



Leitfaden zur Substrat- und Effizienz- bewertung an Biogasanlagen

Autoren:

Sören Weinrich (DBFZ), Mark Paterson, Ursula Roth (KTBL)

IMPRESSUM

Herausgeber:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133
info@dbfz.de

Förderung:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf-
grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles
(Wissenschaftlicher Geschäftsführer)
Daniel Mayer
(Administrativer Geschäftsführer)

DBFZ Report Nr. 35

Leitfaden zur Substrat- und Effizienzbewertung
an Biogasanlagen
Leipzig: DBFZ, 2020
ISSN: 2197-4632 (Online)
ISSN: 2190-7943 (Print)
ISBN: 978-3-946629-57-3

Autoren:

Sören Weinrich (DBFZ), Mark Paterson, Ursula Roth (KTBL)

Bilder:

Sofern nicht am Bild vermerkt: DBFZ, Jan Gutzeit, Stefanie
Bader (Karte)

Copyright:

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf
ohne die schriftliche Genehmigung des Herausgebers
vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot
fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per
Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die
Vervielfältigung auf CD-ROM.

Datum der Veröffentlichung:

29. Mai 2020

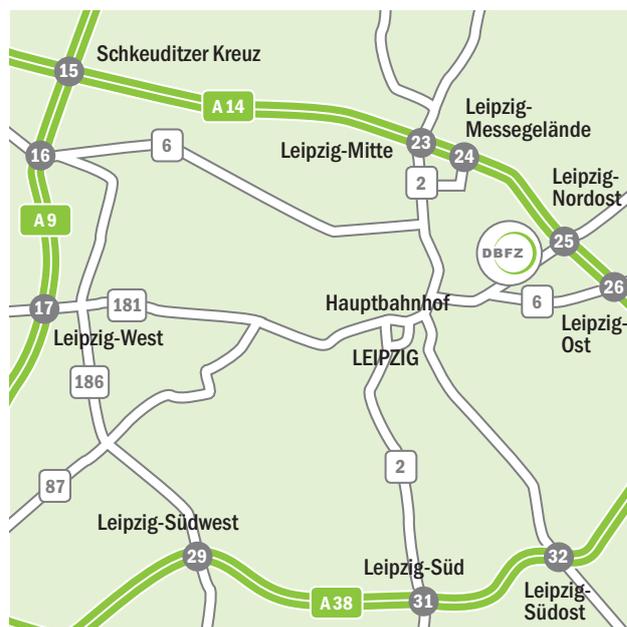
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese
Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter
der Adresse www.dnb.de abrufbar.

ANFAHRT:

Mit dem Zug: Ankunft Leipzig Hauptbahnhof; Straßenbahn
Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommerfeld) bis Haltestelle
Bautzner Straße; Straße überqueren, Parkplatz rechts liegen
lassen und den Haupteingang des DBFZ (Haus 1, Torgauer
Str. 116) benutzen. Bitte melden Sie sich am Empfang an.

Mit dem Auto: Über die Autobahn A 14; Abfahrt Leipzig Nord-
Ost, Taucha; Richtung Leipzig; Richtung Zentrum, Innenstadt;
nach bft Tankstelle befindet sich das DBFZ auf der linken
Seite (siehe „... mit dem Zug“).

Mit der Straßenbahn: Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommer-
feld); Haltestelle Bautzner Straße (siehe „... mit dem Zug“).



Leitfaden zur Substrat- und Effizienz- bewertung an Biogasanlagen

Sören Weinrich
Mark Paterson
Ursula Roth

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133

www.dbfz.de
info@dbfz.de



Autoren:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Bereich Biochemische Konversion

Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Internet: www.dbfz.de

Dr.-Ing. Sören Weinrich

Tel.: +49 (0)341 2434-341
E-Mail: soeren.weinrich@dbfz.de

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)
Team Energie, Emissionen und Klimaschutz

Bartningstraße 49
64289 Darmstadt
Internet: www.ktbl.de

Dipl.-Ing. (FH) Mark Paterson

Tel.: +49 (0)6151 7001-234
E-Mail: m.paterson@ktbl.de

Dipl.-Geoökol. Ursula Roth

Tel.: +49 (0)6151 7001-231
E-Mail: u.roth@ktbl.de

Das **Kapitel 2.4. „Batchversuche“** wurde in Abstimmung mit den Mitgliedern der **KTBL-Arbeitsgruppe „Ringversuche Biogas“** erstellt (Dr. Manfred Bischoff, LUFA Nord-West | Florian Ebertseder, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft | Dr. Christiane Herrmann, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. | Gabriele Meißbauer, Schmack Biogas Service GmbH | Dr. Hans Oechsner (Vorsitzender), Universität Hohenheim | Dr. Susanne Ohl, Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein | Dr.-Ing. Jürgen Pröter, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH und Dr. Peter Tillmann, VDLUFA Qualitätssicherung NIRS GmbH).

Der Leitfaden zur Substrat- und Effizienzbewertung wurde im Rahmen des Verbundvorhabens **Bewertung von Substraten hinsichtlich des Gasertrags – vom Labor zur großtechnischen Anlage** (FKZ: 22034614 und 22015915) mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe erstellt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	9
2 Methoden zur Substratbewertung	10
2.1 Probenahme	11
2.2 Laborauswahl	13
2.3 Analytische Kenngrößen.....	15
2.3.1 Fermentierbare organische Trockensubstanz	16
2.3.2 Futtermittelanalyse	19
2.3.3 Elementaranalyse	22
2.3.4 Brennwert.....	24
2.3.5 Chemischer Sauerstoffbedarf	25
2.3.6 Gesamter organischer Kohlenstoff	26
2.4 Batchversuche.....	27
2.4.1 KTBL/VDLUFA-Ringversuch Biogas	29
2.4.2 Fehlerquellen und -beseitigung	35
2.5 KTBL-Richtwerte.....	38
2.6 Methodenauswahl	40
3 Methoden zur Effizienzbewertung	46
3.1 Methanertrag und (Rest-)Methanpotential	46
3.2 Massenbilanzierung	48
3.2.1 Berechnung der fermentierbaren Substratbestandteile.....	49
3.2.2 Berechnung des Umsatzes der anaeroben Vergärung.....	49
3.2.3 Berechnung der resultierenden Biogas- und Gärrestmengen	53
3.3 Energiebilanzierung.....	54
3.4 Methodenauswahl	57
4 Zusammenfassung	62

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Formelzeichen		Einheit
ADL	Lignin (acid detergent lignin)	[g kg ⁻¹ TS]
BS	Betriebsstunden	[h]
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg O ₂ L ⁻¹]
CV _F	Variationskoeffizient der Wiederholbarkeit	[%]
CV _R	Variationskoeffizient der Vergleichbarkeit	[%]
FOS	Flüchtige organische Säuren	[g L ⁻¹]
FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz	[% oTS]
FQ	Fermentierbarkeit	[%]
FQ _{XF}	Fermentierbarkeit Rohfaser (XF)	[% XF]
FQ _{NfE}	Fermentierbarkeit stickstofffreier Extraktstoffe (NfE)	[% NfE]
FQ _{XL}	Fermentierbarkeit Rohfette (XL)	[% XL]
FQ _{XP}	Fermentierbarkeit Rohproteine (XP)	[% XP]
f _W	Stöchiometrischer Wasserbedarf	[% FoTS]
f _X	Biomassewachstum	[% FoTS]
FXC	Fermentierbare Rohkohlenhydrate	[g kg ⁻¹ TS]
FXL	Fermentierbare Rohfette	[g kg ⁻¹ TS]
FXP	Fermentierbare Rohproteine	[g kg ⁻¹ TS]
H _{i,CH₄}	Heizwert Methan	[kJ kg ⁻¹ oTS]
H _{i,ZÖ}	Heizwert Zündöl	[kJ kg ⁻¹ oTS]
H _S	Brennwert	[kJ kg ⁻¹ oTS]
H _{S,CH₄}	Brennwert von Methan	[kJ L ⁻¹ CH ₄]
H _{S,nFoTS}	Brennwert nicht fermentierbarer Substratbestandteile	[kJ kg ⁻¹ nFoTS]
H _{S,oTS}	Brennwert	[kJ kg ⁻¹ oTS]
HRT	Verweilzeit (<i>hydraulic retention time</i>)	[d]
m	Mittelwert aller Labore im Ringversuch	[L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]
k	Reaktionskinetik erster Ordnung	[d ⁻¹]
m _S	Massestrom Substrat	[kg d ⁻¹]
M _S	Molare Masse des Substrats	[g mol ⁻¹]

Formelzeichen		Einheit
n_{CH_4}	Mol an CH_4	[mol CH_4]
n_{C}	Anzahl an Kohlenstoffatomen	[-]
n_{H}	Anzahl an Wasserstoffatomen	[-]
n_{N}	Anzahl an Stickstoffatomen	[-]
n_{O}	Anzahl an Sauerstoffatomen	[-]
n_{S}	Anzahl an Schwefelatomen	[-]
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe	[g kg^{-1} TS]
$\text{NH}_4\text{-N}$	Ammoniumstickstoff	[g L^{-1}]
oTS	Organische Trockensubstanz	[% TS]
P_{FWL}	Feuerungswärmeleistung	[kW]
s_{r}	Wiederholstandardabweichung	[L CH_4 kg^{-1} oTS]
s_{R}	Vergleichsstandardabweichung	[L CH_4 kg^{-1} oTS]
T_{N}	Nennzeitraum	[d]
TC	Gesamtkohlenstoff (<i>total carbon</i>)	[g TC kg^{-1} TS]
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff (<i>total organic carbon</i>)	[g TOC kg^{-1} TS]
TS	Trockensubstanz	[% FM]
TV	Trafoverluste	[%]
V_{CH_4}	Spezifischer Methanertrag	[L CH_4 kg^{-1} oTS]
$V_{\text{CH}_4 \text{max}}$	Spezifisches Methanpotential	[L CH_4 kg^{-1} oTS]
V_{norm}	Normvolumen ($p = 1.0135$ bar und $T = 0^\circ\text{C}$)	[L mol^{-1}]
$V_{\text{Zö}}$	Zündölverbrauch	[L]
$W_{\text{el,brutto}}$	Bruttostrommenge	[kWh]
$W_{\text{el,eigen}}$	Eigenstrombedarf	[kWh]
$W_{\text{el,nutz}}$	Nutzstrommenge	[kWh]
x_{a}	Wahrer Wert im Ringversuch	[L CH_4 kg^{-1} oTS]
XA	Rohasche	[g kg^{-1} TS]
XF	Rohfaser	[g kg^{-1} TS]
XL	Rohfette	[g kg^{-1} TS]
XP	Rohproteine	[g kg^{-1} TS]
Y_{CH_4}	Stöchiometrisches Methanpotential	[L CH_4 kg^{-1} FoTS]

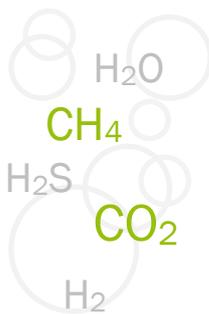
Formelzeichen		Einheit
Y_{CSB}	Stöchiometrisches Methanpotential CSB	[L CH ₄ g ⁻¹ O ₂]
Y_{FXC}	Stöchiometrische Methanpotential FXC	[L CH ₄ kg ⁻¹ FXC]
Y_{FXP}	Stöchiometrisches Methanpotential FXP	[L CH ₄ kg ⁻¹ FXP]
Y_{FXL}	Stöchiometrisches Methanpotential FXL	[L CH ₄ kg ⁻¹ FXL]
Y_{G}	Restgaspotential (im Gärrest)	[L CH ₄ kg ⁻¹ FM]
Y_{TOC}	Stöchiometrisches Biogaspotential TOC	[L Biogas g ⁻¹ TOC]
ρ	Dichte	[kg m ⁻³]
η	Umsatz FoTS	[kg kg ⁻¹ FoTS]

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der aktuellen energiepolitischen Entwicklungen und des zunehmenden Kostendruckes steigen die Anforderungen an eine präzise und zugleich praxisnahe Bilanzierung, Bewertung und Optimierung des Biogasprozesses. Dies beinhaltet sowohl die detaillierte Charakterisierung und Qualitätsbewertung der individuell eingesetzten Substrate als auch die Effizienzbewertung ihrer verfahrensspezifischen Umsetzung im Fermenter.

Grundsätzlich existieren in der Wissenschaft und Praxis vielfältige Untersuchungsverfahren und Berechnungsmethoden, um die Eigenschaften der eingesetzten Substrate oder den aktuellen Prozesszustand zu charakterisieren. Eine direkte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Verfahren auf Basis der Trockensubstanz (TS, oTS, FoTS), Futtermittel-, Elementar- oder Brennwertanalyse ist bis heute nicht gegeben. Unter Berücksichtigung der konkreten Prozessbedingungen liefern experimentelle Batchtests oder kontinuierliche Laborversuche realitätsnahe Aussagen zum Methanertrag einzelner Substrate. In der großtechnischen Anlagenpraxis haben sich dabei die allgemeinen Richtwerte für Gasausbeuten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) etabliert, welche auf einer Vielzahl an Einzelmessungen von Batchversuchen unterschiedlicher Labore und zusätzlichen Erfahrungswerten (Expertenwissen) beruhen.

Ziel des vorliegenden Leitfadens ist es, die unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung des Methanbildungspotentials einzelner Substrate hinsichtlich ihrer praxisnahen Anwendung und Aussagekraft zu beschreiben. Auf Basis vereinfachter Massen- oder Energiebilanzen können die charakteristischen Kenngrößen der eingesetzten Substrate oder der anfallenden Gärreste dann zur Effizienzbewertung einer Biogasanlage verwendet werden.



Biogas oder Methan?

Für eine einheitliche Substrat- und Effizienzbewertung wird im vorliegenden Leitfaden lediglich Methan zur Beschreibung der Gasproduktion verwendet, da dies der energiereiche Bestandteil des Gases ist. Zudem wird der Gehalt an Kohlenstoffdioxid im Biogas neben der Substratzusammensetzung maßgeblich durch den pH-Wert beeinflusst. Für eine realitätsnahe Berechnung oder Bewertung der effektiven Biogaszusammensetzung im Fermenter müssen somit physikochemische Einflussparameter und Abhängigkeiten (Dissoziationsreaktionen und Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid) berücksichtigt werden, welche für eine praxisnahe und robuste Auswertung nicht geeignet sind.

2 Methoden zur Substratbewertung

Grundsätzlich existieren zahlreiche Methoden und Kenngrößen, um die Eignung der vielfältigen Substrate für den Einsatz in einer Biogasanlage zu charakterisieren. Neben den vielfältigen Berechnungsverfahren auf Basis von chemischen Substratanalysen (in Verbindung mit Annahmen zur Fermentierbarkeit der jeweiligen Komponenten) stehen zudem labortechnische Vergärungsversuche sowie die Messwerte von großtechnischen Anlagen zur Verfügung.

Methanpotential

In Bezug auf die erzeugte bzw. erzeugbare Menge an Methan ist zwischen dem **Methanpotential** der einzelnen Substrate und dem **Methanertrag** im realen Anlagenbetrieb zu unterscheiden (Abbildung 1). Während das substratspezifische Methanpotential dabei Aussagen über die **Substratqualität** für den Einsatz in einer Biogasanlage erlaubt, ermöglicht der tatsächliche Methanertrag im realen Anlagenbetrieb die Beurteilung der verfahrensspezifischen **Effizienz** bei unterschiedlichen Verweilzeiten und Betriebsbedingungen. Dabei spiegeln sich auch mögliche **Messunsicherheiten oder Gasverluste** (z. B. Leckagen oder Verluste an Überdrucksicherungen) im Methanertrag der konkreten Biogasanlage wider. Eine scharfe Trennung der beiden Kenngrößen ist damit eine grundlegende Voraussetzung, um eine belastbare und aussagekräftige Evaluation der charakteristischen Messdaten und Kenngrößen zu ermöglichen.



Abbildung 1: Zusammenhang zwischen dem Methanpotential und Methanertrag im realen Anlagenbetrieb

Für eine realitätsnahe Substratbewertung ist der Energiebedarf für **mikrobielle Wachstumsprozesse** bei der Ermittlung des Methanpotentials zu berücksichtigen. Zudem bezieht sich das Potential auf den konkreten Zustand (z. B. Reife-, Silierungs- oder Aufschlussgrad) der eingesetzten Substrate, sodass auch entsprechende **Vorbehandlungs- oder Desintegrationsverfahren** das verfügbare Methanpotential im anaeroben Biogasprozess grundsätzlich verändern können.

Abbaukinetik

Neben dem substratspezifischen Methanpotential ist die **Abbaukinetik** (Abbaugeschwindigkeit) der fermentierbaren Substratbestandteile im Fermenter eine entscheidende Kenngröße, um einen gezielten, effizienten und flexiblen Substrateinsatz unter Berücksichtigung der konkreten **Verweilzeit** und **Raumbelastung** zu ermöglichen. Grundsätzlich wird die Abbaugeschwindigkeit bzw. der daraus resultierende Methanertrag dabei sowohl durch die **chemische Zusammensetzung** und **physikalische Struktur**

(Partikelgröße) der eingesetzten Substrate als auch durch den konkreten **Prozesszustand** (einschließlich möglicher Inhibitoren und wachstumslimitierender Einflussfaktoren der mikrobiellen Gemeinschaft) beeinflusst.

Aus biochemischer Sicht beschreibt die schnell abbaubare Fraktion Substratbestandteile wie gelöste Zucker oder organische Säuren, wohingegen mittelschnell abbaubare Inhaltsstoffe beispielsweise durch Proteine oder weitestgehend leicht abbaubare Kohlenhydrate gekennzeichnet sind. Faserhaltige Substratbestandteile, wie beispielsweise Strukturkohlenhydrate (Cellulose und Hemicellulose u. a.) oder langkettige Fettsäuren und Öle, repräsentieren die langsam abbaubare Fraktion (Abbildung 2).

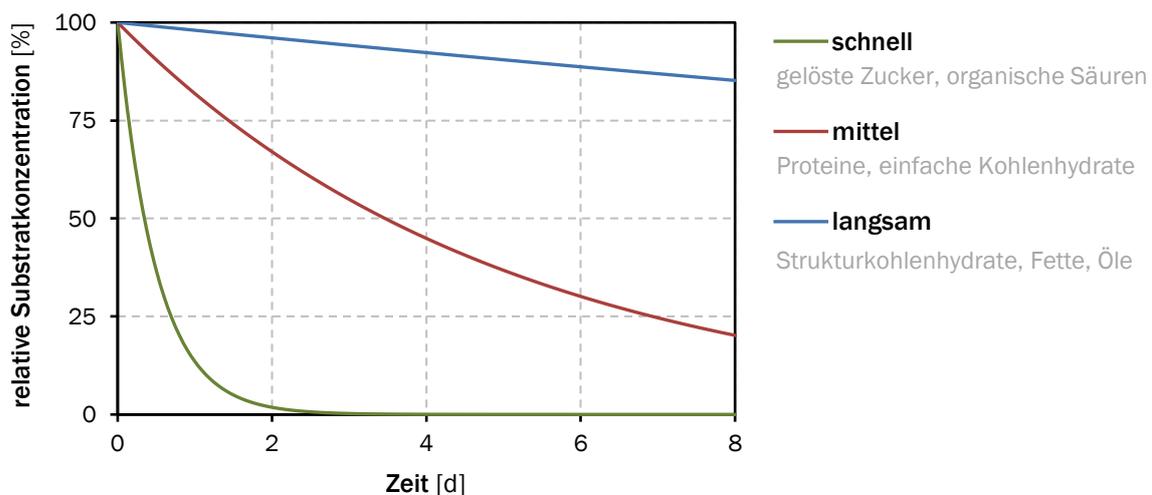


Abbildung 2: Exemplarischer Konzentrationsverlauf von schnell, mittel und langsam abbaubaren Substratbestandteilen

Literaturhinweise

Liebetrau, J.; Pfeiffer, D. und Thrän, D. (2015): Messmethodensammlung Biogas. Hrsg. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Vol. 7, Leipzig

KTBL (2015): Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Hrsg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), KTBL-Heft 107, 3. Auflage, Darmstadt

VDI 4630 (2016): Richtlinie zur Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche 4630. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin

VDLUFA (2011): Methodenvorschrift „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“. VDLUFA Methodenbuch VII, Umweltanalytik, 4.1.1. Hrsg. Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), VDLUFA-Verlag, Darmstadt

2.1 Probenahme

Neben der eigentlichen Laboranalyse wird das Untersuchungsergebnis erheblich von der Probenahme (und Probenaufbereitung) beeinflusst. Im Vergleich zur Genauigkeit der einzelnen Analyseverfahren besitzt die Repräsentativität der Probenahme dabei mitunter einen viel größeren Einfluss auf das resultierende Ergebnis zur Substrat- oder Effizienzbewertung als die Analyse selbst.

Repräsentative Probenahme

Um eine belastbare Substrat- oder Prozesscharakterisierung zu ermöglichen, sollte die entnommene Probe den **durchschnittlichen Zustand der Substrate und Gärmedien** innerhalb des konkreten Betrachtungszeitraums der jeweiligen Anlage repräsentieren.

Bei flüssigen Proben ist somit der jeweilige Behälterinhalt durch **Rühren oder Umpumpen** ausreichend lange zu homogenisieren. Für die Probenahme aus Rohrleitungen sind alte, **stehende Reste im Entnahmestutzen** (mindestens das dreifache Rohrvolumen) vor der eigentlichen Probenahme zu verwerfen. Soll die Probe aus einer Nebenstromleitung (Bypass) entnommen werden, ist eine ausreichende Zirkulation innerhalb der Leitung vor der eigentlichen Probenahme zu gewährleisten. Probenahmen aus **Schwimmschichten oder Totzonen** sind zu vermeiden.

Werden Proben aus Silos, Mieten oder Haufenwerken entnommen, sind oberflächennahe Schichten oder Randproben (insbesondere bei Schimmelbildung o. ä.) zu verwerfen. Für die Probenahme sind dabei nur Gerätschaften zu verwenden, welche den Zustand der Probe in ihrer physikalischen Beschaffenheit oder biochemischen Zusammensetzung nicht verändern.

Die Menge der Probenahme richtet sich nach der **Heterogenität und Struktur (Partikelgröße)** der untersuchten Substrate oder Gärreste sowie den Anforderungen der Laboranalysen. Nach Rücksprache mit dem jeweiligen Labor ist grundsätzlich eine großzügige Probenahme mit ausreichend Probenmaterial für zusätzliche Rückstellproben zu empfehlen.

In Abhängigkeit von den konkreten Betriebsbedingungen, den zeitlichen bzw. saisonalen Schwankungen und Alterungsprozessen der Substrate sollte eine **hinreichend häufige Probenahme** erfolgen. Bei der Wahl des konkreten Entnahmezeitpunkts (Tag und Uhrzeit) sind die anlagenspezifischen Besichtigungs- und Betriebskonzepte zu berücksichtigen. Bei heterogenen Substraten, großen Silos oder Behältern sind an **unterschiedlichen Stellen Einzelproben** zu entnehmen, welche abschließend zu einer Sammelprobe vereinigt werden (beispielsweise in Form einer qualifizierten Stichprobe).

Probenlagerung, -aufbereitung und -transport

Für Lagerung und Transport der Proben sind geeignete Behälter aus beständigen Materialien und von ausreichender Größe (maximale Füllmenge entspricht 75 % des Behältervolumens) zu verwenden. Die Proben sind unmittelbar auf Kühlschranktemperatur (bei ca. 4 °C) zu kühlen. Eine zusätzliche **Probenaufbereitung** (einschließlich Einfrieren, Mahlen oder Zerkleinern) sollte in enger Abstimmung mit dem jeweiligen Labor erfolgen, da dadurch bereits ein Substrataufschluss erfolgt, welcher das Messergebnis mitunter beeinträchtigen kann. Der **Probentransport** sollte möglichst schnell (am selben Tag) erfolgen. Details zum Transport oder der vorherigen Lagerung sollten ebenfalls vorab mit dem analysierenden Labor abgestimmt werden.

Probenahmeprotokoll

Um den Ablauf der Probenahme sowie mögliche **Unregelmäßigkeiten** in den resultierenden Analyseergebnissen nachweisen zu können, sind relevante Informationen während der Probenahme in einem entsprechenden Protokoll mit folgenden Inhalten festzuhalten:

- Datum und Uhrzeit der Probenahme
- Name des Probenehmers
- Bezeichnung und Standort der Anlage
- Detaillierte und eindeutige Angabe der Entnahmestelle
- Beobachtungen vor Ort (Farbe, Geruch, Wetterverhältnisse, etc.)
- Sonstige Besonderheiten und Auffälligkeiten

Dabei sollte die in Bezug auf die Probenahme (und Analyse) gewählte Methode über den jeweiligen Betrachtungszeitraum grundsätzlich beibehalten werden, um eine vergleichbare Datenbasis zu garantieren.

Literaturhinweise

Henkelmann, G. (2017): Probenahme aus Gülle-, Fermenter- und Gärrestbehältern, Einsatzstofflagern und offenen Silos. In: Schriftenreihe des Biogas Forums Bayern (Arbeitsgruppe III: Prozessbiologie, -bewertung und Analytik)

VDLUFA (2011): Methodenvorschrift „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“. VDLUFA Methodenbuch VII, Umweltanalytik, 4.1.1. Hrsg. Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), VDLUFA-Verlag, Darmstadt

LAGA (2016): Methodensammlung Abfalluntersuchung. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Version 3, Stuttgart

2.2 Laborauswahl

Grundsätzlich existieren zahlreiche Labore im Bereich der Landwirtschafts- und Umweltanalytik, welche die analytische oder experimentelle Bestimmung vielfältiger Kenngrößen der Biogastechnologie anbieten. Neben etablierten Kenngrößen auf Basis der Futtermittelanalyse oder Batchversuchen zählen mittlerweile auch Brennwert- oder Elementaranalysen sowie kontinuierlichen Laborversuche zum Analysenspektrum an Biogasanlagen. Für eine aussagekräftige und belastbare Substrat- und Prozessbewertung sind bei der Laborauswahl folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Die Durchführung der Laboranalysen oder -versuche sollte unter Einhaltung bzw. in klarem Bezug zu aktuellen **Richtlinien und Methodenvorschriften** (wie z. B. VDI 4630) erfolgen.
- Das beauftragte Labor sollte seine Eignung durch die regelmäßige, erfolgreiche Teilnahme an **Ringversuchen** und/oder eine entsprechende **Akkreditierung** (bzw. vergleichbare Qualitätsprüfungen) für das konkrete Analysenspektrum nachweisen.
- Für eine belastbare bzw. **statistische Auswertung** sind für jede Probe ausreichende Wiederholungen (in der Regel mindestens drei Replikate) der jeweiligen Analyse durchzuführen.
- Die eingesetzte Probenmenge sollte die **Heterogenität der Substrate** repräsentieren und in entsprechend großen Einsatzmengen, Versuchsmaßstäben oder zusätzlichen Wiederholungen untersucht werden.

- Jede Form der zusätzlichen **Probenaufbereitung** (abseits des methodenspezifischen Probenaufschlusses) sollte im Prüfbericht dokumentiert werden. Unter Umständen ist ein Nachweis über den Einfluss zusätzlicher Aufbereitungsverfahren (wie z. B. durch Zerkleinern oder Mahlen) zu erbringen.
- Die Analysen- oder Versuchsdurchführung sollte zeitnah im direkten Anschluss an die Probenahme erfolgen. Ist dies nicht möglich, sind die konkreten **Lagerungsbedingungen** anzugeben.
- Zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle sollten **interne Standards** (wie z. B. Cellulose oder getrocknetes Kraftfutter bei Batchtests) mitgeführt werden, um mögliche Abweichungen von diesem Standard innerhalb einer Versuchsserie oder Analysenreihe schnell und sicher zu identifizieren. Bei erhöhten Abweichungen sind die jeweiligen Messergebnisse zu verwerfen und die entsprechenden Versuche zu wiederholen.
- Für eine detaillierte, zeitlich hochaufgelöste und präzise Messwerterfassung ist auf erprobte Versuchstechnik mit einem hohen Maß an **Automatisierung** zurückzugreifen. Bei manuellen Arbeitsschritten (wie z. B. Ablesen einer Skala) ist besondere **Sorgfalt und standardisiertes Vorgehen** erforderlich.
- Der **Prüfbericht** sollte folgende Merkmale beinhalten:
 - Angabe der referenzierten Methodenvorschrift und eingehaltenen Standards
 - Kennzeichnung der Probenlagerung und/oder der zusätzlichen Probenaufbereitung
 - Dokumentation der Einzelmessungen (Replikate) und der statistischen Ergebnisauswertung
 - Mögliche Unregelmäßigkeiten bei der Analyse bzw. Versuchsdurchführung

Zusätzlich bei Batchversuchen:

- Angabe der Bezugsgrößen und Normbedingungen (Methanertrag üblicherweise in L kg⁻¹ oTS)
- Ursprung, Aufbereitung und Eigenschaften des verwendeten Inokulums
- TS- und oTS-Gehalte der eingesetzten Substrate und Inokula (einschließlich Hinweise zur Berücksichtigung der Korrektur flüchtiger Substratbestandteile)
- Angabe der Versuchsdauer (mit Bezug auf das Abbruchkriterium)
- Dokumentation des allgemeinen Versuchsaufbaus (Messverfahren und Versuchstechnik)
- Angabe der Prozesstemperatur
- Auf Anfrage sollten weitere Parameter wie die Einsatzmengen (Substrat-Inokulum-Verhältnis), die Ergebnisse der Einzelproben (Substrat, Inokulum, Referenz) oder der zeitliche Verlauf der Gasproduktion dokumentiert werden

Die Durchführung oder Dokumentation zusätzlicher Analyseschritte oder Kenngrößen ist vor der Beauftragung mit dem jeweiligen Labor zu konkretisieren. Zudem ist es sinnvoll, das ausgewählte Labor bereits bei der Planung der Probenahme miteinzubeziehen, um einen geeigneten Probentransport und eine zeitnahe Analyse (ohne lange Probeneinlagerung) zu ermöglichen.

Um mögliche Übertragungsfehler und den Einfluss laborspezifischer Messunsicherheiten zu verringern, sollten vergleichende **Versuchsserien** unterschiedlicher Substrate oder Substrataufbereitungsverfahren im gleichen Labor durchgeführt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass die verwendeten **Medien** über die jeweilige Untersuchungsdauer **konstante Eigenschaften und Prozessparameter** aufweisen.

2.3 Analytische Kenngrößen

Für eine aussagekräftige Substratcharakterisierung sind die eingesetzten Substrate hinsichtlich ihrer Eignung zur Methanproduktion in einer Biogasanlage zu bewerten. Grundsätzlich gilt es, die **analytischen Laboranalysen** in einen direkten Zusammenhang mit dem unter **anaeroben Bedingungen verfügbaren Energiepotential** der Substratmischung zu bringen. In der praxisnahen Wissenschaft bzw. Anwendung haben sich dabei drei Kenngrößen etabliert:

Fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS)

Zur Substratcharakterisierung wird üblicherweise der Gehalt an organischer Trockensubstanz bestimmt. Dabei bestehen die unterschiedlichen Substrate nicht nur aus fermentierbaren organischen Bestandteilen, sondern enthalten neben Asche und Wasser auch nicht abbaubare organische Komponenten, wie beispielsweise Lignin (Abbildung 3). Als Grundlage für eine realitätsnahe Berechnung des Methanpotentials ist der Gehalt an fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS) zu bestimmen.

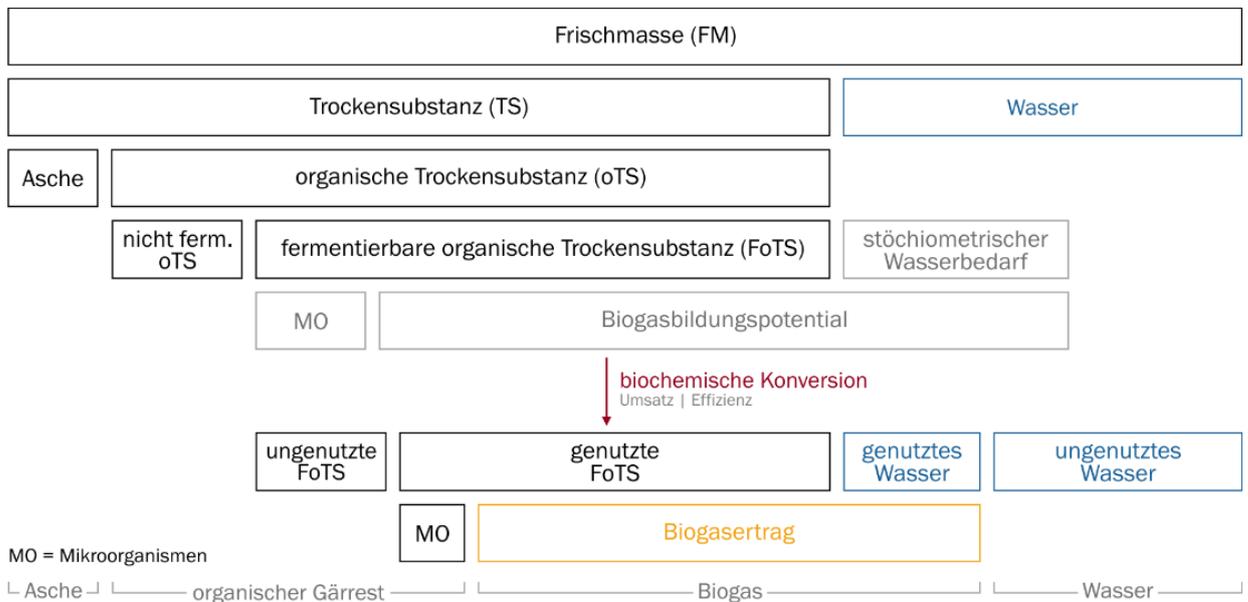


Abbildung 3: Umsatz der charakteristischen Substratbestandteile im Biogasprozess

Methanpotential

Für einen direkten Abgleich zur gemessenen (oder berechneten) Methanproduktion im großtechnischen Anlagenbetrieb wird üblicherweise das Methanpotential zur energetischen Bewertung von Substraten ausgewiesen. Zur direkten Vergleichbarkeit unterschiedlicher Substrattypen oder -qualitäten wird das Methanpotential dabei grundsätzlich bei Normbedingungen für 0 °C und 101,325 kPa für trockenes Gas (Wasserdampfkorrektur) bestimmt. Neben der experimentellen Bestimmung anhand von geeigneten Laborversuchen sind weitere Verfahren auf Basis der Futtermittelanalyse, dem chemischen Sauerstoffbedarf oder der Elementaranalyse bekannt, um das Methanpotential der eingesetzten Substrate zu ermitteln.

Brennwert

Im Rahmen der energetischen Anlagenbewertung lässt sich der Brennwert als Kenngröße zur Substrat- und Effizienzbewertung verwenden. Dabei ist eine Anwendung hier nur sinnvoll, wenn der gemessene Brennwert der Probe auf die fermentierbaren Substratbestandteile korrigiert wird, um eine realitätsnahe Abschätzung der verfügbaren Energiemenge im anaeroben Biogasprozess zu erhalten.

Umrechnung charakteristischer Kenngrößen zur Substratbewertung

Anhand des **stöchiometrischen Methanpotentials** und dem charakteristischen **Brennwert von Methan**, lassen sich die drei unterschiedlichen Kenngrößen zur Substratbewertung direkt ineinander umrechnen und somit für eine einheitliche und vergleichende Auswertung auf Basis der **FoTS**, des spezifischen **Methanpotentials** oder **Brennwerts** verwenden.

		Zielgröße		
		FoTS [% oTS]	Methanpotential [L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]	Brennwert [kJ kg ⁻¹ oTS]
Eingangsgröße	FoTS [% oTS]		$\frac{FoTS \cdot Y_{FoTS}}{100}$	$\frac{FoTS \cdot Y_{FoTS} \cdot H_{S,CH_4}}{100}$
	Methanpotential [L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]	$\frac{V_{CH_4 max} \cdot 100}{Y_{FoTS}}$		$V_{CH_4 max} \cdot H_{S,CH_4}$
	Brennwert [kJ kg ⁻¹ oTS]	$\frac{H_S \cdot 100}{H_{S,CH_4} \cdot Y_{FoTS}}$	$\frac{H_S}{H_{S,CH_4}}$	
FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz		[% oTS]	
H _S	Brennwert		[kJ kg ⁻¹ oTS]	
H _{S,CH₄}	Brennwert von Methan 39,80 kJ L ⁻¹ CH ₄		[kJ L ⁻¹ CH ₄]	
V _{CH₄ max}	Methanpotential		[L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]	
Y _{FoTS}	Stöchiometrisches Methanpotential 420 L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS		[L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS]	

Stöchiometrisches Methanpotential mit 420 L CH₄ kg⁻¹ FoTS für Halm- und Körnerfrüchte nach Weißbach (Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. In: Pflanzenbauwissenschaften, Vol. 13, Nr. 2, S. 72–85, 2009)

Brennwert von Methan mit 39,80 kJ L⁻¹ CH₄ nach Hahne (Technische Thermodynamik: Einführung und Anwendung. Oldenbourg Verlag, 2010)

2.3.1 Fermentierbare organische Trockensubstanz

Die fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS) definiert die unter **anaeroben Bedingungen tatsächlich abbaubare Trockensubstanz** (Abbildung 3). Da für die stoffliche Umwandlung (Biogas- oder Methanbildung) der eingesetzten Substrate ebenfalls nur die tatsächlich fermentierbaren Inhaltsstoffe Verwendung finden, ist die **Abschätzung der nicht-abbaubaren Substratbestandteile** eine Voraussetzung für eine belastbare Substratcharakterisierung oder Effizienzbewertung. Anhand des **stöchiometrischen Methanpotentials** in L Methan je kg FoTS lässt sich dann auf das resultierende Methanpotential

der Substrate schließen. Dabei fehlen bis heute standardisierte Methoden, um den (nicht-) fermentierbaren Anteil beliebiger Substrate direkt im Praxisbetrieb analytisch zu bestimmen.

Für ausgewählte Substrattypen kann die FoTS in erster Näherung anhand der Methode von Weißbach berechnet werden. Zusätzlich lässt sich die maximale FoTS über den Ligningehalt der eingesetzten Substrate bestimmen.

Berechnung der FoTS nach Weißbach

Auf der Basis umfangreicher **Versuchsserien zur energetischen Futterbewertung für die Tierernährung** wurde eine Methode zur Berechnung der FoTS in nachwachsenden Rohstoffen entwickelt. Der Anteil an oTS, der unter anaeroben Bedingungen mikrobiell nutzbar ist, wird dabei anhand der Ergebnisse einer chemischen Laboranalyse geschätzt. Dazu dienen **substratspezifische Schätzggleichungen**, die im einfachsten Falle bei den pflanzlichen Biomassen über den Laborparameter **Rohfasergehalt (XF)** als unabhängige Variable bestimmt werden können.

Berechnungsmethode

Getreide und Getreidekornsilagen	
Weizen, Roggen	$FoTS = 99,0 - 0,189 \cdot XF$
Gerste, Hafer	$FoTS = 99,1 - 0,138 \cdot XF$
Getreide insgesamt	$FoTS = 99,1 - 0,153 \cdot XF$
Maisganzpflanzen, Lieschkolben und Maiskorn sowie daraus hergestellte Silagen	
Maissilage insgesamt	$FoTS = 98,4 - 0,047 \cdot XF - 0,000104 \cdot XF^2$
Getreideganzpflanzensilagen (Getreide-GPS)	
Weizen, Triticale	$FoTS = 98,2 - 0,053 \cdot XF - 0,000102 \cdot XF^2$
Roggen	$FoTS = 98,3 - 0,082 \cdot XF - 0,000022 \cdot XF^2$
Gerste	$FoTS = 98,1 - 0,081 \cdot XF - 0,000006 \cdot XF^2$
Andere Grünfütterarten sowie daraus hergestellte Silagen	
Grünroggen	$FoTS = 97,5 - 0,023 \cdot XF + 0,000230 \cdot XF^2$
Grünhafer	$FoTS = 97,6 - 0,030 \cdot XF + 0,000297 \cdot XF^2$
Luzerne	$FoTS = 97,1 - 0,041 \cdot XF - 0,000101 \cdot XF^2$
Gras, intensive Nutzungen	$FoTS = 96,9 - 0,026 \cdot XF + 0,000300 \cdot XF^2$
Zuckerrüben und Zuckerrübensilagen	
Zuckerrüben insgesamt	$FoTS = 99,1 - 0,07 \cdot XF$
Tierische Exkrememente	
Rinder- und Schweinegülle	$FoTS = 50$
Hühnertrockenkot	$FoTS = 76$

FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz	[% oTS]
XF	Rohfaser	[g kg ⁻¹ TS]

Um konsistente Einheiten im gesamten Leitfaden zur gewährleisten, wurde die ursprüngliche Bezugsbasis der FoTS von g je kg TS zu % oTS geändert. Die resultierenden Gleichungen weichen in ihrer Darstellung somit von der ursprünglichen Form von Weißbach ab. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind jedoch identisch.

Vor- und Nachteile

- ✓ Aussagekräftige und belastbare Bewertung der fermentierbaren Substratbestandteile
- ✓ Logische Erweiterung zur Substratcharakterisierung und Massenbilanzierung auf Basis der organischen Trockensubstanz (oTS)
- ✗ Schätzgleichungen nur für eine begrenzte Auswahl an typischen Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern verfügbar

Literaturhinweise

Weißbach, F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. In: *Landtechnik*, Vol. 6, Nr. 6, S. 356-358a

Weißbach, F. (2009): Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung. In: *Landtechnik*, Vol. 64, Nr. 6, S. 394-397

Weißbach, F. (2011): Das Gasbildungspotenzial von Schweinegülle bei der Biogasgewinnung. In: *Landtechnik* Vol. 66, Nr. 6, S. 460-464

Weißbach, F. (2012): Das Gasbildungspotential von Hühnertrockenkot bei der Biogasgewinnung. In: *Landtechnik*, Vol. 67, Nr. 4, S. 299-304

Berechnung der FoTS anhand des Ligningehalts

Für eine alternative Abschätzung lässt sich die FoTS anhand des Ligningehalts bestimmen. Dabei ist die FoTS hier direkt über die **oTS abzüglich des Ligningehalts** definiert. Unter der Annahme, dass das untersuchte Substrat außer Lignin nur fermentierbare organische Substratbestandteile beinhaltet, lässt sich so ein **höchst möglicher (maximaler) FoTS-Gehalt** bestimmen.

Berechnungsmethode

$$\text{FoTS} = 100 - 0,1 \cdot \text{ADL}$$

FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz	[% oTS]
ADL	Lignin (<i>acid detergent lignin</i>)	[g kg ⁻¹ TS]

Vor- und Nachteile

- ✓ Einfache Berechnungsvorschrift
- ✓ Auf alle Substrattypen (einschließlich Abfälle und Reststoffe) anwendbar
- ✗ Berechnung ist stark von der Genauigkeit und Aussagekraft der Ligninbestimmung abhängig
- ✗ Es wird lediglich die maximale FoTS bestimmt; nicht-fermentierbare Faserstoffe, Proteine und Fette bleiben unberücksichtigt

2.3.2 Futtermittelanalyse

Die Futtermittelanalyse charakterisiert die vielfältigen Substrate anhand der unterschiedlichen Zusammensetzung von **Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten**. Dabei lässt sich anhand der Nährstoffverteilung auch auf das Methanpotential der eingesetzten Substrate schließen. Grundsätzlich stehen dabei zwei Varianten auf Basis der nährstoffspezifischen Methanpotentiale der fermentierbaren Nährstoffe sowie der Verwendung von substratspezifischen Regressionsmodellen zur Verfügung.

Methanpotential der fermentierbaren Nährstoffe

Zur Bestimmung des Methanpotentials werden im ersten Schritt die **fermentierbaren Bestandteile der einzelnen Rohnährstoffe** bestimmt. Üblicherweise wird die Fermentierbarkeit mit der am Tier gemessenen scheinbaren Verdaulichkeit der Rohnährstoffe gleichgesetzt. Für die Abschätzung der substratspezifischen Verdauungsquotienten existieren von der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG) oder dem Deutschen Landwirtschaftsverlag (DLV) umfangreiche Tabellenwerke. Dabei ist eine direkte **Übertragung der Verdauungskoeffizienten zur Bewertung der anaeroben Fermentierbarkeit** im Biogasprozess kritisch zu hinterfragen, da diese üblicherweise zu geringe Fermentierbarkeiten ausweisen und somit das verfügbare **Methanpotential der eingesetzten Substrate unterschätzen**. Zudem sind keine nährstoffspezifischen Angaben zur Fermentierbarkeit (oder dem stöchiometrischen Methanpotential) von unbekanntem Rest- und Abfallstoffen bekannt.

Im zweiten Schritt lassen sich nun die fermentierbaren Nährstoffe mit dem **stöchiometrischen Methanpotential von Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten** multiplizieren, um auf das vollständige Potential der untersuchten Substrate zu schließen. Für die nährstoffspezifischen Methanpotentiale sind auf Basis von stöchiometrischen Untersuchungen Werte nach Weißbach oder der VDI Richtlinie 4630 (2016) bekannt.

Nährstoffspezifisches Gaspotential		Weißbach ^{a)}		VDI 4630 ^{b)}		
		Biogas	Methan	Biogas	Methan	
Y_{FXC}	Kohlenhydrate	792	402	690	345	[L kg ⁻¹ FXC]
Y_{FXP}	Proteine	785	401	730	365	[L kg ⁻¹ FXP]
Y_{FXL}	Fette	1350	958	1279	921	[L kg ⁻¹ FXL]

a) einschließlich 5% Substratbedarf für mikrobielle Wachstumsprozesse (Weißbach, F.: Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. In: Pflanzenbauwissenschaften, Vol. 13, Nr. 2, S. 72-85, 2009)

b) einschließlich 8% Substratbedarf für mikrobielle Wachstumsprozesse (VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe: Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuch. Beuth Verlag, Düsseldorf, 2016)

Berechnungsmethode

$$\text{FXC} = \frac{\text{XF} \cdot \text{FQ}_{\text{XF}} + (1000 - \text{XA} - \text{XF} - \text{XP} - \text{XL}) \cdot \text{FQ}_{\text{NfE}}}{100}$$

$$\text{FXP} = \frac{\text{XP} \cdot \text{FQ}_{\text{XP}}}{100}$$

$$FXL = \frac{XP \cdot FQ_{XL}}{100}$$

$$V_{CH_4|max} = \frac{Y_{FXC} \cdot FXC + Y_{FXP} \cdot FXP + Y_{FXL} \cdot FXL}{1000 - XA}$$

FQ _{XF}	Fermentierbarkeit XF	[% XF]
FQ _{NfE}	Fermentierbarkeit NfE	[% NfE]
FQ _{XL}	Fermentierbarkeit XL	[% XL]
FQ _{XP}	Fermentierbarkeit XP	[% XP]
FXC	Fermentierbare Rohkohlenhydrate	[g kg ⁻¹ TS]
FXL	Fermentierbare Rohfette	[g kg ⁻¹ TS]
FXP	Fermentierbare Rohproteine	[g kg ⁻¹ TS]
XA	Rohasche	[g kg ⁻¹ TS]
XF	Rohfaser	[g kg ⁻¹ TS]
XL	Rohfette	[g kg ⁻¹ TS]
XP	Rohproteine	[g kg ⁻¹ TS]
V _{CH₄ max}	Methanpotential	[L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]
Y _{FXC}	Stöchiometrische Methanpotential FXC 402 L CH ₄ kg ⁻¹ FXC	[L CH ₄ kg ⁻¹ FXC]
Y _{FXP}	Stöchiometrisches Methanpotential FXP 401 L CH ₄ kg ⁻¹ FXP	[L CH ₄ kg ⁻¹ FXP]
Y _{FXL}	Stöchiometrisches Methanpotential FXL 958 L CH ₄ kg ⁻¹ FXL	[L CH ₄ kg ⁻¹ FXL]

Die Angaben für das stöchiometrische Methanpotential beruhen auf den umfangreichen Untersuchungen zum Gasbildungspotential der fermentierbaren Nährstoffe von Halm- und Körnerfrüchten nach Weißbach (2009). Zusätzlich stehen dabei Richtwerte nach VDI 4630 zur Verfügung (siehe Literaturhinweise).

Vor- und Nachteile

- ✓ Aussagekräftige Berechnung anhand der detaillierten Nährstoffzusammensetzung
- ✓ Bestimmung von Methan und Kohlenstoffdioxid (Biogaszusammensetzung) möglich
- ✓ Belastbare Methoden zur Bewertung von typischen Futtermitteln (Halm- und Körnerfrüchten) bekannt
- ✗ Die Verwendung der DLG/DLV Verdauungskoeffizienten zur Bewertung der Fermentierbarkeit der Nährstoffe ist kritisch zu hinterfragen (bzw. generell als zu niedrig anzunehmen)
- ✗ Keine Angaben zur Fermentierbarkeit oder dem stöchiometrischen Methanpotential unbekannter Rest- und Abfallstoffe (abseits von Futtermitteln) verfügbar

Literaturhinweise

VDI 4630 (2016): Richtlinie zur Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche 4630. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin

Keymer, U.; Schilcher, A. (1999): Überlegungen zu theoretischen Gasausbeuten vergärbare Substrate in Biogasanlagen. Landtechnik-Bericht Nr. 32

Weißbach, F. (2009): Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. In: *Pflanzenbauwissenschaften*, Vol. 13, Nr. 2, S. 72-85

DLG (1997): Futterwerttabellen Wiederkäuer. 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt

DLV (1972): Futtermitteltabellenwerk. Nehring, K.; Beyer, M.; Hoffmann, B. (Hrsg). 2. Auflage. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin

Substratspezifische Regressionsmodelle

Für die Berechnung des Biogas- oder Methanbildungspotentials lassen sich geeignete (multivariate und lineare) Regressionsmodelle ausgewählter Substrattypen nutzen. Hierbei wird ein **funktionaler Zusammenhang** zwischen den charakteristischen **Nährstofffraktionen aus der Futtermittelanalyse** und dem gemessenen **Biogas- oder Methanbildungspotential aus labortechnischen Batchversuchen** unterstellt. Die verfügbaren Modellansätze unterscheiden sich entsprechend in den berechneten Biogaskomponenten, den benötigten Kenngrößen der Futtermittelanalyse und den zur Modellerstellung und -validierung verwendeten Substrate. Dabei besitzen insbesondere die Strukturkohlenhydrate (Cellulose, Hemicellulose oder Lignin) der erweiterten Futtermittelanalyse nach van Soest häufig einen signifikanten Einfluss auf das Berechnungsergebnis.

Übersicht Regressionsmodelle

Quelle	Gasphase	Kenngrößen	Substrate
Amon et al. 2006	CH ₄	XP, XL, XF, NfE	Energiepflanzen (Mais und Getreide) und Gras
Amon et al. 2007	CH ₄	XP, XL, CL, HC	Mais
Dandikas et al. 2014	Biogas CH ₄	HC, ADL	Energiepflanzen (Getreide, Mais, Kartoffeln, Zuckerrübe, Sonnenblumen und Triticale)
Dandikas et al. 2015	Biogas CH ₄	CP, HC, ADL	Gras und Leguminosen
Gunaseelan 2006	CH ₄	XC, ADL, ADF, N, XA	Obst, Gemüse, Bioabfall, Sorghum und Napiergras
Kaiser 2007	Biogas CH ₄	XP, XL, XF, NfE zusätzlich auch HC, CL ADL	Energiepflanzen (Mais, Zuckerrübe und Erbsen), Stroh, Hanf, Gras und Miscanthus
Rath et al. 2013	Biogas	XL, HC, SU, ADL	Mais
Stoffel und Köhler 2012	CH ₄	ADL, XS	Mais
Thomsen et al. 2014	CH ₄	CL, HC, ADL	Lignocellulosehaltige Biomasse
Triolo et al. 2011	CH ₄	CL, ADL, ADF, NDF	Energiepflanzen und Gülle
Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Machmüller, A.; Hopfner-Sixt, K.; Bodiroza, V.; Schreiner, M. (2006): Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. In: <i>Bioresource technology</i> , Vol. 98, Nr. 17, S. 3204-3212.			
Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Zollitsch, W.; Mayer, K.; Gruber, L. (2007): Biogas production from maize and dairy cattle manure – influence of biomass composition on the methane yield. In: <i>Agriculture, Ecosystems and Environment</i> , Vol. 118, S. 173-182			
Dandikas, V.; Heuwinkel, H.; Lichti, F.; Drewes, J. E.; Koch, K. (2014). Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. In: <i>Bioresource technology</i> , Vol. 174, S. 316-320.			
Dandikas, V.; Heuwinkel, H.; Lichti, F.; Drewes, J. E.; Koch, K. (2015). Correlation between biogas yield and chemical composition of grassland plant species. In: <i>Energy and Fuels</i> , Vol. 29, Nr. 11, S. 7221-7229			

Gunaseelan, V. N. (2007). Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. In: *Bioresource technology*, Vol. 98, Nr. 6, S. 1270-1277

Kaiser, F. L. (2007). *Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren*. Dissertation, Technische Universität München.

Rath, J.; Heuwinkel, H.; Herrmann, A. (2013). Specific biogas yield of maize can be predicted by the interaction of four biochemical constituents. In: *BioEnergy Research*, Vol. 6, Nr. 3, S. 939-952.

Stoffel, D. und Köller, K. (2012): Qualität von Biogasmais - Berechnung des Methanertrages von Silomais. In: *Landtechnik*, Vol. 67, Nr. 5, S. 354-357

Thomsen, S. T.; Spliid, H.; Østergård, H. (2014). Statistical prediction of biomethane potentials based on the composition of lignocellulosic biomass. In: *Bioresource technology*, Vol. 154, S. 80-86.

Triolo, J.M.; Sommer, S.G.; Möller, H.B.; Weisbjerg, M.R.; Jiang, X.Y. (2011): A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: influence of lignin concentration on methane production potential. In: *Bioresource technology*, Vol. 102, Nr. 20, S. 9395-9402.

XA = Rohasche, XP = Rohprotein, XL = Rohfett, XF = Rohfaser, XC = Rohkohlenhydrate, NfE = Stickstofffreie-Extraktstoffe, CL = Cellulose, HC = Hemicellulose, XS = Rohstärke, ADF = Säure-Detergenz-Faser (acid detergent fiber), ADL = Säure-Detergenz-Lignin (acid detergent lignin), NDF = Neutral-Detergenz-Faser (neutral detergent fiber), SU = Zucker und N = Stickstoff

Vor- und Nachteile

- ✓ Einfache Berechnungsvorschrift unter Verwendung der Futtermittelanalytik
- ✓ Vielzahl an Regressionsmodellen für zahlreiche Substrattypen bekannt
- ✗ Laborspezifische Messunsicherheiten bei der Durchführung von Batchversuchen oder der Substratanalytik spiegeln sich auch in den Ergebnissen der Regressionsmodelle wider
- ✗ Rein statistische (keine biochemisch interpretierbare) Berechnungsgrundlage

2.3.3 Elementaranalyse

Auf Basis vereinfachter Reaktionsgleichungen lässt sich das **stöchiometrische Gaspotential** (Methan und Kohlenstoffdioxid) durch die elementare Zusammensetzung an **Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel** im Substrat bestimmen. Entsprechend müssen die **Summenformeln** (Anzahl der Atome einer chemischen Verbindung) der betrachteten Substrate bzw. Substratbestandteile bekannt sein. Da keine Unterscheidung zwischen organischem oder fermentierbarem Kohlenstoff erfolgt, ist eine zusätzliche Korrektur des berechneten Gaspotentials durch einen **Fermentationsquotienten** erforderlich. Zusätzlich ist der **Substratbedarf für mikrobielle Wachstumsprozesse** zu berücksichtigen.

Grundsätzlich ist die Bestimmung des Methanpotentials anhand einer Elementaranalyse für **leicht abbaubare Idealsubstrate** wie Cellulose oder Stärke geeignet. Zudem ermöglichen stöchiometrische Bilanzen **Aussagen zur Biogaszusammensetzung** sowie eine Berechnung des molekularen Wasserbedarfs, welche im Rahmen einer vollständigen Massenbilanzierung zur stöchiometrischen Berechnung des Methanertrags benötigt wird.

Berechnungsmethode

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{C}}}{2} + \frac{n_{\text{H}}}{8} - \frac{n_{\text{O}}}{4} - \frac{3 \cdot n_{\text{N}}}{8} - \frac{n_{\text{S}}}{4}$$

$$M_{\text{S}} = n_{\text{C}} \cdot 12 + n_{\text{H}} + n_{\text{O}} \cdot 16 + n_{\text{N}} \cdot 14 + n_{\text{S}} \cdot 32$$

$$V_{\text{CH}_4|\text{max}} = \frac{n_{\text{CH}_4} \cdot V_{\text{norm}} \cdot \text{FQ} \cdot (100 - f_{\text{X}})}{M_{\text{S}} \cdot 10}$$

FQ	Fermentierbarkeit	[% C]
f_{X}	Biomassewachstum 5 % C	[% C]
M_{S}	Molare Masse des Substrats	[g mol ⁻¹]
n_{CH_4}	Mol an CH ₄	[mol CH ₄]
n_{C}	Anzahl an Kohlenstoffatomen	[-]
n_{H}	Anzahl an Wasserstoffatomen	[-]
n_{N}	Anzahl an Stickstoffatomen	[-]
n_{O}	Anzahl an Sauerstoffatomen	[-]
n_{S}	Anzahl an Schwefelatomen	[-]
$V_{\text{CH}_4 \text{max}}$	Methanpotential	[L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]
V_{norm}	Normvolumen (bei 101,325 kPa und 0 °C) 22,414 L mol ⁻¹	[L mol ⁻¹]

Vor- und Nachteile

- ✓ belastbare Ergebnisse für synthetische Idealsubstrate wie beispielsweise Cellulose oder Stärke
- ✓ Bestimmung von Methan und Kohlenstoffdioxid (Biogaszusammensetzung) möglich
- ✓ Grundlage für eine detaillierte Massen- oder Elementenbilanz
- ✗ keine Richtwerte zur Fermentierbarkeit der elementaren Substratbestandteile bekannt

Literaturhinweise

Buswell, A.M. und Mueller, H.F. (1952): Mechanism of Methane Fermentation. In: *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 44, Nr. 3, S. 550-552

Boyle, W.C. (1976): Energy recovery from sanitary landfill - A review. A seminar held in Göttingen. In: Schlegel, H.G. und Barnea, S. (Hrsg.): *Microbial Energy Conversion*. Pergamon Press, Oxford, S. 119-138

McCarty, P.L. (1972): Energetics of organic matter degradation. In: *Water Pollution Microbiology*, Mitchell, R. (Ed.), Wiley-Interscience, New York, S. 91ff.

2.3.4 Brennwert

Der Brennwert definiert die **chemische gebundene Energie eines Brennstoffes**, welche bei der Verbrennung und abschließenden Abkühlung (einschließlich Kondensation bei 25 °C) freigesetzt wird. Um eine aussagekräftige Substratbewertung an Biogasanlagen zu ermöglichen, ist der Brennwert auf den anaerob nutzbaren Energieanteil zu beschränken.

Auf Basis des Fermentationsquotienten wird der gemessene Brennwert dabei anhand des **Energiepotentials der nicht abbaubaren Organik** korrigiert. So lässt sich beispielsweise die abbaubare oTS über den Ligningehalt bestimmen (siehe Kapitel 2.3.1) und folgerichtig durch den **Brennwert von Lignin** (ca. 25,6 MJ kg⁻¹) vom vollständigen Brennwert der Probe subtrahieren. Zusätzlich ist die **Energienmenge für mikrobielles Wachstum** zu berücksichtigen.

Grundsätzlich lässt sich der resultierende Brennwert der eingesetzten Substrate somit direkt zur **energetischen Substrat- oder Effizienzbewertung** verwenden oder aber anhand des Brennwertes von Methan in ein entsprechendes Methanpotential umrechnen (siehe Kapitel 2.3). Dabei sind bis heute keine präzisen Daten zur Fermentierbarkeit oder dem Brennwert der nicht fermentierbaren Substratbestandteile vielfältiger Substrate und Reststoffe bekannt, sodass mit erheblichen Unsicherheiten bei der Bestimmung und Verwendung dieser Kenngröße zu rechnen ist.

Berechnungsmethode

$$H_S = \left(H_{S,oTS} - \frac{(100 - FQ)}{100} \cdot H_{S,nFoTS} \right) \cdot \frac{100 - f_x}{100}$$

FQ	Fermentierbarkeit	[% oTS]
f _x	Biomassewachstum 5 % FoTS	[% FoTS]
H _S	Brennwert fermentierbarer Substratbestandteile	[kJ kg ⁻¹ oTS]
H _{S,nFoTS}	Brennwert nicht fermentierbarer Substratbestandteile 25.600 kJ kg ⁻¹ nFoTS	[kJ kg ⁻¹ nFoTS]
H _{S,oTS}	Brennwert Substrat (Messwert)	[kJ kg ⁻¹ oTS]

Brennwert nicht fermentierbare Substratbestandteile (in diesem Fall Lignin mit 26.000 KJ je kg nFoTS) nach Fischer et al. (Energetische Bewertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mithilfe des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades. In: Landtechnik, Vol. 71, Nr. 4, S. 139–154, 2016)

Vor- und Nachteile

- ✓ Etablierte Kenngröße aus der Verbrennungstechnik organischer Substrate
- ✗ Keine Aussage zur Biogaszusammensetzung möglich
- ✓ Standardisierte und etablierte Bestimmungsmethode
- ✗ Keine präzisen Daten zur Fermentierbarkeit oder dem Brennwert nicht fermentierbarer Substratbestandteile bekannt

Literaturhinweise

DIN EN 14918:2010-04 (2010): Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes. Deutsches Institut für Normung, Berlin

Fischer, E.; Postel, J.; Ehrendreich, F.; und Nelles, M. (2016). Energetische Bewertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mithilfe des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades. In: Landtechnik, Vol. 71, Nr. 4, S. 139–154

2.3.5 Chemischer Sauerstoffbedarf

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) kennzeichnet die **Menge an Sauerstoff, welche zur vollständigen Oxidation organischer Verbindungen** benötigt wird. Anhand stöchiometrischer Berechnungen lässt sich ein spezifisches Potential von **350 mL Methan je g CSB** herleiten.

In der Praxis wird der CSB üblicherweise durch die nasschemische Oxidation mit Kaliumdichromat oder Kaliumpermanganat bestimmt und erlaubt **keine Aussage zur biologischen Verfügbarkeit bzw. anaeroben Abbaubarkeit** der Substrate. Für eine realitätsnahe Bestimmung des Methanpotentials ist der gemessene CSB somit hinsichtlich der tatsächlich fermentierbaren Substratbestandteile zu korrigieren. Konkrete Richtwerte zur Bestimmung des fermentierbaren CSB sind nicht bekannt, sodass sich hier an den unterschiedlichen Berechnungsmethoden der FoTS zu orientieren ist. Zusätzlich ist der Substratbedarf für mikrobielle Wachstumsprozesse bei der Berechnung zu berücksichtigen. Eine Bestimmung des gesamten Biogaspotentials oder des Methangehalts ist anhand des CSB nicht möglich.

Grundsätzlich wird der CSB üblicherweise zur Bewertung **stark verdünnter Proben** im Bereich der **Abwasseranalytik** verwendet. Unter Umständen kann es dabei auch in der Biogastechnologie sinnvoll sein, beim Einsatz stark verdünnter Substrate mit einem hohen Anteil an flüchtigen Stoffen (z. B. Perkolat) auf den CSB zurückzugreifen.

Berechnungsmethode

$$V_{\text{CH}_4|\text{max}} = \frac{\text{CSB} \cdot Y_{\text{CSB}} \cdot \text{FQ} \cdot (100 - f_x)}{\rho \cdot \text{TS} \cdot \text{oTS} \cdot 1000}$$

CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf Substrat	[mg O ₂ L ⁻¹]
FQ	Fermentierbarkeit	[% CSB]
f _x	Biomassewachstum 5 % CSB	[% CSB]
oTS	organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]
TS	Trockensubstanz Substrat	[% FM]
V _{CH₄ max}	Methanpotential	[L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]
Y _{CSB}	Stöchiometrisches Methanpotential CSB 350 mL CH ₄ g ⁻¹ O ₂	[mL CH ₄ g ⁻¹ O ₂]
ρ	Dichte Substrat 1000 kg m ⁻³	[kg m ⁻³]

Stöchiometrisches Methanpotential mit 350 mL CH₄ je g O₂ gemäß VDI 4630 (Vergärung organischer Stoffe: Substratcharakterisierung, Probe-nahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuch. Beuth Verlag, Düsseldorf, 2016)

Vor- und Nachteile

- ✓ Etablierte Kenngröße der Abwasserwirtschaft (bei Substraten mit geringen TS-Gehalten)
- ✓ Einfache Bestimmung anhand von Küvetten-tests oder Photometer möglich
- ✗ Nur für flüssige Substrate sinnvoll einzusetzen
- ✗ Erhöhte Messunsicherheiten bei zusätzlicher Verdünnung, Dispergierung oder Partikeln
- ✗ Keine Aussage zur Biogaszusammensetzung
- ✗ Keine Daten zur Fermentierbarkeit bekannt
- ✗ Einsatz von toxischen Chemikalien erforderlich

Literaturhinweise

VDI 4630 (2016): Richtlinie zur Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche 4630. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin

DIN 38414-9 (1986): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente; Bestimmung des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB). Beuth Verlag GmbH, Berlin

2.3.6 Gesamter organischer Kohlenstoff

In Anlehnung an den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) lässt sich auch der gesamte organische Kohlenstoff (*total organic carbon*, TOC) als etablierte Kenngröße der Abwasseranalytik zur Substratcharakterisierung an Biogasanlagen verwenden. Es wird davon ausgegangen, dass **ein Mol an umgesetzten Kohlenstoff einem Mol an Biogas** entspricht. Unter Berücksichtigung der molaren Masse von Kohlenstoff und des Normvolumens lässt sich somit ein stöchiometrisches Potential von **1,8662 L Biogas je g TOC** definieren.

Der TOC wird dabei üblicherweise durch eine thermisch-katalytische Verbrennung oder eine Nassoxidation mithilfe ultravioletter (UV) Strahlung bestimmt. Durch die Verbrennungsanalytik ist jedoch **keine Differenzierung zwischen fermentierbarem und nicht-fermentierbarem TOC** möglich. Zudem erlaubt der TOC nur die **Bestimmung des Biogaspotentials** und ermöglicht damit keine Aussage zum Methanpotential oder -gehalt. Weiterhin ist der zusätzliche Bedarf an fermentierbarem TOC als Kohlenstoffquelle für mikrobielle Wachstumsprozesse zu berücksichtigen. Im Vergleich zum CSB ist der TOC dabei insbesondere **für Feststoffe geeignet** und kennzeichnet sich durch eine **erhöhte Genauigkeit und Automatisierbarkeit** der Analyse.

Berechnungsmethode

$$V_{CH_4|max} = \frac{TOC \cdot Y_{TOC} \cdot c_{CH_4} \cdot FQ \cdot (100 - f_x)}{10000 \cdot oTS}$$

c_{CH_4}	Methankonzentration im Biogas 52 % CH ₄	[% CH ₄]
FQ	Fermentierbarkeit	[% TOC]
f_x	Biomassewachstum 5 % TOC	[% TOC]
oTS	organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]

TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff (<i>total organic carbon</i>) Substrat	[g TOC kg ⁻¹ TS]
V _{CH₄ max}	Methanpotential	[L CH ₄ kg ⁻¹ oTS]
Y _{TOC}	Stöchiometrisches Biogaspotential TOC 1,8662 L Biogas g ⁻¹ TOC	[L Biogas g ⁻¹ TOC]

Vor- und Nachteile

- ✓ Etablierte Kenngröße der Abwasserwirtschaft
- ✗ Keine Aussage zur Biogaszusammensetzung
- ✓ Erhöhte Genauigkeit und Automatisierung (im Vergleich zur CSB-Analyse)
- ✗ Keine Daten zur Fermentierbarkeit bekannt

Literaturhinweise

DIN EN 15936 (2012): Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung. Beuth Verlag GmbH, Berlin

2.4 Batchversuche

Neben den zuvor beschriebenen Analysenverfahren werden üblicherweise Ergebnisse aus **diskontinuierlichen Vergärungsversuchen (Batchversuchen)** zur experimentellen Bestimmung des Methanpotentials der eingesetzten Substrate verwendet. Batchversuche werden in unterschiedlichen Versuchsaufbauten im Maßstab von 0,1 bis 30 L Reaktoren durchgeführt. Grundsätzlich wird das zu untersuchende Substrat gemeinsam mit geeignetem **Impfmateri**al (Inokulum) unter anaeroben Bedingungen zu Biogas abgebaut. In einer zusätzlichen Nullprobe wird ausschließlich die Gasbildung des Inokulums gemessen. Durch Differenzbildung zwischen Substrat- und Nullversuch lässt sich dann die substratspezifische Biogas- bzw. Methanproduktion ermitteln, welche in der Regel auf die organische Trockensubstanz (oTS) der eingesetzten Substrate bezogen wird. Optimale Vergärungsbedingungen (gemäß den etablierten Richtlinien) erlauben eine realitätsnahe Bestimmung von Methanerträgen, ohne unbekannte Kenngrößen oder schwankende Angaben zum mikrobiellen Biomassewachstum, zur Fermentierbarkeit oder Stöchiometrie explizit angeben oder ermitteln zu müssen.

Dabei wird der **Endwert aus Batchversuchen** häufig mit dem **Methanpotential** der eingesetzten Substrate gleichgesetzt. Inwieweit der experimentelle Endwert im Batchversuch tatsächlich das maximale Methanpotential der jeweiligen Substrate repräsentiert oder nur einen individuellen Methanertrag darstellt, ist bis heute nicht abschließend geklärt. Neben der Fermentierbarkeit und Abbaukinetik von langsam abbaubaren Substratbestandteilen besitzt das konkrete Abbruchkriterium dabei einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis.

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus Batchversuchen zu gewährleisten sind die Anforderungen der einschlägigen **Richtlinien und Methodenvorschriften** (wie beispielsweise VDI 4630 oder VDLUFA 4.1.1) bei der Versuchsdurchführung einzuhalten. Insbesondere die

- Vorbehandlung und Lagerung der eingesetzten Substrate
- Herkunft, Qualität bzw. Aktivität, Vorbehandlung und Lagerung des verwendeten Inokulums
- Bestimmung der analytische Kenngrößen (TS, oTS sowie TS-Korrektur)
- Messtechnik zur Gasvolumen- und -konzentrationsmessung

- Durchmischung, aktives Reaktionsvolumen und Temperatur
- Versuchsansatz (Inokulum-Substrat-Verhältnis auf Basis oTS sollte üblicherweise größer 2 sein)
- Abbruch- und Qualitätskriterien ausgewählter Richtlinien
- Datenverarbeitung und Berechnungen (Normierung der Gasproduktion auf 0 °C; 101,325 kPa)

besitzen mitunter einen erheblichen Einfluss auf das Versuchsergebnis und sind (soweit möglich) anhand der entsprechenden Vorgaben in den Methodenvorschriften zu berücksichtigen. Trotz der Einhaltung verfügbarer Richtlinien können die zahlreichen Einflussfaktoren, vielfältige Messtechnik und die Verwendung von biologisch aktiven Medien (Inokula) bei gleichem Probenmaterial zu **Abweichungen zwischen einzelnen Laboren** bzw. unterschiedlichen Versuchsansätzen führen.

Sowohl aktuelle Untersuchungen im Rahmen praxisnaher Forschung als auch **nationale und internationale Ringversuche** liefern dabei wichtige Anhaltspunkte, um die bestehenden Methodenvorschriften hinsichtlich einer präzisen und standardisierbaren Versuchsdurchführung zu verbessern. Um eine systematische, laborübergreifende Qualitätsverbesserung der Biogaslabore bei der Bestimmung der Gaserträge in Batchversuchen zu erreichen, sah sich auch das **Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)** zusammen mit der **VDLUFA Qualitätssicherung NIRS GmbH (VDLUFA)** früh dazu veranlasst, regelmäßig Ringversuche für die Bestimmung von Gaserträgen in Batchversuchen anzubieten (siehe Kapitel 2.4.1), um aus den Abweichungen zwischen den Laboren die Ursachen der Messunsicherheiten erkennen und reduzieren zu können.

Vor- und Nachteile

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Etablierter Labortest mit zahlreichen Referenzwerten und langjährigen Erfahrungen in Wissenschaft und Praxis ✓ Einschlägige Richtlinien und Methodenvorschriften verfügbar ✓ Geringer Aufwand im Vergleich zu kontinuierlichen Laborversuchen ✓ Implizite Messung biochemischer Parameter (mikrobielles Biomassewachstum, Fermentierbarkeit und Stöchiometrie) ✓ Richtwerte auf Basis von Messergebnissen vieler Labore haben sich zur Effizienzbewertung und Anlagenauslegung in der großtechnischen Anlagenpraxis etabliert | <ul style="list-style-type: none"> ✗ Zahlreiche Einflussgrößen und weiterhin hohe Messunsicherheiten zwischen den Ergebnissen einzelner Labore möglich (insbesondere, wenn von Richtlinien abgewichen wird). ✗ Details zu den verwendeten Methoden häufig nicht (vollständig) erfasst ✗ Hoher Aufwand im Vergleich zu chemischen Substratanalysen (typische Versuchsdauer zwischen 30 und 40 Tage) ✗ Die Übertragbarkeit von Abbaukinetiken aus Batchversuchen für eine präzise Bewertung von kontinuierlichen Laborversuchen oder großtechnischen Biogasanlagen (unter Berücksichtigung der konkreten Verweilzeit und Raumbelastung) ist aufgrund der zahlreichen Messunsicherheiten im kontinuierlichen Anlagenbetrieb bis heute nicht im Detail nachgewiesen. |
|---|--|

Weiterführende Literatur und Richtlinien

VDI 4630 (2016): Richtlinie zur Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche 4630. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin

VDLUFA (2011): Methodenvorschrift „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“. VDLUFA Methodenbuch VII, Umweltanalytik, 4.1.1. Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA, Hrsg), VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Holliger, C. et al. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. In: *Water Science and Technology*, Vol. 74, Nr. 11, S. 2515-2522

2.4.1 KTBL/VDLUFA-Ringversuch Biogas

Ringversuche spielen bei der Qualitätsüberwachung von Laboren eine zentrale Rolle, da sie den Laboren die Möglichkeit bieten, ihre **Leistungsfähigkeit zu prüfen und objektiv darzustellen**. Denn die tatsächliche analytische Leistung eines Labors kann am besten im Vergleich mit anderen Laboratorien überprüft werden. Dafür erhalten die teilnehmenden Labore zur gleichen Zeit identische Proben, die sie nach einheitlichen Methoden, wie im jeweiligen Labor üblich, analysieren. Anhand der anschließenden Ringversuchsauswertung lassen sich Aussagen über die Messgenauigkeit der Labore treffen.

Das Ziel des KTBL/VDLUFA-Ringversuchs Biogas ist im Wesentlichen, die übergreifende Qualitätssicherung der Biogaslabore bei der Bestimmung der Gaserträge oder auch des Restmethanpotentials mittels diskontinuierlicher Laborversuche (Batchtests). Dazu werden mögliche Einflussfaktoren und Ursachen der Abweichungen in den Messergebnissen analysiert, um so die Messgenauigkeit der Biogaslabore zu erhöhen. Dadurch wird eine bessere **Vergleichbarkeit und höhere Genauigkeit der Ergebnisse** von Gärversuchen erreicht. Die Anzahl der teilnehmenden Labore liegt jährlich zwischen 20 bis 30 Laboren, die aus dem In- und europäischen Ausland stammen und mit unterschiedlichen Versuchsaufbauten teilnehmen.

Mit Beginn der KTBL/VDLUFA Ringversuche im Jahr 2006 wurde die gleichnamige KTBL-Arbeitsgruppe „Ringversuch Biogas“ gegründet, welche die Durchführung und Diskussion der Ringversuche bis heute fachliche begleitet und praxisnah unterstützt. Neben der Auswertung der unterschiedlichen Laborergebnisse ist insbesondere die Ursachenforschung und Fehlersuche bei stark abweichenden Messwerten einzelner Labore ein wesentlicher Bestandteil der Aufgaben der Arbeitsgruppe.

Durchführung der Ringversuche

Der Analyseumfang des jährlich stattfindenden Ringversuchs Biogas wird von den teilnehmenden Biogaslaboren individuell bestimmt. Die Teilnehmer wählen aus den folgenden Analysebereichen:

- **Bestimmung der Biogas- und Methanerträge**
Batchversuche von mindestens drei Probenmaterialien (inkl. Bestimmung von Trockenmasse, organischer Trockenmasse bzw. Rohasche und Gärsäuren)
- **Bestimmung der Gehalte an Rohnährstoffen**
Rohprotein, Rohfaser, Rohfett, Rohstärke, Zucker, Detergenzien-Faser (aNDFom, ADFom), Detergenzien-Lignin, Enzymlösliche organische Substanz, Enzymunlösliche organische Substanz anhand einer Probe
- **Bestimmung des Emissions- und Restmethanpotentials und Gehalt organischer Fettsäuren**
Emissionsmethanpotential bei 20 °C und Restmethanpotential bei 37 °C, sowie die Bestimmung der organischen Fettsäuren (C2 bis C5)

Als Grundvoraussetzung zur Teilnahme am Ringversuch zur Bestimmung der Biogas- und Methanerträge bzw. des Restmethanpotentials wird die Einhaltung der **VDLUFA-Methodenvorschrift** „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“ (2011), der **VDI-Richtlinie 4630** „Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche“ (2016) bzw. der **VDLUFA-Methodenvorschrift** „Bestimmung des Restgaspotentials aus Gärresten im Labortest“ (2019) vorausgesetzt.

Für den Analysebereich „Gärttest“ werden im Ringversuch mindestens **drei unterschiedliche Proben** versandt. Das versandte Probenmaterial soll wie im Labor üblich gehandhabt und analysiert werden. Das Probenmaterial beinhaltet immer Maissilage und mikrokristalline Cellulose als Referenzsubstrat. Weitere Substrate vergangener Ringversuche waren u. a. Weizenkorn, Grassilage, Durchwachsende Silphie, Haferkleie, Futtermittel oder Biertreber. Die Rohnährstoffe werden üblicherweise in Maissilage-Proben bestimmt. Für den Analysebereich „Restgasbestimmung“ werden Gärrestproben verschickt. Bei der Versendung von frischen Silagen ist auch ein **Einfluss der Probenlagerung und Probenhomogenisierung** auf das Endergebnis möglich. Die Proben werden daher in aller Regel per Eilpaket im gekühlten Zustand in isolierten Boxen versendet.

Alle Proben (einschließlich des Inokulums) müssen mit **drei Wiederholungen** (mindestens zwei Wiederholungen) vom Labor analysiert werden. Die Analyseergebnisse müssen den Organisatoren innerhalb von vier Monaten übermittelt werden. Die Ergebnisse und Messwerte werden in ringversuchseigenen Datenblättern (MS Excel) und soweit möglich, mit den entsprechenden Verlaufskurven der Biogas- und Methanbildung eingereicht. Da der Ringversuch die **Qualitätssicherung der Biogaslabore** zum Ziel hat, erfolgt keine Plausibilitätsprüfung der eingereichten Labordaten durch die Organisatoren (Ringversuchsart Q).

Die Durchführung und Auswertung des Ringversuchs erfolgt anonym, wofür jedes teilnehmende Labor eine individuelle Laborkennung erhält. Zum Abschluss des Ringversuchs erhalten die Labore einen umfangreichen, schriftlichen Bericht zur Auswertung. Zudem richten die Organisatoren in der Regel nach Abschluss der Auswertung ein **Abschlussstreffen** aus, an dem die Laborvertreter gemeinsam mit der KTBL-Arbeitsgruppe die Resultate der Auswertung besprechen und mögliche Fehlerquellen oder aufgetretene Probleme diskutieren können. Hieraus ergeben sich zum Teil interessante Anhaltspunkte für die Verbesserung der Laborarbeit.

Auswertung der Ringversuche

Der Auswertungsbericht zum jeweiligen Jahrgang des Ringversuch Biogas umfasst alle Analysebereiche und die dazugehörigen Parameter sowie alle relevanten Anmerkungen, Methodenbeschreibung und Einzelergebnisse. Die Ergebnisdarstellung für die Laborbeurteilung erfolgt im Wesentlichen anhand der Streuung der Ergebnisse bei der **Wiederholbarkeit (r)** der Messergebnisse innerhalb des Labors und der **Vergleichbarkeit (R)** der Analysewerte zwischen den beteiligten Laboren. Zusätzlich wird die Standardnormalverteilung (z-Wert-Darstellung) der Stichprobe ermittelt.

Die Auswertung des Ringversuchs (entsprechend DIN 5725, 2002) dient dazu, die Möglichkeiten der Methode und insbesondere die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Labore hinweg zu beschreiben. Dabei wird die Streuung der Ergebnisse unter anderem als **Vergleich- (s_R) und Wiederholstandardabweichung (s_r)** berechnet. Gemäß DIN 5725-2 (2002) werden dabei Einzelwerte als **Ausreißer** bestimmt, die nicht zu den übrigen Werten dieses Labors passen. Ferner werden alle Werte eines

Labors markiert, wenn der Labormittelwert dieses Labors statistisch signifikant von dem Mittelwert aller Labore abweicht oder die laborinterne Streuung erhöht ist. Bei allen drei Typen von Ausreißern wird unterschieden, ob diese Ausreißer signifikant auf dem 1%-Niveau liegen (dann werden diese Messergebnisse aus der Auswertung herausgenommen) oder ob die Signifikanz nur auf dem 5 %-Niveau gegeben ist (dann werden diese Werte markiert, aber in der weiteren Berechnung berücksichtigt). Ausreißer werden auch per Hand, ohne statistische Berechnungen aus der Auswertung herausgenommen, wenn begründete Zweifel an den Daten vorliegen. Diese Entscheidungen werden durch die Organisatoren des Ringversuchs dokumentiert.

Als Ergebnis der Auswertung nach DIN 5725 (2002) erhält man die folgenden Kenndaten der Methode:

- Variationskoeffizient der Wiederholbarkeit (CV_r)
Beschreibung der Genauigkeit der Werte innerhalb des Labors
- Wiederholstandardabweichung (s_r)
Abweichung der Wiederholungen innerhalb eines Labores
- Variationskoeffizient der Vergleichbarkeit (CV_R)
Beschreibung der Präzision zwischen den Laboren
- Vergleichsstandardabweichung (s_R)
Abweichung der Wiederholungen zwischen den beteiligten Laboren

Abbildung 4 zeigt beispielhaft für den Auswertungsbereich zum Ringversuch Biogas 2016 die Ergebnisdarstellung für die Streuung der eingereichten Analysewerte zur vergleichenden Laborbeurteilung am Beispiel des Methanertrags für mikrokristalline Cellulose ($C_6H_{10}O_5$).

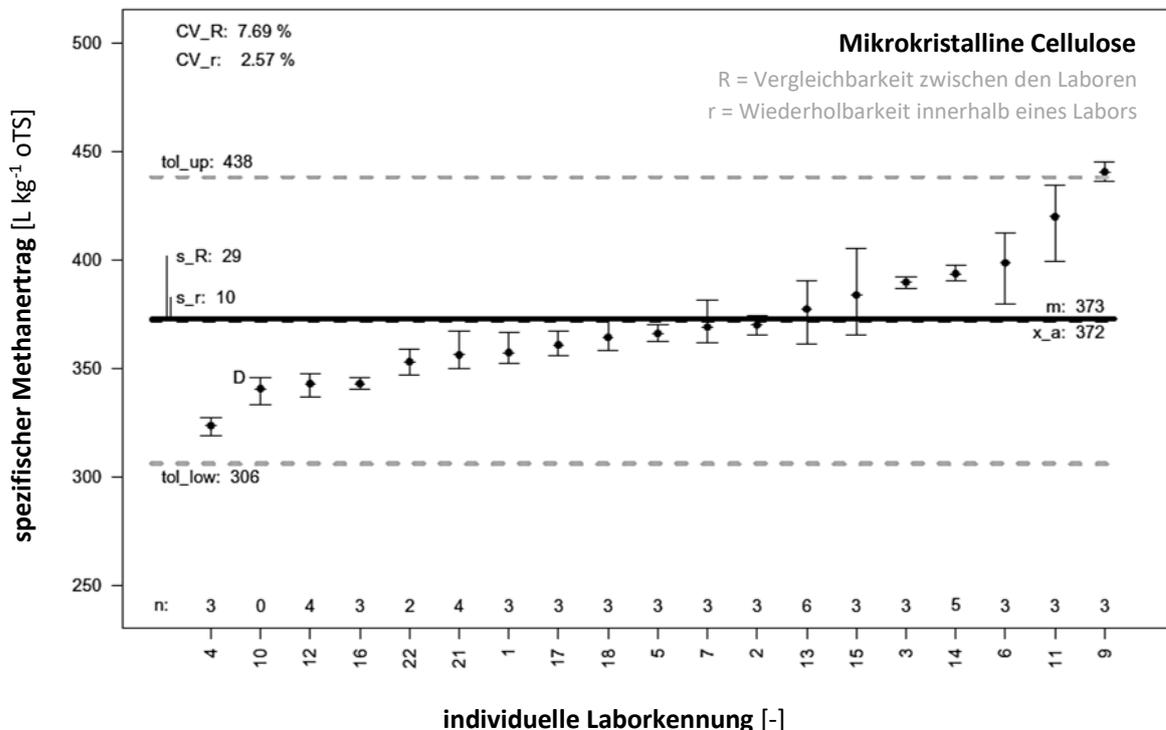


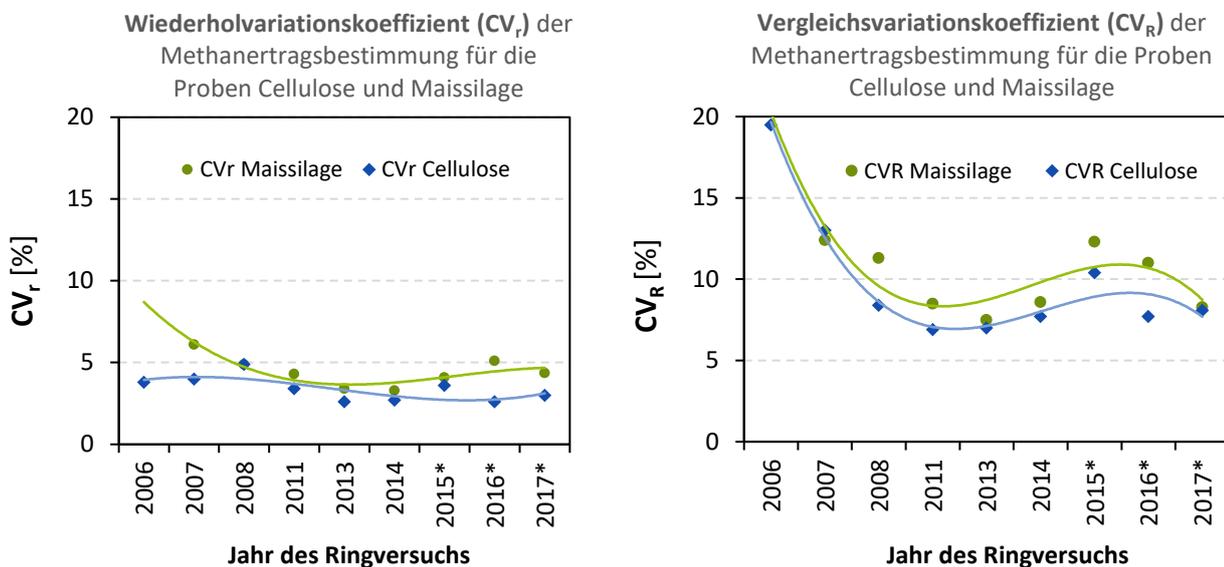
Abbildung 4: Ergebnis des Methanertrags von mikrokristalliner Cellulose im KTBL/VDLUFA-Ringversuch Biogas 2016

Die durchgezogene waagerechte Linie kennzeichnet den Mittelwert (m) der Analysen aus diesem Ringversuch. Die schwarze gestrichelte Linie markiert den „wahren“ Methanertrag (x_a) der Probe (berechnet gemäß Kapitel 2.3.3, unter Berücksichtigung von 10 % Substratbedarf für mikrobielle

Wachstumsprozesse). Die grauen gestrichelten Linien markieren die mit der Vergleichsstandardabweichung (s_R) berechneten Toleranzgrenzen (tol_{up} und tol_{low}). Gemäß DIN 38402-45 sind die Toleranzgrenzen anhand der Vergleichsstandardabweichung mit $m \pm 2 \cdot s_R$ bzw. $x_a \pm 2 \cdot s_R$ bestimmt, wenn ein "wahrer" Wert (x_a) der Proben zugeordnet werden kann. Für die Vergleichsstandardabweichung wird für mikrokristalline Cellulose mit einer Abweichung von $s_R = 33 \text{ L kg}^{-1} \text{ oTS}$ gerechnet; dies entspricht der mittleren Vergleichsstandardabweichung dieser Probe über mehrere Jahre des Ringversuchs.

Ergebnisse vergangener Ringversuche

Die Ergebnisse vergangener Ringversuche zeigen, dass sich die Analyseergebnisse der Biogas- bzw. Methanausbeute seit Beginn der Ringversuche im Jahr 2006 zum Teil **deutlich verbessern** konnten (Abbildung 5). Da die Zusammensetzung der am Ringversuch teilnehmenden Labore jährlich wechselt, ist ein Vergleich der Auswertung über die Dauer des Ringversuchs dabei jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig.



* Änderung der Zielsetzung des Ringversuchs von der Prüfung der Umsetzung der VDLUFA-Methode (mit Plausibilitätskontrolle der eingehenden Labordaten) hin zur Qualitätsbeurteilung der Labore (ohne Plausibilitätskontrolle der eingehenden Labordaten).

Abbildung 5: Entwicklung des Variationskoeffizienten beim KTBL/VDLUFA-Ringversuch Biogas (Jahrgänge 2006 bis 2017)

Auffällig ist, dass beim ersten Durchlauf im Jahr 2006 die Ergebnisse für Cellulose eine relativ breite Streuung aufwiesen, obwohl es sich hierbei um ein standardisiertes und sehr homogenes Testsubstrat handelt. So lag der Vergleichsvariationskoeffizient (CV_R) des Methanertrages zwischen den Laboren bei 19,5 %. Beim Vergleich des Versuchsaufbaus und der Ergebnisse wurde deutlich, dass die Abweichungen nicht auf die Art und Größe der jeweiligen Versuchseinrichtungen zurückzuführen waren. Vielmehr spielte die Vorgehensweise bei der **Datenerfassung**, die **Genauigkeit von Methanmessgeräten**, deren **regelmäßige Kalibrierung**, die rechnerische Auswertung unter Berücksichtigung der **Bezugsgrößen für Normbedingungen** und die Berücksichtigung der **Wasserdampfkorrektur** bei Abweichungen eine deutlich erkennbarere Rolle. Inzwischen liegen die CV_R -Werte für den Methanertrag für Cellulose bei rund 8 %. Der Wiederholvariationskoeffizient (CV_r), der die Genauigkeit der Werte innerhalb des Labors beschreibt, konnte in den Jahren der Ringversuchsdurchgänge für den Methanertrag auf unter 3 % reduziert werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Methanertragsbestimmung von Maissilage zeigt sich ein etwas anderes Bild. Der Wiederholvariationskoeffizient (CV_r) der Labore konnte von anfänglich über 6 % auf nun rund 4 % verbessert werden. Auch hier begannen die Ringversuche mit hohen CV_r -Werten (von über 12 %) und über die Jahres des Ringversuchs konnte die Streuung zwischen den Werten bei diesem Probenmaterial auf rund 8 % reduziert werden. Zwischenzeitlich stiegen sie zum Teil jedoch wieder geringfügig an. Bei einem derartigen Substrat spielen mögliche **natürliche Qualitätsunterschiede** zwischen den Anbaujahren, der Einfluss der Zerkleinerungstechnik und der Einfluss der Silierung eine Rolle bei der Erarbeitung der Ergebnisse. Auch die Homogenität der Probe hat einen Einfluss auf den Vergleich der Ringversuch-Auswertungen der vergangenen Jahre, da die Maissilage unzerkleinert an die Labore verschickt wird und für den Ringversuch mit dem im Labor üblichen Verfahren vorbereitet wird. Grundsätzlich sind somit höhere als auch stärker schwankende CV_r -Werte für die Maissilage im Vergleich zur Cellulose zu erwarten.

Qualitätssiegel (Zertifikat) des Ringversuchs

Der Ringversuch verfolgt den Ansatz der **Qualitätsverbesserung der Labore (Ringversuchsart Q)**. Aus diesem Grund wird keine Prüfung der Eingangsdaten auf Plausibilität durch die Ringversuchsorganisatoren durchgeführt.



Die teilnehmenden Labore erhalten nach Abschluss des Ringversuchs ein **Qualitätssiegel** (Abbildung 6) über ihre „erfolgreiche“ Teilnahme. Dieses Zertifikat bezieht sich derzeit nur auf die korrekte Ermittlung der Gaserträge (Analysebereich Gärtest) und lässt die Parameter Restgaspotential und Rohnährstoffe unberührt. Das Qualitätssiegel wird einem Labor individuell ausgestellt, wenn

- alle Hauptproben analysiert wurden,
- die Standardnormalverteilung (z-Wert) bei 2 von 3 Proben bei maximal ± 2 liegt und
- der Soll-Gasertrag der Cellulose gemäß VDLUFA-Methode bestimmt worden ist.

Abbildung 6: Beispiel des Qualitätssiegels (Zertifikat) des KTBL/VDLUFA-Ringversuch Biogas

Zusammenfassung

Trotz der etablierten Methodenvorschriften ist es für die Labore unabdingbar, permanent laborübergreifende Qualitätsverbesserungsmaßnahmen durchzuführen um ihre Leistungsfähigkeit zu prüfen und objektiv darzustellen. Die analytische Leistung eines Labors kann am besten im **Vergleich mit anderen Laboratorien** im Rahmen eines Ringversuchs überprüft werden.

Seit 2006 werden vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) zusammen mit der VDLUFA Qualitätssicherung NIRS GmbH (VDLUFA) Ringversuche für Biogaslabore durchgeführt, an denen inzwischen jährlich zwischen 20 und 30 Labore teilnehmen. Diese Labore beachten die vorgegebenen Richtlinien weitestgehend, sie arbeiten aber häufig mit unterschiedlichen Apparaturen, was auch zulässig ist. Zudem kam es mitunter zum Wechsel der beteiligten Labore. Über die Jahre der Ringversuche konnte trotzdem die **Qualität der Ergebnisse aus den KTBL/VDLUFA-Ringversuchen kontinuierlich verbessert werden**. Es zeigte sich aber auch, dass es unerlässlich ist, dass die grundlegenden Bedingungen der Richtlinien eingehalten werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Dies sind die Auswahl und Qualität des Inokulums, die passenden Mischungsverhältnisse aus Testsubstrat und Inokulum, gasdichte Versuchapparaturen, regelmäßig kalibrierte Messgeräte und eine optimale Auswertung der Gaserträge unter Beachtung der Temperatur- und Druckbedingungen zur Normierung der Werte.

Unter Berücksichtigung der individuellen Versuchsdurchführung und -auswertung wird derzeit weiter daran gearbeitet, **Fehlerquellen** der einzelnen Labore in gemeinsamer Suche zu erkennen und zu beheben, um eine **weitere Verbesserung der laborinternen und laborübergreifenden Standardabweichungen** zu erreichen.

Weitere Informationen zum KTBL/VDLUFA-Ringversuch Biogas finden sich unter www.ringversuch-biogas.de.

Weiterführende Literatur und Richtlinien

VDI 4630 (2016): Richtlinie zur Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche 4630. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin

VDLUFA (2011): Methodenvorschrift „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“. VDLUFA Methodenbuch VII, Umweltanalytik, 4.1.1. Hrsg. Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), VDLUFA-Verlag, Darmstadt

VDLUFA (2019) Methodenvorschrift „Bestimmung des Restgaspotentials aus Gärresten im Labortest“. VDLUFA Methodenbuch VII, Umweltanalytik, 4.1.2. Hrsg. Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Oechsner, H., Paterson, M. (2013): Methanertrag aus Biomasse – Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf die Praxis. In: *Tagungsband Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven, FNR/KTBL-Kongress in Kassel*. Hrsg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt, S. 81-92

Weinrich, S.; Paterson, M.; Pröter, J. (2017): Aussagekraft von diskontinuierlichen Laborversuchen (Batchtests) zur Substrat- und Prozessbewertung von Biogasanlagen. In: *Tagungsband Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven, FNR/KTBL-Kongress in Bayreuth*. Hrsg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt, S. 278-295

2.4.2 Fehlerquellen und -beseitigung

Durch die individuellen und mitunter komplexen Versuchssysteme sowie die vielfältigen Arbeitsschritte bei der Versuchsdurchführung und Auswertung der Messergebnisse existieren **zahlreiche Einflussfaktoren**, welche die Aussagekraft und Vergleichbarkeit von Batchtests beeinflussen. Soweit wie möglich sind die Anforderungen und Empfehlungen einschlägiger Richtlinien einzuhalten. Darüber hinaus lassen sich anhand der Ergebnisse vergangener Ringversuche sowie der langjährigen Erfahrung der ringversuchsbegleitenden KTBL-Arbeitsgruppe „Ringversuch Biogas“ typische Fehlerquellen identifizieren.

So stoßen insbesondere Labore (oder Forschungseinrichtungen) mit nur wenig Erfahrungen in der Anwendung von Batchtests bei der praktischen Durchführung oder Auswertung mitunter auf kleinere Probleme oder Unsicherheiten, für die sie keine Lösung finden. Um bekannte **Fragestellungen schnell, zuverlässig und korrekt zu lösen** und somit die Qualität der Messergebnisse im jeweiligen Labor zu erhöhen, werden im Folgenden typische Probleme bei der Durchführung von Batchtests beschrieben und eine mögliche Ursache sowie Hinweise zur Problembeseitigung vorgeschlagen.

Problem	Ursache	Beseitigung
Kein Messwert für die organische Trockensubstanz (TS und oTS) der untersuchten Probe beim Versuchsstart vorhanden	Direkter Einsatz der Probe im Batchtest ohne vorherige Laboranalysen	Approximation der TS- und oTS-Gehalte anhand vorheriger Analysen oder Richtwerte vergleichbarer Proben. Während der Durchführung der Batchversuche ist die TS und oTS der konkreten Probe zu bestimmen. Bei der Versuchsauswertung ist die spezifische Gasbildung anhand der tatsächlichen TS- und oTS-Gehalte der eingesetzten Proben zu korrigieren.
Inhomogene Probe	Grobes Pflanzenmaterial mit langen Fasern oder biogene Reststoffe und Abfälle können mitunter starke Inhomogenitäten aufweisen	In Abhängigkeit von den vorhandenen Testsystemen ist ein möglichst großes Fermentervolumen zu wählen, sodass eine repräsentative Mischprobe des Substrats eingesetzt werden kann. Ansonsten ist durch mechanische Zerkleinerung eine homogene Probe herzustellen. Dabei ist die Vorbehandlung des Substrats bereits als zusätzlicher Desintegrations-schritt in der Versuchsauswertung zu bewerten.

Verzögerte Gasbildung (Lag-Phase)	Verzögerte Gasbildung aufgrund der Anpassung der mikrobiellen Gemeinschaft an ein neues Substrat und/oder erforderliche Desintegration langsam abbaubarer Substratbestandteile	Durch vorherige Adaption des Inokulums an das Substrat lässt sich eine verzögerte Gasbildung vermeiden bzw. verringern. Zudem können entsprechende Desintegrationsverfahren (Substratvorbehandlung) schnell abbaubare Substratbestandteile verfügbar machen.
Trockene Proben kleben am Boden des Ansatzgefäßes fest (u. a. mikrokristalline Cellulose)	Substrat nicht ausreichend eingemischt	Probe anlösen oder eine geringe Menge Flüssigkeit vorlegen.
Versäuerung des Gärmediums	Inhibition der mikrobiellen Wachstumsprozesse aufgrund eines Nährstoffmangels oder einer geringen Pufferkapazität des Inokulums. Zudem kann eine zu hohe Einwaage (Masse an oTS) des Probenmaterials eine Versäuerung hervorrufen.	Einsatz eines geeigneten Inokulums mit ausgewogenem Nährstoffspektrum und ausreichender Pufferkapazität, Reduzierung der Probenmenge hinsichtlich eines geeigneten Mischungsverhältnisses an oTS von Probe und Inokulum (siehe VDI 4630)
Entmischung des Probeansatzes	Schlechte (oder keine) Durchmischung	Mindestens einmal täglich Rühren
Zu hohe Eigengasbildung des Inokulums (> 20 % der Gesamtgasproduktion), Schwimmschichtbildung, erschwerte Durchmischung	Inokulum stammt aus einem Fermenter mit zu hoher Raumbelastung	Inokulum vor dem Versuchsansatz in einem Behälter ausreichend durchmischen und Strukturmaterial absieben (keine Partikel > 3mm), bei Gärtemperatur für wenige Tage/Wochen aushungern, bis eine genügend tiefe Eigengasbildung erreicht ist.

Sollten trotz der Einhaltung bekannter Richtlinien und dem Ausschluss der zuvor beschriebenen Probleme weiterhin **Abweichungen in den Versuchsergebnissen** deutlich werden, ist die gesamte Prozesskette bei der Durchführung von Batchversuchen systematisch zu evaluieren. So sind vom jeweiligen Versuchsaufbau bis zur Messwertauswertung folgende grundlegende Kriterien zu berücksichtigen, um mögliche Ungenauigkeiten oder Fehlerquellen in den Ergebnissen zu beseitigen.

Undichtigkeiten im Versuchsaufbau insb. bei geringen Gasmengen	<ul style="list-style-type: none"> • Alle Komponenten auf Dichtigkeit prüfen • Mehrfachbestimmung (Gärverlauf vergleichen) • Geeignete bzw. gasdichte Materialien für Gasbeutel, Anschlüsse oder Schläuche verwenden • Sperrflüssigkeiten überprüfen
Messtechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Prüfung, Validierung und Kalibrierung der verwendeten Messtechnik gemäß der Herstellungsangaben (Protokollieren anhand von Kontrollkarten) • Eignung der Messbereiche für das Einsatzgebiet prüfen
Wasserbadtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Tägliche Kontrolle des Füllstands und der Temperatur im Wasserbad (Protokollieren anhand von Kontrollkarten) • Gäransatz auf ± 1 °C der Solltemperatur regeln
TS- und oTS-Gehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrfachbestimmung durchführen, insbesondere auf ausreichende Homogenisierung der Probe achten • Korrektur um flüchtige organische Bestandteile (Fettsäuren und Alkohole) beachten (insbesondere bei Silagen kann es sonst zu einer Überschätzung des Methanpotentials führen)
Raumbelastung Inokulum-Substrat-Ratio (ISR)	<ul style="list-style-type: none"> • Substratzugabe an das verwendete Inokulum und den zu erwartenden Gasertrag anpassen (Inokulum-Substrat-Verhältnis anhand der Richtwerte überprüfen)
Aktivität des Inokulums	<ul style="list-style-type: none"> • Angepasstes Inokulum mit hoher Aktivität verwenden (Kontrolle der Aktivität anhand von Referenzsubstraten/Standards) • Zu langes Ausgasen vermeiden (Ausgaszeit des Inokulums verringern) • Im Batchtest sollte die Referenz nach 5 Tagen 70 % des theoretischen Biogaspotentials erreicht haben
Vergärungseigenschaften des Inokulums	<ul style="list-style-type: none"> • Nährstoffmangel (Mikro- und Makronährstoffe) • Geringe Pufferkapazität, pH-Wert oder Stickstoffgehalt • Prozessparameter Inokulum anhand der folgenden Richtwerte einstellen: <ul style="list-style-type: none"> - pH-Wert 7 - 8,5 - $\text{NH}_4\text{-N}$ 1 g L⁻¹ - 2,5 g L⁻¹ - Puffer > 3 g CaCO₃ L⁻¹ - FOS < 1 g L⁻¹ • Fütterungsregime des Inokulumfermenters verändern bzw. alternative Inokulumquelle verwenden

Auswertungsalgorithmus	<ul style="list-style-type: none">• Berechnungsalgorithmen überprüfen (insbesondere, Blindwertkorrektur, TS- und oTS-Bezug, Korrektur auf Normbedingungen)• Kopfraumkorrektur berücksichtigen• Mastertabelle mit geschützten Berechnungszellen verwenden• Überprüfung der Berechnung mit Standardzahlen• Plausibilitätsprüfung anhand von Referenzwerten
------------------------	--

2.5 KTBL-Richtwerte

Der in den Biogasanlagen erzielbare Methanertrag wird sowohl von der Zusammensetzung der eingesetzten Substrate (Methanpotential) als auch durch die Verfahrens- und Prozesstechnik beeinflusst. Die Abschätzung des Methanertrags, der für die Auslegung der Biogasanlagen im Zuge der Planung notwendig ist, erfolgte in der Vergangenheit häufig aufgrund von individuellen Erfahrungswerten. Dies führte zu sehr unterschiedlicher Dimensionierung der Anlagen bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen. Da sich Biogasanlagen durch hohen Kapitalbedarf und Langlebigkeit auszeichnen, wirken sich Fehler in der Anlagenauslegung oft gravierend aus, weil eine spätere Korrektur der Auslegungsmängel meist nicht möglich ist. Mit den im Jahr 2005 erstmals vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) veröffentlichten Richtwerte wurde ein **einheitlicher Standard zur Abschätzung der Gaserträge** in landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf Basis des bekannten Wissens bereitgestellt.

Die zuletzt im Jahr 2015 publizierten, und im Rahmen der begleitenden Expertengruppe abgestimmten Gasertragsrichtwerte basieren auf einer umfassenden Datenerhebung aus dem Jahr 2009 mit insgesamt **1.386 Datensätzen von unterschiedlichen Laboren** aus Wissenschaft und Praxis. Basis für die statistische Auswertung bilden **Batchversuche mit Einzelsubstraten im mesophilen Temperaturbereich**, die entsprechend der gängigen Methodenvorschrift durchgeführt wurden. Kontinuierliche Gärversuche wurden hingegen nicht mit einbezogen, da diese meist mit anderen Zielsetzungen (wie beispielsweise der Untersuchung der Prozessstabilität) betrieben wurden. Grundsätzlich werden dabei zwei Arten von Gasertragsdaten für vielfältige Substrattypen ausgewiesen:

- Mittelwerten aus Messergebnissen von Batchversuchen unterschiedlicher Labore
- Richtwerte für typischen Gasausbeuten im großtechnischen Anlagenbetrieb

Bei den Laborwerten kann durch die Angabe **der Anzahl an Datensätzen und des Variationskoeffizienten** (Standardabweichung der Biogaserträge in Prozent vom Mittelwert) die Aussagequalität der Mittelwerte beurteilt werden. Ein niedriger Variationskoeffizient in Verbindung mit hoher Versuchsanzahl ist ein Indiz für eine geringe Streuung der Gaserträge und damit für eine hohe Aussagekraft der Werte. Dagegen steht ein hoher Variationskoeffizient für eine große Streuung der Werte. Allerdings nimmt auch dieses Streuungsmaß mit der Anzahl der Messwerte bei absolut gleicher Streuung ab. Daher sind für Planungszwecke bei hohen Variationskoeffizienten und/oder einer geringen Anzahl Messdaten **ergänzende Untersuchungen** der eigenen Substrate zu empfehlen. Das gilt vor allem für heterogene Substrate, wie beispielsweise Wirtschaftsdünger oder Bioabfälle.

Bei der Zusammenstellung der Ergebnisse aus den Gärversuchen zeigte sich jedoch, dass mitunter große und aus den vorliegenden Daten nicht begründbare **Unterschiede zwischen den Einzelergebnissen** vorlagen. Gleichzeitig variierte die Anzahl der auswertbaren Einzelversuche je Labor und Substra-

tart teilweise erheblich. In Anbetracht dieser Faktoren und auch aufgrund der zum Teil geringen Anzahl von Gärversuchen mit der gleichen Substratart sind die entsprechenden Ergebnisse der statistischen Auswertung unterschiedlich gut abgesichert. Zusätzlich können Batchversuche von Substraten mit sehr niedrigen Trockensubstanzgehalten für eine Reihe von Silagen nicht auf die üblichen Praxisbedingungen übertragen werden. Daher hat sich die KTBL-Arbeitsgruppe „Biogaserträge“ 2010 zur **Veröffentlichung von zusätzlichen Gasausbeuten (den sogenannte Richtwerten)** entschlossen. Diese basieren neben den Laborergebnissen auf Ergebnissen von Rechenmodellen, Experteneinschätzungen sowie auf Erfahrungen aus der großtechnischen Anlagenpraxis.

Grundsätzlich wird der Biogasertrag in der großtechnischen Anlagenpraxis durch **verfahrenstechnische Betriebsparameter und die konkrete Anlagentechnik** (wie beispielsweise durch die Verweilzeit, Raumbelastung, Durchmischung oder Prozessstabilität) erheblich beeinflusst. Je nach Substrat variiert zudem die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe mitunter sehr stark. Dies gilt insbesondere für heterogene Substrate wie Wirtschaftsdünger oder Bioabfall. Bei Silagen hingegen spielen Reifestadium sowie Alter und Qualität (Ligningehalt) der Silage eine entscheidende Rolle. Die KTBL-Gaserträge bzw. -ausbeuten sind dementsprechend als Richtwerte zu verstehen, welche in Abhängigkeit von der konkreten Prozessführung und Substratqualität im kontinuierlichen Anlagenbetrieb sowohl unter- als auch überschritten werden können.

Ein Vergleich der tatsächlichen Substratausnutzung von **1.854 untersuchten Biogasanlagen** mit den theoretischen Ertragswerten gemäß der KTBL-Richtwerte (KTBL-Gaserträge aus Batchversuchen) zeigt, dass im Durchschnitt aller betrachteten Biogasanlagen und eingesetzten Substrate die KTBL-Richtwerte überwiegend erreicht werden (Abbildung 7). Für rund 54 % der Anlagen befindet sich die Substratausnutzung in einer Spanne von ± 10 % zum Richtwert und für 82 % aller betrachteten Anlagen sogar im Bereich von ± 20 %. Unter Berücksichtigung erheblicherer Unsicherheiten bei der Messdatenerfassung an Praxisanlagen sind diese Übereinstimmungen für eine erste Anlagenbewertung hinreichend genau. Ergebnisse aus verschiedenen Biogasmessprogrammen bestätigen, dass die Substrat- und Gärrestmengen im großtechnischen Betrieb häufig nur unvollständig erfasst werden. Aussagen zum Methanertrag und möglichen Gasverlusten sind üblicherweise stark fehlerbehaftet oder beruhen auf groben Abschätzungen über die Rückrechnung der eingespeisten Strommengen. Eine präzisere Bestimmung der Substratausnutzung (entsprechend Abbildung 7) setzt somit auch eine detaillierte Erfassung und Validierung der eingesetzten Messtechnik an großtechnischen Biogasanlagen voraus.

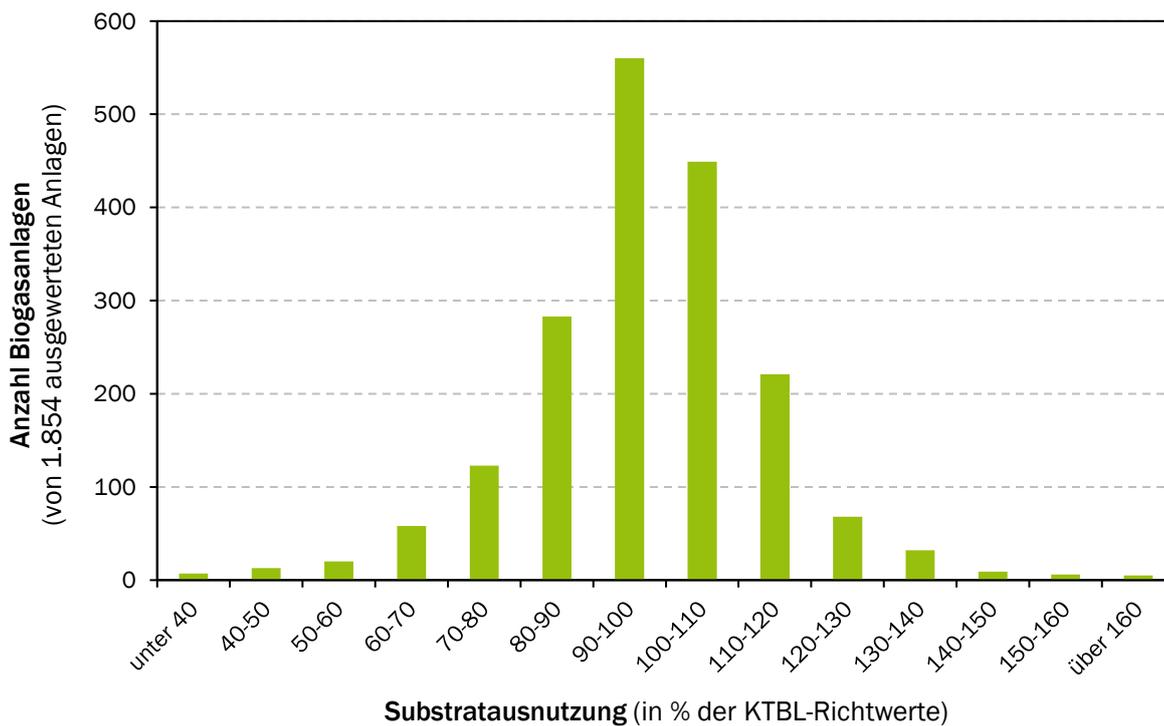


Abbildung 7: Relative Substratausnutzung von 1.854 untersuchten Biogasanlagen bezogen auf KTBL-Richtwerte

Die KTBL-Richtwerte einzelner Substrate dienen als Faustzahlen und erlauben einen **allgemeinen Vergleich der Substratausnutzung unterschiedlicher Substratarten** in der großtechnischen Anlagenpraxis. Für eine detaillierte und individuelle Prozessbewertung sind jedoch die Methanpotentiale der eingesetzten Substrate auf Basis konkreter Substratanalysen bzw. Batchversuche zu bestimmen und unter Berücksichtigung der individuellen Anlagenkonfiguration und Prozessführung (Verweilzeit, Raumbelastung oder Gärtemperatur) zu beurteilen.

Weiterführende Literatur

KTBL (2013): Faustzahlen Biogas. 3. Auflage, Hrsg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt

KTBL (2015): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. 3. Auflage, Heft 107, Hrsg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt

Oechsner, H., Paterson, M. (2013): Methanertrag aus Biomasse – Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf die Praxis. In: Tagungsband Biogas in der Landwirtschaft – *Stand und Perspektiven*, FNR/KTBL-Kongress in Kassel. Hrsg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt, S. 81-92

2.6 Methodenauswahl

Zur Substratbewertung an Biogasanlagen stehen neben den KTBL-Richtwerten unterschiedliche Berechnungsmethoden auf Basis chemischer Substratanalysen sowie die in Batchversuchen ermittelten Gaserträge zur Verfügung.

Methodenvergleich

Für einen aussagekräftigen Vergleich der verfügbaren Methoden wurde die umfangreiche Datenbasis des KTBL/VDLUFA-Ringversuchs Biogas aus dem Jahr 2017 zugrunde gelegt, um sowohl Messunsicherheiten innerhalb eines Labors als auch zwischen unterschiedlichen Laboren gezielt abzubilden. Im entsprechenden Ringversuch wurde dabei eine **einheitliche Charge an Maissilage** sowohl zur Ermittlung der **Gaserträge (21 Labore)** als auch zur analytischen Bestimmung der charakteristischen Rohnähstoffe aus der **Futtermittelanalyse (14 Labore)** verschickt. Anhand der laborspezifischen Analyseenergebnisse lassen sich nun die Methanerträge experimenteller Batchversuche mit den Kenngrößen der unterschiedlichen Berechnungsmethoden auf Basis der fermentierbaren Nährstofffraktionen oder Regressionsmodelle (auf Basis der FoTS bzw. Futtermittelanalyse in Kapitel 2.3.1 und 2.3.2) hinsichtlich ihrer **Präzision und Aussagekraft** bewerten (Abbildung 8). Dabei wurde nicht in allen Laboren jedes Merkmal bzw. jeder Nährstoff analysiert, sodass die zur Berechnung verfügbaren Kenngrößen (mit $n =$ Anzahl der verfügbaren Laboranalysen) in Abhängigkeit von der jeweiligen Berechnungsvorschrift variieren können. Für die berechneten oder experimentell ermittelten Methanerträge im Ringversuch erfolgte für die Maissilageprobe keine Korrektur um flüchtigen Substratbestandteile (Säuren und Alkohole), wodurch die direkte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Bestimmungsverfahren mit den Ergebnissen aus den Batchversuchen im Ringversuch 2017 geringfügig eingeschränkt wird.

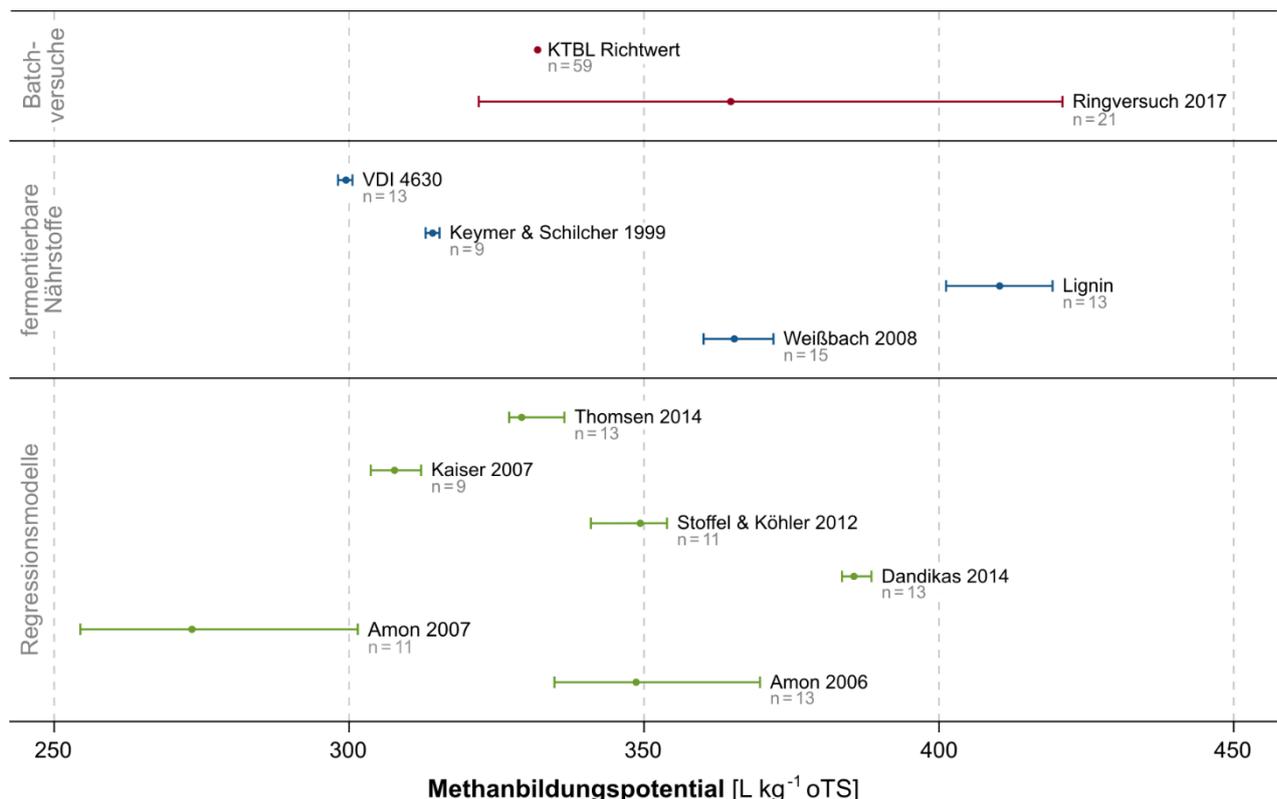


Abbildung 8: Methodenvergleich zur Bestimmung des Methanpotentials von Maissilage im KTBL/VDLUFA-Ringversuch Biogas 2017

Im Vergleich zu den einzelnen Berechnungsmethoden ist bei der experimentellen Ermittlung der Methanerträge im Batchversuch mit wesentlich größeren **Messunsicherheiten** zu rechnen. Durch den methodischen Standard chemischer Analysen weisen die meisten Berechnungsmethoden auf Basis der fermentierbaren Substratbestandteile oder verfügbaren Regressionsmodellen grundsätzlich einen we-

sentlich geringeren Wertebereich innerhalb der einzelnen Berechnungsvorschrift aus. Durch die methodenspezifischen Annahmen zur Fermentierbarkeit oder dem stöchiometrischen Methanpotential (einschließlich Biomassewachstum) einzelner Substrate sind jedoch auch hier mit erheblichen Abweichungen und Unsicherheiten zwischen den Ergebnissen einzelner Berechnungsmethoden zu rechnen (Abbildung 8). Für den jeweiligen Mittelwert des Methanbildungspotentials lässt sich somit sowohl innerhalb als auch zwischen den verschiedenen Bestimmungsmethoden **keine eindeutige Übereinstimmung** ermitteln. Lediglich das berechnete Methanbildungspotential nach Weißbach stimmt mit dem Mittelwert der Batchversuche überein.

Grundsätzlich weisen die Berechnungsmethoden auf Basis der Verdauungskoeffizienten der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (VDI 4630 sowie Keymer und Schilcher, 1999) ein sehr niedriges Methanbildungspotential auf, sodass zur Bestimmung der fermentierbaren Substratbestandteile vorzugsweise auf die korrigierte Berechnungsvorschrift von Weißbach zurückzugreifen ist.

Zudem ist anzumerken, dass alle Regressionsmodelle (Kapitel 2.3.2) auch von den Ergebnissen und der Aussagekraft experimenteller Batchversuche abhängen. Aufgrund der bestehenden Unterschiede zwischen Messergebnissen verschiedener Labore gelten entsprechende Zusammenhänge zudem streng genommen nur für den verwendeten Versuchsaufbau sowie die konkreten Versuchs- oder Analysenvorschriften des ursprünglichen Labors. Eine Präzisierung der Ergebnisse aus Batchversuchen würde somit auch zu einer entsprechenden Verbesserung der Regressionsmodelle führen.

Methodenbewertung und Aussagekraft

Für eine belastbare Substratbewertung und präzise Bestimmung des Methanpotentials werden Aussagen zur **Fermentierbarkeit**, **Gaszusammensetzung** sowie zum Substratbedarf für **mikrobielles Wachstum** benötigt (Abbildung 3). Im Folgenden werden die verfügbaren Methoden hinsichtlich der direkten Bestimmung bzw. Messung dieser drei Kenngrößen und ihrer praktischen Anwendbarkeit anhand des spezifischen **Aufwands der Methode** sowie der **verfügbaren Literaturwerte** dargestellt:

	Bestimmung Messung			Praktische Anwendbarkeit	
	Fermentierbarkeit	Mikrobielles Wachstum	Gaszusammensetzung	Aufwand der Methode	Verfügbare Literaturwerte
FoTS	+/- ^{a)}	-	+	gering	mittel ^{b)}
Futtermittelanalyse	+/- ^{a)}	-	+	hoch	mittel ^{b)}
Elementaranalyse	-	-	+	hoch	gering
Brennwert	-	-	-	mittel	mittel
CSB/TOC	-	-	-	mittel	gering ^{c)}
Batchversuche	+	+	+	hoch	hoch
Kontinuierliche Laborversuche	+	+	+	sehr hoch	mittel
KTBL-Richtwerte ^{d)}	+	+	+	gering	hoch

a) Belastbare Referenzwerte auf Basis von Versuchsserien zur energetischen Futterbewertung in der Tierernährung für ausgewählte Substrattypen vorhanden. Es erfolgt jedoch keine direkte Bestimmung anhand der jeweiligen Substratprobe.

b) Zahlreiche Literaturwerte für Futtermittel verfügbar; ansonsten nur wenige Referenzwerte vorhanden.

c) Literaturwerte lediglich im Bereich der Abwassertechnik verfügbar.

d) Substratspezifische Mittelwerte aus Messergebnissen von Batchversuchen unterschiedlicher Labore sowie Richtwerte für typischen Gasausbeuten im großtechnischen Anlagenbetrieb.

Eine Methode für die direkte Bestimmung der **Fermentierbarkeit** anhand einer individuellen Substratprobe ist bis heute nicht bekannt. Für eine Berechnung des Methanpotentials auf Basis der FoTS oder Futtermittelanalyse sind jedoch für ausgewählte Substrattypen belastbare Referenzwerte auf Basis von Versuchsserien zur energetischen Futterbewertung in der Tierernährung vorhanden. Der Substratbedarf für **mikrobielle Wachstumsprozesse** lässt sich ebenfalls nicht eindeutig anhand chemischer Analysen bestimmen, sodass die Definition üblicherweise nur anhand von Richtwerten (5 bis 8 % der FoTS) auf Basis der Vergärung von idealisierten Referenzsubstraten, wie beispielsweise Glucose oder einzelnen organischen Säuren, erfolgt. Die **Gaszusammensetzung** kann im Rahmen der Substratcharakterisierung auf Basis der FoTS, Futtermittel- oder Elementaranalyse über die zugrundeliegenden Reaktionsgleichungen der stöchiometrischen Biogas- oder Methanpotentiale (anhand der Summenformel der verwendeten Referenzsubstanzen) berechnet werden. Lediglich der Brennwert sowie die CSB/TOC-Analytik erlauben keine Abschätzung über den jeweiligen Methan- oder Kohlenstoffdioxidgehalt.

Ein wesentlicher Vorteil bei der **experimentellen Bestimmung** von Methanerträgen in kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Laborversuchen besteht darin, dass sich entsprechende Aussagen zur Fermentierbarkeit oder dem Substratbedarf für mikrobielles Wachstum implizit in der Methanproduktion der konkreten Substratprobe widerspiegeln (und nicht zusätzlich erfasst werden müssen). Häufig ist jedoch der Aufwand zur Versuchsdurchführung in Abhängigkeit von der verfügbaren Messtechnik größer. Die KTBL-Richtwerte beruhen auf Messergebnissen von Batchversuchen unterschiedlicher Labore und spiegeln damit auch mögliche Qualitätsschwankungen innerhalb einer Substratklasse wieder.

Handlungsempfehlung

Grundsätzlich existieren zahlreiche Verfahren um die Qualität der eingesetzten Substrate anhand chemischer Analysen oder experimenteller Laborversuche zu bewerten. Dabei besitzt jede verfügbare Methode zur Bestimmung des Methanpotentials **individuelle Vor- und Nachteile**. Unter Berücksichtigung des methodenspezifischen Aufwands (sowie der daraus resultierenden Kosten) sind idealerweise die Ergebnisse von Batchversuchen vergleichend mit geeigneten Berechnungsmethoden anhand chemischer Substratanalysen auszuwerten. Die KTBL-Richtwerte lassen sich für eine kostengünstige, allgemeine und praxisnahe Substratbewertung im großtechnischen Anlagenbetrieb einsetzen.

Beim Einsatz von typischen Futtermitteln oder pflanzlicher Biomasse bieten die Rohnährstoffe der Futtermittelanalyse eine belastbare Grundlage für eine detaillierte Substratanalyse. Dabei ist von einem Einsatz der DLG- oder DLV-Verdauungskoeffizienten abzusehen, sodass die Fermentierbarkeit über die Methode von Weißbach oder den Ligningehalt abzuschätzen ist. Auch die Regressionsmodelle auf Basis der einzelnen Nährstoffe der Futtermittelanalytik bieten mitunter nur wenig Aussagekraft, da die statistischen Abhängigkeiten nur für einzelne Substrattypen gültig sind und aufgrund der unterschiedlichen Labormethoden zur Bestimmung der Gaspotentiale (und Nährstoffgehalte) mitunter erhebliche Abweichungen aufweisen (siehe Abbildung 8). Da für die Kenngrößen der Elementar-, Brennwert- oder CSB/TOC-Analysen keine belastbaren Informationen zur Fermentierbarkeit bekannt sind, sind diese Methoden nur als grober Richtwert (insbesondere für unbekannte Substrate und Abfälle) zu verstehen.

Die charakteristischen Methoden lassen sich somit hinsichtlich ihrer Aussagekraft einzelnen Substrattypen zuordnen und anhand des folgenden Entscheidungsbaums für eine bestmögliche Substratbewertung klassifizieren (Abbildung 9).

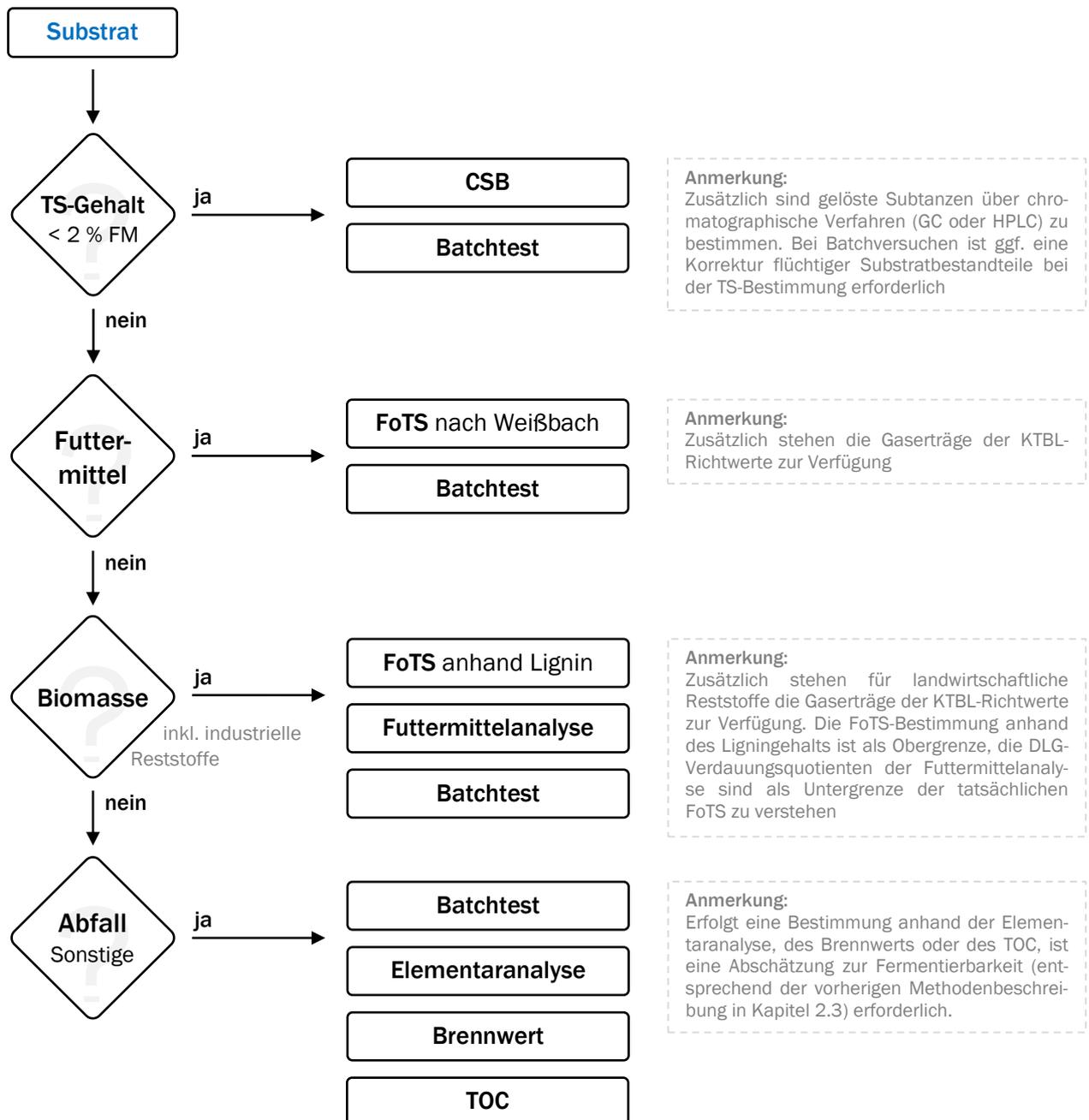


Abbildung 9: Entscheidungsbaum für die Methodenwahl zur Substratbewertung an Biogasanlagen

3 Methoden zur Effizienzbewertung

Während das substratspezifische Biogasbildungspotential Aussagen über die **Substratqualität** für den Einsatz in einer Biogasanlage erlaubt, ermöglicht der tatsächliche Methanertrag im realen Anlagenbetrieb die Beurteilung der verfahrensspezifischen **Effizienz** (Umsatz der FoTS) bei unterschiedlichen Verweilzeiten (Abbildung 1). Grundsätzlich existieren dabei unterschiedliche Verfahren, um den biochemischen Abbau der verwendeten Substrate auf Basis experimenteller Methanpotentiale und -erträge oder der Bilanzierung der ein- und ausgehenden Masseströme zu evaluieren. Für entsprechende Bilanzen sind die erforderlichen Kenngrößen dabei über einen **Betrachtungszeitraum von mindestens drei Verweilzeiten** zu ermitteln.

3.1 Methanertrag und (Rest-)Methanpotential

Für eine direkte Bestimmung der biologischen Effizienz wird der im kontinuierlichen Anlagenbetrieb gemessene **Methanertrag** dem **Methanpotential** der eingesetzten Substrate gegenübergestellt:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Methanertrag}}{\text{Methanpotential}}$$

In Abhängigkeit der verfügbaren Messdaten ergeben sich mit der zusätzliche Kenngröße des absoluten **Restmethanpotentials** weitere Möglichkeiten, die Effizienz der Gärstrecke durch folgenden grundlegenden Zusammenhang zu bestimmen:

$$\text{Methanpotential} = \text{Methanertrag} + \text{Restmethanpotential}$$

Für die Ermittlung von Methanpotentiale stehen neben Batchversuche auch weitere Bestimmungsverfahren auf Basis von **analytischen Kenngrößen** oder die **KTBL-Richtwerte** in Kapitel 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zur Verfügung.

Der Methanertrag bzw. Methanvolumenstrom im kontinuierlichen Anlagenbetrieb lässt sich anhand einer **Vielzahl thermischer, physikalischer oder mechanischer Messprinzipien** bestimmen. In Abhängigkeit von den konkreten Mess- bzw. Umgebungsbedingungen sind bei den einzelnen Verfahren mögliche **Messfehler und Nachweißgrenzen** sorgfältig zu berücksichtigen. In jedem Fall muss eine Korrektur des gemessenen Biogases auf Normbedingungen und – sofern nötig – auf trockenes Biogas (Wasserdampfkorrektur) erfolgen. Ist keine verlässliche Gasmessung vorhanden, kann der **Methanertrag** über die erzeugte elektrische Arbeit näherungsweise ermittelt werden. Dabei besitzt die realistische **Abschätzung des elektrischen Wirkungsgrads** einen erheblichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis. So ist im Vergleich zu den Herstellangaben über die gesamte Laufzeit des BHKW im Durchschnitt mit einem Wirkungsgradverlust von mindestens 3 % zu rechnen. Zudem sind unter Umständen zusätzliche **Zündölmengen und mögliche Gasverluste** bei der Rückrechnung zu berücksichtigen.

Das Restmethanpotential lässt sich entsprechend der verfügbaren **Richtlinien** (siehe weiterführende Literatur und Richtlinien) in Anlehnung an typische Batchversuche zur Substratcharakterisierung ermitteln. Um dabei vom spezifischen Restmethanpotential je kg Gärrest auf das absolute Restmethanpotential zu schließen, wird die ausgetragene **Gesamtmasse des Gärrests** benötigt. Ist der Gesamtmassen-

strom des Gärrests nicht bekannt, lässt sich dieser aus der Differenz zwischen zugeführter Frischmasse und der Masse an gebildetem Biogas (absoluter Biogasertrag) abschätzen.

Berechnungsmethoden

$$\eta = \frac{\dot{V}_{\text{CH}_4}}{\dot{V}_{\text{CH}_4|\text{max}}} \cdot 100$$

Methanpotential und Methanertrag

$$\eta = \frac{\dot{V}_{\text{CH}_4|\text{max}} - \dot{V}_{\text{CH}_4|\text{res}}}{\dot{V}_{\text{CH}_4|\text{max}}} \cdot 100 = \frac{\dot{V}_{\text{CH}_4|\text{max}} - V_{\text{CH}_4|\text{res}} \cdot \dot{m}_{\text{aus}}}{\dot{V}_{\text{CH}_4|\text{max}}} \cdot 100$$

Methanpotential und Restmethanpotential

$$\eta = \frac{\dot{V}_{\text{CH}_4}}{\dot{V}_{\text{CH}_4} + \dot{V}_{\text{CH}_4|\text{res}}} \cdot 100 = \frac{\dot{V}_{\text{CH}_4}}{\dot{V}_{\text{CH}_4} + V_{\text{CH}_4|\text{res}} \cdot \dot{m}_{\text{aus}}} \cdot 100$$

Methanertrag und Restmethanpotential

$$\dot{m}_{\text{aus}} = \dot{m}_{\text{ein}} - \frac{\dot{V}_{\text{CH}_4}}{c_{\text{CH}_4}} \cdot \rho_B \cdot 100 = \dot{m}_{\text{ein}} - \dot{V}_{\text{CH}_4} \cdot \frac{c_{\text{CH}_4} \cdot 16 + (100 - c_{\text{CH}_4}) \cdot 44}{c_{\text{CH}_4} \cdot V_{\text{norm}}}$$

c_{CH_4}	Methankonzentration im Biogas	[% CH ₄]
\dot{m}_{ein}	Substratmassenstrom (Frischmasse) je Tag	[kg d ⁻¹]
\dot{m}_{aus}	Gärrestmassenstrom je Tag	[kg d ⁻¹]
\dot{V}_{CH_4}	Absoluter Methanertrag je Tag	[m ³ CH ₄ d ⁻¹]
$\dot{V}_{\text{CH}_4 \text{max}}$	Absolutes Methanpotential je Tag	[m ³ CH ₄ d ⁻¹]
$\dot{V}_{\text{CH}_4 \text{res}}$	Absolutes Restmethanpotential je Tag	[m ³ CH ₄ d ⁻¹]
$V_{\text{CH}_4 \text{res}}$	Spezifisches Restmethanpotential	[m ³ CH ₄ kg ⁻¹ Gärrest]
V_{norm}	Normvolumen (101,325 kPa und 0 °C) 22,414 L mol ⁻¹	[L mol ⁻¹]
η	Effizienz	[%]
ρ_B	Dichte Biogas	[kg m ⁻³]

Bestimmung des Methanertrags

Gasmotor (Ottomotor)		Zündstrahlmotor
$\dot{V}_{\text{CH}_4} = \frac{W_{\text{el,brutto}} \cdot 100}{\eta_{\text{el}} \cdot H_{i,\text{CH}_4} \cdot T_N}$		$\dot{V}_{\text{CH}_4} = \frac{W_{\text{el,brutto}} \cdot 100 - H_{i,\text{ZÖ}} \cdot V_{\text{ZÖ}} \cdot \eta_{\text{el}}}{\eta_{\text{el}} \cdot H_{i,\text{CH}_4} \cdot T_N}$
H_{i,CH_4}	Heizwert Methan 9,97 kWh m ⁻³	[kWh m ⁻³]
$H_{i,\text{ZÖ}}$	Heizwert Zündöl 9,07 kWh L ⁻¹	[kWh L ⁻¹]
T_N	Nennzeitraum	[d]
\dot{V}_{CH_4}	Absoluter Methanertrag je Tag	[m ³ CH ₄ d ⁻¹]
$V_{\text{ZÖ}}$	Zündölverbrauch	[L]
$W_{\text{el,brutto}}$	Bruttostrommenge nach dem BHKW	[kWh]

η_{el} Elektrischer Wirkungsgrad [%]

Vor- und Nachteile

- ✓ Verwendung praxisnaher Kenngrößen
- ✓ Durchschnittliche Gasproduktion bzw. BHKW-Leistung ist in der Regel bekannt
- ✗ Experimentelle Bestimmung des (Rest-)Methanpotentials ist vergleichsweise aufwändig (im Vergleich zur chemischen Substratanalytik)
- ✗ Große Unsicherheiten bei der Bestimmung einzelner Betriebsgrößen (z. B. Gasverluste oder BHKW-Wirkungsgrad)

Weiterführende Literatur und Richtlinien

VDI 4630 (2016): Richtlinie zur Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche 4630. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin

VDLUFA (2019) Methodenvorschrift „Bestimmung des Restgaspotentials aus Gärresten im Labortest“. VDLUFA Methodenbuch VII, Umweltanalytik, 4.1.2. Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA, Hrsg.), VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Oechsner, H. (2015): Bestimmung des Restgas-/Restmethanpotenzials. In: Liebetrau, J.; Pfeiffer, D. und Thrän, D. (2015): Messmethodensammlung Biogas. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Vol. 7, Hrsg. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), Seite 173-177

3.2 Massenbilanzierung

Neben der direkten Bestimmung der Effizienz anhand der (Rest-)Methanpotentiale und -erträge lässt sich der Umsatz der FoTS im stationären Betrieb auch durch die Bilanzierung der ein- und ausgehenden Masseströme zu evaluieren. Um eine vollständige Massenbilanz erstellen zu können, ist zu Beginn ein **definierter Bilanzraum** festzulegen (Abbildung 10). Im jeweiligen Anwendungsfall ist es dabei möglich, die Systemgrenze auf das gesamte Anlagenkonzept einschließlich mehrerer Fermenterinstufen und zusätzlicher Aggregate zur Substrat-, Gärrest- oder Biogasaufbereitung zu erweitern.

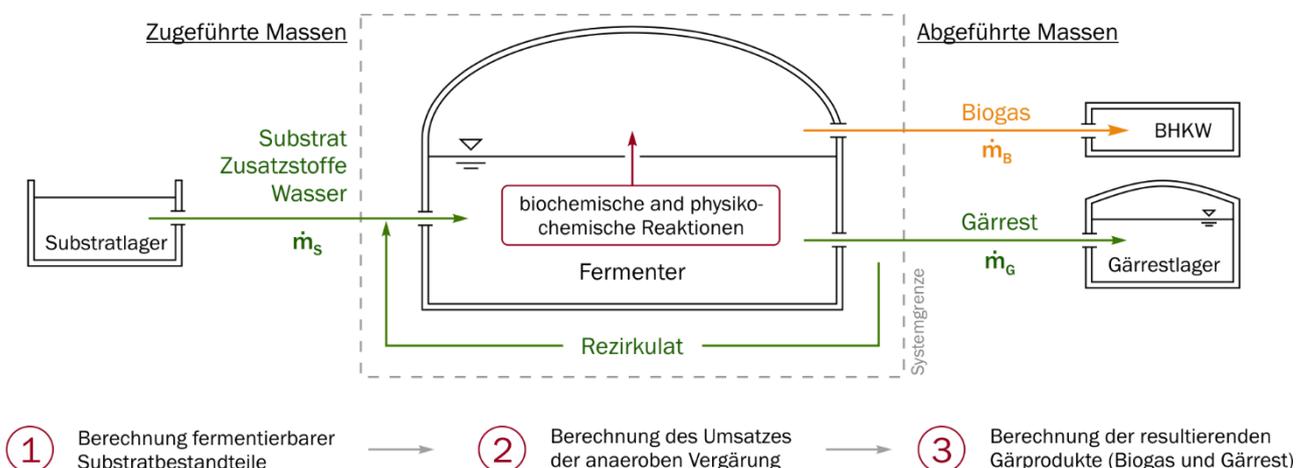


Abbildung 10: Systematische Vorgehensweise zur Massenbilanzierung einer Biogasanlage

Dabei gilt es, alle Massenströme, welche in das System (über die Systemgrenze) ein- und austreten, zu bestimmen. Die dem System **zugeführten Massen** beinhalten in der Regel die eingesetzten Substrate sowie zusätzliche Additive (Spurenelemente, Enzyme oder Präparate zur H₂S-Bindung) und Wasser. Das gebildete Biogas und der Gärrest verlassen den Prozess als **abgeführte Massen**.

Die zugeführte Substratmischung – einschließlich möglicher Zusatzstoffe und Wassermengen – wird als bekannt vorausgesetzt. Ausgehend von den **fermentierbaren Substratbestandteilen** ① der zugeführten Substrate lässt sich unter Nutzung der vorhandenen Messdaten über den jeweiligen **Umsatz** ② im Fermenter auf die resultierenden Mengen und die Eigenschaften der **Gärprodukte** ③ schließen.

Weiterführende Literatur

Weinrich, S.; Weißbach, F.; Pröter, J.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2014): Massenbilanzierung von Biogasanlagen: Möglichkeiten und Herausforderungen für die Effizienzbewertung von Biogasanlagen. In: *Ta-gungsband des 8. Rostocker Bioenergieforums*, S. 369–379

3.2.1 Berechnung der fermentierbaren Substratbestandteile

Eine belastbare **Charakterisierung der zugeführten Substrate** ist Voraussetzung für eine aussagekräftige Massenbilanzierung einer Biogasanlage. Die Gasproduktion wird dabei gezielt auf die verfügbare bzw. umgesetzte FoTS der eingesetzten Substrate bezogen. Grundsätzlich lässt sich die FoTS anhand der verfügbaren Methoden in Kapitel 2.3.1 (Weißbach oder Ligningehalt) direkt berechnen. Zusätzlich ist es möglich, die FoTS auf Basis der Futtermittelanalyse in Kapitel 2.3.2 durch Summierung der einzelnen Nährstoffe an fermentierbaren Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten zu bestimmen. Die FoTS der verwendeten Substrate kann auch durch entsprechende Umrechnung des Methanpotentials oder des Brennwertes approximiert werden (siehe Kapitel 2.3).

3.2.2 Berechnung des Umsatzes der anaeroben Vergärung

In der chemischen Reaktionstechnik wird der Umsatz über das Verhältnis der umgesetzten Stoffmenge zur eingesetzten Stoffmenge bestimmt und bezieht sich folglich nur auf die **potentiell abbaubaren Substratbestandteile**. In diesem Sinne lässt sich der Begriff Umsatz auch auf die FoTS für die Bilanzierung und Effizienzbewertung von Biogasanlagen anwenden. Grundsätzlich existieren in Abhängigkeit von den verfügbaren Messdaten und Kenngrößen unterschiedliche Möglichkeiten, den Umsatz mithilfe des Methanertrags oder anhand von Gärrestanalysen (einschließlich Restmethanpotential) zu berechnen.

Methanertrag

Die Bestimmung des Umsatzes der FoTS anhand des Methanertrags ähnelt der grundsätzlichen Herangehensweise in Kapitel 0 (Methanertrag und (Rest-)Methanpotential). So wird auch hier der gemessene Methanertrag dem verfügbaren Methanpotential gegenübergestellt. In diesem Fall wird das Methanpotential auf Basis der FoTS (gemäß Kapitel 2.3.1) charakterisiert. Ist der Methanertrag im stationären Betrieb der jeweiligen Biogasanlage nicht bekannt, lässt sich die zugrundeliegende Methanbildung

durch die eingespeiste Strommenge (elektrische Arbeit) anhand der Berechnungsmethoden in Kapitel 0 ermitteln.

Berechnungsmethode

$$\eta = \frac{\dot{V}_{\text{CH}_4} \cdot 10^{11}}{\dot{m}_S \cdot \text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot Y_{\text{FoTS}}}$$

η	Umsatz FoTS	[% FoTS]
\dot{V}_{CH_4}	Methanertrag	[m ³ CH ₄ d ⁻¹]
\dot{m}_S	Massestrom Substrat	[kg d ⁻¹]
TS _S	Trockensubstanzgehalt Substrat	[% FM]
oTS _S	Organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]
FoTS _S	Fermentierbare organische Trockensubstanz Substrat	[% oTS]
Y _{FoTS}	Stöchiometrisches Methanpotential 420 L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS	[L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS]

Stöchiometrisches Methanpotential mit 420 L CH₄ kg⁻¹ FoTS für Halm- und Körnerfrüchte nach Weißbach (Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. In: Pflanzenbauwissenschaften, Vol. 13, Nr. 2, S. 72–85, 2009)

Vor- und Nachteile

- ✓ Direkter Vergleich zwischen Methanertrag und -potential (berechnet anhand der FoTS)
- ✓ Durchschnittliche Gasproduktion bzw. BHKW-Leistung ist in der Regel bekannt
- ✗ Starker Einfluss möglicher Messfehler
- ✗ Große Unsicherheiten bei der Bestimmung einzelner Betriebsgrößen (z. B. Gasverluste oder BHKW-Wirkungsgrad)

Restmethanpotential

Durch diskontinuierliche Vergärungsversuche (Batchversuche) mit dem Gärrest lässt sich auf das jeweilige Restmethanpotential schließen. Das Restmethanpotential kennzeichnet das **ungenuzte Methanpotential** (bzw. die verbleibende FoTS) im Gärrest und lässt sich somit als direkter **Indikator für die Effizienz** der biochemischen Umsetzung im Fermenter verwenden. Das Restmethanpotential wird üblicherweise im mesophilen Temperaturbereich bei 37 °C bestimmt (im Gegensatz zur Emissionsmethanpotentialbestimmung welches bei 20 °C ermittelt wird).

Grundsätzlich kann das Restmethanpotential dabei auch gemeinsam mit dem Methanertrag zur Bestimmung des verfügbaren Methanpotentials der eingesetzten Substrate genutzt werden, oder umgekehrt anhand des verfügbaren Potentials zur Abschätzung des Methanertrags im stationären Zustand verwendet werden (siehe Kapitel 0). In der folgenden Berechnungsmethode wird dabei lediglich die **FoTS des Substrats** sowie das **Restmethanpotential im Gärrest** benötigt, sodass auf die experimentelle Ermittlung von Methanpotentialen oder -erträgen (zur Ermittlung der täglichen Gärrestmengen) verzichtet werden kann.

Berechnungsmethode

$$\eta_{\text{FoTS}} = \frac{\text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot Y_{\text{FoTS}} \cdot 10^2 - V_{\text{CH}_4|\text{res}} \cdot 10^8}{\text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot (Y_{\text{FoTS}} - V_{\text{CH}_4|\text{res}} \cdot (100 - f_X + f_W) \cdot 10^{-2})}$$

FoTS _S	Fermentierbare organische Trockensubstanz Substrat	[% oTS]
f _W	Stöchiometrischer Wasserbedarf 11,25 % FoTS	[% FoTS]
f _X	Biomassewachstum 5 % FoTS	[% FoTS]
oTS _S	Organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]
TS _S	Trockensubstanz Substrat	[% FM]
V _{CH₄ res}	Spezifisches Restmethanpotential	[L CH ₄ kg ⁻¹ Gärrest]
Y _{FoTS}	Stöchiometrisches Methanpotential 420 L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS	[L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS]
η _{FoTS}	Umsatz FoTS	[% FoTS]

Stöchiometrisches Methanpotential mit 420 L CH₄ kg⁻¹ FoTS für Halm- und Körnerfrüchte nach Weißbach (Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. In: Pflanzenbauwissenschaften, Vol. 13, Nr. 2, S. 72-85, 2009)

Vor- und Nachteile

- ✓ Probenahme ohne zusätzliche Messtechnik an jeder Biogasanlage möglich
- ✗ Durchführung von experimentellen Restmethanpotentialbestimmungen relativ aufwändig und zeitintensiv

Gärrestanalysen

Bei der Charakterisierung des Gärrestes ist zu berücksichtigen, dass dieser nicht nur aus anorganischer Substanz und Wasser besteht, sondern zusätzlich nicht nutzbare und nicht umgesetzte organische Trockensubstanz sowie neu gebildete Bakterienbiomasse enthält (Abbildung 3). Im Allgemeinen bleibt dabei die absolute Masse der zugeführten Asche (anorganische TS) im Gärrest erhalten und kann somit als **interner Marker** verwendet werden. Durch den oTS-Abbau steigt der Rohaschegehalt in der TS vom Substrat zum Gärrest erheblich an. Deshalb lässt sich anhand der Analyse von repräsentativen Substrat- und Gärrestproben auf den jeweiligen Umsatz, d.h. den **Ausnutzungsgrad der FoTS** schließen. Dabei ist sicherzustellen, dass sich die **Anlage im stationären Zustand befindet** und alle anorganischen Additive in der Bilanzierung mit einbezogen werden.

Berechnungsmethode

$$\eta_{\text{FoTS}} = \frac{10^8}{\text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot (100 - f_X)} \cdot \left(1 - \frac{100 - \text{oTS}_S}{100 - \text{oTS}_G}\right)$$

$$\eta_{\text{FoTS}} = \frac{10^8}{\text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot [100 - f_X - \text{TS}_G \cdot (100 - f_X + f_W) \cdot 10^{-2}]} \cdot \left(1 - \frac{\text{TS}_G}{\text{TS}_S}\right)$$

FoTS _S	Fermentierbare organische Trockensubstanz Substrat	[% oTS]
f _W	Stöchiometrischer Wasserbedarf 11,25 % FoTS	[% FoTS]
f _X	Biomassewachstum 5 % FoTS	[% FoTS]
oTS _G	Organische Trockensubstanz Gärrest	[% TS]
oTS _S	Organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]
TS _G	Trockensubstanz Gärrest	[% FM]
TS _S	Trockensubstanz Substrat	[% FM]
η _{FoTS}	Umsatz FoTS	[% FoTS]

Stöchiometrischer Wasserbedarf von 11,25 % FoTS und mikrobielles Biomassewachstum von 5 % FoTS für Halm- und Körnerfrüchte nach Weißbach (Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. In: Pflanzenbauwissenschaften, Vol. 13, Nr. 2, S. 72–85, 2009)

Vor- und Nachteile

- ✓ TS- und oTS-Gehalt im Gärrest als Standardanalytik häufig in der großtechnischen Anlagenpraxis verfügbar bzw. Probenahme ohne zusätzliche Messtechnik an jeder Biogasanlage möglich
- ✗ Geringe Messunsicherheiten (< 1 %) führen zu starken Abweichungen im Berechnungsergebnis
- ✗ Häufig werden zu hohe Umsätze (> 100 %) ausgewiesen

Reaktionskinetik

Für die Vorhersage der Biogasproduktion lässt sich der Umsatz im stationären Zustand über die charakteristische **Reaktionskinetik (1. Ordnung)** der zugeführten Substratmischung bzw. Substratbestandteile bestimmen. Üblicherweise bestehen die fermentierbaren Nährstoffe aus unterschiedlich schnell abbaubaren Fraktionen, sodass für eine detaillierte Abbildung ggf. unterschiedliche, sich überlagernde Reaktionskinetiken zu verwenden sind (Abbildung 2). Dabei kann die Fraktionierung der verschiedenen Substratbestandteile entweder auf rein empirischen Festlegungen (z. B. schneller oder langsamer abbaubare FoTS) beruhen oder sich auf die Kenntnis des typischen Verhaltens analytischer Stoffgruppen (z. B. Zucker, Stärke, Cellulose, Hemicellulosen, Fette und Proteine) stützen.

Die **substratspezifischen Reaktionskonstanten** lassen sich in erster Näherung anhand von Laborversuchen bestimmen. Dabei ist die Übertragbarkeit der im Labormaßstab gewonnen kinetischen Kenngrößen auf den realen Prozesszustand einer großtechnischen Biogasanlage bis heute nicht eindeutig bekannt und somit kritisch zu hinterfragen.

Berechnungsmethode

$$\eta_{\text{FoTS}} = \frac{k \cdot \text{HRT}}{1 + k \cdot \text{HRT}} \cdot 100$$

HRT	Verweilzeit	[d]
k	Reaktionskinetik erster Ordnung	[d ⁻¹]
η _{FoTS}	Umsatz FoTS	[% FoTS]

Vor- und Nachteile

- ✓ Einfache Bestimmung des Umsatzes unter Berücksichtigung der konkreten Betriebsbedingungen (Verweilzeit)
- ✗ Konkrete Angaben zu repräsentativen Reaktionskinetiken einzelner Substrate oder Substratmischungen häufig nicht verfügbar.

3.2.3 Berechnung der resultierenden Biogas- und Gärrestmengen

In Abhängigkeit von den **fermentierbaren Substratbestandteilen** und deren **spezifischem Umsatz** lassen sich die resultierenden Mengen und charakteristischen Eigenschaften der erzeugten Fermentationsprodukte (Biogas bzw. Methan und Gärrest) anhand einer einfachen Massenbilanz eindeutig bestimmen.

Berechnungsmethode

$$\dot{V}_{\text{CH}_4} = \dot{m}_S \cdot \text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot \eta_{\text{FoTS}} \cdot Y_{\text{FoTS}} \cdot 10^{-11}$$

$$Y_G = \frac{\text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot (100 - \eta) \cdot Y_{\text{FoTS}} \cdot 10^{-8}}{1 - \text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot \eta_{\text{FoTS}} \cdot (100 - f_X + f_W) \cdot 10^{-10}}$$

$$\dot{m}_G = \dot{m}_S \cdot [1 - \text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot \eta_{\text{FoTS}} \cdot (100 - f_X + f_W) \cdot 10^{-10}]$$

$$\text{oTS}_G = \frac{\text{oTS}_S \cdot (100 - \text{FoTS}_S \cdot \eta_{\text{FoTS}} \cdot (100 - f_X) \cdot 10^{-4})}{100 - \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot \eta_{\text{FoTS}} \cdot (100 - f_X) \cdot 10^{-6}}$$

$$\text{TS}_G = \frac{\text{TS}_S \cdot (100 - \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot \eta_{\text{FoTS}} \cdot (100 - f_X) \cdot 10^{-6})}{100 - \text{TS}_S \cdot \text{oTS}_S \cdot \text{FoTS}_S \cdot \eta_{\text{FoTS}} \cdot (100 - f_X + f_W) \cdot 10^{-8}}$$

f_W	Stöchiometrischer Wasserbedarf 11,25 % FoTS	[% FoTS]
f_X	Biomassewachstum 5 % FoTS	[% FoTS]
FoTS_S	Fermentierbare organische Trockensubstanz Substrat	[% oTS]
\dot{m}_G	Massestrom Gärrest	[kg d ⁻¹]
\dot{m}_S	Massestrom Substrat	[kg d ⁻¹]
oTS_G	Organische Trockensubstanz Gärrest	[% TS]
oTS_S	Organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]
TS_G	Trockensubstanz Gärrest	[% FM]
TS_S	Trockensubstanzgehalt Substrat	[% FM]
$V_{\text{CH}_4 \text{res}}$	Spezifisches Restmethanpotential	[L CH ₄ kg ⁻¹ Gärrest]
Y_{FoTS}	Stöchiometrisches Methanpotential 420 L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS	[L CH ₄ kg ⁻¹ FoTS]
\dot{V}_{CH_4}	Methanertrag	[m ³ CH ₄ d ⁻¹]
η_{FoTS}	Umsatz FoTS	[% FoTS]

3.3 Energiebilanzierung

Entsprechend der Berechnung des biochemischen Umsatzes der fermentierbaren Substratbestandteile lassen sich auch die unterschiedlichen Wege der Energiewandlung in einer Biogasanlage bilanzieren. Dabei umfasst die Systemgrenze gemäß Abbildung 11 üblicherweise die **gesamte Anlagenstruktur** (einschließlich aller baulichen und technischen Anlagen zur Strom- und Wärmeproduktion).

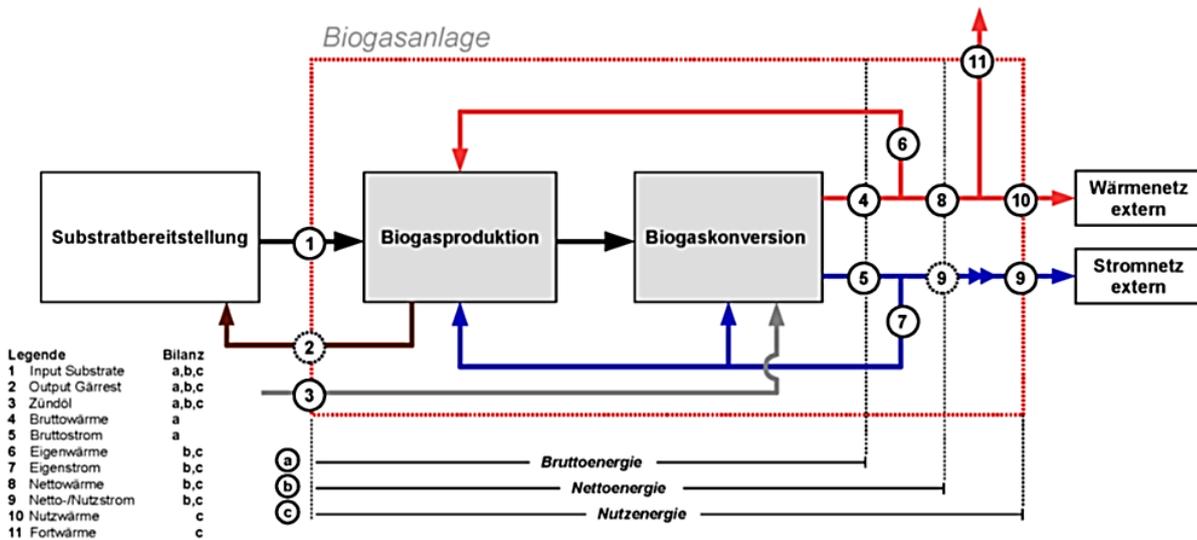


Abbildung 11: Kenngrößen und Messpunkte zur Energiebilanzierung einer Biogasanlage

Berechnung des Brennstoffausnutzungsgrads

In Analogie zur konventionellen Energie- und Kraftwerkstechnik lässt sich der mittlere Brennstoffausnutzungsgrad als Kenngröße zur **energetischen Effizienzbewertung** von Biogasanlagen verwenden. Er ist als der Quotient aus allen in einem bestimmten Zeitraum nutzbar abgegebenen Energien und der gesamten zugeführten Energie definiert.

In einer konventionellen Biogasanlage werden die in Kraft-Wärme-Kopplung **erzeugte elektrische und thermische Arbeit** als Zielenergien definiert. Dabei ist zu beachten, dass lediglich die **nutzbar abgegebenen Energiemengen** berücksichtigt werden, sodass sich der Eigenenergiebedarf sowie die tatsächlich (extern) genutzte Wärmemenge in der Gesamteffizienz der Biogasanlage widerspiegeln. Der betrachtete Zeitraum schließt alle Pausen-, Stillstands-, Anfahr- und Abfahrzeiten mit ein.

Als Aufwendung wird die im **Substrat gebundene chemische Energie** in Form des Brennwertes der eingesetzten Substrate betrachtet. Für eine aussagekräftige Bewertung der anaerob verfügbaren Energie ist es auch hier sinnvoll, den Brennstoffausnutzungsgrad bzw. den Brennwert der eingesetzten Substrate auf den fermentierbaren Anteil zu beziehen (siehe Kapitel 2.3.4). Zusätzliche Betriebsstoffe wie Rapsöl oder Biodiesel müssen im Rahmen der Substratbeschreibung bei der Berechnung der eingesetzten Substrateleistung berücksichtigt werden.

Berechnungsmethode

Volleinspeisung

Eigenstrombedarf wird extern bezogen

$$W_{el,netto} = W_{el,nutz} - W_{el,eigen}$$

Überschusseinspeisung

Eigenstrombedarf wird intern gedeckt

$$W_{el,netto} = W_{el,nutz}$$

$$P_S = \left(\frac{\dot{m}_S \cdot TS_S \cdot oTS_S \cdot H_S}{10^4} + \frac{H_{S,ZÖ} \cdot V_{ZÖ}}{T_N} \right) \cdot \frac{1}{86400}$$

$$\bar{\omega} = \frac{W_{el,netto} + Q_{nutz}}{P_S \cdot T_N \cdot 24}$$

H_S	Brennwert fermentierbaren Substratbestandteile	[kJ kg ⁻¹ oTS]
$H_{S,ZÖ}$	Brennwert Zündöl 35.000 kJ L ⁻¹	[kJ L ⁻¹]
\dot{m}_S	Massestrom Substrat	[kg d ⁻¹]
oTS_S	Organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]
P_S	Substrateistung	[kW]
Q_{nutz}	Nettowärmemenge (genutzte Wärmemenge)	[kWh]
T_N	Nennzeitraum	[d]
TS_S	Trockensubstanz Substrat	[% FM]
$V_{ZÖ}$	Zündölverbrauch	[L]
$W_{el,eigen}$	Eigenstrombedarfsmenge	[kWh]
$W_{el,netto}$	Nettostrommenge	[kWh]
$W_{el,nutz}$	Nutzstrommenge (ingespeiste Strommenge)	[kWh]
$\bar{\omega}$	Brennstoffausnutzungsgrad	[-]

Vor- und Nachteile

- ✓ Energetische Gesamtbewertung einer Biogasanlage (einschließlich aller technischen Anlagen zur Strom- und Wärmeproduktion)
- ✓ Etablierte Kenngröße aus der Verbrennungs- bzw. Kraftwerkstechnik
- ✓ Eingangsdaten (Netto- bzw. Nutzstrommenge oder Nettowärmemenge) häufig bekannt
- ✗ Keine präzisen Daten zum Brennwert fermentierbare Substratbestandteile bekannt
- ✗ Keine qualitativen Aussagen zu verfahrenstechnischen Mängeln

Kapazitätzahl und Arbeitsausnutzung

Für eine detaillierte Interpretation des ermittelten Brennstoffausnutzungsgrades können Arbeitsausnutzung und Kapazitätzahl berechnet werden. Die Kapazitätzahl beschreibt das Verhältnis der installierten Verstromungs- und Wärmeleistungen aller Konversionsaggregate zur stündlich zugeführten Substratenergiemenge (theoretischer Wert). Die Arbeitsausnutzung setzt die tatsächlich nutzbar

abgegebenen Strommengen (Einspeisezähler am Trafo) und Wärmemengen (nicht für den Biogasprozess verwendete Wärme - Zähler der jeweiligen Wärmelieferstrecke) zu den theoretisch produzierbaren Energiemengen im Betrachtungszeitraum ins Verhältnis. Das Zerlegen des Brennstoffausnutzungsgrades in eine leistungs- und eine arbeitsbezogene Kennzahl ermöglicht eine eingehendere Interpretation möglicher Schwachstellen bzw. Ineffizienzen einer Biogasanlage.

Berechnungsmethode

Volleinspeisung Eigenstrombedarf wird extern bezogen		Überschusseinspeisung Eigenstrombedarf wird intern gedeckt
$W_{el,netto} = W_{el,nutz} - W_{el,eigen}$		$W_{el,netto} = W_{el,nutz}$
$P_S = \left(\frac{\dot{m}_S \cdot TS_S \cdot oTS_S \cdot H_S}{10^4} + \frac{H_{S,ZÖ} \cdot V_{ZÖ}}{T_N} \right) \cdot \frac{1}{86400}$		
Kapazitätzahl	Arbeitsausnutzung	Brennstoffausnutzungsgrad
$K = \frac{P_N + \dot{Q}_N}{P_S}$	$n_A = \frac{W_{el,netto} + Q_{nutz}}{(P_N + \dot{Q}_N) \cdot T_N \cdot 24}$	$\bar{\omega} = K \cdot n_A$
H_S	Brennwert fermentierbaren Substratbestandteile	[kJ kg ⁻¹ oTS]
$H_{S,ZÖ}$	Brennwert Zündöl 35.000 kJ L ⁻¹	[kJ L ⁻¹]
K	Kapazitätzahl	[-]
\dot{m}_S	Massestrom Substrat	[kg d ⁻¹]
n_A	Arbeitsausnutzung	[-]
oTS_S	Organische Trockensubstanz Substrat	[% TS]
P_N	Elektrische Nennleistung	[kW]
P_S	Substratleistung	[kW]
\dot{Q}_N	Thermische Nennleistung	[kW]
Q_{nutz}	Nettowärmemenge (genutzte Wärmemenge)	[kWh]
T_N	Nennzeitraum	[d]
TS_S	Trockensubstanz Substrat	[% FM]
$V_{ZÖ}$	Zündölverbrauch	[L]
$W_{el,eigen}$	Eigenstrombedarfsmenge	[kWh]
$W_{el,netto}$	Nettostrommenge	[kWh]
$W_{el,nutz}$	Nutzstrommenge (ingespeiste Strommenge)	[kWh]
$\bar{\omega}$	Brennstoffausnutzungsgrad	[-]

Weiterführende Literatur

VDI 4661 (2014): Energiekenngrößen – Grundlagen – Methodik. Beuth Verlag, Berlin

Fischer, E.; Postel, J.; Ehrendreich, F.; Nelles, M. (2016): Energetische Bewertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mithilfe des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades. In: *Landtechnik*, Vol. 71, Nr. 4, S. 139-154

Postel, J.; Fischer, E.; Barchmann, T.; Rensberg, N.; Stur, M.: Potenziale zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Biogasanlagen – Energetische Effizienz von Repoweringmaßnahmen. DBFZ Report Nr. 28, Hrsg. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig, 2016

3.4 Methodenauswahl

Zur Effizienzbewertung von Biogasanlagen stehen neben Batchversuchen zur Ermittlung von (Rest-) Methanpotentialen auch die unterschiedlichen Bilanzierungswege auf Basis der fermentierbaren Substratbestandteile (FoTS) oder des Brennstoffausnutzungsgrads zur Verfügung.

Methodenvergleich und -bewertung

Für einen exemplarischen Methodenvergleich wurden unterschiedlicher Verfahren zur Effizienzbewertung der Gärstrecke ausgewertet und evaluiert. Dabei stützen sich die vorliegenden Untersuchungsergebnisse lediglich auf einen Doppelversuch im DBFZ-Biogaslabor. In Abhängigkeit von den jeweiligen Messergebnissen in der großtechnischen Anlagenpraxis ist grundsätzlich mit **größeren Unsicherheiten** bei den einzelnen Bestimmungsmethoden zu rechnen. Die Mittelwerte der benötigten Kenngrößen (Gasmessung und Gärrestanalyse) im stationären Betrieb der kontinuierlich betriebenen Laborversuche zur Monovergärung von Maissilage sind im Folgenden zusammengefasst.

Biogasertrag [L kg ⁻¹ oTS d ⁻¹]	Methanertrag [L kg ⁻¹ oTS d ⁻¹]	TS [% FM]	oTS [% TS]
660 ± 24	350 ± 15	7,6 ± 0,3	84,9 ± 0,5

Mittelwerte und Standardabweichung von zwei 10 L Reaktoren, welche im Parallelversuch bei konstanter Raumbelastung (3,5 g oTS L⁻¹ d⁻¹) und Verweilzeit (HRT = 60 Tage) mit identischem Probenmaterial (Maissilage, Wasser und zusätzliche Spurenelemente) einmal täglich beschickt wurde. Die Versuche wurden bei mesophilen Temperaturen (38 ± 1 °C) über einen Zeitraum von 210 Tagen durchgeführt. Die Bestimmung der charakteristischen Kenngrößen erfolgte im stationären Zustand (Mittelwert über die letzten 60 Versuchstage).

Dieselbe Maissilage wurde dabei auch in den KTBL/VDLUFA-Ringversuchen Biogas und Rohrnährstoffen anhand von Batchversuchen und der Futtermittelanalyse (nach Weender und Van Soest) in unterschiedlichen Laboren untersucht. Im Folgenden lassen sich nun die unterschiedlichen **Methoden zur Effizienzbewertung** anhand von Batchversuchen oder den unterschiedlichen Bilanzierungswegen der charakteristischen Substratbestandteile auf Basis der FoTS miteinander vergleichen (Abbildung 12). So resultiert der vergleichsweise niedrige KTBL-Richtwert (auf Basis von 59 Batchversuchen) für das Methanbildungspotential der verwendeten Maissilage dabei in einem Umsatz oberhalb des theoretischen Maximalwerts von 100 %. Auch bei einer Vielzahl an Laborergebnissen der Batchversuche im KTBL/VDLUFA-Ringversuch 2017 ist mit unrealistisch hohen Umsätzen zu rechnen. Dabei ist im großtechnischen Anlagenbetrieb selten eine präzise Gasvolumenstrommessung installiert, sodass sich entsprechende Aussagen zur Biogasproduktionsrate häufig nur auf Basis der eingespeisten Strommenge und entsprechenden Berechnung über das Blockheizkraftwert abschätzen lassen. Entsprechende Unsi-

cherheiten bei der Rückrechnung – wie beispielsweise die Definition des elektrischen Wirkungsgrads oder die Quantifizierung von Gas- und Trafoverlusten – würden den möglichen Wertebereich bei der Ermittlung der Biogaserträge (und der darauf beruhenden Effizienzbewertung) zusätzlich vergrößern.

Untersuchungen zur Datengrundlage der KTBL-Richtwerten in Kapitel 2.5 bzw. Abbildung 7 bestätigen, dass die im großtechnischem Betrieb gemessenen Methanerträge sowohl über als auch unterhalb der Methanpotentiale aus Batchversuche liegen und somit theoretisch in Umsätzen oberhalb von 100 % resultieren können.

Zusätzlich werden drei unterschiedliche Varianten zur Berechnung der Effizienz anhand der Bilanzierung der fermentierbaren Substratbestandteile (FoTS) evaluiert. Innerhalb der jeweiligen Berechnungsvarianten auf Basis des Methanertrags, der TS- oder oTS-Analysen im Gärest sind dabei drei unterschiedliche Wege zur Schätzung der fermentierbaren Substratbestandteile auf Basis der

- Verdauungskoeffizienten der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG),
- Schätzgleichungen zur FoTS nach Weißbach,
- Ligninbestimmung ($\text{FoTS} = \text{oTS} - \text{ADL}$)

anhand der laborspezifischen Nährstoffanalysen der identischen Maissilage im KTBL/VDLUFA Ringversuch Biogas 2016 berücksichtigt worden. Grundsätzlich bestätigt sich auch hier, dass die Anwendung der DLG-Verdauungsquotienten in allen Bilanzierungsvarianten die verfügbare FoTS sowie das daraus resultierenden Methanpotential der Substrate unterschätzen (siehe VDI 4630 oder Keymer & Schilcher in Abbildung 8) und somit eine Effizienz über 100 % ausweisen. Zusätzlich wird das Ergebnis der Effizienzbewertung auf Basis des TS- und oTS-Gehalts im Gärest nur von den Messunsicherheiten der einzelnen Nährstoffanalysen zur Bestimmung der FoTS sowie einem repräsentativen Messfehler der entsprechenden Gärrestanalysen ($\pm 1,5\%$) um den Mittelwert beeinflusst.

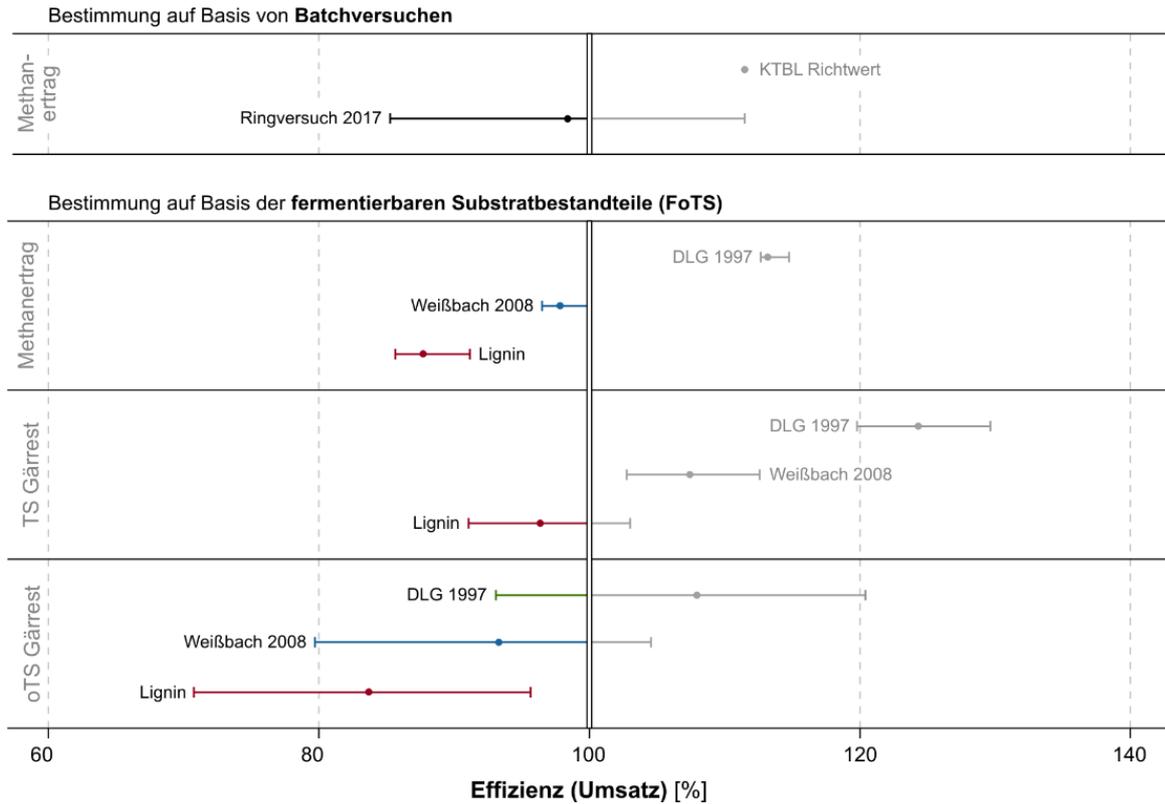


Abbildung 12: Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Effizienzbewertung einer Maismonovergärung im Labormaßstab

Trotz vergleichsweise **präziser Analyseergebnisse** ist bereits bei geringen Unsicherheiten in der oTS-Bestimmung mit einem **großen Wertebereich** des daraus resultierenden Umsatzes zu rechnen, welcher eine eindeutige Effizienzbewertung maßgeblich erschwert. Der Variationskoeffizient bei der Berechnung der Effizienz auf Basis der TS-Analysen vom Gärrest ist grundsätzlich geringer, jedoch befinden sich die entsprechenden Kennzahlen der verwendeten Methoden zur FoTS-Bestimmung häufig oberhalb von 100 %.

Handlungsempfehlung

Grundsätzlich lässt sich die Effizienz einer Biogasanlage anhand der biologischen Umsetzung in der Gärstrecke oder über die Energiebilanzierung der Gesamtanlage, einschließlich aller technischen Anlagen zur Strom- und Wärmeproduktion, bewerten (Abbildung 13). In Abhängigkeit von der konkreten Zielstellung und den verfügbaren Messdaten besitzt jede Methode **individuelle Vor- und Nachteile**.

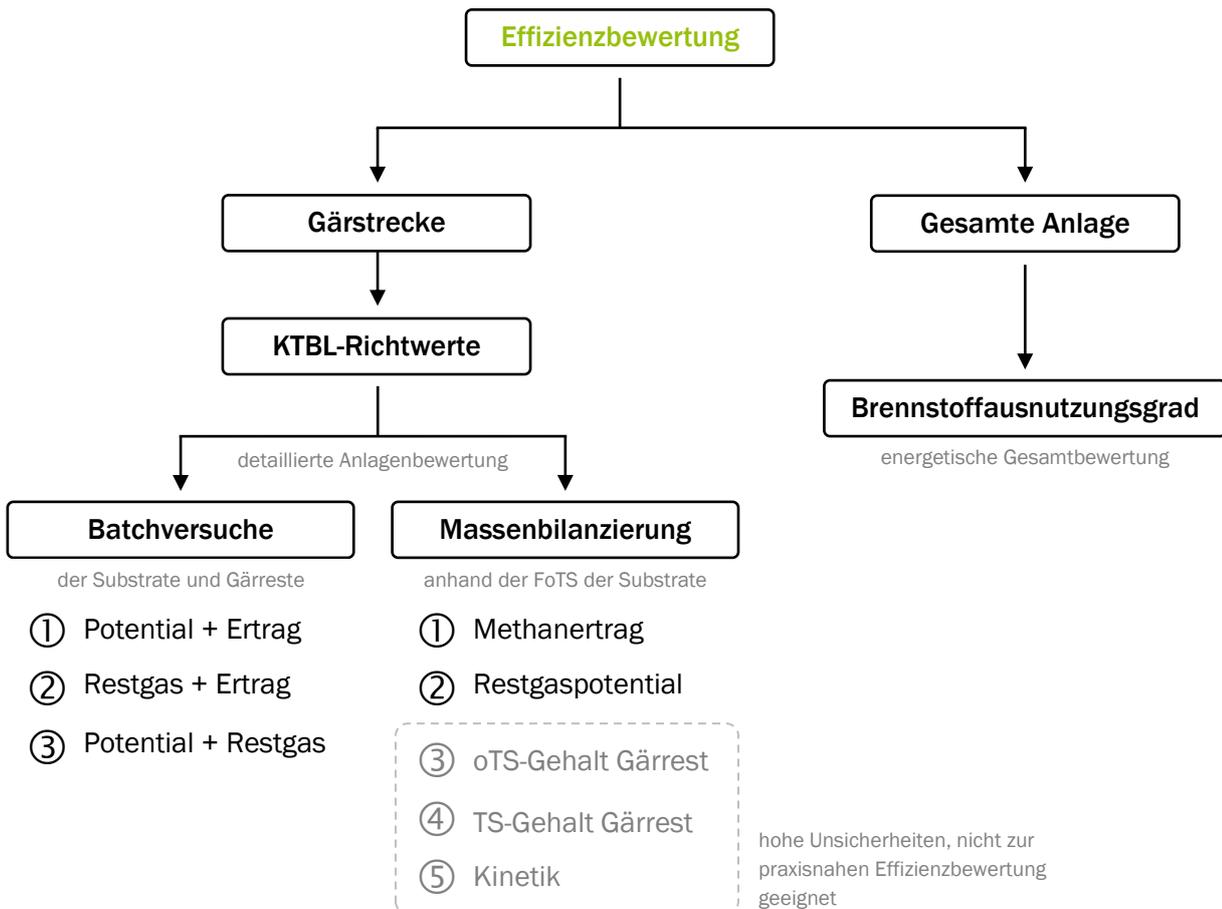


Abbildung 13: Entscheidungsbaum für die Methodenwahl zur Effizienzbewertung von Biogasanlagen

Ist insbesondere die Effektivität der Substratausnutzung in der Gärstrecke von Interesse, sollte eine erste Anlagenbewertung anhand der **KTBL-Richtwerte** (Methanpotential) im Vergleich zum **Methanertrag** der jeweiligen Anlage erfolgen. Lassen sich anhand der eingesetzten Substratmengen und jeweiligen Betriebsdaten sinnvolle Zusammenhänge ableiten, können weitere Methoden auf Basis von Batchversuch bzw. Restmethanmessungen oder der Massenbilanzierung anhand der FoTS zur detaillierten Anlagenbewertung verwendet werden.

So lassen sich Kombination aus dem jeweiligen **Methanertrag** im kontinuierlichen Anlagenbetrieb mit den Ergebnissen von **Batchversuchen der Substrate** oder den **Restmethanpotentialen der Gärreste** die Effizienz der anaeroben Vergärung bewerten (Kapitel 3.1). Dabei sind hier mögliche Messunsicherheiten bei der Durchführung von Batchversuchen und der Ermittlung von Restmethanpotentialen sowie die zahlreichen Einflussfaktoren (wie beispielsweise Methanverluste oder die Definition des BHKW-Wirkungsgrads) bei der Ermittlung von Methanerträgen im großtechnischen Anlagenbetrieb zu beachten.

Der Umsatz der FoTS lässt sich anhand einer Massenbilanzierung (Kapitel 3.2) bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass die entsprechenden Bilanzgleichungen streng genommen nur bei **konstanten Prozessbedingungen** (stationärer Zustand) anzuwenden sind. Geringe Schwankungen der Substratqualität oder -menge sind bei einem ausreichend großen Bilanzzeitraum zu vernachlässigen, wohingegen ein kompletter Substratwechsel nicht innerhalb des jeweiligen Betrachtungshorizonts liegen sollte. In diesem Fall, wäre der Umsatz der FoTS jeweils vor und nach dem Substratwechsel zu bestimmen. Zudem füh-

ren geringen Unsicherheiten bei der **oTS- oder TS-Bestimmung** im Gärrest ($\pm 1,5\%$) bereits zu erheblichen Schwankungen der resultierenden Umsatzbestimmung (Abbildung 12), sodass diese Methoden nicht bzw. nur ergänzend für eine aussagekräftige und präzise Effizienzbewertung der Gärstrecke geeignet sind. Auch die grundsätzlichen Unsicherheiten bei der FoTS-Bestimmung sind im Rahmen der Bilanzierung zu berücksichtigen.

Ist die energetische Effizienz der Gesamtanlage von Interesse lässt sich der korrigierte Brennstoffausnutzungsgrad (bezogen auf die fermentierbaren Substratbestandteile) zu Anlagenbewertung verwenden. Grundsätzlich sind dem Anlagenbetreiber Angaben zur Netto- bzw. Nutzstrommenge oder Nettowärmemenge aus dem Betriebstagebuch bekannt. Dabei ist die Qualität der Anlagendaten sowie die Abschätzung des korrigierten Brennwertes anhand der **fermentierbaren Substratbestandteile** kritisch zu prüfen.

Grundsätzlich sind die ermittelten Kennzahlen zur Effizienzbewertung der Gärstrecke nicht als Absolutwerte zu verstehen, sondern ermöglichen vielmehr eine **kontinuierliche Überwachung** der Gärstrecke bzw. des gesamten Anlagenkonzepts. So lässt sich anhand der zuvor beschriebenen Methoden die **relative Änderung der einzelnen Effizienzindikatoren** nach möglichen Umbaumaßnahmen oder bei einer geänderten Prozessführung (Verweilzeit, Raumbelastung oder Substratwechsel) bewerten.

4 Zusammenfassung

Für eine realitätsnahe Auslegung und optimierte Prozessführung von Biogasanlagen ist sowohl eine detaillierte Charakterisierung und **Qualitätsbewertung der eingesetzten Substrate** als auch eine **Effizienzbewertung ihrer verfahrensspezifischen Umsetzung** im Fermenter erforderlich. Grundsätzlich stehen hier auf Basis der verfügbaren analytischen Kennzahlen und experimentellen Laborversuche unterschiedliche Verfahren zu **Substrat- und Effizienzbewertung** zur Verfügung.

Grundsätzlich lässt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse keine eindeutige Bestimmungsmethode zur Substrat- und Effizienzbewertung favorisieren. In Abhängigkeit von den verfügbaren Kenngrößen und Versuchsergebnisse ermöglichen die unterschiedlichen Berechnungsvorschriften vielmehr eine **qualitative Auswertung und Eingrenzung realitätsnaher Wertebereiche**.

So werden labortechnisch Batchversuche üblicherweise zur experimentellen Ermittlung von Methanpotentialen verwendet. Durch zahlreiche Einflussfaktoren und methodische Unterschiede ist zum Teil mit **Abweichungen** zwischen den Ergebnissen einzelner Labore zu rechnen. Die zahlreichen Vorschriften zur Berechnung des Biogasbildungspotentials auf Basis der charakteristischen Nährstofffraktionen an Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten werden dabei durch die unterschiedlichen Annahmen zur Bestimmung

- der fermentierbaren Substratbestandteile,
- des stöchiometrischen Methanpotentials und
- des Substratbedarfs für mikrobielle Wachstumsprozesse

beeinflusst. Hier zeigt sich deutlich, dass die Verwendung der **DLG-Verdauungskoeffizienten** (z. B. nach VDI 4630) das verfügbare Methanbildungspotential der Substrate unterschätzt, sodass die fermentierbaren Nährstoffe anhand der **Methode von Weißbach** und der maximalen FoTS auf Basis der Ligninbestimmung abzuschätzen sind. Eine allgemeingültige und standardisierte Berechnungsmethode ist jedoch bis heute nicht bekannt. Grundsätzlich bieten die Verfahren auf Basis der fermentierbaren Substratbestandteile dabei eine biochemisch interpretierbare Berechnungsvorschrift, welche sich beispielsweise hinsichtlich sinnvoller Grenzwerte und typischer Wertebereiche validieren lässt. Die Allgemeingültigkeit bzw. Übertragbarkeit der **zahlreichen Regressionsmodelle zur Potentialbestimmung** auf Basis der Futtermittelanalyse wird sowohl durch die prinzipielle Aussagekraft der durchgeführten Batchversuche als auch durch die entsprechende Genauigkeit und Übertragbarkeit der Substratanalysen eingeschränkt.

Entsprechend der Bestimmung des Biogasbildungspotentials werden auch die unterschiedlichen Berechnungswege zur Bestimmung der Effizienz der Gärstrecke von der Messgenauigkeit und Belastbarkeit der verwendeten Analysen beeinflusst. So ist insbesondere die Berechnung des **Umsatzes anhand des TS- oder TS-Abbaus** durch die starke Sensitivität der eingesetzten Analysen und einen weiten Wertebereich der daraus resultierenden Effizienz gekennzeichnet.

Aktuelle Untersuchungen im Rahmen **praxisnaher Forschung** als auch **nationale und internationale Ringversuche** liefern dabei wichtige Anhaltspunkte, um die bestehenden Methodenvorschriften zu präzisieren und die Mess- bzw. Wiederholgenauigkeit bei der Versuchsdurchführung zu verbessern. Dabei gilt es, gezielt einflussreiche Parameter zur Substrat- und Effizienzbewertung anhand von Ringversuchen (einschließlich kontinuierlicher Vergärungsversuche) zu identifizieren, um eine eindeutige, aussagekräftige und standardisierte Methode zur Charakterisierung der eingesetzten Substrate und deren Umsatz in einer Biogasanlage zu formulieren.

Ergebnisse im Biogasmessprogramm III Teilvorhaben 1

FKZ: 22403515, DBFZ | 22403615, LfL | 22403715, Uni Hohenheim | 22403815, FH Kiel

Im Rahmen des Verbundvorhabens (Teilvorhaben 1: Faktoren für einen effizienten Betrieb von Biogasanlagen) wurde die Energieeffizienz von etwa 60 Praxisanlagen anhand des oTS- oder FoTS-Abbaus, der Methan- und Restmethanpotentiale sowie auf Basis der Brennstoffausnutzungsgrads ermittelt, um die Wirtschaftlichkeit der Anlagen und den Erfolg von Repowering-Maßnahmen oder die Möglichkeiten der Flexibilisierung bewerten.

Grundsätzlich stimmen im Mittel die Methanpotentiale auf Basis der FoTS, Batchversuche oder der KTBL-Faustzahlen überein. Dabei ist ein detaillierter Vergleich der unterschiedlichen Bewertungsmethoden aufgrund vielfältiger Messunsicherheiten (von der Probenahme bis zur eigentlichen Analyse) häufig nicht möglich, sodass auch hier mitunter Effizienzen weiter über 100 % ausgewiesen werden. Dabei besitzen insbesondere die Unsicherheiten bei der Einwaage der Fest- und Flüssigsubstrate sowie die Ermittlung der Methanerträge (unter Berücksichtigung der BHKW-Wirkungsgrade oder möglicher Gas- bzw. Trafoverluste) einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der Effizienzbewertung. Die Suche nach Messfehlern in der Bilanzierung muss für jede Anlage im Detail erfolgen und kann mitunter sehr aufwändig sein. In diesem Kontext ist das Restmethanpotential (oder Energiepotential) des Gärrests sicher eine verlässliche Größe, um die Effizienz des Prozesses zu bewerten. So weisen hohe Restgaspotentiale sicher auf Optimierungsmöglichkeiten hin.

So wird auch hier den Anlagenbetreiber empfohlen, die Anlageneffizienz im ersten Schritt auf Basis von KTBL Richtwerten zu ermitteln. Auftretende Mängel in der Datenerfassung und Datenqualität können so identifiziert und optimiert werden. Die zusätzliche Bestimmung des Restmethanpotentials ermöglicht zudem Aussagen über das verfügbare Methanpotential im Gärrest. Sollte die Effizienzbewertung damit zu einem vertretbar geringen Fehler führen, können präzisere Verfahren zur Methanpotentialbestimmung der Substrate auf Basis von Batchversuchen oder FoTS herangezogen werden.

Weiterführende Literatur

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR, Hrsg.): Biogas-Messprogramm III. FNR, Gülzow, 2020, in Bearbeitung

PUBLIKATIONEN

Bisher veröffentlichte Reports:

- DBFZ Report Nr. 34** Entwicklung einer Methode zur Verwendung der Daten des Schornsteinfegerhandwerks für die energiewirtschaftliche Berichterstattung - Dissertationsschrift
- DBFZ Report No. 33** Recommendations for reliable methane emission rate quantification at biogas plants
- DBFZ Report Nr. 32** Wärmenutzung von Biogasanlagen
- DBFZ Report Nr. 31** Die Niedertemperatursynthese von Methan in Thermoöl-temperierten Plattenreaktoren - Dissertationsschrift -
- DBFZ Report Nr. 30** Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland
- DBFZ Report Nr. 29** Effiziente Bioenergie für Regionen - Ergebnisse der technisch-ökonomischen Begleitforschung zur Fördermaßnahme Bioenergie-Regionen 2012-2015
- DBFZ Report Nr. 28** Potenziale zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Biogasanlagen - Energetische Effizienz von Repoweringmaßnahmen
- DBFZ Report Nr. 27** Neuartiger emissionsarmer Kaminofen (DBU-NEKO)
- DBFZ Report Nr. 26** Bewertung technischer und wirtschaftlicher Entwicklungspotenziale künftiger und bestehender Biomasse-zu-Methan-Konversionsprozesse - Dissertationsschrift
- DBFZ Report Nr. 25** Nachrüstlösung zum katalytischen Abbau von gasförmigen organischen Emissionen aus Kaminöfen
- DBFZ Report Nr. 24** Biomasse zur Wärmeerzeugung - Methoden zur Quantifizierung des Brennstoffeinsatzes
- DBFZ Report Nr. 23** Technisch-ökonomische Begleitforschung des Bundeswettbewerbes „Bioenergie-Regionen“
- DBFZ Report Nr. 22** Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland - Stand der Technik und Optimierungsansätze
- DBFZ Report Nr. 21** Entwicklung der Förderung der Stromerzeugung aus Biomasse im Rahmen des EEG
- DBFZ Report Nr. 20** KlimaCH4 - Klimaeffekte von Biomethan
- DBFZ Report Nr. 19** Hy-NOW - Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse
- DBFZ Report Nr. 18** Kleintechnische Biomassevergasung - Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung
- DBFZ Report Nr. 17** Grünlandenergie Havelland - Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland
- DBFZ Report Nr. 16** Algae biorefinery - material and energy use of algae
- DBFZ Report Nr. 15** Politics and Economics of Ethanol and Biodiesel Production and Consumption in Brazil
- DBFZ Report Nr. 14** Holzpelletbereitstellung für Kleinfeuerungsanlagen
- DBFZ Report Nr. 13** Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung
- DBFZ Report Nr. 12** Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse
- DBFZ Report Nr. 11** Monitoring Biokraftstoffsektor
- DBFZ Report Nr. 10** Ermittlung des Verbrauchs biogener Festbrennstoffe im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD-Sektor) - Endbericht

DBFZ Report Nr. 9 Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse

DBFZ Report Nr. 8 - Kompakt - Sammelband

DBFZ Report Nr. 7 Final Report - Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials - Status quo and options for specification -

DBFZ Report Nr. 6 Katalytisch unterstützte Minderung von Emissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen

DBFZ Report Nr. 5 Optimierung und Bewertung von Anlagen zur Erzeugung von Methan, Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen

DBFZ Report Nr. 4 Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassennutzung

DBFZ Report Nr. 3 Feinstaubminderung im Betrieb von Scheitholz-Kaminöfen unter Berücksichtigung der toxikologischen Relevanz

DBFZ Report Nr. 2 Methodische Vorgehensweise zur Standortidentifikation und Planung der Biomassebereitstellung für Konversionsanlagen am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen

DBFZ Report Nr. 1 Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen

Weitere Informationen and Download:

www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/

**DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH**

Torgauer Straße 116

04347 Leipzig

Phone: +49 (0)341 2434-112

Fax: +49 (0)341 2434-133

E-Mail: info@dbfz.de

www.dbfz.de