



**Fokusheft im Projekt Pilot-SBG**

# ANAEROBE FERMENTATION

Bereitstellung von Biogas und Gärrest aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststoffen

Konversion von Biomasse zu Biogas und Gärrest

Grundlagen der ökonomischen und ökologischen Bewertung

Übersicht zu verbreiteten Reaktorbauförmern

# INHALTSVERZEICHNIS

Übersicht .....	4
Hintergrund .....	5
Konversion von Biomasse zu Biogas.....	6
Prozessparameter .....	7
Stand der Technik Reaktortechnologien .....	10
Flüssigvergärung.....	10
Feststoffvergärung.....	10
Überblick zu Reaktortechnologien .....	11
Rührkesselreaktor CSTR .....	11
Pfropfenstromreaktor PFR .....	12
Garagenfermenter .....	14
Weitere Reaktorbauformen .....	14
Die Fermentertypen im Vergleich .....	15
Technische Bewertung .....	15
Ökologische Aspekte .....	18
Ökonomische Aspekte .....	18
Fazit .....	19
Das Vorhaben Pilot-SBG .....	20
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....	24
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....	25
Literaturverzeichnis .....	26

# IMPRESSUM

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116  
DE-04347 Leipzig  
+49 (0)341 2434-112  
[info@dbfz.de](mailto:info@dbfz.de)  
[www.dbfz.de](http://www.dbfz.de)

**Autor:innen:** Marcel Pohl, Mathias Stur, Katja Oehmichen, Hendrik Etzold

**Datum der Veröffentlichung:** 25. März 2024

**Zitierempfehlung:** Pohl, M.; Stur, M.; Oehmichen, K.; Etzold, H. (2024). *Anaerobe Fermentation: Bereitstellung von Biogas und Gärrest aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststoffen*. Fokusheft im Projekt Pilot-SBG. Leipzig: DBFZ. 27 S. ISBN: 978-3-949807-09-1. DOI: 10.48480/b9vn-9686.

**ISBN:** 978-3-949807-09-1

**DOI:** <https://doi.org/10.48480/b9vn-9686>

**Layout:** Rico Ehrentraut

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr unter Aktenzeichen G26/3552.1 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich bei den Autor:innen.

## ÜBERSICHT

Über die anaerobe Vergärung können Biogas und Gärrest aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststoffen sowie Abfällen bereitgestellt werden. Hierfür werden die Grundlagen der Biogasbildung aus organischen Ausgangsstoffen erläutert, sowie die in Deutschland und Westeuropa gebräuchlichsten Fermenter-

systeme vorgestellt. Für die Auswahl einer geeigneten Technologie werden auf zu beachtende Aspekte aus ökonomischer, ökologischer und technologischer Sicht hingewiesen. Diese Technologien erlauben das energetische und stoffliche Erschließen vielfältiger Stoffströme und können eine Vielzahl von Produkten bereitstellen.

Wichtig für die Vergärbarkeit von organischen Substraten ist die sachgerechte Vorbehandlung. Auch die Produkte, Biogas und Gärreste, können durch eine geeignete Nachbehandlung für den jeweiligen Verwendungszweck konditioniert werden.

### Kernthemen der Broschüre

- ▶▶▶ Konversion von Biomasse zu Biogas und Gärrest
- ▶▶▶ Flüssigvergärung
- ▶▶▶ Feststoffvergärung
- ▶▶▶ Überblick zu Reaktortechnologien
- ▶▶▶ Grundlagen der ökonomischen und ökologischen Bewertung

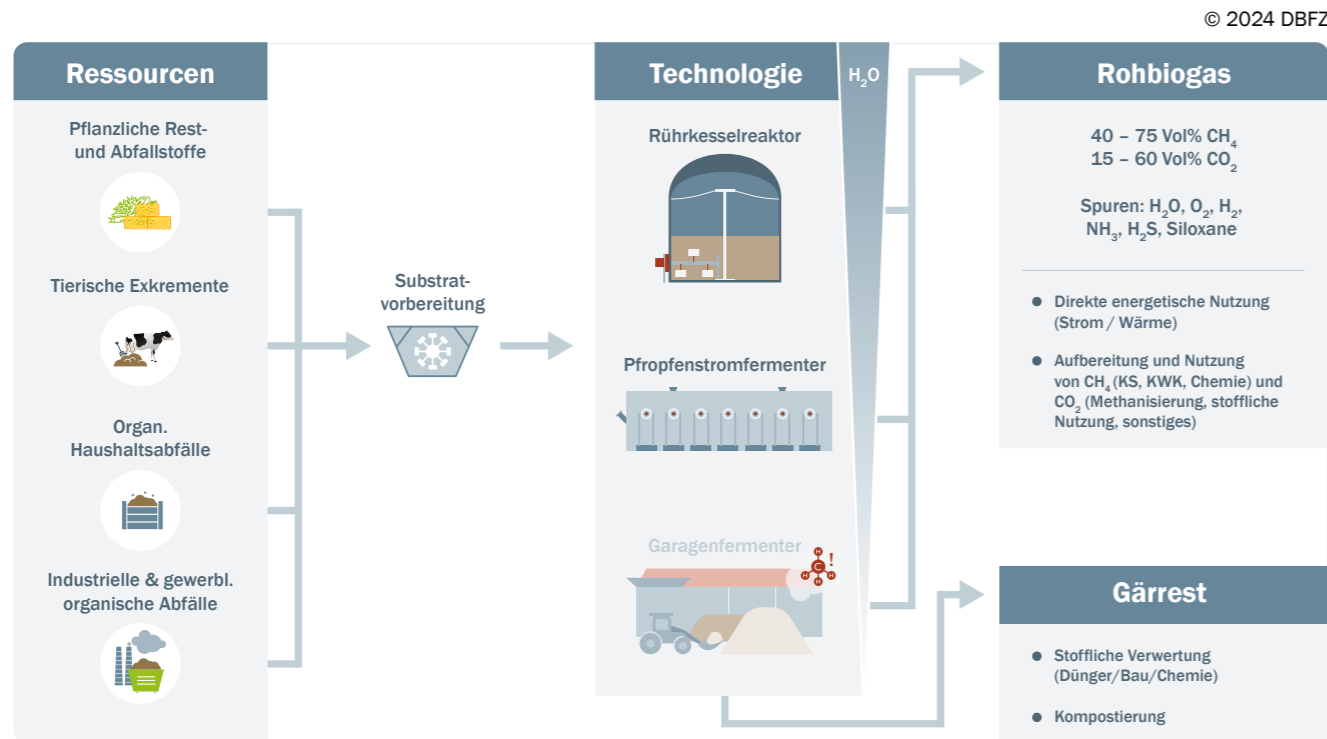


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Edukten und Produkten des Biogasprozesses (European Biogas Association 2021)

## HINTERGRUND

Die Vergärung von Biomasse zu Biogas ist die weltweit wichtigste Bioenergie-technologie, welche zur Energiebereitstellung ebenso genutzt wird wie zur Behandlung organischer Abfälle. Hierbei wird in Form des produzierten Methans ein Energieträger bereitgestellt, welcher in unterschiedlichen Bereichen genutzt werden kann. Zudem verbleibt ein Gärrest, welcher a) direkt ausgebracht Mineraldünger substituieren kann oder b) durch entsprechende Aufbereitungs- und Trennverfahren zu wertigen Nebenprodukten verarbeitet werden kann. In Deutschland leisten Biogasanlagen bereits einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgas (THG)-Emissionen sowohl in der Energie- als auch in der Abfallwirtschaft. So wurde im Jahr 2022 rund 12,4% des erneuerbaren Stroms und rund 9,2% der erneuerbaren Wärme aus Biogas bereitgestellt [Rensberg et al. 2023].

Innerhalb Europas finden sich die meisten Biogasanlagen und größten Biomethanproduktionskapazitäten in Deutschland. Dies rührt aus der Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), welches seit dem Jahr 2000 die bevorzugte Abnahme von Strom aus erneuerbaren Quellen garantiert und mit definierten Vergütungssätzen unterstützt hat. Im Zuge der Novellierungen des EEG aus den Jahren 2012 und 2014 hat der Neubau von Biogasanlagen stagniert, was sich in der bereitgestellten Energie aus Biogas seit 2017 widerspiegelt. Es wurden hingegen bestehende Anlagen in der Produktionskapazität erweitert („Überbaut“) und somit für die zeitlich flexible Energiebereitstellung modifiziert. Mit dem EEG 2017 wurden die festen Vergütungssätze für Strom



Einstock/shutterstock.com

aus Biomasse auf ein Ausschreibungsverfahren umgestellt. Neu errichtete Anlagen beschränkten sich im Wesentlichen auf Gülle-Kleinanlagen und solche zur Vergärung von organischen Abfällen [Daniel-Gromke et al. 2018]. Durch die frühe und langfristige Förderung der Biogastechnologie und ihrer dezentralen Ausgestaltung, entwickelte sich Deutschland zum weitweiten Vorreiter in Forschung und Anwendung zur Biogasproduktion und -aufbereitung [Lora Grando et al. 2017].

Wie auch in den meisten anderen europäischen Ländern finden sich in Deutschland die zahlenmäßig meisten der ca. 9.770 Biogasanlagen (in 2021, Fachverband Biogas e.V. 2022) angeschlossen an landwirtschaftliche Betriebe (ca. 8.200). Dies wurde förderpolitisch angereizt, um die Energiebereitstellung zu dezentralisieren und Wertschöpfung im ländlichen Raum zu stärken. Hieraus erklärt sich, dass die hauptsächlich eingesetzten Substrate agrarische Reststoffe sind, allen voran nachwachsende Rohstoffe (47%) und tierische Exkremente (48%). Aufgrund des niedrigeren Gehalts an anaerob abbaubarer Organik tragen die tierischen Exkremente jedoch nur ca. 17% der aus Biogas bereitgestellten Energie bei. Organische Abfälle als Input für Abfallvergärungsanlagen (etwa 145 Anlagen in 2021, Dotzauer et al. 2022), z.B. aus der Getrennsammlung, und industrielle Reststoffströme spielen derzeit frischmassebezogen noch eine untergeordnete Rolle (jeweils <5%, Da-

niel-Gromke et al. 2018). Auch auf europäischer Ebene finden sich 63% der Biogasanlagen in der Landwirtschaft, gefolgt von rund 15% zur Deponiegasnutzung [European Biogas Association 2021].

Die energetische Nutzung des produzierten Biogases geschieht in Deutschland überwiegend in Blockheizkraftwerken (BHKW), welche in der Regel am Standort der Biogasanlage elektrische Energie und Wärme auskoppeln. Da die Auskopplung elektrischer Energie der Hauptbestandteil der EEG-Vergütung von Biogasanlagen darstellt, haben sich Alternativen wie die Mikrogasturbine aufgrund ihres schlechteren elektrischen Wirkungsgrads nicht durchsetzen können [Deublein und Steinhauser 2010]. Von den erwähnten mehr als 9.000 Biogasanlagen in Deutschland bereiten lediglich rund 240 Anlagen das Biogas zu Biomethan auf [Dotzauer et al. 2022], vornehmlich um es in das Erdgasnetz einzuspeisen.

Im Rahmen des REPowerEU-Plans [Europäische Kommission 2022] zur Umgestaltung des europäischen Energiesystems sieht die Europäische Kommission einen Biomethanaktionsplan vor, welcher die Biomethanproduktion bis 2030 auf jährlich 35 Milliarden m<sup>3</sup> steigern soll. Neben dem Setzen finanzieller Anreize soll diese Steigerung auch durch eine europäisch abgestimmte Agrarpolitik unterstützt werden.

## Konversion von Biomasse zu Biogas

Die Vergärung von Biomasse zur Herstellung von Biogas ist ein Fermentationsprozess. Aus Ermangelung eines Elektronenakzeptors (hier  $O_2$ ) setzen sich im Biogasreaktor oder Fermenter anaerobe Mikroorganismen durch. Diese wiederum produzieren im anaeroben Milieu Enzyme, welche die Umwandlung von Biomasse zu Biogas erlauben. Bei dieser Vergärung von Biomasse entsteht das Biogas, welches als Hauptkomponenten aus dem brennbaren Methan ( $CH_4$ ) sowie Kohlendioxid ( $CO_2$ ) besteht. Darüber hinaus finden sich im Biogas je nach vergorener Biomasse und Prozessführung die Spurengase Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ), Ammoniak ( $NH_3$ ), Stickstoff ( $N_2$ ), Wasserstoff ( $H_2$ ), und Siloxane. Eventuelle Gehalte an Sauerstoff ( $O_2$ ) können aus Undichtigkeiten des Systems oder – in geringen Mengen zur biologischen Entschwefelung – technisch gewollt sein. Darüber hinaus enthält das Biogas Wasserdampf, welcher vor der energetischen Nutzung oder weiteren Aufbereitung, z. B. durch Kondensation, entfernt werden sollte.

Der dem anaeroben Abbau von Biomasse zugrundeliegende biochemische Prozess gliedert sich in vier aufeinanderfolgende Schritte (Abbildung 2). Im ersten Schritt dieser mikrobiellen Sukzession, der Hydrolyse, werden die hochmolekularen Substanzen der Biomasse (z. B. Kohlenhydrate, Zucker und Fette) welche von den Mikroorganismen nicht direkt genutzt werden können, mittels extrazellulärer Enzyme in niedermolekulare, wasserlösliche Bestandteile (Einfachzucker, Aminosäuren, Fettsäuren, Glycerin) aufgespalten. Die Hydrolyse von Biomasse wird häu-

fig als der langsamste und damit geschwindigkeitsbestimmende Schritt des anaeroben Abbaus bezeichnet. Die gebildeten Zwischenprodukte werden im folgenden Schritt, der Versäuerung oder Acidogenese, zu kurzkettigen, flüchtigen Fettsäuren und Alkoholen abgebaut. Hierbei entsteht darüber hinaus Kohlendioxid und Wasserstoff. Im anschließenden dritten Prozessschritt, der Acetogenese, werden die Produkte der Acidogenese zu Essigsäure umgesetzt.

Diese wiederum dient als einer der Präkursoren für die Methanogenese – die abschließende Methanbildung. Die Methanogenese kann nun auf zwei unterschiedlichen Wegen erfolgen. In der acetoklastischen Methanogenese wird Essigsäure zu Methan und Kohlendioxid aufgespalten. In der parallel verlaufenden hydrogenotropen Methanogenese hingegen dient Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle für die Reduktion zu Methan mit Hilfe von Wasserstoff.

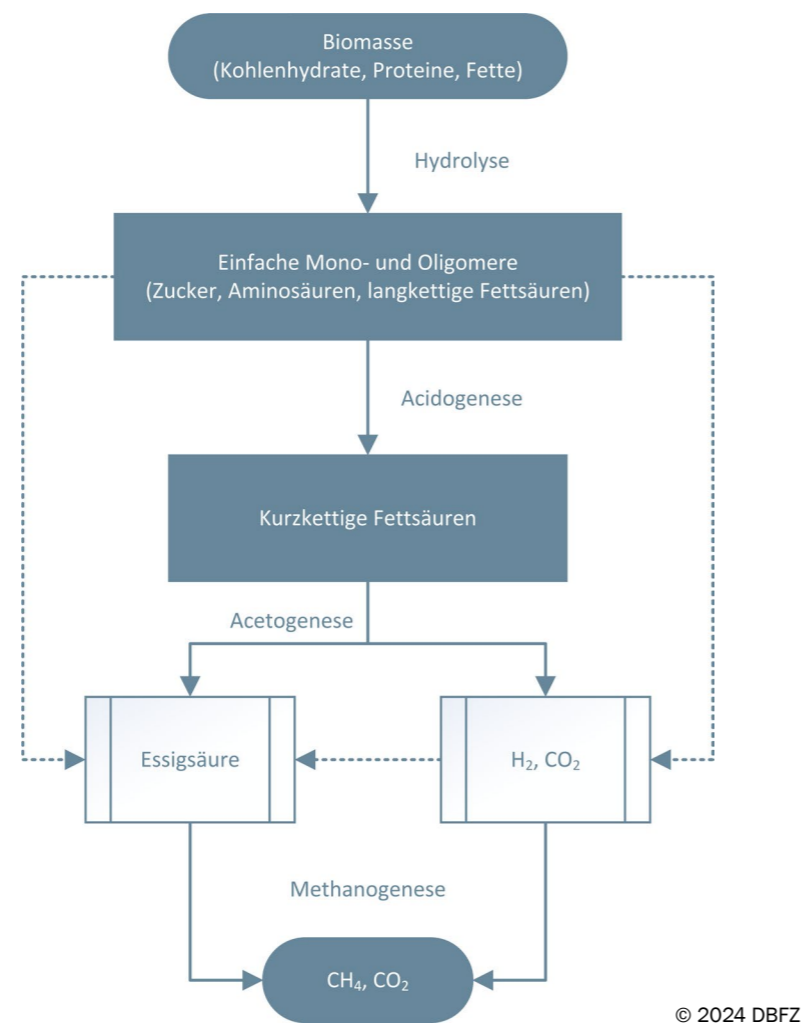


Abbildung 2: Biochemische Prozessschritte des anaeroben mikrobiellen Abbaus von Biomasse

Die ausgegorenen Biomassen des Biogasprozesses, die Gärprodukte oder Gärreste, enthalten weiterhin die zugeführten Nährstoffe, da ihnen im Zuge der Vergärung fast ausschließlich Kohlenwasserstoffe in Form von Methan und Kohlendioxid entweichen. Daher werden sie derzeit, sofern es sich bei den Edukten des Prozesses nicht um Abfallstoffe handelt, vornehmlich direkt als organische Dünger in der Landwirtschaft genutzt, wobei sie Mineraldünger substituieren und Nährstoffkreisläufe schließen.

## Prozessparameter

Der oben dargestellte biochemische Prozess der Methanbildung aus Biomasse erfordert günstige Milieubedingungen für das mikrobielle Wachstum [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2021a]. Um den Prozess technisch beherrschbar zu machen und mit ausreichender biologischer bzw. ökonomischer Effizienz zu betreiben, sind daher eine Reihe von Prozessparametern zu beachten und ggf. zu steuern. Eine Vielzahl von Prozessparametern ist von außen steuerbar, wohingegen sich andere aufgrund der gewählten Prozessparameter oder der physikochemischen Bedingungen im Gärmedium einstellen.

Ein Parameter mit erheblicher Auswirkung auf biologische, chemische und physikalische Eigenschaften des Biogasprozesses ist die gewählte **Prozesstemperatur**. Die Wahl der Temperatur beeinflusst nicht nur die Zusammensetzung der mikrobiologischen Gemeinschaft im Fermenter,

welche den Abbau der Organik bewerkstelligt, sondern beeinflusst auch direkt Parameter wie die Viskosität, Oberflächenspannung und den Stofftransport im Gärgemisch [Castellano-Hinojosa et al. 2018]. Gemeinhin wird zwischen den Temperaturniveaus mesophil ( $30 - 40\text{ °C}$ ) und thermophil ( $50 - 60\text{ °C}$ ) unterschieden, wobei die Definitionen der Temperaturbereiche in der Literatur gelegentlich abweichen. In diesen Temperaturbereichen zeigen die beteiligten mikrobiellen Gemeinschaften ihre Optima. Ein Betrieb bei thermophiler Temperatur verspricht, bei gegebener Verweilzeit, höhere Methanausbeuten, da die höhere Prozesstemperatur schnellere biochemische Reaktionen und schnellere Transportvorgänge im Gärgemisch ermöglicht. Jedoch sind thermophile Prozesse u. a. aufgrund der geringeren mikrobiellen Diversität anfälliger gegenüber Prozessstörungen [Mao et al. 2015]. Obwohl der Biogasprozess unempfindlich gegenüber moderaten Temperaturschwankungen ist, hat sich eine konstante Prozesstemperatur als wichtig für die Anlageneffizienz gezeigt, da Verluste durch die Adaption der mikrobiellen Gemeinschaft vermieden werden. Von den 61 im Biogas-Messprogramm III untersuchten Biogasanlagen wurden interessanterweise mehr als die Hälfte bei Temperaturen im Bereich  $42 - 48\text{ °C}$  betrieben. Dieser Bereich scheint sich in der Praxis als geeigneter Kompromiss zwischen Produktivität, Stabilität und Heizenergiebedarf zu zeigen [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2021b]. Ein Betrieb bei thermophiler Temperatur ist bei der

Vergärung von Abfällen von Vorteil, da der hygienisierende Effekt des hohen Temperaturniveaus genutzt werden kann ohne hierfür eine gesonderte Prozessstufe vorsehen zu müssen.

Zudem ist die **hydraulische Verweilzeit** (HRT) der Substrate in der Biogasanlage ein wichtiger verfahrenstechnischer Parameter, welcher bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen ist. Diese durchschnittliche Verweilzeit der Biomasse im Gärprozess berechnet sich als der Quotient aus dem betrachteten Reaktionsvolumen und dem zugeführten Substratvolumenstrom [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2016]. Je nach Abbaubarkeiten und Methanerträgen der eingesetzten Substrate, aber auch der Stufen (Anzahl der in Reihe geschalteten Fermenter) der Fermenterstrecke variieren die hydraulischen Verweilzeiten in der Praxis stark. So wurden an 61 landwirtschaftlichen Praxis-Biogasanlagen im Rahmen des Biogas-Messprogramms III [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2021b] hydraulische Verweilzeiten zwischen 36 und 231 Tagen aufgenommen. Hier wurde auch festgestellt, dass mehrstufige Biogasanlagen im Durchschnitt höhere Verweilzeiten (100 Tage) aufweisen als einstufig ausgeführte Anlagen (67 Tage).

Die **Anzahl der Prozessstufen** für die Fermentation, also die Anzahl der in Reihe geschalteten Fermenter, kann variieren. So versprechen zwei oder mehr Stufen eine höhere Effizienz und Prozessstabilität, da die säure- und methanbildenden Mikro-

organismen jeweils unterschiedliche Vorzugsbedingungen hinsichtlich beispielsweise Nährstoffkonzentrationen oder dem pH-Wert haben. Mithilfe mehrerer Prozessstufen können also die Abbauschritte der Hydrolyse und der Methanbildung (vgl. Abschnitt Konversion von Biomasse zu Biogas) auch verfahrenstechnisch voneinander getrennt werden und Aspekte wie z. B. die jeweils benötigten Verweilzeiten spezifisch ausgelegt werden. Nachteilig sind jedoch die höheren spezifischen Kosten für die Ausführung eines bestimmten Reaktionsvolumens in mehreren Behältern. Dennoch überwiegen die prozesstechnischen Vorteile, so dass sich in der Praxis vornehmlich mehrstufige Anlagen finden [Weiland 2010; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2021b]. Verfügt die Biogasanlage über mehrere Stufen, so bezeichnet der Hauptgärer

in der Regel die erste Stufe. Hierauf folgt der (oder die) Nachgärer. Zur Lagerung der weitestgehend abgebauten Biomasse dient bis zu weiterer Nutzung das Gärrestlager. Ein wichtiger Parameter für die Dimensionierung von Biogasfermentern, aber auch für die Prozesssteuerung laufender Anlagen, ist neben der hydraulischen Verweilzeit auch die **organische Raumbelastung** ( $B_R$ ) des Fermentationssystems. Definiert ist diese als Eintrag an organischer Trockensubstanz (oTS) in Bezug auf das aktive Fermentationsvolumen und der Zeit – in der Regel angegeben in  $\text{kg}_{\text{oTS}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ . Die im Rahmen des Biogas-Messprogramms III [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2021b] untersuchten Biogasanlagen zeigten Raumbelastungen von  $0,9 - 5 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$  über die Fermenterstrecke, im Mittel von  $2,7 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ .

Die Raumbelastung ist somit umgekehrt proportional zu der hydraulischen Verweilzeit. Steigert man die Raumbelastung einer Biogasanlage oder verkürzt die hydraulische Verweilzeit, verschlechtert sich in Folge die energetische Substratausnutzung und die Biogausausbeute sinkt.

Bei der **Auslegung und Dimensionierung** von Biogasanlagen sind also viele Freiheitsgrade vorhanden, bzw. sind diese zu berücksichtigen. In der Regel werden diese jedoch dadurch begrenzt, dass potentielle Betreiber bereits im Vorfeld der technischen Planung ein dezidiertes Bild über die einzusetzenden Substrate und die Nutzungspfade der entstehenden Produkte haben. So ist es ratsam, die Substratversorgung, welche einen erheblichen Teil der Betriebskosten ausmacht, rechtzeitig und möglichst langfristig sicherzustellen. Darauf aufbauend kann in der Planung z. B. eine geeignete Vorbehandlungs- und Fermentertechnologie ausgewählt werden.

Für die Auswahl der zu vergärenden, organischen Biomassen (**Substrate**) können verschiedene Unterscheidungskriterien herangezogen werden. So bestimmen beispielsweise der Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) sowie die Partikelgrößenverteilung einer Biomasse die rheologischen Eigenschaften und damit die Pumpbarkeit ( $\text{TS} \leq 15\%$ , bei üblichem Substrat für Biogasanwendungen) oder Stapelfähigkeit und determiniert bereits die Auswahl der einsetzbaren Fermentertechnologie. Selten werden einzelne Substratströme allein in Monovergärung genutzt. In der Praxis fast ausschließlich anzutreffen sind Co-Vergärungen zweier oder mehrerer unterschiedlicher

Substrate. Durch die Mischung fester und flüssiger Substrate zu einem Gärgemisch, in Deutschland am weitverbreitetsten aus Gülle und Mais, kann unter anderem der Trockensubstanzgehalt des Gemischs eingestellt werden um eine Pumpbarkeit zu gewährleisten. Darüber hinaus können über die gezielte Mischung von Einsatzstoffen die Wachstumsbedingungen der am Prozess beteiligten Mikroorganismen eingestellt werden, beispielsweise in Hinblick auf das Kohlenstoff-zu-Stickstoff-Verhältnis oder auch den Gehalt an Spurenelementen. Abbildung 3 zeigt die Einordnung der Vergärung und alter-

nativer Technologien zur Biomassebehandlung/-verwertung hinsichtlich der Gehalte an Wasser und Strukturmaterialien im Substrat.

Die Handhabbarkeit und Vergärbarkeit von enzymatisch schwer aufzuschließenden Substraten lässt sich durch die Auswahl von geeigneten Vorbehandlungsschritten verbessern (siehe Fokusheft Substratvorbereitung). Auch ist es ratsam, gegebenenfalls mit den Substraten mitgeführte Störstoffe (wie beispielsweise Steine, Metalle, Plastik oder auch Sand) vor der Fermentation zu entfernen. Nicht zuletzt beeinflussen

diese nicht nur die Prozessführung selbst, sondern auch die Qualität der potenziellen Gärprodukte.

►► Weitere Informationen:  
Fokusheft Substratvorbereitung

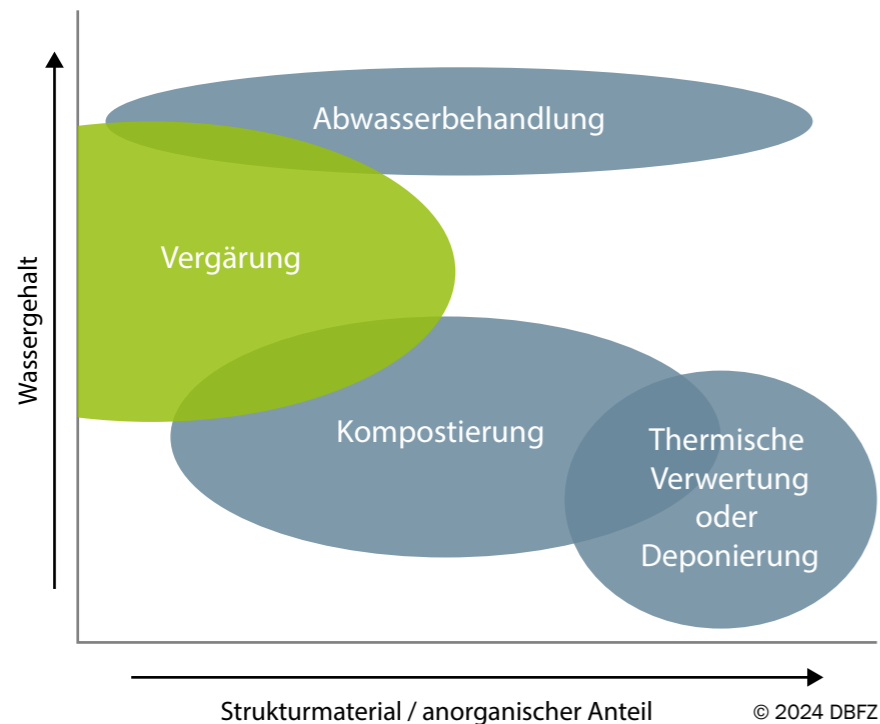


Abbildung 3: Eignung von Stoffströmen für Behandlungstechnologien (angepasst nach Wellinger et al. 2013)



## STAND DER TECHNIK REAKTORTECHNOLOGIEN

Auch wenn in der Biogastechnologie die Entwicklung stetig fortschreitet, haben sich in der Praxis einige wenige Reaktorkonzepte durchgesetzt. Die im Folgenden beschriebenen Reaktoren sind kosteneffizient zu errichten, zeichnen sich durch technische Robustheit aus und sind durch Wissenschaft und Praxis umfassend charakterisiert. Neben der Landwirtschaft und der Abfallwirtschaft wird die Anaerobtechnik auch in der Abwassertechnik in unterschiedlichen Ausführungen wie z.B. Faultürmen eingesetzt.

Auch wenn mannigfaltige Kriterien für die Klassifizierung von Biogasreaktoren herangezogen werden können, hat sich die Unterscheidung anhand des im Gärmedium eingestellten TS-Gehaltes weit durchgesetzt. Anhand dessen wird gemeinhin zwischen einer Fest- oder Flüssigvergärung unterschieden [Angelonidi und Smith 2015], auch wenn hier die Übergänge fließend sind und der zugrundeliegende biologische Prozess grundsätzlich nicht ohne Wasser als Transportmedium für Enzyme und Intermediate funktionieren kann.

### Flüssigvergärung

Die **Flüssigvergärung** wird für niedrigviskose, pumpfähige Substrate mit TS-Gehalten bis zu ca. 15 Ma.-%, unter Berücksichtigung der anwendungsüblichen Partikelgrößenverteilung mit typischen Partikellängen von im Wesentlichen < 1–50 mm, angewendet. Dabei werden neben Abwasservergärungsverfahren meist kontinuierlich oder quasikontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren (continuous stirred tank reactor - CSTR), Pflöpfstromreaktoren (plug flow



Abbildung 4: Darstellung der Anlagentechnik im Behälterinnenraum im entleerten Zustand auf dem Gelände des DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

reactor - PFR) oder Reaktoren nach dem Verdrängerprinzip in verschiedenen Ausführungen mit hydraulischen, pneumatischen oder mechanischen Durchmischungsstrategien eingesetzt. Aufgrund des hohen Wasseranteils des Substrates bei der Flüssigvergärung können einerseits die Biogasausbeuten bezogen auf das Arbeitsvolumen in einem geringeren Bereich liegen. Andererseits ist der Aufwand zur Einhaltung des notwendigen Substrataufschlussgrades durch Zerkleinerungstechnik sowie zur Abscheidung von Störstoffen höher als im Vergleich zur Feststoffvergärung, um die erforderlichen Substrateigenschaften wie bspw. eine niedrige Viskosität für die prozesssichere Handhabung mit Pumpentechnik gewährleisten zu können.

### Feststoffvergärung

Die **Feststoffvergärung** wird für stapelbare Substrate mit einem TS-Gehalt

von bis zu ca. 50 Ma.-% angewendet. Die Handhabung des mittel- bis hochviskosen Substrates erfolgt mittels großvolumiger Fördertechnik wie Kolbenpumpen oder Universalschaufeln von Teleskopladern. Somit fällt die Anforderung an die Partikelgrößenverteilung im Vergleich zur Flüssigvergärung geringer aus. Je nach Viskosität des Substrates kommen bei der Feststoffvergärung für mittlere Viskositäten Pflöpfstromreaktoren und für mittlere bis hohe Viskositäten Boxen- bzw. Garagenfermenter zum Einsatz. Aufgrund des geringeren Wasseranteils kann der spezifische Ausnutzungsgrad des Arbeitsvolumens höher liegen als bei der Flüssigvergärung. Der erforderliche Aufwand zur Abscheidung von Störstoffen kann in Abhängigkeit von der Reaktortechnologie geringer ausfallen oder sogar entfallen, insbesondere bei Garagenfermentern mit teleskopladergestützter Substrathandhabung.

## Überblick zu Reaktortechnologien

Im Folgenden werden mit dem Rührkessel- (CSTR) und dem Pflöpfstromfermenters (PFR) die in den Industrieländern am weitesten verbreiteten Reaktorbauformen beschrieben. Darüber hinaus wird der in der Abfallwirtschaft genutzte Garagenfermenter adressiert und weitere im Vorhaben nicht eingesetzte Bauformen benannt.

### Rührkesselreaktor CSTR

Die Reaktorbauform des Rührkesselreaktors ist für die kontinuierliche Verarbeitung von pumpfähigem Substrat vorgesehen. Der Reaktor wird durch vorgeschaltete Pumpen mit frischem Substrat beschickt. Theoretisch wird von einem vollständig durchmischten Arbeitsvolumen ausgegangen, was in Abhängigkeit von der tatsächlichen technischen

Ausführung und den angewendeten Durchmischungsstrategien in der Praxis nicht generell sichergestellt werden kann.

In Abbildung 5 ist ein CSTR mit einem großflächigem Paddelrührwerk und einem Seitenrührwerk dargestellt. Hierbei wird das im Reaktorinnenraum befindliche Gärmedium durch die Paddel in Bewegung versetzt und die obere Schicht mit der unteren Gärmediumschicht umgewälzt. Eine eventuell vorhandene Schwimmschicht kann in Abhängigkeit vom Füllstand des Gärmediums durch die Paddel aufgebrochen, untergemischt und somit reduziert bzw. aufgelöst werden. Dies stellt eine vorteilhafte Maßnahme zur Behandlung unerwünschter Schwimmschichtenbildung dar. Das Seitenrührwerk soll außerhalb des Wirkungsbereiches des Paddelrührwerkes für eine par-

tielle Durchmischung des Gärmediums sorgen. Der Durchmischungsgrad ist hierbei stark von den rheologischen Eigenschaften des Gärmediums, insbesondere dem Fließverhalten und der Partikelgrößenverteilung abhängig und im Vergleich zur unten genannten Durchmischung mit dem Zentralrührwerk als geringer einzustufen.

Diese Bauweise kommt typischerweise bei einstufigen Biogasanlagen als Hauptgärer sowie bei mehrstufigen Biogasanlagen als Nachgärer bzw. Gärrestlager zum Einsatz. Ein Grund dafür ist u. a. die kostengünstige Einbindung des integrierten Gasspeichers als Reaktordach. In dieser Anwendung (siehe Abbildung 5) handelt es sich um ein integriertes pneumatisch vorgespanntes zweischaliges Membrangasspeicherdach.

Abbildung 6 zeigt eine weitere Reaktorausführung des CSTR. Hier ist kein Gasspeicherdach mit einer Ausgleichsfunktion für betriebs- und witterungsbedingte Schwankungen des biogasführenden Volumens vorhanden. Das Festdach kann jedoch die statischen Lasten eines Zentralrührwerkes aufnehmen. Zur Durchmischung des Gärmediums wird eine rotierende Rührwerkswelle mit zwei axial versetzten Flügelpaaren eingesetzt. Dies erlaubt eine im Vergleich zur oben genannten Durchmischungsform mit Paddel- und Seitenrührwerk stärkere Durchmischung mit höherem Durchmischungsgrad. Schwimmschichten können angesaugt und zentrisch zur Rührwerkswelle untergedrückt werden. Es bildet sich eine Art Schlaufenströmung aus, sodass das oben angesaugte Gärmedium axial entlang der Wel-

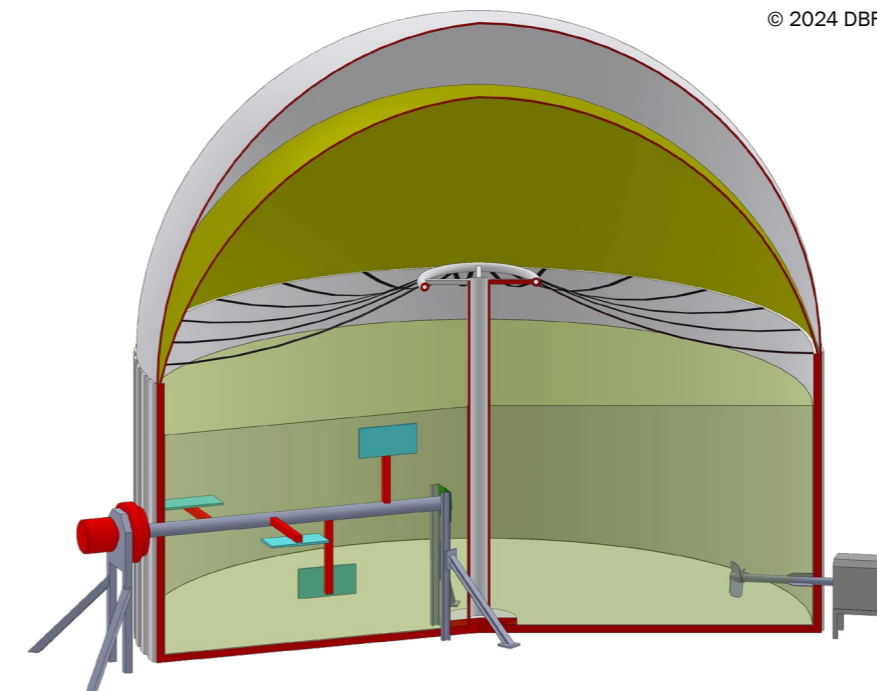


Abbildung 5: Rührkesselreaktor mit Doppelmembrangasspeicherdach, Paddelrührwerk links unten und Seitenrührwerk rechts unten

le zum Boden bewegt wird und am Boden radial nach außen sowie am Mantelbereich wieder nach oben strömen kann. Dadurch wird auch der Bildung von Sinkschichten entgegengewirkt. Das eingespeiste Substrat wird gleichmäßig im Arbeitsraum verteilt und Temperaturunterschiede werden aufgrund des hohen Durchmischungsgrades ausgeglichen.

Diese Bauweise kommt typischerweise als Hauptgärer bei mehrstufigen Biogasanlagen zur Anwendung. Das produzierte Biogas kann über gasraumverbindende Gasleitungen von anderen Reaktoren mit integrierten Gasspeicherdächern aufgefangen werden. Bei einstufigen Anlagen wäre ein zusätzlicher separater Gasspeicher erforderlich.

In Rührkesselreaktoren kann die Beheizung des Gärmediums auf Nenn-temperatur erfolgen:

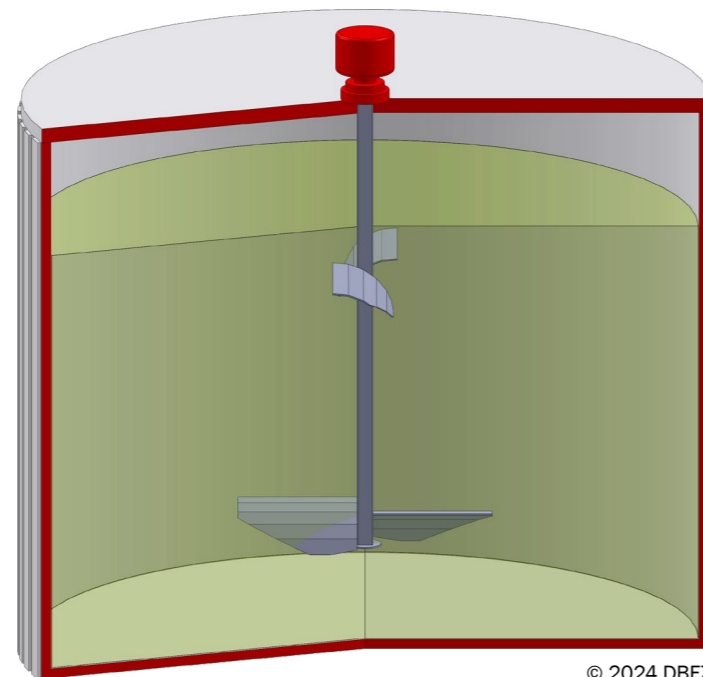
Intern:

- über Rohrheizschlaufen an der Innenmantelseite direkt ins Gärmedium oder
- über ein in den Behältermantel und -boden integriertes Heizsystem.

Extern:

Vorheriges Erwärmen des einzuspeisenden Substrates oder Rezirkulantes durch:

- Heizelemente, wie beispielsweise heizkesselbefeuertem Durchlauf-erhitzer oder
- Wärmeübertrager, das heißt Temperaturausgleich zwischen auszuspeisendem Gärrest und einzuspeisendem Gärsubstrat im Gegenstrom.



© 2024 DBFZ

Abbildung 6: Rührkesselreaktor mit Zentralrührwerk mittig und Festdach

### Pfropfenstromreaktor PFR

Im Gegensatz zum Rührkesselreaktor wird beim Pfropfenstromreaktor die theoretische Annahme getroffen, dass es sich nicht um einen voll durchmischten Behälter handelt. Vielmehr wird unterstellt, dass sich ein Pfropfen des Mediums entlang der Förderrichtung ausbildet. Das bedeutet, dass ein bestimmter Medienteil in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit zeitlich durch den Arbeitsraum geführt wird, um die vier Stufen des Biogasbildungsprozesses räumlich getrennt durchlaufen zu können. Dieser Effekt hängt sehr stark von den rheologischen Eigenschaften des Mediums ab. Je zäher bzw. viskoser das Medium ist, desto eher stellt sich die Ausbildung eines Pfropfens ein. Umgekehrt gilt: je fließfähiger das Medium ist, desto höher ist die räumliche Durchmischung entlang der Förderrichtung und somit

geringer der Grad der Pfropfenausbildung. Die Förderrichtung verläuft entlang der horizontalen Längsachse des liegenden zylindrischen bzw. quaderförmigen Behälters. Es wird bei der Bauform des PFR in die zwei am weitesten verbreiteten Arten eines kreisrunden bzw. rechteckigen Querschnitt unterschieden. In Abbildung 7 ist ein liegender zylindrischer Behälter mit innenliegendem und durchgängigem Paddelrührwerk als PFR dargestellt.

Für den Paddelrührwerksbetrieb ist ein Antrieb erforderlich der in der Regel direkt konzentrisch auf der Welle über ein Umlaufrädergetriebe bauraumsparend und über eine Drehmomentstütze drehfest mit dem Gestell verbunden ist. Die Antriebswelle des Paddelrührwerkes ist mit einer Reihe axial hintereinander angeordneter und im Drehwin-

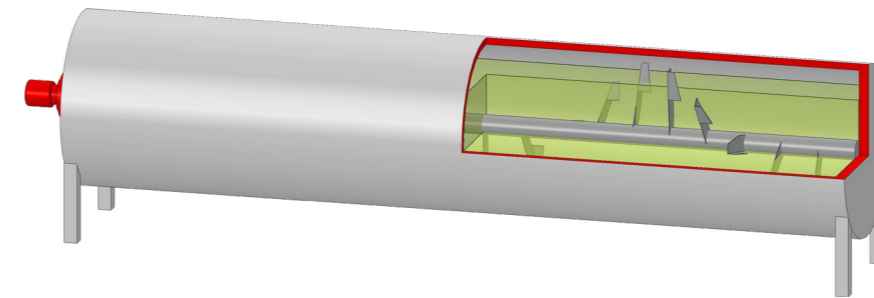


Abbildung 7: Pfropfenstromreaktor mit durchgängigem Paddelrührwerk und kreisrundem Querschnitt

kel versetzter Paddelarme ausgeführt, die eine paddelförmige Helix ausbilden. Durch Rotation der Welle und dem Anstellwinkel der Paddel zur Welle wird eine axiale Förderung des Mediums erreicht. Die Welle ist je nach Anwendung hohl ausgeführt, um im Normalbetrieb bei Nennfüllstand einen Auftrieb im Gärmedium zu erreichen. Somit soll eine durch die Eigenmasse gravimetrisch bedingte Durchbiegung und damit verbunden zusätzliche radiale Last auf die beidseitigen Lager reduziert werden. Außerdem kann durch diese Maßnahme auf eine aufwändige Zwischenlagerung der

Welle verzichtet werden. Des Weiteren kann bei dieser Variante eine Beheizung durch den Hohlkörper ermöglicht und die Wärme zur effizienten Temperierung direkt in den Kern des Gärmediums eingebracht werden. Die Substrateinspeisung erfolgt am Anfang der Förderrichtung üblicherweise über eine getauchte Stopfschnecke am Eintragsbereich oder durch andere Förderaggregate wie Kolbenpumpen. In einer weiteren Ausführung des PFR erfolgt die Durchmischung über mehrere in Förderrichtung nacheinander und ineinander kämmende Haspelrührwerke (Abbildung 8). Da-

© 2024 DBFZ

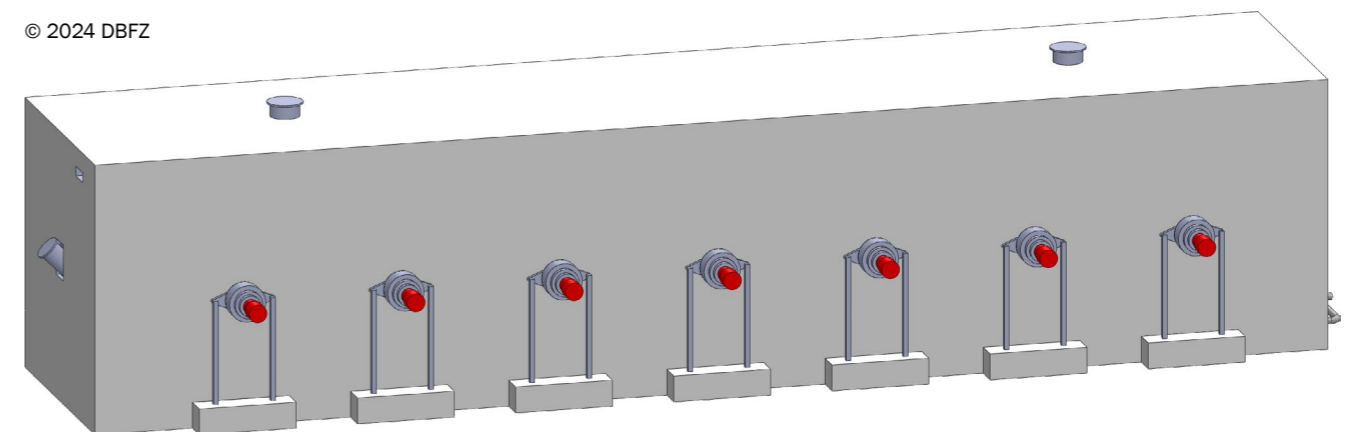


Abbildung 8: Pfropfenstromreaktor mit mehreren seitlichen Haspelrührwerken und rechteckigem Querschnitt

bei kommt es u. a. zur Ausbildung von Sinkschichten, die teilweise durch den Verdrängungseffekt entlang der Förderrichtung zur Auspeisestelle verschoben werden können. In Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften des Gärmediums können diese Effekte unterschiedlich stark ausfallen und ggf. zu Störungen im Betrieb führen. Für jedes Rührwerk ist ein einzelner Antrieb mit Untersetzungsgetriebe erforderlich. Der Austrag des Gärrestes erfolgt über eine Förderschnecke oder andere Förderorgane am Ende des Reaktorbehälters. Die Beheizung kann über eine Mantel- und Bodenbeheizung sichergestellt werden. Weitere Varianten mit Mischformen der genannten technischen Ausführungen sind in der Praxis möglich.

Beim PFR und beim CSTR ist durch einen kontinuierlichen Betrieb eine permanente Bereitstellung von Biogas und Gärrest ohne Schwankungen möglich. Das bedeutet üblicherweise ein- bis mehrfach täglich eine chargenweise Beschickung von Substrat in den PFR oder CSTR bzw. Entnahme des Gärrestes aus dem Reaktor.

## Garagenfermenter

Im Vergleich zu Rührkessel- oder Pfpfenstromreaktoren werden Garagenfermenter diskontinuierlich betrieben. Bei dieser Form der Feststoffvergärung wird der Gärraum mit einer Substrat-Gärrest-Mischung befüllt und gasdicht verschlossen. Über mehrere Tage wird das Gärmedium zur Prozesssteuerung üblicherweise mit Perkolat bzw. Rezirkulat perkoliert. Nachdem der vergärbare Anteil im Gärmedium weitgehend abgebaut ist und die Biogasbildungsrate abfällt, wird der Gärraum durch den Teleskoplader entleert und neu befüllt. Während des Betriebes kommt es zu vergleichsweise hohen betriebsbedingten Emissionen bei der Erzeugung der erforderlichen anaeroben bzw. aeroben Atmosphären im Reaktorinnenraum während der Anfahr- und Abfahrphasen. Durch eine versetzte Parallelschaltung mehrerer nebeneinander angeordneter Garagenfermenter kann durch einen überlappenden Betrieb eine quasi-kontinuierliche Biogasbereitstellung erreicht werden. Eine solche Anordnung ist in Abbildung 9 dargestellt.

### Weitere Reaktorbauformen

#### DRANCO-Verfahren

Beim DRANCO-Verfahren als Feststoffvergärungsverfahren wird ein vertikal stehender zylindrischer Behälter mit konisch zulaufendem Boden verwendet. Die Beschickung mit vorbehandeltem Feststoff vermischt mit Rezirkulat/Gärmedium erfolgt über eine Kolbenpumpe und Einspeiseleitungen, die im

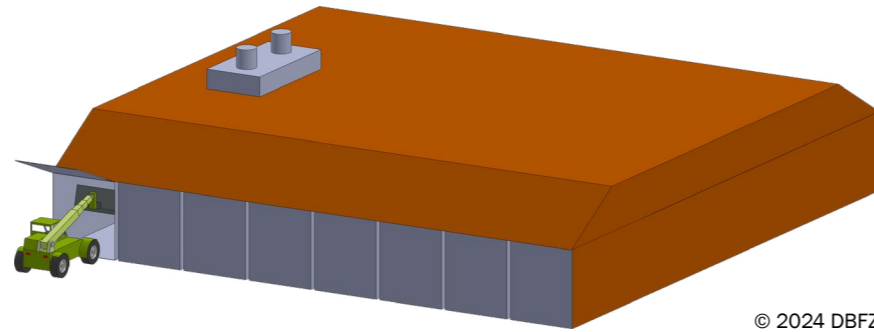


Abbildung 9: Garagenfermenter mit teleskopladergestütztem Substrat-, Gärmedium- und Gärrestumschlag

oberen Innenbereich des Behälters münden. Auf diese Weise wird Frischmaterial mit einem TS-Gehalt von ca. 25 – 35 % auf die Oberfläche des Gärmediums aufgebracht und mittels Schwerkraft durch den Behälter geführt [Seyfried et al. 2015]. Die Entnahme des Gärrestes erfolgt über eine Austragspumpe, welche am tiefsten Punkt des Bodens angeordnet ist. Weitere Maßnahmen zur Durchmischung des Gärmediums wie bspw. Rührwerke sind nicht vorgesehen. Dadurch ist der Reaktor mit geringer Komplexität und einfachem Aufbau wartungsarm und ermöglicht aufgrund der geringen mechanischen Ausstattung eine vergleichsweise hohe Betriebssicherheit. Konstruktionsbedingt kann sich ein vertikaler Pfpfenstrom ausbilden. Die Beheizung erfolgt extern über die Temperierung des einzuspeisenden Substrat-Gärmedium-Gemisches.

#### VALORGA-Verfahren

Beim VALORGA-Verfahren wird ebenfalls ein vertikal stehender zylindrischer Behälter zur Behandlung von

Substrat mit ca. 25 – 35 % TS-Gehalt eingesetzt. Im Unterschied zum DRANCO-Verfahren erfolgt die Feststoffvergärung in einem durch eine Wand teilweise geteilten Gärraum im Sinne von zwei verbundenen Kammern. Zum einen soll durch die dadurch geschaffene Zwangsführung des Gärmediumstroms die Verweilzeit sichergestellt werden. Hierbei kann sich ein horizontal verlaufender Pfpfenstrom von der ein- zur ausspeiseseitigen Kammer einstellen. Zum anderen erfolgt zur Durchmischung des Gärmediums die Einspeisung von zirkulierendem Biogas durch ein am Boden angeordnetes Einspeisesystem. Die Temperierung wird extern über die Beheizung des einzuspeisenden Materials sowie über ein internes Heizsystem ermöglicht [Seyfried et al. 2015].

#### Upflow-Downflow-Reflow

Das Upflow-Downflow-Reflow-Verfahren (UDR) ist als Flüssigvergärung überwiegend für die Behandlung von Gülle in Co-Fermentation mit weiteren nachwachsenden Rohstoffen oder geeigneten Biomassen vorgesehen. Kern

der Anlage sind zwei zylindrisch vertikal ausgerichtete Festbettreaktoren mit Biomasserückhalt, die eigenständig betrieben oder als Erweiterung an bspw. einen CSTR angekoppelt werden können. Ein kleinerer Festbett-Upflow-Reaktor wird im unteren Anmischbereich mit vorbehandeltem Feststoff und Gülle bzw. Rezirkulat oder Gärmedium beschickt und rührwerkgestützt durchmischt. Anschließend erfolgt ein vertikal nach oben gerichtetes Aufströmen des Gärmediums durch den Festbettreaktor im Gleichstrom mit

dem gebildeten aufsteigenden Biogas. Nach dem Durchlaufen werden das Biogas und das Gärmedium im oberen Bereich abgezogen. Das Gärmedium wird anschließend in einen nachgeschalteten größeren Festbett-Downflow-Reaktor oberhalb eingespeist und durchläuft den Gärraum vertikal nach unten verlaufend im Gegenstrom zum entstehenden Biogas. Anschließend erfolgt entweder die Einspeisung des Gärmediums in bspw. einen CSTR oder als Rezirkulat zurück in den Festbett-Upflow-Reaktor.

## Abwasserbehandlungsreaktoren

Zur Behandlung von Abwässern oder abgetrennten niedrigviskosen Gärrestflüssigphasen können zur Flüssigvergärung auch konventionelle Reaktoren wie bspw. Upflow anaerobic sludge blanket (UASB), Expanded granular sludge bed (EGSB) oder Internal circulation (IC) eingesetzt werden. Diese Reaktoren zeichnen sich durch kurze Verweilzeiten und hohe Abbauraten aus.

## DIE FERMENTERTYPEN IM VERGLEICH

### Technische Bewertung

In der Abfall- und Abwasserwirtschaft steht die Stabilisierung und Konditionierung von Abfall- und Reststoffströmen für die weitere Behandlung im Vordergrund. Demgegenüber haben landwirtschaftliche Biogasanlagen die Auskopplung von Nutzenergie (neben Methan auch Strom und Wärme) im Fokus. Die Schwerpunktsetzung auf Energiebereitstellung oder Abfallbehandlung wirken sich beispielsweise auf die Einhaltung der hydraulischen **Verweilzeiten** der Substrate im Prozess aus. Die Qualität des produzierten Biogases hingegen hat sich in Untersuchungen in der Praxis als unabhängig von der eingesetzten Technologie erwiesen [Angelonidi und Smith 2015]. Für die Bewertung des Biogasprozesses – sei es aus ökologischer, ökonomischer oder technischer Sicht – ist die Festlegung geeigneter Bilanzierungsgrenzen von entscheidender Bedeutung. Der hier betrachtete und bewertete Teil einer Anlage zur

Bereitstellung von Biogas ist in Abbildung 10 dargestellt.

Der **Wasserbedarf** ist für Verfahren der Flüssigvergärung technisch bedingt höher. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser häufig durch Einsatzstoffe mit hohem Wassergehalt, wie z. B. Gülle, oder aber durch die Rückführung von abgepressten Gärresten („Rezirkulation“ in Abbildung 10) gedeckt werden kann. Bei der Behandlung von Siedlungsabfällen kommen daher selten Rührkesselfermenter zum Einsatz, da dem Prozess große Wassermengen zugeführt werden müssten. Bei Pfpfenstromfermentern ist eine Rezirkulation sogar essentiell für den Prozess, da diese das frisch zugeführte Substrat mit aktiver Biomasse aus dem Gärrest animpft. Ein höherer Wasserbedarf, genauer gesagt ein höherer Wassergehalt im Gärmedium, wird in Tabelle 1 als nachteilig bewertet, da damit eine höhere Heizleistung für

die Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur einhergeht. Ein höherer Wassergehalt hat jedoch den verfahrenstechnischen Vorteil, dass der Eigenenergiebedarf für beispielsweise die Förder- oder Rührtechnik geringer ist.

Bei komplexeren Konzepten ist hinsichtlich des Strom- und Wärmebedarfs die Energiebilanz der Gesamtanlage zu berücksichtigen. So kann beispielsweise ein Teil der für die Fermenterbeheizung benötigten Wärme aus der Abwärme einer thermischen Substratvorbehandlung zurückgewonnen werden. Der **Eigenenergiebedarf** der unterschiedlichen Fermentertypen kann nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. Flüssigvergärungsverfahren (CSTR und PFR) sind in hohem Maße automatisierbar, woraus sich Strombedarfe für die Steuerungs- und Fördertechnik ergeben. Bei Trockenvergärungsverfahren sind diese zwar



ungleich geringer, jedoch ist hier ein höherer Dieserverbrauch zu verzeichnen, der sich aus der Beschickung mit Radladern resultiert.

Die von einer Biogasanlage ausgehenden **Geruchsemissionen**, hängen stark von der Lagerung der Substrate und Gärprodukte ab. Die Anlagen selbst sollten gasdicht ausgeführt sein, so dass sich die Geruchsbelastigungen in Grenzen halten. Beim Einsatz schwefelhaltiger Substrate kann es zur Bildung von Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) kommen, welches toxisch ist und nach faulen Eiern riecht [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2021a].

Auch der **Vorbehandlungsaufwand** der Substrate lässt sich nur schwer pauschalisieren. So erfordern die Verfahren zur Flüssigvergärung bei gegebener Substratzusammensetzung einen gewissen Vorbehandlungsaufwand um das Substratgemisch pumpfähig zu machen. Erheblicher ist jedoch die Beschaffenheit der Ausgangsstoffe. Abfälle aus der Getrenntsammlung müssen in einer aufwendigen, mehrstufigen Vorkette von Störstoffen wie Glas, Metall und Kunststoff befreit werden, was auch mit einer Entfernung von Organik einhergeht. Vandevivere et al. [2003] berichten von einer ungewollten Aussortierung von 15 – 25 %

der organischen Substanz mit entsprechenden Einbußen bei der Methan- ausbeute.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zur qualitativen Bewertung technischer Kriterien der drei etablierten Fermentertypen: Rührkesselreaktor, Pfropfenstromreaktor und Garagenfermenter. Dieser Vergleich ist keinesfalls als umfassend oder abschließend anzusehen, da beispielsweise Unterschiede und Bandbreiten der Substratbeschaffenheit oder der Betriebsweise von Biogasanlagen nicht vollumfänglich berücksichtigt werden können.

Tabelle 1: Qualitativer Vergleich der relevantesten Fermentertechnologien (Eigene Einschätzung, Vandevivere et al. 2003, Angelonidi und Smith 2015)

Kriterium	Rührkesselreaktor (CSTR)	Pfropfenstromreaktor (PFR)	Garagenfermenter
Methan- ausbeute	+	+	0
Wassergehalt	-	0	+
Verweilzeit	0	0	+
Flächenbedarf	0	+	-
Substratflexibilität	0	0	+
Vorbehandlungsaufwand der Substrate	-	0	+
Störstofftoleranz	-	0	+
Prozessstabilität	+	+	0
Geruchsemissionen	+	+	0
Eigenenergiebedarf: Strom	0	-	+
Eigenenergiebedarf: Wärme	-	0	+
Eigenenergiebedarf: Dieselkraftstoff	0	0	-
Wartungsaufwand	-	0	+
Automatisierbarkeit	+	+	-
Methanemissionen	0	0	- -
Investitionskosten	0	-	+

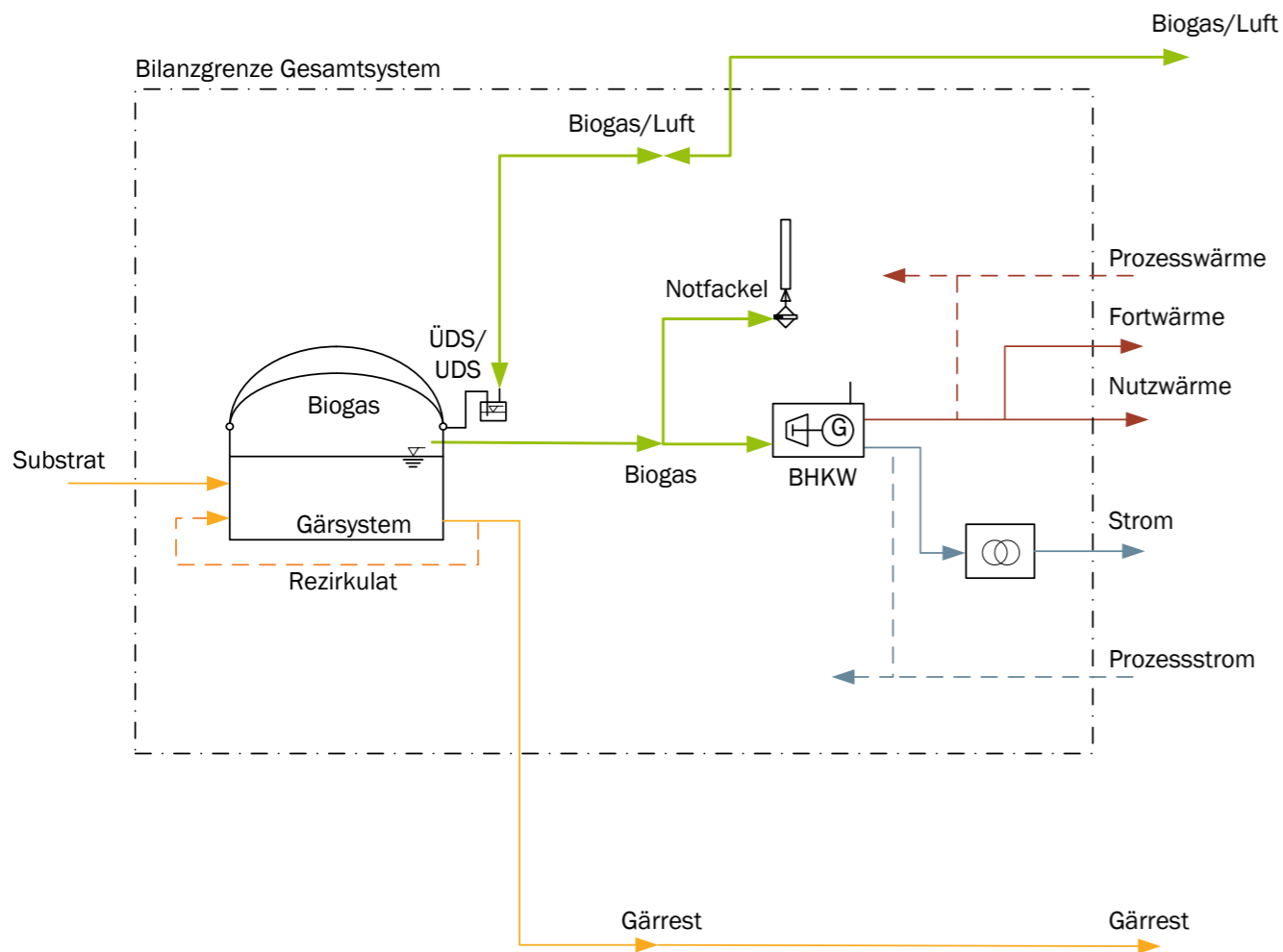


Abbildung 10: Bilanzgrenze einer Biogasanlage. Rote Hervorhebung: Betrachtungsrahmen der Bewertung (© DBFZ, 2017)

Bei dem Technologievergleich der drei Reaktorbauarten in Tabelle 1 erscheint der Garagenfermenter als die geeignetste Variante für die Vergärung stapelbarer Ressourcen. Zu berücksichtigen sind jedoch auch die vergleichsweise sehr hohen betriebsbedingten Methanemissionen sowie die Notwendigkeit eines geübten Umgangs mit dem Teleskopklader beim Betrieb im engen Innenraum des Garagenfermenters. Aufgrund der negativen Auswirkungen der Methanemissionen auf die Treibhausgasbilanz wird der Garagenfermenter im Vergleich der Technologien gesondert dargestellt.

## Ökologische Aspekte

Für die THG-Bewertung der Vergärungsprozesse im Fermenter sind neben den THG-Emissionen aus der Bereitstellung der für den Fermenterbetrieb benötigten Energie auch die direkten Methanemissionen relevant.

Für den Betrieb der Fermenter wird sowohl thermische als auch elektrische Energie benötigt. Der Wärmebedarf wird bisher häufig aus der Abwärme interner Prozesse gedeckt (Blockheizkraftwerk). Der benötigte Strom wird in der Regel aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. Die Nutzung von Netzstrom führt jedoch

zu höheren klimarelevanten Emissionen des Fermenterbetriebes. Aufgrund des geringeren Strombedarfs stellt sich der Garagenfermenter im Vergleich zu den beiden anderen als vorteilhafter dar (Tabelle 1).

Neben den Aufwendungen für die Bereitstellung der Prozessenergie für die Biogasanlage ist auf der Stufe der Fermentation vor allem die Betrachtung der direkten Methanemissionen relevant. Diese können aufgrund des hohen Treibhauspotentials (GWP, global warming potential) von Methan das Gesamtergeb-

nis entscheidend beeinflussen. Wie Tabelle 1 zeigt, erweisen sich hier die beiden kontinuierlich betriebenen Fermenter CSTR und PFR als ökologisch vorteilhafter.

Auch bei der Bereitstellung der Biomasse entstehen Treibhausgasemissionen, beispielsweise beim Anbau oder der Sammlung der Ressourcen. Diese werden hier nicht berücksichtigt, da sie für einen reinen Vergleich der Fermentertechnologien nicht relevant sind.

## Ökonomische Aspekte

Biogaskonzepte sind aus ökonomischer Sicht **standortspezifisch** zu betrachten. Unterschiedliche Anlagengrößen, Substratzusammensetzungen, Anlagentechnologien, Produkte und Logistikkonzepte erschweren den Vergleich verschiedener Anlagen. Generell kann bei der Biogaserzeugung zwischen kapitalgebundenen Kosten wie Investitionen in Gebäude, Anlagen, sowie Grund und Boden und verbrauchs-/betriebsgebundenen Kosten unterschieden werden.

Im Betrachtungsrahmen fallen **Investitionen** für den Fermenter bzw. Nachgärer sowie für die Befüll- und Entleertechnik an. Je nach Reaktortechnologie ist die Rührtechnik in den Fermenter integriert. Darüber hinaus sind Mittel für die Wartung und Instandhaltung der Anlagen einzuplanen. Die betriebsgebun-

denen Kosten ergeben sich im Wesentlichen aus den **Personalkosten** für die Anlagenbedienung sowie für die Verwaltung und Administration. Die verbrauchsgebundenen Kosten ergeben sich aus dem **Substratbedarf** sowie der benötigten **Prozessenergie** in Form von elektrischem Strom für Pumpen und Rührwerke und Wärme für die Fermenterbeheizung.

Bei überwiegendem Einsatz von Anbaubiomasse ist davon auszugehen, dass die **Substratkosten** mit bis zu über 50% pro Jahr die höchsten Kosten verursachen [C.A.R.M.E.N. e.V. 2024]. Daher ist eine langfristig gesicherte Substratversorgung für ein Biogaskonzept von entscheidender Bedeutung. Neben der **Verfügbarkeit der Biomasse** sind auch deren Transport und Lagerung zu berücksichtigen.

Werden vermehrt Abfall- und Reststoffe eingesetzt, die kostengünstiger verfügbar sind oder bei deren Verwertung sogar Erlöse erzielt werden, sinkt dieser Kostenblock deutlich.

Der zweitgrößte Kostenblock sind in der Regel die **Investitionen** bzw. deren jährliche Abschreibung sowie Wartung und Instandhaltung. Die Höhe der spezifischen Investitionen, z. B. bezogen auf die Biogasproduktion, sinkt mit zunehmender Anlagengröße. Die **Skaleneffekte** bei den Fermentern sind vorhanden und begünstigen den Bau größerer Anlagen. Dies geht jedoch mit einem höheren monetären Aufwand für die Substratlogistik einher. Das Einzugsgebiet für die Ressourcenbereitstellung wird entsprechend größer und die Substrate müssen auch aus **größeren Entfernungen** angeliefert werden.

## FAZIT

Für die Planung und Errichtung einer Anlage zur Bereitstellung von Biomethan sind vielfältige Parameter zu beachten, welche nicht nur die Auswahl einer geeigneten Reaktortechnologie betreffen. So bestimmen auch die Substrateigenschaften maßgeblich die vorzusehenden, vorbehandelnden Upstream-Prozessschritte. Das Vermarktungskonzept der Produkte – beispielsweise Biomethan als Ener-

gieträger und Gärrest als organischer Dünger – wirken sich hingegen vornehmlich auf die Reinigungs- und Aufbereitungsschritte der Downstream-Prozesse aus.

Bei gegebener Substratverfügbarkeit entscheidet im Wesentlichen der Trockensubstanzgehalt des Gärgemisches und der Störstoffeintrag über die Auswahl einer geeigneten Tech-

nologie. Kontinuierliche Verfahren zeigen eine höhere Effizienz im Sinne der energetischen Substratausnutzung, da sich eine stabile Prozessbiologie ausbilden kann. Diskontinuierliche Verfahren reduzieren den Vorbehandlungsaufwand und weisen eine geringere Störstoffanfälligkeit auf, emittieren in der Regel jedoch größere Mengen treibhausgasrelevanter Gase.



## DAS VORHABEN PILOT-SBG

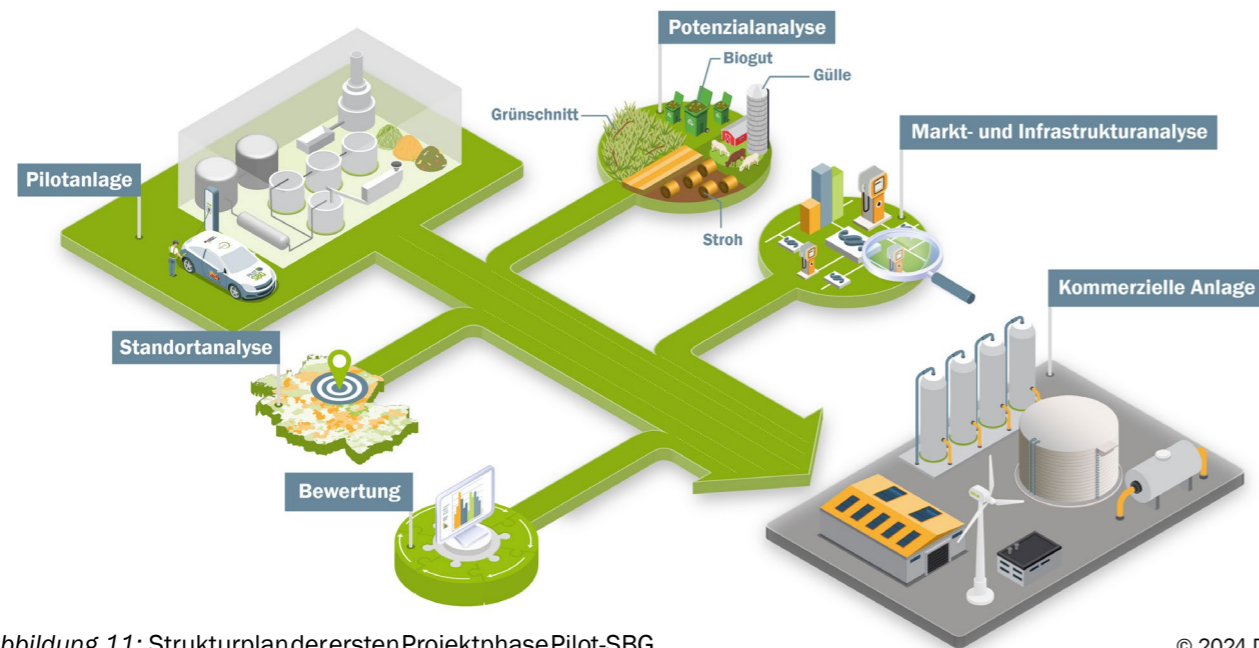


Abbildung 11: Strukturplan der ersten Projektphase Pilot-SBG

© 2024 DBFZ

Das Vorhaben fokussiert als innovationsunterstützende Dienstleistung auf die Weiterentwicklung von fortschrittlichem erneuerbarem Methan als Kraftstoff in Deutschland. Es baut auf der in der ersten Projektphase geplanten und errichteten Pilotanlage im Technikumsmaßstab und entsprechenden Vorversuchen auf. Der

Während nach der Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2023 der technologische Schwerpunkt im Projekt auf der erfolgreichen Pilotierung und Prozessoptimierung liegt, werden darüber hinaus Rückschlüsse für modulspezifische und konzeptionelle Optimierungsansätze und den Erfolg im kommerziellen Maßstab abgeleitet. Die Optimierungs-

kampagnen mit agrarischen (Stroh und Rindergülle) und urbanen (Bioabfall: Biogut und Grüngut) Ressourcen werden auch modul- und schnittstellenspezifische Versuchsreihen durchgeführt. Basierend auf der Modellierung und Skalierung der Versuchsergebnisse sowie einer Erweiterung der Bilanzgrenzen auf die gesamte Bereitstellungskette werden neben der ökologischen Bewertung auch Kosten- und Erlösstrukturen betrachtet.

### Das Vorhaben Pilot-SBG adressiert die Bereitstellung von erneuerbarem Methan als Energieträger für schwer elektrifizierbare Verkehrssektoren.

innovative Verfahrensansatz der Pilotanlage zielt auf die Erhöhung der Methanausbeute aus dem Biogasprozess, u. a. durch die Verwertung des biogenen CO<sub>2</sub> mit grünem Wasserstoff. Zentrale Aspekte einer begleitenden Machbarkeitsanalyse sind vor allem die Ressourcenverfügbarkeit und -verteilung sowie weitere Standort-, Infrastruktur- und Marktfragen (Abbildung 11).

kriterien der Prozessführung und der Prozesskette sind dabei Ressourceneffizienz und die Schließung von Stoffkreisläufen sowie Treibhausgasvermeidungskosten. In den zwei Teilpaketen werden daher praktische Forschungsversuche einerseits und deren Bewertung auf konzeptioneller Ebene andererseits realisiert. Neben dem reproduzierbaren Routinebetrieb der Gesamtanlage in Versuchs-

Im Anschluss an das Projekt Pilot-SBG soll die Pilotanlage als zentraler Bestandteil einer Technologieplattform für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft dienen. Von besonderem Vorteil ist dabei die hohe Flexibilität der Anlage hinsichtlich einer bspw. veränderten Anordnung oder Erweiterung der modularen Prozesskette.

## ÜBERBLICK FOKUSHEFTE 2023/2024

Biogene Reststoffe und Abfälle gewinnen im Kontext der Energie- und Verkehrswende und einer biobasierten Wirtschaft zunehmend an Bedeutung. Die Bereitstellung von erneuerbarem Methan als Kraftstoff im Verkehr kann dabei einen wesentlichen Beitrag leisten. Im Vorhaben Pilot-SBG wird in einem integrierten Konzept aus biogenen Rest- und Abfallstoffen über die anaerobe Fermentation Biogas produziert und dieses anschließend mit grünem Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Um das Konzept optimal zu unterstützen, werden neben den technologischen Fragestellungen innerhalb des Vorhabens auch Themen der Markt- und Standortanalyse adressiert. Ein erster Meilenstein ist die übersichtliche Zusammenfassung des Status quo in einer Veröffentlichungsreihe zu ausgewählten Schwerpunkten.

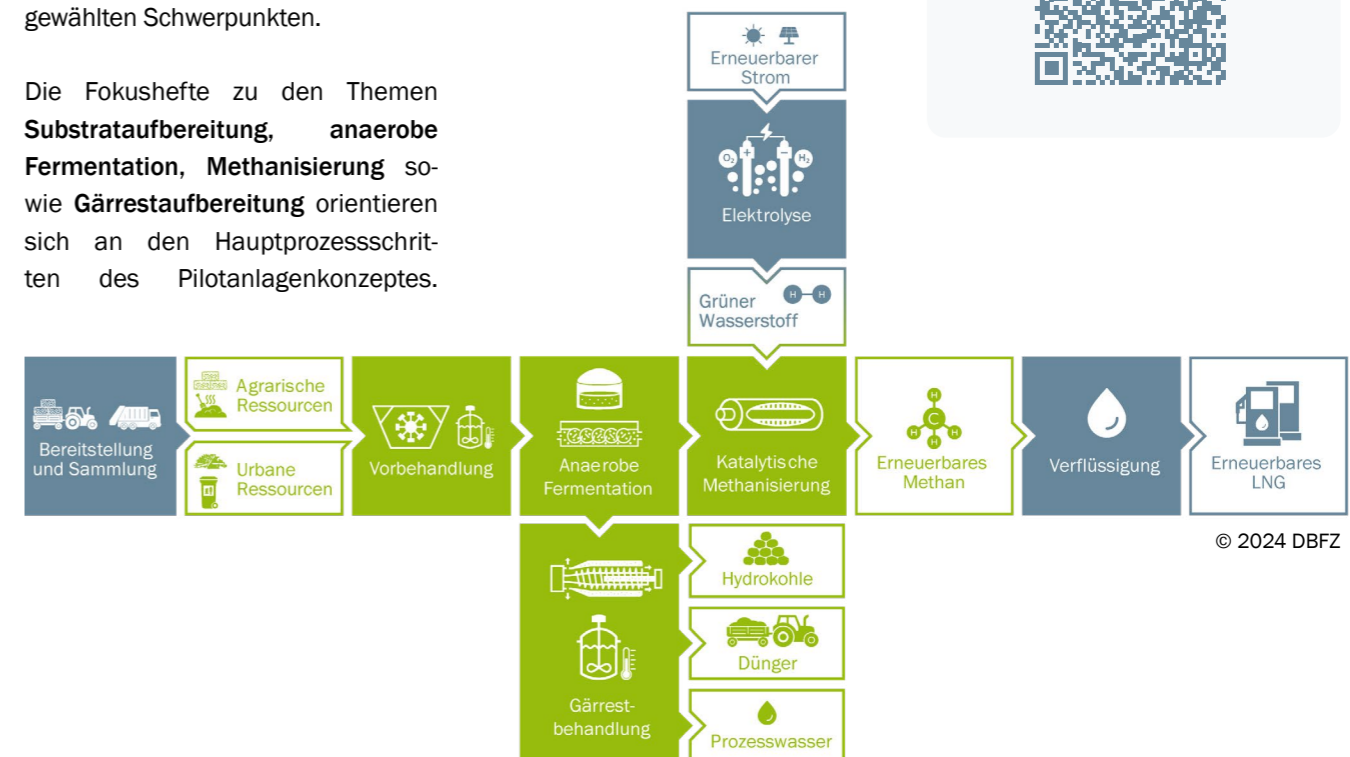
In jedem Fokusheft wird ein Überblick über die verfügbaren Optionen des jeweiligen Prozessschritts gegeben und diese werden in einem kurzen technischen, ökonomischen und ökologischen Vergleich einander gegenübergestellt. Analog hierzu verfahren auch die beiden Fokushefte zur **Wasserstoffbereitstellung** sowie zur **Methanverflüssigung**. Diese Prozessschritte sind zwar nicht Bestandteil der Pilotanlage, aber für eine Skalierung in den kommerziellen Maßstab unabdingbar (Abbildung 12).

Die Ergebnisse der Machbarkeitsanalyse aus der ersten Projektphase sind neben dem vorliegenden Fokusheft zur **Marktanalyse und Treibhausgasquote** zusammenfassend in denen zur **Standortanalyse und Ressourcen-**

**verteilung** sowie **Infrastrukturanalyse** dargestellt, wobei sie thematisch vielfach ineinandergreifen.

Die Umsetzung von integrierten Bereitstellungskonzepten für erneuerbares, also bio- und strombasiertes Methan ist von zahlreichen Faktoren abhängig und kann in seiner standortspezifischen Ausgestaltung sehr unterschiedlich ausfallen. Ein erstes **Beispielkonzept** für die Umsetzung im kommerziellen Maßstab wird in einem weiteren Fokusheft dargestellt.

►► Weitere Informationen: Report 44 „Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr“



© 2024 DBFZ

Abbildung 12: Prozessschritte in der Pilotanlage (grün) und Betrachtungsrahmen für den kommerziellen Maßstab (grün + petrol)



Abbildung 13: Pilotanlage zur Herstellung von erneuerbaren Methan auf dem Gelände des Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig

©DBFZ 2023

## ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Abkürzung	Beschreibung
BHKW	Blockheizkraftwerk
ÜDS	Überdrucksicherung
UDS	Unterdrucksicherung
KS	Kraftstoff
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
THG	Treibhausgas
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
oTS	organaische Trockensubstanz
B <sub>R</sub>	Raumbelastung
TS	Trockensubstanz
CSTR	continuous stirred-tank reactor   Rührkesselreaktor
PFR	plug flow reactor   Pfropfenstromreaktor
UDR	Upflow-Downflow-Reflow
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket
EGSB	Expanded granular sludge bed
IC	Internal circulation
GWP	global warming potential
CNG	Compressed Natural Gas
FuE	Forschung und Entwicklung
LNG	Liquified Natural Gas

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Edukten und Produkten des Biogasprozesses (European Biogas Association 2021).....	4
Abbildung 2: Biochemische Prozessschritte des anaeroben mikrobiellen Abbaus von Biomasse .....	6
Abbildung 3: Eignung von Stoffströmen für Behandlungstechnologien (angepasst nach Wellinger et al. 2013) .....	8
Abbildung 4: Darstellung der Anlagentechnik im Behälterinnenraum im entleerten Zustand auf dem Gelände des DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH .....	10
Abbildung 5: Rührkesselreaktor mit Doppelmembrangasspeicherdach, Paddelrührwerk links unten und Seitenrührwerk rechts unten.....	11
Abbildung 6: Rührkesselreaktor mit Zentralrührwerk mittig und Festdach.....	12
Abbildung 7: Pfropfenstromreaktor mit durchgängigem Paddelrührwerk und kreisrundem Querschnitt .....	13
Abbildung 8: Pfropfenstromreaktor mit mehreren seitlichen Haspelrührwerken und rechteckigem Querschnitt.....	13
Abbildung 9: Garagenfermenter mit teleskopladergestütztem Substrat-, Gärmedium- und Gärrestumschlag .....	14
Abbildung 10: Bilanzgrenze einer Biogasanlage. Rote Hervorhebung: Betrachtungsrahmen der Bewertung (© DBFZ, 2017) .....	16
Abbildung 11: Strukturplan der ersten Projektphase Pilot-SBG .....	20
Abbildung 12: Prozessschritte in der Pilotanlage (grün) und Betrachtungsrahmen für den kommerziellen Maßstab (grün + petrol).....	21
Abbildung 13: Pilotanlage zur Herstellung von erneuerbaren Methan auf dem Gelände des Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig .....	22

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Qualitativer Vergleich der relevantesten Fermentertechnologien (Eigene Einschätzung, Vandevivere et al. 2003, Angelonidi und Smith 2015).....	17
--	----

## LITERATURVERZEICHNIS

Angelonidi, Eleni; Smith, Stephen R. (2015): A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. In: *Water Environ J* 29 (4), S. 549–557. DOI: 10.1111/wej.12130.

C.A.R.M.E.N. e.V. (Hg.) (2024): Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Online verfügbar unter <https://www.carmen-ev.de/2020/11/11/wirtschaftlichkeit-von-biogasanlagen/>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2024, zuletzt geprüft am 20.02.2024.

Castellano-Hinojosa, Antonio; Armato, Caterina; Pozo, Clementina; González-Martínez, Alejandro; González-López, Jesús (2018): New concepts in anaerobic digestion processes. Recent advances and biological aspects. In: *Applied microbiology and biotechnology*. DOI: 10.1007/s00253-018-9039-9.

Daniel-Gromke, Jaqueline; Rensberg, Nadja; Denysenko, Velina; Stinner, Walter; Schmalfuß, Tina; Scheftelowitz, Mattes et al. (2018): Current Developments in Production and Utilization of Biogas and Biomethane in Germany. In: *Chemie Ingenieur Technik* 90 (1-2), S. 17–35. DOI: 10.1002/cite.201700077.

Deublein, Dieter; Steinhauser, Angelika (2010): *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Dotzauer, Martin; Barchmann, Tino; Schmieder, Uta; Rensberg, Nadja; Stinner, Walter; Arnold, Karin; Krüger, Christine (2022): Kurzstudie zur Rolle von Biogas für ein klimaneutrales, 100 % erneuerbares Stromsystem 2035. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Leipzig.

Europäische Kommission (2022): REPowerEU. Kommission will Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen aus Russland schnell verringern. Online verfügbar unter [https://germany.representation.ec.europa.eu/news/repowereu-kommission-will-abhangigkeit-von-fossilen-brennstoffen-aus-russland-schnell-verringern-2022-05-18\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/repowereu-kommission-will-abhangigkeit-von-fossilen-brennstoffen-aus-russland-schnell-verringern-2022-05-18_de), zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 29.01.2024.

European Biogas Association (2021): *Statistical Report of the European Biogas Association 2021*. Brussels, Belgium.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hg.) (2016): *Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung*. 7. Auflage. Rostock (Bioenergie).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2021a): *Biogas - regional, fair, klimaneutral* (Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, 39).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hg.) (2021b): *Biogasmessprogramm III. 61 Biogasanlagen im Vergleich*. 1. Auflage. Gülzow bei Güstrow: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.

Fachverband Biogas e.V. (2022): *Branchenzahlen 2020 und Prognose der Branchenentwicklung 2021*. Stand 10/2022. Online verfügbar unter [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de\\_branchenzahlen](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de_branchenzahlen), zuletzt geprüft am 13.01.2023.

Lora Grando, Rafaela; Souza Antune, Adelaide Maria de; da Fonseca, Fabiana Valéria; Sánchez, Antoni; Barrera, Raquel; Font, Xavier (2017): *Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants*. A European

evaluation of research and development. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, S. 44–53. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.079.

Mao, Chunlan; Feng, Yongzhong; Wang, Xiaojiao; Ren, Guangxin (2015): Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, S. 540–555. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.032.

Rensberg, Nadja; Denysenko, Velina; Daniel-Gromke, Jaqueline (2023): *DBFZ Report Nr. 50: Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan*. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ Report, 50). Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-2023121912324769809602>.

Seyfried, Carl Franz; Kroiss, Helmut; Rosenwinkel, Karl-Heinz; Dichtl, Norbert; Weiland, Peter (Hg.) (2015): *Anaerobtechnik. Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung*. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin Germany: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=997049>.

Vandevivere, P.; Baere, L. de; Verstraete, W. (2003): Types of anaerobic digesters for solid wastes. In: J. Mata-Alvarez (Hg.): *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. London: IWA Publishing, S. 111–140.

Weiland, Peter (2010): Biogas production. Current state and perspectives. In: *Applied microbiology and biotechnology* 85 (4), S. 849–860. DOI: 10.1007/s00253-009-2246-7.

Wellinger, A.; Murphy, Jerry D.; Baxter, D. (2013): *The Biogas Handbook. Science, Production and Applications*: Elsevier.

