



Fokusheft im Projekt Pilot-SBG

SUBSTRATVORBEREITUNG

Optimierung des Abbaus faserreicher Biomassen für den Biogasprozess

Zerkleinerung als essenzieller Schritt
zur Biomasseaufbereitung

Effiziente Aufschlussmethoden zur
Verbesserung der Biogasausbeute

Reduktion des Energieverbrauches
durch Zerkleinerungstechniken

INHALTSVERZEICHNIS

Übersicht	4
Hintergrund	5
Technologien im Überblick	6
Physikalische Verfahren	7
Mechanisch	7
Thermisch	9
Kavitation	12
Elektrokinetische Verfahren	12
Chemische Verfahren	12
Biochemische Verfahren	14
Mikroorganismen	14
Enzyme	14
Techno-ökonomischer Vergleich ausgewählter Substrataufbereitungsverfahren	15
Technische Bewertung	15
Ökonomische Bewertung	18
Bewertung der THG-Emissionen	19
Das Vorhaben Pilot-SBG	20
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	24
Literaturverzeichnis	25
Weitere Fokushefte im Projekt Pilot-SBG	27

IMPRESSUM

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116
DE-04347 Leipzig
+49 (0)341 2434-112
info@dbfz.de
www.dbfz.de

Autor:innen: Erik Fischer, Bengt Verworner, Timo Zerback

Datum der Veröffentlichung: 04. November 2024

Zitierempfehlung: Fischer, E.; Verworner, B.; Zerback, T.; (2024). Substratvorbereitung - Optimierung des Abbaus faserreicher Biomassen für den Biogasprozess. Fokusheft im Projekt Pilot-SBG. Leipzig: DBFZ. 27 S. ISBN: 978-3-949807-17-6. DOI: 10.48480/9q7a-py77.

ISBN: 978-3-949807-17-6

DOI: <https://doi.org/10.48480/9q7a-py77>

Layout: Rico Ehrentraut

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

ÜBERSICHT

Die Substratvorbereitung, d. h. die Aufbereitung von Rohsubstraten für den Biogasprozess soll vorrangig einen störungsfreien Anlagenbetrieb mittels Pump- und Rührwerkseinheiten ermöglichen, indem die Stückigkeit und Faserlängen der Substrate sowie der Trockensubstanzgehalt der Substratmischungen entsprechend eingestellt werden. Bei der

Verwendung von unterschiedlichen Rohsubstraten wie Getreidestroh, Grünschnitt oder Bioabfällen sind verschiedene Aufbereitungsschritte zur Grob- und Fein- bzw. Trocken- und Nasszerkleinerung möglich. Die Substratvorbereitung besteht in der Regel nicht aus einer festen, stationären Anlageneinheit, sondern setzt sich aus einzelnen Aggregaten

zur Substrataufbereitung mit einem zentralen Wiegeplatz zusammen. Darüber hinaus sind Flächen für das Abfüllen, das Umfüllen und das Mischen von Substraten erforderlich - mit dem Ziel lager- und dosierfähige Chargen mit Hilfe von Gebinden und Behältern für den nachgeschalteten Prozessschritt der anaeroben Vergärung bereitzustellen.

Kernthemen der Broschüre

- ▶▶ Vorbehandlung und Homogenisierung der Inputsubstrate zur besseren Förderbarkeit
- ▶▶ Mechanischer Substrataufschluss zur Oberflächenvergrößerung
- ▶▶ Beschleunigung des mikrobiellen Abbaus fester organischer Bestandteile bis hin zum Biogas
- ▶▶ Verbesserung der Rührfähigkeit der Substratmischungen und damit verbundene Energieeinsparung

Neben einem störungsfreien Betrieb, soll der Substrataufschluss auch eine Erhöhung der **Biogasausbeute** bewirken. Vereinfacht ausgedrückt, bewirkt die Zerkleinerung (grobmechanisch bis Aufspaltung auf molekularer Ebene) einen verbesserten Zugang entsprechender Mikroorganismen, welche für die Biogasentstehung verantwortlich sind. Dadurch kann sich der Biogasertrag erhöhen.

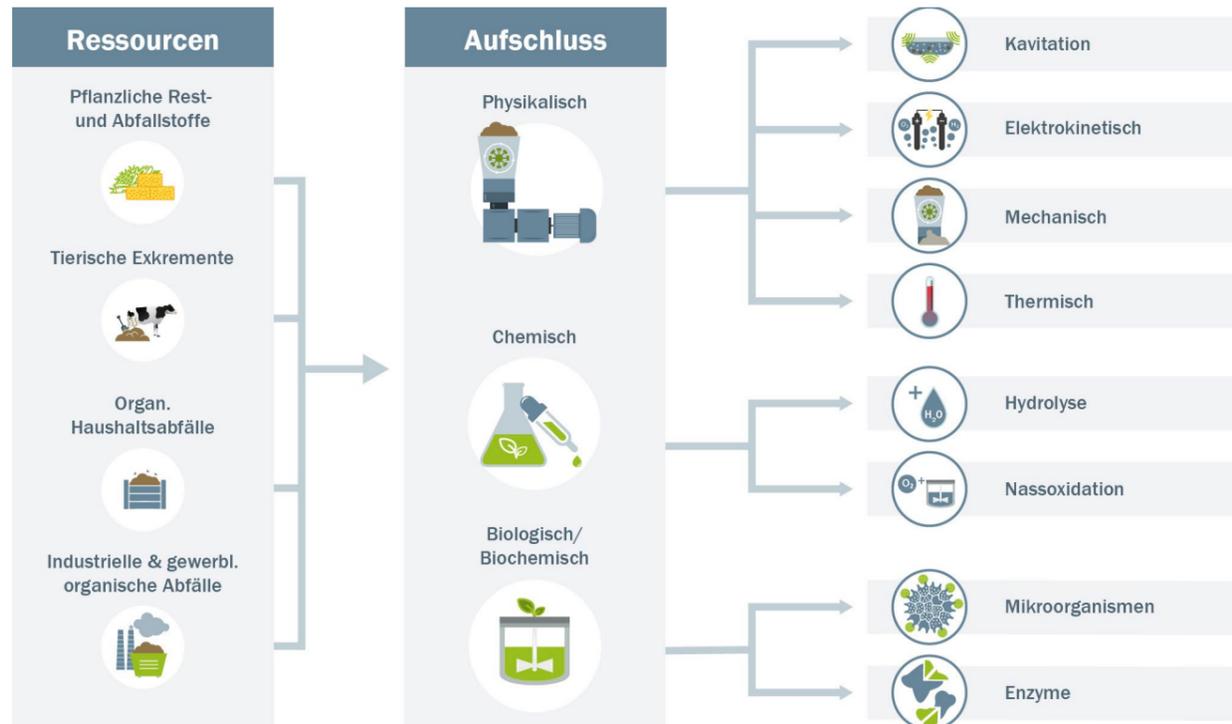


Abbildung 1: Graphical Abstract: Ressourcen und Aufschussmöglichkeiten

©DBFZ 2024

HINTERGRUND

Die Substrataufbereitung in der Biogastechnik hat den Hintergrund Einsatzstoffe für die generelle Einsatzbarkeit zu konditionieren und den Biogasertrag zu erhöhen. Eine Substrataufbereitung hat in der Regel zum Ziel die Vergärbarkeit von Einsatzstoffen bei der anaeroben Vergärung zu verbessern.

Die anaerobe Vergärung biogener Rest- und Abfallstoffe bietet eine Reihe von Chancen:

- die Bereitstellung von Biogas oder Biomethan als erneuerbarer Energieträger oder strategischer Grundstoff für die Weiterverarbeitung
- die Bereitstellung von biobasiertem CO₂ zur Nutzung oder Abscheidung
- die Bereitstellung von organischem Dünger und weiteren Koppelprodukten
- Reduktion klimawirksamer Emissionen bei der Lagerung und Verwertung von bspw. Gülle und Bioabfällen.

Die Herausforderung bei der anaeroben Vergärung von faser- und damit lignocellulosehaltiger Biomassen liegt in deren innerer Struktur, was die mikrobielle Umsetzung und Biogasbildung limitiert (Abbildung 2). Die Ursache liegt in der chemischen Struktur des Ligninpolymers, welches im Wesentlichen aus aromatischen Bindungen, Doppelbindungen und phenolischen Gruppen besteht.

Diese Struktur verleiht den Ligninmolekülen hydrophobe - wasserab-

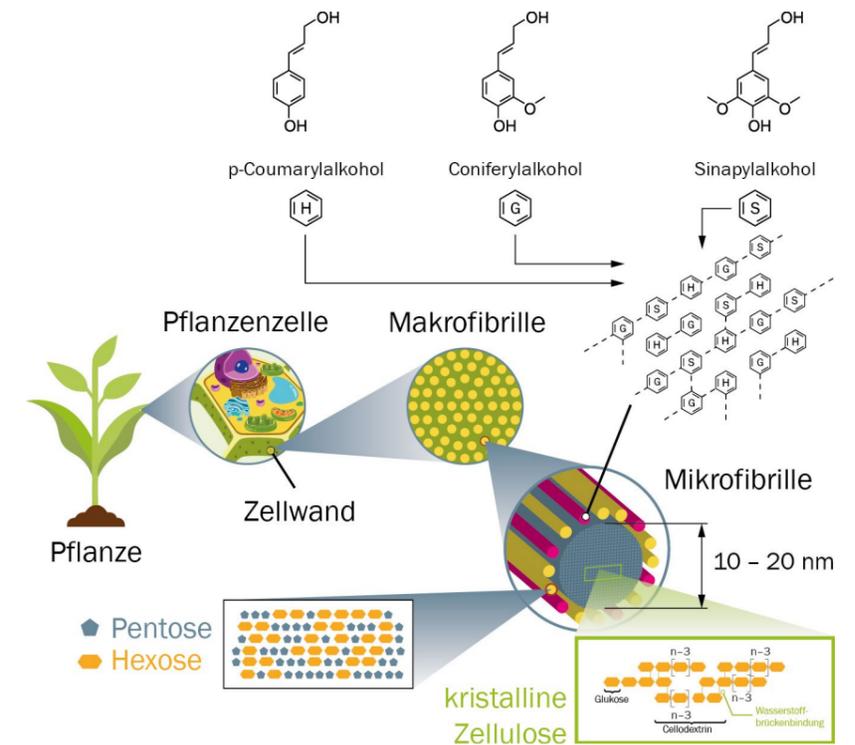


Abbildung 2: Struktur von Lignocellulose [Rubin, E. 2008]

weisende - Eigenschaften, welche biochemisch nur schwer zugänglich sind. Darüber hinaus sind die Polysaccharide (Vielfachzucker) Cellulose und Hemicellulose kovalent an das Ligninmolekül gebunden. Folglich führt die Einbindung des Lignins zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit der beiden Polysaccharide gegenüber biochemischen Abbauprozessen.

Die Substrataufbereitung - auch Substratdesintegration bzw. -aufschluss genannt - umfasst die Vorbehandlung von Eingangsstoffen für Biogasanlagen sowohl vor als auch während des anaeroben Abbauprozesses. Ziel der Substrataufbereitung ist es, die Bindungen zwischen den einzelnen Bestandteilen der Lignocellulose aufzulösen. Durch die Freisetzung von Zellmaterial wird die

Verfügbarkeit der biologisch abbaubaren Substanzen verbessert. Die Verweilzeit des Substratgemisches im Fermenter kann reduziert werden und die Biogasproduktion kann kontinuierlicher ablaufen und gesteigert werden. Neben der Steigerung von Gasertrag und Abbaugeschwindigkeit können durch eine gezielte Aufbereitung bspw. auch Schwimm- und Sinkschichten vermieden, die Leistungsaufnahme der Rührwerke reduziert oder die Pumpfähigkeit des Substrates und/oder des Gärmediums verbessert werden.

TECHNOLOGIEN IM ÜBERBLICK

Je nach Art des Energieeintrags lassen sich die Verfahren zur Substrataufbereitung in **physikalische, chemische** oder **biologische Prozesse** unterteilen. Während mechanische, thermische oder elektrokinetische Technologien den physikalischen Verfahren zugeordnet werden, findet sich der Einsatz von Hilfsstoffen (z.B. Enzymen, Mikroorganismen, Säuren, Laugen) in den biologischen und chemischen Desintegrationsprozessen wieder. Darüber hinaus gelten kombinierte Verfahren wie in etwa die Extrusion als Schlüsseltechnologie für eine schnelle und möglichst vollständige Vergärung von Substraten. Abbildung 3 veranschaulicht das breite Spektrum an Verfahrensvarianten zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate, wobei über die Prozesskette hinaus noch weitere Technologien existieren.

Der Aufschluss lignocellulosehaltiger Substrate erfolgt in der Praxis in der Regel durch physikalische Desintegrationsverfahren (Abbildung 4). Gemäß einer seitens des DBFZ durchgeführten Betreiberbefragung für das Bezugsjahr 2022 gaben 24 % aller Befragten an, eine Desintegrationseinheit für den Anlagenbetrieb einzusetzen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, erfolgt der Substrataufschluss in den Anlagen zu 18 % über mechanische Verfahren. In rund 3 % der Anlagen kommen biologische sowie in 2 % thermische Aufschlussverfahren zum Einsatz. Alternative Technologien wie etwa chemische Verfahren (0,5 %), Ultraschall oder elektrische Verfahren nehmen derzeit nur eine untergeordnete Rolle ein.

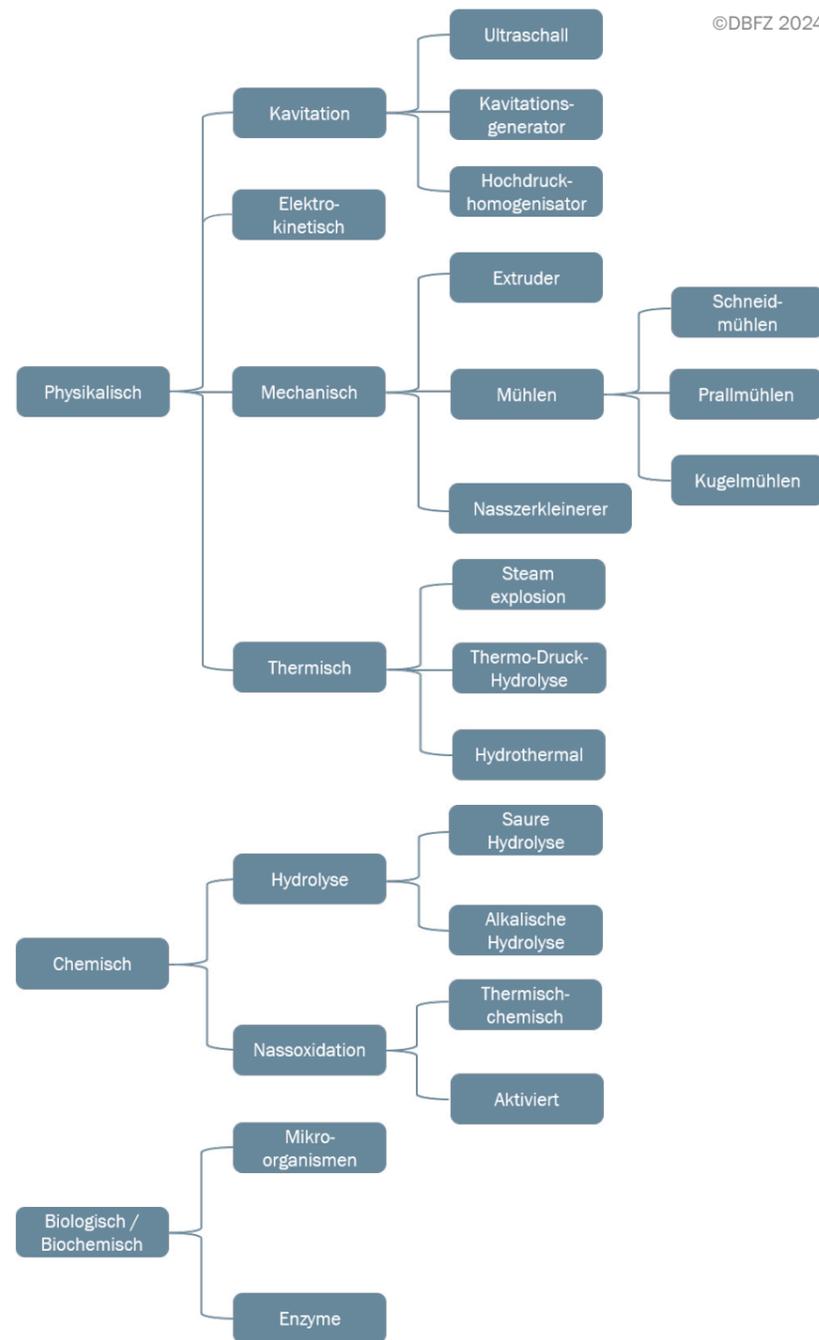


Abbildung 3: Überblick der Verfahren zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate [nach Schumacher et al. 2012 und Baumkötter 2019]

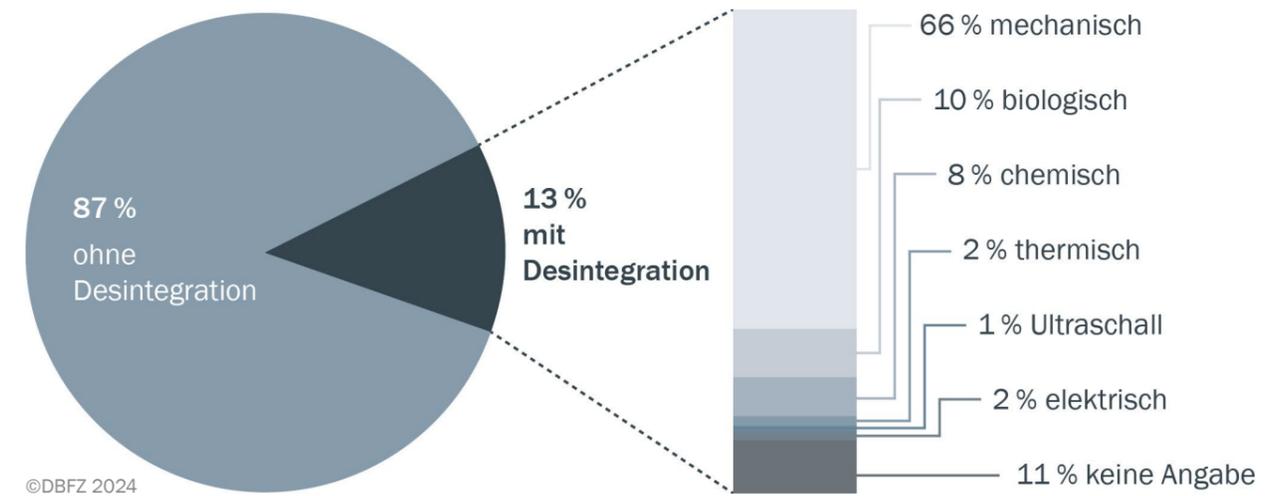


Abbildung 4: Im Biogasanlagenbestand eingesetzte Substrataufschlussverfahren (DBFZ-Betreiberbefragung 2023, Bezugsjahr 2022)

PHYSIKALISCHE VERFAHREN

Bei der physikalischen Substrataufbereitung wird die Biomasse ohne die Zugabe von Chemikalien, Mikroorganismen oder Enzymen vorbehandelt. Das Ziel dieser Verfahren besteht darin, die Lignocellulosestruktur durch mechanische und thermische Beanspruchung aufzubrechen und insbesondere die Oberfläche des Substrates zu vergrößern.

Mechanisch

Die mechanischen Vorbehandlungsverfahren werden hier in die Gruppen Extruder, Mühlen und Nasszerkleinerer unterteilt.

Extruder

Bei der Extrusion werden Stoffe unter Druck von Schnecken durch eine Öffnung gepresst. Bezüglich der Bauform können Extruder in Ein- und Doppelschneckenextruder unterteilt werden. Die Doppelschneckenextruder können weiter

in Gleich- und Gegenläufer unterschieden werden. Die Schnecken werden geometrisch in die vier Abschnitte Eintrag, Verdichtung, Zerkleinerung sowie Austrag unterteilt. Die Eintragszone, welche unter dem Einfülltrichter liegt, zieht das zugegebene Material ein und fördert es in die Verdichtungszone. Dabei wird das Substrat bereits grob zerkleinert. Bei der weiteren Förderung durch den Extruder verengen sich die Schneckengänge und das Material wird verdichtet. Mit steigendem Druck erhöht sich auch die Temperatur im Substrat. Zudem ändert sich aufgrund der abnehmenden Steigung der Schnecke(n) die Größe der Kammern, wodurch sich der auf das Substrat wirkende Druck stetig ändert. Schließlich gelangt das Material in die Austragszone, welche die Aufgabe hat, die aufgeschlossene Biomasse durch eine definierte Öffnung zu pressen. Durch den Aufschluss mit dem Extruder erwärmt sich das zu zerkleinernde Material

und kann am Auslass eine Temperatur von bis zu ca. 50 °C aufweisen [Baumkötter 2019]. Bei Versuchen zur Aufbereitung von Stroh mit dem Extruder konnte eine Steigerung des Methanertrags um bis zu 21 % erreicht werden [Lehmann & Friedrich 2012].

Mühlen

Mühlen werden insbesondere zur Vorbehandlung von schüttfähigen Feststoffen eingesetzt und in Schneid-, Prall- und Kugelmühlen unterteilt. Schneidmühlen zerkleinern das Substrat durch Scherwirkung zwischen einem oder mehreren rotierenden Messern – dem Rotor – und einer feststehenden Gegenschneide – dem Stator. Das Mahlgut fällt durch einen Schacht in den Mahlraum und verlässt diesen nach der Zerkleinerung durch ein Sieb. Der Feinheitsgrad des zerkleinerten Materials wird dabei durch die Maschenweite des Siebes bestimmt.



Kugelmühlen durch eine zentrale Öffnung an der Stirnwand des Rohres. Der Austrag erfolgt je nach Bauform durch Schlitze in der Rohrwand oder durch eine Öffnung in der gegenüberliegenden Stirnwand. Die Kugelmühle wird zu 20 bis 35% mit Mahlkörpern und zu 15 bis 25% mit Mahlgut gefüllt. Die Drehzahl der Mahltrommel wird so gewählt, dass die gewünschte rollende und/oder fallende Bewegung der Füllung eintritt [Pahl et al. 1993, Vauck & Müller 2000].

Messern gepumpt und dadurch zerkleinert. Weitere Bauarten sind die Ein- und Zweiwellenzerkleinerer sowie Schneidzylinder mit integrierter Flügeleinheit. Hier handelt es sich um rotierende ineinandergreifende Messerscheiben oder Hämmer einheiten durch die das Substrat gepumpt und dadurch zerkleinert wird.

Thermisch

Die meisten Verfahren zur thermischen Vorbehandlung von Biomasse haben ihren Ursprung in der zellstoffverarbeitenden Industrie. Im Bereich der Bioraffinerien werden derartige Prozesse zur Erzeugung von Alkoholen und/oder Zuckerhydrolysaten, als Ausgangsstoffe zur weiteren Produktaufbereitung und -konditionierung eingesetzt. Bei der thermischen Biomassevorbehandlung handelt es sich um einen Prozess, bei dem die langkettigen Strukturen der Lignocellulose hydrolytisch unter Zuführung thermischer Energie und ggf. Druck gespalten und in der Folge dem biologischen Abbau zugänglich gemacht werden. Die Wirkung der thermischen Desintegration auf den Biomasseaufschluss wird dabei maßgeblich durch die Temperatur beeinflusst (Tabelle 1). Demnach

ist ein Einfluss der thermischen Behandlung auf die Lignocellulose ab einer Temperatur $\geq 150\text{ °C}$ zu erwarten wobei das Risiko einer vermehrten Bildung potenzieller Hemmstoffe (Inhibitoren) mit steigender Temperatur zunimmt. Zu diesen Substanzen gehören unter anderem Furalaldehyde, z. B. Furfural und 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF), die als Reaktionsprodukte der Dehydratisierung von Einfachzuckern (Pentosen, Hexosen) entstehen. Weiterhin ist die Bildung phenolischer Verbindungen als typische Abbauprodukte des Lignins feststellbar. Unterhalb dieses Schwellenwerts ($\leq 150\text{ °C}$) sind in der Regel nur geringe Effekte hinsichtlich des Abbaus von Lignocellulose zu beobachten.

Die Verfahren zur thermischen Vorbehandlung von Biomasse lassen sich je nach apparativem Aufbau und Zielsetzung grundsätzlich in drei Gruppen einteilen:

- Hydrothermale Vorbehandlung („liquid hot water“, LHW)
- Dampfexplosion („steam explosion“, SE)
- Thermodruckhydrolyse („thermal pressure hydrolysis“, TDH)

Tabelle 1: Einfluss der thermischen Desintegration auf lignocellulosehaltige Biomasse bei unterschiedlichen Temperaturen [nach Baumkötter 2019 und Schwarz 2011]

Temperatur	70 – 120 °C	150 – 190 °C	200 – 250 °C	> 250 °C
<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss auf lignocellulosehaltige Biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> • Hygienisierung • kein signifikanter Aufschluss des Lignocellulosekomplexes 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung der Hemicellulose • Auflösung von Lignin $\geq 160\text{ °C}$ • Bildung von Hemmstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung der Cellulose • Bildung von Hemmstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> • Pyrolytische Effekte • Beginn von Verschwelung und Vergasung

Schneidmühlen eignen sich besonders für holziges oder trockenes faserhaltiges Material wie zum Beispiel Stroh. Diese lassen sich gut schneiden, während feuchte und elastische Substrate, beispielsweise Silagen oder Bioabfälle, aufgrund der Zwangsführung zu Verstopfungen neigen. Zudem sind Schneidmühlen empfindlich gegenüber Störstoffen wie zum Beispiel Steinen. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Fasern nur geschnitten bzw. gekürzt werden. Es kommt weniger zu einem Auffasern und nur zu einem geringen Aufschluss des Lignocelluloseverbundes. In der Praxis werden Schneidmühlen bei der Zerkleinerung von Stroh, Holz und Lebensmittelabfällen eingesetzt.

Die mechanische Zerkleinerung durch die **Prallmühle** beruht auf der vielfachen Prallbeanspruchung des Materials bei hohen Umdrehungszahlen, wodurch es an den Bruchkanten gebrochen wird. Die mehrfache Prallbeanspruchung resultiert aus dem Aufprallen auf die Prallorgane des Rotors, auf Flächen im Mahlraum und aus dem gegenseitigen Aufeinanderprallen der Partikel. Ein weiterer Effekt besteht darin, dass die Stoffe auseinandergerissen werden, wodurch vor

allem lignocellulosereiche Materialien zerfasern. Gegenüber der Zerkleinerung durch Schneidmühlen weist das Mahlgut bei Prallmühlen daher bei gleicher Feinheit eine größere Oberfläche auf [Baumkötter 2019].

Ein wesentliches Bauteil der Prallmühle ist der mit hoher Geschwindigkeit drehende Rotor. Dieser kann vertikal oder horizontal angeordnet sein. An ihm können in unterschiedlicher Anzahl Hämmer, Platten, Stifte oder Ketten als Prallorgane angebracht sein. Neben dem Rotor kann auch der Prallraum durch Einbauten oder über die Geometrie verschiedenartig konstruiert werden. Je nach Materialeigenschaften und gewünschter Feinheit wird das zerkleinerte Gut über Siebe oder eine periodisch öffnende Klappe ausgetragen. In Prallmühlen können auch feuchte Stoffe aufgeschlossen werden. Bei einigen Anlagen besteht sogar die Möglichkeit neben festen, auch flüssige oder feuchte Medien direkt in den Prallraum einzubringen. Dadurch kann die Zerkleinerung hinsichtlich Aufschlussgrad, Energieverbrauch und Sicherheit verbessert werden. Nachteilig sind ein höherer Verschleiß der Prallorgane und die Verunreinigung bzw. Verdünnung des

Mahlguts [Pahl et al. 1993]. Durch die häufig massive Bauweise der Prallmühlen, sind diese gegenüber Störstoffen vergleichsweise unempfindlich. So werden zum Beispiel Steine als Fremdkörper einfach mit zermahlen. Dennoch sollte aus Verschleißgründen auf eine möglichst geringe Störstoffzufuhr geachtet werden.

Kugelmühlen bestehen aus einem rotierenden zylindrischen Rohr, in dem sich die Mahlkörper und das Mahlgut befinden. Durch die aktive Drehung des Rohres bewegen sich die Mahlkörper und zerkleinern das Mahlgut zum einen durch Schlag und Reibung zwischen den Mahlkörpern und zum anderen zwischen Mahlkörper und Wand des Rohres. Dabei stellen der Mahlkörper und die Innenwand des Mahlraumes die wesentlichen Verschleißteile dar. Als Mahlkörper werden Stahlkugeln oder auch Stäbe verwendet. Mit der Größe der Oberfläche des Mahlkörpers steigt auch die Kontaktfläche und die Masse zur Übertragung der Energie an das Mahlgut. Durch die Zusammenstellung hinsichtlich Größe, Form und Material können die Mahlkörper auf das Mahlgut und die gewünschte Mahlfeinheit eingestellt werden. Befüllt werden

Hydrothermale Vorbehandlung (LHW)

Die hydrothermale Vorbehandlung (LHW) beschreibt ein Verfahren, im Rahmen dessen Biomassen in Gegenwart von Wasser unter vergleichsweise moderaten Prozessbedingungen ($T = 150 - 230 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 5 - 30 \text{ bar}$) aufgeschlossen werden. Bei dem auch als Autohydrolyse bezeichneten Prozess, ermöglicht die sogenannte Autodissoziation des Wassers eine tiefe Infiltration der Wassermoleküle in die Struktur der Biomasse. Dieser Effekt wird durch den hohen Druck noch verstärkt. Die freigesetzten Ionen ($\text{OH}^- / \text{H}_3\text{O}^+$) fungieren hierbei als Katalysatoren, welche die Hydrolyse der Cellulose, Hemicellulose oder Teile des Lignins beschleunigen [Chen et al. 2022]. Gegenüber alternativen Desintegrationsmethoden, wie z. B. chemischen Verfahren, besteht der Vorteil darin, dass auf den Einsatz von teuren und oft schwer zu entsorgenden Chemikalien verzichtet werden kann.

Für die hydrothermale Vorbehandlung kommen verschiedene Reaktoren zum Einsatz, die sich im Wesentlichen nach der Art der Prozessführung in Batch-, halbkontinuierliche oder kontinuierliche Reaktoren (z. B. Gegenstrom oder Gleichstromreaktoren) unterteilen lassen. Wie in Abbildung 5 ersichtlich, wird bei Batchreaktoren **1** die feste Biomasse zusammen mit einem wässrigen Reaktionsmedium in den Reaktor überführt und der Prozess gestartet. Während der gesamten Vorbehandlung wird kein Material zu- oder abgeführt. Diese Bauart wird üblicherweise im Labor- oder Pilot-Maßstab betrieben und gilt aufgrund der diskontinuierlichen

Betriebsführung für die kommerzielle Anwendung als nicht vorteilhaft. Im Gegensatz dazu ermöglichen semikontinuierliche Reaktoren **4** dagegen die Beschickung von lignocellulosehaltigen Eingangsstoffen, welche in einer Festbettkonfiguration unter hydrothermalen Bedingungen aufgeschlossen werden. Innerhalb des Reaktors wird die Biomasse einem kontinuierlichen Strom des Reaktionsmediums ausgesetzt, das sich in der Regel vertikal durch den Reaktor bewegt. Bei Systemen, die auch als Perkolations- oder Durchflussreaktoren bezeichnet werden, ermöglicht das Durchströmen des Festbetts die Extraktion löslicher Biomassebestandteile wodurch deren Reaktion vermieden wird [Steinbach et al. 2017]. Ein wesentlicher Nachteil liegt in der Verdünnung durch den hohen Anteil an Reaktionsmedium respektive Lösungsmittel. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass feinere Partikelgrößen zur Erhöhung des Strömungswiderstands im Festbett führen. Bei den kontinuierlich geführten LHW-Prozessen, zählen die nach Gleichstromverfahren **3** arbeitenden Reaktorkonfiguration zu den häufigsten Anwendungsformen. Im Rahmen der Vorbehandlung bzw. Aufschlusses werden lignocellulosehaltige Biomassen zusammen mit dem Lösungsmittel zeit- und richtungsgleich durch den Reaktor gefördert. Eine alternative Prozessvariante wird durch Gegenstromverfahren **2** beschrieben. Hierbei kommen Zwischenprodukte, die aus weniger reaktiven Anteilen der Biomasse gebildet werden, mit frischer Biomasse in Kontakt. Dies kann zu Reaktionen führen, die in anderen Reaktortypen nicht möglich sind [Chen et al. 2022], [Steinbach et al. 2017].

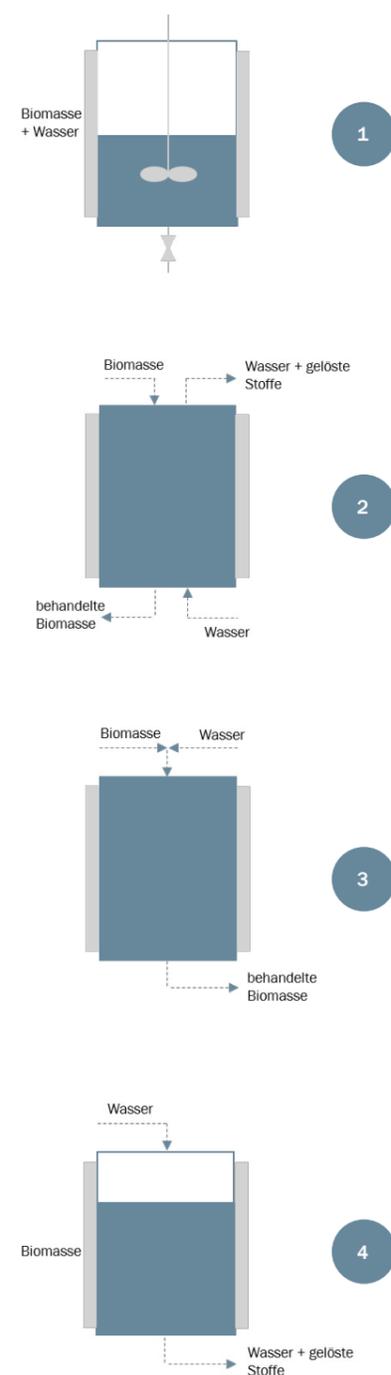


Abbildung 5: Reaktortypen für die hydrothermale Vorbehandlung von Biomassen, **1** Gleichstrom-Batchreaktoren, **2** kontinuierlicher Gegenstromreaktor **3** kontinuierlicher Gleichstromreaktor, **4** halbkontinuierlicher Durchflussreaktor [nach Steinbach et al. 2017]

Im Rahmen der Biogaserzeugung wird das LHW-Verfahren vor allem im labor-technischen Maßstab eingesetzt. Das Spektrum der potentiellen Einsatzstoffe umfasst nahezu alle Rest- und Abfallstoffe aus landwirtschaftlichen und kommunalen Bereichen. So werden bei der Vergärung von Weizenstroh beispielsweise Steigerungen von bis zu 63% kommuniziert [Shang et al. 2019]. Für eine erfolgreiche Desintegration sollten die Substrate dabei vollständig mit Wasser bedeckt sein. Auf diese Weise können unerwünschte Verkokungs- oder Verbrennungsreaktionen vermieden werden. Zudem sollten langfaserige Substrate vorher zerkleinert werden, um ein Umwickeln der Rühr- und Einspeisetechnik zu vermeiden.

Dampfexplosion (SE)

Die Dampfexplosion (SE) ist ein Verfahren, dessen desintegrierende Wirkung auf dem thermischen Abbau der Lignocellulose sowie der Zerstörung der Zell- und Faserstruktur durch rasche Druckentlastung beruht. Dabei wird die Biomasse in einem geschlossenen System auf eine Temperatur von 160 bis 220 °C erhitzt, was einen Druckanstieg zur Folge hat [Montgomery & Bochmann 2014]. Nach einer Behandlungsdauer von zum Teil wenigen Sekunden oder Minuten [Antczak et al. 2021] wird das System durch Ablassen des Drucks schlagartig entspannt. Der plötzliche Druckabfall bewirkt, dass intrazellulär gebundenes Wasser sehr schnell verdampft und bei seinem Austritt aus dem Zellinnern einen Effekt hervorruft, der allgemein hin als Dampfexplosion bezeichnet wird. Die bei der thermischen Expansion auftretenden Kräfte führen zu einem Zerreißen der Zellen und der sie umge-

benden Pflanzenfasern [Montgomery & Bochmann 2014]. In Analogie zu LHW-Verfahren sind die Vorteile des SE-Prozesses im Verzicht von Chemikalien zu finden. Zudem erfordert diese Verfahrensvariante deutlich kürzere Behandlungszeiten, wodurch Reaktionen besser kontrolliert und die Bildung unerwünschter Nebenprodukte (z. B. Hemmstoffe) reduziert werden kann. Die Effekte der SE-Behandlung auf die Biogas- und Methanerträge wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht. Hierbei kamen in erster Linie landwirtschaftliche Reststoffe und Koppelprodukte wie Weizen-, Mais oder Rapsstroh sowie Rindergülle und Rinderfestmist zum Einsatz. Auch der Einfluss auf die anaerobe Vergärung kommunaler Bioabfälle (OFMSW – Organic fraction of municipal solid waste) wurde untersucht, wobei die Ergebnisse in der Regel auf diskontinuierlichen Gärversuchen, sogenannten Batchtests, beruhen. Bei der Wahl geeigneter Aufschlussbedingungen können durch diese Vorbehandlungsmethode deutliche Steigerungen der Biogas- bzw. Methanerträge erzielt werden. So konnten Bauer et al. durch die Strohbehandlung eine 20%-ige Steigerung des Methanertrags feststellen [Bauer et al. 2009].

Thermodruckhydrolyse (TDH)

Neben den bereits beschriebenen Verfahren zur thermischen Substratdesintegration zählt die Thermodruckhydrolyse (TDH) zu jenen Technologien, die bereits im kommerziellen Maßstab zum Einsatz kommen. Bei diesen Verfahren handelt es sich, ähnlich wie bei der SE, um einen mehrstufigen Prozess bei dem teilweise auf eine schlagartige Entspannung verzichtet wird [Baum-

kötter 2018]. Das Anwendungsspektrum liegt vor allem in der thermischen Abwasserbehandlung, wobei der entwässerte Klärschlamm zunächst auf näherungsweise 100 °C erhitzt und anschließend der thermischen Hydrolysestufe (160 °C – 180 °C) zugeführt wird. Bei diesem Verfahren wird der Klärschlamm nach 20 bis 30 Minuten auf Umgebungsdruck entspannt, wodurch das Material hygienisiert, die Zellen zerstört und die organischen Bestandteile für eine nachfolgende Vergärung zugänglich gemacht werden. Steht hingegen der Einsatz von biologischen Abfällen, z. B. Biomüll oder Küchenabfälle im Vordergrund, so müssen die Substrate zuvor auf einen Trockensubstanzgehalt von 10 bis 15% verdünnt und mögliche Störstoffe (Metall, Kunststoff, Steine) entfernt werden [Schieder et al. 2000]. Bei groben oder stückigen Eingangsstoffen ist zudem eine vorherige Zerkleinerung erforderlich. Die positiven Effekte dieser Vorbehandlungstechnologie werden, ähnlich wie bei den anderen Desintegrationsmethoden, durch die Wahl der Vorbehandlungsparameter beeinflusst. So wurden durch Vorbehandlung von Energiepflanzen bereits Steigerungen der Biogasausbeute von 20 bis 30% sowie deutlich kürzere Verweilzeiten im Fermenter erreicht [Dinglreiter 2007]. Schumacher et al. erzielte eine Erhöhung des spezifischen Methanertrags von 109% nachdem Rindermist bei 160 °C für 60 Minuten vorbehandelt wurde [Schumacher et al. 2019].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass thermische Verfahren im Vergleich zu chemischen und/oder thermo-chemischen Prozessen

eine geringere Effizienz aufweisen. Ihre Vorteile liegen jedoch im Verzicht auf den Einsatz von Chemikalien zu finden, die somit bei der anaeroben Vergärung nicht mehr berücksichtigt werden müssen. Weiterhin wird durch die hohen Temperaturen im Reaktor eine Sterilisation des Inputmaterials sichergestellt, weshalb bei der mesophilen Vergärung organischer Stoffe wie z. B. Küchenabfällen oder Klärschlämmen auf eine vor- oder nachgeschaltete Hygienisierung verzichtet werden kann.

Kavitation

Kavitationseffekte werden bei der Ultraschallbehandlung von pumpfähigen Substratmischungen erzeugt, um den Aufschluss des Substrates zu erreichen. Unter Kavitation versteht man die Bildung und den Zerfall von Dampfblasen in einer Flüssigkeit bei geringem Druck. Diese Dampfblasen können unter anderem in der Unterdruckphase einer Schallwelle entstehen. Bei der Implosion der Blasen treten kurzzeitige lokale Druckstöße bis 4.500 bar und Temperaturspitzen von bis zu 5.000 K auf. Daraus folgen hohe lokale Scherkräfte im Substrat, die zur Zerstörung der Zellstrukturen führen. Diese Kavitationseffekte entstehen vor allem im niedrigen Ultraschallfrequenzbereich von 20 bis 40 kHz [Atchleyandrum 1988, Müller et al. 2000]. Da durch die Ultraschallbehandlung auch die für die Vergärung notwendigen Organismen geschädigt werden, wird häufig nur ein Teilstrom behandelt oder das Input-Substrat wird vor Eingabe in den Hauptfermenter vorbehandelt [Baumkötter 2019]. In der Regel wird dieser Technik ein Nasszerkleinerer vorgeschaltet.

ELEKTRO-KINETISCHE VERFAHREN

Bei der elektrokinetischen Desintegration wird das Substrat durch ein elektrisches Feld gepumpt. Dieses bewirkt bei Erreichen einer kritischen Feldstärke eine Perforation der Zellmembran, die zur Zerstörung der Zelle führt. Die Höhe der kritischen Feldstärke und somit des Energieeintrags ist vom Substrat abhängig. Bautechnisch werden entsprechende Anlagen in Form von Rohren mit längs durchlaufenden Elektroden realisiert. Wie bei der Ultraschallbehandlung wird auch bei der elektrokinetischen Desintegration in der Regel ein Nasszerkleinerer vorgeschaltet [Hendriks & Zeeman 2009].

CHEMISCHE VERFAHREN

Chemische Verfahren zur Substratvorbehandlung beschreiben Methoden, mit denen zum Teil hohe Anteile an biologisch abbaubaren Kohlenhydraten zur Verfügung gestellt werden können. Zu den gängigsten Anwendungsformen zählen die alkalische, saure oder oxidative Vorbehandlung wobei der Substrataufschluss unter Einsatz von Säuren oder Basen für die Biogasproduktion bisher nicht im großtechnischen Maßstab praktiziert wird. Sonderformen, die sich durch den Einsatz von Chemikalien in thermischen Prozessen ergeben (z. B. AFEX), werden im Folgenden nicht näher betrachtet.

Saure Vorbehandlung

Die anaerobe Vergärung lignocellulosehaltiger Biomasse wird, wie bereits erwähnt, durch deren inhärente Struktur erschwert. Um diese aufzuschließen, kommen bei der sauren Substratvorbehandlung sowohl organische als auch anorganische Säuren wie z. B. Phosphor-, Schwefel-, Salpeter oder Salzsäure zum Einsatz, die entweder in konzentrierter (30 – 70%) oder in verdünnter Form zu dosiert werden. Der Aufschluss mit konzentrierten Säuren erfolgt in der Regel bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen (<100 °C) wobei sich die Auswahl der Reagenzien nach den Materialeigenschaften der Systemkomponenten (Reaktoren, Pumpen etc.) richtet. Steht hingegen die Verwendung von verdünnten Säuren im Vordergrund, so sind für eine effektive Vorbehandlung Temperaturen von bis zu 250 °C erforderlich [Zheng et al. 2014]. Die Desintegration erfolgt durch die Hydrolyse der Hemicellulose, die zu Zuckerverbindungen (Pentosen, Hexosen) gespalten wird [Cai et al. 2021], [Li et al. 2021]. Außerdem wird durch die Spaltung von Etherbindungen zwischen Lignin und Hemicellulose die Zugänglichkeit der Cellulose verbessert.

Alkalische Vorbehandlung

Der alkalische Aufschluss lignocellulosehaltiger Substrate zählt zu den verbreitetsten Methoden bei der anaeroben Vergärung. Ähnlich wie bei den sauren Desintegrationsprozessen, beruht die chemische Wirkung auf der Öffnung der Esterbindungen innerhalb des Lignocellulosekomplexes. Weiterhin werden Teile der Hemicellulose und des Lignins herausgelöst wodurch die Kristallinität der

Cellulose verringert und die nachgeschaltete Vergärung vereinfacht wird. Neben diesen chemischen Modifikationen geht die alkalische Vorbehandlung ebenso mit einer Veränderung der morphologischen Eigenschaften der Substrate einher. So wird oft eine Vergrößerung der Oberfläche sowie die Zunahme der Porosität erreicht, was zur Verbesserung der enzymatischen Zugänglichkeit führt [You et al. 2019], [Norrrahin et al. 2021]. Die alkalische Vorbehandlung kann mit verschiedenen Reagenzien wie z. B. Calciumoxid, Ammoniak, Harnstoff sowie Calcium-, Natrium- oder Kaliumhydroxid durchgeführt werden [Usman et al. 2014]. Analog zu den thermischen Desintegrationsmethoden wird die Effektivität des Aufchlusses durch Vorbehandlungsparameter wie Temperatur und Dauer beeinflusst.

Ein weiterer Faktor wird durch die Stoffmengenkonzentration beschrieben, wobei die Toleranzen insbesondere im oberen Bereich nicht überschritten werden sollten. So wurde bereits über die mikrobiologisch toxische Wirkung von NaOH als Folge einer zu hohen Konzentration berichtet [Khan et al. 2022]. Zudem gilt es zu beachten, dass alkalisch vorbehandelte Substrate höhere pH-Werte aufweisen. In kontinuierlich geführten Gärprozessen kann dies zur Hemmung der Methanisierung durch Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts in Richtung des giftigen Ammoniaks führen [Chen et al. 2008]. Demzufolge scheinen sich Substrate mit naturgemäß niedrigem pH-Wert oder hohem Lipidanteil eher für die alkalische Vorbehandlung zu eignen.

Oxidative Vorbehandlung

Die oxidative Vorbehandlung beschreibt einen Prozess, dem insbesondere die „Ozonolyse“ und „Nassoxidation“ zugeordnet werden. Eine Sonderform stellt die erweiterte Nassexplosion dar („advanced wet explosion“), welche sich im Wesentlichen durch eine schlagartige Entspannung von der konventionellen Methode unterscheidet. Im Rahmen dieser Vorbehandlungsmethoden werden oxidierende Verbindungen wie z. B. Sauerstoff, Luft, Wasserstoffperoxid oder Ozon eingesetzt. Diese spalten die Hemicellulose und das Lignin oxidativ und unter Bildung freier Radikale [Hendriks & Zeeman 2009], [Kahn et al. 2022]. Ziel der Vorbehandlung ist es, die mikrobielle und enzymatische Zugänglichkeit der Cellulose und gebildeten Spaltprodukte im Biogasprozess zu verbessern [Kissel et al. 2019].

Bei der Nassoxidation handelt es sich um einen exothermen Prozess, welcher bei Temperaturen von 125 – 300 °C und Drücken von bis zu 20 MPa durchgeführt wird. Hierfür werden die Biomassen zusammen mit Wasser und dem Oxidationsmittel in ein geschlossenes System überführt [Kahn et al. 2022]. Handelt es sich bei dem Oxidationsmittel nicht um Sauerstoff, so sind die ablaufenden Reaktionsmechanismen mit hydrothermalen Prozessen (siehe oben) vergleichbar. Folglich können intensivere Vorbehandlungsbedingungen zur Bildung potentieller Hemmstoffe (Furfural, 5-HMF) führen deren Konzentration im Vergleich zu LHW- oder SE-Prozessen allerdings geringer ist [Tomás-Péjo et al. 2011]. Wird allerdings vorrangig Wasserstoffperoxid verwendet,

ist die chemische Wirkung ähnlich der einer alkalischen Vorbehandlung [Kissel et al. 2019]. Für einen möglichst effizienten Abbau des Ligninpolymers empfehlen Hendriks und Zeeman einen pH-Bereich von 10-12. Gründe hierfür sind die mangelnde Delignifizierung (pH 10) sowie die nicht nachweisbare Wirkung des Oxidationsmittels bei pH ≥ 12,5 [Hendriks & Zeeman 2009]. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass das Wasserstoffperoxid während der Vorbehandlung vollständig abgebaut wird. Dennoch wird auch bei diesem Verfahren über die Bildung toxischer Oxidationsprodukte und deren hemmende Wirkung auf die Mikrobiologie berichtet. Zudem ist zu berücksichtigen, dass durch den Oxidationsprozess ein Teil der Organik und somit des Biogaspotentials zerstört wird [Kissel et al. 2019].

Bei der zweiten Verfahrensvariante wird Ozon, das mittels Hochspannung erzeugt und als Gas direkt in den Vorbehandlungsprozess eingeleitet wird, als Oxidationsmittel verwendet [Kissel et al. 2019]. Im Gegensatz zur Nassoxidation erfolgt die Substratdesintegration im Rahmen der Ozonolyse bei Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck) wodurch das Risiko der Hemmstoffbildung minimiert wird. Die Wirksamkeit dieser Vorbehandlung wird dabei von der Ozonkonzentration im Gasstrom, der Partikelgröße des Eingangsstoffs und dem Wassergehalt des Materials beeinflusst [Kahn et al. 2022]. Der Wassergehalt erweist sich als der kritischste Faktor, da er zur Löslichkeit des Materials während der Vorbehandlung beiträgt. Gemäß Kissel et al. wird das Verfahren aus Kostengründen derzeit jedoch kaum noch angewendet [Kissel et al. 2019].

Organosolv Vorbehandlung

Beim Organosolv-Verfahren werden lignocellulosehaltige Eingangsströme in einer Mischung aus reinen oder wässrigen organischen Lösungsmitteln (z. B. Alkohole, Ester, Ketone) sowie Wasser desintegriert. Der Substrataufschluss kann dabei durch Zugabe von Katalysatoren verbessert werden. So lässt sich durch Zugabe von organischen oder anorganischen Säuren entweder die Betriebstemperatur senken oder der Delignifizierungsprozess intensivieren. Ähnlich wie die alkalische Desintegration, zielt das Organosolv-Verfahren auf die Entfernung der Lignin- und Hemicellulosefraktion ab, welche bei erhöhten Temperaturen (150–200 °C) vollständig aus dem Komplex herausgelöst werden. Im Gegensatz dazu bleibt die Cellulose bis zum Ende des Prozesses weitestgehend erhalten. Darüber hinaus kommt es auch hier zu morphologischen Veränderungen der Biomasse wie z. B. einer Abnahme der Kristallinität der Cellulose sowie einer verbesserten Zugänglichkeit der Kohlenhydrate für den mikrobiellen Abbau [Hendriks & Zeeman 2009].

BIOCHEMISCHE VERFAHREN

Biologische und biochemische Vorbehandlungsverfahren umfassen die Substrataufbereitung mit Hilfe von Mikroorganismen und Enzymen. In der Natur übernehmen Mikroorganismen mit ihrer entsprechenden Enzymausstattung die Zersetzung von Biomasse. Diese Funktion kann für die Biogasproduktion gezielt genutzt werden. Der wesentliche Unter-

schied gegenüber der Natur besteht bei der technischen Nutzung von Mikroorganismen und Enzymen darin, dass die Biomassen nur zu einem gewissen Grad abgebaut werden sollen, damit diese dem anaeroben Prozess zugänglich gemacht werden können. Hier soll ein Substrataufschluss erreicht werden, welcher für eine verbesserte Zugänglichkeit der Substrate für die Mikrobiologie im Fermenter sorgt. Gleichzeitig soll die Nahrungsgrundlage für die anaeroben Mikroorganismen im Fermenter weitestgehend erhalten bleiben (z. B. Cellulose) [Khan et al. 2022].

Mikroorganismen

In der Natur übernimmt eine Vielzahl von Makro- und Mikroorganismen die Aufgabe, Biomassen in ihre immer kleiner werdenden Bestandteile zu zerlegen. Auch für die Aufbereitung von Biomasse zu einem geeigneten Biogassubstrat können Mikroorganismen eingesetzt werden. Ziel ist es jedoch, die Substrate mit Hilfe der Mikroorganismen so vorzubehandeln, dass eine Verbesserung der Abbaubarkeit erreicht wird, ohne dass im Biogasprozess abbaubare Stoffe bereits von den Mikroorganismen verbraucht werden.

Generell kann zwischen dem Einsatz von Mikroorganismen zur Vorbehandlung der Inputsubstrate und dem Einsatz von Mikroorganismen im Fermenter unterschieden werden. Bei den eingesetzten Organismen handelt es sich um Pilze oder Bakterien. Der gezielte Einsatz von Mikroorganismen zur Substrataufbereitung ist derzeit nicht Stand der Praxis und wird einem TRL von 3 bis 6 zugeordnet.

Ferner muss unterschieden werden ob die gängige Praxis der Silierung, also der Haltbarmachung von Biomasse durch milchsäure Vergärung darunter zählt. Bei der Silagebereitung wird neben der Konservierung auch ein Substratvoraufschluss und damit eine verbesserte Abbaubarkeit erreicht. Die erwünschte Hauptwirkung der Silierung ist eine Konservierung durch pH-Absenkung. Somit wird die Aufschlusswirkung als nachrangig betrachtet und soll hier nicht als Aufschlusstechnik betrachtet werden. Silierung ist Stand der Technik und entspricht somit einem TRL von 9. [Laser et al. 2019].

Enzyme

Enzyme können wie bei den Mikroorganismen zur Substratbehandlung eingesetzt werden. Dabei können Enzyme ebenfalls vor der Zugabe oder im Fermenter zugesetzt werden. Sie haben ebenfalls die Funktion die Substrate aufzuschließen, um Molekülketten in ihre Bestandteile zu zerlegen oder Substanzen abzubauen, welche den Abbau im Fermentationsprozess reduzieren (z. B. Lignin) [Guan et al. 2021]. Durch die Zugabe von Enzymen sollen also gezielt Bestandteile des Substrates abgebaut werden, so dass diese schneller und im größeren Umfang für die Fermentation zur Verfügung stehen. Generell verspricht der Einsatz von Enzymen in Biogasanlagen einen höheren Substratumsatz (schnellerer Abbau), eine verbesserte Viskosität des Fermentermediums (Reduktion der Pump- und Rührenergie, Auflösen von Schwimmschichten) und eine Erweiterung des einsetzbaren Substratspektrums.

Vorteile sind zum einen der geringe energetische Aufwand, zum anderen kann auf den Einsatz von Chemikalien verzichtet werden, was den Einsatz im Fermenter unbedenklich macht.

Nachteilig beim Einsatz von Enzymen ist das geringe Kosten-Nutzen-Verhältnis. Auch steht die Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit des Enzymeinsatzes in Biogasfermentern in Frage und ist nicht zweifelsfrei geklärt. Nach einem groß angelegten Verbundprojekt, in welchem die Wirkung von Enzymen im Labor und Praxismaßstab untersucht wurde,

kam man zu dem Schluss: „Wirksamkeit von Enzymzusätzen nicht eindeutig belegt“ [https://news.fnr.de/fnr-pressemittteilung/biogaswirksamkeit-von-enzymzusaetzen-nicht-eindeutig-belegt].

Der Einsatz von Enzymen für die Substratvorbehandlung ist nicht überall gängige Praxis und gesicherte Daten zum Enzymeinsatz in Biogasanlagen liegen nur unzureichend vor. Dennoch sind Biogasenzymer bereits kommerziell verfügbar und stellen damit einen TRL von 8 bis 9 dar. Generell konnte im Labor-

maßstab festgestellt werden, dass durch den Einsatz von Enzymen der Biogasertrag gesteigert und die Raumbelastung erhöht werden kann. Für den Praxismaßstab wurde festgestellt, dass Enzyme sehr substratspezifisch eingesetzt werden müssen, um einen positiven Effekt auf Durchsatzraten und Methanerträge zu erzielen. Insgesamt ist der Einsatz von Enzymen in Biogasanlagen mit erhöhten Kosten bei nicht vollständig gesichertem Methanmehrertrag und verbesserter Abbauleistung verbunden [Brémond et al. 2018].

TECHNO-ÖKONOMISCHER VERGLEICH AUSGEWÄHLTER SUBSTRATAUFBEREITUNGSVERFAHREN

Im Rahmen des techno-ökonomischen Vergleichs werden die hier aufgezeigten Verfahren der Substrataufbereitung zunächst anhand des technischen Reifegrades (Technology Readiness Level - TRL) kategorisiert. Ferner werden sowohl die Vor- und Nachteile als auch die Effekte der einzelnen Aufschlussverfahren in jeweils einer Tabelle gegenübergestellt und bewertet. Für die ökonomische Bewertung werden hingegen ausschließlich jene Verfahren betrachtet, welche bereits im kommerziellen Maßstab vertrieben und somit einen TRL von mindestens 7 aufweisen. Der Fokus liegt, sofern die Informationen verfügbar, auf einer Betrachtung

- der Investmentkosten,
- der Anschlusskosten,
- der Durchsatzmengen,
- der Mehrerträge in Methan- und oder Biogasproduktion und
- des spezifischen Energieverbrauchs.

Um hierbei eine herstellerneutrale Darstellung zu gewährleisten, wurde auf eine Nennung einzelner Aggregate verzichtet. Für die chemische Desintegration konnten aufgrund fehlender Marktpräsenz keine Kenndaten für die ökonomische Betrachtung ermittelt werden. Somit werden diese unter „Ökonomische Bewertung“ nicht näher betrachtet.

TECHNISCHE BEWERTUNG

Die beschriebenen Verfahren entsprechen einem Technologiereifegrad zwischen 4 und 9. Das heißt, sie werden im kommerziellen Maßstab eingesetzt (9), im Demonstrationsmaßstab betrieben (5 bis 8) oder sind noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung (< 5) [Schumacher et al. 2014], [Papadokonstantatis 2017]. Die technische Einordnung der ein-

zelnen Verfahren zur Substrataufbereitung unter Berücksichtigung des TRL ist in Abbildung 6 zusammenfassend dargestellt.

Insbesondere die chemischen Verfahren unter Einsatz alkalisch und sauer wirkender Reagenzien (TRL 4-7) oder der Einsatz von Oxidations- und Lösungsmitteln (TRL 4-6) haben derzeit noch keine kommerzielle Marktreife erreicht. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die mikrobiologischen (TRL 3-6) und thermischen Verfahren, wobei die hydrothermalen Desintegrationsprozesse (LHW) bisher nicht über den Pilotmaßstab (TRL 5-7) hinausgekommen sind. Eine Ausnahme bilden hier die Verfahren der Dampfexplosion (SE) und der Thermodruckhydrolyse (TDH), die mit einem TRL von 6 bis 9 bereits von einigen Marktteilnehmern im kommerziellen Maßstab angeboten werden. Das breiteste Spektrum an Desintegrationstechnologien wird durch physikalisch-mechanische,

elektrokinetische und -kavitative Aggregate beschrieben. Die Methoden beschreiben den aktuellen Stand der Technik und werden Betreibern von Biogasanlagen mit einem TRL von 8 bis 9 am Markt angeboten. Die Herausforderung für Entwickler, Hersteller und Betreiber besteht dabei darin, den Energiebedarf und die Kosten der Aggregate gering zu halten. Der Einsatz von Enzymen ist oft nicht eindeutig oder nur unzureichend belegt. Dennoch werden Biogasenzymer bereits kommerziell vertrieben und weisen daher einen TRL von 8 bis 9 auf.

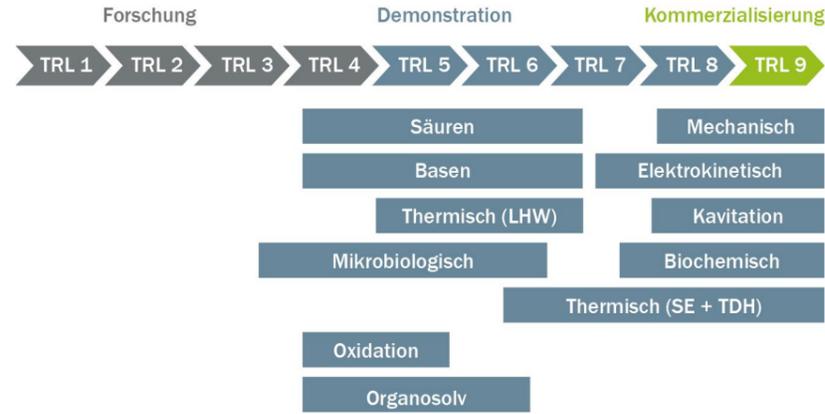


Abbildung 6: Bewertung der Substrataufbereitungsverfahren anhand des technischen Reifegrads (TRL) [nach Schumacher et al. 2014 und Papadokonstantakis 2017]

Tabelle 2: Vor- und Nachteile verschiedener Vorbehandlungsverfahren einschließlich des Einflusses auf die Struktur der verwendeten Substrate und Methanausbeute | ● positiver Effekt, ● kein positiver Effekt, ⊖ Einzeleffekte nicht erkennbar oder nicht eindeutig nachweisbar [Khan et al., 2022], [Montgomery & Bochmann 2014], [Hofmann et al. 2019], [Substrataufbereitung ALBBayern 2019] und [Leitfaden Biogas 2016]

I: Verbesserte Substrateigenschaften | II: Partikeloberflächenvergrößerung | III: Ligninaufschluss | IV: Methanausbeute

Technologie	Vorteile	Nachteile	I	II	III	IV
Extruder	<ul style="list-style-type: none"> Kombination thermischer und mechanischer Substratvorbehandlung Erhöhung des Zerkleinerungsgrades durch Dampfdruckeffekte Verringerung der Partikelgröße (Oberflächenvergrößerung) Geeignet für faserhaltige, krautartige landwirtschaftliche Reststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Energiebedarf 	●	●	●	●
Mühlen	<ul style="list-style-type: none"> Vorratshaltung an zerkleinertem Substrat möglich Befüllung automatisier- und mit Vorlageeinheiten kombinierbar Zerkleinerungsgrad beeinflussbar 	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhter Verschleiß an bewegten Teilen 	●	●	●	●
Nasszerkleinerer	<ul style="list-style-type: none"> Störstoffauslese durch integrierten Abscheidebehälter möglich (z. B. Lochscheibenzerkleinerer) 	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhter Verschleiß bei störstoffhaltigen Substraten möglich 	●	●	●	●

Technologie	Vorteile	Nachteile	I	II	III	IV
Hydrothermal (LHW)	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung der enzymatischen Zugänglichkeit Separation der Hemicellulose Erhöhung des Anteils leicht verfügbarer Organik Keine Chemikalien bzw. Katalysatoren erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Wärme-, Energie- und Wasserbedarf Nur innerhalb bestimmter Temperaturbereiche effektiv Mögliche Bildung von Inhibitoren Geringe Ligninentfernung 	●	⊖	●	●
Dampfexplosion (SE)	<ul style="list-style-type: none"> Zerstörung/Auflösung des Lignins Erhöhung des Anteils leicht verfügbarer Organik Gesteigerte Löslichkeit der Hemicellulose Keine Chemikalien erforderlich Kürzere Vorbehandlungszeiten Gesteigerte Entfernung des Lignins Vergrößerung der Partikeloberfläche 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Wärme- und Energiebedarf Nur innerhalb bestimmter Temperaturbereiche wirksam Mögliche Bildung von Inhibitoren Hohe Energiekosten Höherer Abbau von Zuckern 	●	●	●	●
Thermodruckhydrolyse (TDH)	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Anteils leicht verfügbarer Organik Keine Chemikalien erforderlich Kürzere Vorbehandlungszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Wärme- und Energiebedarf Nur innerhalb bestimmter Temperaturbereiche wirksam Mögliche Bildung von Inhibitoren 	●	●	●	●
Kavitation		<ul style="list-style-type: none"> Hoher Energiebedarf 	●	●	●	●
Elektrokinetisch		<ul style="list-style-type: none"> Hoher Energiebedarf 	●	●	●	●
Säuren	<ul style="list-style-type: none"> Effektive Entfernung des Ligninanteils Steigerung der Substrat-Porosität Steigerung der Zuckerausbeute aus Biomasse Kurze Vorbehandlungsdauer Kosteneffizient 	<ul style="list-style-type: none"> Abbau von Zuckern Beschädigung durch Korrosion Mögliche Bildung von Inhibitoren (insbesondere bei höheren Temperaturen) Probleme mit Korrosion aufgrund harscher Bedingungen 	●	●	●	●
Basen	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Anteils leicht verfügbarer Organik Effektiver Aufschluss des Ligninanteils Erhöhung der Menge an Glucose 	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung der Konzentration alkalischer Reagenzien im Fermenter Hohe Kosten für Chemikalieneinsatz- und/oder -entsorgung Probleme mit Korrosion beim technischen Equipment 	●	●	●	●

I: Verbesserte Substrateigenschaften | II: Partikeloberflächenvergrößerung | III: Ligninaufschluss | IV: Methanausbeute

Technologie	Vorteile	Nachteile	I	II	III	IV
Oxidation	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der enzymatischen und mikrobiellen Zugänglichkeit Vorbehandlung im niedrigeren Temperaturbereich möglich Mitunter vollständiger Abbau des Oxidationsmittels Aufschluss des Ligninanteils 	<ul style="list-style-type: none"> Zerstörung eines Teils der Organik und somit des Biogas- und Methanpotentials Mögliche Bildung von Inhibitoren sofern es sich beim Oxidationsmittel nicht um Sauerstoff handelt Höhere Kosten für zusätzliches Equipment (z.B. Ozongenerator) Abbau von Cellulose 	⊖	⊖	+	⊖
Organosolv	<ul style="list-style-type: none"> Praktikabel für die reine Ligningewinnung Hohe Zuckerausbeute Gesteigerter Aufschluss der Ligninanteils 	<ul style="list-style-type: none"> Prozessoptimierung aufgrund unterschiedlicher Siedepunkte der Lösemittel erschwert Aufbereitungsstufe zur Lösemittel-Rückgewinnung erforderlich 	⊖	+	+	⊖
Mikroorganismen	<ul style="list-style-type: none"> milde Prozessbedingungen geringer Energieaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> schwer steuerbar langsamer Prozess geringer Ligninabbau 	⊖	+	-	⊖
Enzyme	<ul style="list-style-type: none"> gut dosierbar, gezielt einsetzbar geringer Energieaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> erhöhte Kosten für Enzyme kontinuierliche Zugabe erforderlich Wirkung auf Methanmehrertrag nicht eindeutig belegt 	⊖	+	-	⊖

ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

Um eine ökonomische Bewertung der verschiedenen Formen des Substrataufschlusses vornehmen zu können, müssen die anfallenden Betriebskosten sowie Investitionskosten berücksichtigt werden. Der Energiebedarf stellt neben weiteren Betriebsmitteln oft den relevanten Kostenfaktor dar. In Tabelle 3 sind wesentliche ökonomische Kenngrößen und der Energiebedarf für ausgewählter Vorbehandlungstechnologien vergleichend gegenübergestellt. Betrachtet man die Anschlussleistung

und den spezifischen Energieverbrauch der auf dem Markt verfügbaren Vorbehandlungsaggregate, zeichnet sich bereits ein erstes Bild vom Leistungsbedarf von Substrataufschlussverfahren ab. Zahlen liefern umfangreiche Betreiberbefragungen und die Auswertungen der Befragungen. Vornehmlich wird elektrische Leistung benötigt. Lediglich thermische Verfahren verbrauchen zusätzlich Wärmeenergie, was die erhöhten Werte der Anschlussleistung von bis zu 275 kW erklärt. Bei thermischen Desintegrationsverfahren werden ca. 90% der gesamten Leistung in Form von thermischer Energie für die Dampfbereitstellung benötigt. Mit den verbleibenden 10%

elektrischer Energie wird die Peripherie versorgt [Hofmann et al. 2019]. Mit 1,5 kWel bis hin zu 200 kWel Anschlussleistung weisen mechanische Desintegrationseinheiten einen sehr großen Schwankungsbereich auf. Mehr als die Hälfte der Aggregate (6 von 11) bewegen sich jedoch im Leistungsbereich zwischen 30 kWel und 90 kWel. Im Gegensatz zu den sehr energieaufwendigen mechanischen und thermischen Vorbehandlungsverfahren, fallen Apparate zur Erzeugung von Ultraschall, Kavitation und Elektrokinese durch zum Teil deutlich niedrigere Anschlussleistungen auf. Bei letztgenannten Aggregaten ist auch der spezifische Verbrauch in der Regel geringer.

Tabelle 3: Ökonomische Kenngrößen der verschiedenen Substrataufbereitungstechnologien [Hofmann et al. 2019]

Technologie	Anschlussleistung elektrisch [kW]	Spezifischer Stromverbrauch [kWh/t FM]	Substratdurchsatz [m³/h]	Investition, ca. [T€]	Erhöhung der Gasausbeute [%]
Mechanisch	1,5 – 200	bis zu 95	bis zu 1.000	3 – 108	8 – 40
Biologisch + Mechanisch	30 – 80	1 – 5	10 – 40	80 – 180	8 – 15
Ultraschall	1 – 4	1 – 18	0,5 – 2	60 – 170	7 – 30
Kavitation	10 – 20	-	-	60 – 170	7 – 30
Thermisch	bis zu 275	10 – 1.500	1 – 3	bis zu 1.100	7 – 30
Elektrisch	1 – 5	-	40	500	15 – 18

BEWERTUNG DER THG-EMISSIONEN

Analog zur ökonomischen Bewertung stellen unter Berücksichtigung der Effizienz der Vorbehandlungsmaßnahme der Bedarf an Hilfsmitteln und Prozessenergie die wesentlichen Faktoren zur Bewertung der mit der Substrataufbereitung verbundenen THG-Emissionen dar. Insbesondere die Bereitstellung von Prozessenergie, Strom und/oder Wärme, kann je nach eingesetzter Technologie und Brennstoff ausschlaggebend für die Höhe der verursachten THG-Emissionen sein. THG-Emissionen aus der Bereitstellung der benötigten Prozessenergie lassen sich senken, wenn zum einen prozessintern anfallende Wärme genutzt wird und zum anderen statt des emissionsintensiven Netzstroms, Strom aus erneuerbaren Quellen Anwendung findet.

DAS VORHABEN PILOT-SBG

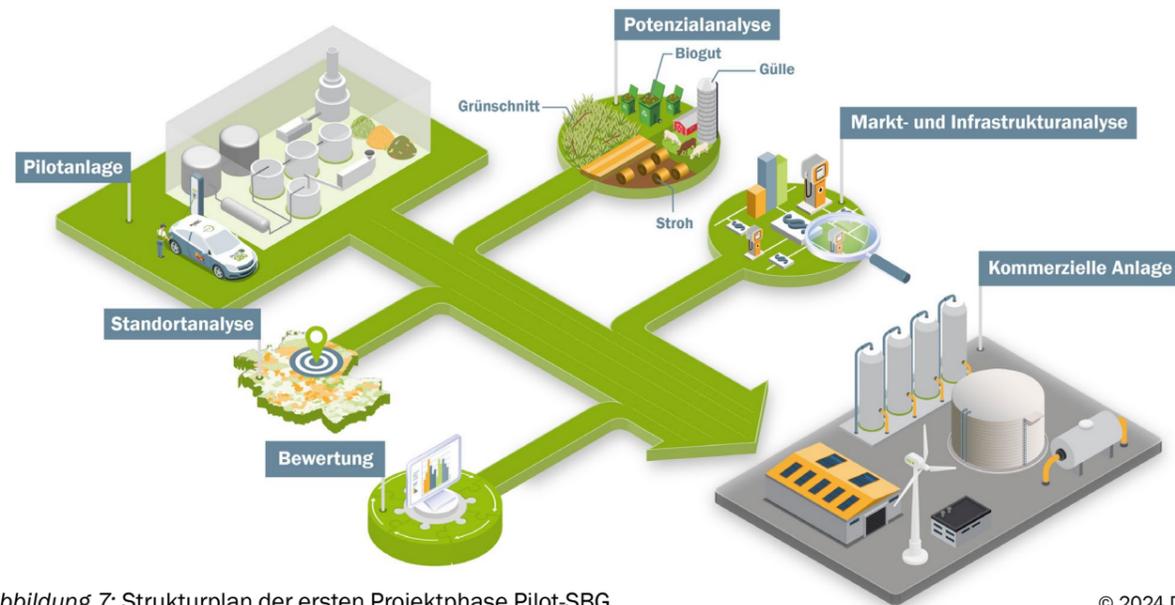


Abbildung 7: Strukturplan der ersten Projektphase Pilot-SBG

© 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 CO₂ mit grünem Wasserstoff. Zentrale Aspekte einer begleitenden Machbarkeitsanalyse sind vor allem die Ressourcenverfügbarkeit und -verteilung sowie weitere Standort-, Infrastruktur- und Marktfragen (Abbildung 7).

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.

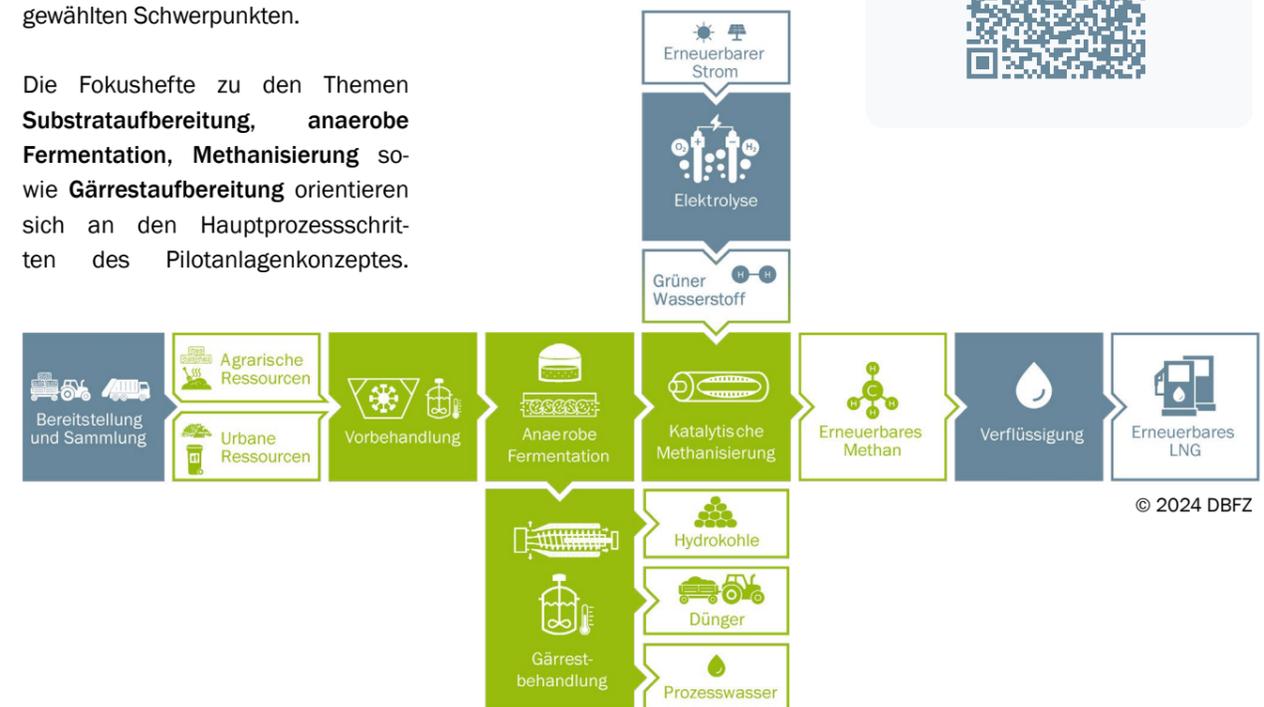
In jedem Fokusheft wird ein Überblick über die verfügbaren Optionen des jeweiligen Prozessschritts gegeben und diese werden in einem kurzen technischen, ökonomischen und ökologischen Vergleich einander gegenübergestellt. Analog hierzu verfahren auch die beiden Fokushefte zur **Wasserstoffbereitstellung** sowie zur **Methanverflüssigung**. Diese Prozessschritte sind zwar nicht Bestandteil der Pilotanlage, aber für eine Skalierung in den kommerziellen Maßstab unabdingbar (Abbildung 8).

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



Abbildung 9: Pilotanlage zur Herstellung von erneuerbarem Methan auf dem Gelände des Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig



ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Graphical Abstract: Ressourcen und Aufschussmöglichkeiten.....	4
Abbildung 2: Struktur von Lignocellulose [Rubin, E. 2008]	5
Abbildung 3: Überblick der Verfahren zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate [nach Schumacher et al. 2012 und Baumkötter 2019].....	6
Abbildung 4: Im Biogasanlagenbestand eingesetzte Substrataufschlussverfahren (DBFZ-Betreiberbefragung 2023, Bezugsjahr 2022)	7
Abbildung 5: Reaktortypen für die hydrothermale Vorbehandlung von Biomassen, ① Gleichstrom-Batchreaktoren, ② kontinuierlicher Gegenstromreaktor ③ kontinuierlicher Gleichstromreaktor, ④ halbkontinuierlicher Durchflussreaktor [nach Steinbach et al. 2017]	10
Abbildung 6: Bewertung der Substrataufbereitungsverfahren anhand des technischen Reifegrads (TRL) [nach Schumacher et al. 2014 und Papadokonstantakis 2017].....	16
Abbildung 7: Strukturplan der ersten Projektphase Pilot-SBG.....	20
Abbildung 8: Prozessschritte in der Pilotanlage (grün) und Betrachtungsrahmen für den kommerziellen Maßstab (grün + petrol).....	21
Abbildung 9: Pilotanlage zur Herstellung von erneuerbarem Methan auf dem Gelände des Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig	22

TABELLENVERZEICHNIS

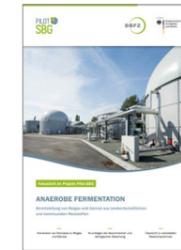
Tabelle 1: Einfluss der thermischen Desintegration auf lignocellulosehaltige Biomasse bei unterschiedlichen Temperaturen [nach Baumkötter 2019 und Schwarz 2011].....	9
Tabelle 2: Vor- und Nachteile verschiedener Vorbehandlungsverfahren einschließlich des Einflusses auf die Struktur der verwendeten Substrate und Methanausbeute ● positiver Effekt, ● kein positiver Effekt, ○ Einzeleffekte nicht erkennbar oder nicht eindeutig nachweisbar [Khan et al., 2022], [Montgomery & Bochmann 2014], [Hofmann et al. 2019], [Substrataufbereitung ALBBayern 2019] und [Leitfaden Biogas 2016]	16
Tabelle 3: Ökonomische Kenngrößen der verschiedenen Substrataufbereitungstechnologien [Hofmann et al. 2019]	19

LITERATURVERZEICHNIS

- Antczak, A., Szadkowski, J., Szadkowska, D., & Zawadzki, J. (2022). Assessment of the effectiveness of liquid hotwater and steam explosion pretreatments of fast-growing poplar (*Populus trichocarpa*) wood. *Wood Science and Technology*, 56, S. 87-109.
- Bauer, A. (2009). Optimierung der Biogasherstellung aus Energiepflanzen und landwirtschaftlichen Reststoffen Universität für Bodenkultur Wien, Department für Nachhaltige Agrarsysteme.
- Baumkötter, D. (2019). Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate zur Steigerung des Biogasertrages. Forschungsbericht Agrartechnik des Fachausschusses Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEH).
- Bochmann, G., & Montgomery, L. F. (2014). Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. *IEA Bioenergy*, S. 1-24.
- Cai, Y., Zheng, F., Schäfer, F., Stinner, W., Yuan, X., Wang, H., . . . Wang, X. (2021). A review about pretreatment of lignocellulosic biomass in anaerobic digestion: achievement and challenge in Germany and China. *Journal of Cleaner Production*(299), S. 126885.
- Chen, W.-H., Nizetic, S., Sirohi, R., Huang, Z., Luque, R., Papadopoulos, A. M., Hoang, A. T. (2022). Liquid hot water as sustainable biomass pretreatment technique for bioenergy production: A review. *Bioresource Technology*, 344, S. 126207. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126207>
- Chen, Y., Cheng, J., & Creamer, K. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*(99).
- Dinglreiter, U. (2007). Wie lässt sich biomasse am besten klein kriegen? Verfahren und Werkstoffe für die Energietechnik, 3.
- Hendriks, A., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* (100), S. 10-18.
- Hofmann, J., Weinrich, S., Kornatz, P., Daniel-Gromke, J., Schumacher, B., Rostalski, K., & Merkel, W. (2019). Entwicklung eines Leitfadens zur Auswahl von standortspezifisch angepassten Rühr- und Substrataufschlussverfahren für Biogasanlagen - ELIRAS. Schlussbericht, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig.
- Khan, M. U., Usman, M., Ashraf, M. A., Dutta, N., Luo, G., & Zhang, S. (2022). A review of recent advancements in pretreatment techniques of lignocellulosic materials for biogas production: Opportunities and Limitations. *Chemical Engineering Journal Advances*.
- Kissel, R., Henkekmann, G., Seidel, J., Koch, K., Dollhofer, V., & Lebuhn, M. (2019). Substrataufbereitung - Zur Verbesserung des Abbaus faserreicher Biomasse. (A. B. e.V., Hrsg.) *Biogas Forum Bayern*.
- Li, J., Yang, Z., Zhang, K., Liu, M., Liu, D., Yan, X., . . . Shi, Y. (2021). Valorizing waste liquor from dilute acid pretreatment of lignocellulosic biomass by *Bacillus megaterium* B-10. *Industrial Crops and Products*(161), S. 113160.
- Norrrahim, M., Ilyas, R., Nurazzi, N., Rani, M., Atikah, M., & Shazleen, S. (2021). Chemical pretreatment of lignocellulosic biomass for the production of bioproducts: An overview. *Applied Science and Engineering Progress*, S. 1-12.

- Papadokonstantakis, S. (2017). D3.2 Definition of biomass reference technologies with respect to TRL and performance indicators. Chalmers University of Technology, Schweden. Von www.advancedfuel.eu abgerufen
- Rubin, E. M. (2008). Genomics in cellulosic biofuels. *nature*, 454, S. 841-845. doi:10.1038/nature07190
- Schieder, D., Schneider, R., & Bischof, F. (2000). Thermal hydrolysis (TDH) as a pretreatment method for the digestion of organic waste. *Water Science & Technology*, 41(3), S. 181-187.
- Schumacher, B., Hofmann, J., & Pröter, J. (2012). Verfahrensüberblick zur Desintegration von Biomasse. *Biogas Journal*, S. 88-94.
- Schumacher, B., Wedwitschka, H., Hofmann, J., Denysenko, V., Lorenz, H., & Liebetrau, J. (2014). Disintegration in the biogas sector - Technologies and effects. *Bioresource Technology*(168), S. 2-6.
- Schumacher, B., Zerback, T., Wedwitschka, H., Weinrich, S., Hofmann, J., & Nelles, M. (2019). The influence of pressure-swing conditioning pre-treatment of cattle manure on methane production. *bioengineering*, 7(1).
- Schwarz, B. (8. November 2011). Stand und neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Substratvorbehandlung für den Biomasseinsatz in Biogasanlagen. Dermbach, Thüringen. Von <https://www.tll.de/www/daten/veranstaltungen/materialien/biogas/tbi41111.pdf> abgerufen
- Steinbach, D., Kruse, A., & Sauer, J. (2017). Pretreatment technologies of lignocellulosic biomass in water in view of furfural and 5-hydroxymethylfurfural production-a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7, S. 247-274.
- Tomás-Péjo, E., Alvira, P., Ballesteros, M., & Negro, M. (2011). Pretreatment Technologies for Lignocellulose-to-Bioethanol Conversion. *Alternative Feedstocks and Conversion Processes*, S. 149-176.
- Usman, M., Ishfaq, M., Malik, S., Ishfaq, B., & Iqbal, M. (2014). Effects of temperature, pH and steeping time on the extraction of starch from Pakistani rice. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(6), S. 877-892.
- Usman, M., Ishfaq, M., Malik, S., Iqbal, M., & Ishfaq, B. (2014). Alkaline extraction of starch from broken rice of Pakistan. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 7(1), S. 146-152.
- You, Z., Pan, S.-Y., Sun, N., Kim, H., & Chiang, P.-C. (2019). Enhanced corn-stover fermentation for biogas production by NaOH pretreatment with CaO additive and ultrasound. *Journal of Cleaner Production*(238), S. 117813.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*(42), S. 35-53.
- Guan, R.; Li, X.; Wachemo, A.C.; Yuan, H.; Liu, Y.; Zou, D.; Zuo, X.; Gu, J. Enhancing anaerobic digestion performance and degradation of lignocellulosic components of rice straw by combined biological and chemical pretreatment. *Sci. Total Environ.* 2018, 17, 637–638. *Sustainability* 2021, 13, 7202 17 of 1816.
- Rouches, E.; Escudié, R.; Latrille, E.; Carrère, H. Solid-state anaerobic digestion of wheat straw: Impact of S/I ratio and pilot scale fungal pretreatment. *Waste Manag.* 2019, 85, 464–476.
- FNR-Pressemitteilung: <https://news.fnr.de/fnr-pressemitteilung/biogas-wirksamkeit-von-enzymzusatz-nicht-eindeutig-belegt>

WEITERE FOKUSHEFTE IM PROJEKT PILOT-SBG



Anaerobe Fermentation

Bereitstellung von Biogas und Gärrest aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststoffen

DOI: 10.48480/b9vn-9686

ISBN: 978-3-949807-09-1



Beispielkonzept

zur Bereitstellung von erneuerbarem LNG aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und erneuerbarem Wasserstoff im kommerziellen Maßstab

DOI: 10.48480/jsct-z879

ISBN: 978-3-949807-06-0



Infrastruktur für erneuerbares Methan im Verkehr

DOI: 10.48480/78kk-xp41

ISBN: 978-3-949807-01-5



Marktanalyse und Treibhausgasquote

für erneuerbares Methan im Verkehr

DOI: 10.48480/fctg-2823

ISBN: 978-3-949807-00-8



Methanisierung

Bereitstellung von Biogas und Gärrest aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststoffen

DOI: 10.48480/rm3g-ej31

ISBN: 978-3-946629-99-3

