

6 BIOLOGISCHE ANAEROBVERFAHREN

6.1 Allgemeines

Der anaerobe Abbau von organischem Material erfolgt in mehreren Stufen. Jede Stufe dieses sequentiellen Abbaus erfolgt durch unterschiedliche Bakteriengruppen unter Abgabe von Zwischenprodukten. In diesem Sinne unterscheidet sich der anaerobe vom aeroben Abbau organischer Substanz.

Allgemein wird ein vierstufiges Abbaumodell für die Umwandlung von Kohlehydraten, Fetten und Proteinen in Methan und Nebenprodukte vorgestellt:

- Hydrolyse
- Versäuerung
- Acetogene Phase
- Methanbildung

Die Hydrolyse führt hochmolekulare (Polymere, Fette) bzw. ungelöste Stoffe sowie Proteine durch extrazelluläre Enzyme in gelöste Bruchstücke über.

Die gelösten organischen Bruchstücke können nunmehr ins Zellinnere der fermentierenden Bakterien gelangen und werden in der Versäuerungsphase hauptsächlich in (übelriechende) kurzkettige organische Säuren (Butter-, Propion-, Ameisen-, Valeriansäure...) aber auch in Alkohole überführt. Nebenprodukte dieses Prozesses sind H₂ und CO₂.

In der acetogenen Phase werden die organischen Säuren und Alkohole unter H₂ Bildung in Essigsäure umgebaut. Die acetogene Phase ist daher zwingend an die Vergesellschaftung mit wasserstoffverbrauchenden Mikroorganismen gebunden, die dafür sorgen, daß die H₂-Partialdrücke ausreichend gering sind. Im Falle des vierstufigen Modells wird Wasserstoff durch methanogene Bakterien gemäß

$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (reduktive Methanisierung) bzw.

$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ (Essigsäurespaltung) verbraucht.

Während alle bisher gefundenen Methanbakterien H₂ und CO₂ zu Methan umbauen können, gilt dies nur für einige wenige im Falle der Essigsäurespaltung (acetoclastische Bakterien). Obwohl diese Bakteriengruppe auch die empfindlichste der ganzen Kette ist, wird dennoch der Großteil des Methan (70%) durch Essigsäurespaltung gebildet. Es ist einsichtig, dass die Geschwindigkeit des gesamten anaeroben Abbaus organischer Substanz vom langsamsten

dieser sequentiellen Prozesse bestimmt wird. In den meisten Fällen ist die Methanisierung der geschwindigkeitsbegrenzende Schritt.

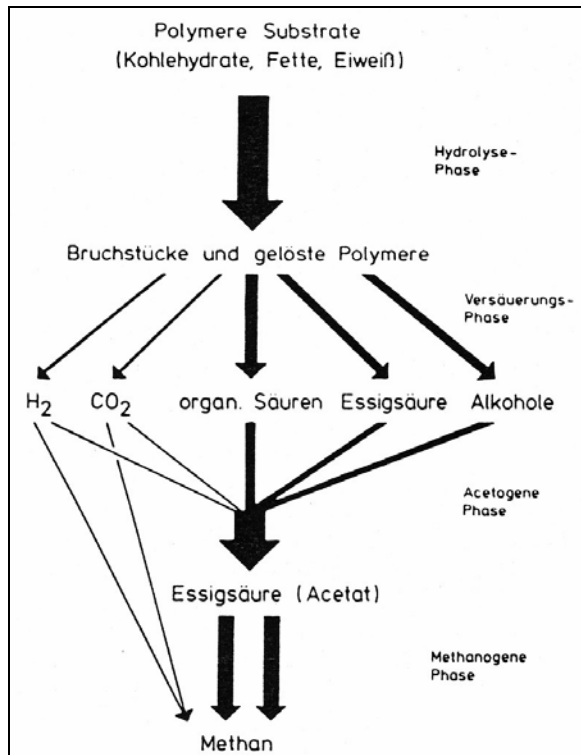


Abbildung 6-1: Schema des mehrstufigen anaeroben Abbaus (MUDRACK und KUNST, 1994)

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung des aeroben und des anaeroben Abbauprozesses

Parameter	Aerober Abbauprozess	Anaerober Abbauprozess
Temperatur	je nach Temperatur des Abwassers etwa 5 bis 20 °C	Optimum der mesophilen Bakterien 30 bis 37 °C (oftmals Beheizung erforderlich)
pH-Wert	neutral	je nach Bakterienart sauer bzw. neutral
Abbau	im Regelfall setzt ein Organismus die Inhaltsstoffe zu CO ₂ , H ₂ O und Biomasse um	Stufenweiser Abbau der Verbindungen durch mehrere Bakteriengruppen zu CO ₂ , CH ₄ und Biomasse
Generationszeiten, Wachstum	sehr schnelles Wachstum, geringe Generationszeiten (i. M. etwa 2 h); dadurch hohe Produktion an Biomasse (Überschußschlamm)	relativ langsames Wachstum (besonders der methanogenen Bakterien, abhängig vom Substrat) Generationszeiten zwischen 12 h und 15 d; dadurch sehr geringe Produktion an Biomasse (Überschußschlamm)
Prozeßtechnik, Verfahrenstechnik	einstufige Prozeßführung möglich; technische Gestaltung des Reaktionsraumes hat keine entscheidende Bedeutung für den Abbau.	mehrstufige Prozeßführung aus mikrobiologischer Sicht vorteilhaft; Prozeßführung und Reaktortechnik haben entscheidenden Einfluß auf die Leistungsfähigkeit des Verfahrens; mehrstufige Prozeßführung ist aufwendiger als einstufiger Betrieb
Bemessung, Dimensionierung	nach der Raumbelastung, Schlammbelastung oder Durchflußzeit möglich, da im Regelfall eine Bakterienart mit kurzen Generationszeiten für den Abbau ausreicht; Schlammbelastung ist definierbar, relativ geringes Schlammalter ist ausreichend	nach üblichen Kriterien nicht möglich, da verschiedene Bakterien mit sehr unterschiedlichen Generationszeiten beteiligt. Das erforderliche, hohe Schlammalter macht eine Schlammrückführung erforderlich. Bisher üblicher Bemessungswert: Raumbelastung

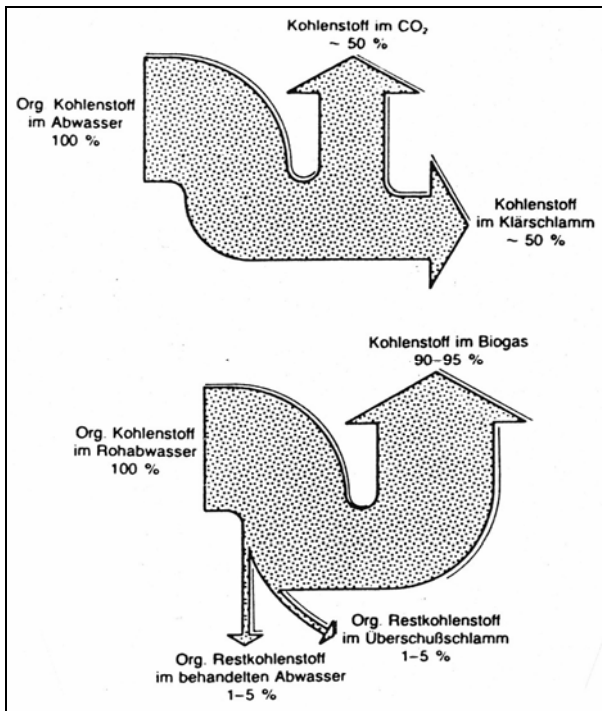
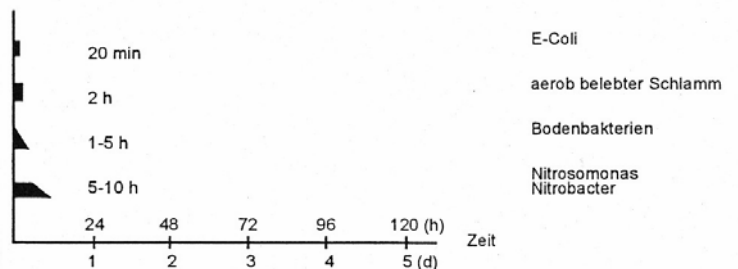


Abbildung 6-3: Kohlenstoffbilanz des aeroben und anaeroben mikrobiellen Abbaus (TEMPER et al., 1986)

Aerobe Mikroorganismen



Fakultativ und obligat anaerobe Mikroorganismen

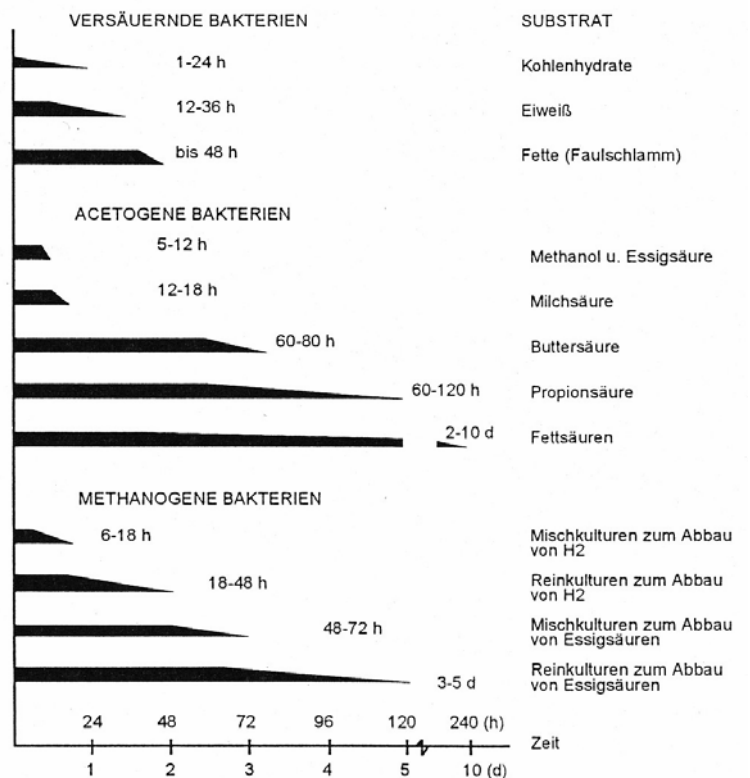


Abbildung 6-2: Gegenüberstellung von Generationszeiten aerober und anaerober Mikroorganismen

6.2 Umweltparameter (MUDRACK und KUNST, 1994)

Der anaerobe Abbauprozess hat für alle beteiligten Bakteriengruppen unterschiedliche optimale Umweltbedingungen.

für die *Temperatur* ergeben sich drei Optima:

- Die versäuernden Bakterien haben ihr Temperaturoptimum bei 30 °C, während das der mesophilen methanogenen Organismen bei 35 - 37 °C liegt. Ein weiteres Temperaturoptimum, jenes der thermophilen Mikroorganismen, liegt bei ca. 50°C.

für den *pH-Wert* ergeben sich zwei Optima:

- Für die Methanbakterien sollte ein Bereich von pH 6,8 - 7, 2 eingehalten werden, wenn eine ungehemmte Methanbildung erfolgen soll.
- Für die versäuernden Bakterien ist ein schwach saurer pH günstig.

für die *Umwälzung* der Reaktoren ergeben sich gegensätzliche Forderungen.

- Für die Methanisierung sollte durch möglichst schonende Umwälzung die Symbiose zwischen acetogenen und methanogenen Bakterien (interspecies hydrogen transfer) nicht gestört werden. Für einen optimalen Stoffwechselprozess sollte andererseits durch kräftiges Umwälzen für einen schnellen Stoffaustausch und guten Kontakt zwischen Substrat und Organismen gesorgt werden.

für die *H₂-Konzentration* die oft als Kontrollparameter vorgeschlagen wird, ergibt sich eine für die einzelnen Bakteriengruppen unterschiedliche Relevanz.

Daneben haben noch eine Reihe von toxischen oder Hemmstoffen, wie sie in Industrieabwässern häufig vorkommen (Schwermetalle, Ammonium, Schwefelwasserstoff, Sulfit), bei der anaeroben Abwasserreinigung praktische Bedeutung. Auch die Produkte des Prozesses selbst, also kurzkettenige wasserdampf-flüchtige organische Säuren haben vor allem in ihrer undissoziierten Form hemmende Wirkung auf den Prozess. Damit ist verbunden, daß der anaerobe Abbauprozess in einem labilen Gleichgewicht verläuft. Wenn die acetogene Phase einmal gestört ist und langsamer abläuft und sich dadurch die Produkte der Fermentation anreichern, braucht es Eingriffe von außen.

Tabelle 6-2: Günstige Konzentration gelöster Spurenelemente im Anaerobreaktor (ATV-FA 7.5, 1990)

Spurenelement	Konzentrationsbereich (mg/l)
Fe	1-10
Ni	0,005-0,5
Co	0,003-0,06
Mo	0,005-0,05

Tabelle 6-3: Richtwerte für den erforderlichen Spurenelementbedarf, bezogen auf den abgebauten CSB (ATV-FA 7.5, 1990)

Spurenelement	Spurenelementbedarf	
	mg/kg CSB-Abbau	(mg/l) bei 50 g CSB/l
Fe	100-2000	3-100
Ni	5-300	0,3-15
Co	5-200	0,3-10
Mo	1-4	0,05-0,2
Se	2-4	0,1-0,2
Wb	2-8	0,1-0,4

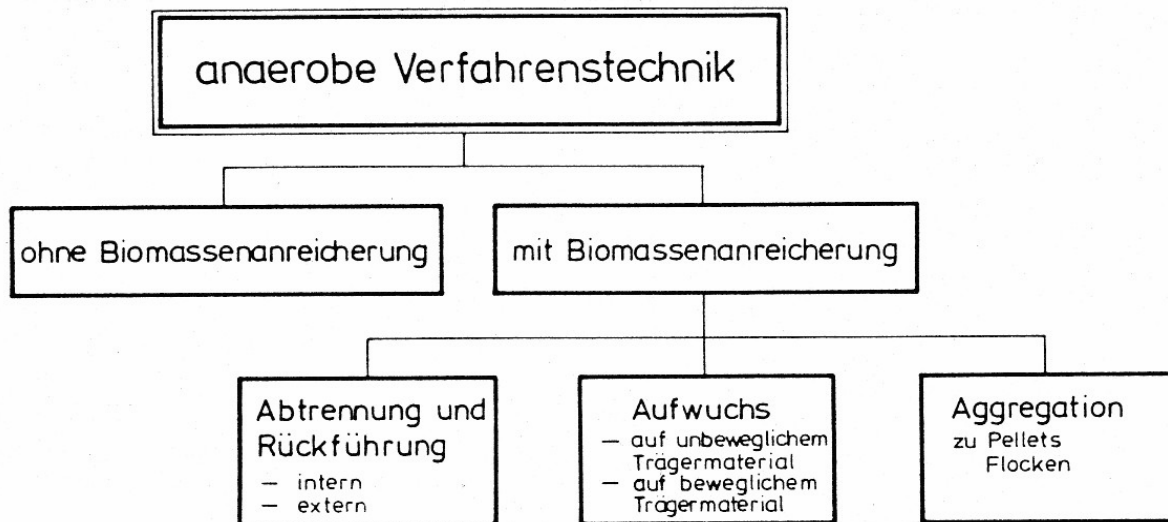
6.3 Reaktorsysteme

Abbildung 6-4: Gliederung der Verfahrenstechniken zur anaeroben biologischen Abwasserreinigung (MUDRACK und KUNST, 1994)

Die entscheidende Aufgabe von Anaerobreaktoren besteht darin die Bakterien ausreichend lange im System zu halten, also eine ausreichende Feststoffaufenthaltszeit zu gewährleisten, da sonst die am langsamsten wachsende Gruppe ausgeschwemmt wird und der Prozess zum Erliegen kommt. Daher werden Reaktoren zunächst danach unterschieden, ob die Feststoffaufenthaltszeit (t_s , Schlammalter) gleich oder größer als die hydraulische Verweilzeit (t_h) ist.

- Volldurchmischte Systeme ($t_s = t_h$)
- Systeme mit Feststoffrückhalt bzw. -rückführung ($t_s > t_h$)
- Kontaktschlammverfahren (anaerobe Belebung)
- Schlammbettverfahren
- Festbettreaktoren
- Schweb- oder Wirbelbettverfahren.
- Membranreaktoren

In einem volldurchmischten Reaktor ist die Feststoffverweilzeit gleich der hydraulischen Aufenthaltszeit. Beim Kontaktschlammverfahren ist dem volldurchmischten Reaktor ein Nachklärbecken, ähnlich dem aeroben Belebungsverfahren nachgeschaltet. Das Schlammbettverfahren (up-Flow) besteht aus einem vom Abwasser von unten nach oben

durchströmten Reaktor, in dem das Schlammbett unten konzentriert ist, und die Schlammabtrennung durch ein darüberliegendes oder nachgeschaltetes Nachklärbecken erfolgt.

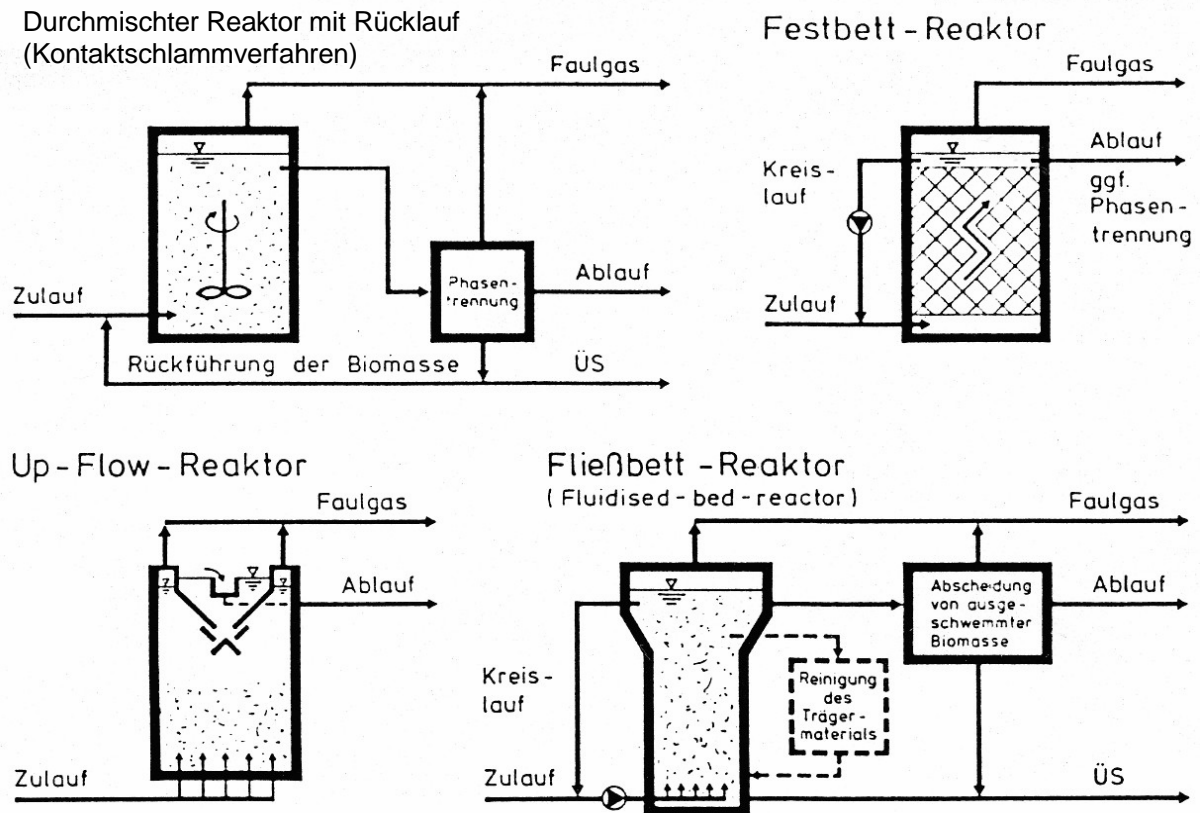


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung einiger Anaerob-Reaktoren (MUDRACK und KUNST, 1994)

6.4 Ergebnisse

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Methangärung diverser Abläufe der Lebensmittelindustrie (BRAUN, 1982)

Ablauf	θ (d)	B_R ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	Y_G ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	P_G ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	η_{OTS} (%)	η_{CSB} (%)	η_{BSB_5} (%)	Autor
Schlachthof	0,69– 2,94	–	–	–	–	–	88 –96	Anderson und Donnelly (1977)
Schlachthof	8,5	–	0,47 BSB ₅	0,1	41 –67	–	88 –93	Black et al. (1974)
Schlachthof	14 –25	3,5– 4,2 OTS	0,46 OTS	1,6–2,1	46	–	–	de Favieri et al. (1981)
Schlachthof	0,5	3,5 CSB	0,27 CSB ²	–	–	80	–	Sayed et al. (1981)
Schlachthof	3 –10	5,3–16,7 OTS	0,22–0,35 OTS	1,9–3,7	–	–	–	Mathisen (1981)
Bohnenblanchierung	4,2	3,5– 4,5 OTS	0,6 OTS ¹	1,6–2	75	88	–	v. d. Berg und Lentz (1977)
Birnschälung	5	– “ –	– “ –	– “ –	63	91	–	– “ –
Kartoffelschälung	9	– “ –	– “ –	– “ –	65	62	–	– “ –
Obst- und Gemüseverarbeitung	32	0,8– 1,6 OTS	0,3 –0,58 OTS	–	–	–	–	Knol et al. (1978)
Spinat- und Porreeblanchierung	4 –12	–	–	–	48 –85	–	90,8–92,7	Schlegel (1975)
Obst- und Gemüseverarbeitung	25	4 TS	0,45 TS	1,8	–	–	–	Lane (1979)
Erbsenabfälle	15	–	0,42 OTS	–	–	–	–	Braun (1981a)
Olivenölextraktion	20 –25	1,2– 1,5 TS	0,7 BSB ³	–	–	–	80 –85	Fiestas et al. (1981)
Palmölablauge	10 –30	1,4– 4,2 OTS	–	–	52,4–72,2	64,5–80	87 –95,3	Morris (1980)
Molke	2 – 5	6,4 BSB	0,86 BSB	5,5	–	–	92	Parker und Skerry (1975)
Kartoffelstärkeerzeugung	–	7,5 CSB	0,32–0,38 CSB ²	–	–	90 –95	95 –98	van Bellegem (1980)
Hefefabrik	0,45– 0,7	1 – 8 CSB	–	0,5–4	60 –70	60 –70	–	Hansford und Richter (1974)
Hefefabrik	3,5 – 7	1,8– 5,75 BSB	0,58–0,72 BSB ³	–	–	–	75 –93	Köhler (1973, 1974)
Zuckerfabrik	0,17– 1	12 –16,5 CSB	–	–	–	87 –97 ⁴	90 –98 ⁴	Lettinga et al. (1980); Pette u. Versprille (1981)

¹ bezogen auf abgeb. OTS

² bezogen auf abgeb. CSB

³ bezogen auf abgeb. BSB₅

⁴ nach Zentrifugation

Legende: θ Aufenthaltszeit
 B_R Raumbelastung
 Y_G Ertrag
 P_G Gasproduktion
 η Abbauleistung

Tabelle 6-5: Verschiedene Daten zu Biogasanlagen (MUDRACK und KUNST, 1982)

Theoretische Gasausbeuten		
Stoffart	% CH ₄	Gasausbeute $\frac{\text{NM}^3}{\text{kg o. TS}_{\text{abg}}}$
Kohlenhydrat	50	0,886
Fett	70	1,535
Protein	84	0,587

Gasmengen und Faulzeiten für landwirtschaftliche Stoffe bei 30 °C Faulraumtemperatur (nach Baader u.a., 1978)

Faulgut	Bei vollständiger Ausfäulung			Gasmenge in % der Gesamtmenge nach Faulzeit von Tagen			
	Gasmenge bezogen auf Gesamt- organ. Trockenmasse		Faulzeit in Tagen	Gehalt CH ₄			
	ml/g	ml/g			%	10	15
Rinderkot	237	315	117	80	24	36	48
Schweinekot	257	415	115	81	40	57	68
Stroh 30 mm lg.	357	383	123	80	29	38	45
Stroh 2 mm lg.	393	423	80	81	51	67	77
Kartoffelkraut	526	606	53	75	85	90	92
Z.-Rübenblätter	456	501	14	85	99	100	100
Gras	490	557	24	84	87	96	99

Biogasproduktion aus pflanzlichen Rohmaterialien (nach Braun, 1982)

Material	Hydraul. Verweilzeit (d)	Raumbelastung (kg TS/m ³ · d)	Gasausbeute (m ³ /kg TS)
Seegras	20	2	0,1
Seetang	20	2	0,17
Wasserhyazinthe	10	4	0,1
Frischwasseralgen	10	4	0,25
Abwasserteichalgen	3-30	1,4-11,2	0,26-0,5
Silage	15	6,7	0,45