bio- und das Generatorgas. Die Verfahren zu ihrer Herstellung sind, wie die Energiebilanzen zeigen, energetisch gesehen sinnvoll, d.h. der Output an Energieträgern höherer Wertigkeit im Vergleich zu solchen beim Input ist deutlich positiv. Wenn derzeit dennoch diese Energieträger, auf den Gesamtenergiemarkt bezogen, nur in Sonderfällen hergestellt werden, so hat das unbeschadet des begrenzten Potentials vorwiegend wirtschaftliche Gründe.

Für den mobilen Einsatz sind Generator- und Biogas gegenwärtig und in absehbarer Zeit nicht empfehlenswert, obwohl beispielsweise im letzten Krieg mehrere hunderttausend Fahrzeuge für Generatorgasbetrieb ausgerüstet waren. Es waren eben die außergewöhnlichen Umstände, die den Einsatz erzwungen haben.

Daß das Generatorgas derzeit nicht konkurrenzfähig ist, liegt nicht nur an den deutlich höheren Kosten, sondern auch an der sehr aufwendigen und umständlichen Handhabung der Brennstoffe für den Gaserzeuger beim mobilen Einsatz.

Auch Biogas ist für den mobilen Einsatz nicht konkurrenzfähig. Das liegt zum Teil daran, daß die Verdichtung dieser Gase beträchtliche Investitionen erfordert, auch unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit. Ferner ist der Raumbedarf für die Gasflaschen bedeutend und das Austauschen bzw. Befüllen der Flaschen aufwendiger als bei einer Betankung mit flüssigen Kraftstoffen.

Eine abweichende Wertung ergibt sich für den Einsatz im stationären Bereich. Werden Generator- und Biogas ausschließlich unter dem Aspekt der Erzeugung eines Energieträgers gesehen, sind diese gegenwärtig nicht konkurrenzfähig.
Bei Generatorgas ist eine Anpassung der Erzeugung an den Bedarf gut möglich. Dies ist bei Biogas nur bedingt zu erreichen. Daher spielt der Nutzungsgrad bei einer Bewertung und Planung von Biogasanlagen eine gewichtige Rolle.

Beide Verfahren können aber auch schon derzeitig dann konkurrenzfähig sein, wenn neben der Erzeugung von Energieträgern Entsorgungsaufgaben gelöst werden.
Bei Biogas hat die Verwendung als Brennstoff grundsätzlich einen Vorzug vor der Verwendung als Kraftstoff, außer es liegen spezielle Verbrauchsstrukturen vor, wie bei den schon früher erwähnten kommunalen Kläranlagen.

Die oben skizzierte Situation wird sich kurzfristig nicht ändern. Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen kann jedoch dabei schneller verbessert werden als unter Umständen beim Generatorgas, weil die Hauptentwicklungen darauf abzielen, die Ausbeute der Anlagen – volumen- und zeitbezogen – zu verbessern, wofür berechtigte Hoffnungen bestehen, und weil ferner die Anforderungen bei Entsorgungsfragen zunehmen.

Außer der Erzeugung von gasförmigen Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen sind auch Entwicklungen im Gange und auch bereits technisch realisiert, ein hochwertiges Gas, im Heizwert etwa dem Erdgas entsprechend, aus Braunkohle herzustellen, beispielsweise nach dem Prinzip der Generatorgaserzeugung. Eine große Bedeutung wird auch dem Wasserstoff zugeschrieben. Vergleicht man die verschiedenen Verfahren, das Gewinnen von Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen, aus fossilen Energieträgern oder über Solarzellen und Solarkollektoren, so läßt sich ein gesichertes Urteil über die weitere Entwicklung auch hinsichtlich der Kosten noch nicht fällen. Mit Sicherheit wird man sagen können, daß Systeme zur Nutzung fossiler und nachwachsender Rohstoffe nebeneinander auftreten werden, wobei sich die Anteile aufgrund der Potentiale auch regional außerordentlich unterschiedlich entwickeln werden.

Daß sich die Wissenschaft und Forschung mit den Energien aus nachwachsenden Rohstoffen verstärkt befassen muß, ist nicht so sehr ein akutes energiepolitisches Problem, sondern liegt in erster Linie in der absehbaren Erschöpfung fossiler Energiequellen begründet. Aber auch agrar- und entsorgungspolitische Gesichtspunkte begründen eine vertiefte und zielgerichtete Untersuchung geeigneter Entwicklungsmöglichkeiten für gasförmige Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen, auch wenn den flüssigen Energieträgern energetisch gesehen grundsätzlich eine höhere Bedeutung beizumessen ist.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

[1] *Batel, W., M. Graef, G.-J. Mejer, R. Möller u. F. Schoedder:* Pflanzenöle für die Kraftstoff- und Energieversorgung. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 2, S. 40/51.

[2] *Batel, W., M. Graef, G.-J. Mejer, F. Schoedder u. G. Vellguth:* Äthanol aus nachwachsenden Rohstoffen als alternativer Kraftstoff für Fahrzeuge. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 4, S. 125/37.

[3]●Hütte: Des Ingenieurs Taschenbuch. Bd. I. Berlin: Verlag W. Ernst & Sohn, 27. Aufl. 1949 u. 28. Aufl. 1955.

[4]●Physikhütte. Bd. II, 29. Aufl. Berlin, München, Düsseldorf: Verlag W. Ernst & Sohn 1971.

[5]●*Baader, W., E. Dohne u. M. Brenndörfer:* Biogas in Theorie und Praxis. KTBL-Schrift 229. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1978.

[6] Fa. Linde: Gasekatalog für Forschung, Entwicklung und Meßtechnik. (278–1.15).

[7] *Rau, B.:* Einfluß wechselnder Gasqualität auf den Betrieb von Gasmotoren. Motortechn. Zeitschrift (MTZ) Bd. 44 (1983) Nr. 6, S. 207/12.

[8] *Held, W. u. A. König:* Einsatz von Biogas als Kraftstoff für stationäre Motoren. In: "2. Fachgespräch Biogas", herausgegeben vom Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 1983, S. 41/44.

[9] Fa. Messer Griesheim: Ringbuch "Gase hoher Reinheit".

[10]●*Reid, R.C., J.M. Prausnitz u. T.K. Sherwood:* The properties of gases and liquids. New York: McGraw-Hill 1977.

[11] *Chueh, P.L. u. J.M. Prausnitz:* Vapor-liquid equilibria at high pressures; Calculation of critical temperatures, volumes, and pressures of nonpolar mixtures.
Am. Inst. Chem. Eng. Journal Bd. 13 (1967) Nr. 6, S. 1107/13.

[12]•*Weast, R.C. (Hrsg.):* CRC handbook of chemistry and physics. 61st Edition 1980/81.
Florida: CRC Press 1980/81.

[13]•*Kurth, K. u. A. Kochs:* Grundlagen der Gasanwendung.
Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1980.

[14]•*D'Ans, J. u. E. Lax (Hrsg.):* Taschenbuch für Chemiker und Physiker. 2. Aufl.
Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1949.

[15]•rororo Technik-Lexikon Energietechnik und Kraftmaschinen
Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag 1972.

[16] *Mollenhauer, K. u. H. Pucher:* Der Stadtgasmotor – ein umweltfreundlicher Stationärantrieb.
Motortechn. Zeitschrift (MTZ) Bd. 44 (1983) Nr. 2, S. 41/44.

[17] *Batel, W.:* Alternative Kraftstoffe für die Landwirtschaft.
Landtechnik Bd. 37 (1982) Nr. 6, S. 278/80.

[18] *Fankhauser, J. u. A. Moser:* Studie über die Eignung von Biogas als Treibstoff für Landwirtschaftstraktoren.
Schriftenreihe der Eidgen. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik FAT, Heft 18, Tänikon, 1983.

[19]•*Jantsch, F.:* Fahrzeuggeneratoren.
Berlin: Joh. Kasper & Co. 1943.

[20]•*Kotthaus, H.:* Betriebstechnisches Taschenbuch.
München: Carl Hanser 1959.

[21]•*Robinson, J.S. (Hrsg.):* Fuels from biomass. Technology and feasibility.
Park Ridge (N.Y.): Noyes Data Corporation 1980.

[22]•*Klass, D.L. (Hrsg.):* Biomass as a nonfossil fuel source.
ACS Symposium series 144.
Washington, D.C.: American Chemical Society 1981.

[23] *Dimitri, L.:* Anbau schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb: Möglichkeiten und bisherige Erfahrungen.
Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Mitteilungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt (Frankfurt) Bd. 69 (1981) S. 79/92.

[24] Gesamtkonzeption Nachwachsende Rohstoffe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Sonderheft. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1983, S. 143.

[25] *Dambroth, M.:* Nutzungsmöglichkeiten nachwachsender Rohstoffe als Chemiegrundstoffe und Energiesubstitute.
Der Förderungsdienst Bd. 30 (1982) Nr. 5, S. 129/40.

[26]•*Reinhold, F. u. W. Noack:* Laboratoriumsstudie über die Gasgewinnung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen. In: *Liebmann, H.:* Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist.
München: R. Oldenbourg 1956.

[27] *Schuchardt, F.:* Untersuchungen zum Gärverhalten von tierischen Exkrementen und Pflanzen.
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 42/47.

[28] *Kleinhanß, W.:* Ökonomische Aspekte der Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Nutzpflanzen.
Ber. über Landwirtschaft Bd. 61 (1983) H. 1, S. 109/43.

[29]•Ruhr-Stickstoff AG (Hrsg.): Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 9. Aufl.
Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1980.

[30]•Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1983.
Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1983.

[31] *Patzak, W.:* Energieeinsatz und Energieumsetzung im Bereich der Forstwirtschaft.
Ber. über Landwirtschaft Sh. 195 (1979) S. 66/77.

[32] *North, W.J., V.A. Gerard u. J.S. Kuwabara:* Biomass production by freshwater and marine macrophytes. In: *Klass, D.L.*, siehe [22].

[33] *Benemann, J.R.:* Energy from fresh and brackish water aquatic plants. In: *Klass, D.L.*, siehe [22].

[34]•Nutzung der solaren Strahlungsenergie.
Programmstudie des BMFT (Bonn).
Frankfurt/Main: Umschau-Verlag 1976.

[35] *Lucas, J. u. J.F. Molle:* Production d'énergie mechanique par gazéification de la paille.
CNEEMA Bull. Nr. 269, Juni 1980.

[36]•*Kollmann, F.:* Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Aufl., Bd. 1.
Berlin, Göttingen, Heidelberg: Verlag Springer 1951.

[37] *Klason, P.:* Ark. Kemi, Mineral., Geol. Bd. 5 (1913) Nr. 7. Entnommen aus [36] S. 268.

[38] *Soltes, E.J., A.T. Wiley u. S.-C.K. Lin:* Biomass pyrolysis – Towards an understanding of its versatility and potentials.
Biotechnology and Bioengineering Symp. No. 11 (1981) S. 125/36.

[39] *Lewellen, P.C., W.A. Peters u. J.B. Howard:* Cellulose pyrolysis kinetics and char formation mechanism.
"Symposium Papers", 16th Int. Symposium on Combustion, sponsored by the Combustion Inst. Pittsburgh, 1977, S. 1471/80.

[40] *Schulze-Lammers, P.:* Untersuchungen an einem Gegenstromgaserzeuger mit Stroh als Brennstoff.
Vortrag 41. Intern. Tagung Landtechnik, 10./11. Nov. 1983, Braunschweig.

[41] *Lindner, C.:* Vergasung von Biomasse in der Wirbelschicht.
Berichte der Kernforschungsanlage Jülich.
Jül-Conf. 46 (1981) S. 214/30.

[42] *Nitschke, E.:* Die Herstellung von Synthesegas durch Holzvergasung nach dem Rheinbraun-HT-Winklerverfahren.
Berichte der Kernforschungsanlage Jülich.
Jül-Conf. 46 (1981) S. 231/46.

[43]•2. Fachgespräch Biogas, Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig 1983.

[44] *Sahm, H.:* Biologie der Methan-Bildung.
Chem.-Ing. Techn. Bd. 53 (1981) Nr. 11, S. 854/63.

[45] *Baader, W.:* Substratspezifische Stoff-Führung bei anaeroben Verfahren zur Methan-Gewinnung.
Chem.-Ing. Techn. Bd. 54 (1982) Nr. 3, S. 222/28.

[46] *Baader, W., H.W. Orth u. F. Schuchardt:* Energie aus biologischen Umwandlungsprozessen.
Ber. über Landwirtschaft Sh. 195 (1979) S. 235/48.

[47] *Bahl, A., W. Andersch u. G. Gottschalk:* Continuous production of acetone and butanol by clostridium acetobutylicum in a two-stage phosphate limited chemostat.
European J. Appl. Microbiol. Biotechnol. Bd. 15 (1982) S. 201/205.

[48]•Energiequellen für morgen? Nichtfossile-Nichtnukleare Primärenergiequellen.
Programmstudie des BMFT (Bonn), Umschau Verlag: Frankfurt 1976.

[49] Viessmann Werke KG, Allendorf (Eder): Informationsblatt Ardola, 3/1984.

[50]•*Loewer, O.J., R.J. Black, R.C. Brook, I.J. Ross u. F. Payne:* Economic potential of on-farm biomass gasification for corn drying.
ASAE-paper No. 80-3508, St. Joseph, Michigan 1980.

[51] *Richey, C.B., J.R. Barrett u. G.H. Foster:* Biomass channel-gasification furnace.
Trans. ASAE Bd. 25 (1982) Nr. 1, S. 2/6.

[52]•*Krischer, O. u. K. Kröll:* Trocknungstechnik Bd. 1.
Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1956.

[53]•*Maltry, W. u. E. Pötke:* Landwirtschaftliche Trocknungstechnik.
Berlin: VEB Verlag Technik 1962.

[54] ASAE Standard: ASAE S248.3: Construction and rating of equipment for drying farm crops.
Agricultural Engineers Yearbook of Standards 1983, S. 349/56.

[55]•Energie aus landwirtschaftlicher Produktion.
KTBL-Schrift 273, Münster-Hiltrup: Landw.-Verlag 1981.

[56] *Ernst, H.:* Wirtschaftliche Dampf- und Wärmeerzeugung.
Die Branntweinwirtschaft. 2. Septemberheft 1980, S. 312/15.

[57] *Würch, H.:* Zur betriebstechnischen Einordnung von Biogasanlagen.
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 55/60.

[58] *Orth, H.:* Verbraucher von Biogas und ihr Einfluß auf die Auslegung einer Biogasanlage.
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 60/64.

[59]•*Kleinhanß, W.:* Wirtschaftlich zulässige Investitionen für Biogasanlagen. In: 2. Fachgespräch Biogas, hrsg. vom Institut für Technologie, FAL, Braunschweig 1983, S. 136/39.

[60] *Kloss, R.:* Planung von Biogasanlagen zur Energiebereitstellung am Beispiel eines Schweinemastbetriebes.
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 64/74.

[61] *Schulz, W.:* Kostengünstige Bauweisen. In: 2. Fachgespräch Biogas, hrsg. vom Institut für Technologie, FAL, Braunschweig 1983, S. 128/30.

[62] *Stutzer, D.:* Biogas industriell erzeugt.
VDI-Nachr. Bd. 36 (1982) Nr. 18, S. 12.

[63] *Kreipe, H.:* Biogas, seine Gewinnung und Verwertung in landwirtschaftlichen Brennereien.
Die Branntweinwirtschaft, 2. Septemberheft 1980, S. 306/12.

[64] *Eckert, K.:* Biogasgewinnung in Verbindung mit einer landwirtschaftlichen Brennerei.
Die Branntweinwirtschaft, 1. Augustheft 1981, S. 258/59.

[65] *Behr, W.:* Methangasgewinnung aus Brennereischlempe.
Die Branntweinwirtschaft. Teil I. 1. Augustheft 1980, S. 246/48; Teil II. 1. Septemberheft 1980, S. 291/92.

[66] Die Spreu vom Weizen trennen.
Hann. Land- und Forstwirtsch. Zeitung Bd. 135 (1982) Nr. 40, S. 78/79.

[67] *Isensee, E. u. R. Wenzlaff:* Nebenwirkungen der Biogaserzeugung.
Landtechnik Bd. 39 (1984) Nr. 2, S. 77/79.

[68]•*Recknagel/Sprenger:* Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik.
München, Wien: Oldenbourg 1979.

[69]•*Wenzlaff, R.:* Erfahrungen mit Biogas im praktischen Betrieb. Münster-Hiltrup: Landw.-Verlag 1981.
KTBL-Schrift 266

[70]•*Orth, H.W.:* Energieübertragung und Gasverwertung. In: 2. Fachgespräch Biogas, hrsg. vom Institut für Technologie, FAL, Braunschweig, S. 77/80.

[71] *Boustrany, K. u. D. Stokkey:* Biogas upgrading with membrane technology.
Bioenergy '84 World Conference, Juni 1984, Göteborg, Schweden, Book of Abstracts, S. 133.

[72] *Simonet, R.A.:* Neue Energiequellen – Erdgas aus Mülldeponien.
Sonderdruck Maschinenfabrik Mayer AG, CH-4707 Deitingen, 1984.

[73] *Miller, G.L. u. J.L. Smith:* Microprocessor dual-fuel diesel engine control.
Trans. ASAE Bd. 26 (1983) No. 1, S. 6/9.

[74] *Stadler, E. u. R. Studer:* Untersuchung über den Betrieb von Landwirtschaftstraktoren mit Dieselholzgas.
Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik FAT, Heft 12, Tänikon, 1981.

[75]•*Schmidt, K.:* Die Gaserzeuger. In: *List, H.:* Die Verbrennungskraftmaschine. Bd. 1, Teil 2.
Wien: Springer-Verlag 1959.

[76]•*Bussien, R.:* Automobiltechnisches Handbuch. 16. Aufl.
Berlin: Technischer Verlag Herbert Cram 1945.

[77] *Nordström, O.:* Aktuelle Arbeiten auf dem Gebiet der Ersatztreibstoffe in Schweden.
Zeitschrift Motorlastwagen Bd. 45 (1960) Nr. 18, 19, 20 und 22.

[78] *Jakobsen, J.H.L.:* Optimizing of the power and heat production from biogas.
Bioenergy '84 World Conference, Juni 1984, Göteborg, Schweden, Book of Abstracts, S. 197.

[79] *Leiker, M.:* Gasmotor und Wechselmotor sowie die gasförmigen Kraftstoffe in den letzten 30 Jahren.
Motortechn. Zeitschrift (MTZ) Bd. 26 (1965) Nr. 5, S. 195/212.

[80]•*Büttner, S.:* Biogas – An alternative fuel for automotive application. In: *Fazzolare, R.A. u. C.B. Smith (Hrsg.):* Beyond the energy crisis. Vol. III, S. 1553/60.
Oxford: Pergamon Press 1981.

[81] *Büttner, S. u. K. Maurer:* Traktor mit Biogasantrieb, Umrüstung und erste Einsatzerfahrungen.
Landtechnik Bd. 37 (1982) Nr. 6, S. 284/87.

[82] *Schuhmacher, H., G. Lepperhoff u. F. Pischinger:* Dual-fuel engine for diesel and biogas with pilot sprays.
Bioenergy '84 World Conference, Juni 1984, Göteborg, Schweden, Book of Abstracts, S. 257.

[83]•*Krause, Pillat, Zander:* Arbeitssicherheit.
Loseblattsammlung, S. 2/72–74b.
Freiburg i. Br.: Rudolf Haufe Verlag.

[84] *Maurer, K.:* Persönliche Mitteilung 1983.

[85] Persönliche Mitteilungen bei den Firmen: Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Köln, und Waukesha-Motoren, Waukesha/Milwaukee, USA, anläßlich der Hannover-Messe 1984.

[86] *Orlich, J.:* Verfügbarkeit der für eine Verdichtung geeigneten Stoffe. In: *Bossel, U.* (Hrsg.): Brikettieren und Pelletieren von Biomasse.
Tagungsbericht "Solentec" – 8./9.3.1983, Göttingen, Adelebsen: Solentec Fachbuchbetrieb 1983, S. 27/33.

[87] *Heyland, K.-U. u. S. Solansky:* Energieeinsatz und Energieumsetzung im Bereich der Pflanzenproduktion.
Ber. über Landwirtschaft Sh. 195 (1979) S. 15/30.

[88] *Strehler, A.:* Energiegewinnung aus Holz-, Stroh- und Papierbriketts. In: *Bossel, U. (Hrsg.):* Brikettieren und Pelletieren von Biomasse. Tagungsbericht "Solentec" – 8./9.3.1983, Göttingen, Adelebsen: Fachbuchvertrieb 1983, S. 127/39.

[89] *Wenner, H.-L.:* Energiebedarf und Energieanfall in der Landwirtschaft.
Landtechnik Bd. 38 (1983) Nr. 1, S. 6/10.

[90]•Aral AG (Hrsg.): Kraftstoff-Fibel. 2. Aufl.
Bochum: Aral AG 1983.

[91]•*Schuchardt, F.:* Energiebilanz der Biogasproduktion aus Pflanzen und Flüssigmist. In: *Fazzolare, R.A. u. C.B. Smith* (Hrsg.): Beyond the energy crisis. Vol. III, S. 1823/27.
Oxford: Pergamon Press 1981.

[92] *Kleinhanß, W.:* Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung aus tierischen Exkrementen.
Ber. über Landwirtschaft Bd. 58 (1980) Nr. 4, S. 560/97.

[93] *Dohne, E.:* Stromerzeugung aus Biogas.
Landtechnik Bd. 35 (1980) Nr. 8/9, S. 374/76.

[94]•*Bohn, T. u. H.-G. Eickhoff:* Wasserstoff als Rohstoff und Energiequelle.
Chem.-Ing. Techn. Bd. 48 (1976) Nr. 2, S. 133.

[95] *Fuhrmann, Th.:* Wasserstoffantrieb für Automobile.
Motortechn. Zeitschrift (MTZ) Bd. 44 (1983) Nr. 6, S. 211/12.

[96]•*Gwinner, D.:* Alternativ-Kraftstoffe für Straßenfahrzeuge der Zukunft.
VDI-Z. Bd. 118 (1976) Nr. 22, S. 1053/60.

[97] *Pester, W.:* Automobil-Forschung – ein Magnet.
VDI-Nachr. Jg. 36 (1982) Nr. 20.

[98] *Schicketanz, W.:* Bericht über eine interne Arbeitssitzung des GVC-Fachausschusses "Prozeß- und Anlagentechnik" vom 25./26. Okt. 1982 in Bad Nauheim.
Chem.-Ing. Techn. Bd. 55 (1983) Nr. 5, S. 411/17.

[99] Verfahren zur Speisung eines Brenners oder Gasmotors mit aus Carbid freigesetztem Acetylen und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.
Offenlegungsschrift DE 30 05 659 A1. Deutsches Patentamt Bundesrepublik Deutschland.

Notizen aus Forschung, Lehre, Industrie und Wirtschaft

Prof. Dr.-Ing. Adolf König 80 Jahre

Am 13.9.1984 konnte Prof. *König,* von 1953 bis 1970 Ordinarius und Direktor des Instituts für Landwirtschaftliches Maschinenwesen (heute Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik) der Christian-Albrechts-Universität in Kiel, die Vollendung seines 80. Lebensjahres feiern.

Adolf König, 1904 in Vohwinkel geboren, begann seine wissenschaftliche Laufbahn nach dem Studium des Maschinenbaus an der Technischen Hochschule München (1924/29) als Assistent (1929/34) bei Prof. Dr.-Ing. *Georg Kühne.* In dieser Zeit promovierte er 1933 mit einem Thema zur Prüfung der Gleichmäßigkeit der Saatausbringung mit Drillmaschinen. Von 1934 bis 1946 arbeitete er als Direktionsassistent für Entwicklungs- und Patentangelegenheiten bei der Fa. Rud. Sack in Leipzig. 1946 folgte er einem Ruf auf den Lehrstuhl für Landwirtschaftliche Maschinenkunde an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Halle. Nach der Flucht in die Bundesrepublik 1951 wurde *Adolf König* zunächst wieder in einem neugegründeten Zweigbetrieb der Fa. Rud. Sack in Hannover tätig, bis er 1953 als Nachfolger von Prof. *Speiser* an die Universität Kiel berufen wurde.

Seine Arbeiten*) sind geprägt von den Problemen zu Beginn der Motorisierung und der Mechanisierung der Innenwirtschaft. Zahlreiche Dissertationen zu Themen des Schleppereinsatzes, der Bodenbearbeitung und zur Förder- und Aufbereitungstechnik für Getreide und Kartoffeln entstanden unter seiner Leitung.

*) Eine umfassendere Darstellung findet sich in den Grundlagen der Landtechnik Bd. 19 (1969) Nr. 5, S. 176.

3. Internationale Konferenz "Physikalische Eigenschaften landwirtschaftlicher Stoffe" 1985 in Prag

Ausgerichtet von der Universität für Landwirtschaft (Fakultät für Mechanisierung) in Prag, findet vom 19. bis 23. August 1985 eine Konferenz statt, die sich mit den physikalischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Stoffe und ihrem Einfluß auf Gestaltung und Leistungsfähigkeit landwirtschaftlicher Maschinen und Verfahren beschäftigt.

Ziel der Konferenz ist es, in einem Treffen von Wissenschaft und Technik einen Informationsaustausch zu pflegen über die physikalischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Stoffe, über Untersuchungsmethoden bei ihrer Bestimmung und über die Anwendung der Erkenntnisse in Wissenschaft und Praxis.

Behandelt werden sollen vor allem:

1. Physikalische Eigenschaften landwirtschaftlicher Produkte – unverarbeitet und bei der Weiterverarbeitung.
2. Physikalische Eigenschaften des Bodens, einschließlich der Beziehungen Boden – Wasser und Pflanze – Wasser.
3. Mathematische und physikalische Beschreibung (auch über Modelle) technologischer Prozesse in der Landwirtschaft und den zugehörigen Industriezweigen
4. Physikalische Gesichtspunkte bei der Gestaltung von Maschinen und Verfahren; Energiebedarf, Verluste usw.
5. Forschungsmethoden zu dieser Problematik.

Nähere Auskünfte über die Konferenz erteilt :
Ph. Dr. *Jan Chlumsky,* Conference Secretary, University of Agriculture; 16521 Praha 6 – Suchdol, Chechoslovakia
oder als Ansprechpartner in der Bundesrepublik Deutschland
Prof. Dr.-Ing. *H.D. Kutzbach,* Inst. für Agrartechnik (440), Postfach 70 05 62, 7000 Stuttgart 70.