

BIOGAS

regional, fair, klimaneutral



SCHRIFTENREIHE
NACHWACHSENDE
ROHSTOFFE

39

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IMPRESSUM

Herausgeber

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
OT Gülzow, Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Tel.: 03843/6930-0
Fax: 03843/6930-102
info@fnr.de
www.fnr.de

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Autor

em. Prof. Dipl.-Ing. Dr. agr. habil. Bernd Linke

Für die Ergebnisdarstellung mit Schlussfolgerungen, Konzepten und fachlichen Empfehlungen sowie die Beachtung etwaiger Autorenrechte sind ausschließlich die Verfasser zuständig. Daher können mögliche Fragen, Beanstandungen oder Rechtsansprüche u. Ä. nur von den Verfassern bearbeitet werden. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen und dergleichen in dieser Veröffentlichung berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei betrachtet und damit von jedermann benutzt werden dürften. Ebenso wenig ist zu entnehmen, ob Patente oder Gebrauchsmusterschutz vorliegen. Die aufgeführten Bewertungen und Vorschläge geben nicht unbedingt die Meinung des Herausgebers wieder.

Alle Rechte vorbehalten.

Titelbild

Countrypixel/Adobe.Stock

Gestaltung/Realisierung

www.tangram.de, Rostock

Artikelnummer 1.185

FNR 2021

ISBN 978-3-942147-45-3

BIOGAS

regional, fair, klimaneutral

Schriftenreihe Nachhaltige Rohstoffe Band 39



INHALT

| | |
|--|-----------|
| Verwendete Abkürzungen | 4 |
| Symbolverzeichnis | 5 |
| 1 Einführung | 8 |
| 2 Gärsubstrate für die Biogasgewinnung | 9 |
| 2.1 Gülle und Stallmist | 9 |
| 2.2 Kommunale Abfälle aus der Biotonne | 9 |
| 2.3 Nachwachsende Rohstoffe | 9 |
| 2.4 Kommunale Klärschlämme | 10 |
| 2.5 Abwässer aus der Nahrungsmittelindustrie | 10 |
| 3 Nutzung von Biogas | 11 |
| 4 Mikrobiologie und Grundlagen der Biogasgewinnung | 12 |
| 4.1 Biogas als Endprodukt des anaeroben Stoffwechsels | 12 |
| 4.2 Physiologie und Milieueinflüsse | 15 |
| 5 Verfahren zur Biogasgewinnung | 19 |
| 5.1 Klärschlämme aus der Abwasserbehandlung | 19 |
| 5.2 Kommunale Abfälle aus der Biotonne | 20 |
| 5.2.1 DRANCO-Verfahren | 20 |
| 5.2.2 KOMPOGAS-Verfahren | 21 |
| 5.2.3 BEKON-Verfahren | 22 |
| 5.2.4. GICON-Verfahren | 23 |
| 5.3 Abwässer aus der Nahrungsmittelindustrie | 24 |
| 5.4 Gülle, Stallmist und nachwachsende Rohstoffe | 25 |
| 6 Bemessungsgrundlagen | 27 |
| 6.1 Bemessungs- und Leistungsparameter | 27 |
| 6.2 Einfluss von Verweilzeit und Raumbelastung auf die Biogasproduktion | 29 |
| 6.3 Modell für die Berechnung der Biogasbildung im Fermenter und im Gärrestlager | 31 |
| 6.3.1 Biogas-/Methanausbeute im Gärsubstrat-Input | 34 |
| 6.3.2 Biogas-/Methanausbeute im Fermenter | 35 |
| 6.3.3 Biogas-/Methanausbeute im Gärrestlager | 38 |
| 6.3.4 Kofermentation | 43 |
| 7 Feststoffvergärung – Ergebnisse aus Labor- und Pilotversuchen | 47 |
| 7.1 Satzweise Feststoffvergärung mit Impfmateriale | 47 |
| 7.2 Satzweise 2-phasige Feststoffvergärung | 51 |
| 7.3 Kontinuierliche 2-phasige Feststoffvergärung | 53 |
| 7.3.1 Aufstromverfahren | 53 |
| 7.3.2 Schwimmbettverfahren | 54 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 8 | Verfahrenstechnische Berechnungen | 60 |
| 8.1 | Gaskomponenten im Biogas | 60 |
| 8.2 | Umrechnung der Biogasmenge auf Normvolumen | 61 |
| 8.3 | Massebilanz in Biogasanlagen | 62 |
| 8.3.1 | Masse von Biogas | 62 |
| 8.3.2 | Fest-Flüssig-Trennung von Gärresten | 63 |
| 9 | Biogas, ein Beitrag zu einer nachhaltigen Energie- und Stoffwirtschaft | 65 |
| 9.1 | Vom Stromeinspeisegesetz zum Erneuerbare-Energie Gesetz (EEG) | 65 |
| 9.2 | Landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung | 67 |
| 9.3 | Biogas im Ökolandbau | 68 |
| 9.4 | Anlagen zur Biomethanproduktion | 69 |
| 9.5 | Biogas in Bioenergiedörfern | 73 |
| 9.6 | Biogas in Stadtwerken | 74 |
| 9.7 | Biogas in Kombination mit anderen Erneuerbaren Energien | 75 |
| 10 | Fazit | 79 |
| | Literaturverzeichnis | 83 |
| | Abbildungsverzeichnis | 93 |
| | Tabellenverzeichnis | 96 |

VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

| | |
|--------------------------------|--|
| AF | Anaerobfilter |
| AFR | Austromfeststoffreaktor |
| ATB | Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie Potsdam-Bornim |
| BCN | Biogas-Crops-Net |
| BEKON | Verfahren zur Biogasgewinnung aus organischen Feststoffen |
| BHKW | Blockheizkraftwerk |
| BIOPAQ®UASB | Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reaktor der Firma BIOPAQ |
| BM | Beschickungsmuster |
| BMEL | Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft |
| BTU | Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg |
| CaCO ₃ | Calciumcarbonat |
| CH ₄ | Methan |
| CO | Kohlenmonoxid |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| DRANCO | Dry Anaerobic Composting |
| EEG | Erneuerbare-Energie Gesetz |
| EUROSOLAR | Europäische Vereinigung für Erneuerbare Energien e. V. |
| EWG | Einwohnergleichwert, Grad für die Verschmutzung des Abwassers |
| F | Fermenter |
| FM | Frischmasse |
| FNR | Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe |
| FOS | Flüchtige organische Säuren |
| GICON | Satzweise Verfahren zur Biogasgewinnung |
| GPS | Ganzpflanzensilage |
| H ₂ CO ₃ | Kohlensäure |
| H ₂ O | Wasser |
| HCO ₃ ⁻ | Hydrogencarbonation |
| HR | Hydrolysereaktor |
| INES | Initiative Erdgasspeicher |
| IWES | Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik |
| IZES | Institut für Zukunfts Energie Systeme |
| KOMPOGAS | Anerobes Kompostierungsverfahren |
| KW | Kilowatt |
| KWh | Kilowattstunden |
| KWK | Kraft-Wärme Kopplung |
| L | Lager für Gärrest |
| Ma. % | Masseprozent |
| MTO | Methanol-zu-Olefinen |
| MW | Megawatt |
| NawaRo | Nachwachsende Rohstoffe |
| N _{ges} , oder TN | Gesamt-Stickstoff nach Kjeldahl |
| NH ₃ | Ammoniak |
| NH ₄ ⁺ | Amoniumionen |
| Nm ³ | Normkubikmeter Gas |
| OH ⁻ | Hydroxylionen |
| oS | organische Substanz |
| oTS | organische Trockensubstanz |
| PtG | Power-to-Gas |

| | |
|--------|---|
| SBF | Schwimmbettfermenter |
| SIG-EE | Sektorenkopplungs- und Innovationsgesetz für Erneuerbare Energien |
| SOEC | Festoxid-Elektrolyse (engl.) |
| TAC | Totales Anorganisches Carbonat |
| THG | Treibhausgas |
| TS | Trockensubstanz |
| TWh | Terrawattstunden |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| Vol.% | Volumenprozent |
| ZSW | Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung |

SYMBOLVERZEICHNIS

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|---------------------------------|---|---|
| B_R | $\text{kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$ | oS-Raubelastung des Fermenters |
| c_0 | $\text{kg oS t}^{-1}\text{ FM}$ | Substrat/- oS-Zulaufkonzentration zum Fermenter |
| c, c_t | g l^{-1} | Substrat/- oS Konzentration im Fermenter zur Zeit t |
| c_Z^{TS} | $\text{kg TS t}^{-1}\text{ FM}$ | TS-Konzentration im Zulauf Separator |
| $c_{\text{Fest.}}^{\text{TS}}$ | $\text{kg TS t}^{-1}\text{ FM}$ | TS-Konzentration im abgepresstem Feststoff |
| $c_{\text{Flüss.}}^{\text{TS}}$ | $\text{kg TS t}^{-1}\text{ FM}$ | TS-Konzentration in der abgepressten Flüssigkeit |
| c_{Ac} | g l^{-1} oder mg l^{-1} | Konzentration der gesamten Essigsäure |
| c_{HAc} | mg l^{-1} | Konzentration der nicht dissoziierten Essigsäure |
| c_{KS} | g l^{-1} oder mg l^{-1} | Konzentration an flüchtigen Karbonsäuren |
| E_A | kJ Mol^{-1} | Aktivierungsenergie |
| E_{FM} | $\text{t FM ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ | Frischmasseertrag je Hektar von nachwachsenden Rohstoffen |
| E_{TS} | $\text{t TSha}^{-1}\text{a}^{-1}$ | Trockensubstanzertrag je Hektar nachwachsende Rohstoffe |
| f_T | keine | Temperaturterm |
| k_1, k_2 | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante $k_1 > k_2$ |
| K_{CH_4} | $\text{€ m}^{-3}\text{CH}_4$ | Kosten je Kubikmeter Methan aus nachwachsenden Rohstoffen |
| $k_{\text{D/Ac}}$ | mol l^{-1} | Dissoziationskonstanten Essigsäure |
| $K_{\text{el.}}$ | € kWh^{-1} | Kosten für Strom aus Anbau von nachwachsenden Rohstoffen |
| k_F^{Crops} | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Crops, Fermenter |
| $k_F^{\text{Gülle}}$ | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Gülle, Fermenter |
| k_F^{Mix} | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Mix, Fermenter |
| k_F | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Fermenter |
| K_F | $\text{€ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ | Kosten je Hektar für Anbau von nachwachsenden Rohstoffen |
| $k_{\text{L}/22^\circ}$ | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Gärrestlager 22 °C |

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|------------------------|--|--|
| $k_{L/37^\circ}$ | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Gärrestlager 37 °C |
| K_{TS} | $\text{€ t}^{-1} \text{TS}$ | Kosten je Tonne TS für Anbau von nachwachsenden Rohstoffen |
| m_0 | $\text{t d}^{-1} \text{FM}$ | Zulaufmenge, Massestrom |
| m_B^{F+L} | $\text{kg t}^{-1} \text{FM}$ | Masse Biogas aus Fermenter und Gärrestlager |
| M_{CH_4} | $\text{gl}^{-1}/\text{kg m}^{-3}$ | Molare Masse CH_4 (16) |
| M_{CO_2} | $\text{gl}^{-1}/\text{kg m}^{-3}$ | Molare Masse CO_2 (44) |
| $m_{Fest.}^{FM}$ | keine | Frischmasse Feststoff vom Zulauf Separator, <1 oder <100 % |
| $m_{Flüss.}^{FM}$ | keine | Frischmasse Feststoff vom Zulauf Separator, <1 oder <100 % |
| m_Z^{FM} | keine | Frischmasse Zulauf, 1 oder 100 % |
| p_0 | mbar | Normdruck (1013,25 mbar) |
| p_1 | mbar | Gasdruck im Biogas bei V_1 |
| $p_{CH_4}^B$ | keine | Vol.-Anteil CH_4 < 1 im Biogas aus Fermenter und Gärrestlager |
| $p_{CO_2}^B$ | keine | Vol.-Anteil CO_2 < 1 im Biogas aus Fermenter und Gärrestlager |
| p_i | keine | oS-Anteil < 1 aus Impfmateriale im Mix mit Feststoffen |
| $p_{oS/Imp}^{Crops}$ | keine | oS-Anteil < 1 aus Pflanzen im Mix mit Gülle |
| p_w | mbar | Dampfdruck des Wassers bei T_1 |
| pK_A | mol l^{-1} | Säurekonstante |
| Q_{B/CH_4} | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | Biogas-/Methanmenge |
| Q_B^{F+L} | m^3 | Biogasmenge aus Fermenter und Gärrestlager |
| r_B^m | $\text{m}^3 \text{t}^{-1} \text{FMd}^{-1}$ | Biogasbildungsrate aus Mix von Impfmateriale und Feststoffen |
| r_{B/CH_4}^F | $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ | Biogas-/Methanbildungsrate Fermenter |
| T_0 | K | Normtemperatur (273,15 K) |
| T_1 | K | Temperatur des Biogases |
| T_1, T_2 | K | absolute Temperatur |
| t_m | d | mittlere hydraulische Verweilzeit |
| V_0 | m^3 | Volumen Biogas im Normzustand |
| V_1 | m^3 | Volumen Biogas gemessen bei T_1 und p_1 (m^3) |
| V_F/V_R | m^3 | Volumen Biogasfermenter/Rührkesselreaktor |
| V_m | l mol^{-1} | Molvolumen idealer Gase (22,4) |
| y_{B/CH_4}^F | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Biogas-/Methan ausbeute Fermenter |
| y_{B/CH_4}^L | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | tatsächliche Biogas-/Methan ausbeute im Gärrest |
| y_{B/CH_4}^{max} | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Maximale Biogas-/Methan ausbeute eines Gärsubstrates |
| $y_{CH_4}^{max/L}$ | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Maximale Methan ausbeute im Gärrest |
| $y_{B/CH_4}^{max/L}$ | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Maximal mögliche Biogas-/Methan ausbeute im Gärrest |
| $y_{CH_4}^{max/Crops}$ | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Maximale Methan ausbeute Pflanzen (crops) |
| $y_{CH_4}^{max/Gülle}$ | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Maximale Methan ausbeute Gülle |
| $y_{CH_4}^{max/Mix}$ | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Maximale Methan ausbeute im Mix aus Gülle und Pflanzen |
| $y_{CH_4}^{Mix}$ | $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oS}$ | Methan ausbeute Mix aus Pflanzen (crops) und Gülle |

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|------------|-----------------------|--|
| Y_{CH_4} | $m^3 t^{-1} TS$ | Methanausbeute je Tonne TS aus nachwachsenden Rohstoffen |
| $-dc$ | $g l^{-1}$ | Differential der Substratkonzentration |
| a, b, c | keine | Werte der Kurvenanpassung nach Hill oder Chapman |
| c | $kg oS t^{-1} FM$ | oS-Ablaufkonzentration Fermenter |
| D | d^{-1} | Verdünnungsgeschwindigkeit $D=1/t_m$ |
| dt | d | Differential der Zeit |
| k | d^{-1} | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante 1. Ordnung |
| p | keine | absoluter Anteil y_{B/CH_4}^F an y_{B/CH_4}^{max} |
| R | $kJ kMol^{-1} K^{-1}$ | Gaskonstante |
| $r(c)$ | $g l^{-1}d^{-1}$ | Geschwindigkeit des Substratabbaus |
| η | < 1 | elektrischer Wirkungsgrad des BHKW, hier 0,38 |

1 EINFÜHRUNG

Die Biogasbildung, auch unter dem Begriff „Methanogenese“ bekannt, ist ein zentraler Bestandteil des Kohlenstoffzyklus der Erde. Biogas besteht überwiegend aus Methan und Kohlendioxid und ist das Endprodukt in diesem von Mikroorganismen und Archaeen dominierten Kohlenstoffzyklus. Da diese Gase wirksame Treibhausgase sind, hat die Methanogenese auch bei der Vermeidung der globalen Erwärmung an Bedeutung gewonnen. Eine Schlüsselstellung hat die Bildung von Biogas im Verlauf der anaeroben Nahrungskette, da die Bildung von Methan und Kohlendioxid aus Wasserstoff und organischen Säuren das Wachstum vieler in der Natur vorkommender und für die Zersetzung von organischen Substanzen notwendigen syntrophen Bakterien überhaupt erst ermöglicht [1].

Biogas ist eine wichtige Säule des zukünftigen Energiesystems, da Biogas speicherbar, flexibel nutzbar und grundlastfähig ist. Biogas kann Energie auch dann produzieren, wenn Solar- und Windenergie nicht in ausreichender Menge verfügbar sind. Diese Vorzüge gilt es bei der Weiterentwicklung unserer Energieversorgung zu nutzen und eine möglichst effiziente und nachhaltige Biogasproduktion zu gewährleisten. Ohne den bedeutenden Beitrag des Energieträgers Biogas aus Biomasse sind die ehrgeizigen Ziele, die sich die Bundesregierung bei der Energiewende mit Blick auch auf Klimaschutz und Versorgungssicherheit gesetzt hat, kaum zu erreichen [2].

Nach Angaben des Umweltbundesamtes betrug 2020 die Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien insgesamt 251 TWh. Das sind 45,4 Prozent des Bruttostromverbrauchs in Deutschland. Davon entfallen auf die Verstromung von Biogas 11,4 % und auf die Verstromung von Biomethan 1,0 % [3]. Neben der Bereitstellung eines erneuerbaren Energieträgers leistet die Biogasgewinnung auch einen wichtigen Beitrag zur Schaffung und Schließung von Stoffkreisläufen, indem die anfallenden Gärreste mit verbesserten hygienischen Eigenschaften zum Beispiel bei Gülle, Stallmist oder Bioabfällen als wertvolle organische Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden können.

2 GÄRSUBSTRATE FÜR DIE BIOGASGEWINNUNG

Als Gärsubstrate sind alle organischen Verbindungen geeignet, die einem mikrobiellem Abbau zugänglich sind, z. B. aus der Landwirtschaft in Form von Gülle und Stallmist, aus Abfällen der Biotonne, Biomasse aus der Landschaftspflege oder aus dem Anbau nachwachsender Rohstoffe.

2.1 Gülle und Stallmist

Die Tierhaltung trägt nach wie vor maßgeblich zur Emission von Treibhausgasen aus der Landwirtschaft durch die Lagerung und Ausbringung von Gülle bei. In der Landwirtschaft werden mehr als 70% der Gülle unbehandelt gelagert und auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht. Durch eine gesteigerte Vergärung von Gülle in gasdichten Fermentern und Lagerbehältern könnten sowohl die Treibhausgasemissionen aus der Tierhaltung in der Landwirtschaft reduziert als auch zusätzlich erneuerbare Energie bereitgestellt werden. Das erschließbare Potential wird mit etwa 50 Mio. Tonnen Gülle und Stallmist mit einer jährlichen Stromproduktion von 4 TWh veranschlagt [4].

2.2 Kommunale Abfälle aus der Biotonne

Jedes Jahr landen rund 5 Millionen Tonnen organischer Küchenabfälle im Hausmüll, sei es aus Gedankenlosigkeit der Verbraucher oder weil die Kommunen trotz gesetzlicher Pflicht noch keine Biotonne bereitgestellt haben. Konservativ geschätzt könnten durch eine bessere Erfassung etwa fünf Millionen Tonnen Bioabfälle in Biogasanlagen verwertet werden. Das entspricht etwa der Energiemenge von Biogas aus Mais der auf einer Fläche der Größe von Berlin mit etwa 80.000 Hektar angebaut wird [5].

2.3 Nachwachsende Rohstoffe

Jahr 2020 wurden auf etwa 1,55 Millionen Hektar nachwachsende Rohstoffe für die Biogasproduktion angebaut. Das entspricht etwa acht Prozent der gesamten Landwirtschaftsfläche Deutschlands. Hierbei dominiert nach wie vor Silomais mit rund 65 Prozent, weitere bedeutende Einsatzstoffe sind Ganzpflanzensilagen aus Gras, Getreide, Leguminosen und Zuckerrüben. Um die Ausweitung des Maisanbaus zur Biogaserzeugung zu begrenzen, hat die Bundesregierung bereits mit der EEG-Novelle 2012 die Einsatzmöglichkeiten von Mais deutlich reduziert. Zudem wurde der Fokus auf den verstärkten Einsatz von Reststoffen, wie Gülle und Mist sowie von alternativen Energiepflanzen, z. B. Silphie oder Wildkräuter gelegt [2].

2.4 Kommunale Klärschlämme

Bei der Behandlung von kommunalen Abwässern fallen Klärschlämme an, die in geschlossenen Faulbehältern behandelt werden. Laut einer Studie des deutschen Umweltbundesamtes (UBA), in der Daten von 1.150 Kläranlagen in Deutschland ausgewertet wurden, beträgt die tägliche Faulgasproduktion je Einwohner 19,6 Liter. Da der Methangehalt des Faulgases 65 % beträgt, können aus dem Abwasser je Einwohner täglich 12,7 Liter Methan gewonnen werden [6]. Das Faulgas wird jedoch überwiegend zur Deckung des Strom- und Wärmebedarfs auf den Kläranlagen eingesetzt und hatte, gemessen an der Stromerzeugung aus Biomasse im Jahr 2017 nur einen Anteil 2,9 % [7].

2.5 Abwässer aus der Nahrungsmittelindustrie

Die Nahrungsmittelindustrie gehört zu den fünf größten Branchen in Deutschland. Das Trocknen, Garen und Kühlen von Lebensmitteln ist energieintensiv und belastet Ressourcen und das Klima. Bei der Produktion von Nahrungsmitteln entstehen nur wenige feste Abfälle. Diese Abfälle werden als Rohstoffe für andere Produkte weiter genutzt, direkt als Tierfutter bereitgestellt, als organischer Dünger in der Landwirtschaft oder in Biogasanlagen verwertet. Als Folge der Verarbeitungsprozesse wie etwa das Blanchieren sowie der Hygieneanforderungen ist der Bedarf an Wasser mit Trinkwasserqualität sehr groß und das Abwasser häufig stark mit organischen Inhaltsstoffen belastet [8].

Wegen der hohen Konzentration an fäulnisfähigen organischen Verbindungen, ausgedrückt als „Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)“ zwischen 2 und 40 kg CSB/m³ Abwasser ist eine direkte Einleitung in eine kommunale Kläranlage wegen Überlastung nicht möglich und auch nicht sinnvoll. Da durch den Verarbeitungsprozess die Abwässer in der Regel warm sind, können sie direkt in speziellen Fermentern zur Methanergewinnung genutzt werden. Dabei handelt es sich um Fermenter mit Biomasserückhaltung, die eine hohe Leistungsfähigkeit besitzen. Für Abwässer z. B. aus einer Käserei im Allgäu mit einer CSB-Konzentration von 2,8 kg/m³ können täglich aus 1.600 m³ Abwasser 1.350 m³ Methan erzeugt werden. Das entspricht etwa der Menge von Erdgas, sodass der Bedarf für fossile Energieträger für den Betrieb der Käserei reduziert werden kann [9].

3 NUTZUNG VON BIOGAS

Der Großteil der Biogasanlagen nutzt das erzeugte Biogas vor Ort. Das heißt, das Biogas wird direkt am Entstehungsort mittels Kraft-Wärme-Kopplungsprozess (KWK) in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zu Strom und Wärme umgewandelt. Dabei kommen Verbrennungsmotoren in Form von Gas-Otto-, oder Zündstrahl-, Dieselmotoren zum Einsatz. Von Biomethan spricht man, wenn Rohbiogas nach der Aufbereitung etwa die gleichen verbrennungstechnischen Eigenschaften wie Erdgas aufweist und ins Gasnetz eingespeist werden kann. 2018 haben 213 Anlagen mit einer Kapazität von 1.169 Mio. Nm³ pro Jahr eine Menge von 10 TWh Biomethan in das Gasnetz eingespeist. Das entspricht rund einem Prozent des deutschen Erdgasverbrauchs. Acht Anlagen befinden sich im Bau und neun weitere sind in der Planung. Neben kommunalen und industriellen Abfällen, organischen Reststoffen aus der Tierhaltung wie Gülle und Stallmist bietet die Landwirtschaft mit Energiepflanzen und Stroh das größte Potential einer zukünftigen Nutzung. Zu dessen Erschließung könnte ein Großteil der bestehenden Biogasanlagen auf Einspeisung umgerüstet werden. Weitere Reserven liegen in Effizienzsteigerungen und Repowering der Anlagen- und Prozesstechnik bestehender und neuer Anlagen. Bis 2030 könnten bis zu 10,3 Milliarden m³ Biogas pro Jahr in das deutsche Gasnetz eingespeist werden [10].

Bei einem jährlichen Erdgasverbrauch nach Angaben des Statistik Portals „Statista“ von derzeit 88 Milliarden Kubikmeter in Deutschland sind das etwa 11 %. Die nationalen und europäischen Anforderungen an Gewässer- und Bodenschutz werden einerseits mit einem gewässerverträglichen Anbau von Energiepflanzen, andererseits mit einer Erhöhung der Energieeffizienz einbezogen und berücksichtigt, um eine nachhaltige Bewirtschaftung zu gewährleisten [2].

4 MIKROBIOLOGIE UND GRUNDLAGEN DER BIOGASGEWINNUNG

4.1 Biogas als Endprodukt des anaeroben Stoffwechsels

Die Anfänge zur Erforschung der Biogasbildung lassen sich bis auf das Jahr 1776 zurückverfolgen als der Italienische Physiker ALESSANDRO VOLTA sein klassisches Experiment durchführte, indem er das Sediment eines flachen Sees entnahm, das entweichende Gas sammelte und ein entflammbares Gas nachwies (Abb. 1). Der englische Physiker FARADAY identifizierte im Jahr 1821 Methan als Kohlenwasserstoff, indem er mit Sumpfgas experimentierte. Im Rahmen seiner Doktorarbeit entwickelte SOEHNGEN aus den Niederlanden (Abb. 1) als erster Forscher eine Apparatur, mit der man unter Laborbedingungen die Biogasbildung untersuchen konnte [11]. Auch der französische Bakteriologe PASTEUR machte Versuche mit Biogas, das aus Mist gewonnen wurde. Er entdeckte 1884 den mikrobiellen Ursprung des Methans und schlug erstmals vor, den Pferdemist des Pariser Fuhrparks zur Gasproduktion für die Pariser Straßenbeleuchtung zu verwenden [12].



Abb. 1: Nachweis eines brennbaren Gases aus Sedimenten von ALESSANDRO VOLTA (links) und Apparatur von SOEHNGEN für Laborversuche unter Laborbedingungen (rechts) [11].

Der Abbau komplexer organischer Verbindungen zu Biogas erfolgt durch einen mehrstufigen biochemischen Prozess, der heute als 4-Stufen Modell bekannt ist. In der ersten Phase des anaeroben Abbaus werden die hochmolekularen Substanzen Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße durch fakultativ und obligat anaerobe Mikroorganismen in niedermolekulare lösliche Bruchstücke zerlegt, wie z. B. Einfachzucker, langkettige Fettsäuren, Glycerin und Aminosäuren. Diese Umwandlung erfolgt durch extrazelluläre Enzyme (Hydrolasen) der an der Hydrolyse (1) beteiligten Bakterien (Abb. 2).

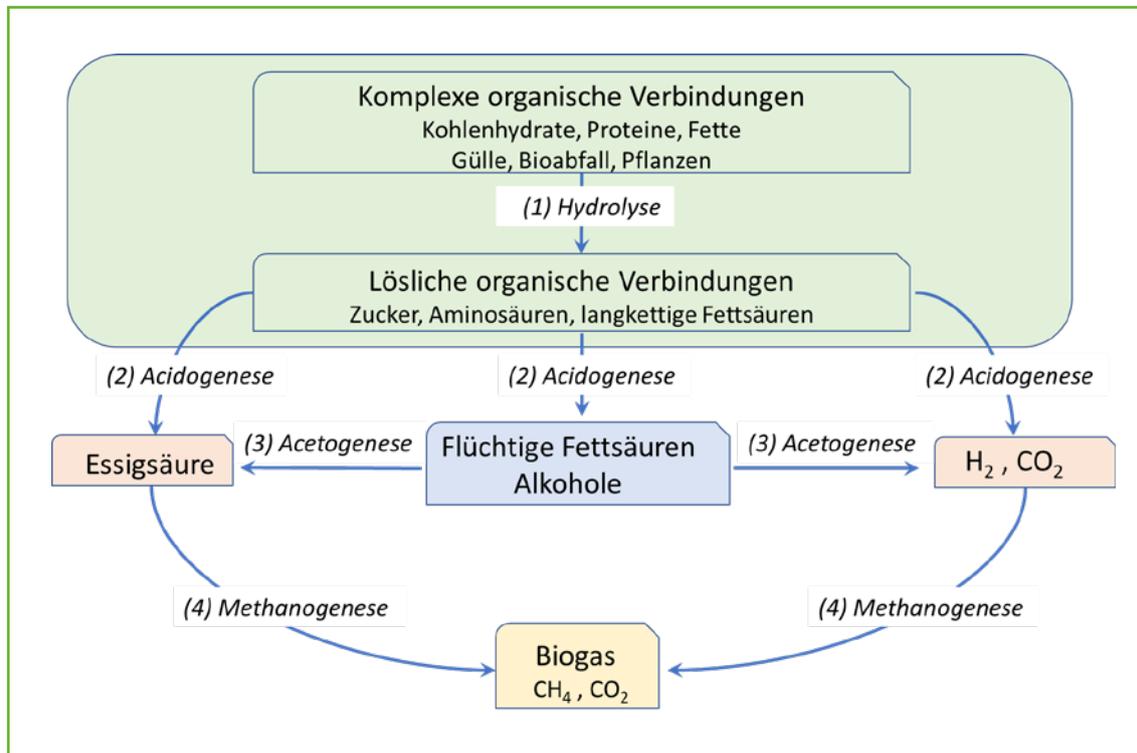


Abb. 2: Vereinfachtes Schema der Biogasbildung

Die Hydrolyse der meisten hochmolekularen Substanzen, z. B. Kohlenhydrate, erfolgt in wenigen Stunden, während für Proteine oder Fette einige Tagen notwendig sein können. Substanzen mit einem hohen Anteil an Lignocellulose und Lignin werden nur langsam und unvollständig abgebaut, da Lignin anaerob nicht gespalten werden kann. Die in der Hydrolysephase gebildeten Monomere werden von den gleichen Bakterien, deren Exoenzyme in der Hydrolysephase wirken, aufgenommen und weiter abgebaut. Den Hauptteil der entstehenden Produkte bilden flüchtige Fettsäuren, wie Essigsäure, Propionsäure und Buttersäure. Außerdem entstehen Milchsäure, Alkohole, Wasserstoff und Kohlendioxid. Dieser Prozess wird als Versäuerung oder auch Acidogenese (2) bezeichnet (Abb. 2).

Die Acetogenese (3) bildet das Bindeglied zwischen Acidogenese und Methanogenese (4). Die Stoffwechselprodukte aus der Acidogenese werden von den acetogenen Bakterien zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Dieser Prozess wurde erst relativ spät entdeckt, da acetogene Bakterien durch ihr eigenes Stoffwechselprodukt, den Wasserstoff, gehemmt werden [13]. Deshalb leben die acetogenen Bakterien in Symbiose mit methanbildenden Archaea, die den von den acetogenen Bakterien gebildeten Wasserstoff verwerten und damit für den notwendigen niedrigen Wasserstoffpartialdruck sorgen (Abb. 3).

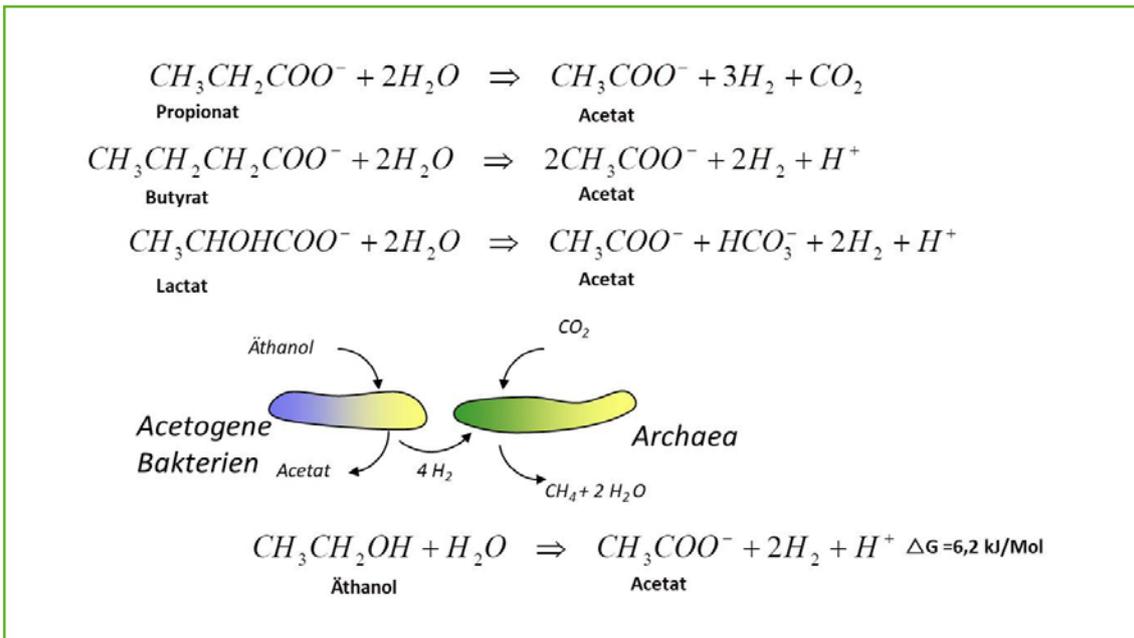
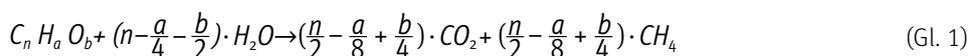


Abb. 3: Abbau organischer Säuren und Äthanol zu Acetat, Wasserstoff und CH_4

Archaeen gehören zu den ältesten Mikroorganismen auf der Erde. Sie verfügen über bestimmte Coenzyme, die bei der reduktiven Methanbildung aus Kohlendioxid und Wasserstoff entdeckt wurden. Wegen ihrer einzigartigen Zellwandstruktur werden die Archaeen kaum durch Antibiotika gehemmt, allerdings benötigen sie streng anaerobe Bedingungen. Als Substratspezialisten können sie nur sehr wenige Substrate umsetzen, die wichtigsten sind Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid. Archaeen stehen am Ende einer Stoffwechselkette, die nicht nur in technischen Systemen genutzt werden, sondern sie sorgen auch in natürlichen Ökosystemen für eine „biologische Entgiftung“, wenn hohe Konzentrationen von Wasserstoff und organischen Säuren vorhanden sind [1].

Einen Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung von organischen Verbindungen, und der Menge und Qualität des produzierten Gases bei der Faulung von Klärschlämmen erkannten BUSWELL und BORUFF im Jahr 1932 [14], die auch als Buswell Formel bekannt ist (Gl. 1). In der Formel steht n für die Anzahl der Kohlenstoffatome (C), a für die Anzahl der Wasserstoffatome (H) und b für die Anzahl der Sauerstoffatome (O).



Die Anwendung dieser Formel für verschieden organische Stoffgruppen ermöglicht die Berechnung sowohl der möglichen Biogasausbeute als auch der jeweiligen Anteile von CH_4 und CO_2 im Biogas (Tab. 1).

Die Mikroorganismen des anaeroben Abbaus haben einen artspezifischen Bedarf an Makro- und Mikro-nährstoffen sowie Vitaminen. Die Konzentration und Verfügbarkeit dieser Komponenten hat Einfluss auf die Wachstumsgeschwindigkeit und Aktivität der verschiedenen Populationen. Es existieren artspezifische Mindest- und Maximalkonzentration, deren Festlegung aufgrund der Vielfalt unterschiedlicher Kulturen und deren zum Teil stark ausgeprägter Adaptionfähigkeit schwierig ist. Für die Archaeen sind insbesondere Spurenelemente wie Kobalt (Co), Nickel (Ni), Selen (Se), Molybdän (Mo), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) von Bedeutung, da sie für ihren Stoffwechsel Coenzyme benötigen, die solche Spurenelemente enthalten [1].

Während des Gärprozesses können Stoffwechselprodukte gebildet werden, die in der Lage sind, den Prozess der Methanbildung zu hemmen, insbesondere das nichtionische, freie Ammoniak (NH_3) sowie der nicht dissoziierte Anteil der flüchtigen Fettsäuren, deren Hemmwirkung vom pH-Wert abhängt. Weiterhin können gelöster Sauerstoff, Schwefelwasserstoff, Schwermetalle wie Zink (Zn) Kupfer (Cu) und Chrom (Cr) oder Desinfektionsmittel und Antibiotika den Prozess der Biogasbildung hemmen [15].

Tab. 1: Biogasausbeuten verschiedener Stoffgruppen auf der Grundlage von Gl. 1

| | Molgewicht (g/Mol) | Molanteile CO_2 und CH_4 im Biogas (Mol) | Molvolumen des Biogases (L/Mol) | Mögliche Biogasausbeute (L/g) | Methan-gehalt im Biogas Vol.% |
|---|--------------------|--|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Kohlenhydrate, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_n$ | 180 | $3 \text{ CO}_2 + 3 \text{ CH}_4$ | $6 \times 22,4 = 134,4$ | $134,4/180 = 0,746$ | 50,0 |
| Fette, z. B. Palmitin $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$ | 256 | $4,5 \text{ CO}_2 + 11,5 \text{ CH}_4$ | $16 \times 22,4 = 358,4$ | $358,4/256 = 1,39$ | 71,8 |
| Proteine, 21 Aminosäuren $\text{C}_{13}\text{H}_{25}\text{O}_7(\text{N}_3\text{S})$ | 367 | $5,125 \text{ CO}_2 + 7,857 \text{ CH}_4$ | $13 \times 22,4 = 291$ | $291/367 = 0,79$ | 60,5 |
| Pflanzliche Biomasse $\text{C}_{38}\text{H}_{60}\text{O}_{26}$ | 932 | $18 \text{ CO}_2 + 20 \text{ CH}_4$ | $38 \times 22,4 = 851$ | $851/932 = 0,91$ | 52,6 |

4.2 Physiologie und Milieueinflüsse

Alle von Mikroorganismen ausgehenden Stoffwechselprozesse erfordern physiologisch günstige Milieubedingungen. Es sind vor allem die Temperatur, der pH-Wert und die Konzentration von Substraten und Hemmstoffen im Reaktionsmedium, die den Biogasprozess beeinflussen. Von der Temperatur ist bekannt, dass steigende Werte auch höhere Reaktionsgeschwindigkeiten zur Folge haben. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit lässt sich aus der ARRHENIUS-Beziehung in Form von (Gl. 2) für zwei verschiedene Temperaturen herleiten und durch die Einführung eines Temperaturterms f_T mit Gl. 3 vereinfachen [16]. Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k_1 und k_2 bei der Biogasgewinnung können unter kontrollierten Laborbedingungen bei zwei verschiedenen Temperaturen T_1 und T_2 ermittelt und aus den beiden Werten der Temperaturterm berechnet werden.

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_A}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \rightarrow f_T = e^{E_A/R \cdot T_1 \cdot T_2} \quad (\text{Gl. 2})$$

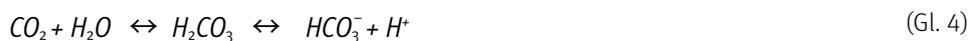
$$\frac{k_2}{k_1} = f_T (T_2 - T_1) \quad (\text{Gl. 3})$$

Die meisten Biogasanlagen werden mesophil, d. h. zwischen 30°C und 40°C betrieben. Für diesen Temperaturbereich wurden für Rinder- und Schweinegülle Werte für f_T von 1,06 bzw. 1,13 berechnet [17]. Würde z. B. durch Ausfall der Heizung die Temperatur im Fermenter von 35°C auf 28°C abfallen, hätte das einen Rückgang der Biogasrate von ursprünglich $1,0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ auf $1,0/1,06^{(35-28)} = 0,66 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ zur Folge.

Neben der Temperatur beeinflusst der pH-Wert im Fermenter die Biogasbildung. Da beim anaeroben Abbau zahlreiche Mikroorganismen beteiligt sind, die unterschiedliche pH-Optima aufweisen, lässt sich für den Gesamtprozess kein optimaler pH-Wert angeben. Hydrolysierende und versäuernde Bakterien bevorzugen zum Beispiel einen pH-Wert zwischen 5,2 und 6,3. Die an der Methanbildung beteiligten Archaeen dagegen bevorzugen einen pH-Wert zwischen 6,5 und 8,0. Als akzeptabler Bereich für die Methanbildung im Fermenter wird ein pH-Wert zwischen 6,5 und 8,1 angegeben [15] [68]. Welcher pH-Wert im Fermenter vorliegt, hängt von der Pufferkapazität des Fermenterinhalt ab. Die Pufferwirkung wird dabei hauptsächlich durch den Carbonat- und Ammoniumpuffer bestimmt (Gl. 4 und 5).

Kohlensäure-Bicarbonat-Puffer

Das Kohlensäure-Bicarbonat-Puffersystem dient zur Reduzierung von pH-Schwankungen. Es besteht aus Kohlensäure (H_2CO_3), und dem Hydrogencarbonation (HCO_3^-) als Base (Gl. 4 und 5). Wenn das Medium nicht sauer genug ist, löst sich ein Proton H^+ von der Kohlensäure, die daraufhin zum Bicarbonation wird. Wenn das Medium dagegen zu viele Protonen enthält, also zu sauer ist, bindet das Bicarbonation ein Proton H^+ und wird zur Kohlensäure, die zu Wasser H_2O und CO_2 zerfällt [18].



Ammoniakpuffer

Bei abfallendem pH-Wert verschiebt sich das Gleichgewicht auf die Seite des Ammoniums, NH_4^+ wobei Hydroxylionen OH^- frei werden, während bei steigendem pH-Wert vermehrt undissoziiertes Ammoniak NH_3 gebildet wird (Gl. 6).



Durch das gute Pufferungsvermögen der Gülle wird der pH-Wert zu einem ungeeigneten Kontrollparameter, da z. B. eine Übersäuerung des Fermenterinhalt bei hoher Belastung mit schnell versäuernden Verbindungen durch zuckerhaltige Stoffe nicht zwangsläufig zu einem messbaren Abfall des pH-Wertes führt. Für die Überwachung des Biogasprozesses ist deshalb die Bestimmung der flüchtigen organischen Säuren (FOS) in Kombination mit der Pufferkapazität (TAC) besser geeignet [19]. Die FOS/TAC-Bestimmung ist ein von der ehemaligen Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) adaptierter Titrationstest (Nordmann-Methode) zur Bestimmung des Quotienten aus Säurekonzentration und Pufferkapazität des Fermenterinhalt.

FOS wird in mg/l Essigsäureäquivalente angegeben, der TAC-Wert als Totales Anorganisches Carbonat in mg/l $CaCO_3$ (alkalische Pufferkapazität). Der FOS/TAC ist seit geraumer Zeit als Leitwert zur Beurteilung des Gärprozesses anerkannt. Mit seiner Hilfe lassen sich Prozessstörungen bis hin zum drohenden Umkippen der Fermenter-Biologie frühzeitig erkennen, so dass Gegenmaßnahmen umgehend eingeleitet werden können [20]. Da Mikroorganismen für die Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels nur die nicht dissoziierten Verbindungen durch Diffusion in ihre Zellen aufnehmen können (Abb. 4), ist eine Bestimmung der nicht dissoziierten Anteile notwendig (Gl. 7 bis 9).

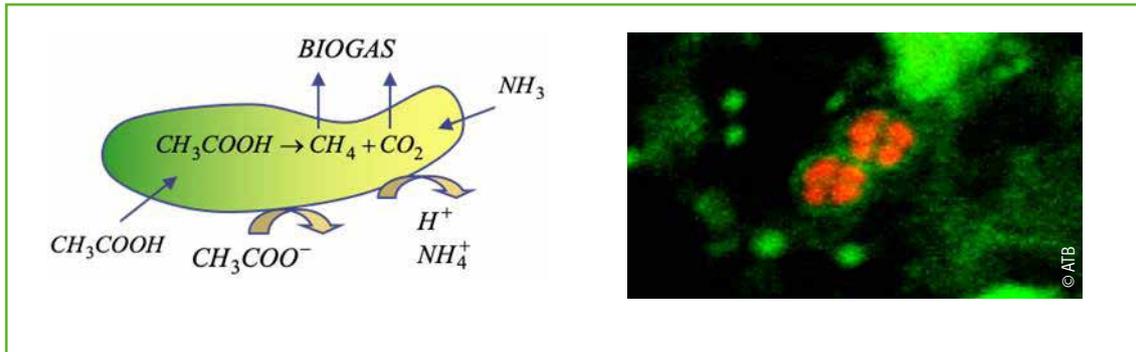


Abb. 4: Diffusion von Essigsäure und Ammoniak durch die Zellwand, Essigsäure Dissoziationskonstante von $1,8 \times 10^{-5}$ bei 25°C links, rechts Methanosarcina rot, umgeben von acetogenen Bakterien grün

Aus der gesamten Konzentration der Essigsäure und von Ammonium können die nicht dissoziierten Anteile c_{HAc} und c_{NH_3} aus Gl. 7 bzw. Gl. 8 und Gl. 9 berechnet werden.

$$c_{\text{HAc}} = \frac{c_{\text{Ac}}}{1 + K_{\text{D/Ac}} \cdot 10^{\text{pH}}} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$c_{\text{NH}_3} = \frac{0,94412 \cdot c_{\text{NH}_4}}{1 + 10^{\text{pK}_a - \text{pH}}} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$\text{pK}_a = 0,0925 + \frac{2728,795}{t + 273,15} \quad (\text{Gl. 9})$$

Für den pH-Bereich von 6 bis 9 wurden beispielhaft für drei verschiedene Gesamt-Essigsäure- und Ammoniumkonzentrationen die zugehörigen nicht dissoziierten Anteile berechnet (Abb. 5).

Die Grafik zeigt eine gegenläufige Abhängigkeit der nicht dissoziierten Anteile von beiden Stoffgruppen vom pH-Wert. Mit steigendem pH-Wert erhöhen sich die Konzentrationen an c_{NH_3} während mit abfallendem pH-Wert die Konzentration an c_{HAc} ansteigen. Dabei fällt auf, dass unabhängig von der Gesamtkonzentration von c_{Ac} und c_{NH_4} die jeweils geringsten Konzentrationen der hemmenden nicht dissoziierten Anteile von c_{HAc} und c_{NH_3} bei einem pH-Wert von etwa 7,2 vorliegen.

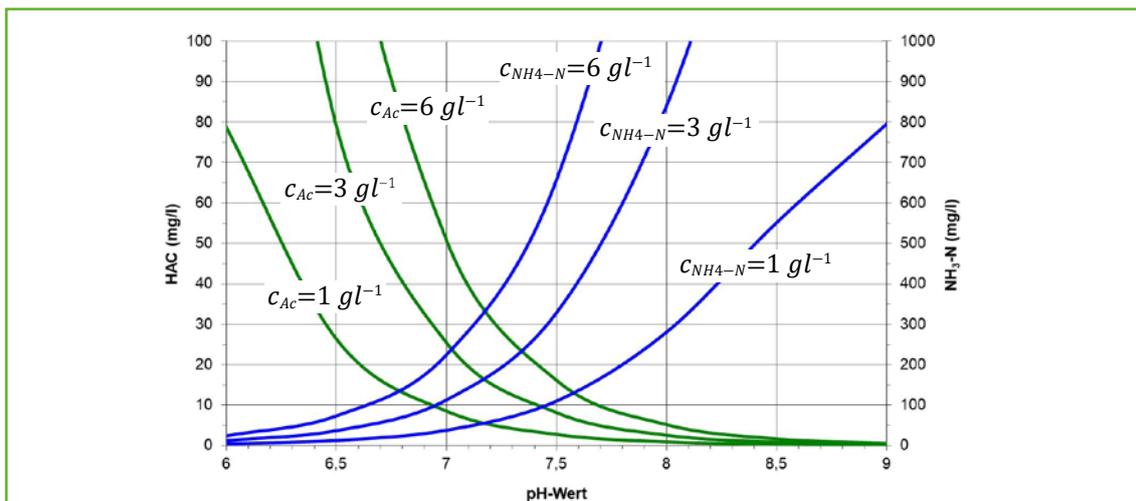


Abb. 5: Einfluss des pH-Wertes auf die nicht dissoziierten Anteile von Essigsäure c_{HAc} und Ammonium c_{NH_3} bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen von Essigsäure c_{Ac} und Ammonium c_{NH_4} [21].

Der hemmende Einfluss erhöhter Konzentrationen an freiem Ammoniak ist bekannt und nachgewiesen. So z. B. wird in [22] berichtet, dass ab 560 mg $\text{NH}_3\text{-N/l}$ eine 50 %ige Hemmung in der Methanogenese eingetreten ist. Bei thermophiler Prozessführung wird dieser Grad der Hemmung bei 700 mg $\text{NH}_3\text{-N/l}$ erreicht [23]. Eine Langzeitstudie zur Monovergärung von Grassilage hat gezeigt, dass durch Zugabe eines Alumosilikates unter mesophilen Bedingungen die toxische Wirkung des freien Ammoniaks aufgehoben werden kann. Aus biochemischer Sicht kommt im Falle der Prozessdestabilisierung das komplexe Zusammenspiel innerhalb der anaeroben Abbaukette aus dem Gleichgewicht. Die Autoren dieser Studie kommen zu dem Schluss, dass die Ursachen einer Hemmung auch starke Temperaturschwankungen, abrupter Substratwechsel oder die Zufuhr bzw. Bildung prozesshemmender Substanzen sein können. Hemmstoffe entstehen auch als Zwischen- bzw. Nebenprodukte des anaeroben Abbauprozesses, z. B. Wasserstoff, flüchtige Fettsäuren (FFS), Ammoniak und Schwefelwasserstoff [24].

Im Hinblick auf die Hemmung von Essigsäure und Ammonium auf die Biogasbildung zeigt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit vom pH-Wert und von der Gesamtsäurekonzentration der beiden Inhaltsstoffe [25]. Demnach tritt für Essigsäure bei 1 g/L und einem pH-Wert von 6,5 eine 50 %ige Hemmung ein. Das entspricht einer Konzentration an nicht dissoziierter Essigsäure von etwa 25 mg/L. Dieser Wert stellt sich auch bei pH=7 und 3 g/L Gesamtsäure ein (Abb. 5). Im pH-Bereich zwischen 6,5 und 7,5 ist der Einfluss der Ammoniumkonzentration auf die Hemmung nicht so stark ausgeprägt (Abb. 6).

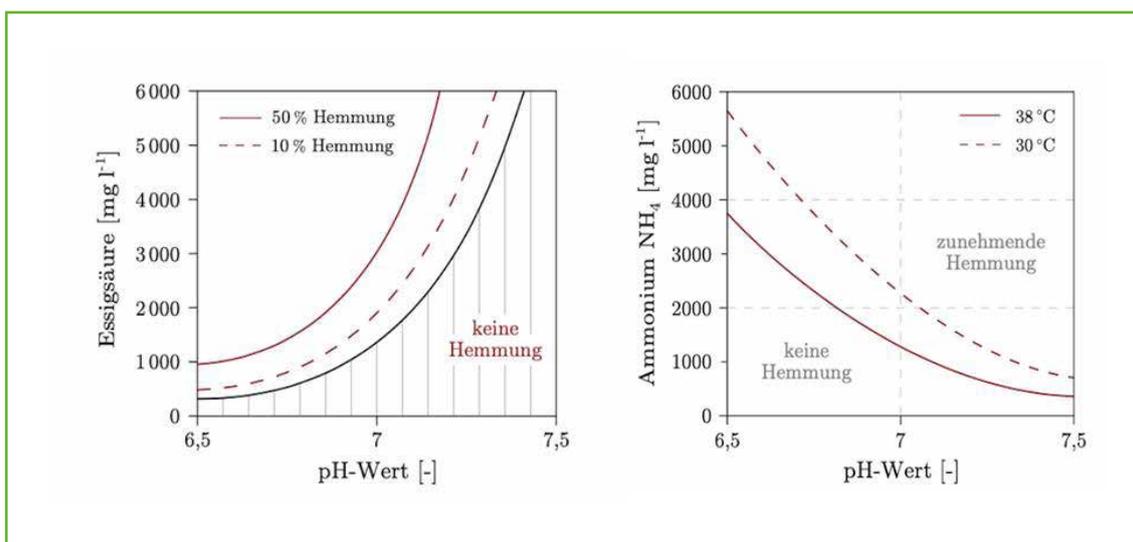


Abb. 6: Zulässige Gesamtkonzentrationen an Essigsäure und Ammonium zur Vermeidung von Hemmungen bei der Methanbildung [25].

5 VERFAHREN ZUR BIOGASGEWINNUNG

5.1 Klärschlämme aus der Abwasserbehandlung

Bei größeren Kläranlagen ab ca. 50.000 Einwohnergleichwerten (EWG) kommt die anaerobe Stabilisierung mit Faulgas- oder Biogasgewinnung zum Einsatz. Der Schlamm wird zur Verminderung des Schlammvolumens zuerst eingedickt und dann kontinuierlich in den Faulbehälter (Abb. 7) gepumpt. Dort werden unter Luftabschluss und Temperaturen von ca. 33°C bis 37°C bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von ca. 20 Tagen organische Substanzen von Bakterien und Archaeen abgebaut. Es entsteht Faulgas mit 60 bis 70% Methan, 30 bis 40% Kohlendioxid, geringe Mengen Wasserstoff und Schwefelwasserstoff, das zur Energiegewinnung in Form von Strom und Wärme in Blockheizkraftwerken oder Mikrogasturbinen eingesetzt wird [26] [27].

Zur Verringerung des Volumens des ausgefaulten Klärschlammes erfolgt eine Entwässerung durch Zentrifugen, Bandfilterpressen, Kammerfilterpressen und Schneckenpressen. Die Entwässerbarkeit des Klärschlammes wird deutlich verbessert, wenn dem Schlamm ein Konditionierungsmittel, z. B. ein Flockungsmittel zugeführt wird [28].

Da im Klärschlamm Schwermetalle, Arzneimittelrückstände, Krankheitserreger, Nanomaterialien, Kunststoffreste und eine Vielzahl anderer Schadstoffe enthalten sind, fand eine stetige Abkehr von der direkten landwirtschaftlichen Nutzung hin zur Verbrennung statt. Heute wird mehr als die Hälfte der kommunalen Klärschlämme in Mono- und Mitverbrennungsanlagen behandelt. 2017 wurde die Klärschlammverordnung novelliert, so dass große Kläranlagen, die das Abwasser von mehr als 100.000 oder 50.000 Einwohnern behandeln, Klärschlamm nur noch bis 2029 bzw. 2032 bodenbezogen als Dünger verwerten dürfen [29].

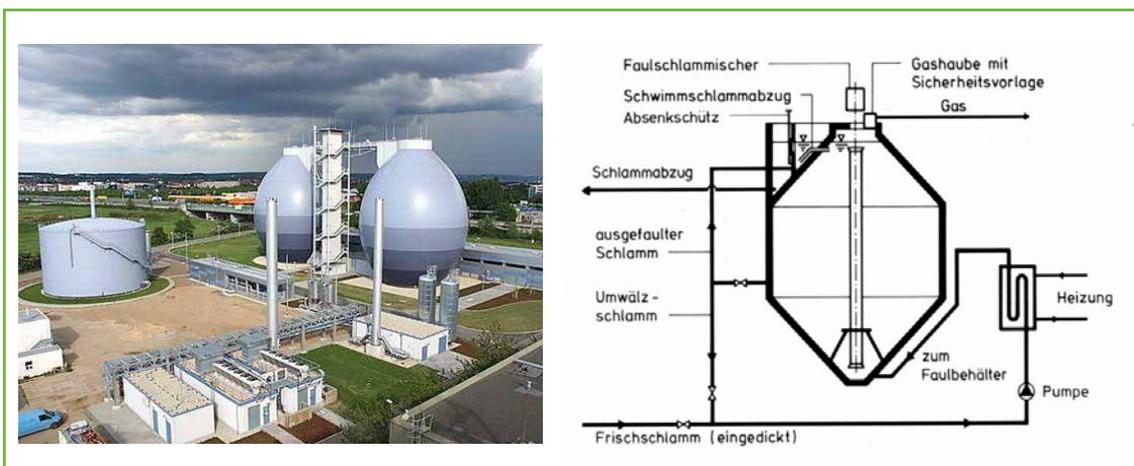


Abb. 7: Schematischer Aufbau eines Faulbehälters [26] und Bild der Schlammbehandlung auf der Kläranlage Dresden-Kaditz [27]

5.2 Kommunale Abfälle aus der Biotonne

5.2.1 DRANCO-Verfahren

Hauptmerkmal des patentierten DRANCO-Verfahrens ist ein vertikaler Stahlfermenter mit konischem Behälterboden, der speziell für die Vergärung von Bioabfällen und organischen Fraktionen aus Restmüll entwickelt wurde (Abb. 8). Drei oder vier innenliegende Steigrohre, die zur gleichmäßigen Beschickung des Fermenters über den gesamten Querschnitt dienen, durchschneiden den konischen Behälterboden und reichen bis über den Füllstand ca. 1 m unter dem Dach. Die Steigrohre sind unter dem Behälter durch eine schiebergetrennte Ringleitung verbunden, um eine wechselnde Beschickung zu ermöglichen.

Außenseitig ist der Behälter optimal wärmedämmt, um Temperaturverluste zu minimieren. Im Behälter sind weder Rührwerke noch Heizungstechnik eingebaut, sodass der Fermenter selbst völlig wartungsfrei ist. Auf dem begehbaren Dach des Fermenters sind alle erforderlichen Sicherheitseinrichtungen sowie eine Gas-Entnahmeleitung installiert. Der Fermenter ist inklusive Aufbauten ca. 30 m hoch und hat je nach Durchmesser (8 bis 16 m) ein Volumen von 1.000 bis 4.000 m³ mit einer Verarbeitungskapazität von bis zu 50.000 t pro Jahr [30].

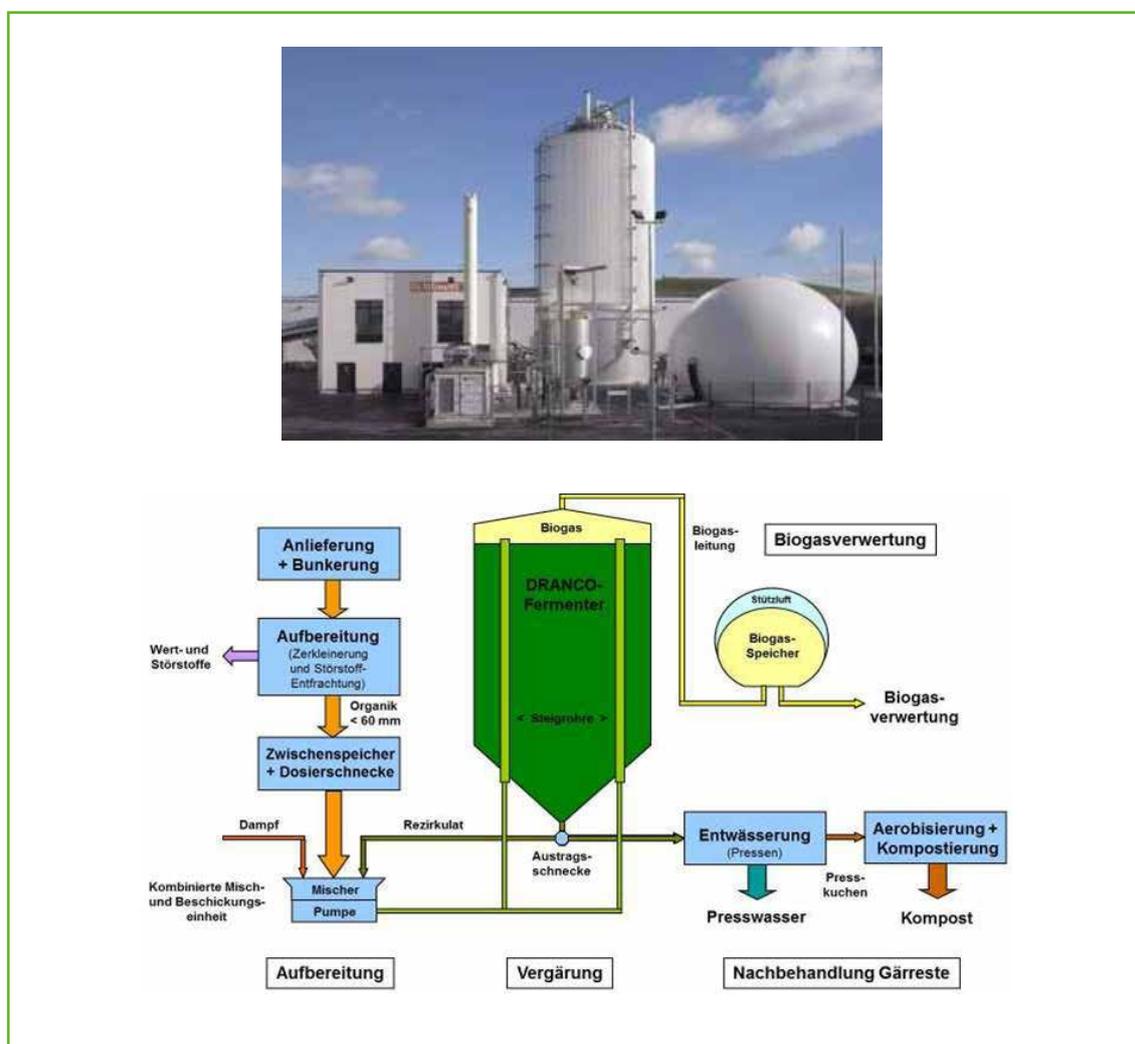


Abb. 8: DRANCO – Vergärungstechnologie für die Verwertung von Bioabfällen und organischen Fraktionen aus Restmüll [30]

5.2.2 KOMPOGAS-Verfahren

Das KOMPOGAS-Verfahren ist ein thermophiler Vergärungsprozess, in dem die aufbereiteten Bioabfälle den liegenden, zylinderförmigen Pfropfenstromfermenter durchströmen (Abb. 9). Aufgrund eines TS-Gehalts von > 30 % im Fermenter wird eine Durchmischung des Materials in Längsrichtung verhindert und dank der thermophilen Betriebsweise bei circa 55 °C der Nachweis der Hygienisierung im Fermenter gemäß Bioabfallverordnung (BioAbfV) erbracht. Der Kompogas-Fermenter wird über einen Zwischenspeicher 24 Stunden kontinuierlich mit aufbereiteten Bioabfällen beschickt. Der Prozessbiologie steht folglich eine stets konstante Menge an Inputmaterial zur Verfügung und der Prozess kann dadurch mit hoher Raumbelastung gefahren werden. Eine kontinuierliche Beschickung verhindert eine partielle Übersäuerung des Prozesses und garantiert einen gleichmäßig hohen Gasertrag.

Im liegenden zylindrischen Fermenter bildet sich durch den hohen TS-Gehalt von > 30% eine Pfropfenströmung. Das langsam laufende Rührwerk hat keine Förderwirkung, es dient lediglich der radialen Substratumwälzung, um Gasblasen aus dem Substrat zu lösen und absinkende Schwerstoffe aufzumischen. Die Prozessschritte von Hydrolyse über Säurebildung zur Methanbildung finden im Pfropfenstrom statt.

Die Gärreste aus dem Fermenter werden mittels Schneckenpressen entwässert, wobei die feste Fraktion in der Kompostierung aerob behandelt wird und die flüssige Fraktion (Presswasser) in der Landwirtschaft Verwendung findet. Als Alternative kann mittels Teilstromvergärung, bei der nur der energiereiche Teil des Bioabfalls in die Vergärung gegeben wird, das restliche organische Material am Fermenter vorbeigeführt und mit dem Gärrest vermischt werden. Die Mischung wird aerob in der Kompostierung behandelt, in welcher auch der Hygienisierungsnachweis des Teilstroms erfolgt [31].

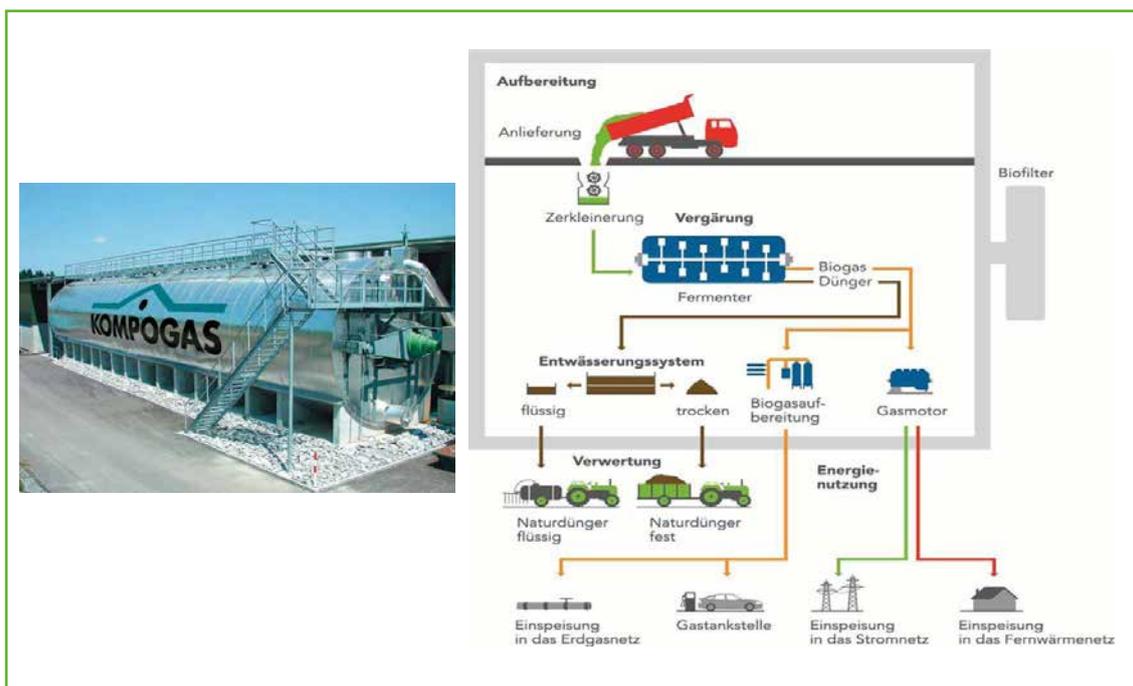


Abb. 9: KOMPOGAS-Vergärungstechnologie von kommunalem, gewerblichem und industriellem Bioabfall [31]

5.2.3 BEKON-Verfahren

Das BEKON-Verfahren ist ein einstufiges Vergärungsverfahren im Batch-Betrieb. „Einstufig“ bedeutet hier, dass die verschiedenen Abbaureaktionen (Hydrolyse, Säure-, und Methanbildung) in einem Verfahrensschritt ablaufen. Schüttfähige Biomassen mit hohem Trockensubstanzanteil können methanisiert werden, ohne dass das Gärmaterial aufwendig vorbehandelt werden muss. Das Prinzip ist ganz einfach: Unter Luftabschluss beginnen die Bioabfälle nach Inokulation (Animpfung) durch bereits vergorenes Material zu vergären und es entsteht hochwertiges Biogas. Die Bioabfälle werden in einer Annahmehalle gesammelt und danach mit einem Radlader in den garagenförmigen Fermenter (Abb. 10) eingebracht.

Die Inokulation erfolgt durch die Mischung von frischem mit bereits vergorenem Material. Die bei der Vergärung austretende Zellflüssigkeit (Perkolat) wird durch ein Drainagesystem aufgefangen und in einem Kreislauf dem Gärgut zur Befeuchtung wieder zugeführt. Die konstante Temperierung der Biomasse erfolgt mittels einer Wand- und Bodenheizung. Dabei ist weder eine weitere Durchmischung der Biomasse noch die Zuführung von zusätzlichem Material notwendig. Nach der Befüllung wird der Fermenter mit einem hydraulisch betriebenen Tor verschlossen und der Gärprozess der Biomasse startet. Das entstehende Biogas wird in der Regel in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Gewinnung von Strom und Wärme genutzt. Der kontinuierliche Betrieb des BHKW wird sichergestellt, indem immer mehrere Fermenter zeitlich versetzt befüllt und betrieben werden [32].

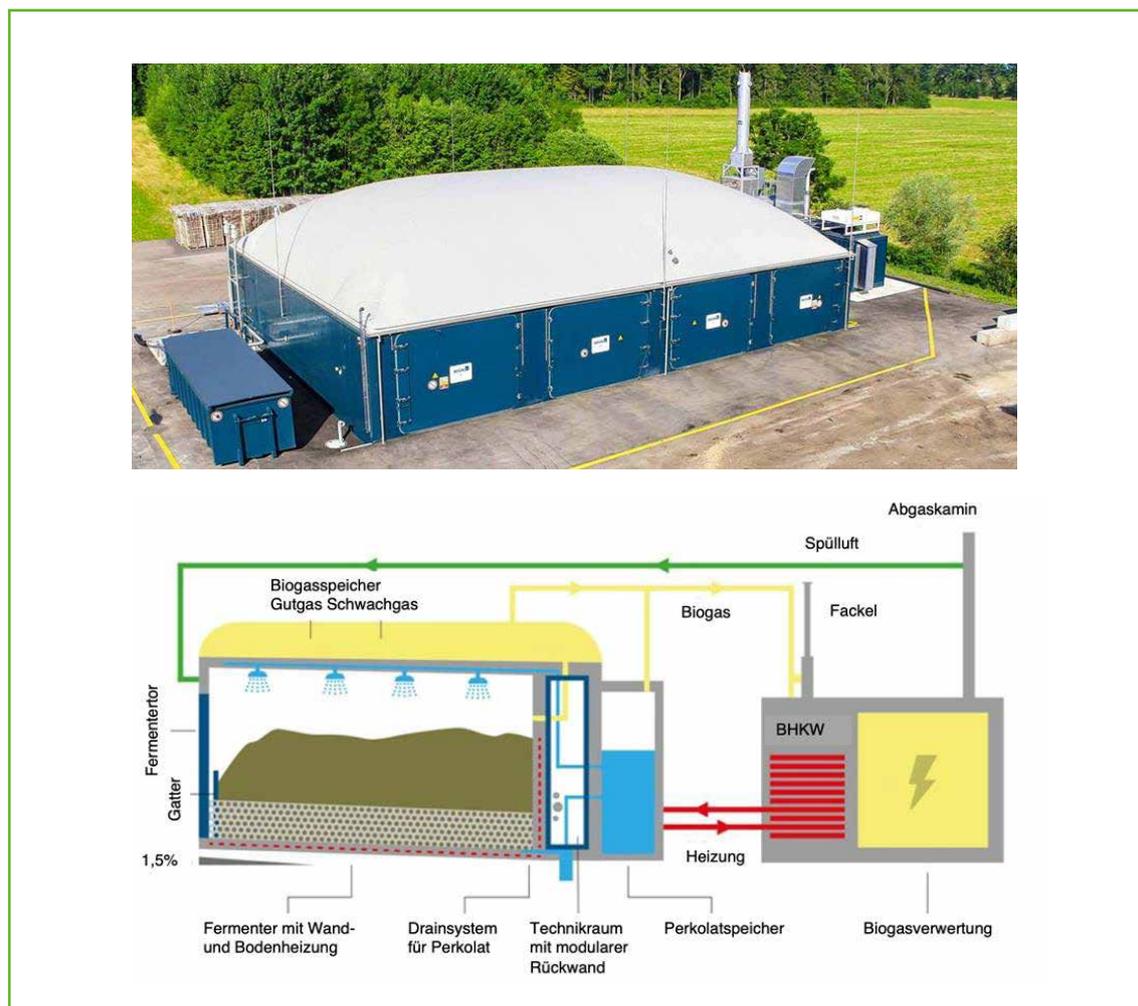


Abb. 10: BEKON-Vergärungstechnologie für Bioabfall und schüttfähige Biomassen mit hohem Trockensubstanzanteil [32]

5.2.4. GICON-Verfahren

Das gemeinsam von der Firma GICON (Grossmann Ingenieur-Consult) in Dresden und der BTU Cottbus (Prof. Busch) entwickelte Verfahren ist für feste Abfall- und Reststoffe aber auch für nachwachsende Rohstoffe einsetzbar. Die Verfahrensspezifik erlaubt es, zwischen verschiedenen Rohstoffen zu wechseln bzw. die Stoffe gleichzeitig einzusetzen. Ähnlich wie bei der BEKON-Vergärungstechnologie handelt es sich um ein zweiphasiges Verfahren, das mit einer festen und einer flüssigen Phase arbeitet.

Im Unterschied zum BEKON-Verfahren wird die Perkulationsflüssigkeit nicht nur in einem einfachen Perkolationsspeicher gesammelt, sondern gezielt über einen Methanreaktor mit Füllkörpern geleitet, wie sie bei der Reinigung von Abwässern aus der Nahrungsmittelindustrie (s. Kap. 5.3) zur Anwendung kommen. Solche Anaerobfilter sind sehr leistungsfähig, da sie durch die eingebrachten Füllkörper eine hohe Konzentration an aktiven Mikroorganismen aufweisen, die zur Methanbildung führen. Dieses an der Universität Galway in Irland erstmals für die Vergärung von Mist und grünem Pflanzenmaterial entwickelte Verfahren [33] wurde mit der GICON-Technologie (Abb. 11) erfolgreich weiterentwickelt und in großtechnischen Verfahren hauptsächlich für Bioabfälle angewendet [34].

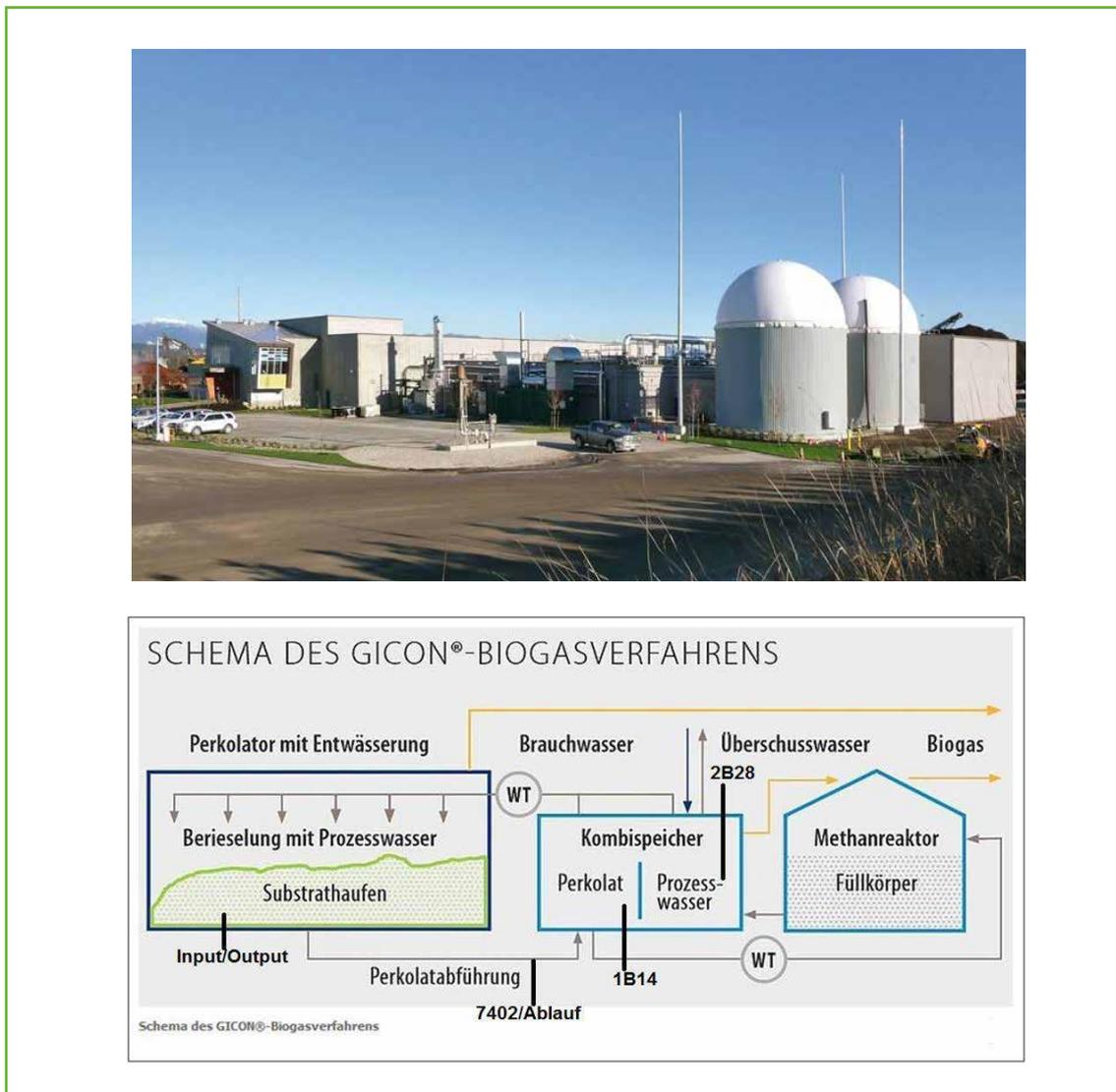


Abb. 11: GICON Vergärungstechnologie nach der zweistufigen Trocken-Nass-Fermentation, Foto in Richmond, Canada [34]

5.3 Abwässer aus der Nahrungsmittelindustrie

Abwässer der Nahrungsmittelindustrie enthalten überwiegend lösliche organische Verbindungen, so dass Rührkesselreaktoren, wie sie z.B. bei der Klärschlammfäulung mit mittleren hydraulischen Verweilzeiten von 20 bis 30 Tagen nicht effektiv sind. Die Begründung hierfür liegt in der sehr geringen aktiven Biomassekonzentration die sich im Gleichgewichtszustand (siehe Kapitel 6.3.2) einstellen würde. Für die Erhöhung dieser Biomassekonzentration sind in den letzten Jahrzehnten verschiedene Konzepte entwickelt worden. Hierzu gehören das anaerobe Belebungsverfahren, das eine Rückführung von Biomasse aus einem Sedimentationsbecken vorsieht, oder Festbettreaktoren mit Aufwuchsträgern zur Ansiedlung eines Biomassefilms [35].

Das heute überwiegend angewendete Verfahren zur Abwasserreinigung ist die UASB-Technologie der Firma PAQUES (Abb. 12). PAQUES begann mit der Entwicklung und Lieferung von Anlagen für die Umwandlung des CSB im Abwasser zu Biogas vor etwa 40 Jahren mit der Anwendung des BIOPAQ®UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)-Reaktors. Es handelte sich um eine Erfindung von Professor Gatze Lettinga von der Landwirtschaftlichen Hochschule Wageningen in den Niederlanden. Der Reaktor wurde von der Versuchsanlage zu einer Praxisanlage weiterentwickelt und für viele Abwassertypen eingesetzt. PAQUES wurde schnell zum globalen Marktführer in diesem Bereich der anaeroben Behandlung. Seine Position wurde durch die Entwicklung eines neuen Typs von anaerobem Reaktor mit der Bezeichnung BIOPAQ®IC (Internal Circulation)-Reaktor weiter gestärkt. Sowohl der BIOPAQ®UASB-Reaktor als auch der BIOPAQ®IC-Reaktor werden für die Abwasserbehandlung mit einem breiten Spektrum von Kohlenhydratkonzentrationen im Bereich von 1.000 bis 20.000 mg CSB/l verwendet.

In diesem Bereich bilden die Bakterien ein kompaktes Granulat mit sehr guten Absetzeigenschaften. Oberhalb dieses Bereichs tendieren die Bakterien zu einem Wachstum mit flockigerer Struktur. Dafür entwickelte PAQUES den Reaktor BIOPAQ®UASB+. Für stärker konzentrierte Abwässer, die feinorganische Teilchen und/oder Fett und Proteine enthalten, entwickelte Paques den BIOPAQ®AFR (Anaerobic Flotation Reactor) [36].

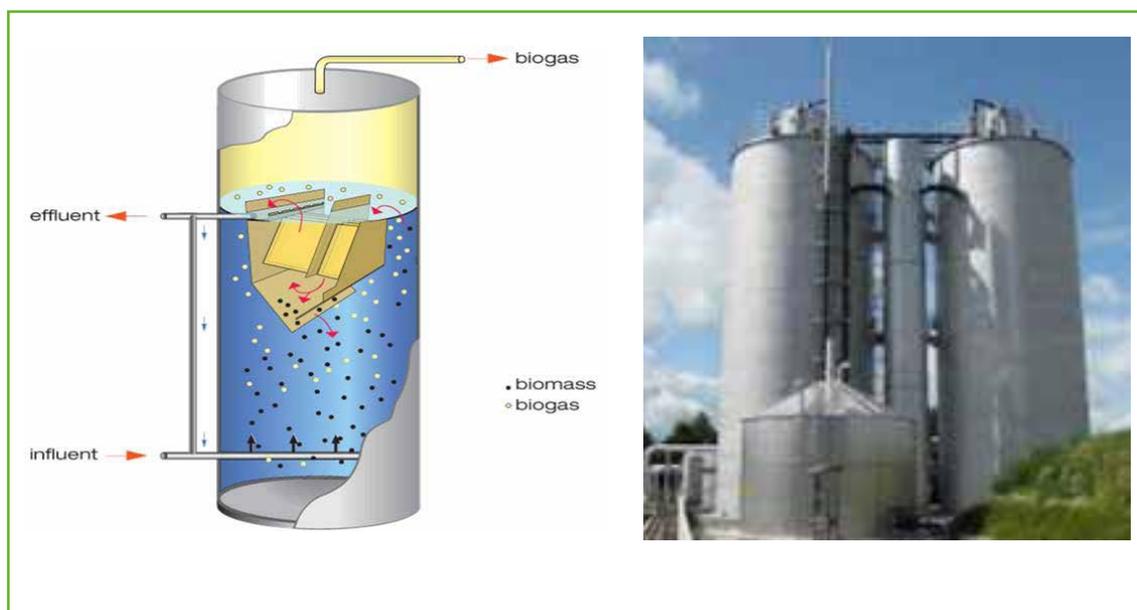


Abb. 12: Schema UASB-Reaktor zur Reinigung von Abwässern aus der Nahrungsmittelindustrie aus [36] und Bild einer Praxisanlage [37]

5.4 Gülle, Stallmist und nachwachsende Rohstoffe

Die überwiegende Anzahl der in Deutschland betriebenen etwa 9.500 Biogasanlagen [38] nutzen Rührkeselfermenter zur Biogasproduktion. Nach Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) werden, bezogen auf die Frischmasse, in diesen Anlagen ca. 49 % Nachwachsende Rohstoffe, 45 % Gülle und Mist, 4 % kommunaler Bioabfall und 2 % Reststoffe aus Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft eingesetzt [39]. Der Betrieb einer landwirtschaftlichen Biogasanlage umfasst im Wesentlichen die Bereiche Substratbereitstellung und -vorbehandlung, Biogaserzeugung, Gasspeicherung sowie die Gasaufbereitung und -verwertung. Die aus der Tierhaltung anfallenden Exkremente werden in einer Güllegrube gesammelt, bevor sie in den Biogasfermenter gepumpt werden. In dieser Grube kann auch Stallmist oder Pflanzenmaterial zugegeben und zerkleinert werden (Abb. 13). Entschließt sich ein Landwirt, betriebsfremde organische Abfälle (z. B. Bioabfälle) zu vergären, muss er die Hinweise zum Vollzug der novellierten Bioabfallverordnung beachten [40].

Kernstück einer Biogasanlage ist der gasdicht verschlossene, wärmeisolierte und mit einer Homogenisierung versehene Biogasfermenter. Neben verschiedenen Fermenterformen und Baustoffen sind in der Praxis verschiedene Systeme zur Durchmischung anzutreffen. Weit verbreitet sind die in der Gülletechnik eingesetzten Tauchmotor-Propellerrührwerke. Paddelrührwerke mit 1–2 Umdrehungen je Minute haben sich besonders für Biomassen mit hohem Feststoffanteil bewährt. Die Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur erfolgt über Warmwasser, das mit dem Kühlkreislauf des BHKW gekoppelt ist. Zum Einsatz kommen im Fermenter installierte Warmwasserleitungen aber auch außerhalb des Fermenters vorhandene Wärmetauscher [41].

Das erzeugte Biogas wird überwiegend in einem Blockheizkraftwerk zur Stromerzeugung genutzt. Das BHKW-Modul besteht neben dem Verbrennungsmotor und einem darauf abgestimmten Generator aus Wärmeüberträgersystemen zur Rückgewinnung der Wärmeenergie aus Abgas, Kühlwasser- und Schmierölkreislauf, hydraulischen Einrichtungen zur Wärmeverteilung und elektrischen Schalt- und Steuereinrichtungen zur Stromverteilung und zur BHKW-Steuerung. Als Motoren werden Gas-Otto- oder Zündstrahlmotoren eingesetzt. Letztere kamen in der Vergangenheit häufiger zum Einsatz, Neuanlagen werden aber in 2 von 3 Fällen mit Gas-Otto-Motoren bestückt.

Rohbiogas ist wasserdampfgesättigt und beinhaltet neben Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) u. a. auch nicht unerhebliche Mengen von Schwefelwasserstoff (H_2S). Schwefelwasserstoff ist toxisch und riecht unangenehm nach faulen Eiern. In Verbindung von Schwefelwasserstoff und dem im Biogas enthaltenen Wasserdampf kommt es zur Schwefelsäurebildung. Die Säuren greifen die zur Verwertung des Biogases verwendeten Motoren sowie vor- und nachgeschaltete Bauteile an. Deshalb muss im Biogas vor der Verwertung der Schwefelwasserstoff entfernt werden. Hierfür haben sich in der Praxis verschiedene Verfahren etabliert, wie z. B. die biologische Entschwefelung durch Einblasen von Luft in den Fermenter oder in externen Reaktoren mit Hilfe von Tropfkörperverfahren. Alternativ werden auch chemische und physikalische Entschwefelungsverfahren durch Zugabe von Eisenhydroxid oder Natronlauge angewendet. Werden schwefelfreie Gase benötigt, ist der Einsatz von Aktivkohle erforderlich [42].

Bei vielen Biogasanlagen kann die im BHKW anfallende Wärme aufgrund fehlender Nachfrage am Ort der Biogasgewinnung außer für die Aufrechterhaltung des eigentlichen Gärprozesses oftmals nicht ausreichend genutzt werden. In Bioenergiedörfern ist dagegen eine Nutzung der Wärme vorgesehen (s. Kap. 5 Verfahren zur Biogasgewinnung). Vor diesem Hintergrund konnte in den letzten Jahren ein kontinuierlicher Zubau von Biogasaufbereitungs- und -einspeiseanlagen beobachtet werden. Als Vorteil wird u. a. eine bessere Primärenergieausnutzung und damit ein besserer Gesamtwirkungsgrad angesehen, da das eingespeiste Biomethan am Bedarfsort mit entsprechend hoher Effizienz genutzt werden kann. Um Biogas in das Erdgasnetz einzuspeisen oder als Kraftstoff zu nutzen, ist eine Aufbereitung auf Erdgasqualität erforderlich. Ziel ist die Kohlendioxidabtrennung bzw. Methananreicherung. Durch eine nachgeschaltete Konditionierung des aufbereiteten Biogases wird die notwendige Qualität für die Einspeisung erreicht. Über die in der Praxis angewendeten Verfahren wird auf den von FNR herausgegebenen Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung verwiesen [43].

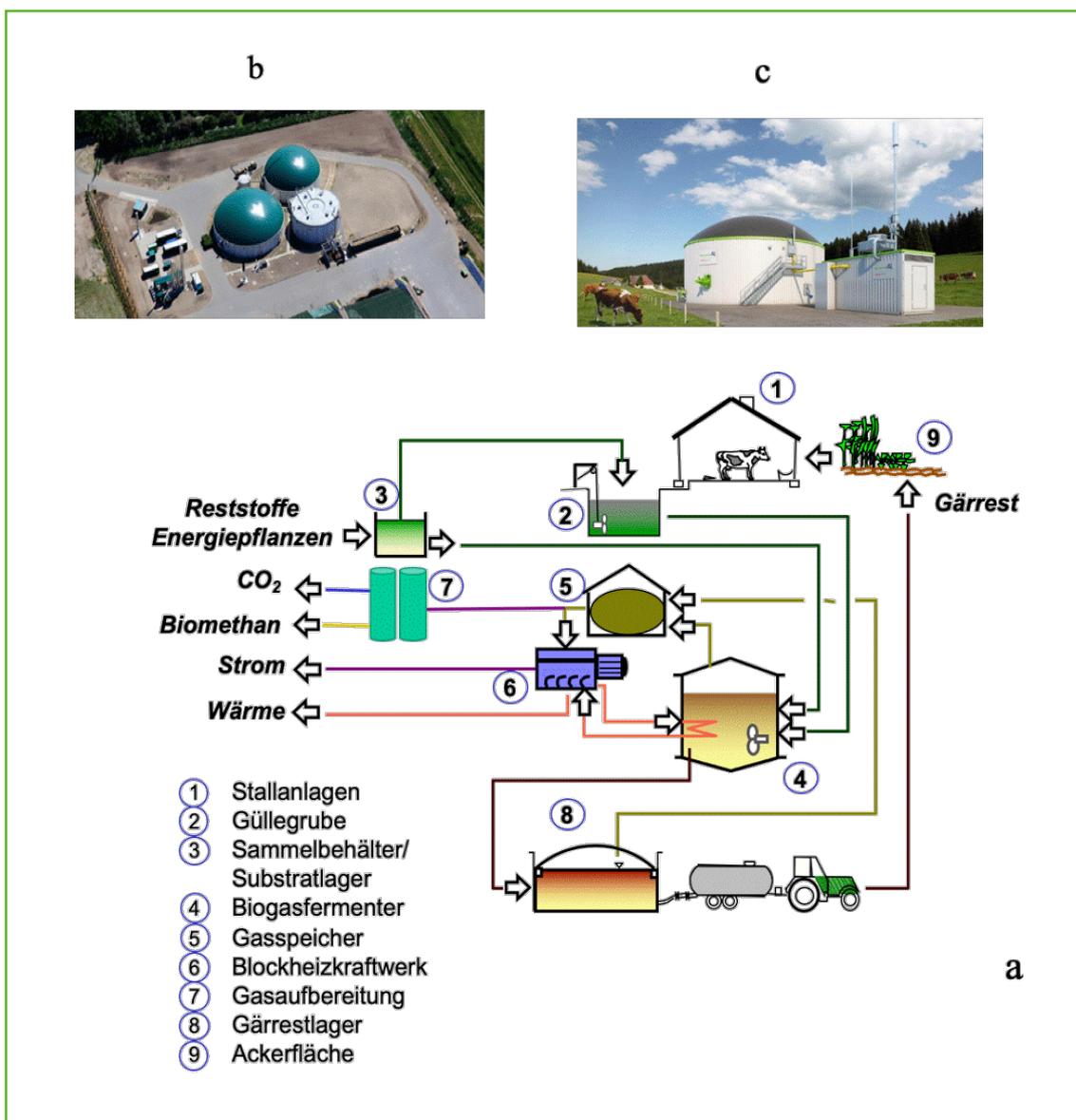


Abb. 13: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (a), Biogasanlage der Firma AGRAFERM (b) [44] mit Gasaufbereitung (oben) und 75 kW Hofbiogasanlage der Firma SCHMACK (c) [45] mit BHKW (unten)

6 BEMESSUNGS-GRUNDLAGEN

6.1 Bemessungs- und Leistungsparameter

Der Biogasfermenter mit einem Arbeitsvolumen V_F , wird mit einer Gärsubstratmasse m_0 beschickt, die eine Konzentration an fäulnisfähigen organischen Verbindungen c_0 enthält. Ein Großteil der organischen Verbindungen wird zu Biogas/Methan umgewandelt, das täglich in einer Menge von Q_{B/CH_4} zur Verfügung steht. Demzufolge ist die Ablaufkonzentration an organischer Verbindungen c des Gärrestes geringer, da aus der Zulaufkonzentration Biogas/Methan gebildet wurde.

Da der Biogasfermenter mehrmals täglich mit frischem Gärsubstrat beschickt wird, kann er aus verfahrenstechnischer Sicht als kontinuierlich betriebener Rührkessel betrachtet werden. Der Quotient aus durchströmtem Volumen V_F und dem Volumenstrom m_0 wird als mittlere hydraulische Verweilzeit t_m definiert. Bei geringem Volumenstrom ist die mittlere hydraulische Verweilzeit hoch, das Gärsubstrat kann besser abgebaut werden und die Biogasausbeute y_B^f ist höher als bei geringeren Verweilzeiten (Abb. 16).

Neben der Verweilzeit wird für die Bemessung des Fermentervolumens häufig auch die Raumbelastung B_R herangezogen. Sie gibt an, welche Masse an organischer Substanz je Kubikmeter Fermentervolumen täglich zugeführt wird. Anders als bei der Verweilzeit wird bei diesem Parameter die Konzentration der im Gärsubstrat enthaltenen organischen Verbindungen berücksichtigt. Wie effizient eine Biogasanlage betrieben wird, kann man den Leistungsparametern entnehmen. Der wichtigste Parameter ist die Biogasaus-/Methanbeute y_{B/CH_4}^f , die angibt, welche Menge Biogas/Methan Q_{B/CH_4}^f aus der täglich zugeführten organischen Masse $m_0 \cdot c_0$ produziert wird. Dieser Wert ist nicht nur von der Qualität des zugeführten Gärsubstrates, sondern auch von den Belastungsparametern t_m und B_R abhängig. Die Biogas-/Methanbildungsrate r_{B/CH_4}^f gibt an, welche Menge Biogas/Methan täglich aus einem Kubikmeter Fermentervolumen gewonnen wird und ist das Produkt aus Biogasausbeute y_B^f und Raumbelastung B_R (Abb. 14).

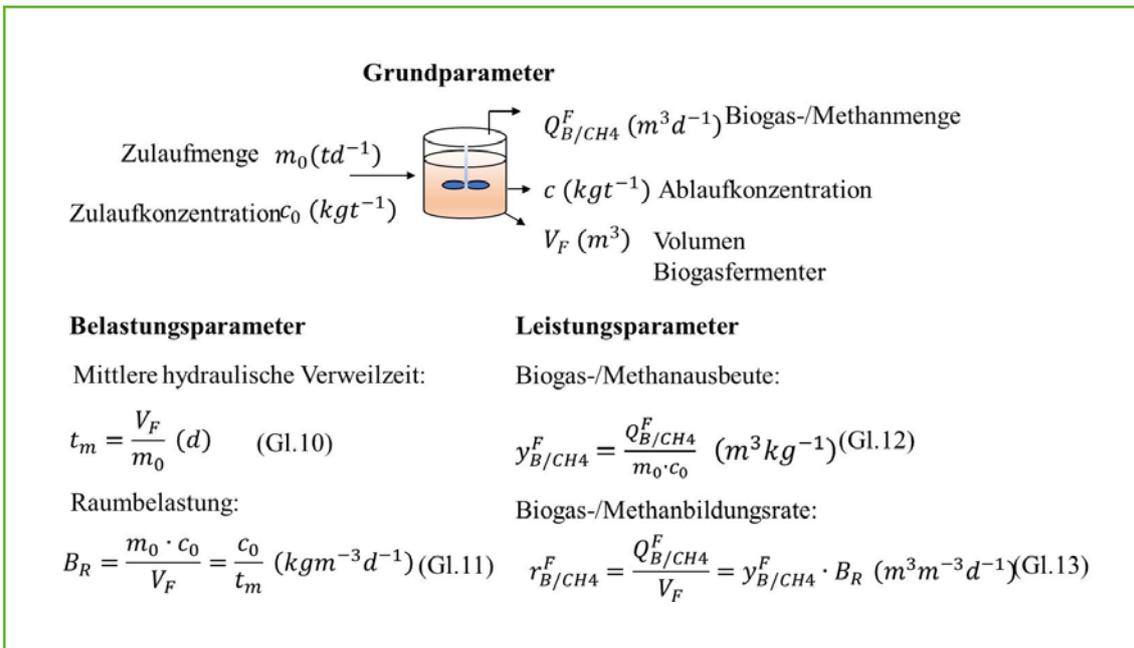


Abb. 14: Prozess- und Leistungsparameter bei der Biogasgewinnung.

Die mittlere hydraulische Verweilzeit t_m und die Raumbelastung B_R sind durch die Konzentration an organischer Substanz c_0 im Zulauf verbunden (Gl. 11 in Abb. 14). Wählt man z. B. für die Beschickung des Biogasermentes eine Raumbelastung von $3 \text{ kgm}^{-3} \text{ d}^{-1}$, dann stellt sich für Gülle mit $c_0=100 \text{ kg}$ organischer Substanz (oS) je Tonne Frischmasse eine mittlere hydraulische Verweilzeit von 33 Tagen ein. Bei gleicher Raumbelastung beträgt für Maissilage mit $c_0=300 \text{ kg}$ organischer Substanz je Tonne Frischmasse die mittlere hydraulische Verweilzeit 100 Tage (Abb. 15).

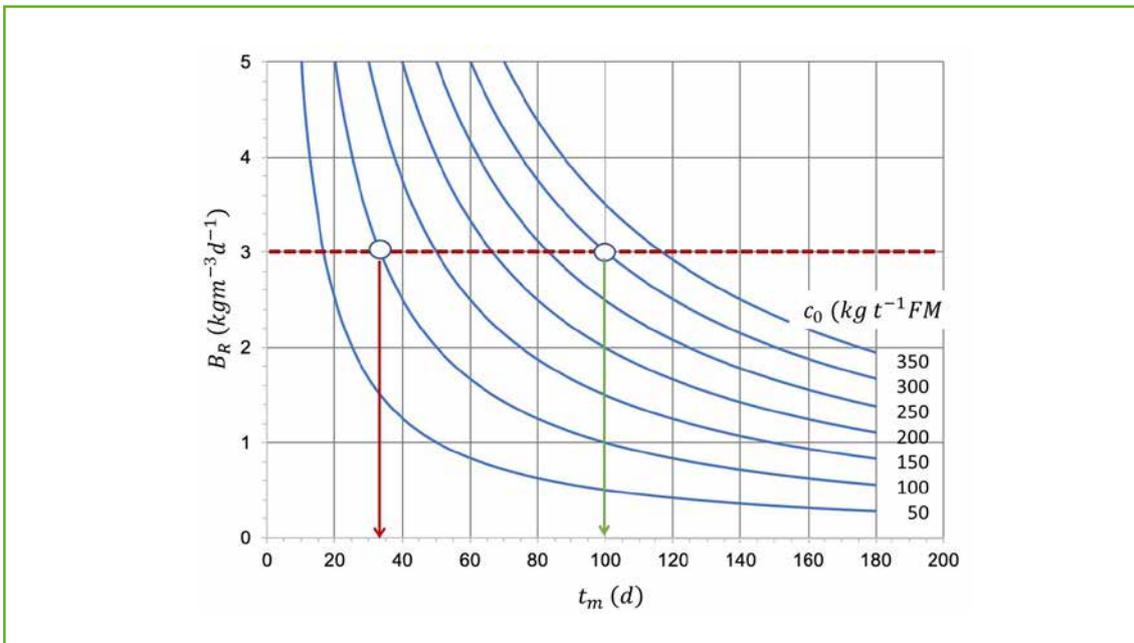


Abb. 15: Zusammenhang zwischen oS-Raumbelastung und mittlerer hydraulischer Verweilzeit bei verschiedenen Konzentrationen an organischer Substanz im Gärsubstrat [46].

6.2 Einfluss von Verweilzeit und Raumbelastung auf die Biogasproduktion

Bei der Auslegung der Fermentergröße für ein Gärsubstrat, welches z. B. nur aus Gülle oder aus einem Gemisch mit organischen Reststoffen oder Biogaspflanzen besteht, kann das erforderliche Fermentervolumen über eine gewählte mittlere hydraulische Verweilzeit oder der oS-Raumbelastung erfolgen (Gl. 14 und 15).

$$V_F = t_m \cdot m_o \quad (\text{Gl. 14})$$

oder

$$V_F = \frac{m_o \cdot c_o}{B_R} \quad (\text{Gl. 15})$$

Mit steigender Raumbelastung oder Verringerung der mittleren hydraulischen Verweilzeit verringert sich stetig die Biogasausbeute (Abb. 16). Der Rückgang der Biogasausbeute signalisiert eine beginnende Überlastung des Fermenters, beginnende Überlastung des Fermenters, was durch einen Anstieg der flüchtigen Fettsäuren, insbesondere von Propionsäure und Essigsäure sowie mit hohen FOS/TAC-Werten verbunden ist. Es hat dann bereits eine Hemmung der Methanogenese eingesetzt (s. Kap. 4.2), die durch stickstoffreiche Gärsubstrate unter Freisetzung von Ammoniak noch verstärkt wird.

Da mit einer Erhöhung der Raumbelastung oder Verkürzung der Verweilzeit dem Fermenter mehr organische Substanz zugeführt wird, steigt auch die Biogasbildungsrate deutlich an. Allerdings wird das Gärsubstrat bezogen auf die zugeführte organische Substanz deutlich geringer abgebaut. Um eine Übersäuerung des Fermenters zu verhindern, sollte dann die Zuführung von Gärsubstrat gestoppt werden, bis die FOS/TAC-Werte wieder auf Normalwerte zurückgegangen sind. Durch den Verlauf der Kurven in Abb. 16 wird die Frage aufgeworfen, bei welcher Verweilzeit bzw. Raumbelastung für ein vorgegebenes Substrat oder Substratgemisch die Biogasanlage betrieben werden soll?

Für die Beantwortung dieser Frage wurde das im Kapitel 6.3 beschriebene Modell entwickelt, das mit bekannten Messmethoden in Biogaslaboren für Planer oder Betreiber von Biogasanlagen die Optimierung der Biogasanlage ermöglicht. Eine Validierung des Modells für die Landwirtschaft erfolgte bereits durch umfangreiche Langzeitversuche im Labor mit Gülle und nachwachsenden Rohstoffen [47]. Dieses Modell kann aber auch für andere Bereiche der Biogasgewinnung angewendet werden, so z. B. bei der Klärschlammfäulung oder Bioabfallvergärung.

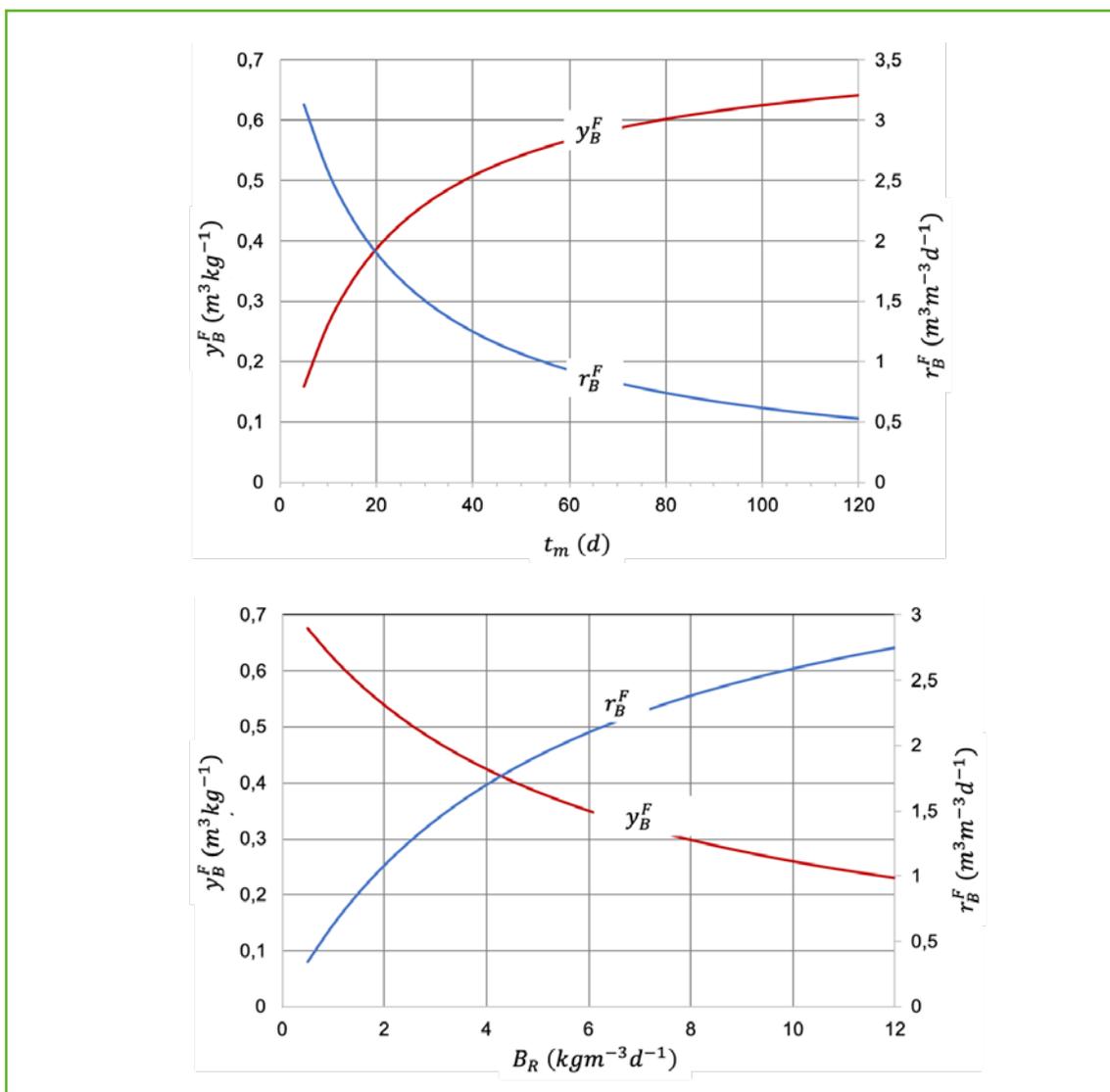


Abb. 16: Einfluss der Raumbelastung B_R und der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m auf die Biogasausbeute y_B^F und die Biogasbildungsrate r_B^F , beispielhaft für eine Mischung aus 67 % Rindergülle und 33 % Maissilage auf oTS-Basis, Daten aus [47].

6.3 Modell für die Berechnung der Biogasbildung im Fermenter und im Gärrestlager

Ziel des Berechnungsmodells ist die Etablierung einer Berechnungsmethode auf der Grundlage von einfach zu bestimmenden Parametern, die in der Biogaspraxis verwendet werden, aber über die üblichen Bemessungsansätze zur Auslegung der Fermentergröße nach vorgegebener mittlerer hydraulischer Verweilzeit oder oS-Raubelastung (siehe 6.2) hinausgehen. Da der mikrobiologische Abbauprozess in der Natur und in technischen Prozessen überwiegend nach einer Reaktion 1. Ordnung erfolgt [48], kann diese Reaktionskinetik auch für die Biogasbildung angewendet werden. Bei einer Reaktion 1. Ordnung lässt sich die Geschwindigkeit des Abbaus eines Substrates $r(c)$ mit der Konzentration c durch Gl. 16 beschreiben.

$$r(c) = -\frac{dc}{dt} = k \cdot c_t \quad (\text{Gl. 16})$$

Dabei ist die Änderung der Substratkonzentration im Fermenter nach der Zeit $-\frac{dc}{dt}$ das Produkt aus der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k und der zur Zeit t noch vorhandenen Substratkonzentration c_t . Da Gleichung 16 einen Substratverbrauch beschreibt, wurde diese Änderung definitionsgemäß mit einem Minuszeichen versehen. Die Integration von Gl. 16 ergibt Gl. 17.

$$c_t = c_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (\text{Gl. 17})$$

Für einen vollständig durchmischten Rührfermenter stellt sich bei kontinuierlicher Zuführung von Substrat ein Gleichgewichtszustand (steady-state) ein. In diesem Zustand ist die Änderung der Substratkonzentration im Fermentervolumen $V_R \frac{dc}{dt}$ gleich Null, so dass Gl. 18 und 19 formuliert werden können [49].

$$\text{Änderung} = \text{Zulauf} - \text{Ablauf} + \text{Umsatz} = 0 \quad (\text{Gl. 18})$$

$$V_R \frac{dc}{dt} = m_0 \cdot c_0 - m_0 \cdot c + V_R \cdot r(c) = 0 \quad (\text{Gl. 19})$$

Entsprechend Gl. 16 kann für den Rührfermenter die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante mit k_F definiert werden (Gl. 20).

$$r(c) = k_F \cdot c \quad (\text{Gl. 20})$$

Durch Verknüpfung von Gl. 10 (s. Abb. 14), Gl. 19 und Gl. 20 ergibt sich für die mittlere hydraulische Verweilzeit im Rührfermenter Gl. 21.

$$t_m = \frac{1}{k_F} \left(\frac{c_0}{c} - 1 \right) \quad (\text{Gl. 21})$$

Die Anwendung von Gl. 21 erfordert, dass die Werte von c_0 und c bekannt sind. Da es sich um Substratkonzentrationen handelt, müssen Analysen der zu Biogas umsetzbaren organischen Substanzen im Labor durchgeführt werden. Diese Analysen sind nicht erforderlich, da ein Zusammenhang zwischen Substratabbau und Biogas/Methanproduktion besteht (Abb. 17).

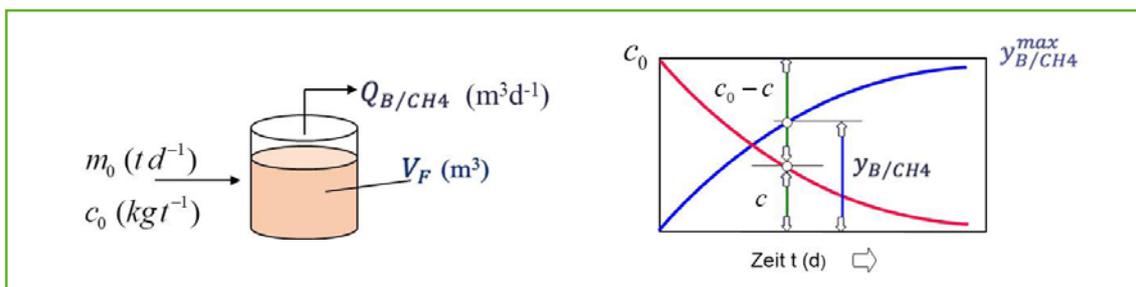


Abb.17: Zusammenhang zwischen Substratabbau und Biogasproduktion

Definiert man die zu Biogas umsetzbare Konzentration an organischer Substanz als c_0 und die zum Zeitpunkt t noch im Fermenter vorhandene Restkonzentration c , dann entspricht der Wert $c_0 - c$ der bis dahin gemessenen Biogasausbeute y (Abb. 17). Ist nach einer bestimmten Zeit die abbaubare organische Substanz vollständig zu Biogas umgesetzt, dann ist die maximale Biogas-/Methanausbeute erreicht. Die Beziehung zwischen Substratabbau und Biogasbildung ergibt sich aus Gl. 22.

$$\frac{c_0 - c}{c_0} = \frac{y_{B/CH_4}}{y_{B/CH_4}^{max}} \quad (\text{Gl. 22})$$

Gl. 22 lässt sich umformen und man erhält Gl. 23.

$$\frac{c_0 - c}{c_0} = \frac{y_{B/CH_4}}{y_{B/CH_4}^{max} - 1} \quad (\text{Gl. 23})$$

Die Verknüpfung von Gl. 21 und 23 liefern Bestimmungsgleichungen für die mittlere hydraulische Verweilzeit t_m (Gl. 24) und die Biogas-/Methanausbeute y_{B/CH_4}^F (Gl. 25). Damit ist eine Bemessung des Biogasfermenters auch ohne die Bestimmung der Konzentrationsänderung $c_0 - c$ möglich und kann auf der Grundlage der gemessenen Biogas-/Methanmenge erfolgen.

$$t_m = \frac{1}{k_F} \left(\frac{y_{B/CH_4}^F}{y_{B/CH_4}^{max} - y_{B/CH_4}^F} \right) \quad (\text{Gl. 24})$$

Löst man Gl. 24 nach y_{B/CH_4}^F auf, erhält man Gl. 25.

$$y_{B/CH_4}^F = y_{B/CH_4}^{max} \cdot \frac{k_F \cdot t_m}{k_F \cdot t_m + 1} \quad (\text{Gl. 25})$$

Eine Bestimmungsgleichung für y_{B/CH_4}^F unter Berücksichtigung der Raumbelastung (Gl. 26) erhält man, indem man in Gl. 24 für t_m den Quotienten $\frac{c_0}{B_R}$ einsetzt.

$$y_{B/CH_4}^F = y_{B/CH_4}^{max} \cdot \frac{k_F \cdot c_0}{k_F \cdot c_0 + B_R} \quad (\text{Gl. 26})$$

Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_F kann aus Gl. 27 oder Gl. 28 berechnet werden. Hierzu ist lediglich ein kontinuierlicher Langzeitversuch mit dem zu untersuchenden Gärsubstrat im Gleichgewichtszustand erforderlich (s. Kapitel 6.3.2).

$$k_F = \frac{1}{t_m} \left(\frac{y_{B/CH_4}^F}{y_{B/CH_4}^{max} - y_{B/CH_4}^F} \right) \quad (\text{Gl. 27})$$

$$k_F = \frac{B_R}{c_0} \left(\frac{y_{B/CH_4}^F}{y_{B/CH_4}^{max} - y_{B/CH_4}^F} \right) \quad (\text{Gl. 28})$$

Der Wirkungsgrad p eines Biogasfermenters, d. h. welcher Prozentsatz der maximal möglichen Biogas- oder Methanausbeute tatsächlich erreicht wird, kann bestimmt werden, indem in Gl. 25 y_{B/CH_4}^F durch $p \cdot y_{B/CH_4}^{max}$ ersetzt wird (Gl. 29):

$$p = \frac{k_F \cdot t_m}{k_F \cdot t_m + 1} \quad (\text{Gl. 29})$$

Durch Auflösung von Gl. 29 nach t_m erhält man (Gl.30).

$$t_m = \frac{p}{k_F - k_F \cdot p} \quad (\text{Gl. 30})$$

Welcher Anteil der maximal möglichen Biogas/Methanausbeute in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m und der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_F entsprechend Gl. 29 erreichbar ist, liefert Abb. 18. Wendet man Gl. 29 für Rindergülle und Futterrübensilage mit k_F Werten von $0,064 \text{ d}^{-1}$ bzw. $0,273 \text{ d}^{-1}$ aus [47] an, um z. B. 90% der maximalen Biogas-/Methanausbeute zu erreichen, dann beträgt die erforderliche mittlere hydraulische Verweilzeit 140 d bzw. 33 d.

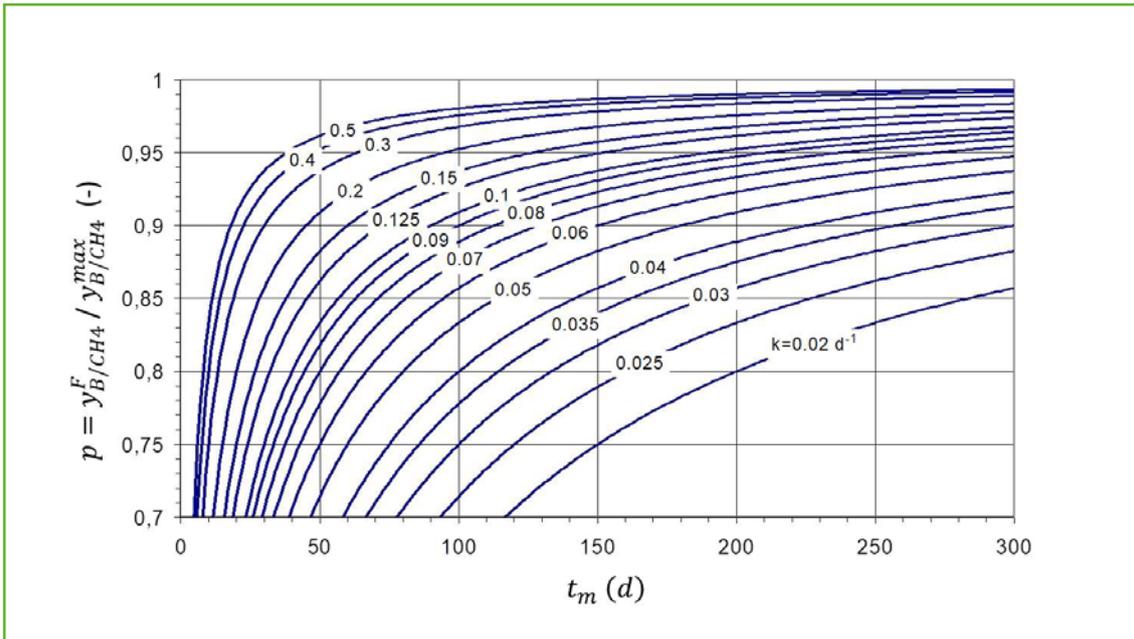


Abb. 18: Anteil der maximal möglichen Biogas/Methanausbeute p in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m und der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_F

Ziel des vorgestellten Modells (Abb. 19) ist die Bereitstellung von Berechnungsgrundlagen mit Blick auf folgende Fragestellungen:

- Welcher Anteil der im Gärsubstrat enthaltenen organischen Substanz kann zu Biogas/Methan abgebaut werden, bzw. wie hoch ist die maximale Biogas-/Methanausbeute y_{B/CH_4}^{max} des eingesetzten Gärsubstrates?
- Wie groß muss der Biogasfermenter dimensioniert werden, um für eine vorgegebene Menge Gärsubstrat eine bestimmte Biogas-/Methanausbeute y_{B/CH_4}^F bei stabilem Betrieb, ohne Überlastung/Hemmung zu erreichen?
- Welches Potenzial für die Biogas/Methanbildung $y_{B/CH_4}^{max/L}$ steckt noch im Gärrest aus dem Biogasfermenter und wieviel davon wird noch im Gärrestlager y_{B/CH_4}^L in Abhängigkeit von der Temperatur und der Lagerzeit gebildet?

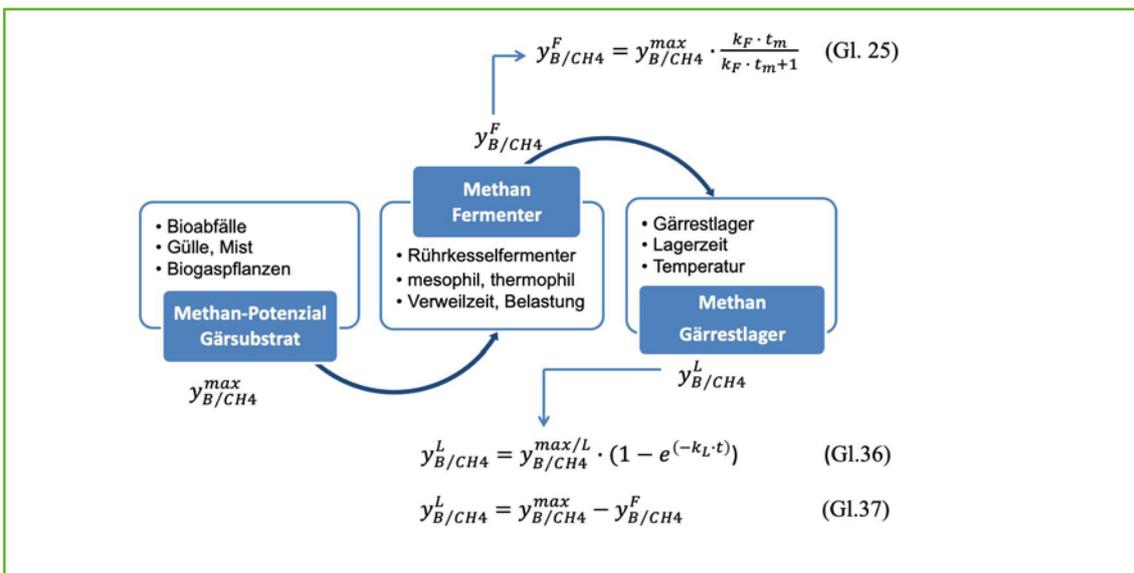


Abb. 19: Allgemeines Berechnungsmodell für die Auslegung der Fermentergröße eines vollständig durchmischten Biogasfermenters und des Gärrestlagers für die Biogas-/Methangewinnung

6.3.1 Biogas-/Methanausbeute im Gärsubstrat-Input

Auf der Grundlage der von BUSWELL und BORUFF im Jahr 1932 entwickelten Gleichung (Gl. 1) kann zwar das Biogas-/Methanpotenzial organischer Verbindungen berechnet werden (Tab. 1), dabei werden aber nicht die realen Bedingungen der Biogas-/Methanbildung im Biogasfermenter berücksichtigt. Deshalb sind einheitliche Regeln und Vorgaben für die Durchführung von Batch- und kontinuierlichen Vergärungsversuchen erarbeitet worden [50].

Die Ermittlung des Biogas-/Methanpotenzials erfolgt dabei als Batch-Versuch, indem die zu vergärende Probe mit einem Impfschlamm vermischt wird, der bereits an das Gärsubstrat adaptiert ist und selbst kaum noch Biogas-/Methan produziert. Um lange Adaptationsphasen zu verhindern, beträgt das Mischungsverhältnis Impfschlamm zu Gärsubstrat auf Basis der organischen Trockensubstanz 2:1. Die Temperatur im Gärmedium soll 37 °C betragen und zur statistischen Absicherung der Ergebnisse werden 3 Wiederholungen angesetzt. Als Referenzsubstrat wird kristalline Cellulose angesetzt, die eine Biogas-/Methanausbeute von 745 bzw. 375 l je kg organische Trockenmasse aufweist. Der Gärversuch kann dann beendet werden, wenn das tägliche produzierte Biogas < 1 % der bis dahin gebildeten Biogasmenge beträgt [51]. Die auf Normzustand ermittelten Gasmengen, abzüglich des Anteils aus dem Impfschlamm werden auf die eingesetzte organische Substanz bezogen und liefern das Biogas-/Methanpotenzial.

Am Beispiel von zwei typischen Methansummenkurven soll gezeigt werden, dass nach einer kurzen Adaptationsphase nach etwa 25 Tagen nur noch sehr wenig Methan gebildet wird, jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht das Maximum der Methanbildung erreicht ist (Abb. 20). Dieses Maximum kann bestimmt werden, wenn alle Messwerte aus dem batch-Versuch für eine geeignete Kurvenanpassung herangezogen werden. Nach Auswertung von zahlreichen Gärversuchen hat sich gezeigt, dass für die Kurvenanpassung die Hill-Funktion (Gl. 31) oder die Chapman-Funktion (Gl. 32) geeignet sind [52]. Für beide Kurvenverläufe liefert die Hill-Funktion (Gl. 31) die beste Anpassung, während die Chapman-Funktion (Gl. 32) bei Kurvenverläufen ohne ausgeprägte Adaptationszeit besser geeignet ist.

$$y_{B/CH_4} = a \cdot \frac{t^b}{c^{b+t}} \quad (\text{Gl. 31})$$

$$y_{B/CH_4} = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t})^c \quad (\text{Gl. 32})$$

Eine geeignete Software für die Kurvenanpassung ist z. B. TableCurve 2D von Systat Software, Inc., welche die Faktoren in den beiden Gleichungen liefert. Der Wert für den Faktor a entspricht dabei dem Maximalwert der Biogas-/Methanausbeute $y_{CH_4}^{max}$. Für die in Abb. 20 dargestellten Methansummenkurven entsprechend der Hill-Funktion wurden für Rindergülle und Maissilage Werte für a, b und c von 282 lkg⁻¹, 1,9507 und 7,0259 bzw. 367 lkg⁻¹, 1,5311 und 5,1292 ermittelt. Für die Bestimmung gebildeten Methanmengen wurde das Automatic Methane Potential Test System (AMPTS) der Firma Bioprocess control verwendet.

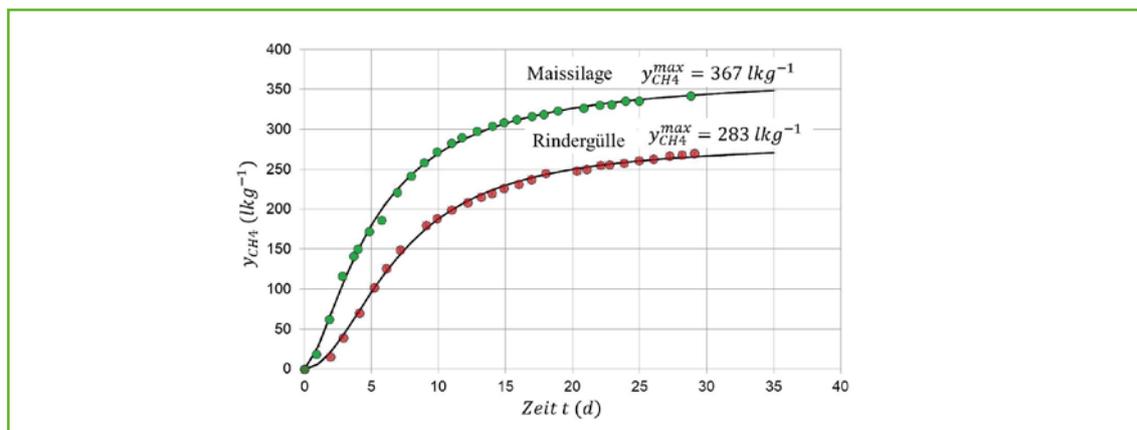


Abb. 20: Bestimmung der maximalen Methanausbeute für Rindergülle und Maissilage nach Kurvenanpassung mit der Hill-Funktion.

6.3.2 Biogas-/Methanausbeute im Fermenter

Nachdem das Biogas-/Methanpotenzial im Gärsubstrat-Input y_{B/CH_4}^{max} bekannt ist, muss zur Bestimmung der Biogas-/Methanausbeute im Fermenter y_{B/CH_4}^F ein kontinuierlicher Langzeitversuch im Laborfermenter durchgeführt werden. Die Ausführung und Größe dieses Laborfermenters kann unterschiedlich sein, wichtig ist, dass die Temperatur im Fermenter konstant gehalten wird und die Reaktionsmasse im Fermenter gut durchmischt wird, damit sich keine Sediment- oder Schwimmschichten bilden. Die Gärsubstratzugabe sollte mindestens einmal täglich erfolgen. Das produzierte Biogas wird in Gasbeuteln gesammelt und der Methan- gehalt des Biogases bestimmt (Abb. 21).

Im Gegensatz zum einfachen Gärtest, ist der Aufwand für die Durchführung des Versuches erheblich aufwendiger. Das betrifft nicht nur die Versuchsanlage, sondern auch die Dauer des Versuches. Damit die Versuchsergebnisse reproduzierbar sind, ist die Erreichung des Gleichgewichtszustandes (steady state) notwendig. Zur Vermeidung langer Adaptationsphasen sollte der Laborfermenter mit Gärrest gefüllt werden, der aus Gärversuchen mit dem gleichen Substrat-Input stammt, oder aus einer Praxis-Biogasanlage in der ein vergleichbares Substrat eingesetzt wird. Da die Versuche mehrere Wochen dauern können, ist ein entsprechender tief gekühlter Vorrat an Gärsubstrat anzulegen.

Bei der Inbetriebnahme des Biogasfermenters muss entschieden werden, bei welcher oS-Raumbelastung B_R oder mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m die Biogasgewinnung erfolgen soll. Für die Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_f hat diese Entscheidung keinen Einfluss, da dieser Wert eine von der Verweilzeit oder Belastung unabhängige Konstante ist. Es wird empfohlen eine oS-Raumbelastung B_R von etwa $3 \text{ gl}^{-1}\text{d}^{-1}$ zu wählen, aus der sich je nach oS-Konzentration im Gärsubstrat die mittlere hydraulische Verweilzeit t_m ergibt. Die Verweilzeit sollte jedoch nicht zu gering gewählt werden, da während der Inbetriebnahme die am biologischen Abbau beteiligte Mischpopulation aus Bakterien und Methanbildnern sich noch an das Gärsubstrat adaptieren muss und nicht die Gefahr der Überlastung des Fermenters besteht.

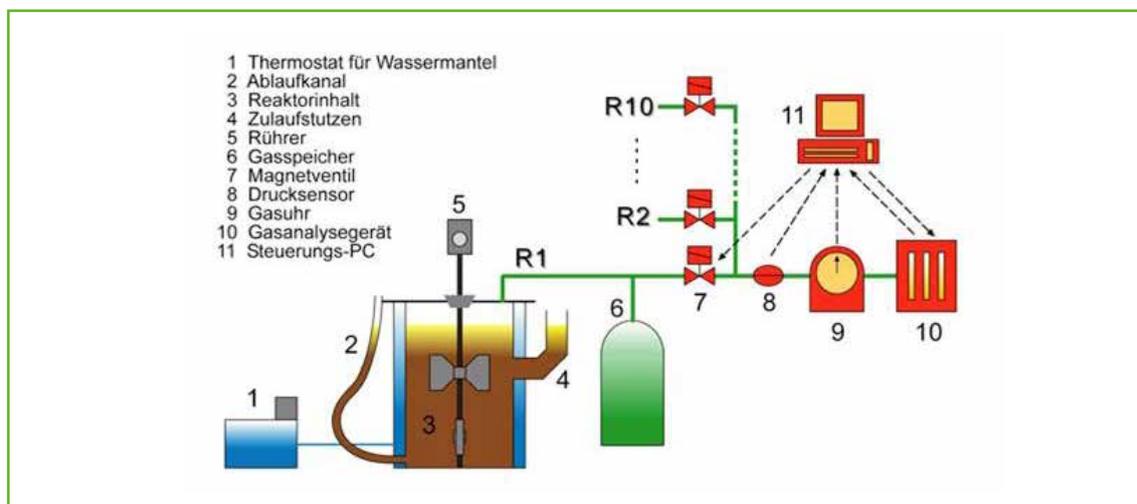


Abb. 21: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Biogas-/Methanausbeute im Fermenter y_{B/CH_4}^F und der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_f [47]

Grundlage für die Bestimmung des Gleichgewichtszustandes ist die Änderung r_c der Konzentration eines Inhaltsstoffes c im Fermenter, der mit einer Verdünnungsgeschwindigkeit $D=1/t_m$ aus dem Fermenter ausgespült wird (Gl. 33).

$$r_c = \frac{dc}{dt} = -D \cdot c \quad (\text{Gl. 33})$$

Nach Integration von Gl. 33 kann c_t/c_0 im Verlauf der Versuchszeit für verschiedene mittlere hydraulische Verweilzeiten (Gl. 34) dargestellt werden. Dabei entspricht c_0 der Anfangskonzentration des auszuspülen den Inhaltsstoffs und wird gleich 1 gesetzt.

$$\int_{c_0}^{c_t} \frac{dc}{c} = -D \int_{t_0}^t dt \rightarrow \ln\left(\frac{c_t}{c_0}\right) = -D \cdot t \rightarrow \frac{c_t}{c_0} = e^{(-D \cdot t)} \quad (\text{Gl. 34})$$

Bei einer gewählten mittleren hydraulischen Verweilzeit von 30 Tagen sind nach 90 Tagen Versuchszeit nur noch 5 % der zu Beginn vorhandenen Inhaltstoffkonzentration im Fermenter vorhanden. Bei längeren mittleren hydraulischen Verweilzeiten sind entsprechend längere Versuchszeiten erforderlich (Abb. 22).

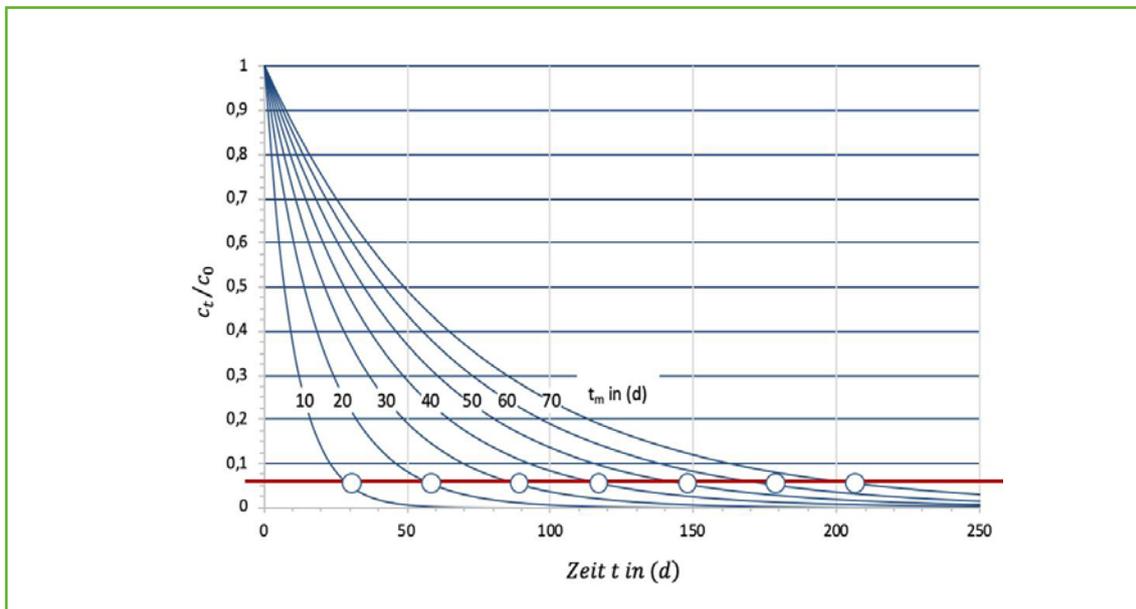


Abb. 22: Erreichung des Gleichgewichtszustandes bei $c_t/c_0=0,05$ im Verlauf der Versuchszeit t bei verschiedenen Werten von t_m

Der Vorteil des allgemeinen Berechnungsmodells für die Auslegung der Fermentergröße besteht darin, dass nur ein kontinuierlich beschickter Laborfermenter als Langzeitversuch bei einer konstanten mittleren hydraulischen Verweilzeit im Gleichgewichtszustand betrieben werden muss. Als Zeitraum der Messwert-erfassung sind etwa 4 Wochen ausreichend, um die Größe von y_{B/CH_4}^F zu bestimmen. Für Rindergülle mit einer Konzentration an organischer Substanz c_0 von 84 gl^{-1} wurde im Langzeitversuch bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m von 30 Tagen eine Methanausbeute im Fermenter y_{B/CH_4}^F von 220 lkg^{-1} gemessen. Mit Hilfe der im Gärttest bestimmten maximalen Methanausbeute y_{B/CH_4}^{max} von 283 lkg^{-1} (Abb. 20) kann die Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten durch Gl. 27 erfolgen, indem die gemessenen Werte eingesetzt werden (Gl. 35).

$$k_f = \frac{1}{30} \left(\frac{220}{283-220} \right) = 0,116 \text{ d}^{-1} \quad (\text{Gl. 35})$$

Damit lässt sich mit Hilfe von Gl. 25 die Methanausbeute im Fermenter $y_{CH_4}^F$ als Funktion von t_m berechnen und grafisch darstellen (Abb. 23).

Aus den bekannten Werten für $y_{CH_4}^{max}$ und $y_{CH_4}^F$ ergibt sich auch die maximale Methanausbeute im Gärrestlager aus der Differenz von $y_{CH_4}^{max}$ und $y_{CH_4}^F$ zu $283-220=63 \text{ lkg}^{-1}$. Mit steigenden Werten von t_m gehen auch die Werte für $y_{CH_4}^{max/L}$ zurück, da die Methanausbeute im Fermenter ansteigt und demzufolge auch weniger Methanbildungspotenzial im Gärrestlager zur Verfügung steht. Analog kann auch die Methanausbeute im Fermenter $y_{CH_4}^F$ als Funktion von B_R (Gl. 26) berechnet und grafisch dargestellt werden (Abb. 24). Da Raumbelastung und mittlere hydraulischen Verweilzeit durch die Konzentration an organischer Substanz im Zufluss c_0 verbunden sind (Gl. 11 in Abb. 14), ergibt sich für $t_m=30 \text{ d}$ und $c_0=84 \text{ kgm}^{-3}$ eine Raumbelastung von $B_R=2,8 \text{ kgm}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

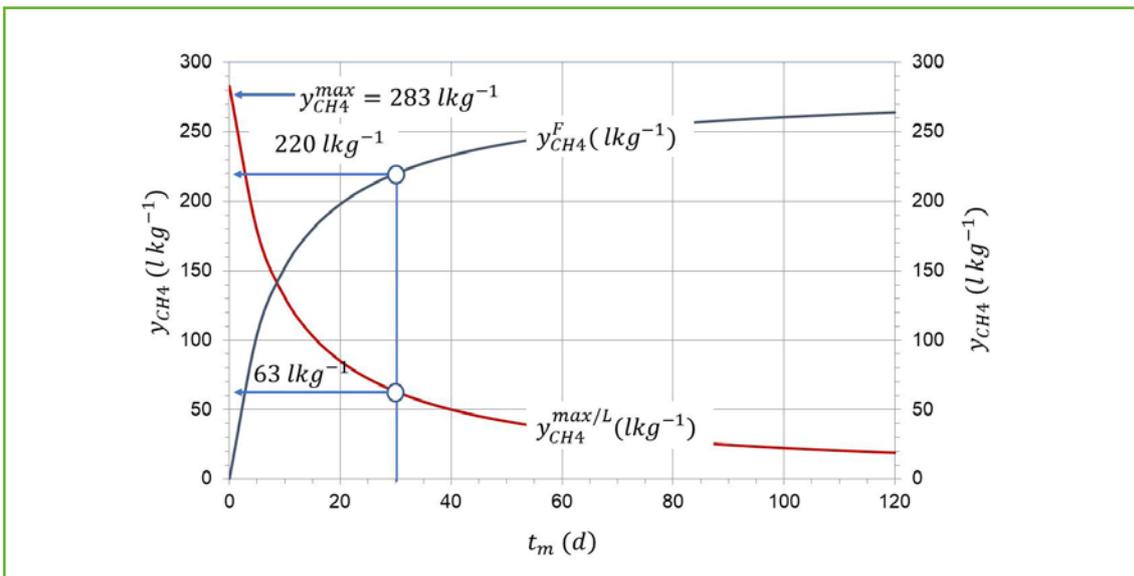


Abb. 23: Methanausbeute im Fermenter $y_{CH_4}^F$ und Methanbildungspotenzial im Gärrestlager $y_{CH_4}^{max/L}$ in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m

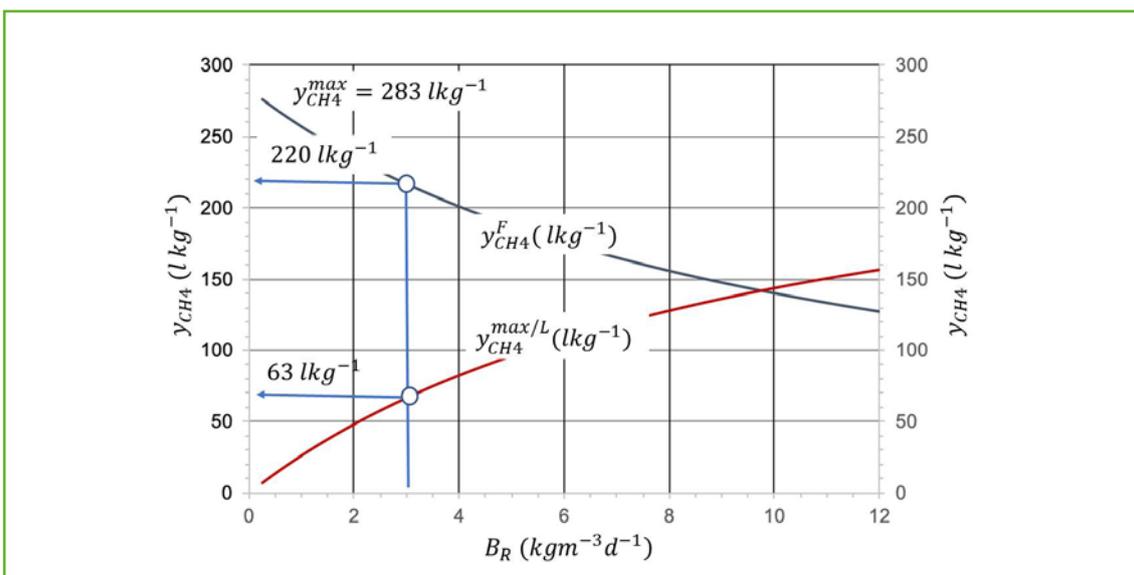


Abb. 24: Methanausbeute im Fermenter $y_{CH_4}^F$ und Methanbildungspotenzial im Gärrestlager $y_{CH_4}^{max/L}$ in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R

6.3.3 Biogas-/Methanausbeute im Gärrestlager

Die Biogas-/Methanbildung im Gärrestlager y_{B/CH_4}^L ist abhängig von der Lagerzeit, der Temperatur im Gärrestlager und von der im Gärrestlager noch maximal verfügbaren Biogas-/Methanausbeute $y_{B/CH_4}^{max/L}$. Wie bei den kontinuierlichen Versuchen im Fermenter kann der Verlauf der Biogas-/Methanbildung auch durch eine Reaktion 1. Ordnung mit einer Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_L beschrieben werden (Gl. 36). Der Wert von $y_{B/CH_4}^{max/L}$ entspricht dabei der Differenz aus maximaler Biogas-/Methanausbeute im Gärsubstrat $y_{B/CH_4}^{max/Inp}$ und der bereits im Fermenter gebildeten Biogas-/Methanmenge y_{B/CH_4}^F (Gl. 37).

$$y_{CH_4}^L = y_{CH_4}^{max/L} \cdot (1 - e^{(-k_L \cdot t)}) \quad (Gl. 36)$$

$$y_{CH_4}^{max/L} = y_{CH_4}^{max} - y_{CH_4}^F \quad (Gl. 37)$$

Die Menge der Biogas-/und Methanbildung kann wieder in einfachen Labor-batch-Versuchen ermittelt werden, indem über einen Zeitraum von 60 Tagen die Biogas-/Methanbildung gemessen wird (Abb. 25). Eine Kurvenanpassung wie in Abb. 20 ist hierbei nicht notwendig, da der Maximalwert der Biogas-/und Methanbildung im Gärrestlager durch Gl. 37 bekannt ist. Wichtig ist, dass die Gärreste aus dem Laborfermenter (siehe Kapitel 6.3.3) vor Beginn der batch-Versuche bei 4 °C aufbewahrt wurden. Es sollte möglichst die gleiche Temperatur gewählt werden, bei dem der Fermenter betrieben wird. In der Regel ist das der mesophile Temperaturbereich von 37 °C. Für die Bestimmung des Temperaturterms f_T nach Gl. 3 muss die Biogas-/Methanbildung noch bei einer geringeren Temperatur z. B. bei 22 °C gemessen werden.

Durch Umformung von Gl. 36 kann die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Biogas-/Methanbildung im Gärrestlager k_L bei zwei verschiedenen Temperaturen auch grafisch bestimmt werden. Hierzu wird Gl. 38 als Geradengleichung dargestellt mit t als x-Achse und dem negativen natürlichen Logarithmus des Quotienten in der Klammer als y-Achse. Der Wert von k_L ergibt sich als negativer Anstieg für die beiden untersuchten Temperaturen (Abb. 26).

$$k_L = \frac{1}{t} \cdot \left[-\ln \left(\frac{y_{CH_4}^{max} - y_{CH_4}^L}{y_{CH_4}^{max/L}} \right) \right] \quad (Gl. 38)$$

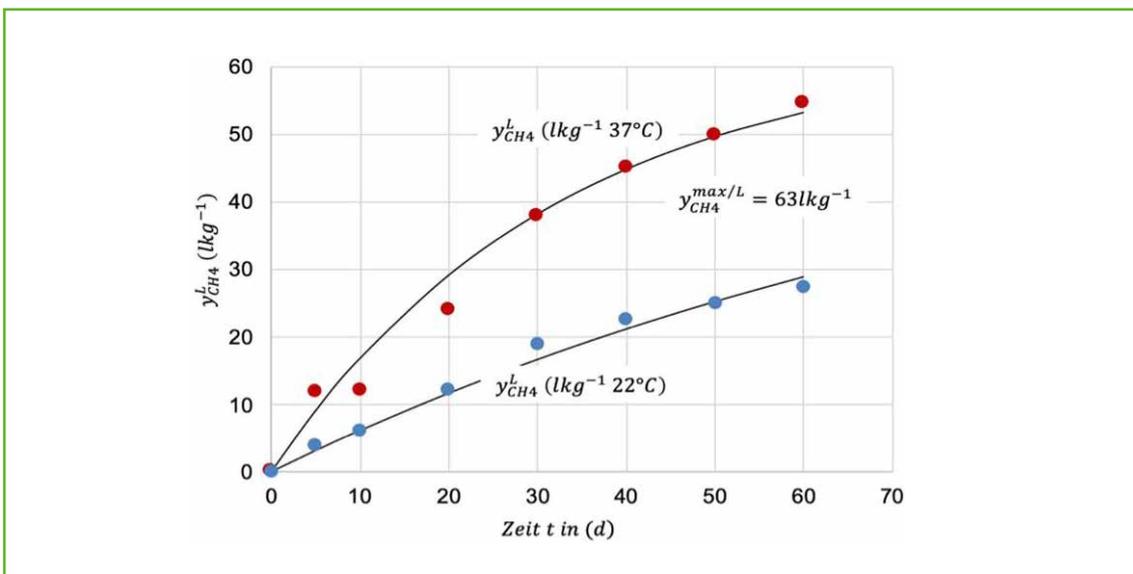


Abb. 25: Verlauf der Methanbildung im Gärrestlager bei zwei verschiedenen Temperaturen

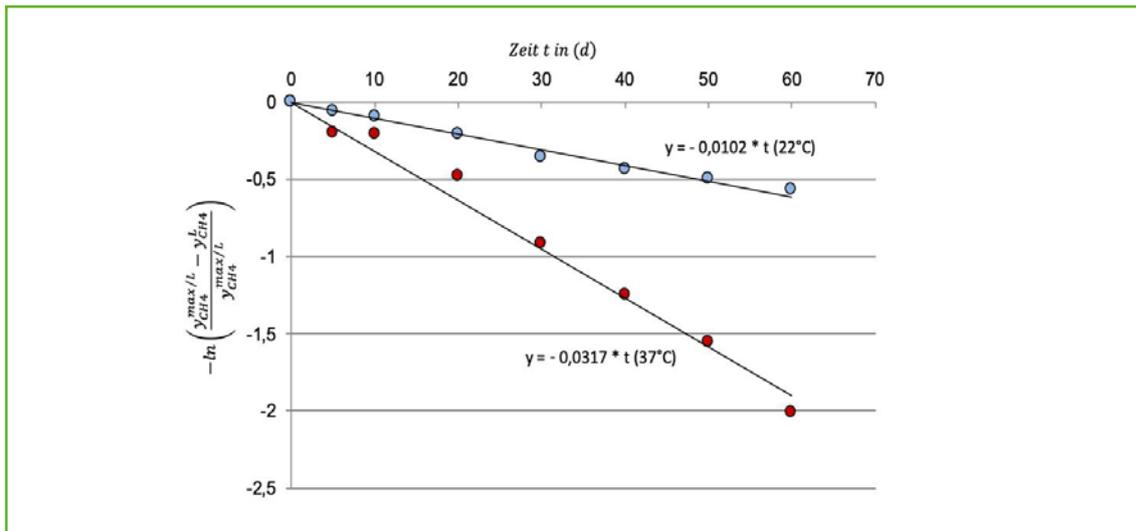


Abb. 26: Darstellung von Gl. 38 als Geradengleichung mit Werten für k_L bei 37°C und 22°C von 0,0317 d⁻¹ bzw. 0,0102 d⁻¹.

Die Berechnung der Biogas-/Methanbildung im Gärrestlager im Verlauf der Lagerzeit bei verschiedenen Temperaturen ist nun mit Hilfe des Temperaturterm f_T möglich, der aus Gl. 3 (s. Kap. 4.2) ermittelt werden kann (Gl. 39).

$$f_T = \left(\frac{k_L(T_2)}{k_L(T_1)}\right)^{\frac{1}{T_2 - T_1}} = \left(\frac{0,0317}{0,0102}\right)^{\frac{1}{37 - 22}} = 1,0785 \quad (\text{Gl. 39})$$

Bei Temperaturen, die unter 37° liegen, lassen sich die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten nach Gl. 40 berechnen.

$$k_L < 37^\circ\text{C} = \frac{k_L(37^\circ\text{C})}{f_T^{37 - T}} \quad (\text{Gl. 40})$$

Bei einer Temperatur T im Gärrestlager von 22°C beträgt der Wert für $k_{L/22^\circ}$ entsprechend Gl. 40

$$k_{L/22^\circ\text{C}} = \frac{0,0317}{f_T^{37 - 22}} = \frac{0,0317}{1,0785^{(37 - 22)}} = 0,0102 \text{ d}^{-1}$$

der auch in Abb. 26 grafisch bestimmt wurde. Damit kann der Verlauf der Methanbildung im Gärrestlager auch für andere Temperaturen dargestellt werden.

Die in Abb. 25 dargestellte Methanbildung innerhalb eines Zeitraumes von 60 Tagen beschreibt die Methanbildung des Gärrestes, der zu Beginn der Lagerung in der gesamten Menge im Gärrestlager vorliegt. Dieses Szenario entspricht aber nicht den Bedingungen in der Praxis, da die Abläufe aus dem Fermenter kontinuierlich in das Gärrestlager gelangen. Ein praktikabler Ansatz für die Berechnung dieser zeitversetzten Methanbildung ist nachfolgend beschrieben und kann mit Hilfe der beiden Excel-Tabellen (Tab. 2 und 3) durchgeführt werden.

Tab. 2: Methanausbeuten nach Gl. 36 im Verlauf der Zeit für Temperaturen im Gärrestlager zwischen 5 °C und 25 °C mit $y_{CH_4}^{max/L} = 63 \text{ l kgO}^{-1}$ zwischen 5 °C und 25 °C von 0 bis 147 d

| Zeit t in (d) | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 5,39 | 3,75 | 2,59 | 1,79 | 1,23 |
| 14 | 10,33 | 7,28 | 5,08 | 3,53 | 2,44 |
| 21 | 14,84 | 10,59 | 7,47 | 5,22 | 3,62 |
| 28 | 18,97 | 13,71 | 9,75 | 6,86 | 4,78 |
| 35 | 22,74 | 16,65 | 11,95 | 8,45 | 5,92 |
| 42 | 26,19 | 19,41 | 14,05 | 10,01 | 7,04 |
| 49 | 29,35 | 22,01 | 16,07 | 11,51 | 8,13 |
| 56 | 32,23 | 24,45 | 18,00 | 12,98 | 9,21 |
| 63 | 34,87 | 26,74 | 19,86 | 14,40 | 10,26 |
| 70 | 37,28 | 28,90 | 21,63 | 15,78 | 11,29 |
| 77 | 39,48 | 30,93 | 23,34 | 17,12 | 12,30 |
| 84 | 41,50 | 32,84 | 24,97 | 18,43 | 13,30 |
| 91 | 43,34 | 34,64 | 26,54 | 19,69 | 14,27 |
| 98 | 45,02 | 36,33 | 28,04 | 20,92 | 15,22 |
| 105 | 46,56 | 37,91 | 29,48 | 22,12 | 16,16 |
| 112 | 47,97 | 39,41 | 30,86 | 23,28 | 17,07 |
| 119 | 49,26 | 40,81 | 32,19 | 24,41 | 17,97 |
| 126 | 50,44 | 42,13 | 33,45 | 25,51 | 18,85 |
| 133 | 51,51 | 43,38 | 34,67 | 26,57 | 19,72 |
| 140 | 52,50 | 44,55 | 35,84 | 27,61 | 20,56 |
| 147 | 53,40 | 45,64 | 36,96 | 28,61 | 21,39 |

- Der Verlauf der Methanbildung für die vorgeschriebene Lagerzeit wird mit Hilfe von Gl. 36 bei verschiedenen Temperaturen ermittelt und in einer Excel-Tabelle dargestellt (Tab. 2),
- Bei einer Verweilzeit im Fermenter von 30 Tagen (Abb. 22) liefert der Fermenter eine Methanausbeute $y_{CH_4}^E$ von 220 l kg^{-1} , so dass die im Gärrest noch verbleibende maximale Methanausbeute $y_{CH_4}^{max/L} = 63 \text{ l kg}^{-1}$ beträgt.
- Bei z. B. 150 Tagen Lagerzeit lassen sich 21 Intervalle von jeweils 7 Tagen bilden, so dass die in einer Woche aus dem Fermenter anfallenden Gärreste dem Gärrestlager kumulativ zugeführt werden.
- Die in Tabelle 2 ermittelten und von der Temperatur abhängigen Methanausbeuten werden in Spalte C von Tabelle 3 kopiert und einer Woche mit 21 Intervallen zugeordnet
- Die in Spalte C dargestellten Einzelwerte in den Zeilen 21 bis 41 werden durch 21 (Zahl der Zeitintervalle) dividiert und in die Spalten D bis X übernommen,
- Dabei handelt es sich um wöchentliche Methanausbeuten, die im Gärrestlager freigesetzt und jeweils um eine Woche verzögert kopiert werden.
- Beim letzten Zeitintervall in Spalte X nach 21 Wochen wird nur noch der Anfangswert der ersten Woche von 0,2571 Liter Methan je kg oS eingetragen.
- Der in Zeile 41 und Spalte D ermittelte Wert von 2,5429 in Tabelle 3 entspricht der Summe des Methans nach 147 Tagen, das aus dem Ablauf des Fermenters von einer Woche stammt.
- Als letzter Schritt werden die in Zeile 41 von den Spalten D (7 Tage) bis Spalte X (147 Tage) dargestellten Werte aufsummiert und liefern die Methanausbeute bei einer bestimmten Temperatur (Abb. 27 und Abb. 28).

Tab. 3: Zeitversetzte kumulative Methanausbeute $y_{CH_4}^t$ bei 25°C innerhalb von 21 Intervallen (147 Tage Lagerzeit)

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | bis Spalte X |
|--------|---------------|---------------|-------|--------------|------|------|------|------|------|--------------|
| | | | | Intervalle n | | | | | | |
| | | | | n=1 | n=2 | n=3 | n=4 | n=5 | n=6 | bis n=21 |
| Zeilen | Zeitintervall | Lagerzeit (d) | | | | | | | | |
| 21 | 1 | 7 | 5,39 | 0,25 | | | | | | |
| 22 | 2 | 14 | 10,33 | 0,49 | 0,25 | | | | | |
| 23 | 3 | 21 | 14,84 | 0,70 | 0,49 | 0,25 | | | | |
| 24 | 4 | 28 | 18,97 | 0,90 | 0,70 | 0,49 | 0,25 | | | |
| 25 | 5 | 35 | 22,74 | 1,08 | 0,90 | 0,70 | 0,49 | 0,25 | | |
| 26 | 6 | 42 | 26,19 | 1,24 | 1,08 | 0,90 | 0,70 | 0,49 | 0,25 | |
| 27 | 7 | 49 | 29,35 | 1,39 | 1,24 | 1,08 | 0,90 | 0,70 | 0,49 | 0,25 |
| 28 | 8 | 56 | 32,23 | 1,53 | 1,39 | 1,24 | 1,08 | 0,90 | 0,70 | 0,49 |
| 29 | 9 | 63 | 34,87 | 1,66 | 1,53 | 1,39 | 1,24 | 1,08 | 0,90 | 0,70 |
| 30 | 10 | 70 | 37,28 | 1,77 | 1,66 | 1,53 | 1,39 | 1,24 | 1,08 | 0,90 |
| 31 | 11 | 77 | 39,48 | 1,88 | 1,77 | 1,66 | 1,53 | 1,39 | 1,24 | 1,08 |
| 32 | 12 | 84 | 41,50 | 1,97 | 1,88 | 1,77 | 1,66 | 1,53 | 1,39 | 1,24 |
| 33 | 13 | 91 | 43,34 | 2,06 | 1,97 | 1,88 | 1,77 | 1,66 | 1,53 | 1,39 |
| 34 | 14 | 98 | 45,02 | 2,14 | 2,06 | 1,97 | 1,88 | 1,77 | 1,66 | 1,53 |
| 35 | 15 | 105 | 46,56 | 2,21 | 2,14 | 2,06 | 1,97 | 1,88 | 1,77 | 1,66 |
| 36 | 16 | 112 | 47,97 | 2,28 | 2,21 | 2,14 | 2,06 | 1,97 | 1,88 | 1,77 |
| 37 | 17 | 119 | 49,26 | 2,34 | 2,28 | 2,21 | 2,14 | 2,06 | 1,97 | 1,88 |
| 38 | 18 | 126 | 50,44 | 2,40 | 2,34 | 2,28 | 2,21 | 2,14 | 2,06 | 1,97 |
| 39 | 19 | 133 | 51,51 | 2,45 | 2,40 | 2,34 | 2,28 | 2,21 | 2,14 | 2,06 |
| 40 | 20 | 140 | 52,50 | 2,50 | 2,45 | 2,40 | 2,34 | 2,28 | 2,21 | 2,14 |
| 41 | 21 | 147 | 53,40 | 2,54 | 2,50 | 2,45 | 2,40 | 2,34 | 2,28 | 2,21 |
| | | | Tage | 7 | 14 | 21 | 28 | 35 | 42 | 49 |

... Fortsetzung in Tabelle 3 letzte Zeile 49 bis 147 Tage oder 7 bis 21 Wochen

Welche Methanausbeute im Gärrestlager zu erwarten ist, hängt nicht nur von der Lagerzeit und der im Gärrestlager vorhandenen Temperatur ab, sondern auch davon, welcher Anteil der organischen Substanz bereits im Fermenter zu Methan umgesetzt worden ist. Bei einer Verweilzeit von 30 Tagen und einer maximalen Methanausbeute des Gärsubstrat-Inputs in Höhe von $y_{CH_4}^{max} = 283 \text{ kg}^{-1}$ sind im Fermenter bereits 220 kg^{-1} gebildet worden (siehe Abb. 23), was einer noch verbleibenden maximalen Methanausbeute im Gärrestlager von 63 kg^{-1} entspricht. Nach einer Lagerzeit von 150 Tagen sind z. B. bei einer Temperatur von 15 °C einschließlich der Methanbildung im Fermenter 86 % des insgesamt verfügbaren Methanbildungspotenzials gebildet worden (Abb. 27).

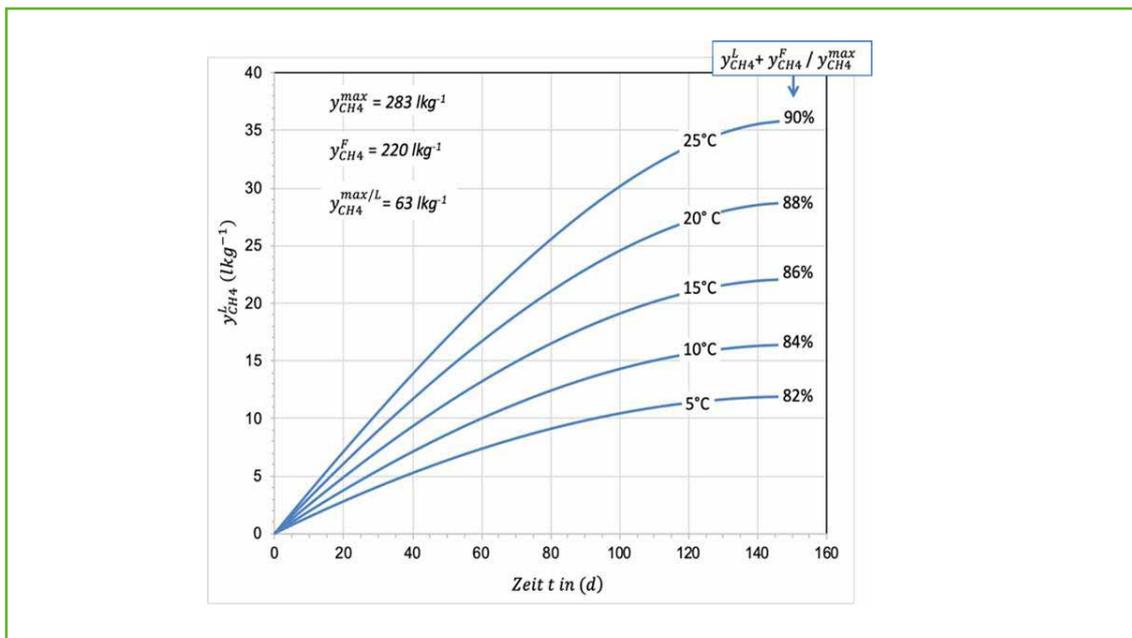


Abb. 27: Methanbildung aus Rindergülle im Gärrestlager im Verlauf der Zeit bei verschiedenen Temperaturen und einer Verweilzeit im Fermenter von $t_m=30$ d.

Wird die Verweilzeit im Fermenter auf 15 Tage halbiert (Abb. 28), was bei Rindergülle ohne Prozessstörungen möglich wäre, reduziert sich auch entsprechend Gl. 25 der Wert von $y_{CH_4}^F$ auf 179 kg^{-1} . Das hat zur Folge, dass im Gärrestlager auch ein höheres Potenzial für die Methanbildung von 104 kg^{-1} vorhanden ist. Bei gleicher Lagerzeit und Temperatur von 15°C im Gärrestlager werden in diesem Fall einschließlich der Methanbildung im Fermenter nur 76 % des im Gärsubstrat verfügbaren Methanpotenzial erreicht. Bei einer Halbierung des Fermentervolumens, was aus ökonomischen Gründen sicher interessant ist, werden 10 % weniger Methan gebildet als bei der Variante in Abb. 27. Liegt die durchschnittliche Lagertemperatur jedoch bei 25°C , beträgt der Unterschied nur noch 6 %.

Es wird deshalb empfohlen, die Temperatur im Gärrestlager zu messen, um die Methanfreisetzung im Verlauf der Lagerzeit berechnen zu können. Das Ergebnis könnte in eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen, ob die Verweilzeit im Fermenter durch erhöhte Substratzufuhr verringert und die damit verbundene geringere Methanausbeute durch ein größeres Volumen des Gärrestlagers kompensiert werden kann.

Die praktische Anwendung des im Kapitel 6.3.3 beschriebenen Modells wurde im Projekt „Opti-Methan“ mit praxisrelevanten Daten zur Methanbildung in den unterschiedlichen Prozessstufen von Biogasanlagen erhoben und auf das Berechnungsmodell übertragen. Im Fokus standen dabei landwirtschaftliche Biogasanlagen, bei denen Mischungen aus Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt wurden. Die Daten dienten als Grundlage für die Erstellung eines Berechnungstools zur Bilanzierung der Prozessstufen Fermentation und Gärrestlagerung und zur Optimierung der Prozessführung bzw. der Auslegung von Biogasanlagen [53].

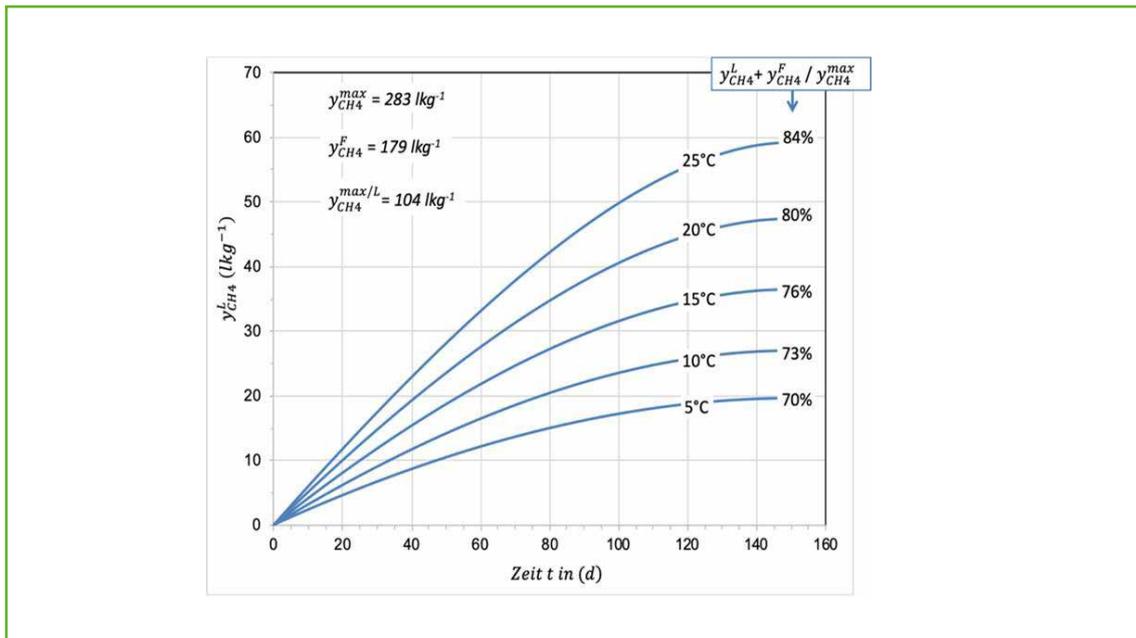


Abb. 28: Methanbildung im Gärrestlager im Verlauf der Zeit bei verschiedenen Temperaturen, $t_m=15$ d

6.3.4 Kofermentation

Im Ergebnis des vom BMEL geförderten bundesweiten Biogas-Messprogramms II [54] hat sich gezeigt, dass 87 % der untersuchten Anlagen Wirtschaftsdünger im Gemisch mit nachwachsenden Rohstoffen als Kofermentation vergären. In der Mischung mit Gülle wurden dabei am häufigsten Mais (50 Ma. %), Getreide GPS (10,7 Ma. %), Grassilage (10,5 Ma. %), Grünroggensilage (9,8 Ma. %) und Körnergetreide (3,1 Ma. %) eingesetzt. Diese Mischung aus Gülle oder Stallmist mit Biogaspflanzen trägt nicht nur zur Steigerung der Biogasproduktion bei, sondern sorgt auch für ein ausgeglichenes Nährstoffverhältnis für die Methanogenese. Von den insgesamt 61 repräsentativen Anlagen wurden 24 Anlagen ausgewählt, die Rindergülle in der Mischung mit nachwachsenden Rohstoffen vergären.

Die erweiterte Modellgleichung (Gl. 43) für die Berechnung der Methanausbeute im Fermenter schließt insgesamt vier Parameter ein ($y_{CH_4}^{max/Crops}$, $y_{CH_4}^{max/Gülle}$, k_F^{Crops} , $k_F^{Gülle}$), die nach der Methode der kleinsten Quadrate für die oben genannten 24 Anlagen bestimmt wurden. Damit kann $y_{CH_4}^{Mix}$ als Funktion von $p_{oS/Inp}^{Crops}$ und t_m in weiten Grenzen dargestellt werden (Abb. 29). Obwohl für den Bereich kleiner Werte von $p_{oS/Inp}^{Crops}$ nur eine geringe Anzahl von Messwerten vorhanden ist, wird deutlich, dass $y_{CH_4}^{Mix}$ für kleine Verweilzeiten stark abfällt, während sich $y_{CH_4}^{Mix}$ für große Verweilzeiten der maximalen Methanausbeute $y_{CH_4}^{max/Mix}$ annähert [55].

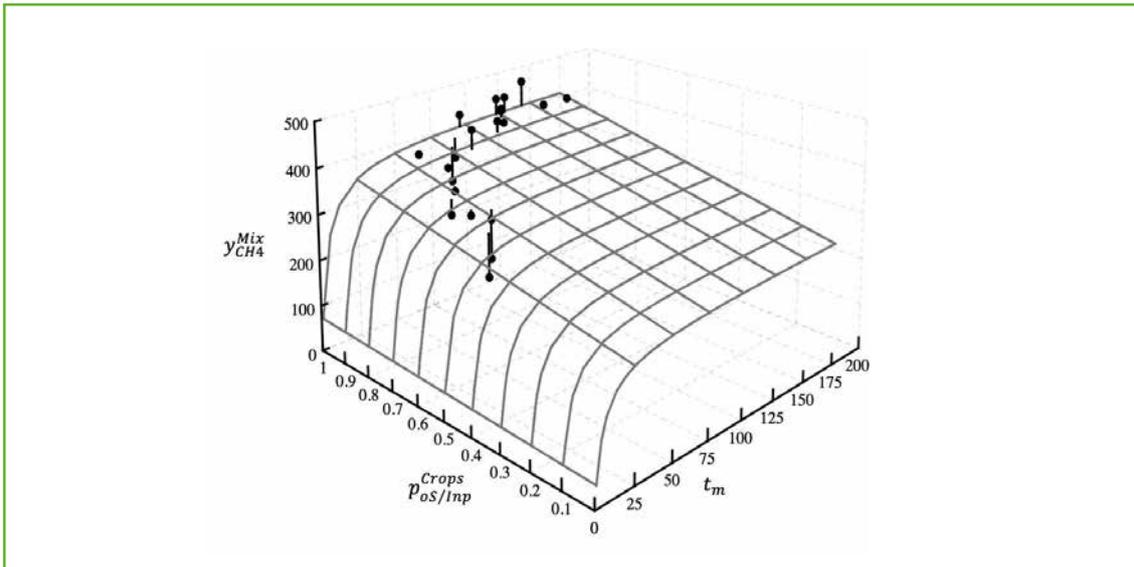


Abb. 29: Einfluss der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m und dem oS Anteil aus Pflanzen im Mix mit Gülle $p_{oS/Inp}^{Crops}$ auf die Methanausbeute $y_{CH_4}^{Mix}$ im Mix Pflanzen und Gülle [55].

Da bei der Kofermentation von NawaRo und Gülle verschiedene Mischungen zum Einsatz kommen, wurden in Gleichung 25 die Werte für k_F und $y_{CH_4}^{max}$ für beliebige Mischungen erweitert. Diese Erweiterung ist durch Interpolation der Einzelwerte zulässig, da für die Mischungen zwischen k_F , $y_{CH_4}^{max}$ und dem oS Anteil aus Pflanzen im Mix mit Gülle $p_{oS/Inp}^{Crops}$ eine lineare Abhängigkeit besteht (Abb. 30 und Abb. 31), die in den Gleichungen 41 und 42 zum Ausdruck kommt.

$$y_{CH_4}^{Mix} = P_{oS/Inp}^{Crops} \cdot y_{CH_4}^{max/Crops} + y_{CH_4}^{max/Gülle} \cdot (1 - p_{oS/Inp}^{Crops}) \quad (Gl. 41)$$

$$y_F^{Mix} = P_{oS/Inp}^{Crops} \cdot y_F^{Crops} + y_F^{max/Gülle} \cdot (1 - p_{oS/Inp}^{Crops}) \quad (Gl. 42)$$

Durch Kombination von Gl. 25, Gl. 41 und Gl. 42 erhält man eine allgemeine Bemessungsgleichung für $y_{CH_4}^{Mix}$ als Funktion von t_m , $p_{oS/Inp}^{Crops}$, $y_{CH_4}^{max/Crops}$, $y_{CH_4}^{max/Gülle}$, k_F^{Crops} und $k_F^{Gülle}$ (Gl. 43).

$$y_{CH_4}^{Mix} = \frac{t_m \cdot (P_{oS/Inp}^{Crops} \cdot k_F^{Crops} + k_F^{Gülle} \cdot (1 - p_{oS/Inp}^{Crops})) \cdot (p_{oS/Inp}^{Crops} \cdot y_{CH_4}^{max/Crops} + y_{CH_4}^{max/Gülle} \cdot (1 - p_{oS/Inp}^{Crops}))}{t_m \cdot (P_{oS/Inp}^{Crops} \cdot k_F^{Crops} + k_F^{Gülle} \cdot (1 - p_{oS/Inp}^{Crops})) + 1} \quad (Gl. 43)$$

Die Anwendung von Gl. 43 für verschiedene Mischungen aus Rindergülle und Maissilage (Abb. 32) sowie von Rindergülle und Rübensilage (Abb. 33) zeigt für die gleichen Mischungen von $p_{oS/Inp}^{Crops}$ deutliche Unterschiede bei der Methanausbeute $y_{CH_4}^{Mix}$ als Funktion der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m . Bei vergleichbaren Werten für $p_{oS/Inp}^{Crops}$ und $y_{CH_4}^{max/Mix}$ erfolgt die Bildung von Methan bei den Mischungen mit Rübensilage wesentlich schneller als bei Maissilage. Der Grund hierfür ist, dass der Wert für Rübensilage mit $k_F^{Crops} = 0,316 \text{ d}^{-1}$ deutlich höher ist als bei Maissilage mit $k_F^{Crops} = 0,033 \text{ d}^{-1}$.

Die geringen Werte lassen sich mit den Analysen der eingesetzten Substrate erklären. So zum Beispiel ist die Konzentration der langsam abbaubaren Rohfaser (XF in %TS) für Maissilage mit 24,6 % TS deutlich höher als bei Rübensilage mit nur 8,0 % TS. Diese geringere Abbaugeschwindigkeit wird deutlich, wenn man die Methanausbeuten in Abhängigkeit von der Verweilzeit für die genannten Mischungen vergleicht (Abb. 32 und 33). Während bei 100 % Rübensilage und $t_m = 40 \text{ d}$ schon 90 % des maximalen Methanausbeute erreicht sind, sind bei 100 % Maissilage und $t_m = 120 \text{ d}$ erst 80 % maximalen Methanausbeute erreicht. Die Kurvenverläufe aus Mischungen von Rindergülle mit Mais- und Rübensilage verhalten sich ähnlich.

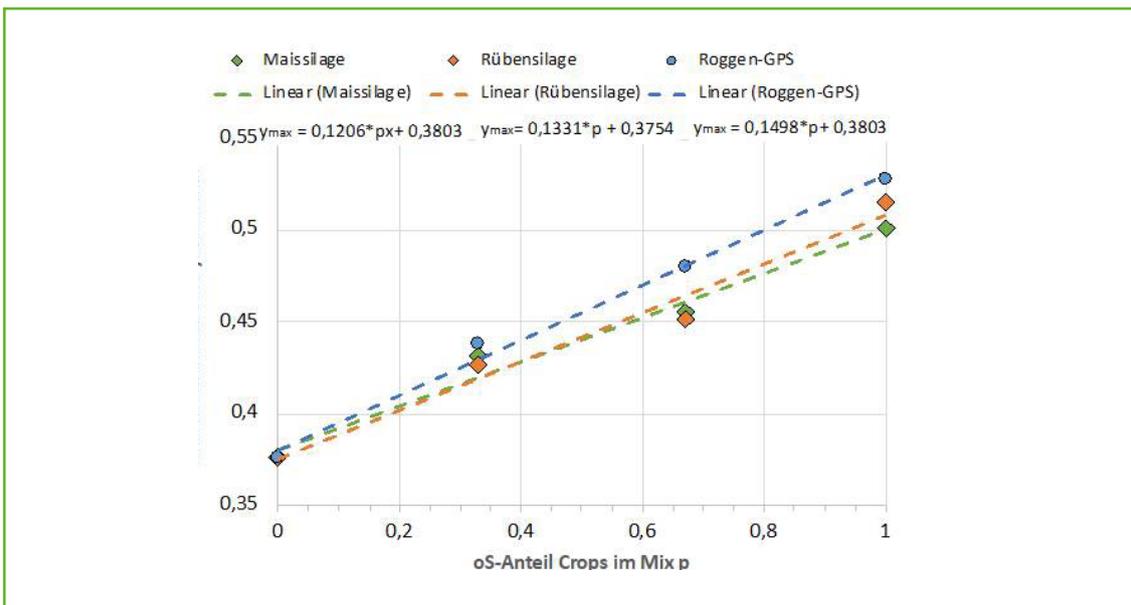


Abb. 30: Maximale Methanausbeuten im Mix $y_{CH_4}^{max/Mix}$ aus Biogaspflanzen und Rindergülle, bei verschiedenen oS-Anteil aus Biogaspflanzen $p_{oS/Inp}^{Crops}$, Daten aus [47]

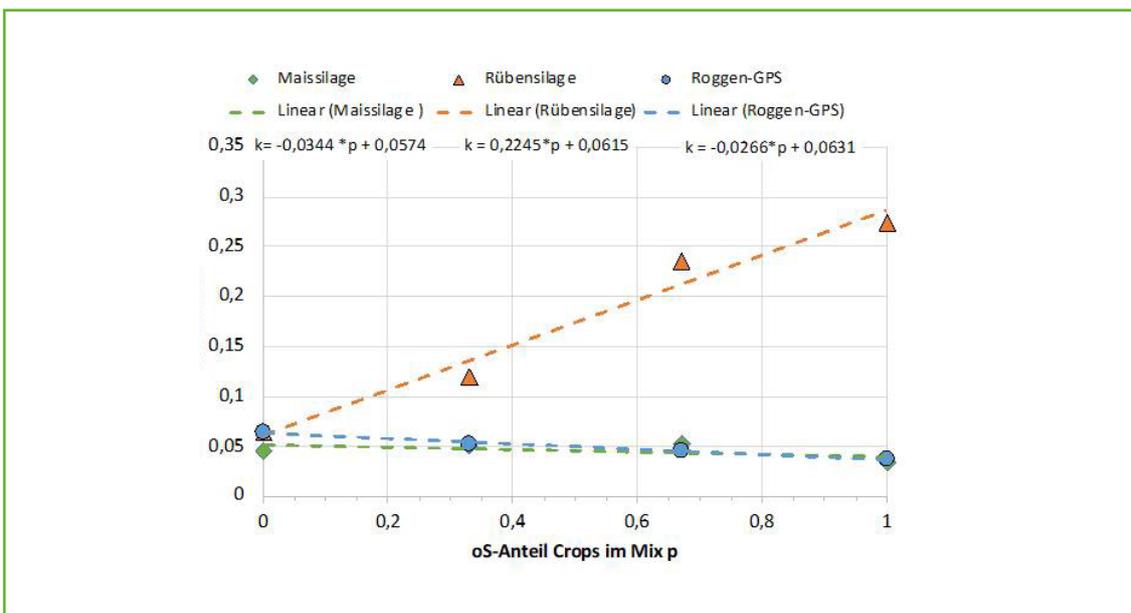


Abb. 31: Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k_F^{Mix} im Mix aus Biogaspflanzen bei verschiedenen oS-Anteilen aus Biogaspflanzen $p_{oS/Inp}^{Crops}$, Daten aus [47]

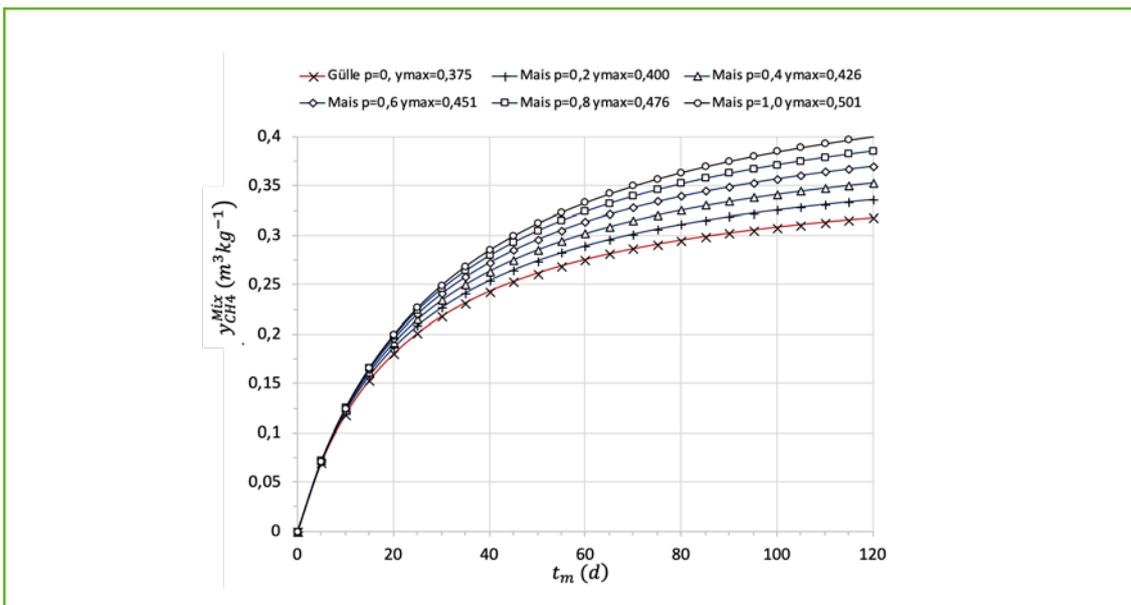


Abb. 32: Methanausbeuten $y_{CH_4}^{Mix}$ aus Mischungen von Rindergülle und Maissilage $p_{oS/Inp}^{Crops}$ in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m .

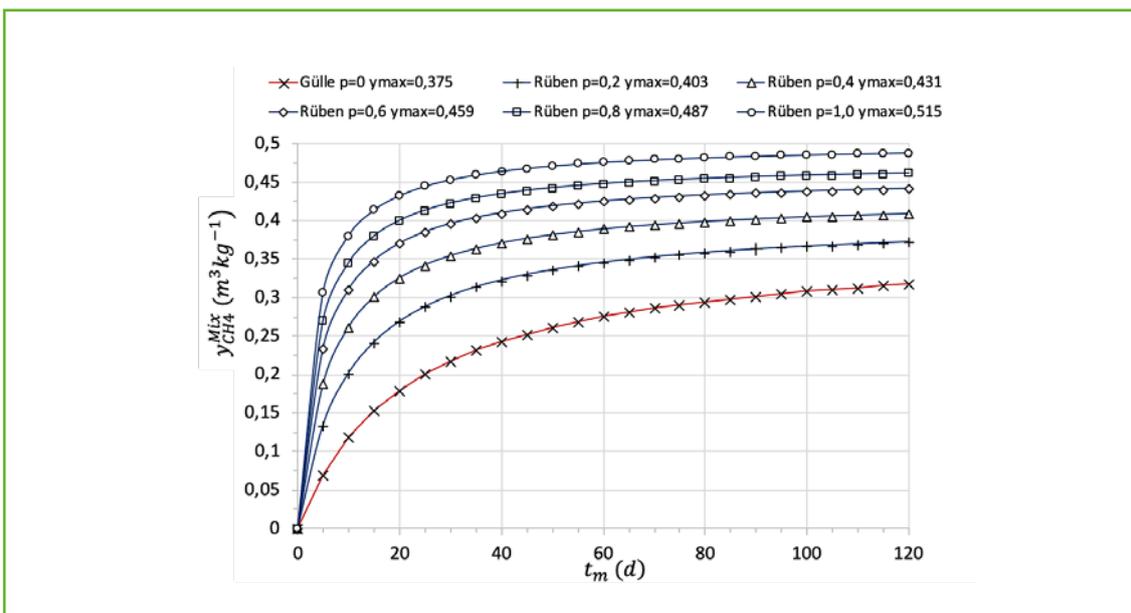


Abb. 33: Methanausbeuten $y_{CH_4}^{Mix}$ aus Mischungen von Rindergülle und Rübensilage $p_{oS/Inp}^{Crops}$ in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m .

7 FESTSTOFFVERGÄRUNG – ERGEBNISSE AUS LABOR- UND PILOTVERSUCHEN

Für die Feststoffvergärung sind zahlreiche organische Reststoffe aus der Landwirtschaft geeignet, wie zum Beispiel Stallmist, Ernterückstände oder die nach der Verarbeitung von Feldfrüchten verfügbaren Reststoffe. Aber auch gezielt angebaute Ganzpflanzen können durch Feststoffvergärung für die Biogasgewinnung eingesetzt werden. Für die Vergärung solcher Feststoffe hat sich der Begriff der „Trockenvergärung“ [56] etabliert, um sich von den Verfahren der Nassvergärung von Gülle im Gemisch mit organischen Feststoffen als Kofermentation (s. Kapitel 6.3.4) abzugrenzen. Die für den Stoffaustausch stets notwendige Feuchte ist in den eingesetzten Feststoffen enthalten.

Nachfolgend werden Verfahren beschrieben, die zwar noch nicht wie der klassische Rührfermenter in der Praxis zum Einsatz kommen. Aber wegen ihrer Einfachheit und zum Teil auch durch hohe Prozessstabilität für die Praxis interessant sein können.

7.1 Satzweise Feststoffvergärung mit Impfmateriale

Die satzweise Vergärung ist die einfachste Möglichkeit der Biogasgewinnung und kann durch Versuche im Labor verfolgt werden. Die zu vergärenden Feststoffe werden dabei mit einem Teil Impfmateriale gemischt, das aus bereits ausgegorenem Material oder Rottemist aus der Rinderhaltung besteht. Die Versuche können z. B. in einfachen Gefäßen, über die eine Haube mit Wasserabschluss nach unten getaucht ist, durchgeführt werden. Das gesammelte Gas aus diesem kleinen Gasometer wird gemessen und die Gaszusammensetzung bestimmt. Der gasdichte Abschluss nach oben kann auch bei der Verwendung von größeren zylindrischen Gefäßen aus Kunststoff oder Metall durch einen Deckel erfolgen, der als ringförmige Wassertasse ausgebildet ist (Abb. 34). Beim Ansatz der Mischung muss jedoch darauf geachtet werden, dass es bei zu geringem Zusatz von Impfmateriale zu keiner Übersäuerung der Reaktionsmasse kommt und die Biogasbildung gehemmt wird (Abb. 35).

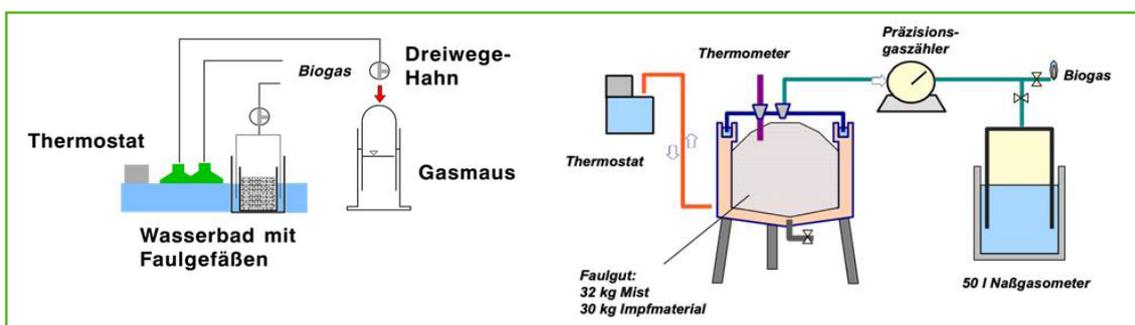


Abb. 34: Versuchsaufbau zur Biogasbildung im Labor des ATB mit 3 kg Glaszylindern (links) und einer kleintechnischen Labor-Versuchsanlage (rechts)

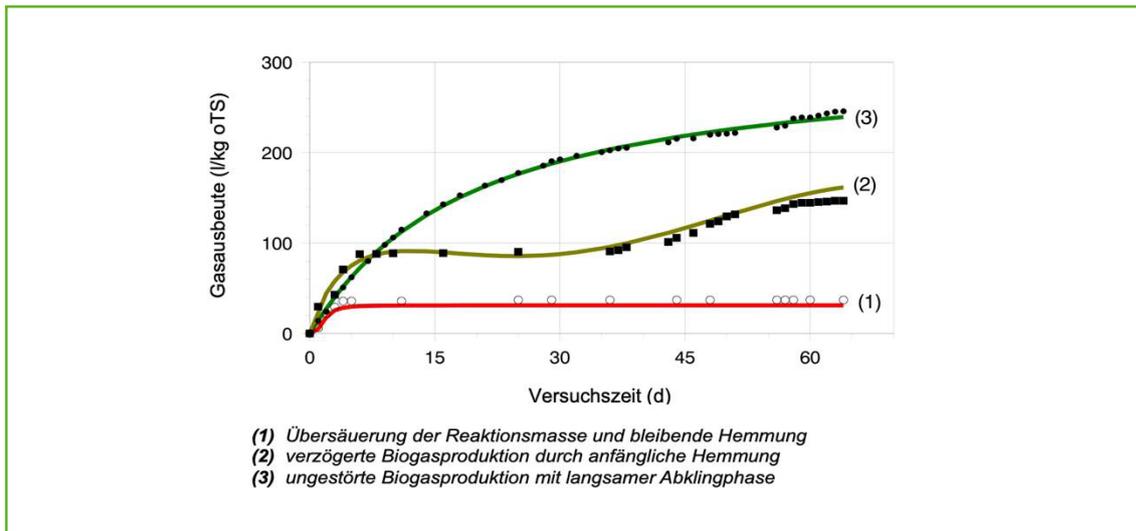


Abb. 35: Verläufe der Biogasbildung bei der satzweisen Vergärung.

Der Einfluss des Impfmaterials im Gemisch mit Grassilage zeigt eine ausgeprägte Hemmung der Biogasbildung, wenn die oTS-Masse im Gemisch zu 75 % aus Grassilage und 25 % Impfmateriale besteht. Höhere oTS-Anteile aus dem Impfmateriale im Gemisch führen zu einer deutlich höheren Biogasausbeute, die mit den geringeren Konzentrationen an organischen Säuren im Gemisch bei Beendigung des Versuches nach 75 Tagen korrelieren (Abb. 36).

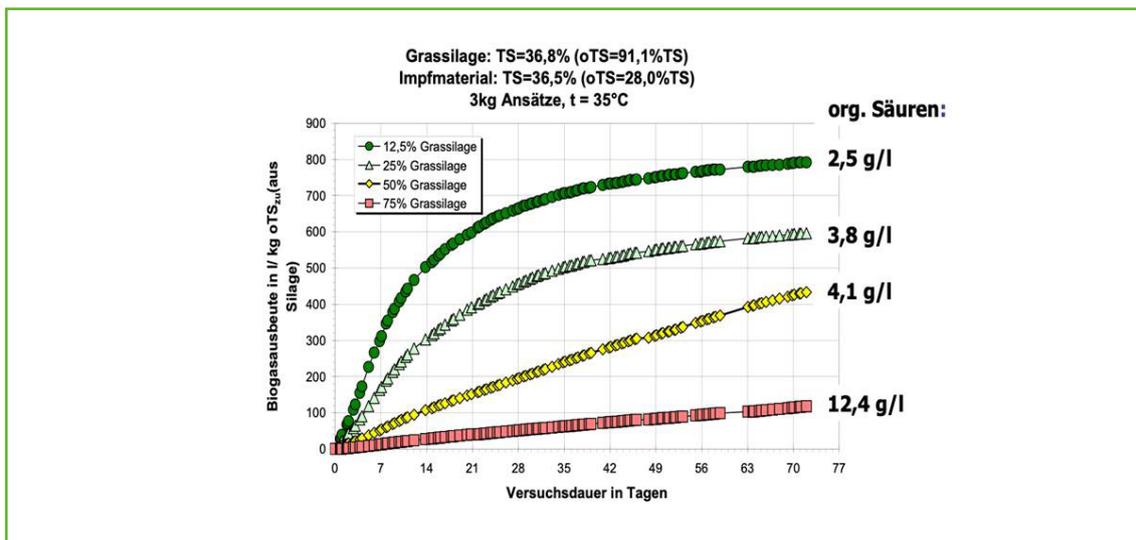


Abb. 36: Verläufe der Biogasbildung bei der satzweisen Vergärung von Grassilage mit unterschiedlichen Anteilen Impfmateriale auf oTS-Basis bei 35°C.

Die Verläufe der Biogasbildung bei der satzweisen Vergärung verschiedener organischer Feststoffe macht deutlich, dass bis zur Erreichung zufriedenstellender Biogasausbeuten sehr lange Lagerzeiten notwendig sind (Abb. 36 und 37). Ein wichtiger Faktor bei der satzweisen Vergärung ist die Masse an Impfmateriale, die in der Mischung vorhanden ist und durch das Impfmaterialeverhältnis p_i ausgedrückt werden kann. Es ist das Verhältnis der organischen Trockenmasse aus dem Impfmateriale ($m_i \cdot c_i$) und dem zu vergärenden Substrat ($m_s \cdot c_s$).

Organische Feststoffe mit einem hohen Gehalt an schnell abbaubaren organischen Verbindungen wie etwa Rüben oder Mais benötigen deutlich höhere Impfmaterialezusätze als Roggenstroh oder Hanfsilage (Abb. 38).

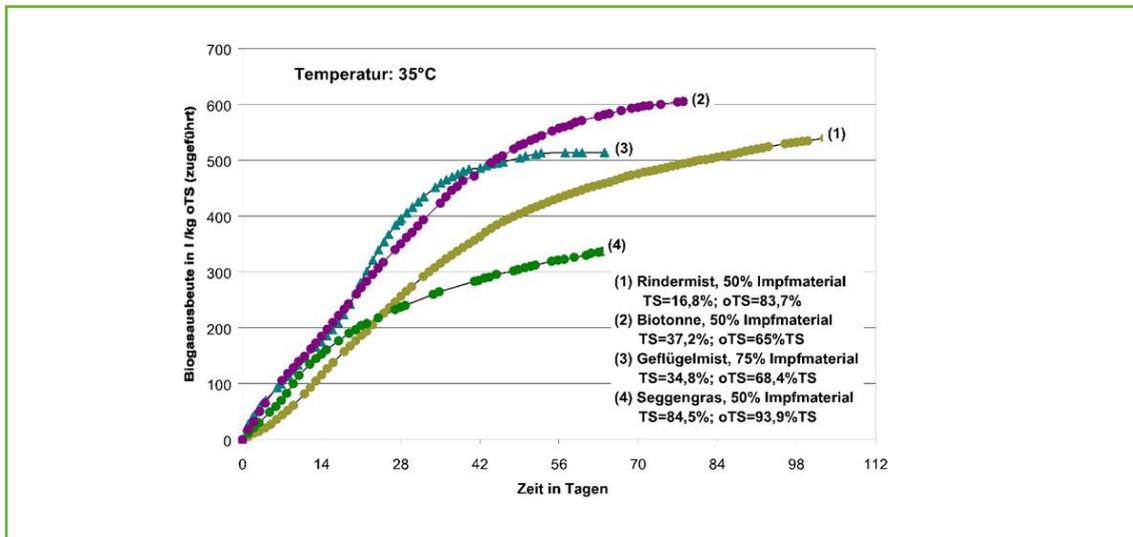


Abb. 37: Verlauf der Biogasbildung bei der satzweisen Vergärung verschiedener organischer Feststoffe mit 50% und 75% Impfmateriale.

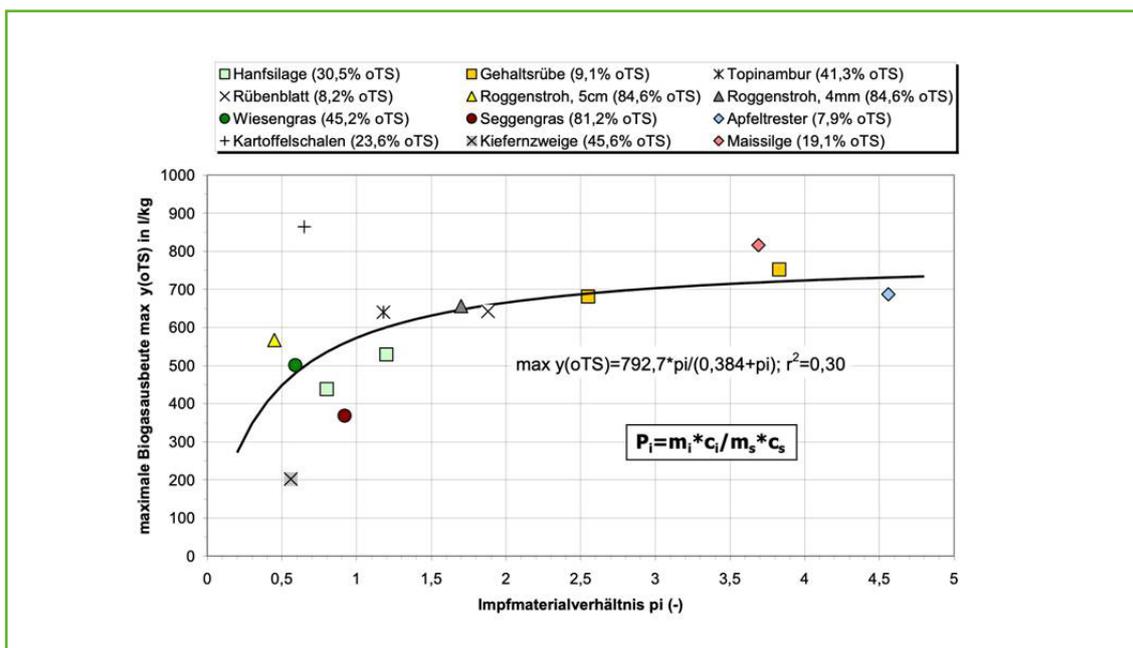


Abb. 38: Einfluss des oTS-Impfmaterialeverhältnisses π_i auf die maximal mögliche Biogasausbeute verschiedener organischer Feststoffe. [57]

In einem kleintechnischen Versuch (Abb. 39) wurde ein Gemisch aus 85 Ma.% Rindermist und 15 Ma.% Grassilage aus der oberen Schicht eines Horizontalsilos über einen Zeitraum von 112 Tagen unter mesophilen Temperaturen gelagert. Die Anlage bestand aus einer kreisrunden Bodenplatte mit einem Durchmesser von etwa 2,5 m, in der eine Fußbodenheizung eingebracht war, einer gasdichten und wärmegeprägten Folienhaube und Temperaturfühlern im Haufwerk. Die Gasmenge und die Gaszusammensetzung wurden täglich gemessen. Die Mischung der Grassilage mit Rindermist erfolgte vor der Befüllung durch einen Stallungstreuer. Eine Erwärmung des Gemisches von etwa 2,75 t war bei der Einlagerung wegen der bereits eingesetzten Eigenerwärmung auf 45 °C nicht erforderlich. Zum Ausgleich der Temperaturverluste infolge Abstrahlung wurde die mit Warmwasser betriebene Fußbodenheizung genutzt.



Abb. 39: Kleintechnische Versuchsanlage zur Biogasgewinnung aus schüttfähigen Substraten, links: gefüllter Fermenter mit Fußbodenheizung und Wassertasse, rechts: Fermenter im Betriebszustand [58]

Nach dem gasdichten Verschließen des Haufwerkes setzte die Biogasproduktion ein. Die noch im Haufwerk verbliebene Luft wurde verdrängt und nach etwa einer Woche hatte sich ein brennbares Gemisch aus Methan und Kohlendioxid eingestellt (Abb. 40). Die Biogasrate folgte bis etwa 60 d dem Temperaturverlauf und nach 112 Versuchstagen sind aus 1 kg Frischmasse und 1 kg oTS im Gemisch 98 Liter bzw. 430 Liter Biogas mit durchschnittlich 58 % Methan gebildet worden.

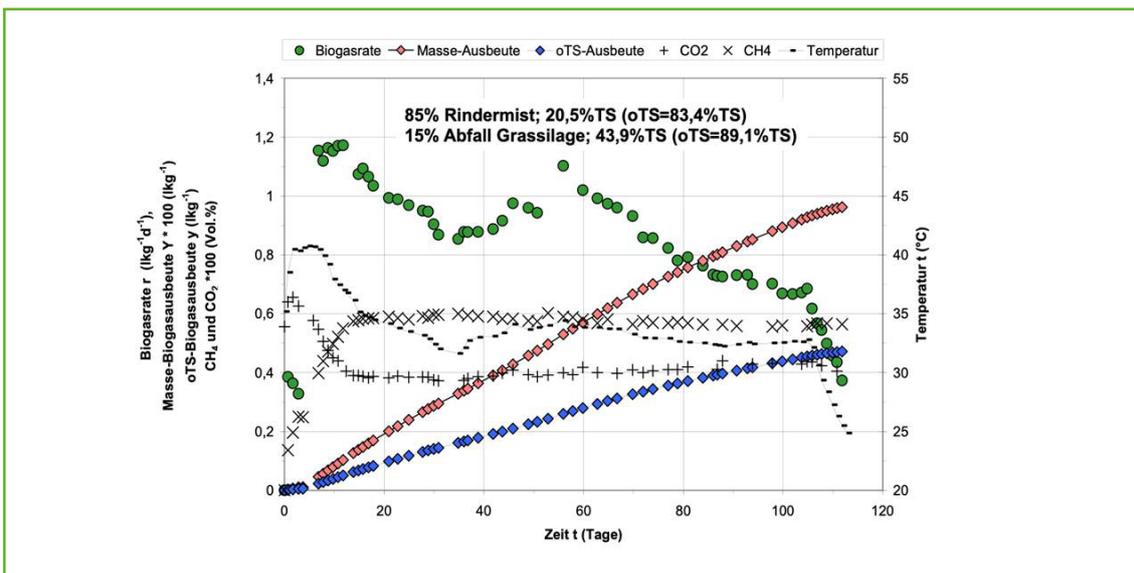


Abb. 40: Ergebnisse des Betriebes der kleintechnischen Versuchsanlage mit einer Mischung aus 85 Ma.% Rindermist und 15 Ma.% Grassilage, Daten aus [58]

7.2 Satzweise 2-phasige Feststoffvergärung

Eine Alternative zur einfachen Feststoffvergärung durch Zusatz von schüttfähigem Impfmateriale ist die satzweise 2-phasige Feststoffvergärung, d. h. der Prozess der Biogasbildung wird mit Hilfe einer festen und einer flüssigen Phase durchgeführt. Das Konzept entspricht in wesentlichen dem GICON-Verfahren (s. Kap. 5.3). Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes „Biogas-Crops-Network“ (BCN) sollten anhand einer kleintechnischen Versuchsanlage (Abb. 41 und 42) Erkenntnisse über die Temperaturführung bei offener und geschlossenen Fahrweise des Hydrolysereaktors mit nachgeschaltetem Methanreaktor (Anaerobfilter) am Beispiel der Vergärung von Roggen-Ganzpflanzensilage gewonnen werden [59].



Abb. 41: Fotos der Versuchsanlage zur satzweise 2-phasigen Feststoffvergärung am ATB [59]

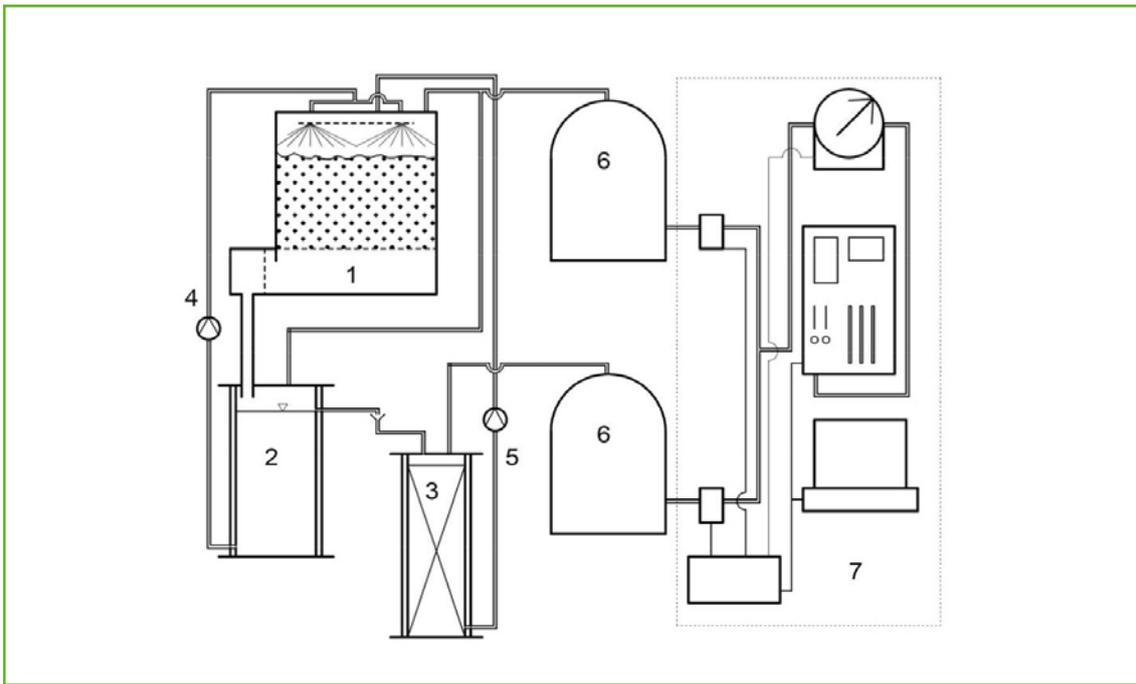


Abb. 42: Schema der Versuchsanlage zur satzweise 2-phasigen Feststoffvergärung [59]

- 1 Hydrolysereaktor (100 Liter)
- 2 Speicher für Prozessflüssigkeit (60 Liter)
- 3 Methanreaktor (30 Liter)
- 4 Pumpe für Prozessflüssigkeit aus der Hydrolyse (60 Liter/h)
- 5 Pumpe für Prozessflüssigkeit aus dem Methanreaktor (1 Liter/h)
- 6 Gasspeicher (100 Liter)
- 7 Anlage zur automatischen Messung der Gasmenge und der Gaszusammensetzung

In Versuchen von jeweils 21 Tagen wurde der Einfluss der Prozesstemperatur auf die Gasbildung des Hydrolyse Reaktors (HR) und des Methanreaktors als Anaerobfilter (AF) untersucht. Für die mesophile Temperaturführung wurden 30 °C und 37 °C, für die thermophile Temperaturführung 55 °C gewählt. Die Anaerobfilter liefen im mesophilen Temperaturbereich von 37 °C. Die drei Hydrolysereaktoren wurden parallel mit jeweils 10 kg Frischmasse der Roggen-GPS 1 beschickt. Die Perkolation erfolgte in einer alternierenden Berieselung des Feststoffes mit der Prozessflüssigkeit aus dem Hydrolysatspeicher von 60 l/h. Nach 1 Minute Perkolation folgte eine Ruhephase von 29 Minuten. Dieser Vorgang wiederholte sich zyklisch.

Am Ende der Versuchsdurchführung wiesen die Gärreste der drei Reaktorsysteme einen ähnlichen organischen Trockensubstanzgehalt von 13,2 Ma.-% auf. Mit 45 Ma.-% war der Abbaugrad bei thermophiler Betriebsweise im Hydrolysereaktor am größten, was sich auch in der höheren Methanausbeute widerspiegelt. Die mesophilen Temperaturführungen dagegen erzielten nur etwa 60 % oTS-Abbau (Tab. 4). Im Anaerobfilter wurden im Vergleich zu den Hydrolysereaktoren deutlich höhere Methangehalte erzielt, was im Hinblick auf eine nachfolgende Aufbereitung von Biomethan von Vorteil ist.

Tab. 4: Ergebnisse der Untersuchungen aus der satzweise 2-phasigen Feststoffvergärung von Roggen-Ganzpflanzensilage, Daten aus [59]

| Reaktorsystem | Roggen-GPS (kg oTS) | Gärrest (kg oTS) | Biogasausbeute (l kg oS ⁻¹) | Methanausbeute (l kg oS ⁻¹) | Methangehalt (Vol. %) |
|-----------------|------------------------|---------------------|--|--|--------------------------|
| Reaktorsystem 1 | | | | | |
| HR 30 °C | 2,91 | 1,75 | 132 | 21 | 16,0 |
| AF 37 °C | – | – | 403 | 307 | 76,2 |
| Reaktorsystem 2 | | | | | |
| HR 37 °C | 2,91 | 1,78 | 116 | 14 | 12,3 |
| AF 37 °C | – | – | 385 | 294 | 76,4 |
| Reaktorsystem 3 | | | | | |
| HR 55 °C | 2,91 | 1,60 | 222 | 21 | 9,6 |
| AF 37 °C | – | – | 414 | 330 | 79,5 |

7.3 Kontinuierliche 2-phasige Feststoffvergärung

7.3.1 Aufstromverfahren

Ein neuer Ansatz zur kontinuierlichen Feststoffvergärung ist die Entwicklung und Erprobung des am ATB entwickelten Aufstromverfahrens. Das Funktionsprinzip beruht auf einem Dichteunterschied zwischen den abzubauenen organischen Feststoffpartikeln und der sie umgebenden Prozessflüssigkeit. Während einige Partikel eine ausreichend geringe Dichte besitzen, wird das Aufsteigen von Feststoffen mit höherer Dichte durch Anlagerung von Gasbläschen bewirkt. Bezugnehmend auf die aufwärts gerichtete Feststoffströmung wird der Reaktor als Aufstromfeststoffreaktor (AFR) bezeichnet. Dabei wird die im AFR vorhandene und mit organischen Säuren angereicherte Prozessflüssigkeit im Aufwärtsstrom durch den Feststoffpfropfen geführt und durch einen separaten Festbetteaktor geleitet (Abb. 43). Zur Abtrennung der flüssigen und gasförmigen Phase sind im Kopf des AFR Siebflächen angeordnet.

Unter Einbeziehung der experimentell ermittelten Daten eines Langzeitversuchs mit einer Mischung aus Stroh und Maissilage wurde ein Modell zur Simulation der Leistungsfähigkeit entwickelt. Bei einer beachtlich hohen Methanproduktivität von 3,0 bis 3,9 m³ m⁻³ d⁻¹ beträgt die zugehörige Methanausbeute der organischen Substanz 0,35 bis 0,41 m³ kg⁻¹. Das entspricht einer oS-Raumbelastung von 8,6 kgm⁻³ d⁻¹ bzw. 9,5 kgm⁻³ d⁻¹ [60].

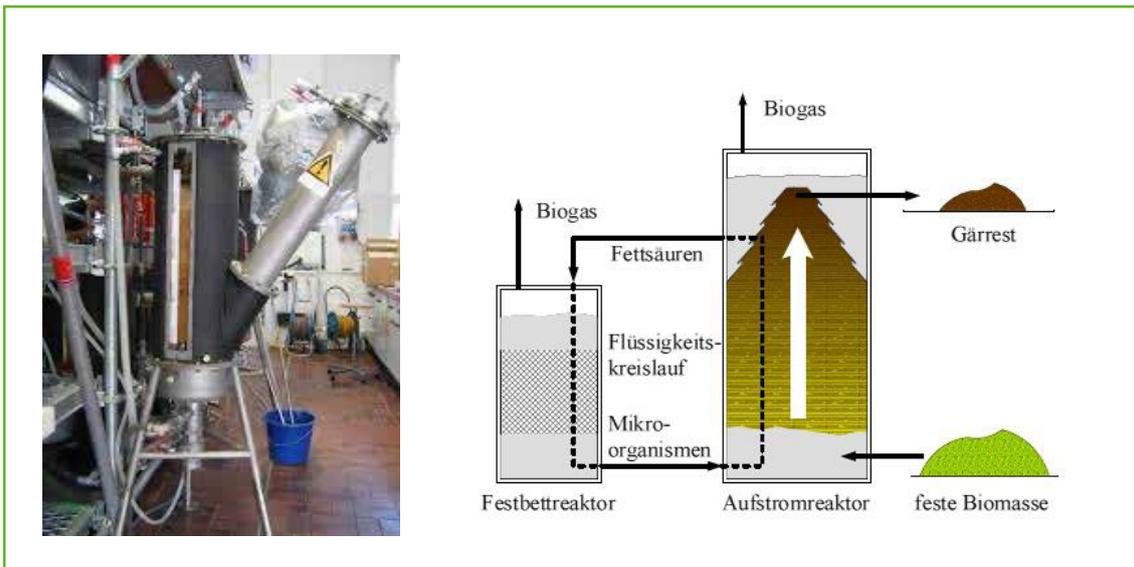


Abb. 43: Labor-Versuchsanlage und Funktionsprinzip des Aufstromfeststoffreaktors aus [60]

Im Rahmen eines vom BMEL über den Projektantrag geförderten Projektes wurden die in [61] erzielten Ergebnisse im kleintechnischen Maßstab im Hinblick auf eine weitere Optimierung und großtechnische Realisierung des Aufstromverfahrens durchgeführt. Der Versuchsstand bestand aus einem Aufstromreaktor sowie mehreren unterschiedlichen Hochleistungs-Methanreaktoren. Diese wurden hinsichtlich ihrer Eignung zur kontinuierlichen Methanisierung der in der Flüssigphase gelösten Intermediate erprobt. Darüber hinaus konnten Erkenntnisse für den praktischen Betrieb wie etwa Beschickung des AFR mit Feststoffen und Entnahme des Gärrestes gewonnen werden. Die Ergebnisse des Projektes haben gezeigt, dass das Verfahren eine hohe biologische Leistungsfähigkeit und Stabilität besitzt. Darüber hinaus wurde der Nachweis der technischen Machbarkeit von größeren, weitgehend automatisierten Anlagen erbracht [61].

7.3.2 Schwimmbettverfahren

Ein weiterer Ansatz für die Vergärung von halmgutartigen Biomassen ist das ebenfalls am ATB entwickelte Schwimmbettverfahren in einem horizontal durchströmten Fermenter [62]. Ausgangspunkt dieser Entwicklung war, dass die Nutzung von Grünland für die Tierernährung seit Jahren rückläufig ist. Eine sinnvolle Möglichkeit, die anfallenden Überschüsse zu verwerten, ist die Gewinnung von Biogas. Durch die Struktur der Gräser gibt es jedoch oft Probleme bei der Durchmischung in üblichen Rührfermentern, so dass eine Vergärung mit diesem Verfahren nur begrenzt möglich ist. Die kontinuierlich dem Fermenter zugeführten Gräser bilden durch das aufsteigende Biogas ein Schwimmbett, das sich als Pfropfen durch den Fermenter bewegt und mit Prozessflüssigkeit aus dem unteren Teil des Fermenters berieselt wird (Abb. 44).

Zur Demonstration der Machbarkeit dieses Verfahrens wurden am ATB und einem Landwirtschaftsbetrieb in Seevetal Langzeitversuche zur Biogasgewinnung im kleintechnischen Maßstab mit silierten Futtergräsern (Tab. 5) in zwei verschiedenen Schwimmbettfermentern durchgeführt (Abb. 44 und Abb. 45).

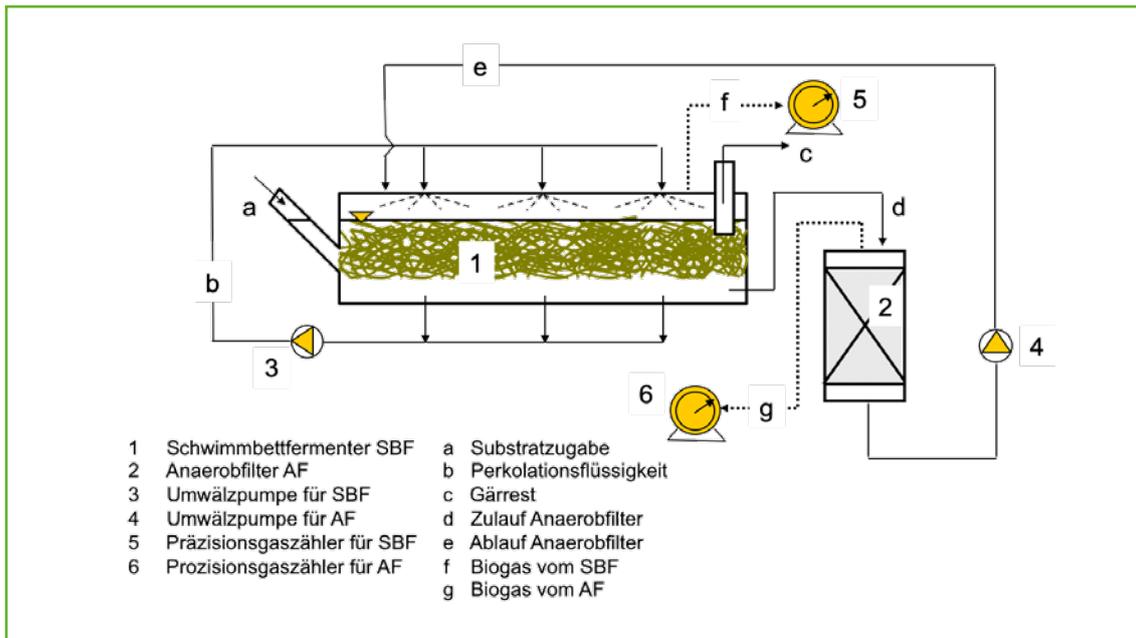


Abb. 44: Schematische Darstellung der Versuchsanlagen (37°C) zur kontinuierlichen Vergärung von Gräsern, Landwirtschaftsbetrieb in Seevetal: nur Schwimmbettfermenter 540 Liter, ATB: Schwimmbettfermenter 55 Liter und Anaerobfilter 40 Liter



Abb. 45: Schwimmbettfermenter im Landwirtschaftsbetrieb in Seevetal (oben) und Schwimmbettfermenter am ATB mit Anaerobfilter (unten)

Tab. 5: Analysen der bei den Versuchen eingesetzten Grassilagen

| Substrat | pH – | TS %FM | oTS %TS | Rohfaser %TS | Zucker %TS | N _{ges} %TS |
|----------|------|--------|---------|--------------|------------|----------------------|
| Gras 1* | 4,2 | 36,0 | 90,9 | 30 | 3,3 | 3,00 |
| Gras 2a | 5,1 | 55,6 | 92,4 | 35,2 | 2,0 | 2,24 |
| Gras 2b | 5,2 | 53,0 | 93,7 | 32,2 | 9,8 | 2,20 |

* zusätzliche Analysen: Milchsäure (16,2 g kg⁻¹ FM), Essigsäure (12,1 g kg⁻¹ FM), Rohfett: 5,0 % TS

Versuchsanlage Seevetal

Die Beschickung des Fermenters bei einer oTS-Raumbelastung von etwa 0,9 kgm⁻³d⁻¹ erfolgte einmal täglich durch manuelle Zugabe. Der Gärrest auf der gegenüberliegenden Seite wurde ebenfalls von Hand entnommen. Die hier vorgestellten Ergebnisse geben nur einen ausgewählten Versuchszeitraum wieder, in dem Grassilagen aus zwei verschiedenen Schnitten eingesetzt wurden (Tab. 5). Grassilage 2a wurde vom 3. Schnitt gewonnen, während Grassilage 2b aus einem 2. Schnitt stammt. Bei der gewählten oTS-Raumbelastung stellte sich bei der Grassilage 2a eine oTS-Biogasausbeute von 540 lkg⁻¹ ein, während die Grassilage 2b eine Biogasausbeute von 610 lkg⁻¹ lieferte (Abb. 46). Die um etwa 70 l je kg oTS höhere Biogasausbeute lässt sich vor allem auf den höheren Zuckergehalt aus dem früheren zweiten Schnitt erklären. Geht man davon aus, dass je kg Zucker 700 l Biogas gebildet werden, dann resultiert aus der Differenz des Zuckergehaltes der beiden Grassilagen ein Mehrertrag an Biogas von etwa 50 l je kg oTS.

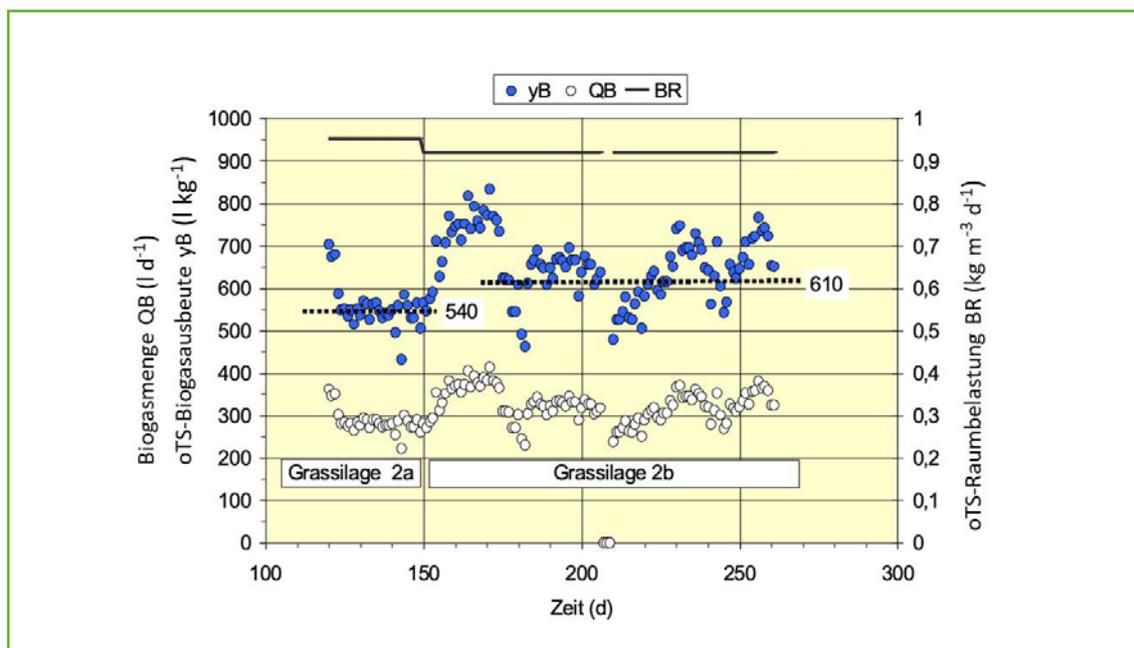


Abb. 46: Biogasmenge QB, oTS-Biogasausbeute yB und oTS-Raumbelastung BR bei mesophiler Vergärung (37°C) zwei verschiedener Grassilagen in einem 540 Liter Schwimmbettfermenter.

Versuchsanlage ATB

Die über insgesamt 6 Wochen durchgeführten Versuche einschließlich Inbetriebnahme wurden mit der Grassilage 1 als Gärsubstrat (Tab. 5) durchgeführt. Nachdem der Schwimmbettfermenter mit Impfschlamm (TS = 13 g l⁻¹, oTS = 50 % TS) aus der Vergärung von Rindergülle und pflanzlicher Biomasse befüllt wurde, erfolgte die Beschickung mit Grassilage und die Einstellung der oTS-Raumbelastung von 1,8 kg m⁻³ d⁻¹. Die Biogasproduktion setzte ohne Verzögerung ein und lieferte bereits nach 13 Tagen oTS-Biogas- und Methanausbeuten von 680 bzw. 430 kg⁻¹. Bei pH-Werten um 7 und einer Konzentration von Karbonsäuren (cKS) unter 2 g l⁻¹ war die Biogasbildung nicht gehemmt, so dass eine Steigerung der oTS-Raumbelastung auf 3 kg m⁻³ d⁻¹ vorgenommen wurde

Diese erhebliche Steigerung der Belastung führte kurzfristig zu einem Rückgang der Gasproduktion, hatte aber keine Auswirkungen auf den weiteren Prozessverlauf. Biogas- und Methanausbeute stiegen schnell wieder an und pegelten sich auf Mittelwerte für beide Fermenter von 570 bzw. 330 kg⁻¹ ein (Abb. 47).

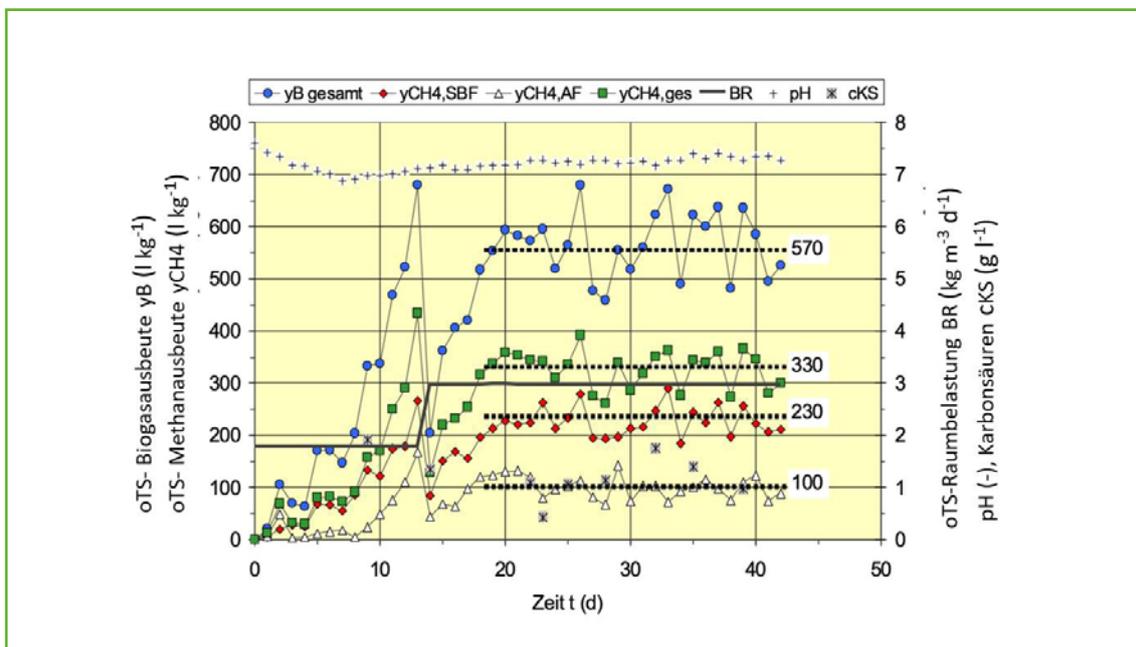


Abb. 47: Prozess- und Leistungsparameter bei der Vergärung (37°C) von Grassilage 1 (Tabelle 5) und zweistufiger Fahrweise (Schwimmbettfermenter SBF und Anaerobfilter AF)

Bedarfsgerechte Biogas- und Methanproduktion im Schwimmbettverfahren

Bei den meisten als Rührkessel betriebenen Biogasfermentern wird eine gleichmäßige Biogasproduktion angestrebt, um z. B. bei der Biogasverstromung im 24 Stunden Vollastbetrieb einen möglichst hohen elektrischen Wirkungsgrad zu erreichen. Das gelingt in der Regel durch eine gleichmäßige Substratzuführung. Soll die tägliche Biogas-/Methanproduktion dem Energiebedarf angepasst werden, ist dies durch eine dynamische Substratzufuhr möglich. Für eine solche Betriebsweise sind die als Rührkessel betriebenen Biogasfermenter nicht ausgelegt, da die Gefahr einer Übersäuerung besteht und als Folge davon die Methanbildung gehemmt wird.

Ob eine bedarfsgerechte Biogasproduktion mit dem Schwimmbettverfahren möglich ist, wurde in einem Langzeitversuch über sieben Wochen untersucht [63]. Hierbei kam die in Abb. 44 dargestellte Versuchsanordnung zur Anwendung. Schwimmbettfermenter und Anaerobfilter hatten ein Arbeitsvolumen von 35 bzw. 22 Liter. Beide Fermenter wurden mesophil bei 38°C betrieben. Die Füllkörper vom Typ Bioflow 40 hat die Firma Rauschert Verfahrenstechnik, in Steinwiesen (Deutschland) zur Verfügung gestellt.

Als Gärsubstrat diente Maissilage (Tab. 6), die semi-kontinuierlich mit der Hand dem Schwimmbettfermenter zugeführt wurde, so dass sich eine oS-Raubelastung von $4,5 \text{ gl}^{-1}\text{d}^{-1}$ eingestellt. Die Perkolation des Schwimmbettfermenters erfolgte mit Hilfe einer Pumpe in einer Menge von $18 \text{ Liter min}^{-1}$ für 1 Minute alle 4 Stunden. Die Beschickung des Anaerobfilters mit Perkulationsflüssigkeit betrug mit 22 lh^{-1} und erfolgte kontinuierlich über 24 Stunden pro Tag. Für die Substratfuhr sind 6 verschiedene Beschickungsmuster (BM) mit einer Versuchsdauer von jeweils 7 Tagen ausgewählt worden. Dabei war die dem Schwimmbettfermenter zugeführte organischen Substanz aus der Maissilage bei jedem Beschickungsmuster gleich groß. Die im Verlauf eines Tages produzierten Methanmengen wurden aufsummiert und getrennt für den Schwimmbettfermenter und den Anaerobfilter erfasst (Abb. 48).

Tab. 6: Analysenparameter der Maissilage und des Impfschlammes [63]

| Parameter | Einheit | Maissilage | Impfschlamm |
|-----------------------------|---------------------------------|------------|-------------|
| TS | ($\text{g kg}^{-1}\text{FM}$) | 381,7 | 20,0 |
| oS | ($\text{g kg}^{-1}\text{FM}$) | 367,3 | 10,6 |
| pH | – | 3,9 | 7,4 |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ | ($\text{g kg}^{-1}\text{FM}$) | 0,5 | 0,7 |
| TKN | ($\text{g kg}^{-1}\text{FM}$) | 1,8 | 4,8 |
| Essigsäure | ($\text{g kg}^{-1}\text{FM}$) | 7,3 | n. b. |
| Propionsäure | ($\text{g kg}^{-1}\text{FM}$) | 0,3 | n. b. |
| max. CH_4 Ausbeute | ($\text{l kg}^{-1}\text{oS}$) | 372,4 | n. b. |

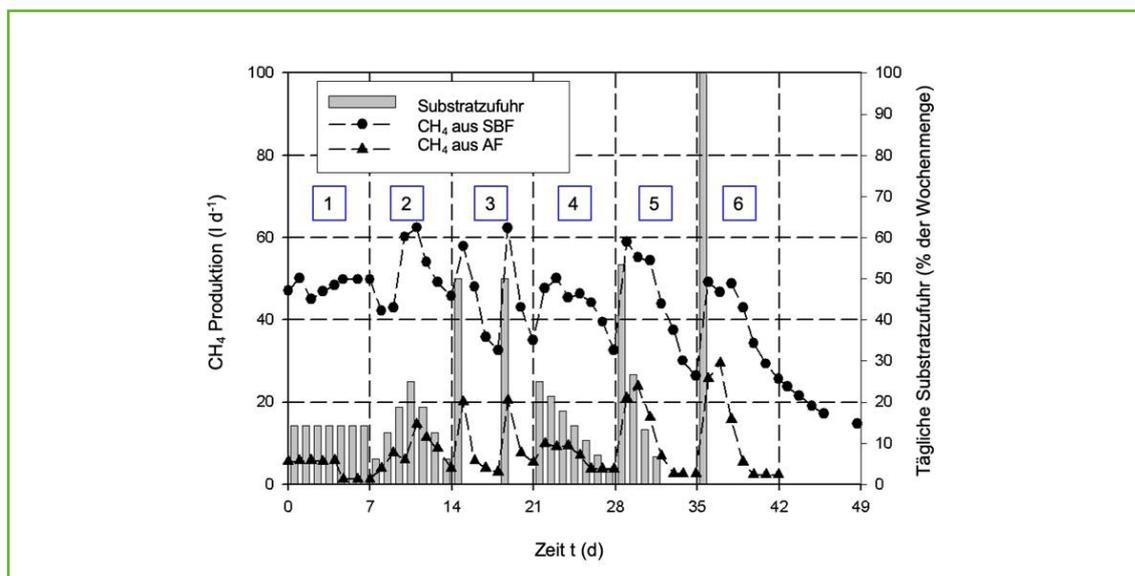


Abb. 48: Einfluss der Substratzufuhr auf die Methanbildung im Schwimmbettfermenter (SBF) und im Anaerobfilter (AF), 1 bis 6 Beschickungsmodus [63]

Beim ersten Beschickungsmodus (BM1) erfolgte täglich eine konstante Substratmenge. Im BM2 wurde, beginnend mit 6,25%, die tägliche Substratmenge dreimal um jeweils 6,26% erhöht, so dass nach dem 4. Tag 25% der wöchentlichen Substratmenge zugegeben war. Anschließend erfolgte eine Reduzierung der Substratmenge wieder täglich um 6,25% bis zum Ende von BM2. Beim Beschickungsmodus BM3 erfolgte die wöchentliche Fütterung nur an 2 Tagen. BM4 war durch eine lineare tägliche Reduzierung der Beschickung gekennzeichnet, während bei BM5 und BM6 geprüft werden sollte, ob das System auch Schockbelastungen ver-

trägt. Bei BM5 wurde die Beschickung nur an 4 Tagen vorgenommen, beginnend mit der Hälfte der Wochenration und mit einer weiteren Halbierung der jeweils am Vortag zugegebenen Substratmenge. In BM6 wurde die Belastung des Systems extrem gesteigert, indem die gesamte für eine oS-Raumbelastung von $4,5 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ notwendige Maissilage nur einmal in den Schwimmbettfermenter gegeben wurde (Abb. 48).

Nach dem Ende der Erprobung eines Beschickungsmusters wurde die Gärrestmasse entnommen, die anhand der produzierten Massen von Methan und Kohlendioxid berechnet wurde. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Reaktorsystem im Hinblick auf die Methanproduktion relativ schnell mit einer Verzögerung von etwa einem Tag auf die untersuchten Beschickungsmuster reagierte und das Methanbildungsvermögen des System nicht durch die verschiedenen Beschickungsmuster beeinträchtigt wurde. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass im Vergleich zur gleichmäßigen Substratzufuhr die Methanproduktion innerhalb eines Tages um 50 % bis 60 % gesteigert werden kann (BM3). Wegen der stark erhöhten Belastungen in den Beschickungsmustern 3, 5 und 6 wurde unmittelbar nach der Beschickung ein Anstieg der flüchtigen organischen Säuren (FOS) im Schwimmbettfermenter gemessen, die jedoch noch während des Versuchszeitraumes abgebaut wurden und zu keiner Hemmung der Methanbildung führten (Abb. 49). Das Beschickungsmuster hatte nur einen geringen Einfluss auf die Methanausbeute des gesamten Systems, die im Mittel bei 330 Liter Methan je kg zugeführte organische Substanz lag.

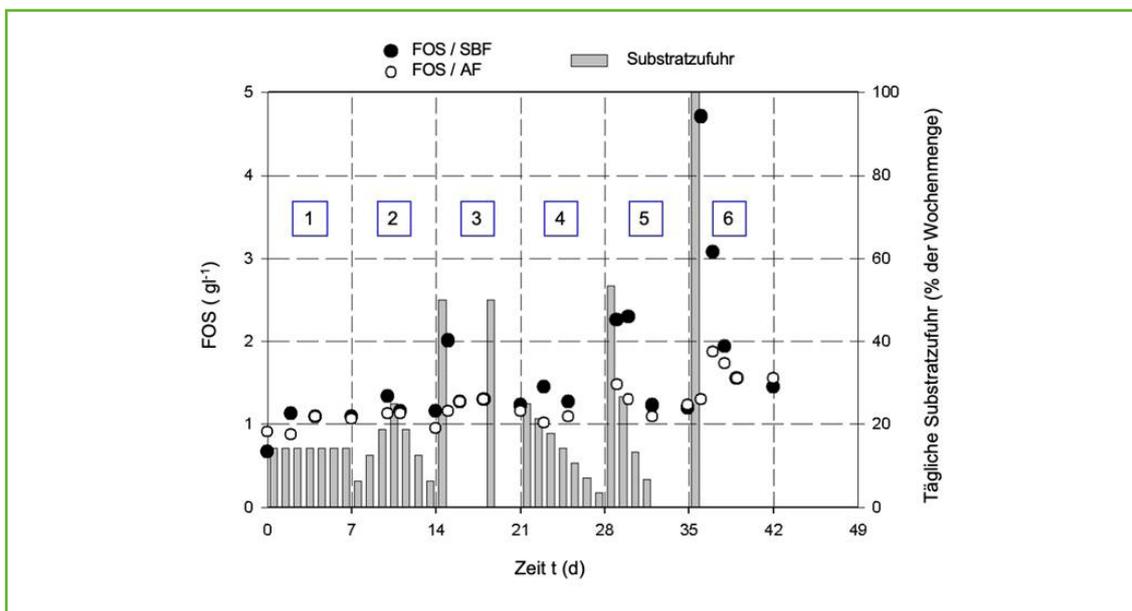


Abb. 49: Einfluss der Beschickungsmuster auf die Konzentration der flüchtigen organischen Säuren (FOS) im Schwimmbettfermenter (SBF) und im Anaerobfilter (AF), 1 bis 6 Beschickungsmodus [63]

Vergleichende Untersuchungen zur perkolierten Feststoff-Vergärung in ein- und mehrstufigen Verfahren wurden am Beispiel von Mais- sowie Riedgras-Seggen-Silagen durchgeführt, die einen direkten Vergleich von satzweisen und kontinuierlichen Verfahrensvarianten ermöglichen [64]. Grundlage für diesen Vergleich bildeten kleintechnische Versuche im Labor und Praxisuntersuchungen. Im Einzelnen werden Ergebnisse zur Feststoffdichte im Fermenter sowie zum Trockensubstanzgehalt im Schwimmbett vorgestellt.

Insbesondere wurden die Perkolationsintensität auf die Eigenschaften der Feststoffe im Schwimmbett und in der Prozessflüssigkeit sowie auf die Kinetik der Gasbildung untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die substratspezifischen Methanausbeuten unter vergleichbaren Belastungs- und Betriebsparametern nur unwesentlich von den Ausbeuten bei Rührkessel-Systemen unterscheiden [64].

8 VERFAHRENSTECHNISCHE BERECHNUNGEN

8.1 Gaskomponenten im Biogas

In Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen des bei der Biogasgewinnung eingesetzten Substrates verändert sich auch der Anteil an Methan im Biogas (Tab. 1). Darüber hinaus kann die Konzentration an Methan im Biogas auch durch die Temperatur im Fermenter beeinflusst werden. So z. B. wird der Methangehalt immer dann ansteigen, wenn die Temperatur im Fermenter deutlich unter der allgemein üblichen Betriebstemperatur im mesophilen Bereich liegt. Der Grund hierfür ist die unterschiedliche Löslichkeit von Methan und Kohlendioxid, den Hauptkomponenten von Biogas im Wasser. Verringert sich die Temperatur, kann mehr Kohlendioxid im wässrigen Gärmedium gelöst werden. Umgekehrt verringert sich der Methangehalt mit steigender Temperatur, insbesondere bei thermophil betriebenen Biogasanlagen. Neben den Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid entstehen aus dem mikrobiellen Abbau noch weitere Gase, die jedoch nur in geringen Konzentrationen vorliegen (Tab. 7).

Tab. 7: Wesentliche Gaskomponenten von Biogas nach [65]

| Gaskomponente | Formel | Schwankungsbreite | Durchschnitt |
|---------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|
| Methan | CH ₄ | 45 bis 70 % | 60 % |
| Kohlendioxid | CO ₂ | 25 bis 55 % | 35 % |
| Wasserdampf | H ₂ O | 0 bis 10 % | 3,1 % |
| Stickstoff | N ₂ | 0,01 bis 5 % | 1,0 % |
| Sauerstoff | O ₂ | 0,01 bis 2 % | 0,3 % |
| Wasserstoff | H ₂ | 0 bis 1 % | < 1 % |
| Ammoniak | NH ₃ | 0,01 bis 2,5 mg m ⁻³ | 0,7 mg m ⁻³ |
| Schwefelwasserstoff | H ₂ S | 10 bis 30 000 mg m ⁻³ | 500 mg m ⁻³ |

8.2 Umrechnung der Biogasmenge auf Normvolumen

Die in Laborversuchen oder in Praxis gemessene Biogasmenge muss wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse immer auf Normzustand, d. h. bei $T = 273,15 \text{ K}$ und $p = 1013,25 \text{ Millibar}$ umgerechnet werden. Grundlage für diese Umrechnung ist die Zustandsgleichung eines idealen Gases.

Für das thermische Verhalten eines Gases sind neben der Temperatur T auch der Druck p und das Volumen V von Bedeutung. Bleibt die Masse eines idealen Gases konstant, so ist das Produkt aus Druck p und Volumen V , geteilt durch die absolute Temperatur T , konstant (Gl. 44).

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konst.} \quad (\text{Gl. 44})$$

Die Gleichung (44) wird als „Zustandsgleichung eines idealen Gases“ bezeichnet und gilt unter Normalbedingungen auch in sehr guter Näherung für reale Gase. Sie wird häufig auch in folgender Form geschrieben (Gl. 45).

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (\text{Gl. 45})$$

Aus Gl. 45 lässt sich das Normvolumen von Biogas V_0 herleiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Biogas in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedliche Anteile von Wasser enthält (Abb. 50) und der Druck des gemessenen Biogases um den Dampfdruck des Wassers vermindert werden muss (Gl. 46).

$$V_0 = V_1 \cdot \frac{(p_1 - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T_1} \quad (\text{Gl. 46})$$

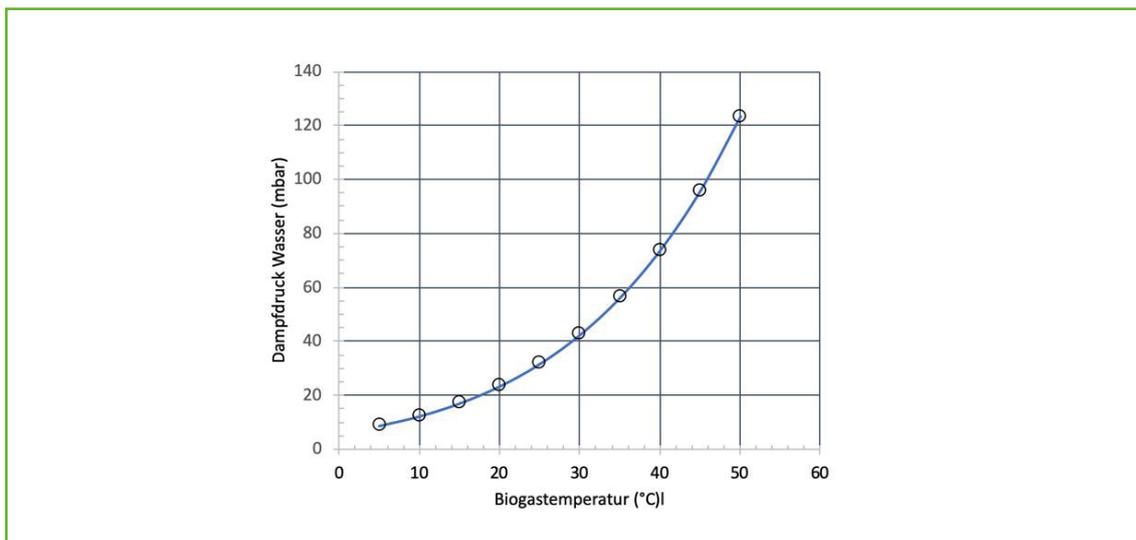


Abb. 50: Zusammenhang zwischen Biogastemperatur und dem Dampfdruck des im Biogas enthaltenen Wassers nach Dampfdrucktabelle [66]

8.3 Massebilanz in Biogasanlagen

8.3.1 Masse von Biogas

Michail Wassiljewitsch Lomonossow postulierte erstmals 1748 das Gesetz von der Erhaltung der Massen, das 1789 von Antoine Laurent de Lavoisier ausformuliert wurde. Es besagt, dass bei einer chemischen Reaktion die Summe der Masse der Edukte gleich der Summe der Masse der Produkte ist [67]. Da die Bildung von Biogas auch auf chemischen Reaktionen beruht, gilt es auch für die Biogasbildung. Die Masse des aus dem Gärsubstrat gebildeten Biogases entsteht überwiegend aus dem Abbau der organischen Substanz.

Die nicht zu Biogas umgesetzte organische Substanz sowie Wasser und Mineralien bilden den Gärrest. Welche Anteile Methan und Kohlendioxid das Biogas enthält, wird von der Qualität des Gärsubstrates bestimmt (s. Tabelle 1). Welcher Anteil der Masse vom eingesetzten Gärsubstrat im Biogas enthalten ist hängt davon ab, wie hoch die Biogasausbeute ist und welche Zusammensetzung das Biogas hat und kann mit Hilfe von Gl. 47 berechnet werden.

$$m_B^{F+L} = Q_B^{F+L} \cdot \frac{p_{CH_4}^B \cdot M_{CH_4} + p_{CO_2}^B \cdot M_{CO_2}}{V_m} \quad (\text{Gl. 47})$$

Voraussetzung für die Berechnung der Biogasmasse ist die Kenntnis der Biogasmenge Q_B^{F+L} , die im Fermenter und Gärrestlager anfällt und welche Anteile Methan $p_{CH_4}^B$ und Kohlendioxid $p_{CO_2}^B$ im Biogas enthalten sind. Diese absoluten Anteile werden mit der molaren Masse von Methan M_{CH_4} und Kohlendioxid M_{CO_2} multipliziert und durch das Molvolumen für Gase geteilt (Gl. 47).

Für Wirtschaftsdünger und eine Auswahl nachwachsender Rohstoffe sind die zugehörigen Massen an Biogas auf der Grundlage von Daten aus [68] entsprechend Gl. 47 berechnet worden. Mit steigendem Biogas- und Methanertrag sowie dem oTS-Gehalt im Substrat erhöhen sich auch die Masse, die mit dem Biogas abgeführt und nicht mehr bei der Bemessung der Gärrestlager berücksichtigt werden müssen (Tab. 8).

Tab. 8: Biogas- und Methanerträge sowie Biogasmassen von Wirtschaftsdüngern und Nachwachsenden Rohstoffen aus [68].

| Substrat | oTS Gehalt kg t ⁻¹ FM | Biogasertrag Nm ³ t ⁻¹ FM | Methanertrag Nm ³ t ⁻¹ FM | CH ₄ Vol.-% | CO ₂ Vol.-% | Masse Biogas kg t ⁻¹ FM |
|-------------------------|-------------------------------------|--|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Wirtschaftsdünger | | | | | | |
| Rindergülle | 80 | 25 | 14 | 56 | 44 | 32 |
| Schweinegülle | 48 | 28 | 17 | 61 | 39 | 34 |
| Rindermist | 200 | 80 | 44 | 55 | 45 | 102 |
| Geflügelmist | 300 | 140 | 90 | 64 | 36 | 163 |
| Nachwachsende Rohstoffe | | | | | | |
| Maissilage | 314 | 200 | 106 | 53 | 47 | 260 |
| Getreide-GPS | 314 | 190 | 105 | 55 | 45 | 242 |
| Grassilage | 315 | 180 | 98 | 54 | 46 | 231 |
| Zuckerrüben | 207 | 130 | 72 | 55 | 45 | 165 |
| Futterrüben | 144 | 90 | 50 | 56 | 44 | 114 |
| Getreidekörner | 844 | 620 | 320 | 52 | 48 | 818 |

Richtwerte für den Masseabbau, TS-, oTS Gehalt, Biogausausbeute, Methangehalt und TS-Konzentration nach der Vergärung von Wirtschaftsdüngern und ausgewählten nachwachsenden Rohstoffen sind auch [69] zu entnehmen. Die Unterschiede zu den in Tabelle 8 genannten Massen für Biogas sind auf unterschiedliche Biogausausbeuten zurückzuführen. So z.B. werden in [69] für Rindergülle und Maissilage Masseverluste von $18 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \text{ FM}$ bzw. $182 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \text{ FM}$ zugrunde gelegt, so dass auf das Biogas nur 23 bzw. $240 \text{ kg t}^{-1} \text{ FM}$ entfallen.

8.3.2 Fest-Flüssig-Trennung von Gärresten

Die aus der Biogasgewinnung anfallenden Gärreste enthalten noch organische Feststoffe, da die in den Gärsubstraten vorhandene Lignocellulose kaum oder nur in geringem Umfang bei der Biogasgewinnung mikrobiell abgebaut wird. Während der Lagerung der Gärreste führen diese Verbindungen zu Sediment- oder Schwimmschichten, die vor der Ausbringung durch Homogenisierung zerstört werden müssen. Deshalb kann eine Separation dieser Verbindungen durch Fest-Flüssig-Trennung sinnvoll sein. Hierfür wird überwiegend der von der Firma FAN entwickelte Pressschneckenseparator [70] eingesetzt, der aus einer konischen Schnecke mit Elektromotor, einem zylindrischen Sieb und die Entwässerung unterstützenden Rückhalteklappen besteht (Abb. 51). Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass mit den abgetrennten Feststoffen ein organischer Dünger bereitgestellt wird, der deutlich höhere Gehalte an Phosphor (P_2O_5) und gesamt-Stickstoff (TN) aufweist als der unbehandelte Gärrest [71].

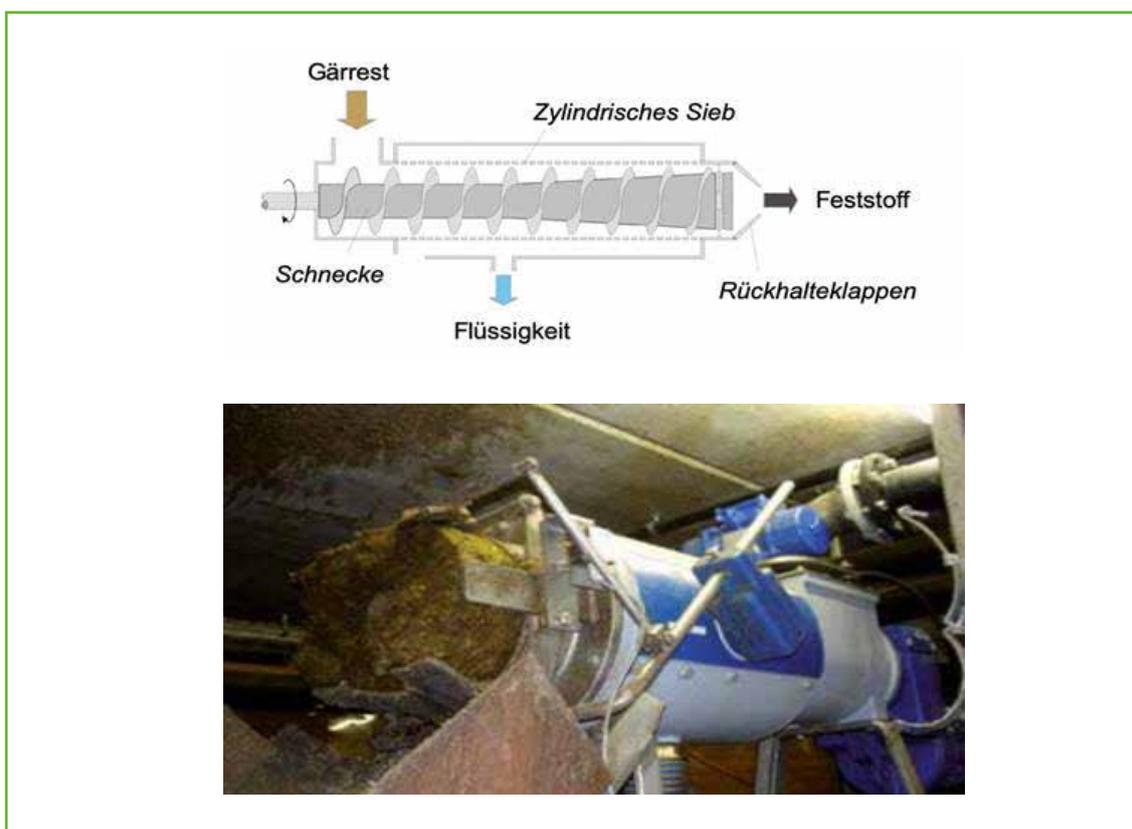


Abb. 51: Schema und Bild eines Pressschneckenseparators aus [72]

Welche Massen Flüssigkeit und Feststoff nach der Fest-Flüssig-Trennung anfallen, kann mit Hilfe von Bilanzgleichungen für die Frischmasse (Gl. 48) und die Trockensubstanz (Gl. 49) berechnet werden.

$$m_Z^{FM} = m_{Fest.}^{FM} + m_{Flüss.}^{FM} \quad (\text{Gl. 48})$$

$$m_Z^{FM} \cdot c_Z^{TS} = m_{Fest.}^{FM} \cdot c_{Fest.}^{TS} + m_{Flüss.}^{FM} \cdot c_{Fest.}^{TS} \quad (\text{Gl. 49})$$

Durch Kombination von Gl.48 und Gl. 49 erhält man die Masse an Flüssigkeit aus Gl. 50.

$$m_{Flüss.}^{FM} = m_Z^{FM} \cdot \frac{c_{Fest.}^{TS} - c_Z^{TS}}{c_{Fest.}^{TS} - c_{Flüss.}^{TS}} \quad (\text{Gl. 50})$$

Die Masse an Feststoff kann analog berechnet werden, indem Gl. 48 nach $m_{Flüss.}^{FM}$ umgestellt und der Ausdruck $m_Z^{FM} - m_{Fest.}^{FM}$ in Gl. 49 eingesetzt wird (Gl. 51).

$$m_{Fest.}^{FM} = m_Z^{FM} \cdot \frac{c_Z^{TS} - c_{Flüss.}^{TS}}{c_{Fest.}^{TS} - c_{Flüss.}^{TS}} \quad (\text{Gl. 51})$$

Es reicht jedoch aus, wenn man z.B. nur die Masse Flüssigkeit berechnet. Die Masse der Feststoffe ergibt sich als Differenz zu 1.

Da die Summe der Massen an Feststoffen und an separierter Flüssigkeit der dem Pressschneckenseparator zugeführten Gärrestmasse entspricht, kann man für die Berechnung der Feststoffe auch Gl. 50 anwenden. Ein wesentlicher Vorteil von Gl. 50 und Gl. 51 besteht darin, dass man auf eine Messung des Massestroms verzichten kann, indem der Ausdruck $m_Z^{FM} = 1$ gesetzt wird und die berechneten Werte für $m_{Flüss.}^{FM}$ und $m_{Fest.}^{FM}$ den Anteilen kleiner 1 entsprechen und die fehlende Komponente aus Gl. 48 berechnet werden kann.

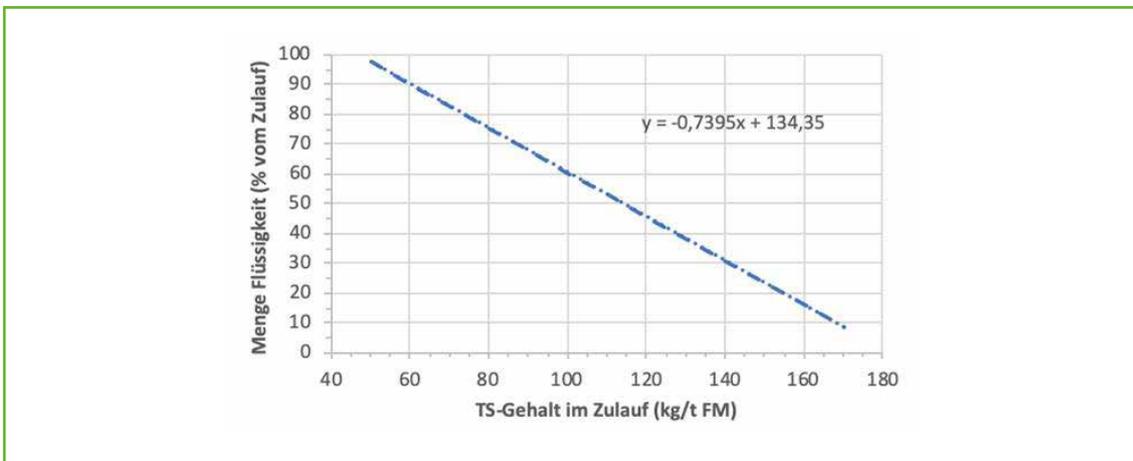


Abb. 52: Menge Flüssigkeit $m_{Flüss.}^{FM}$ nach der Fest-Flüssig-Trennung mit einem Pressschneckenseparator in Abhängigkeit vom TS-Gehalt im Zulauf c_Z^{TS} , Daten aus [72]

9 BIOGAS, EIN BEITRAG ZU EINER NACHHALTIGEN ENERGIE- UND STOFFWIRTSCHAFT

9.1 Vom Stromeinspeisegesetz zum Erneuerbare-Energie Gesetz (EEG)

Den Beginn der Energiewende in Deutschland bildete das „Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz“ (Stromeinspeisegesetz vom 07.12.1990). Mit diesem Gesetz wurden öffentliche Elektrizitätsversorgungsunternehmen erstmals zur Abnahme und Vergütung von Strom verpflichtet, der ausschließlich aus Wasserkraft, Windkraft, Sonnenenergie, Deponiegas, Klärgas oder aus biologischen Rest- und biologischen Abfallstoffen der Land- und Forstwirtschaft gewonnen wurde. Die Höhe der Vergütung je Kilowattstunde für Biogas betrug 75 Prozent des Durchschnittserlöses des Energieversorgungsunternehmens [73].

Mit der Gründung des Fachverbandes Biogas am 14. Februar 1992 durch 17 Gründungsmitglieder wurde eine Organisationsform geschaffen, welche die Interessen der Biogasbranche gegenüber der Politik vertreten konnte [74]. Zu Beginn der neunziger Jahre waren es vor allem Biogasbetreiber von Hofanlagen, die mit der Verstromung des Biogases nicht nur eine zusätzliche Einkommensquelle hatten, sondern auch die Vorzüge der vergorenen Gülle oder Stallmist durch deutlich geringere Geruchsbelastungen, einfaches Handling bei der Ausbringung durch verbesserte Fließfähigkeit und damit Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe nutzen konnte. Die Biogasgewinnung aus Gülle großer Tierhaltungsbetriebe kam auch in den 80er Jahren in der DDR zur Anwendung. In sechs Biogasanlagen mit Fermentervolumina von 500 bis 8.000 m³ erfolgte für Rinder- und Schweinegülle sowie für Geflügelmist eine großtechnische Erprobung verschiedener Technologien [75].

Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist eine zentrale Säule der Energiewende. In diesem Zusammenhang wurde ein erfolgreiches Instrument zur Förderung des Stroms aus erneuerbaren Energien konzipiert. Das Erneuerbare-Energie Gesetz (EEG), welches erstmals im Jahr 2000 in Kraft getreten ist, wurde mehrmals novelliert (EEG 2004, EEG 2009, EEG 2012, PV-Novelle, EEG 2014, EEG 2021) [76]. Neben der Grundvergütung war die Einführung eines Bonus für nachwachsende Rohstoffe mit 7 Cent/kWh_{el} (NawaRo-Bonus) im EEG 2009 (§ 27 EEG) ein wichtiger Impuls und führte zu einem deutlichen Zubau insbesondere von Biogasanlagen mit einer Leistung bis 500 kW_{el} [77].

Der Wissenschaftliche Beirat Agrarpolitik beim Bundeslandwirtschaftsministerium sprach sich jedoch in einer veröffentlichten Stellungnahme dafür aus, die Biogasförderung im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2009) in der gegenwärtigen Form zu stoppen [78]. Er warnte vor einer Verdrängung der Milch- und Rindfleischherzeugung sowie vor Dauerförderung. Weiterhin setzte der Beirat auf verbesserte Speichertechnologien, die Wind- und Sonnenenergie stärken sollen. Im Zuge einer Überarbeitung des Vergütungssystems wurde der Bonus für nachwachsende Rohstoffe in Höhe von 7 Cent/kWh_{el} komplett gestrichen. Im Gegenzug sollte die Förderung der Gülle- und Mistnutzung bei der Biogasgewinnung unter Beibehaltung der Grundvergütung deutlich steigen. Allerdings erhalten nur Anlagen den Bonus, die mindestens 95 % Gülle einsetzen

Mit Inkrafttreten der 4. EEG-Novelle am 1. August 2014 sollte die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien weiter ausgebaut werden. Kernelemente waren die Verbesserung der Marktintegration, die stärkere Konzentration auf kostengünstige Technologien und ab 2017 der Übergang zu einem Ausschreibungsmodell.

Im Bereich Biomasse lag der Fokus besonders auf der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen und der damit verbundenen Erschließung bisher nicht genutzter Potenziale. Daher wurde die mit dem EEG 2012 eingeführte gesonderte Förderung von kleinen Gülle- und Abfallvergärungsanlagen fortgeführt. Voraussetzung hierfür war:

- ein neu zu errichtendes, gasdicht abgedecktes Gärrestlager am Standort der Biogasanlage,
- eine hydraulische Verweilzeit in dem gasdichten und an eine Gasverwertung angeschlossenen System von mindestens 150 Tage und
- zusätzliche Gasverbrauchseinrichtungen zur Vermeidung einer Freisetzung von Biogas (§ 9 (5) EEG).

Ausnahmen gab es für Anlagen, die ausschließlich Gülle und/oder Festmist vergären und für Bioabfallanlagen [79].

Am 8. Juli 2016 hat der Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) beschlossen. Das neue Gesetz trat am 1.1.2017 in Kraft. Mit dem EEG 2017 wurde die Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien von der garantierten Festvergütung auf Ausschreibungen umgestellt. Die Höhe der Vergütung wird über Auktionen für die jeweiligen Energieträger ermittelt.

Hierdurch erwartete die Bundesregierung einen kosteneffizienteren Ausbau durch mehr Wettbewerb, Chancengleichheit für alle Akteure und die Einhaltung des beschlossenen Ausbaukorridors (bis 2025 sollen 40 bis 45 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden) [80]. Die Entwicklung der Anzahl von Biogasanlagen und die installierte elektrische Leistung zeigt einen besonders starken Anstieg seit dem EEG 2009 und ein Abflachen der Kurven ab dem EEG 2012 (Abb. 53).

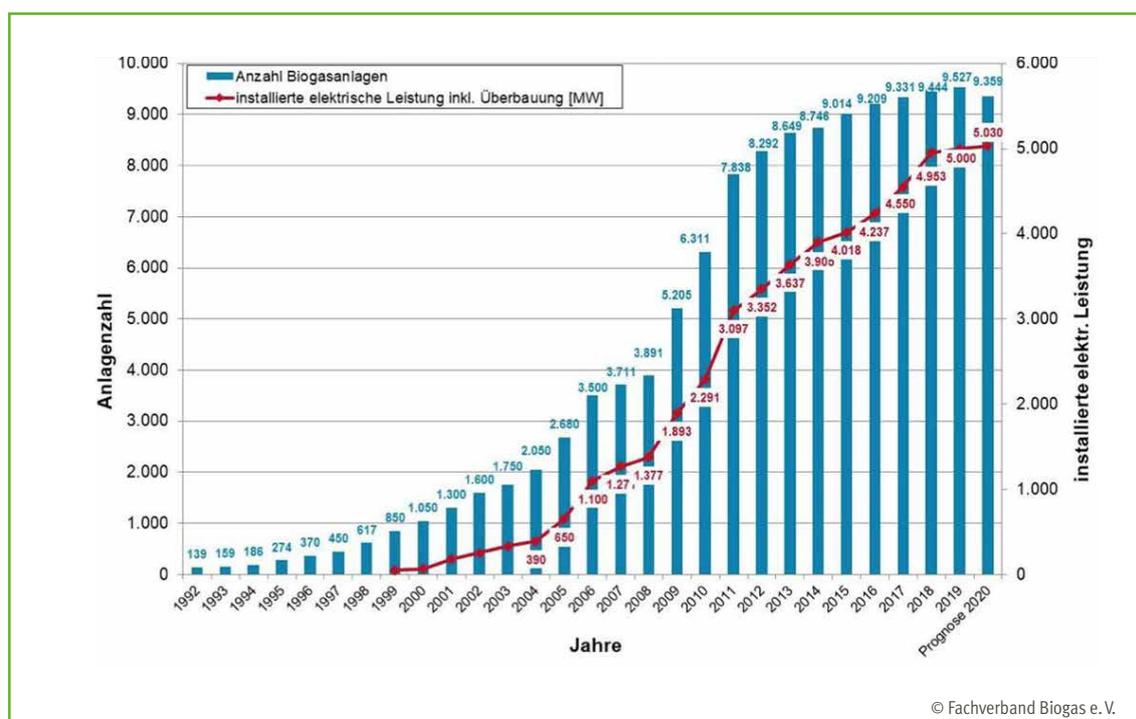


Abb. 53: Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt [MW] (Stand: 7/2020) [81]

Mit dem EEG 2021, das zum 1. Januar 2021 in Kraft trat, soll das EEG 2017 durch ein grundlegend noveliertes EEG ersetzt werden [82]. Die wichtigsten Inhalte des EEG 2021 gliedern sich in sechs Komplexe, nachfolgend eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Maßnahmen:

- Auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität im EEG 2021 wird das Ziel verankert, dass der gesamte Strom in Deutschland vor dem Jahr 2050 treibhausgasneutral ist. Dies gilt sowohl für den hier erzeugten Strom als auch für den hier verbrauchten Strom.
- Umsetzung des „Klimaschutzprogramms 2030“ bedeutet, dass die erneuerbaren Energien im Jahr 2030 65 Prozent des deutschen Stromverbrauchs bereitstellen. Weiterhin wird verbindlich geregelt, in welchem Umfang die einzelnen Technologien zu dem 65-Prozent-Ziel beitragen sollen und mit welchen Ausbaupfaden dies erreicht werden kann.
- Die weitere Dämpfung der Kostenentwicklung sieht vor, die Förderkosten für Neuanlagen dauerhaft durch die Umstellung der Fördersystematik zu senken. Zur EEG-Finanzierung werden Gelder in Höhe von 11 Milliarden Euro bereitgestellt, um die EEG-Umlage im Jahr 2021 auf 6,5 Cent/kWh und im Jahr 2022 auf 6,0 Cent/kWh zu deckeln.
- Der Erhalt der Akzeptanz für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien soll erreicht werden, indem Windanlagenbetreiber die Kommunen künftig finanziell an den Erträgen neuer Anlagen beteiligen. Diese Zahlungen können für Anreize sorgen, damit vor Ort neue Flächen für die Windenergie ausgewiesen werden. Bei der Photovoltaik werden die Rahmenbedingungen für den sog. „Mieterstrom“ verbessert.
- Die Stärkung der Netz- und Marktintegration enthält ein Bündel von Einzelmaßnahmen für eine verbesserte regionale Steuerung und damit für eine erleichterte Integration in das Stromversorgungssystem. Zur Reduzierung der Systemkosten werden „Südquoten“ in den Ausschreibungen eingeführt (Südquote für Windenergieanlagen an Land in Höhe von 15 Prozent in den Jahren 2021 bis 2023 und 20 Prozent ab dem Jahr 2024; Südquote für Biomasseanlagen in Höhe von 50 Prozent). Die Stromerzeugung aus Biomasse soll flexibler werden; hierzu werden die mengenmäßige Begrenzung der sog. Flexibilitätsprämie aufgehoben und neue Anforderungen für sich flexibilisierende Neuanlagen gestellt.
- Der Einstieg in die „Post-Förderung-Ära“ beinhaltet, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien künftig so weit wie möglich marktgetrieben voranschreiten soll. Die Bundesregierung wird daher in ihren Erfahrungsberichten künftig regelmäßig untersuchen, ob und inwieweit die für die Erreichung der mittel- und langfristigen Ausbauziele erforderlichen Ausbaumengen auch marktgetrieben realisiert werden. Für „ausgeförderte Anlagen“, also Erneuerbare-Energien-Anlagen, deren 20-jähriger Vergütungszeitraum ab 2021 ausläuft, wird der Rechtsrahmen angepasst. Bereits nach geltender Rechtslage bleibt der Anspruch auf vorrangige Einspeisung auch nach Ablauf der Förderdauer bestehen, und die Anlagenbetreiber können ihren Strom direkt vermarkten und dadurch Markterlöse für den Weiterbetrieb erzielen. Den Betreibern kleiner Anlagen, für die ein Weiterbetrieb in der Direktvermarktung unter Umständen derzeit unwirtschaftlich sein könnte, wird übergangsweise bis zu ihrer vollständigen Marktintegration durch dieses Gesetz eine Alternative zur Direktvermarktung geboten. Diese Anlagenbetreiber können den in der Anlage erzeugten Strom bis Ende 2027 auch dem Netzbetreiber zur Verfügung stellen und erhalten hierfür den Marktwert abzüglich der Vermarktungskosten.

Im neuen EEG wird die jährliche Ausschreibung für Biomethananlagen bis 2028 auf 150 Megawatt begrenzt, während für feste Biomasse und Biogas für den gleichen Zeitraum 350 Megawatt festgelegt sind.

9.2 Landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung

Im Jahr 2019 haben 9.500 deutschen Biogasanlagen 33,33 Terawattstunden (TWh) klimafreundlichen Strom erzeugt [83], was den Bedarf von über 9,5 Millionen 3 Personen Haushalte mit einem jährlichen Stromverbrauch von 3500 kWh deckt [84]. Zusätzlich wurden knapp 13 TWh Wärme bereitgestellt. Das entspricht einem Viertel der deutschen Stromerzeugung aus regenerativen Quellen. Damit ist Biogas die wesentliche speicherbare Ergänzung zu volatilen Strom aus Wind und Sonne. Bei dieser Vor-Ort-Verstromung dominieren landwirtschaftliche Biogasanlagen mit einem Anteil von 95 % in denen tierische Exkrememente (Gülle und/oder Festmist) sowie nachwachsende Rohstoffe zur Biogaserzeugung genutzt werden. Bezogen

auf die eingesetzten Mengen liegt der Anteil tierischer Exkremate bei rund 50% des Substratinputs. Bei dieser Vor-Ort-Verstromung dominieren landwirtschaftliche Biogasanlagen mit einem Anteil von 95% in denen tierische Exkremate (Gülle und/oder Festmist) sowie nachwachsende Rohstoffe zur Biogaserzeugung genutzt werden. Bezogen auf die eingesetzten Mengen liegt der Anteil tierischer Exkremate bei rund 50% des Substratinputs. Nachwachsende Rohstoffe machen etwa 49% der eingesetzten Substratmengen aus. Daneben werden geringe Mengen organischer Reststoffe zur Biogasproduktion genutzt. In Hinblick auf die mit den aus dem Substratinput bereitgestellten Energiemengen verschiebt sich die Verteilung hin zu nachwachsenden Rohstoffen. Rund 82% der erzeugten Energie ist auf den Einsatz von Nachwachsenden Rohstoffen zurückzuführen [85].

Im Rahmen des EU-Projekts „BioEnergy Farm 2 – Gülle, der nachhaltige Energieträger der Landwirtschaft“ wurde eine Marktübersicht und eine Einschätzung des Marktpotenzials von Biogas-Kleinanlagen in Europa erstellt. Der Bericht zeigt, dass in allen europäischen Ländern erhebliche Anstrengungen unternommen wurden, um die Marktreife von Konzepten für Biogas-Kleinanlagen voranzutreiben. Angesprochen wird hierbei das Marktsegment der vereinfachten Anlagenkonzepte, die Hof-basierte Reststoffe und Nebenprodukte nutzen sollen. Dies ist eine sehr vielversprechende Entwicklung, wenn es um die Nachhaltigkeit der Kleinanlagen geht. Diese Marktübersicht enthält Informationen aus 13 europäischen Ländern, von denen 7 an dem BioEnergy Farm-Projekt teilnehmen [86].

Der deutsche Markt zeigt seit 2012, als das novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG, 2014) eine Sondervergütung für kleine Biogasanlagen bis 75 kW installierte elektrische Leistung einführte, eine beträchtliche Vielfalt an verschiedenen technischen Lösungen für Gülle-Kleinanlagen. Diese Verfahrensvariationen reichen von maßgeschneiderten Konzepten, die so viel Peripherie des Hofes nutzen wie möglich (z. B. Güllelagerung und Pumpen, Gebäudeteile als BHKW-Raum oder die Integration der Kleinanlage in ein neues Stallkonzept), bis hin zu speziellen Konzepten mit vormontierten Anlagenteilen. Zu einem gewissen Grad wurden bestehende Konzepte größerer Biogasanlagen speziell für den Hof-basierten Einsatz auf den geringeren Leistungsbereich (auch unter Kostengesichtspunkten) angepasst. Der Anlagenbestand in Deutschland umfasst etwa 660 Anlagen mit vier verschiedenen Ausführungstypen [86]:

- Typ 1: Rührkesselfermenteranlagen, kontinuierlich betrieben, zahlreiche Ausführungen, überwiegend runde Betonfermenter
- Typ 2: Kompaktanlagen, oft mit liegendem Betonfermenter
- Typ 3: Turm-/Hochfermenteranlagen
- Typ 4: Feststoffvergärungsanlagen

9.3 Biogas im Ökolandbau

Die Anzahl ökologisch wirtschaftender Betriebe lag 2019 bei 34.110. Das sind 12,9% der gesamten Agrarbetriebe in Deutschland [87]. Die Entwicklung der Biogaserzeugung im ökologischen Landbau geht auf die frühen 1980er Jahre zurück. Vor allem in regionalen Initiativen, wie die baden-württembergische „Bundschuh-Genossenschaft“, begannen Ökolandwirte mit alternativen Formen der Strom- und Wärmeerzeugung zu experimentieren und entwickelten erste Hofbiogasanlagen. Bis in die späten 1990er Jahre hinein blieb die Biogaserzeugung ein Aktivitätsfeld experimentierfreudiger Landwirte, die eigene Biogaskonzepte entwickelten [88].

Für Ökobetriebe kann die Produktion von Biogas eine wichtige Ergänzung sein. Da für Ökobetriebe die Kreislaufwirtschaft ein wichtiger Grundsatz ist, könnte sich Biogas in ihre Produktionsabläufe optimal einfügen. Nach Aussagen des Fachverbandes Biogas können Ackerbauern oder Schweinehalter im Ökolandbau das zur Düngung und Bodenverbesserung angebaute Klee gras vom Acker sinnvoll in Biogasanlagen einsetzen. Die Biogasanlage übernimmt dabei die Rolle, die auf konventionellen Betrieben die Kühe als Verwerter des Grases spielen.

Aufgrund der Novellierung des EEG im Jahr 2004 entstand ein regelrechter Boom beim Bau von Biogasanlagen auf Ökobetrieben. Die Anzahl von Biogasanlagen auf Ökobetrieben stieg von 2004 bis 2011 durchschnittlich um rund zehn Prozent pro Jahr, bevor mit der EEG-Novelle 2012 der Anlagenzubau stagnierte. Gleichzeitig erhöhte sich die installierte elektrische Gesamtleistung im Schnitt um jährlich rund 23 Prozent. Mit geschätzten 180 bis 200 Biogasanlagen im Jahr 2014 befanden sich gut zwei Prozent aller Biogasanlagen auf ökologisch wirtschaftenden Betrieben. Gemessen an der installierten elektrischen Leistung betrug der Leistungsanteil der Bio-Biogasanlagen etwa 0,8 Prozent der gesamten in Deutschland installierten Leistung [89].

Dabei bieten Biogasanlagen ökologisch wirtschaftenden Betrieben viele Vorteile. Denn bei der Vergärung von Mist, Gülle oder pflanzlichen Substraten bleiben zentrale Nährstoffe wie Stickstoff bei geringen Verlusten von 10 bis 15 Prozent größtenteils erhalten und können auch über die Wintermonate optimal konserviert werden. Im deutschen Ökolandbau besteht laut einer Studie von Universität Kassel, Ecofys und FiBL ein theoretisches Biogas-Potenzial für eine installierte elektrische Leistung von 500 Megawatt (MW).

Gemindert wird dieses Potenzial allerdings durch Fragen der Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit. Das derzeit realistisch mobilisierbare Potenzial wird von den Experten daher bei 150 MW ohne Wärmenutzung gesehen. Für die Studie wurden nur Einsatzstoffe berücksichtigt, für die keine oder nur geringe Konkurrenzen für Nahrungs- und Futtermittel angenommen werden. So setzt sich das geschätzte Gesamtpotenzial laut der Studie zu knapp zwei Dritteln aus pflanzlichen Reststoffen aus der Landwirtschaft zusammen [90].

9.4 Anlagen zur Biomethanproduktion

Biomethan, das nach Abtrennung von Schwefelwasserstoff, Wasser und Kohlendioxid gewonnen wird, ist vollständig erneuerbares, erdgasgleiches Methan. Es kann in die vorhandenen Erdgasleitungen eingespeist werden und fossiles Erdgas anteilig ersetzen, um Strom, Wärme oder Kraftstoff zu erzeugen. Das Biomassepotenzial zur Biomethanherstellung ist erstaunlich hoch – nach Berechnungen des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) reicht es theoretisch aus, um 2030 fast 40 Prozent unseres Gasverbrauchs zu decken. Auch mit dem realistisch erschließbaren Potenzial lassen sich immerhin noch bis zu 13 Prozent des Gasverbrauchs substituieren. Dem gegenüber liegt der Anteil des grünen Gases heute erst bei einem Prozent. Biomethan könnte somit eine zentrale Rolle beim Klimaschutz insbesondere im Wärme- und Verkehrssektor spielen – zwei Bereiche, in denen die Energiewende bislang kaum vorankommt [91].

Für die Abtrennung von Kohlendioxid werden folgende Verfahren eingesetzt [92]:

- Druckwechseladsorption
- Druckwasserwäsche
- Physikalische Wäsche mit Polyglykolen
- Chemische Wäsche mit Aminen
- Gasseparation über Membranen
- Hybridverfahren aus Membranverfahren und Tieftemperaturkühlung (kryogene CO₂-Abtrennung)

Im Verlauf der Jahre 2017 und 2018 kam es zu einem Verfall der Biomethanpreise, vor allem bei Biomethan aus NawaRo und Gülle, wie es vorrangig im EEG eingesetzt wird. Bei einer Abfrage langfristiger Liefervertragspreise im Jahr 2017 wurden für Biomethan aus NawaRo durchschnittlich 7,1 ct/kWh, für Biomethan vorrangig aus Gülle 7,2 ct/kWh und für Biomethan aus Abfall 6,9 ct/kWh gezahlt. Von den Akteuren wird der derzeitige Preisverlauf auch eher als kurzfristige Bewegung wahrgenommen. Das Biomethan wird dabei überwiegend aus nachwachsen Rohstoffen generiert, deutlich weniger ist der Anteil aus Gülle [93].

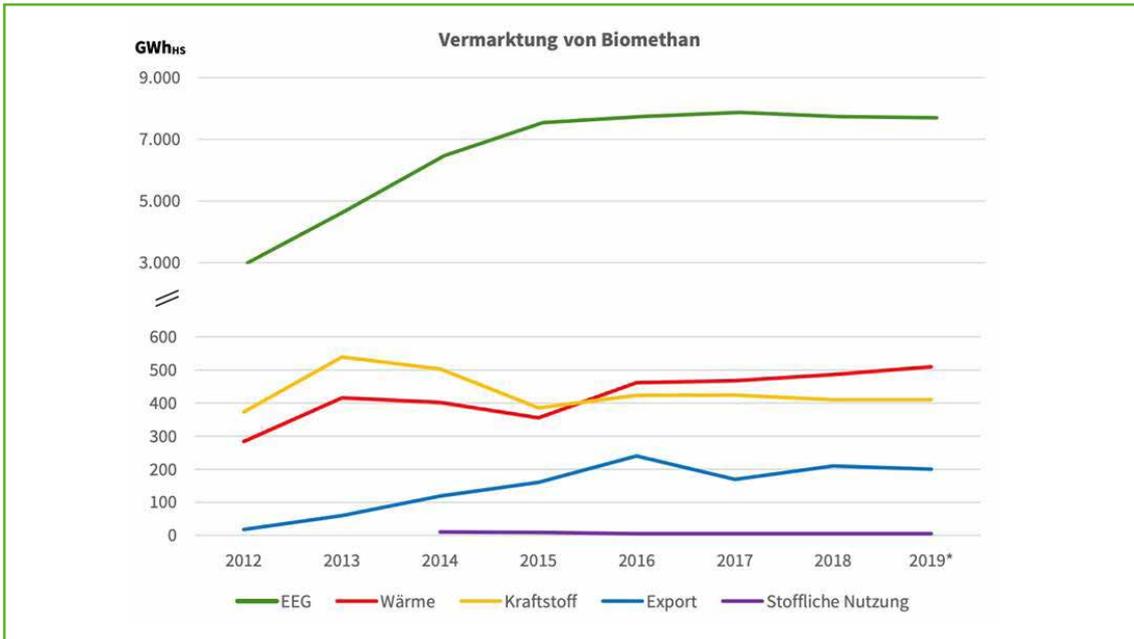


Abb. 54: Vermarktung von Biomethan für unterschiedliche Anwendungsbereiche 2012 bis 2019 (in GWhHS) (Stand Mai 2019, dena)

*vorläufige Schätzung [93]

Erfolgt die Biomethanerzeugung im landwirtschaftlichen Betrieb mit Tierhaltung, werden die anfallenden Wirtschaftsdünger Gülle und/oder Stallmist als kostengünstige Gärsubstrate genutzt. Sie leisten nicht nur einen Beitrag zur Biomethangewinnung, sondern tragen auch durch die Zufuhr von Nährstoffen und Spurenelementen zur Stabilisierung des mikrobiellen Abbauprozesses bei (siehe Kapitel 4.2). Dagegen ist der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen durch den Anbau und die Ernte mit Kosten verbunden. Eine Analyse des Substrateinsatzes für die Biomethanerzeugung zeigt, dass der überwiegende Teil aus nachwachsenden Rohstoffen stammt (Abb. 55).

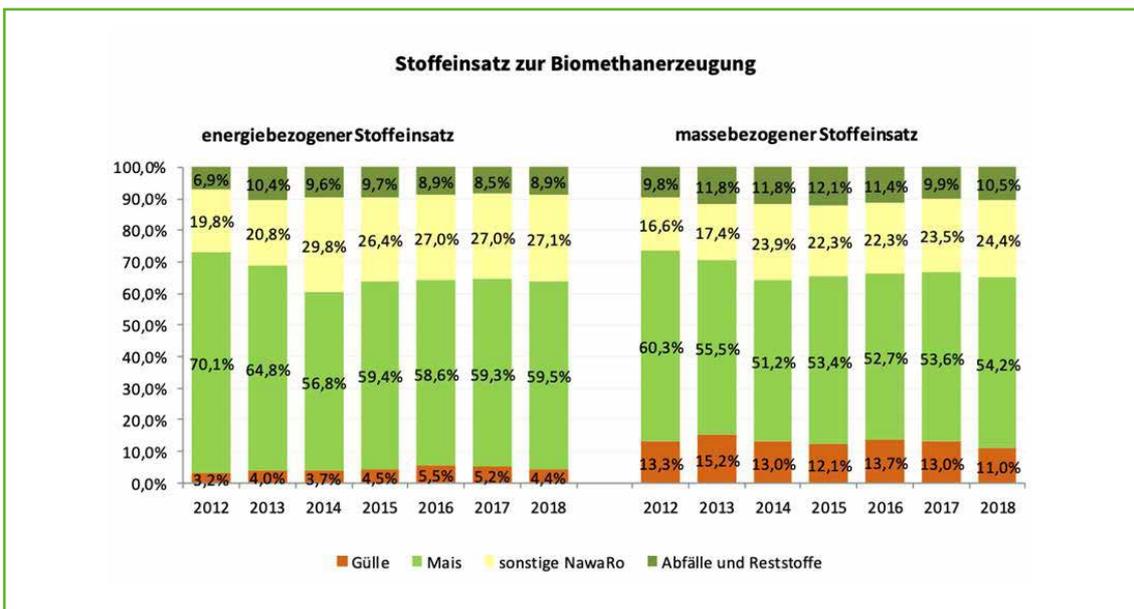


Abb. 55: Entwicklung des energie- und massebezogenen Stoffeinsatzes zur Biomethanerzeugung (Stand Mai 2019, dena) [93]

Am Beispiel von Maissilage, Futterrüben- und Grünland-Ganzpflanzensilage wurde nachfolgend berechnet, wie hoch die Kosten für die Bereitstellung dieser NawaRo je Kubikmeter Biomethan sind. Für diese Berechnung wurde die Datenbank des KTBL genutzt [94]. In dieser Datenbank sind Kosten für den Anbau je Hektar K_F für Frischmasse- und Trockenmasseertrag E_{FM} bzw. E_{TS} genannt und für die genannten NawaRo angewendet (Tab. 9). Durch Verknüpfung der Flächen-NawaRo-Kosten K_F mit dem TS-Flächenertrag E_{TS} entsprechend (Gl. 52) erhält man die auf die TS der NawaRo bezogenen Kosten K_{TS} (Abb. 56).

$$K_{TS} = \frac{K_F}{E_{TS}} \quad (\text{Gl. 52})$$

Die NawaRo-Methanherstellungskosten K_{CH_4} ergeben sich aus dem Quotienten der TS-NawaRo-Kosten K_{TS} und der TS-Methanausbeute Y_{CH_4} (Gl. 53).

$$K_{CH_4} = \frac{K_{TS}}{Y_{CH_4}} \quad (\text{Gl. 53})$$

Für Maissilage als die am häufigsten in Biomethananlagen eingesetzte Biomasse ergeben sich Methanherstellungskosten von 0,30 €/m³ Biomethan, während die Werte für Futterrüben- und Grünland-Ganzpflanzensilage (GPS) 0,46 €/m³ bzw. 0,28 €/m³ betragen. Nutzt man Biomethan für die Stromerzeugung, dann ergeben sich die in Tab. 9 aufgeführten Stromerzeugungskosten $K_{el.}$, die entsprechend Gl. 54 berechnet werden können. Der elektrische Wirkungsgrad wurde mit 38 % zugrunde gelegt, d. h. aus einem Kubikmeter Methan mit einem Energiegehalt von 9,97 kWh werden 3,8 kWh Strom erzeugt. Die Stromerzeugungskosten aus Maissilage, Rübensilage und Grünland-GPS betragen demnach je kWh erzeugten Strom 7,9 ct, 12 ct bzw. 7,4 ct.

$$K_{el.} = \frac{K_{TS}}{Y_{CH_4} \cdot \eta} \quad \text{Beispiel Maissilage: } K_{el.} = \frac{91,4}{302 \cdot 3,8} = 0,079 \text{ € kWh}^{-1} \quad (\text{Gl. 54})$$

Tab. 9: Methan- und Stromerzeugungskosten für ausgewählte nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) unter Berücksichtigung von Flächen-NawaRo-Kosten, TS-Flächenertrag, TS-NawaRo-Kosten und TS-Methanausbeute, Daten aus [68] und [94]

| Parameter | Einheit | Symbol | Maissilage 35% TS | Futterrüben 15% TS | Grünland-GPS 35% TS |
|---------------------------------|---------------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Flächen-NawaRo-Kosten | € ha ⁻¹ a ⁻¹ | K_F | 1.600 | 2.070 | 800 |
| Frischmasse (FM) Ertrag | t ha ⁻¹ a ⁻¹ | E_{FM} | 50 | 90 | 28,6 |
| TS-NawaRo Ertrag | t TS ha ⁻¹ a ⁻¹ | E_{TS} | 17,5 | 13,5 | 10,0 |
| TS-NawaRo-Kosten | € t ⁻¹ TS | K_{TS} | 91,4 | 153 | 79,3 |
| TS-Methanausbeute | m ³ t ⁻¹ TS | Y_{CH_4} | 302 | 333 | 280 |
| NawaRo-Methanherstellungskosten | € m ⁻³ CH ₄ | K_{CH_4} | 0,30 | 0,46 | 0,28 |
| NawaRo-Stromherstellungskosten | € kWh ⁻¹ | $K_{el.}$ | 0,079 | 0,12 | 0,074 |

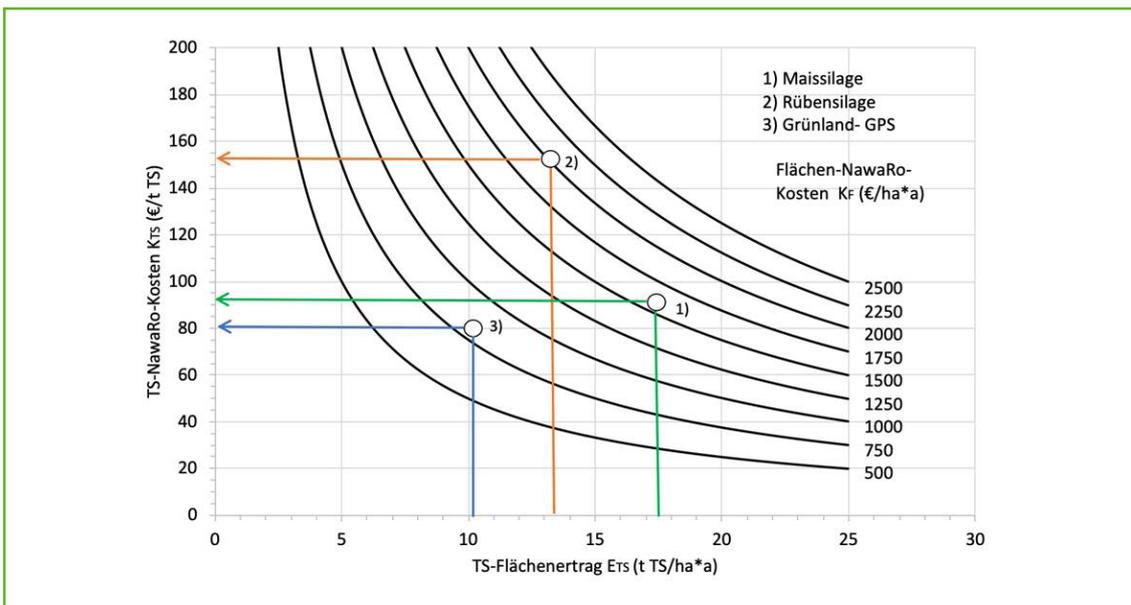


Abb. 56: Einfluß der Flächen-NawaRo-Kosten K_F und des TS-Flächenertrages E_{TS} auf die TS-NawaRo-Kosten K_{TS}

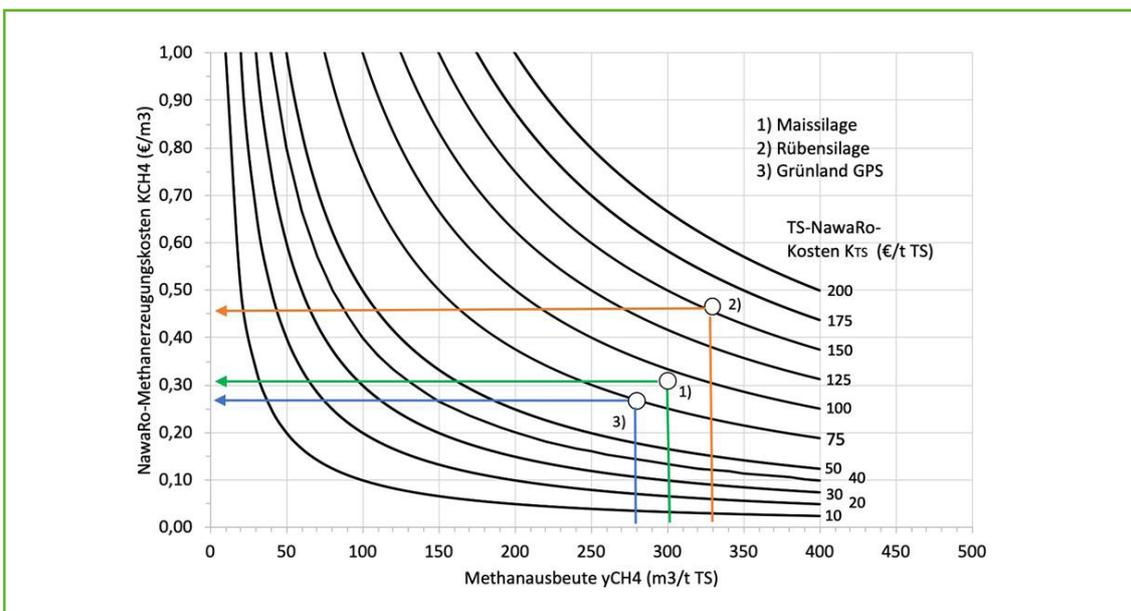


Abb. 57: Einfluss der TS-NawaRo-Kosten K_{TS} und der NawaRo-Methanausbeute y_{CH_4} auf die NawaRo-Methanerzeugungskosten K_{CH_4}

9.5 Biogas in Bioenergiedörfern

In einem Bioenergiedorf wird das Ziel verfolgt, möglichst die gesamte Wärme- und Stromversorgung eines Ortes auf den erneuerbare Energieträger „Biomasse“ zu stellen und die Bioenergieanlagen in Eigenregie zu betreiben. Bioenergiedörfer leisten im ländlichen Raum einen wichtigen Beitrag für eine CO₂-arme Energieversorgung und eine eigenständige Regionalentwicklung. In dem vom BMEL und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe herausgegebenen Leitfaden „Wege zum Bioenergiedorf“ [95], soll ein Bioenergiedorf folgende Bedingungen erfüllen:

- Es ist mindestens soviel Strom durch Biomasse zu erzeugen, wie in dem Ort verbraucht wird.
- Der Wärmebedarf des Ortes wird mindestens zur Hälfte auf Basis von Biomasse abgedeckt. Um eine hohe Energieeffizienz zu erreichen, sollte dies durch Kraft-Wärme-Kopplung erfolgen.
- Die Bioenergieanlagen befinden sich zu mehr als 50% im Eigentum der Wärmekunden und der Biomasse liefernden Landwirte. Möglichst alle Beteiligten sollten Anteile an den Bioenergieanlagen besitzen.

Eine Möglichkeit, diese Bedingungen zu erfüllen, besteht darin, die bei der Stromproduktion durch Biomasse zwangsläufig anfallende Wärme dazu zu nutzen, die Häuser im Ort über ein Nahwärmenetz mit Wärmeenergie zu versorgen. Damit ist jedes Bioenergiedorf ein strategisches Nachhaltigkeitsprojekt, schützt Klima und Umwelt und verbraucht im Idealfall keine fossilen Brennstoffe wie Öl oder Erdgas [96].

Nicht nur die Umstellung auf regenerative Energieträger ist Anreiz für die Etablierung eines Energiedorfs, hinzu kommen auch, dass im Bioenergiedorf zukunftsfähige Arbeitsplätze geschaffen und die regionale Wertschöpfungskette gestärkt werden. Die Dorfgemeinschaft, das Wir-Gefühl und die Identifikation mit dem Ort werden deutlich gestärkt [97].

Aus Anlass des Jubiläums „10 Jahre Bioenergiedorf Jühnde“ im Jahr 2015 wurde eine Metaanalyse über alle bis heute existierenden ca. 160 Bioenergiedörfer vorgenommen. Außerdem erfolgte ergänzend eine Befragung bezüglich der sozialen Aspekte bei der Umsetzung dieser Bioenergiedörfer, da die Berücksichtigung dieser Aspekte, wie bspw. die Beteiligung der Bewohner an den Planungen, eines der speziell kennzeichnenden Merkmale von Bioenergiedörfern darstellt. Ziel der Analysen war es, zu untersuchen, welche Formen von Bioenergiedörfern sich in den zehn Jahren in welcher Weise entwickelt haben und ob die Prinzipien, die von der „Projektgruppe Bioenergiedörfer“ aus Göttingen ursprünglich im Hinblick auf nachhaltig funktionierende Bioenergiedörfer formuliert wurden, bei der Mehrheit der heutigen Bioenergiedörfer tatsächlich eine Rolle spielen oder nicht [98]. Einen Ausgangspunkt der Analyse bildet die Frage, welche Technologien in den Bioenergiedörfern eingesetzt werden. Biogasanlagen stellen in 141 von den 167 analysierten Ausprägungen ein Element der Energieversorgung dar (Abb. 58).

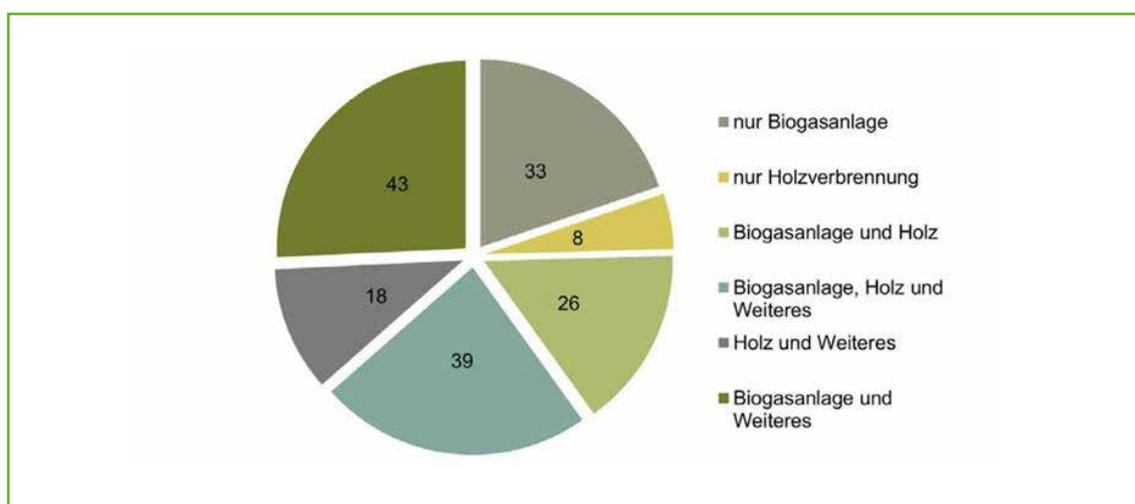


Abb. 58: Anzahl und Verteilung der Technologiekonzepte in Bioenergiedörfern [97]

Neben der Verwendung von Biogas und Holz werden in Bioenergiedörfern weitere erneuerbaren Energien genutzt. In großer Zahl werden Photovoltaikanlagen genannt, aber auch mehrfach die Solarthermie, die Windkraft und die Wasserkraft. In drei Fällen wird in diesem Zusammenhang explizit auf die Elektromobilität verwiesen (Abb. 58).

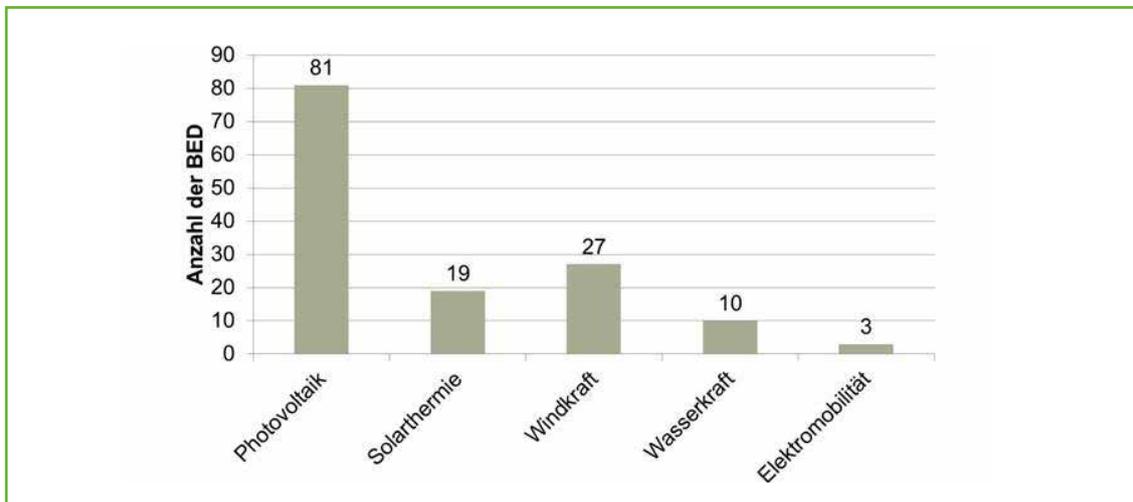


Abb. 59: Nutzung weiterer erneuerbarer Energien in Bioenergiedörfern [97]

Weitere Informationen über Förderungen, Wettbewerbe, Projekte, weblinks und weiterführende Literatur sind [99] zu entnehmen.

9.6 Biogas in Stadtwerken

Mit seinem Festvortrag auf dem 1. Aachener Anwenderforum für Bioenergienutzung in Stadt und Region am 28. April 2003 eröffnete Hermann Scheer †, damals Präsident von EUROSOLAR, ein neues Geschäftsfeld für die Stadtwerke, da sich Biogas leichter als die anderen erneuerbaren Energien in die bestehende Struktur der Energieversorgung integrieren lässt. Aufgrund der dafür notwendigen Dezentralität sieht Dr. Dieter Attig, Vorstandsvorsitzender der Stadtwerke Aachen AG ein hoch interessantes stark ausbaufähiges Zukunftsfeld [100].

Den Umbau unseres Energiesystems – weg von einzelnen zentralen Großkraftwerken in der Hand weniger Konzerne hin zu Millionen dezentraler, erneuerbarer Stromerzeuger – haben bislang in erster Linie engagierte Bürger, Landwirtschaft und Mittelständler gestemmt. Es stellt sich aber die Frage, welche Möglichkeiten diese Akteure künftig haben werden? In jedem Fall wird es zunehmend wichtig, Kraft und Engagement zu bündeln, um möglichst viel zu bewegen. Gemeinsam können Stadtwerke, Kommunen und Bürger lokale Potenziale erfolgreich nutzen und so für Wertschöpfungseffekte in ihrer Region sorgen [101].

Unter dem Titel „Bioenergie – eine Chance für Kommunen und Regionen, Beispiele und Strategien für eine kommunale und regionale Bioenergienutzung“ haben die Deutsche Umwelthilfe und das Institut für Zukunfts Energie Systeme (IZES) in einer Studie aus dem Jahr 2007 mit anderen Kooperationspartnern 10 erfolgreiche Projekte beschrieben, wie Bioenergie durch Biogas, Holz und andere Biofestbrennstoffe durch Kraft-Wärme-Kopplung zum Vorteil für Kommunen genutzt werden kann. Im zweiten Teil der Studie wurde anhand von 6 Modellregionen untersucht, welche Biomasse-Nutzungstechnologien in der Region geeignet sind [102]. In der Folgezeit haben bis heute eine Vielzahl von Stadtwerken die Vorteile der Biogasgewinnung in ihr Geschäftskonzept aufgenommen [103]. Eine Abfrage z. B. bei Google mit den Wörtern „Biogasanlagen Stadtwerke Deutschland“ liefert zahlreiche Städte und Gemeinden, die Strom und Wärme aus Biogas be-

reitstellen oder Biomethan in das Erdgasnetz einspeisen. Die Statistik aus dem Jahre 2016 zeigt zwar, dass 73,9% der Anlagen den Landwirten gehören, aber 3,3% im Besitz von Energieversorgungsunternehmen sind. Bei einem Anlagenbestand von 9.200 (s. Abb. 53) sind das immerhin 416 Anlagen [104].

9.7 Biogas in Kombination mit anderen Erneuerbaren Energien

Power-to-Gas (PtG) ist das zentrale Kopplungselement zwischen Strom- und Gasinfrastruktur. Die strombasierte, CO₂-freie Erzeugung von Gasen wie Wasserstoff bzw. Methan ermöglicht es, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung und an der Energieversorgung insgesamt gleichermaßen zu steigern. Für die saisonale Speicherung von Energie ist die Nutzung von PtG-Technologien heute nahezu alternativlos. Mit dieser Technologie wird der Ökostrom durch Elektrolyse in Wasserstoff und anschließend zu Methan umgewandelt, in bestehenden Gasinfrastrukturen gespeichert, transportiert und bedarfsgerecht wieder bereitgestellt [105].

Die Gaserzeugung mit Hilfe von Strom durch Power-to-Gas elektrisiert die Energiewirtschaft seit Jahren. Alle vier großen Energiekonzerne, etliche Stadtwerke (Mainz, Thüga-Verbund), die Mineralölwirtschaft (Total), Autobauer (Audi), Projektentwickler (Enertrag, GP Joule) und Anlagenbauer (Siemens, Solarfuel, Sunfire, Viessmann) haben mit tatkräftiger staatlicher Hilfe bundesweit rund 30 Pilotanlagen errichtet [106].

Seit 2011 erzeugt die Firma ENERTRAG in einem Hybridkraftwerk mittels Elektrolyse aus Windstrom grünen Wasserstoff, der unter anderem zu Heizzwecken, zur Betankung von PKWs, Bussen und in industriellen Prozessen eingesetzt wird. Ebenso wird der grüne Wasserstoff, der komplett ohne CO₂-Emissionen hergestellt wird, heute unter der Marke ENERTRAG Windgas zur Versorgung von Brennstoffzellen in Notstromversorgungseinheiten bereitgestellt. Das Hybridkraftwerk besteht aus 3 Windenergieanlagen des Typs Enercon E-82 und zwei Motor-BHKWs, die sowohl mit Biogas als auch mit einem Biogas-Wasserstoffgemisch betrieben werden können. Wasserstoff wird aus Windenergie zu Zeiten starker Winde hergestellt und gespeichert, bei Bedarf wird der Wasserstoff wieder in elektrische Energie umgewandelt. Mit der Speicherung der Energie in Form von Wasserstoff kann eine sichere Bereitstellung von Energie auch bei Windstille gewährleistet werden. Wasserstoff ist ein umweltfreundlicher Energieträger, der es ermöglicht, große Energiemengen über einen langen Zeitraum zu speichern [107].

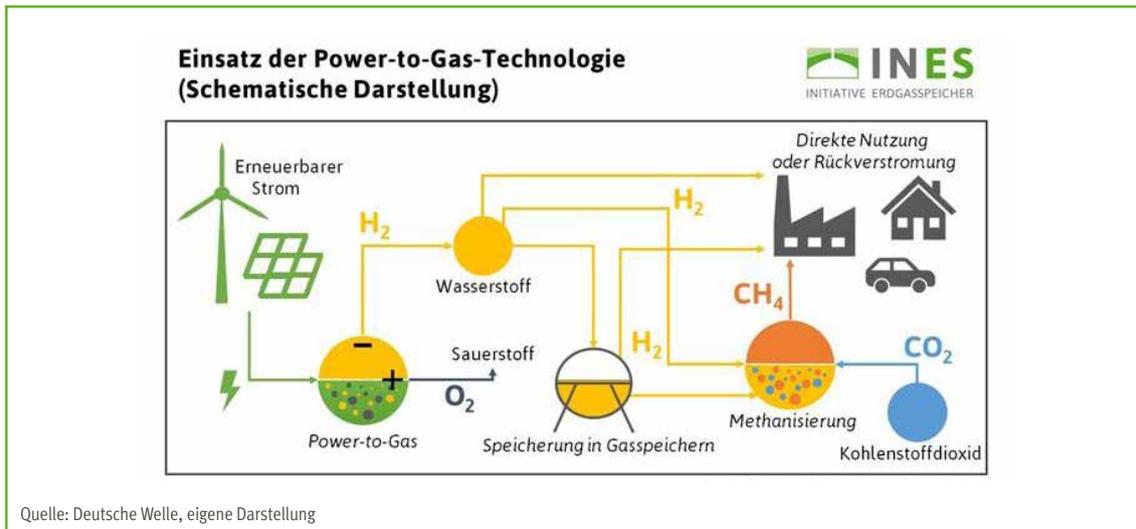


Abb. 60: Schema zur Umwandlung von Strom aus Windkraftanlagen zu Wasserstoff und Methan aus erneuerbaren Energien (EE-Strom) [108]

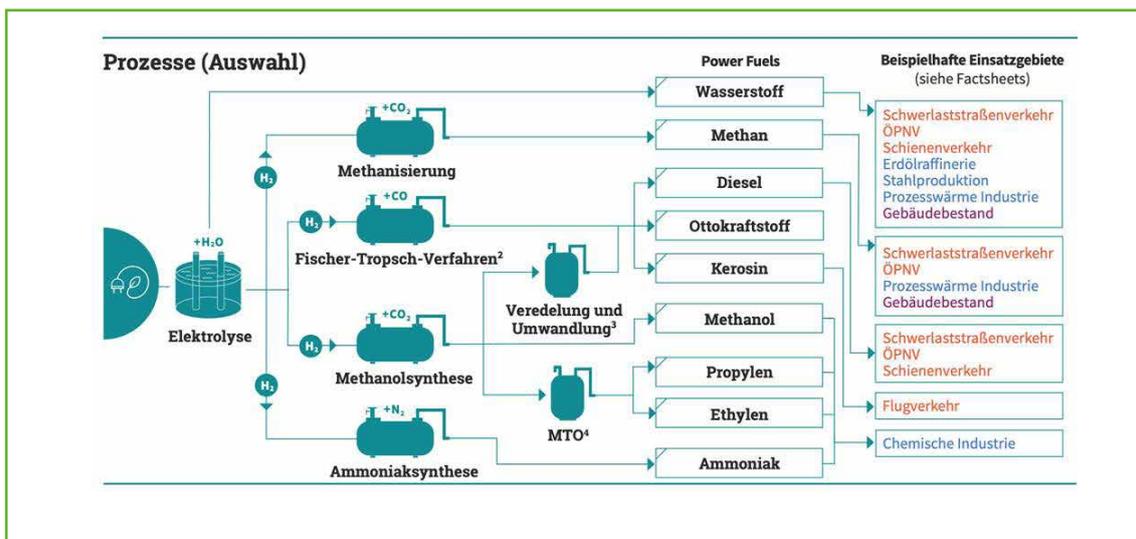


Abb. 61: Prozesse von „Power to X“ (Auswahl), Produkte und beispielhafte Einsatzgebiete [109].

Elektrolyse

Die Wasserstoffelektrolyse bezeichnet die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff durch den Einsatz von elektrischer Energie. Sie kann sowohl als Niedrigtemperatur- als auch als Hochtemperaturverfahren durchgeführt werden. Bislang werden überwiegend bereits weit entwickelte Verfahren mit niedrigen Temperaturen wie die alkalische Elektrolyse oder die Elektrolyse über Protonen-Austausch-Membranen (engl. „PEM“) eingesetzt. Hochtemperaturverfahren könnten zukünftig an Bedeutung gewinnen. Bei der Festoxid-Elektrolyse (SOFC) als Hochtemperatur-Elektrolyse ist eine hohe Effizienz und damit eine Reduzierung des Strombedarfs der Elektrolyse erreichbar, da die Abwärme anderer Prozesse wie der Methanisierung, der Methanolsynthese oder des Fischer-Tropsch-Verfahrens genutzt werden kann.

Methanisierung

Beim Prozess der Methanisierung wird Wasserstoff durch den zusätzlichen Einsatz von Kohlendioxid zu Methan weiterverarbeitet. Die katalytische Methanisierung benötigt einen Katalysator auf der Basis von Nickel und wird bereits kommerziell eingesetzt. Zudem kann auch eine biologische Methanisierung unter Einsatz von Mikroorganismen (Archaeen) erfolgen (siehe Kapitel 4.1). Hierzu sind vor allem die Forschungsarbeiten an der BTU-Cottbus [110], an der Universität Hohenheim im Rahmen eines Verbundvorhabens zu nennen [111]. Die Firma microbEnergy der VISSMANN GROUP betreibt seit 2015 die erste Pilotanlage nach ihrem patentierten BION-Verfahren im industriellen Maßstab in Allendorf (Eder) [112].

Methanolsynthese und Fischer-Tropsch-Verfahren

Synthetische Flüssigkraftstoffe können entweder durch Methanol- oder Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden. Bei der Methanolsynthese wird in einem ersten Schritt Methanol aus Wasserstoff und Kohlendioxid oder Kohlenmonoxid (CO) erzeugt. Das Methanol kann entweder direkt verwendet oder in synthetische Flüssigkraftstoffe (Diesel, Benzin, Kerosin) umgewandelt werden. Bei der Herstellung via Fischer-Tropsch-Synthese wird aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff ein Roh-Flüssigkraftstoff hergestellt, der anschließend raffiniert wird.

Ammoniaksynthese, Methanolsynthese und MTO

Chemikalien, die derzeit aus fossilen Brennstoffen gewonnen werden, könnten künftig auch aus Wasserstoff und weitergehenden chemischen Synthesen erzeugt werden. Ammoniak lässt sich beispielsweise über die Ammoniaksynthese herstellen, bei welcher Wasserstoff und Stickstoff zu Ammoniak synthetisiert werden. Im Falle von Olefin-Chemikalien kann synthetisches Methanol aus Wasserstoff und Kohlendioxid durch eine „Methanol-zu-Olefinen“-Reaktion (engl. „MTO“) in Ethylen und Propylen umgewandelt werden.

Beispiele und Bewertung von PtG-Technologien

Die Kopplung von Wasserstoff aus der Elektrolyse mit Biogasanlagen hat der Autohersteller Audi mit dem Projekt „e-gas Synthetisches Methan als Kraftstoff“ im großtechnischen Maßstab demonstriert. Im Juni 2013 weihte Audi zusammen mit seinen Partnern – dem Stuttgarter Unternehmen SolarFuel GmbH, dem Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Stuttgart, dem Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel und der EWE Energie AG im niedersächsischen Werlte eine Pilotanlage zur Erzeugung von synthetischem Methan als Kraftstoff für eine CO₂-neutrale Langstreckenmobilität ein. Seit Herbst 2013 speist die Anlage synthetisches Erdgas ins Erdgas-Netz ein. Pro Jahr produziert die Audi e-gas-Anlage etwa 1.000 Tonnen Gas und bindet dabei zirka 2.800 Tonnen CO₂ [113].

Betreiber der Biogasanlage ist der niedersächsische Energiekonzern EWE, der seit 2002 Biomethan mit einer Kapazität von 650 Normenkubikmeter pro Stunde in das Erdgasnetz einspeist. Das Kohlendioxid für die Methansynthese stammt aus Biogas, das aus organischen Abfällen und Wirtschaftsdüngern gewonnen wird. Neben der Anlage in Werlte betreibt EWE noch 7 weitere Biogasanlagen, die neben Biomethan auch Kohlendioxid für Power-to-Gas oder Power-to-Liquid-Anlagen zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe bereitstellen [114].

Mit Blick auf die Rolle von Power-to-Gas-Technologien für eine erfolgreiche Energiewende hat die Zukunft ERDGAS GmbH die „nymoen|strategieberatung“ beauftragt, Anlagenhersteller und -betreiber zum Potenzial und zur Entwicklung von PtG im Rahmen von telefonischen Kurzinterviews zu befragen. Hintergrund ist der oft verwendete Verweis auf die Ineffizienz der Anlagen aufgrund der hohen Umwandlungsverluste. Nachfolgend die wichtigsten Ergebnisse dieser Delphi-Kurzstudie [115].

Die betrachteten PtG-Anlagen wurden im Zeitraum von 2010 bis 2017 in Betrieb genommen. Die Nennleistung der Anlagen reicht von 0,15 MW bis 6,3 MW. In neun genannten Pilotanlagen wird durch Elektrolyse Wasserstoff hergestellt und direkt ins Gasnetz eingespeist. In zwei weiteren Pilotanlagen wird durch Elektrolyse Wasserstoff hergestellt, der dann in einem zweiten Schritt methanisiert und in das Gasnetz eingespeist wird. In der Befragung nahmen Betreiber der Anlagen u. a. Stellung zum Wirkungsgrad der Elektrolyse, der im Bereich von 70–83 % liegt und bei Nutzung der Abwärme sogar auf bis zu 90 % gesteigert werden könnte. Für Anlagen, die beide Schritte Elektrolyse und Methanisierung durchführen, werden Kosten für das produzierte Gas von 24 bis 30 Cent/kWh genannt. Interessant ist die Einschätzung zum ökonomischen Potenzial der PtG-Technologie, das die Experten überwiegend im Verkehrsbereich sehen und als sehr hoch einschätzen. Bei der Frage nach den Hürden wird die technische Weiterentwicklung als „gering“, dagegen werden regulatorischen Hemmnisse als stark bis sehr stark eingeschätzt. Optimistisch ist man bei der Kostendegression. Bis 2030 rechnet man mit Preisen von 7 bis 15 Cent/kWh.

10 FAZIT

Deutschland und die EU haben sich ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt: Bis 2050 sollen die jährlichen Treibhausgas (THG)-Emissionen im Vergleich zu 1990 um 80 bis 95 Prozent sinken. Als bevölkerungsreichster und wirtschaftsstärkster Mitgliedsstaat der EU nimmt Deutschland in der EU-Klimapolitik eine wichtige Rolle ein. Zur Erreichung dieser Ziele sind ein Verzicht auf fossile Energieträger und die Nutzung von erneuerbaren Energien unausweichlich.

In der öffentlichen Diskussion und in den Medien werden als erneuerbare Energien fast ausschließlich Windkraft und Photovoltaik genannt, Biomasse oder Biogas kommen dabei nicht oder nur selten vor. Biogas ist in der Wahrnehmung breiter Bevölkerungsschichten eher negativ belegt mit dem Verweis auf Mais-Monokulturen, hohes Verkehrsaufkommen durch den Transport von Gülle, Stallmist oder nachwachsenden Rohstoffen. Wird die Biogasanlage zum Beispiel durch Überlastung nicht ordnungsgemäß betrieben, können auch Belastungen durch unangenehme Gerüche auftreten.

Ein Ziel des vorliegenden Buches ist aufzuzeigen, dass die Gewinnung von Biogas nicht nur einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der genannten Klimaschutzziele leistet, sondern die Landwirte u. a. durch Anlegen von Blühstreifen mit Wildpflanzen auch zur Artenvielfalt beitragen. Als Alternative zum Mais, der trotz Kritik im Bereich Biogas in Deutschland immer noch überwiegend zur Fütterung von Rindern eingesetzt wird, können auch andere Kulturen zur umweltfreundlichen Erzeugung von Biomasse für die Biogasgewinnung angebaut werden.

Hierzu gehört die Durchwachsene Silphie. Als Dauerkultur ist sie zum Beispiel für die Regensburger Energie- und Trinkwasserversorgung AG (REWAG) besonders gut für den Anbau in äußeren Wasserschutzgebieten geeignet. Sie braucht kaum Dünger und nach dem ersten Jahr keine Herbizide mehr. „Die Bepflanzung von Feldern mit Durchwachsener Silphie leistet einen wertvollen Beitrag zum Grundwasserschutz“, erklärte REWAG-Vorstandsvorsitzender Dr. Torsten Briegel bei einem Pressetermin am 03. Juli 2020 im bayerischen Lappersdorf am Rande eines Silphie-Feldes. Auch die Vertreter des Imkerkreisverbandes und des Bezirksjagdverbandes Regensburg Josef Fichtl und Helmut Seiler bestätigten die positive Wirkung der Blühpflanze auf die Bienen, andere Insekten und die Tierwelt. „Wenn ab Juli das Feld blüht, ist das eine ideale Wildbienenweide“ [116].

Die Aktivitäten zur Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) sind Teil des von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) koordinierte und vom BMELV über die FNR geförderte Verbundvorhaben „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“, kurz EVA genannt. Mit diesem umfangreichen nationalen Agrarforschungsprojekt auf 7 verschiedenen Standorten und 12 beteiligten Instituten konnte praxisrelevantes Wissen zu effizienten und nachhaltigen Anbausystemen von Energiepflanzen bereitgestellt werden [117].

Aber auch die Bevölkerung in Städten und Gemeinden können durch die sachgerechte Nutzung der Biotonne einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die gesammelten Abfälle landen zum Beispiel bei der Berliner Stadtreinigung (BSR) in einer Biogasanlage. Das Biogas wird zu Biomethan aufbereitet, in das öffentliche Gasnetz eingespeist und als Kraftstoff für die Biomüllfahrzeuge verwendet. Der anfallende Gärrest ist nahezu frei von unangenehmen Gerüchen, reich an pflanzlichen Nährstoffen sowie Humus bildenden organischen Substanzen. Er ist ein wertvoller organischer Dünger für die Landwirtschaft und ersetzt den mit viel Energie hergestellten Mineraldünger. Dieses Beispiel zeigt, dass aus Bioabfällen nicht nur Energie, sondern auch ein für die Ernährung wichtiger Dünger gewonnen werden kann [118].

Die Gewinnung von Biogas ist ein von Mikroorganismen dominierter Prozess. Daher bestand ein weiteres Ziel des Buches darzustellen, welche Einflussgrößen für die Entstehung von Biogas von Bedeutung sind und worauf man beim Betrieb einer Biogasanlage achten sollte. Für die Biogasgewinnung in der Praxis sind eine Vielzahl von Gärsubstraten geeignet. Daher erschien es notwendig, die hierfür genutzten Technologien für die Biogasgewinnung kurz zu beschreiben, so z. B. zur Behandlung kommunaler Klärschlämme aus der Abwasserbehandlung, die schon genannten Abfälle aus der Biotonne, Abwässer aus der energieintensiven Nahrungsmittelindustrie, Gülle und Stallmist aus der Tierhaltung, Gräser aus der Grünlandbewirtschaftung sowie nachwachsende Rohstoffe. Da die zur Biogasgewinnung geeigneten organischen Verbindungen in Form von Suspensionen, gelösten Molekülen oder schüttfähigen organischen Feststoffen vorliegen, muss die hierfür geeignete Technologie ausgewählt werden.

Ein Großteil des Buches befasst sich mit der Frage, wie kann der Biogasprozess in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, in denen das Biogas überwiegend in Rührkesselfermentern produziert wird, im Hinblick auf eine möglichst hohe Biogas-/Methanausbeute optimiert werden? Hierzu wurde vom Autor des Buches ein Modell entwickelt, das als Berechnungsgrundlage für das Volumen des Fermenters und die Größe des Gärrestlagers herangezogen werden kann. Die im Modell verwendeten Parameter lassen sich dabei durch standardisierte Methoden ermitteln und können von zahlreichen Biogaslabors, z. B. in den Hoch- und Fachschulen, Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten, wissenschaftlichen Einrichtungen oder Ingenieurbüros, kostengünstig durchgeführt werden. Zu den zu bestimmenden Parametern gehören:

- das im Gärsubstrat vorhandene Methanbildungspotenzial als einfacher Gärtest nach VDI Richtlinie 4630,
- die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_f des Biogasfermenters in einem kontinuierlich bei konstanter Temperatur und Verweilzeit mit Gärsubstrat beschickten Laborfermenter,
- ein weiterer Gärtest zur Messung der Methanbildung aus dem Gärrest des Fermenters bei zwei verschiedenen Temperaturen zur Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_l im Gärrestlager und des Temperaturterms f_T als Grundlage für die Ermittlung der Methanbildung im Gärrestlager z. B. im Bereich zwischen 5 °C und 25 °C

Die Validierung des Modells erfolgte durch Gärtests und Langzeitversuchen in Laborfermentern im Rahmen einer Dissertation [47] und in dem vom BMEL geförderten Projekt „Opti-Methan“ mit praxisrelevante Daten [53]. In einer weiteren umfangreichen Studie zur Evaluierung von Praxisanlagen [54] wurde festgestellt, dass 87% von den insgesamt 61 untersuchten Anlagen Wirtschaftsdünger im Gemisch mit nachwachsenden Rohstoffen als Kofermentation vergären. Das für die Biogasbildung auf der Grundlage eine Reaktion 1. Ordnung entwickelte Modell, kann nicht nur für Monosubstrate, sondern auch für die Kofermentation einer beliebigen Mischung aus Gülle, pflanzlicher Biomasse, Bioabfälle oder anderer organischer Abfälle aus der Lebens- und Futtermittelindustrie entsprechend Kapitel 6.3 angewendet werden.

Mit der einstreulosen Tierhaltung und dem damit verbundenen Anfall von Gülle, ein fließfähiges Gemisch aus Kot, Harn und Reinigungswasser, kann dieser Wirtschaftsdünger in kostengünstigen Rundbehältern vor der Ausbringung auf landwirtschaftliche Nutzflächen ohne wesentliche Nährstoffverluste gelagert werden. Da während der Lagerung eine Entmischung durch Bildung von Sediment- und Schwimmschichten auftritt, muss vor der Ausbringung eine Homogenisierung durch leistungsfähige Rührwerke erfolgen. Aus dieser Art der Lagerung erklärt sich auch der überwiegende Einsatz des Rührkessels zur Biogasgewinnung aus Gülle.

Der zunehmende Trend zur Verwendung von Stroh als Einstreu, insbesondere in Biobetrieben, führt wieder zur traditionellen Stallmistwirtschaft. Eine unkontrollierte Lagerung auf dem Hof oder am Feldrand sollte aber wegen der auftretenden Rotteverluste vermieden werden. Insbesondere gelangen Stickstoff in Form von Ammoniak und Kohlendioxid und bei Lagerung über mehrere Wochen auch Methan in die Atmosphäre.

Diese negativen Begleiterscheinungen der Stallmistwirtschaft könnten verhindert werden, indem der Stallmist unter Luftabschluss gelagert und mit einem geringen Teil Impfmateriale vermischt wird. Zu Beginn der gasdichten Lagerung wird der Sauerstoff im Haufwerk durch fakultativ aerob lebende Mikroorganismen aufgebraucht. Diese spontan einsetzende Kompostierung bewirkt einen Temperaturanstieg, der jedoch bei Sauerstoffmangel im Haufwerk wegen der parallel einsetzenden Methanbildung gestoppt wird. Durch diese einfach zu realisierende Technik können z. B. innerhalb von 60 Tagen je Tonne Stallmist, die etwa 15 % Graspilage enthält, 60 Kubikmeter Biogas mit 60 % Methan gewonnen werden. Eine gute Wärmeisolierung der Abdeckhaube und eine Warmwasser-Fußbodenheizung sind zu empfehlen.

Halmgutartige Biomassen, die z. B. bei der Grünlandbewirtschaftung oder der Landschaftspflege anfallen, können durch die in Kapitel 7 beschriebenen Verfahren für die Biogasgewinnung genutzt werden. Neben den bereits in die Praxis überführten satzweise betriebenen 2-phasigen Verfahren zur Feststoffvergärung, sind im Hinblick auf eine gleichmäßige Biogasgewinnung Verfahren mit kontinuierlicher Substratzufuhr vorteilhaft. Hierzu gehört das am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie entwickelte Aufstrom- und Schwimmbettverfahren. Die durch den anaeroben Abbau aus den Pflanzenzellen freigesetzte Flüssigkeit kann dabei für eine optimale Prozessführung genutzt werden. Durch ständige Berieselung der im Schwimmbett vorhandenen Feststoffe ist ein optimaler und schonender Stoffaustausch möglich. Die vorhandene Flüssigkeit enthält die in der Acidogenese/Acetogenese gebildeten löslichen Verbindungen wie z. B. flüchtige Fettsäuren, Alkohole und Wasserstoff. Diese Verbindungen sind schnell zu Biogas umsetzbar, wenn sie über einen Anaerobfilter geführt werden, der eine hohe Konzentration an Archaea enthält. Beide Verfahren nutzen das Aufschwimmen der Feststoffe durch Biogasbildung und Dichteunterschiede und könnten insbesondere für kleinere Betriebe der ökologischen Landwirtschaft zur Anwendung kommen.

Im Vergleich zum klassischen Rührfermenter garantieren der Aufstrom- und Schwimmbettfermenter eine effektive und sichere Prozessführung. Hohe Konzentrationen an organischen Säuren werden schnell im Anaerobfilter zu Biogas umgesetzt, während gleichzeitig im Aufstrom- oder Schwimmbettfermenter die Biogasgewinnung erfolgt. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass im Vergleich zur gleichmäßigen Substratzufuhr die Methanproduktion in der Kombination Schwimmbettfermenter und Anaerobfilter durch erhöhte Substratzufuhr innerhalb eines Tages die Methanproduktion um 50 % bis 60 % gesteigert werden kann und damit eine bedarfsgerechte Methanproduktion möglich ist.

Die im Buch dargestellten verfahrenstechnischen Berechnungen beschränken sich auf die in der Biogaspraxis anfallenden Fragen, wie zum Beispiel,

- wie groß ist die in der Anlage produzierte Biogasmenge im Normzustand?
- mit welchen Masseverlusten im Gärsubstrat ist bei der Biogasproduktion zu rechnen, um das Volumen meines Gärrestlagers gegenüber den Aufsichtsbehörden nachweisen zu können?
- wie kann beim Einsatz eines Pressschneckenseparators die Menge an Feststoff und der abgetrennten Flüssigkeit mit Hilfe der Praxis übliche TS-Bestimmung ermittelt werden?

Die Verabschiedung des EEG am 25. Februar 2000 hat wesentlich dazu beigetragen, dass der Anteil des erzeugten Stromes aus Erneuerbaren Energien heute insgesamt 25,1 TWh beträgt. Das sind 45,4 Prozent des Bruttostromverbrauchs in Deutschland. Davon entfallen auf die Verstromung von Biogas 11,4 % und auf die Verstromung von Biomethan 1,0 % [3]. Das Biomassepotenzial zur Biomethanherstellung ist erstaunlich hoch. Nach Berechnungen des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) reicht es theoretisch aus, um 2030 fast 40 Prozent unseres Gasverbrauchs zu decken. Auch mit dem realistisch erschließbaren Potenzial lassen sich immerhin noch bis zu 13 Prozent des Gasverbrauchs substituieren. Dem gegenüber liegt der Anteil des grünen Gases heute erst bei einem Prozent [91].

Mit der Verabschiedung des novellierten EEG 2021 wurde das EEG seit der Einführung sechsmal novelliert, d. h. in 20 Jahren wurden etwa alle drei Jahre Änderungen eingeführt. Dieses Vorgehen der Politik kann schon als außergewöhnlich bezeichnet werden und ist wohl bis dahin keiner anderen Branche zugemutet worden. Der Wissenschaftliche Beirat Agrarpolitik beim Bundeslandwirtschaftsministerium empfahl 2009 den für einen wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen eingeführten NawaRo Bonus zu streichen. Als Folge dieser Streichung war eine deutliche Verringerung des Zubaus von Biogasanlagen zu verzeichnen.

In der Novellierung des EEG 2021 sieht der Fachverband Biogas jedoch eine Chance, die seit 2014 eingesezte Stagnation des Baus von Biogasanlagen zu beenden, jetzt den Bestand und das Know-How aus 20 Jahren zu erhalten und weiterzuentwickeln, damit die vielfältigen Potenziale von Biogas optimal genutzt werden können. Dazu gehören neben der flexiblen Stromeinspeisung und der Wärmenutzung auch die Einspeisung von aufbereitetem Biogas ins Erdgasnetz mit anschließender Nutzung zum Beispiel im Kraftstoffsektor, die Verarbeitung von Gärprodukten zu hochwertigem Dünger, die Förderung der Artenvielfalt im Energiepflanzenanbau, die regionale Wertschöpfung und die Stabilisierung landwirtschaftlicher Strukturen [119].

Trotz häufiger Änderungen der Rahmenbedingungen haben es Planer und Betreiber von Biogasanlagen geschafft, sich in der Landwirtschaft, in der Industrie und im kommunalen Bereich zu etablieren. So zum Beispiel durch 180 bis 200 Biogasanlagen in ökologisch wirtschaftenden Landwirtschaftsbetrieben, 140 Biogasanlagen als zentrales Element in etwa 140 Bioenergieidörfern oder die etwa 420 Biogasanlagen, die von Energieversorgungsunternehmen betrieben werden.

Ein bisher noch wenig genutztes Potential liegt in Kombination von Biogas mit anderen Erneuerbaren Energien z. B. durch Wind- oder Solarenergie in Kombination mit Power-to-Gas (PtG) Technologien (siehe Kapitel 9.7). In Biomethananlagen, kann das abgetrennte Kohlendioxid durch katalytische oder mikrobiologische Verfahren mit dem durch Elektrolyse gewonnenen Wasserstoff zu Methan umgewandelt werden. Im Ergebnis einer Expertenbefragung durch die Firma „nymoen|strategieberatung“ wird das größte ökonomische Potenzial von PtG im Verkehrsbereich und im Wärmesektor gesehen. Während die technische Weiterentwicklung durch Demonstrationsprojekte eine „geringe“ Hürde für PtG darstellt, werden nach Aussagen der Experten regulatorische Hemmnisse hingegen als „stark“ bzw. „sehr stark“ bewertet.

Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems ist die von der „EnergyWatchGroup“ gestartete Gesetzesinitiative zur Systemintegration Erneuerbarer Energien durch das „Sektorenkopplungs- und Innovationsgesetz für Erneuerbare Energien (SIG-EE)“. Vor dem Hintergrund der aktuell stockenden Investitionsdynamik beim Ausbau der Erneuerbaren Energien sieht das Gesetz die Einführung einer sogenannten Kombikraftwerksvergütung vor mit dem Ziel, Investitionen in 100 % Erneuerbare Energien systemdienlich zu ermöglichen [120].

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2021):** Methanogenese. Bearbeitungsstand: 14. Oktober 2021. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Methanogenese&oldid=216359742>, [abgerufen am 22. Oktober 2021]
- [2] **Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2020):** Nutzen und Bedeutung der Bioenergie. Berlin. www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioeconomie-nachwachsende-rohstoffe/bioenergie-nutzen-bedeutung.html, [abgerufen am 27.10.2021]
- [3] **Umweltbundesamt (2021):** Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2020. Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_hgp_erneuerbareenergien_deutsch_bf.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [4] **Umweltbundesamt (2018):** Biogaserzeugung aus Gülle – Handlungsempfehlungen für den Ausbau des Gülleinsatzes in Biogasanlagen. Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_flyer_guelle_190703_barrierefrei.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [5] **Umweltbundesamt (2015):** Da ist mehr drin! Über die optimale Verwertung von Bioabfällen. News Cleaner Production Germany. Dessau-Roßlau. www.cleaner-production.de/index.php/de/news/letter/archive/view/listid-2/mailid-14-cpg-new-sletter?tmpl=component, [abgerufen am 16.09.2021]
- [6] **Umweltbundesamt (2008):** Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Abschlussbericht. Arbeitsgemeinschaft iat – Ingenieurberatung für Abwassertechnik, Universität Stuttgart, TU Kaiserslautern, Ryser Ingenieure Bern. Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3347.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [7] **Umweltbundesamt (2019):** Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2018. Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_eeinzahlen_2019_bf.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [8] **Umweltbundesamt (2013):** Industriebranchen. Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebranchen/nahrungs-futtermittelindustrie-tie, [abgerufen am 16.09.2021]
- [9] **Bischofsberger, W.; Dichtl, N. (2004):** Anaerobtechnik, 3. Auflage Springer-Verlag
- [10] **Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (2019):** Gas kann grün: Die Potentiale von Biogas/Biomethan. Berlin. www.bdew.de/media/documents/Awh_20190426_Gas-kann-gruen-Potentiale-Biogas.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [11] **European Economic Interest Grouping (1998):** Biogas aus der Abfall- und Abwasserbehandlung – interaktive multimediale CD-ROM. <https://cordis.europa.eu/article/id/9851-biogas-from-waste-and-waste-water-treatment-interactive-multimedia-cdrom/de>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [12] **Kompost & Biogas Verband (2016):** Geschichtliche Entwicklung. Wien. www.kompost-biogas.info/biogas/geschichtliche-entwicklung/, [abgerufen am 16.09.2021]

- [13] **McInerney, M. J.; Bryant, M. P.; Pfennig, N. (1979):** Anaerobic bacterium that degrades fatty acids in syntrophic association with methanogens, Archives of Microbiology, Volume 122, Issue 2, pp. 129–135
- [14] **Buswell, A. M.; Boruff, C. S. (1932):** The Relation between the Chemical Composition of Organic Matter and the Quality and Quantity of Gas Produced during Sludge Digestion, Sewage Works Journal, Vol. 4, No. 3 (May, 1932), pp. 454–460
- [15] **Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007):** Biogashandbuch Bayern – Materialienband. Kapitel 1. Augsburg. www.lfu.bayern.de/energie/biogashandbuch/doc/kap1bis15.pdf, [abgerufen am 02.11.2021]
- [16] **Randall, C. W.; Benefield, L. D.; Buth, D. (1982):** The effects of the temperature on the biochemical reaction rate in the activated sludge process. Sci. Tech. 14, 413–430.
- [17] **Linke, B.; Vollmer, G. R. (1989):** Untersuchungen zur Gewinnung von Biogas aus Rinder- und Schweinegülle, Habilitationsschrift, Institut für Biotechnologie Potsdam der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 151 S.
- [18] **Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2021):** Kohlensäure-Bicarbonat-System. Bearbeitungsstand: 5. März 2021. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kohlensäure-Bicarbonat-System&oldid=209477849>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [19] **Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2010):** Biogasanlagen – Laborparameter und Prozessüberwachung. Freising-Weißenstephan. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_40100.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [20] **Lossie, U.; Pütz, P. (2008):** Gezielte Steuerung von Biogasanlagen mittels FOS/TAC. Düsseldorf. <https://fr.hach.com/asset-get.download.jsa?id=25593612597>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [21] **Linke, B. (2010):** Neue Entwicklungen in der Biogastechnologie. 5. Fachtagung Biogas 2010, IHK Potsdam. <https://docplayer.org/74968753-Neue-entwicklungen-in-der-biogastechnologie.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [22] **Gallert, C.; Winter, J. (1997):** Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic waste: effect of ammonia on glucose degradation and methane production. Applied Microbiology and Biotechnology 48, 405–410.
- [23] **Angelidaki, I.; Ahring, B. K. (1994):** Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. Water Research 28, 727–731
- [24] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2009):** Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe. Band 32. Gülzow-Prüzen <https://mediathek.fnr.de/broschuren/sammlungen/schriftenreihe-gulzower-fachgesprache/band-32-tagungsband-biogas-in-der-landwirtschaft-stand-und-perspektiven.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [25] **Weinrich, S. (2017):** Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen – Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Dissertation. Rostock. https://rosdok.uni-rostock.de/mcrviewer/recordIdentifier/rosdok_id00002016/Dissertation_Weinrich_2018.pdf?page=1, [abgerufen am 16.09.2021]

- [26] **Engelen, B. (2004):** Mikrobiologie des Abwassers. Vorlesung Mikrobielle Ökologie: Standort und Prozesse. Universität Oldenburg. <https://docplayer.org/18994079-Mikrobiologie-des-abwassers.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [27] **Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2021):** Kläranlage Dresden-Kaditz. Bearbeitungsstand: 14. Januar 2021. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kl%C3%A4ranlage_Dresden-Kaditz&oldid=207630534, [abgerufen am 16.09.2021]
- [28] **Ponak, C.; Windisch, S.; Raupenstrauch, H.; Schönberg, A. (2018):** Methoden und Verfahren der Klärschlammbehandlung. In: Energie aus Abfall. Band 15. Neuruppin. Thomé-Kozmiensky Verlag. S. 669 ff. www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA15/2018_EaA_669-678_Raupenstrauch, [abgerufen am 16.09.2021]
- [29] **Umweltbundesamt (2019):** Klärschlamm Entsorgung in Deutschland. Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/themen/klaerschlammentsorgung-in-deutschland, [abgerufen am 16.09.2021]
- [30] **Kern, M.; Raussen, T. (2014):** Das Dranco-Verfahren. In: Biogasatlas 2014/2015 – Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und Europa. Witzenhäuser. S. 405 ff. www.biogas-atlas.de/downloads/ows.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [31] **Kern, M.; Raussen, T. (2014):** Das Kompogas-Verfahren. In: Biogasatlas 2014/2015 – Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und Europa. Witzenhäuser. S. 363 ff. www.biogas-atlas.de/downloads/axpo.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [32] **Bekon (2021):** Die BEKON-Technologie. Harsewinkel. www.bekon.eu/technologie/, [abgerufen am 16.09.2021]
- [33] **Wellinger et al. (1984):** Biogashandbuch Grundlagen-Planung-Betrieb: Verlag Wirz AG, Aarau
- [34] **Gicon (2021):** Das GICON®-Biogasverfahren bietet zahlreiche Vorteile für Anlagenbetreiber. Dresden. www.gaet.gicon.com/produkte-leistungen/biogastechnologien/giconr-biogasverfahren.html, [abgerufen am 16.09.2021]
- [35] **Umweltbundesamt (2003):** BVT-Merkblatt zu Abwasser- und Abgasbehandlung/-management in der chemischen Industrie. Berlin. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_abgas-abwasser_vv.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [36] **Paques Technology B. V.(2021):** Anaerobe CSB-Entfernung. Balk. <https://de.paques.nl/anwendungsgebiete/featured/anaerobe-csb-entfernung>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [37] **Paques Technology B.V.(2021):** BIOPAQ®UASB. Balk. <https://en.paques.nl/products/featured/biopaq-anaerobic-wastewater-treatment/biopaquasb>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [38] **Fachverband Biogas e.V. (2021):** Branchenzahlen 2020 und Prognose der Branchenentwicklung 2021. Freising. [www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf), [abgerufen am 22.10.2021]
- [39] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2018):** Substrateinsatz in Biogasanlagen 2019. Gülzow-Prüzen. <https://mediathek.fnr.de/massebezogener-substrateinsatz-in-biogasanlagen.html>, [abgerufen am 16.09.2021]

- [40] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014):** Hinweise zum Vollzug der BioAbfV der Bund-Länder-Arbeitsgruppe. www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/bioabfv_hinweise_bf.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [41] **Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (2006):** Biogas in der Landwirtschaft, Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg. Postdam. <https://docplayer.org/12218224-Biogas-in-der-landwirtschaft-leitfaden-fuer-landwirte-und-investoren-im-land-brandenburg.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [42] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2021):** Biogasaufbereitung. Gülzow-Prüzen. <https://biogas.fnr.de/biogas-gewinnung/anlagentechnik/biogasaufbereitung>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [43] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014):** Leitfaden Biogasaufbereitung und –einspeisung. 5. Vollständig überarbeitete Auflage. Gülzow-Prüzen. <https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biogas/leitfaden-biogasaufbereitung.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [44] **Agraferm (2017):** Agraferm-Technologie für Biomethananlage in Holleben – Biogasanlage mit Einspeisung ins Erdgasnetz. Pfaffenhofen an der Ilm. www.agraferm.com/news-terme/aktuelles-terme/news-termin/article/agraferm-technologie-fuer-biomethananlage-in-holleben.html, [abgerufen am 16.09.2021]
- [45] **Schmack Biogas Service (2021):** Pioniere der Biogasbranche. Schwandorf. www.schmack-biogas.com/de/, [abgerufen am 16.09.2021]
- [46] **Linke, B.; Mähnert, P. (2005):** Einfluss der Faulraumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen. In: Biogastagung der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2005. www.duesse.de/znr/pdfs/2005/2005-04-15-biogas-03.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [47] **Mähnert, P. (2007):** Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation. Humboldt-Universität Berlin. <https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/16303/maehnert.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [48] **Ottow, J. C. G. und Bidlingmaier, W. (2011):** Umweltbiotechnologie. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 357 Seiten. ISBN 3-437-25230-5.
- [49] **Chmiel, H. (2011):** Bioprozesstechnik. Springer-Spektrum. 3. Auflage. 546 Seiten.
- [50] **Richtlinie VDI 4630 (2016):** Vergärung organischer Stoffe-Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Düsseldorf
- [51] **Liebetau, J.; Pfeiffer, D.; Thrän, D. (2015):** Messmethodensammlung Biogas – Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“. Band 7. Leipzig. www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/4_AGs_Methoden/07_Messmethodensamm_Biogas_web.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]

- [52] **Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (2002):** Biogas und Energielandwirtschaft – Potenzial, Nutzung, Grünes Gas™ Ökologie und Ökonomie. In: Bornimer Agrartechnische Berichte. Heft 32. 2. überarbeitete Auflage. Potsdam-Bornim. <https://opus4.kobv.de/opus4-slbp/frontdoor/index/index/searchtype/series/id/6/rows/10/start/71/docId/4030>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [53] **Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (2019):** Optimierung der Methanausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen – OPTI-METHAN. Schlussbericht. Potsdam. www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22404715.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [54] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2009):** Biogas-Messprogramm II – 61 Biogasanlagen im Vergleich. 1. Auflage. 168 Seiten. Gülzow-Prüzen. <https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biogas/biogas-messprogramm-ii-61-biogasanlagen-im-vergleich.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [55] **Linke, B.; Muha, I.; Wittum, G.; der Plogsties, V. (2013):** Kofermentation von Rindergülle und Nawaro-Modellierung der Methanausbeute aus dem Fermenter und dem Endlager, In: KTBL (2013) Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven, 3. FNR-/KTBL-Kongress 10.–11.09.2013 in Kassel; Darmstadt; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- [56] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2006):** Trockenfermentation – Stand der Entwicklungen und weiterer F+E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche. Band 24. Gülzow-Prüzen. www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_238le2_gfg24.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [57] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2004):** „Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Gülzower Fachgespräche. Band 23. Gülzow-Prüzen. <https://repository.publisso.de/resource/frl:3097836-1/data>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [58] **Mumme, J. (2002):** Trockenfermentation in einer kleintechnischen Batch-Anlage. Humboldt-Universität zu Berlin. Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät. Diplomarbeit. 99 S.
- [59] **Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (2009):** Wieviel Biogas steckt in Pflanzen. In: Bornimer Agrartechnische Berichte. Heft 68. Potsdam. <https://docplayer.org/50556500-Wieviel-biogas-steckt-in-pflanzen.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [60] **Mumme, J. (2008):** Vergärung nachwachsender Rohstoffe im Aufstromverfahren. Dissertation. Humboldt-Universität Berlin. 182 S.
- [61] **Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (2010):** Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen im Aufstromverfahren. Schlussbericht. Potsdam-Bornim. www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22019507.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [62] **Linke, B.; Schönberg, M.; Freudenberg, P. W.; Mieroph, P. (2010):** Biogasgewinnung aus Gräsern im Schwimmbettverfahren. Ergebnisse aus Langzeitversuchen im kleintechnischen Maßstab. VDI-Berichte 2111, Landtechnik 2010, VDI Verlag
- [63] **Linke, B.; Rodríguez-Abalde, A.; Jost, C.; Krieg, A. (2015):** Performance of a novel two-phase continuously fed leach bed reactor for demand-based biogas production from maize silage. Biore-source Technology. Volume 177. Pages 34–40

- [64] **Krieg, L.; Kunst, S.; Grimm, B. (2019):** Perkolierte Feststoff-Vergärung – Vergleichende Untersuchungen zur Prozesssteuerung in ein- und mehrstufigen Verfahren. Dissertation. Humboldt-Universität Berlin. https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/20744/dissertation_krieg_andreas_ludwig.pdf?sequenc, [abgerufen am 16.09.2021]
- [65] **Lumitos (2021):** Biogas. Berlin. www.chemie.de/lexikon/Biogas.html, [abgerufen am 16.09.2021]
- [66] **Internetchemie.Info (2021):** Wasser Dampfdruck-Tabelle. Oldenburg. www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/w/wasser-dampfdruck.php, [abgerufen am 16.09.2021]
- [67] **Lumitos (2021):** Massenerhaltungssatz. Berlin. www.chemie.de/lexikon/Massenerhaltungssatz.html, [abgerufen am 16.09.2021]
- [68] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016):** Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung. 7. Auflage. Gülzow-Prüzen. www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Leitfaden_Biogas_web_V01.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [69] **Reinhold, G. (2005):** Masse- und Trockensubstanzbilanz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: Neue Landwirtschaft Heft 12/2005. S. 68 bis 72. www.tll.de/ainfo/pdf/biog1205.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [70] **FAN Separator (2021):** Fan Separator. Marktschorgast. www.fan-separator.de/, [abgerufen am 16.09.2021]
- [71] **Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. (2012):** Biogasgärreste – Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Arbeitsgruppe I Substratproduktion im Biogas Forum Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising. www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden_2012-03_biogasforum.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [72] **IEA Bioenergy (2015):** Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing. Task 37: Energy from biogas. http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web1.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [73] **Stromeinspeisegesetz:** <https://bit.ly/2ZNtiua>, [abgerufen am 27.10.2021]
- [74] **Fachverband Biogas e. V. (2021):** Historie des Fachverband Biogas e.V. Freising. www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de-historie, [abgerufen am 16.09.2021]
- [75] **Fachverband Biogas e. V. (2017):** Biogas schreibt Geschichte. In: Biogas Journal – Jubiläumsheft. Februar 2017. Freising. https://issuu.com/fachverband.biogas/docs/bgj_jubil__umsheft_2017, [abgerufen am 16.09.2021]
- [76] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021):** Das Erneuerbare-Energien-Gesetz – Stromeinspeisegesetz vom 7.12.1990. Berlin. www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html?cms_docId=72462, [abgerufen am 16.09.2021]
- [77] **Koch-Steindl, H. (2011):** Bonus für nachwachsende Rohstoffe (NawaRo-Bonus). In: EEG 2009 – Umweltgutachter in der Praxis. Bad Abbach. www.umweltgutachter.de/uploads/images/dNaVCgl8WJ2VZDT4AoS1oQ/leseprobe-eeg-2009-umweltgutachter-ratgeber-omnicert.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]

- [78] **Top Agrar Online (2011):** Wissenschaftlicher Beirat für Abschaffung des Nawaro-Bonus. Landwirtschaftsverlag GmbH. Münster. www.topagrar.com/management-und-politik/news/wissenschaftlicher-beirat-fuer-abschaffung-des-nawaro-bonus-9573180.html, [abgerufen am 16.09.2021]
- [79] **Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2015):** Das Erneuerbare-Energien-Gesetz – Daten und Fakten zur Biomasse – Die Novelle 2014. Berlin. https://bioenergie.fnr.de/fileadmin/user_upload/EEG-Novelle2014.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [80] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2021):** EEG 2017. Gülzow-Prüzen. <https://bioenergie.fnr.de/eeg-2017>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [81] **Fachverband Biogas e.V. (2021):** Branchenzahlen 2020 und Prognose der Branchenentwicklung 2021. Freising. [www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf), [abgerufen am 22.10.2021]
- [82] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020):** Gesetzentwurf der Bundesregierung – Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Berlin. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetzentwurf-aenderung-erneuerbare-energien-gesetzes-und-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.pdf?__blob=publicationFile&v=4, [abgerufen am 22.10.2021]
- [83] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021):** Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. Berlin. www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020.pdf;jsessionid=3C7CFE02E3E849FD430F337C85A87C25?__blob=publicationFile&v=31, [abgerufen am 16.09.2021]
- [84] **CHECK24 Vergleichsportal GmbH (2021):** Stromverbrauch: Durchschnittsverbrauch Strom. München. www.check24.de/strom/stromverbrauch/, [abgerufen am 22.10.2021]
- [85] **Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (2017):** Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. DBFZ-Report Nr. 30. Leipzig. www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-30, [abgerufen am 22.10.2021]
- [86] **Hjort-Gregersen, K. et al. (2015):** Marktübersicht von Biogas-Kleinanlagen in Europa. Veröffentlichung des EU-Projekts BioEnergy Farm 2. AgroTech A/S. Aarhus. www.bioenergyfarm.eu/wp-content/uploads/2015/09/D2.1_DE-Markt%C3%BCbersicht.pdf, [abgerufen am 22.10.2021]
- [87] **Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2021):** Zahlen zum Ökolandbau in Deutschland. Ökolandbau.de – das Informationsportal. Bonn. www.oekolandbau.de/landwirtschaft/biomarkt/oekoflaeche-und-oekobetriebe-in-deutschland, [abgerufen am 22.10.2021]
- [88] **Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2021):** Biogaserzeugung auf Biobetrieben. Ökolandbau.de – das Informationsportal. Bonn. www.oekolandbau.de/landwirtschaft/umwelt/biogaserzeugung/, [abgerufen am 22.10.2021]
- [89] **Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2021):** Biogaserzeugung im ökologischen Landbau. Ökolandbau.de – das Informationsportal. Bonn. www.oekolandbau.de/landwirtschaft/umwelt/biogaserzeugung-auf-biobetrieben/biogaserzeugung-im-oekologischen-landbau, [abgerufen am 22.10.2021]

- [90] **Top Agrar Online (2011):** Ökobetriebe haben noch viel Potenzial für Biogasanlagen. Landwirtschaftsverlag GmbH. Münster. www.topagrar.com/energie/news/oekobetriebe-haben-noch-viel-potenzial-fuer-biogasanlagen-9357795.html, [abgerufen am 16.09.2021]
- [91] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2020):** Biomethan kann wesentlich zur Energiewende beitragen. Pressemitteilung 2020-52. Gülzow-Prüzen. www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/biomethan-kann-wesentlich-zur-energiewende-beitragen, [abgerufen am 16.09.2021]
- [92] **Deutsche Energie-Agentur (2021):** Biomethan. biogaspartner. Berlin. www.biogaspartner.de/biomethan/, [abgerufen am 16.09.2021]
- [93] **Deutsche Energie-Agentur (2019):** dena-ANALYSE – Branchenbarometer Biomethan 2019. Berlin. www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-Analyse_Branchenbarometer_Biomethan_2019.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [94] **KTBL (2019):** Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Darmstadt. <https://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [95] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2011):** Wege zum Bioenergiedorf – Leitfaden. 3. Auflage. 120 Seiten. Gülzow-Prüzen. <https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/bioenergie-initiativen/bioenergiedoerfer/wege-zum-bioenergiedorf.html>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [96] **Viessmann Climate Solutions SE (2021):** Bioenergiedorf. Allendorf. www.viessmann.de/de/kommunen/bioenergiedorf.html, [abgerufen am 16.09.2021]
- [97] **ibeg (2021):** Gründe für Bioenergiedörfer. Göttingen. www.bioenergiedorf.info/index.php?id=133, [abgerufen am 16.09.2021]
- [98] **ibeg (2016):** 10 Jahre Bioenergiedörfer – Ergebnisse einer Metaanalyse von 160 Bioenergiedörfern und die Betrachtung von sozialen Aspekten bei der Umsetzung im Juni 2015. In: Schriftenreihe „Fortschritt neu denken“ Heft 4. Göttingen. www.bioenergiedorf.info/fileadmin/user_upload/Schriftenreihe/SR-4_10_Jahre_BED_2017.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [99] **Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2021):** Bioenergiedorf. Bearbeitungsstand: 1. März 2021. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bioenergiedorf&oldid=209329559>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [100] **Hermann-Scheer-Stiftung (2005):** Der Landwirt wird zum Energiewirt. EUROSOLAR-Pressemitteilung vom 23. Juni 2005. Berlin. www.hermannscheer.de/de/index.php/pressemitteilungen-2005-archivmenupressemitteilu-91/174-der-landwirt-wird-zum-energiewirt, [abgerufen am 16.09.2021]
- [101] **VKU (2016):** Stadtwerke und Bürgerbeteiligung – Energieprojekte gemeinsam umsetzen. Berlin. VKU Verlag GmbH. www.unendlich-viel-energie.de/media/file/444.VKU_AEE_Broschuere_Buergerbeteiligung.PDF, [abgerufen am 16.09.2021]
- [102] **IZES et. al (2007):** Regionale Umsetzungen zur Nutzung des im Rahmen der ökologischen Begleitforschung/ZIP Biomasse entwickelten nationalen Werkzeugs für die Politikberatung „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“. Schlussbericht. www.izes.de/sites/default/files/publikationen/ST_04_371.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]

- [103] **Biogas Fachverband e.V. (2021):** Suchergebnis – Stadtwerke. Freising. www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de_suche?open=&l=DE&q=Stadtwerke, [abgerufen am 16.09.2021]
- [104] **Breitkopf, A. (2021):** Biogasanlagen – Verteilung nach Eigentümergruppen in Deutschland 2016. Statista GmbH. Hamburg. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/803982/umfrage/eigentuerstruktur-der-biogasanlagen-in-deutschland/>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [105] **DVGW (2021):** Power to Gas: Schlüsseltechnologie der Energiewende. Bonn. www.dvgw.de/themen/energiewende/power-to-gas/, [abgerufen am 16.09.2021]
- [106] **Orsted Markets GmbH (2017):** Potenzial von Power-to-Gas – Die Spaltung des Wassers. Hamburg. <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/power-to-gas-pilotanlage-prenzlau>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [107] **Enertrag (2021):** Windgas direkt aus dem Windfeld. Dauerthal. <https://enertrag.com/produkte/windgas>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [108] **Initiative Energien Speichern e.V. (2021):** Was sind erneuerbare Gase?. Berlin. <https://erdgas-speicher.de/positionen/umweltvertraeglichkeit/was-sind-erneuerbare-gase/>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [109] **Deutsche Energie-Agentur (2018):** Power to X: Technologien. Berlin. www.powertogas.info/fileadmin/Power_To_Gas/Dokumente/Factsheets/DENA-Factsheet2_Power_to_X_Allgemein.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [110] **BTU Cottbus–Senftenberg (2017):** Bedarfsorientierte Methansynthese auf Basis der Integration weiterer erneuerbarer Energieträger. Schlussbericht. Cottbus. www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22407112.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [111] **Universität Hohenheim (2020):** Verbundprojekt: Einsatz der biologischen Methanisierung für Power-to-Gas Konzepte. Stuttgart. <https://biooekonomie-bw.uni-hohenheim.de/97-98-106-107>, [abgerufen am 16.09.2021]
- [112] **microbEnergy GmbH (2020):** Grün ist Trumpf: das BiON®-Verfahren Biologische Methanisierung durch Mikroorganismen. Schwandorf. www.microbenergy.de/fileadmin/user_upload/9451834_08-2020_DE.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [113] **Deutsche Energie-Agentur (2021):** Audi e-gas Projekt. Strategieplattform Power to Gas. Berlin. www.powertogas.info/projektkarte/audi-e-gas-projekt/, [abgerufen am 16.09.2021]
- [114] **Alteric GmbH (2021):** Neue Windstärken für eine klimaneutrale Energiezukunft. Aurich. www.alteric.com/, [abgerufen am 16.09.2021]
- [115] **nymoen strategieberatung gmbh (2017):** Delphi-Kurzstudie: Praxis und Potenzial von Power-to-Gas. Kurzstudie im Auftrag der Zukunft ERDGAS GmbH. Berlin. https://resources.mynewsdesk.com/image/upload/fl_attachment/oyp0n2xzbzu5zwtcbyxu, [abgerufen am 16.09.2021]
- [116] **Top Agrar Online (2020):** Durchwachsene Silphie: Dauerkultur hilft auch dem Grundwasser. Landwirtschaftsverlag GmbH. Münster. www.topagrar.com/energie/news/dauerkultur-hilft-auch-dem-grundwasser-12102644.html, [abgerufen am 16.09.2021]

- [117] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2009):** Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. 11. Auflage. Gülzow-Prüzen. www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/fg_broschur_energiepfl_eva_2011_v2.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]
- [118] **Berliner Stadtreinigungsbetriebe AöR (2021):** Biogasanlage: Klimaschutz mit Bioabfall. Berlin. www.bsr.de/biogasanlage-22250.php, [abgerufen am 16.09.2021]
- [119] **Fachverband Biogas e. V. (2020):** Letzte Ausfahrt EEG 2021: Biogasbranche erwartet Trendwende. Pressemeldung vom 12.11.2020. Freising. [www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Letzte-Ausfahrt-EEG-2021-Biogasbranche-erwartet-Trendwende/\\$file/20-11-12__PM_PK.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Letzte-Ausfahrt-EEG-2021-Biogasbranche-erwartet-Trendwende/$file/20-11-12__PM_PK.pdf), [abgerufen am 16.09.2021]
- [120] **Fell, H.-F.; Traber, T. (2020):** Eckpunkte für eine Gesetzesinitiative zur Systemintegration Erneuerbarer Energien – Sektorenkopplungs- und Innovationsgesetz für Erneuerbare Energien (SIG-EE). Berlin. http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_Eckpunkte-fuer-eine-Gesetzesinitiative-zur-Systemintegration-Erneuerbarer-Energien.pdf, [abgerufen am 16.09.2021]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 1: | Nachweis eines brennbaren Gases aus Sedimenten von ALESSANDRO VOLTA (links) und Apparatur von SOEHNGEN für Laborversuche unter Laborbedingungen (rechts) [11]. | 12 |
| Abb. 2: | Vereinfachtes Schema der Biogasbildung | 13 |
| Abb. 3: | Abbau organischer Säuren und Äthanol zu Acetat, Wasserstoff und CH_4 | 14 |
| Abb. 4: | Diffusion von Essigsäure und Ammoniak durch die Zellwand, Essigsäure Dissoziationskonstante von $1,8 \times 10^{-5}$ bei 25°C links, rechts Methanosarcina rot, umgeben von acetogenen Bakterien grün | 17 |
| Abb. 5: | Einfluss des pH-Wertes auf die nicht dissoziierten Anteile von Essigsäure c_{HAc} und Ammonium c_{NH_3} bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen von Essigsäure c_{Ac} und Ammonium c_{NH_4} [21]. | 17 |
| Abb. 6: | Zulässige Gesamtkonzentrationen an Essigsäure und Ammonium zur Vermeidung von Hemmungen bei der Methanbildung [25]. | 18 |
| Abb. 7: | Schematischer Aufbau eines Faulbehälters [26] und Bild der Schlammbehandlung auf der Kläranlage Dresden-Kaditz [27] | 19 |
| Abb. 8: | DRANCO – Vergärungstechnologie für die Verwertung von Bioabfällen und organischen Fraktionen aus Restmüll [30] | 20 |
| Abb. 9: | KOMPOGAS-Vergärungstechnologie von kommunalem, gewerblichem und industriellem Bioabfall [31] | 21 |
| Abb. 10: | BEKON-Vergärungstechnologie für Bioabfall und schütffähige Biomassen mit hohem Trockensubstanzanteil [32] | 22 |
| Abb. 11: | GICON Vergärungstechnologie nach der zweistufigen Trocken-Nass-Fermentation, Foto in Richmond, Canada [34] | 23 |
| Abb. 12: | Schema UASB-Reaktor zur Reinigung von Abwässern aus der Nahrungsmittelindustrie aus [36] und Bild einer Praxisanlage [37] | 24 |
| Abb. 13: | Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (a), Biogasanlage der Firma AGRAFERM (b) [44] mit Gasaufbereitung (oben) und 75 kW Hofbiogasanlage der Firma SCHMACK (c) [45] mit BHKW (unten) | 26 |
| Abb. 14: | Prozess- und Leistungsparameter bei der Biogasgewinnung. | 28 |
| Abb. 15: | Zusammenhang zwischen oS-Raumbelastung und mittlerer hydraulischer Verweilzeit bei verschiedenen Konzentrationen an organischer Substanz im Gärsubstrat [46]. | 28 |
| Abb. 16: | Einfluss der Raumbelastung B_R und der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m auf die Biogaus-/Methanbeute y_B^F und die Biogas-/Methanbildungsrate r_B^F , beispielhaft für eine Mischung aus 67 % Rindergülle und 33 % Maissilage auf oTS-Basis, Daten aus [47]. | 30 |
| Abb.17: | Zusammenhang zwischen Substratabbau und Biogasproduktion | 31 |
| Abb. 18: | Anteil der maximal möglichen Biogas/Methanausbeute p in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m und der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_F | 33 |
| Abb. 19: | Allgemeines Berechnungsmodell für die Auslegung der Fermentergröße eines vollständig durchmischten Biogasfermenters und des Gärrestlagers für die Biogas-/Methangewinnung | 33 |
| Abb. 20: | Bestimmung der maximalen Methanausbeute für Rindergülle und Maissilage nach Kurvenanpassung mit der Hill-Funktion. | 34 |
| Abb. 21: | Versuchsaufbau zur Ermittlung der Biogas-/Methanausbeute im Fermenter y_{B/CH_4}^F und der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_F [47] | 35 |
| Abb. 22: | Erreichung des Gleichgewichtszustandes bei $c_t/c_0=0,05$ im Verlauf der Versuchszeit t bei verschiedenen Werten von t_m | 36 |
| Abb. 23: | Methanausbeute im Fermenter $y_{CH_4}^F$ und Methanbildungspotenzial im Gärrestlager $y_{CH_4}^{max/L}$ in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m | 37 |
| Abb. 24: | Methanausbeute im Fermenter $y_{CH_4}^F$ und Methanbildungspotenzial im Gärrestlager $y_{CH_4}^{max/L}$ in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R | 37 |

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 25: | Verlauf der Methanbildung im Gärrestlager bei zwei verschiedenen Temperaturen | 38 |
| Abb. 26: | Darstellung von Gl. 38 als Geradengleichung mit Werten für k_L bei 37 °C und 22 °C von 0,0317 d ⁻¹ bzw. 0,0102 d ⁻¹ . | 39 |
| Abb. 27: | Methanbildung aus Rindergülle im Gärrestlager im Verlauf der Zeit bei verschiedenen Temperaturen und einer Verweilzeit im Fermenter von $t_m=30$ d. | 42 |
| Abb. 28: | Methanbildung im Gärrestlager im Verlauf der Zeit bei verschiedenen Temperaturen, $t_m=15$ d | 43 |
| Abb. 29: | Einfluss der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m und dem oS Anteil aus Pflanzen im Mix mit Gülle $p_{oS/Inp}^{Crops}$ auf die Methanausbeute $y_{CH_4}^{Mix}$ im Mix Pflanzen und Gülle [55]. | 44 |
| Abb. 30: | Maximale Methanausbeuten im Mix $y_{CH_4}^{max/Mix}$ aus Biogaspflanzen und Rindergülle, bei verschiedenen oS-Anteil aus Biogaspflanzen $p_{oS/Inp}^{Crops}$, Daten aus [47] | 45 |
| Abb. 31: | Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k_f^{Mix} im Mix aus Biogaspflanzen bei verschiedenen oS Anteilen aus Biogaspflanzen $p_{oS/Inp}^{Crops}$, Daten aus [47] | 45 |
| Abb. 32: | Methanausbeuten $y_{CH_4}^{Mix}$ aus Mischungen von Rindergülle und Maissilage $p_{oS/Inp}^{Crops}$ in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m . | 46 |
| Abb. 33: | Methanausbeuten $y_{CH_4}^{Mix}$ aus Mischungen von Rindergülle und Rübensilage $p_{oS/Inp}^{Crops}$ in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit t_m . | 46 |
| Abb. 34: | Versuchsaufbau zur Biogasbildung im Labor des ATB mit 3 kg Glaszylindern (links) und einer kleintechnischen Labor-Versuchsanlage (rechts) | 47 |
| Abb. 35: | Verläufe der Biogasbildung bei der satzweisen Vergärung. | 48 |
| Abb. 36: | Verläufe der Biogasbildung bei der satzweisen Vergärung von Grassilage mit unterschiedlichen Anteilen Impfmateriale auf oTS-Basis bei 35 °C. | 48 |
| Abb. 37: | Verlauf der Biogasbildung bei der satzweisen Vergärung verschiedener organischer Feststoffe mit 50 % und 75 % Impfmateriale. | 49 |
| Abb. 38: | Einfluss des oTS-Impfmaterialeverhältnisses p_i auf die maximal mögliche Biogasausbeute verschiedener organischer Feststoffe. [57] | 49 |
| Abb. 39: | Kleintechnische Versuchsanlage zur Biogasgewinnung aus schüttfähigen Substraten, links: gefüllter Fermenter mit Fußbodenheizung und Wassertasse, rechts: Fermenter im Betriebszustand [58] | 50 |
| Abb. 40: | Ergebnisse des Betriebes der kleintechnischen Versuchsanlage mit einer Mischung aus 85 Ma.% Rindermist und 15 Ma.% Grassilage, Daten aus [58] | 50 |
| Abb. 41: | Fotos der Versuchsanlage zur satzweise 2-phasigen Feststoffvergärung am ATB [59] | 51 |
| Abb. 42: | Schema der Versuchsanlage zur satzweise 2-phasigen Feststoffvergärung [59] | |
| Abb. 43: | Labor-Versuchsanlage und Funktionsprinzip des Austromfeststoffreaktors aus [60] | 54 |
| Abb. 44: | Schematische Darstellung der Versuchsanlagen (37 °C) zur kontinuierlichen Vergärung von Gräsern, Landwirtschaftsbetrieb in Seevetal: nur Schwimmbettfermenter 540 Liter, ATB: Schwimmbettfermenter 55 Liter und Anaerobfilter 40 Liter | 55 |
| Abb. 45: | Schwimmbettfermenter im Landwirtschaftsbetrieb in Seevetal (oben) und Schwimmbettfermenter am ATB mit Anaerobfilter (unten) | 55 |
| Abb. 46: | Biogasmenge Q_B , oTS-Biogasausbeute y_B und oTS-Raubelastung B_R bei mesophiler Vergärung (37 °C) zwei verschiedener Grassilagen in einem 540 Liter Schwimmbettfermenter. | 56 |
| Abb. 47: | Prozess- und Leistungsparameter bei der Vergärung (37 °C) von Grassilage 1 (Tabelle 5) und zweistufiger Fahrweise (Schwimmbettfermenter SBF und Anaerobfilter AF) | 57 |
| Abb. 48: | Einfluss der Substratzufuhr auf die Methanbildung im Schwimmbettfermenter (SBF) und im Anaerobfilter (AF), 1 bis 6 Beschickungsmodus [62] | 58 |
| Abb. 49: | Einfluss der Beschickungsmuster auf die Konzentration der flüchtigen organischen Säuren (FOS) im Schwimmbettfermenter (SBF) und im Anaerobfilter (AF), 1 bis 6 Beschickungsmodus [63] | 59 |
| Abb. 50: | Zusammenhang zwischen Biogastemperatur und dem Dampfdruck des im Biogas enthaltenen Wassers nach Dampfdrucktabelle [66] | 61 |
| Abb. 51: | Schema und Bild eines Pressschneckenseparators aus [72] | 63 |

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 52: | Menge Flüssigkeit $m_{Flüss.}^{FM}$ nach der Fest-Flüssig-Trennung mit einem Pressschneckenseparator in Abhängigkeit vom TS-Gehalt im Zulauf c_2^{TS} , Daten aus [72] | 64 |
| Abb. 53: | Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt [MW] (Stand: 7/2020) [81] | 66 |
| Abb. 54: | Vermarktung von Biomethan für unterschiedliche Anwendungsbereiche 2012 bis 2019 (in GWhHS) (Stand Mai 2019, dena) | 70 |
| Abb. 55: | Entwicklung des energie- und massebezogenen Stoffeinsatzes zur Biomethanherzeugung (Stand Mai 2019, dena) [93] | 70 |
| Abb. 56: | Einfluß der Flächen-NawaRo-Kosten K_f und des TS-Flächenertrages E_{TS} auf die TS-NawaRo-Kosten K_{TS} | 72 |
| Abb. 57: | Einfluss der TS-NawaRo-Kosten K_{TS} und der NawaRo-Methanausbeute Y_{CH_4} auf die NawaRo-Methanherzeugungskosten K_{CH_4} | 72 |
| Abb. 58: | Anzahl und Verteilung der Technologiekonzepte in Bioenergiedörfern [97] | 73 |
| Abb. 59: | Nutzung weiterer erneuerbarer Energien in Bioenergiedörfern [97] | 74 |
| Abb. 60: | Schema zur Umwandlung von Strom aus Windkraftanlagen zu Wasserstoff und Methan [108] er bei der Elektrolyse gewonnene Wasserstoff durch Strom aus erneuerbaren Energien (EE-Strom) kann auch für die Herstellung CO_2 -armer synthetischer Energieträger (Power Fuels) und chemischer Grundstoffe genutzt werden. Hierfür wurde der Begriff PtX-Technologien eingeführt (Abb. 61). | 76 |
| Abb. 61: | Prozesse von „Power to X“ (Auswahl), Produkte und beispielhafte Einsatzgebiete [109]. | 76 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|---------|--|----|
| Tab. 1: | Biogasausbeuten verschiedener Stoffgruppen auf der Grundlage von Gl. 1 | 15 |
| Tab. 2: | Methanausbeuten nach G. 36 im Verlauf der Zeit für Temperaturen im Gärrestlager zwischen 5 °C und 25 °C mit $y_{CH_4}^{max/L} = 63 \text{ l kgO}_5^{-1}$ zwischen 5 °C und 25 °C von 0 bis 147 d | 40 |
| Tab. 3: | Zeitversetzte kumulative Methanbildung bei 25 °C innerhalb von 21 Intervallen (147 Tage Lagerzeit) | 41 |
| Tab. 4: | Ergebnisse der Untersuchungen aus der satzweise 2-phasigen Feststoffvergärung von Roggen-Ganzpflanzensilage, Daten aus [59] | 53 |
| Tab. 5: | Analysen der bei den Versuchen eingesetzten Grassilagen | 56 |
| Tab. 6: | Analysenparameter der Maissilage und des Impfschlammes [63] | 58 |
| Tab. 7: | Wesentliche Gaskomponenten von Biogas nach [65] | 60 |
| Tab. 8: | Biogas- und Methanerträge sowie Biogasmassen von Wirtschaftsdüngern und Nachwachsenden Rohstoffen aus [68]. | 62 |
| Tab. 9: | Methan- und Stromerzeugungskosten für ausgewählte nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) unter Berücksichtigung von Flächen-NawaRo-Kosten, TS-Flächenertrag, TS-NawaRo-Kosten und TS-Methanausbeute, Daten aus [68] und [94] | 71 |

Fachagentur Nachhaltende Rohstoffe e.V. (FNR)
OT Gülzow, Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Tel.: 03843/6930-0
Fax: 03843/6930-102
info@fnr.de
www.fnr.de

Artikelnummer 1.185
FNR 2021

