

Zur Verbesserung des Abbaus faserreicher Biomasse

Substrataufbereitung



www.biogas-forum-bayern.de/bif8

Biogas Forum Bayern, Verfasser:

Rainer Kissel, Günter Henkelmann, Matthias Steindl, Veronika Flad, Cristina Chovghi

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Michael Lebuhn

bioBit GmbH



Jakob Seidel,
Konrad Koch

TUM



Benedikt Hülsemann

Uni Hohenheim



Foren des ALB Bayern e. V.

Der ALB Bayern e. V. ist ein offiziell anerkannter, gemeinnützig tätiger, eingetragener Verein mit Mitgliedern aus Landwirtschaft, Wissenschaft, Beratung und den landwirtschaftlichen Organisationen. Weiterhin sind die staatliche Verwaltung, Firmen sowie Dienstleistungsunternehmen aus Industrie, Handel, Gewerbe sowie dem Umweltbereich vertreten.

Der ALB unterstützt die Landwirtschaft mit Wissensvermittlung in den Themenbereichen Bauen in der Landwirtschaft, Bewässerung, Biogas und Landtechnik. Hierzu handelt sie als neutraler Mittler und Bindeglied zwischen landwirtschaftlicher Praxis, Forschung, Umwelt, staatlicher Verwaltung, Gewerbe und Industrie.

Für umfassende Informationen zur umweltschonenden und effizienten Anwendung in der Praxis

werden zu den einzelnen Tätigkeitsbereichen Foren mit folgenden Aufgaben organisiert:

- ▶ Zusammenführen des aktuellen Wissensstandes,
- ▶ Reflektieren mit allen an der Thematik Beteiligten,
- ▶ Erarbeiten/Bekanntmachen konsensfähiger Lösungen

Foren des ALB Bayern e. V.:

- ▶ Bau Forum Bayern (BaF),
Leitung: Jochen Simon, LfL-ILT
- ▶ Bewässerungsforum Bayern (BeF),
Leitung Dr. Martin Müller
- ▶ Biogas Forum Bayern (BiF),
Leitung: Dr. Martin Müller, ALB
- ▶ Landtechnik Forum Bayern (LaF),
Leitung: Dr. Markus Demmel, LfL-ILT

Förderer



Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus



LfL Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

Impressum

Herausgeber Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. (ALB), Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon 08161 / 887-0078

Telefax 08161 / 887-3957

E-Mail info@alb-bayern.de

Internet www.alb-bayern.de

2. Auflage 2026

© ALB Alle Rechte vorbehalten

Titelbild R. Kissel, LfL

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	4
2. Physikalische Verfahren	5
2.1 Zerschneiden (Schneidmühle/Schredder)	6
2.2 Zerreißen und Zerfasern	7
2.2.1 Hammermühle	7
2.2.2 Querstromzerspaner	8
2.2.3 Kugelmühle	9
2.2.4 Rotierende Zahnscheiben	10
2.2.5 Extrusion	12
2.3 Elektrokinetische Desintegration	12
2.4 Ultraschall-Desintegration	14
2.5 Hydrodynamische Kavitation	15
2.6 Thermische Behandlung	16
2.6.1 Dampfexplosion („Steam Explosion“)	16
2.6.2 Druckunterstützte thermische Aufbereitung / Thermo-Druck-Hydrolyse	16
3. Chemische Verfahren	17
3.1 Alkalische Vorbehandlung	18
3.2 Saure Vorbehandlung	20
3.3 Oxidative Vorbehandlung	21
4. Biologische Verfahren	22
4.1 Einsatz von Bakterienkulturen	22
4.2 Pilzbasierte Verfahren	23
4.3 Enzymeinsatz	24
5. Fazit	25

1. Einleitung

Diese Fachinformation beschreibt unterschiedliche Techniken zur Aufbereitung von Substraten, die hohe Anteile an Lignocellulose enthalten. Lignocellulose besteht im Wesentlichen aus Lignin, Cellulose und Hemicellulose, die quervernetzt sind und die pflanzlichen Strukturen flexibel und widerstandsfähig machen (Abb. 1). Lignocellulose stabilisiert die Zellwand der Pflanze und schützt sie vor enzymatischem bzw. mikrobiellem Abbau.

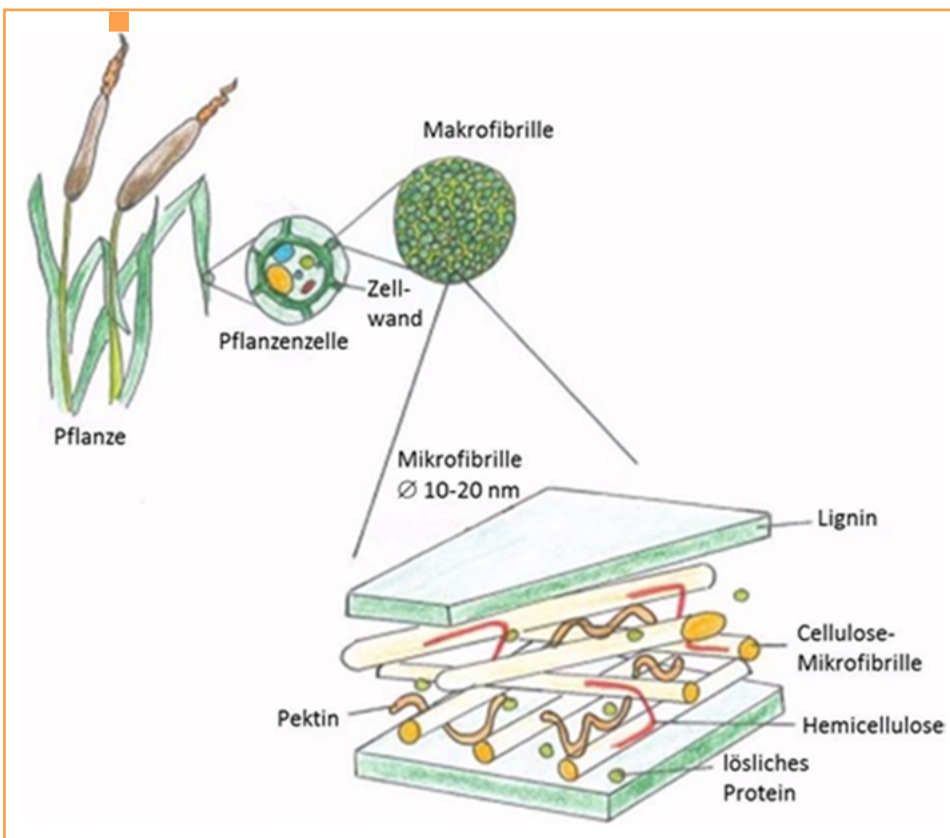


Abb. 1: Aufbau der Lignocellulose pflanzlicher Zellen (Quelle: I. Kinker LfL-AQU)

Cellulose ist neben Hemicellulose und Lignin ein wichtiger Bestandteil der pflanzlichen Zellwand. Mit etwa 50 % Massenanteil ist sie der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände und damit die häufigste organische Verbindung und auch das häufigste Polysaccharid (Vielfachzucker) in Pflanzen überhaupt. Die molekulare Struktur der Cellulose besteht aus Beta-(1,4)-glykosidisch verbundenen D-Glukoseeinheiten mit der Cellobiose als kleinstem Monomer (Abb. 2).

Je nach Polymerisationsgrad liegen unverzweigte Ketten von einigen hundert bis zu 15.000 Cellobiose-Einheiten vor. Diese lagern sich über Wasserstoffbrücken aneinander und bilden sogenannte Mikrofibrillen (Abb. 1), in welchen sich kristalline, d. h. hochgradig geordnete, mit amorphen Bereichen abwechseln. Die kristallinen Bereiche sind hierbei besonders widerstandsfähig gegen einen enzymatischen Angriff.

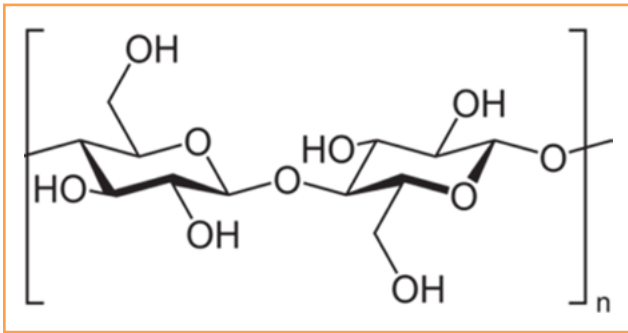


Abb. 2: Strukturformel von Cellobiose, dem Monomer von Cellulose

Je besser dies durch eine geeignete Substrataufbereitung gelingt, desto stärker kann die biologische Zersetzung beschleunigt und gegebenenfalls auch die erzielbare Methanausbeute erhöht werden. Die dafür zur Verfügung stehenden Verfahren lassen sich in drei wesentliche Kategorien unterteilen: physikalisch, chemisch und biologisch. Auch kombinierte / Hybrid-Verfahren sind möglich. Weiterhin können verfahrenstechnische Varianten wie mehrstufige Anlagenkonfigurationen zur Verlängerung der effektiven Verweilzeit oder eine mehrphasige Konfiguration mit Vor-

Um die in Lignocellulose enthaltenen Saccharide für die Biogaserzeugung verfügbar zu machen, muss zum einen das Lignin, welches die Cellulose-Mikrofibrillen und die dazwischen eingelagerte Hemicellulose einschließt, aufgebrochen werden; zum anderen muss vor allem die Cellulose für den hydrolytischen Abbau verfügbar werden, indem die kristallinen Bereiche der Mikrofibrillen desintegriert werden.

schaltung einer „Hydrolysestufe“ (siehe hierzu die Fachinformation des Biogas Forum Bayern [„Empfehlungen zu Verfahren der Hydrolyse in der Praxis“](#)) die Wirkung einer Substrataufbereitung unterstützen. Diese Konzepte sind nicht Gegenstand der vorliegenden Fachinformation. Es besteht auch nicht der Anspruch, dass alle verfügbaren Verfahren, Techniken oder Maßnahmen in den angesprochenen Kategorien in dieser Fachinformation erschöpfend behandelt werden.

2. Physikalische Verfahren

Ziel der physikalischen Aufbereitung ist das Aufbrechen oder die ‚Desintegration‘ der widerstandsfähigen Lignocellulose-Struktur und eine starke Vergrößerung der spezifischen Oberfläche der pflanzlichen Partikel als Voraussetzung für den enzymatischen Angriff durch Mikroben. Bei der mechanischen Vorbehandlung entstehen bei Verwendung geeigneter Materialien (z.B. Abrieb von Chrom oder Nickel in Edelstahl vermeiden!) keine toxischen Nebenprodukte. Eine Steigerung der realisierbaren Gasausbeute wurde für einige Einsatzstoffe wissenschaftlich nachgewiesen. Allerdings haben die Verfahren einen hohen Energieverbrauch, der mit dem Feuchtigkeitsgehalt, der anfänglichen Partikelgröße und dem Grad der Zerkleinerung bzw. der Intensität des Aufschlusses ansteigt. Nachfolgend wird erläutert, welche Aufbereitungsverfahren sich in der Praxis für

unterschiedliche Substrate als geeignet erwiesen haben. Eine zusammenfassende Übersicht findet sich in Tab. 1 am Ende dieses Kapitels.

2.1 Zerschneiden (Schneidmühle/Schredder)

Zerschnitten werden vorwiegend langfaserige Einsatzstoffe wie Gras oder Mist mit dem Ziel, das Material komplikationsfrei in der Biogasanlage verarbeiten zu können, ohne dass sich Verzopfungen an den Rührwerken bilden und Förderaggregate oder Leitungen verstopfen. Durch alleiniges Zerschneiden wird nur eine vergleichsweise geringe Vergrößerung der spezifischen Partikeloberfläche erreicht und die Lignocellulose-Struktur bleibt weitgehend ungestört. Somit ist bei den meisten Materialien allenfalls eine leichte Beschleunigung der Hydrolyse zu erwarten, jedoch keine signifikante Steigerung der Gasausbeute.

In Untersuchungen an der LfL wurde Mais- bzw. Grassilage auf Partikelgrößen von 10 bzw. 4 mm reduziert. Ein anschließender Batchansatz der aufbereiteten Substrate zeigte in diesem Fall jedoch keine signifikanten Gasertragssteigerungen [4]. Eine schneidende Wirkung hat auch der Lochscheibenzerkleinerer (Bild 1), der in die Subst-

ratleitung integriert wird. Diese Technik eignet sich besonders zur Aufbereitung suspendierter langfaseriger Einsatzstoffe, um die Viskosität des Gärgemisches zu verringern. Somit lässt sich die Durchmischung verbessern und gleichzeitig der Energieaufwand verringern. Solche Zerkleinerer sind vergleichsweise preiswert, verfügen über einen Störstoffabscheider und können ohne großen Aufwand in bestehende Anlagen integriert werden. Idealerweise wird das Aggregat mit einer Flüssigfütterung kombiniert, so dass keine zusätzliche Pumpe bzw. Bypassleitung erforderlich ist. Ist das Gerät zwischen Fermenter und Nachgärer installiert, sind große Mengen an Suspension zu transportieren. Im Biogasbereich ist von einem maximalen Durchsatz von 250 m³/h Biomasse auszugehen. Je nach Durchflussmenge variieren die elektrischen Anschlussleistungen zwischen 2 und 18 kW.



Bild 1: Rota-Cut (Quelle: Firma Vogelsang GmbH)

2.2 Zerreißen und Zerfasern

2.2.1 Hammermühle

Zur Zerkleinerung von Körnermais, CCM und Getreide als Futtermittel werden vielfach Hammermühlen eingesetzt. Mehrere, auf einen Rotor montierte Hämmer oder Pendelschläger aus gehärtetem Flachstahl mit Kerben an den Enden werden kontinuierlich gegen das Mahlgut geschleudert und beschleunigen dieses mit enormer Geschwindigkeit in Richtung der Siebkanten. Durch den andauernden Aufprall auf den Hammer und die hohe Geschwindigkeit, mit der das Material auf die Siebkante auftrifft, werden die Pflanzenteile zerkleinert. Ausreichend feine Teilchen durchdringen den Siebmantel und werden von dort aus weiterbefördert. Dies kann durch ein Gebläse oder mechanisch erfolgen. Ausschlaggebend für die Partikelgröße sind das Lochmaß und die Form des Siebkorb(-mantels), der die Schlegelwelle und die Pendelschläger umgibt. Auch in der Biogasproduktion werden Hammermühlen eingesetzt und dort führen die Reduzierung der Partikelgröße und die Vergrößerung der Oberfläche zu einem beschleunigten Abbau und können somit die Biogasproduktivität erhöhen. Zudem wird die Neigung zur Bildung von Schwimmschichten verringert und die Rühr- und Pumpentechnik entlastet. Die Technik zeichnet

sich durch vergleichsweise geringe Anschaffungskosten, große Robustheit und weitgehende Unempfindlichkeit gegenüber Störstoffen aus [1;5]. Bei Anschlussleistungen von 22 bis 100 kW kann diese Vorbehandlung mit steigender Behandlungsintensität und Dauer allerdings sehr energieaufwändig werden. Die Durchsatzleistungen stationärer Geräte betragen laut Hersteller zwischen 12 und 16 t/h und dürften stark von der Art der zu behandelnden Biomasse und den verwendeten Siebeinsätzen abhängen. In Versuchen mit Weizenstroh brachte die Vorbehandlung mit einer Hammermühle eine Steigerung der Hydrolyseausbeute von 6 % auf 34 %. An der LfL erarbeitete vorläufige Ergebnisse zeigten Gasertragssteigerungen von 10 % bei Grassilage und Rindermist, während die Behandlung von Maissilage hier keinen Mehrertrag brachte.

Hammermühlen können auch zur Behandlung von bereits vergorenem Material verwendet werden. Dazu werden sie in die Substratleitung integriert und verarbeiten das flüssige Substrat, das aus dem Fermenter kommt und nach der Behandlung diesem wieder zugeführt wird.



Bild 2: Hammermühle
(Quelle: Kissel, LfL)

2.2.2 Querstromzerspaner

Bei dieser, im Biogasbereich mittlerweile verbreiteten Verfahrenstechnik wird das Substrat durch eine oder zwei großmaschige Ketten, die auf einer senkrecht stehenden Welle montiert sind (s. Bild 3) stark beschleunigt und gegen die Wand der Einrichtung geschleudert. Durch die Wucht des Aufpralls wird das Material zerkleinert und aufgebrochen. Auch diese Technik ist relativ tolerant gegenüber Störstoffen wie Steinen oder Metallteilen, jedoch energieaufwändig. In der Biogastechnik wird sie häufig zur Aufbereitung von Grassilage, Körnermais- oder Rapsstroh eingesetzt [1]. Der Durchsatz hängt von der Behandlungsintensität und der Art der zu behandelnden Biomasse ab. Er beträgt zwischen 2 t / h (Grünschnitt) und 6 t / h (Maissilage) bei einer Anschlussleistung von 75 kW. Bei einer Anschlussleistung von 160 kW können 8 bis 20 t / h behandelt werden.

In Sachsen wurde ein Querstromzerspaner zur Aufbereitung von GPS und Grassilage eingesetzt. Dabei konnte eine Verbesserung der Eintrags- und Rieselfähigkeit festgestellt werden, jedoch keine Erhöhung der realisierten Methanausbeu-

te [7]. Einem Bericht aus Hohenheim zufolge, erhöhte eine 15 Sekunden dauernde Behandlung von Pferdemist zusammen mit GPS, Gras- und Maissilage im Querstromzerspaner die Methanausbeute der Mixtur um knapp 10 % [8]. Eine längere Behandlung ergab keinen weiteren Mehrertrag. Die Technologie wurde auch an der LfL geprüft und erzielte Gasertragssteigerungen um 7 % bei der Aufbereitung von Mais- und Szarvasgrassilage. Die Behandlung von Rindermist und Grassilage zeigte hier keinen Effekt [9].

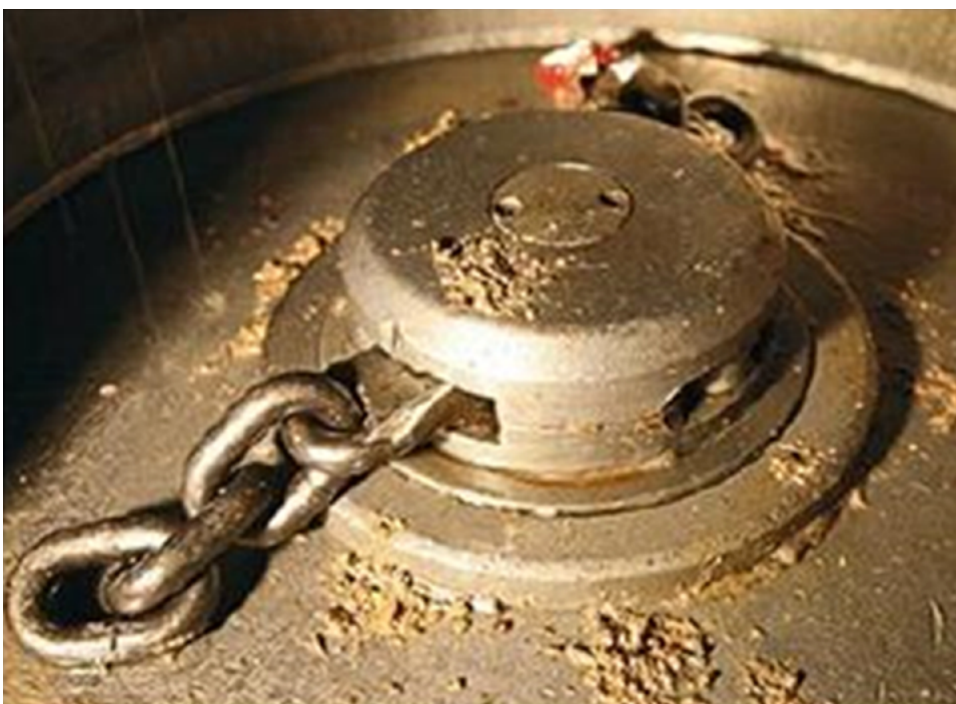


Bild 3: Querstromzerspaner
(Quelle: Firma MeWa Recycling GmbH)

2.2.3 Kugelmühle

Eine zur Aufbereitung von faserreichen Substraten entwickelte Kugelmühle wurde über drei Jahre an der Forschungsbiogasanlage der Uni Hohenheim untersucht. Die Kugelmühle besteht aus einer zylindrischen Trommel mit ca. 2 Metern Durchmesser und 3 Metern Länge. Für die Untersuchungen wurde die Kugelmühle mit 1200 geschmiedete Stahlkugeln mit einem Gewicht von jeweils 2,1 kg befüllt. Die Trommel wird mit einem elektrischen Antriebsmotor (45 kW) in Rotation versetzt. Mitnehmerleisten im Trommelinneren nehmen dabei die Kugeln mit nach oben, von wo sie zurück auf das dazwischen liegende Substrat fallen bzw. über das Substrat rollen und es so zerkleinern bzw. aufschließen. Der Substrateintrag erfolgt über eine Zuführschnecke, der Austrag des zerkleinerten Materials erfolgt am Ende der Trommel über eine perforierte Austragsscheibe. Bauartbedingt macht der Betrieb Lärm, weshalb die Kugelmühle eingehaust werden muss. Aufgrund der robusten Bauweise ist die Maschine unempfindlich gegenüber Fremdkörpern wie Steinen oder Metallteilen. Bei einem im Versuch ermittelten Betriebsoptimum (Umdrehungszahl 8 /min; 1,3 t Substrat) können zwischen 1,5 und 3 t Material pro Stunde aufbereitet werden.

Bei der Untersuchung im Praxismaßstab wurde ein Substratmix aus 39 % Flüssigmist, 11 % Maissilage, 17 % Grassilage sowie 33 % Festmist eingesetzt. Das Substratgemisch wurde bei der

Untersuchung zerkleinert und zerfasert, was zu einer deutlichen Oberflächenvergrößerung der Partikel führte. Die Mischung sollte eine gewisse Struktur aufweisen, damit sie nicht an der Trommelwand festklebt. Durch die Behandlung mit der Kugelmühle wurde bei diesem Substratmix ein Methanmehrertrag von rund 26 % ermittelt. Darüber hinaus verlief der Betrieb, im Gegensatz zur unbehandelten Variante, stabil und es bildete sich keine Schwimmschicht.

Bei der Prüfung zur Abbaugeschwindigkeit zeigte sich, dass strohareiches, faseriges Substrat durch die Kugelmühle in seiner Abbaukinetik so verändert werden kann, dass dieses wie Maissilage oder Getreideschrot gezielt zu einer kurzfristigen Steigerung der Methanproduktion eingesetzt werden kann (z. B. nach 4 – 6 Stunden). Dies erweitert das Substratspektrum für die flexible Gasproduktion erheblich und hilft darüber hinaus, die Anforderungen des „Maisdeckels“ zu erfüllen. Der spezifische Energiebedarf lag bei den genannten Bedingungen im Durchschnitt bei ca. 5 kWh pro Tonne FM und es ließ sich zeigen, dass sich die Kugelmühle schnell amortisiert, wenn Mais durch Pferdemist ersetzt wird. In der in Hohenheim (2026) geprüfte Biokraft-Kugelmühle (Biokraft Energietechnik GmbH) wird Ausgangssubstrat aufbereitet. In von der Fa. Geisberger angeboten Kugelmühlen wird dagegen Fermenter- oder Vorgrubeninhalt bearbeitet.



Bild 4 - 5: Gesamtansicht mit Antriebssystem (links); Kugeln und Austragssieb (rechts) (Quelle: Hülsemann 2025)

2.2.4 Rotierende Zahnscheiben

Dieses Verfahren besteht aus einer Trommel (Stator), in deren Zentrum eine Welle mit hoher Geschwindigkeit rotiert. Auf der Welle sind mehrere verzahnte Bleche oder auch Messer montiert. Die Trommel ist mit einem Ring ausgestattet, der das Gegenstück zu den verzahnten Blechen bildet, und kann auch mit Gegenschnitten ausgeführt sein. Wird das Gärsubstrat zugeführt, kann der flüssige Anteil durch den einstellbaren schmalen Spalt zwischen Rotor und Stator passieren, größere Bestandteile hingegen werden zerrissen oder zerschnitten und erst dann weiter transpor-

tiert, wenn sie soweit zerkleinert wurden, dass sie durch den Spalt passen. Dadurch lässt sich die Fließfähigkeit der Suspension verbessern und der Leistungsbedarf von Pumpen und Rührwerken wird herabgesetzt. Technische Lösungen, die nach diesem Wirkprinzip arbeiten, werden von unterschiedlichen Herstellern angeboten. Sie kommen mit elektrischen Anschlussleistungen ab 15 kW aus. Es werden Systeme angeboten, mit denen in Abhängigkeit des TS-Gehalts des Mediums in der Stunde 200 bis über 500 m³ behandelt werden können.



Bild 6: Disruptor (Quelle: Firma Vogelsang GmbH)

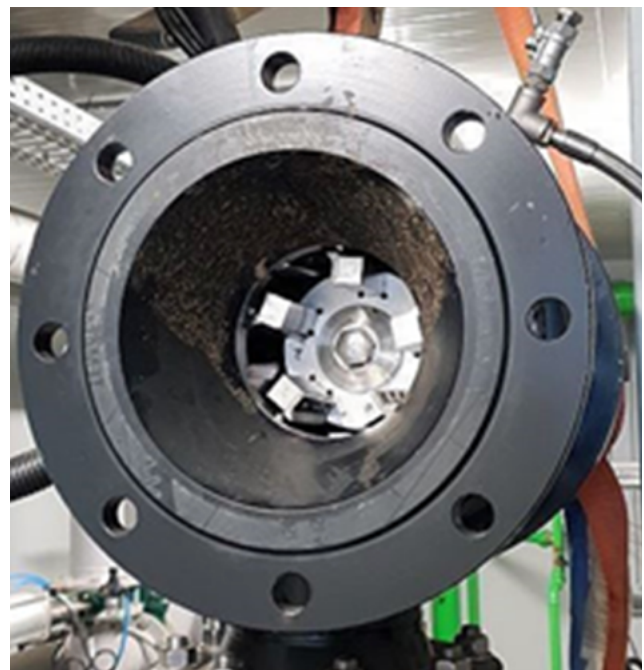


Bild 7: Homogenisator (Quelle: Firma MICCRA GmbH)

Ein ähnliches Wirkprinzip hat ein Verfahren, bei dem in einem zylindrischen Gehäuse eine schräge Scheibe rotiert. Dadurch wird das Substrat in verschiedene Richtungen beschleunigt, wodurch Schub und Scherkräfte entstehen, die das Material intensiv durchmischen. Feststoffe werden durch die Fliehkraft in die Nuten transportiert und von der Zahngeometrie der Schrägscheibe zerkleinert. Der Durchsatz liegt bei etwa 50 m³ / h bei 8 % TS-Gehalt im Substrat bzw. 20 m³ / h bei

10 % TS. Der Energiebedarf liegt je nach TS-Gehalt zwischen 3 und 6 kWh / t [9]. Ein Test dieser Technologie an der LfL ergab bei einer Behandlung von Rindermist, Mais- und Szarvasigrassilage teilweise positive Effekte auf die Gasausbeute. Bei Maissilage betrug die Gasertragssteigerung 6 % und bei Rindermist 11 %. Die Behandlung von Grassilage zeigte keine signifikant positive Wirkung auf die realisierbare Gasausbeute [9].



Bild 8: Gorator (Quelle: Firma hoelschertechnik-gorator® GmbH & Co. KG)

Nach dem Prinzip einer Drehkolbenpumpe arbeitet ein Verfahren, bei dem die zu behandelnde Biomasse zerrissen und zerhackt wird. Das Zerkleinerungsergebnis ist gröber als bei den oben beschriebenen Verfahren. Zur Behandlung von groben Feststoffen wie Kartoffeln, Rüben oder Gemüseresten ist es gut geeignet und kommt auch vorwiegend dort zum Einsatz. Langfasrige Stoffe können die Einrichtung im Einzelfall jedoch unzerkleinert passieren. Im Fall von stoffhaltigen Einsatzstoffen ist zu beachten, dass

diese vor der Behandlung abgeschieden werden sollten. Anstelle der herkömmlichen Drehkolben sind in den sogenannten Hackern ineinandergreifende Messerscheiben auf die beiden Antriebswellen montiert. Durch die Scheibenstruktur und die Rotationsgeschwindigkeit wird die Biomasse zerkleinert und damit fließfähiger, leichter zu pumpen und zu durchmischen. Bei Anschlussleistungen zwischen 4 und 30 kW können je nach Ausführung 60 bis 320 m³ / h behandelt werden.



Bild 9: Unihacker (Quelle: Firma Börger GmbH)

2.2.5 Extrusion

Die Extrusion ist ein Hybrid-Verfahren mit thermischen und mechanischen Wirkmechanismen. Dabei wird die aufzubereitende Biomasse durch eine oder mehrere Schnecken in einer Metallröhre gegen einen Widerstand gedrückt, wodurch hohe Scherkräfte entstehen, die wiederum zu lokalem Temperatur- und Druckanstieg führen [11]. Ein Teil der Lignocellulose-Struktur wird bereits hierdurch aufgeschlossen, ein weitergehender Aufschluss erfolgt bei der nachfolgenden Entspannung des Materials, wenn intrazelluläres Wasser verdampft und hierbei die Zellwände schädigt.

Das Verfahren eignet sich für alle landwirtschaftlichen Reststoffe, insbesondere aber für krautiges Material [11]. Es führt zu einer Zerkleinerung mit deutlicher Erhöhung der spezifischen Partikeloberfläche und ändert die gesamte Struktur der Biomasse, so dass diese für den enzymatischen mikrobiellen Angriff wesentlich besser verfügbar

wird.

Extruder weisen Anschlussleistungen zwischen 22 und 110 kW auf und können Durchsätze bis zu 9 t / h bewältigen. Laut Firmenangaben liegt der Stromverbrauch bei 10 bis 25 kWh / t Biomasse.

An der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurde der Effekt der Extruderbehandlung auf die Gasausbeute von Mais- und Grassilage untersucht. Dabei wurden zwei Zerkleinerungsstufen geprüft: Bei Maissilage bewirkte die Vorbehandlung eine Steigerung der Methanausbeute um 7 bis 14 %, bei Grassilage sogar um 19 bis 26 % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle [7]. Eine Untersuchung an der LfL zeigte positive Effekte für behandelten Rindermist sowie für Mais-, Gras- und Szarvasigrassilage. Der Methan-Mehrertrag betrug hierbei allerdings lediglich zwischen 5 und 8 % [9].



Bild 10: Extruder (Quelle: Barth, LfL)

2.3 Elektrokinetische Desintegration

Bei dieser Verfahrenstechnik wird die Gär suspension einem elektrischen Hochspannungsfeld ausgesetzt, während sie durch eine Substratverrohrung gepumpt wird. Durch die Polarisierung des durchfließenden Mediums werden polare

Verbindungen, z. B. Proteine oder Fettsäuren der Lipiddoppelschicht in der Zellmembran aus der Zellstruktur herausgelöst, wodurch die Zellmembranen porös werden. Durch osmotische Kräfte platzen die Zellen auf, der Zellinhalt mit weiteren

Nährstoffen und Spurenelementen sowie organischen Verbindungen wird für den enzymatischen und mikrobiellen Abbau verfügbar gemacht und die Enzymaktivität gesteigert. Gegebenenfalls kann dadurch die realisierbare Gasausbeute gesteigert werden.

An der LfL wurde die Wirksamkeit der Methode untersucht, indem Gärgemischproben aus Klee-Gras und Rindermist, die an einer Praxisanlage vor und nach der Desintegration entnommen wurden, mittels eines Batch-Tests auf deren Gas-ertrag geprüft wurden. Dabei konnte allerdings keine statistisch signifikante Steigerung der Methanausbeute festgestellt werden [4]. In der Praxis wurde dagegen beobachtet, dass durch das Verfahren bis zu 5 % Mais eingespart wurden. Gleichzeitig sank der Eigenenergiebedarf um rund 20 %, da deutlich weniger Rühraufwand betrieben werden musste [36].

Die Besonderheit dieses Verfahrens liegt in dem sehr geringen Strombedarf. Laut den Angaben eines Herstellers benötigt eine Biogasanlage mit 500 kW elektrischer Bemessungsleistung drei bis vier Module. Die elektrische Anschlussleistung beträgt dann unter 0,2 kW, womit jährlich Stromkosten von lediglich 30 € anfallen. Jedoch

wird zum Schutz vor Verstopfungen bzw. Fremdkörperschäden häufig eine mechanische Zerkleinerungseinheit vorgeschaltet (siehe oben), wodurch der Strombedarf deutlich ansteigt. Das System bewältigt in Abhängigkeit des TS-Gehaltes der Suspension Durchsätze bis 200 m³ / h und kann deshalb relativ einfach in die bestehenden Substratleitungen integriert werden.



Bild 11: BioCrack (Quelle: Firma Vogelsang GmbH)

2.4 Ultraschall-Desintegration

Die Desintegration von Biomasse mittels Ultraschalls stellt eine der energieeffizientesten Methoden zum Aufschluss fester Partikel in flüssiger Biomasse dar. Dabei erzeugen leistungsstarke, elektrische Schwingsysteme in der Flüssigkeit feinste Kavitationsblasen. Bei der Implosion der Kavitationsblasen entstehen hohe Temperaturen, Drücke und Scherkräfte, welche das Substrat aufschließen und den Zellinhalt verfügbar machen. Durch die Zerstörung der Zellmembran werden intrazelluläre Enzyme freigesetzt, welche die optimale Umsetzung der Biomasse befördern [37]. Neben der Verbesserung des biologischen Abbaus wird die Viskosität des beschallten Substrats verringert. Dies verstetigt nicht nur den Anlagenbetrieb, sondern reduziert darüber hinaus den Bedarf an Rührenergie und das Risiko von Schwimmschichten.

Aufgrund einer verbesserten Schallübertragung in flüssigen Medien wird ausschließlich flüssiger Fermenterinhalt beschallt. Dabei wird das Substrat durch einen Bypass aus dem Hauptfermenter oder Nachgärer entnommen und mit einem Volumenstrom von wenigen m^3 pro Stunde durch die Ultraschallreaktoren gefördert. Anschließend wird das aufgeschlossene Substrat zur weiteren Vergärung zurückgeführt. Die Förderung des Substrats erfolgt i. d. R. durch kompakte Exzentrerschneckenpumpen. Zur Vermeidung von Verstopfungen der Pumpe durch Störstoffe sollte stets ein mechanischer Zerkleinerer vorgeschaltet werden.

Für die Erzeugung von Ultraschall sind aktuell Systeme mit zwei Grundprinzipien am Markt verfügbar. Zum einen kann die Ultraschallenergie durch stabförmige Sonotroden in das Substrat eingebracht werden. Hierbei besteht jedoch insbesondere bei faserhaltigen Substraten das Risiko von Verstopfungen und Ablagerungen [38]. Geeignete automatische Spülsysteme ermöglichen dennoch einen kontinuierlichen Betrieb dieser Ultraschallsysteme. Deutlich zuverlässiger ist der Einsatz sogenannter Rohrreaktoren. Dabei

dient das gesamte substratführende Edelstahlrohr als resonantes Ultraschallsystem und kann das Substrat somit ohne hervorstehende Einbauten optimal beschallen [39]. Die in das Substrat eingebrachte Ultraschallenergie ist dabei abhängig von der Anzahl der eingesetzten Ultraschallmodule.

Mit beiden Ultraschall-Verfahrensweisen wurde eine Steigerung der Gasausbeute von bis zu 20 % im Labor erzielt [40]. Der Energieaufwand für die Beschallung liegt im großtechnischen Maßstab bei 5 bis 10 kWh pro m^3 behandelten Substrats. Dies umfasst den Strombedarf der Ultraschallreaktoren sowie der Nebenaggregate wie Pumpe und Feststoffzerkleinerer.

Insgesamt bietet sich der Einsatz von Ultraschallsystemen insbesondere auf Anlagen an, bei denen eine Verringerung der Viskosität des Substrats von hoher Bedeutung für eine optimale Gasausbeute ist.



Bild 12: Ultraschall-Rohrreaktor zur Beschallung von Biogassubstrat (Quelle: Rainer Kissel, LfL)

2.5 Hydrodynamische Kavitation



Bild 13: Suprajet (Quelle: Firma greentex-service)

Der Kavitationseffekt kann auch hydromechanisch hervorgerufen werden, indem Gärgemisch mit 8 bis 10 bar Druck durch eine Düse gepresst wird (Bild 13). Durch die schlagartige Entspannung entstehen Kavitationsblasen, die – wie bei der Ultraschallbehandlung beschrieben – implodieren, wodurch große Kräfte auf die Zellen einwirken. Andere Hersteller nutzen die durch hohe Drehzahlen eines Rotors entstehenden Druckdifferenzen zwischen Zu- und Ablauf. Die-

se erzeugen ebenfalls Kavitationsblasen, die den gewünschten Effekt auf das zu behandelnde Medium ausüben (Bild 14). Je nach Ausführung ist zur Vermeidung von Verstopfungen eine mechanische Zerkleinerungseinheit vorzuschalten (z. B. Schneidsieb). Anwender sprechen von homogenerem Gärs substrat, reduzierten Rührzeiten und höheren Gaserträgen. Von wissenschaftlicher Seite liegen noch keine Informationen zur Effektivität des Verfahrens vor.

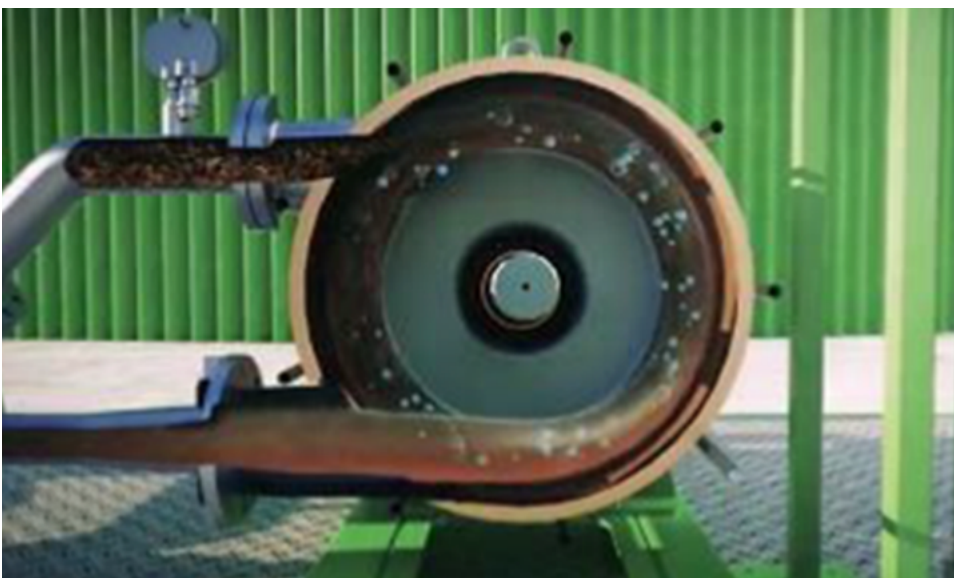


Bild 14: BioBANG-Kavitator (Quelle: Firma BioBANG)

2.6 Thermische Behandlung

Die thermische Behandlung von Biomasse bei Temperaturen zwischen 150 °C und 180 °C führt dazu, dass sich - verstärkt durch zusätzlichen Überdruck - Teile der Lignocellulose zu lösen beginnen. Wenn Wasser vorhanden ist, wird ein Teil der Hemicellulose hydrolysiert, und es werden Zucker freigesetzt. Durch das Aufbrechen der stabilen Lignocellulose-Struktur lässt sich die Gasausbeute steigern. Ab ca. 160 °C nimmt aber die Gefahr der Hemmstoffbildung zu, was zu einem Rückgang der Ausbeute führen kann [16].

2.6.1 Dampfexplosion („Steam Explosion“)

Zusätzlich zur gewöhnlichen Dampfbehandlung wird bei dem Verfahren der Dampfexplosion durch eine schnelle Druckentlastung mit anschließender rascher Abkühlung die Flüssigkeit in der Biomasse zum Explodieren gebracht, wodurch die geordnete Zellstruktur zerstört wird. Durch diesen Prozess wird ein großer Teil der (Hemicellulose gelöst und so für hydrolytische Mikroorganismen leichter zugänglich. Die Dampfexplosion ist eine Methode zur Aufbereitung landwirtschaftlicher Reststoffe, da sie im Vergleich zu mechanischen Verfahren etwa 70 % weniger Energie zur Erreichung eines vergleichbaren Zerkleinerungsgrads benötigt [12]. Die

erforderliche Behandlungsdauer steigt mit dem Wassergehalt der aufzubereitenden Biomasse. Zu beachten ist, dass es bei zu aggressiven Reaktionsbedingungen zur Bildung von Substanzen wie Phenolen oder Furan-Derivaten kommen kann, welche die Biozönose hemmen und damit die Methanausbeute beeinträchtigen können. Falls notwendig, kann eine auftretende Hemmwirkung durch Zugabe von verdünnten Säuren (z. B. Schwefelsäure; ACHTUNG: Gefahrstoff!) gemindert werden [17]. Es wurde auch die Anpassung der methanbildenden Biozönose an eine gewisse Konzentration von Hemmstoffen beschrieben.

2.6.2 Druckunterstützte thermische Aufbereitung / Thermo-Druck-Hydrolyse

Bei diesem Verfahren dringt 180 – 220 °C heißes Wasser in die Lignocellulosestruktur ein, wodurch Teile der Hemicellulose und des Lignins herausgelöst und für die Hydrolyse verfügbar gemacht werden. Um das Wasser flüssig zu halten, muss das Verfahren unter Druck durchgeführt werden. Auch hier können die hohen Temperaturen zur Bildung von Hemmstoffen führen, aufgrund der eingesetzten Wassermengen aber in

geringeren Konzentrationen als bei der Dampfexplosion. Die Bildung von Hemmstoffen scheint auch unterbunden werden zu können, wenn ein pH-Wert von 4 bis 7 eingehalten wird [5; 16].

Die Behandlung wird als besonders geeignet für Maisstroh beschrieben, ist jedoch aufgrund des hohen Wasserbedarfs, des erforderlichen Drucks und der hohen Temperaturen vergleichsweise

energieaufwändig [1]. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens muss deshalb betriebsindividuell kritisch geprüft werden.

Eine Übersicht mit qualitativer Bewertung der gängigen physikalischen Verfahren zur Substrataufbereitung in der Biogastechnik zeigt die unten stehende Tabelle.

Tab. 1: Eigenschaften unterschiedlicher physikalischer Methoden zur Aufbereitung von Biomasse

Verfahren/Aggregat	Beschleunigung der Hydrolyse	Hemmstoffbildung	Störstoffanfälligkeit	Wartungsbedarf	Strombedarf	Wärmebedarf	Substrate, für die eine Steigerung der Methanausbeute nach Behandlung nachgewiesen wurde
Schneidemühle/Schredder	ja	nein	ja	mittel	mittel	null	Maissilage
Hammermühle	ja	nein	nein	mittel	hoch	null	Stroh, Grassilage, Rindermist
Querstromzerspaner	ja	nein	nein	gering	hoch	null	Mais- u. Grassilage, Mischung von Mist/Mais/GPS/Grassilage
Rotierende Zahnscheiben	n. n.*	nein	ja	mittel	gering	null	Rindermist, Mais- und Szarvasi-grassilage
Kavitation	n. n.*	nein	nein	gering	mittel	null	Belebtschlamm in Abwasserreinigungsanlagen
Elektrokinetik	ja	nein	nein	gering	gering	null	Mischschlamm
Druckunterstützte thermische Aufbereitung	ja	bedingt	nein	gering	hoch	hoch	Maisstroh, Energiepflanzen (allgemein)
Extrusion	ja	nein	ja	mittel	hoch	null	Mais-, Gras- und Szarvasi-grassilage, Rindermist

* nicht nachgewiesen

3. Chemische Verfahren

Durch chemische Hydrolyse und Depolymerisation kann ein hoher Anteil der in Cellulose gebundenen Polysaccharide für die Vergärung verfügbar gemacht werden [18]. Die chemische Aufbereitung kann typischerweise unter alkalischen, sauren oder oxidativen Bedingungen vorgenommen werden. Die Vorbehandlung mittels Basen oder Säuren wird in der Praxis noch selten eingesetzt, könnte für die Biogaserzeugung künftig jedoch eine gewisse Rolle spielen, wie im Folgenden erläutert [17].

3.1 Alkalische Vorbehandlung

Für die alkalische Vorbehandlung werden verdünnte Lösungen von Natriumhydroxid (NaOH) und Löschkalk (Calciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), aber auch z. B. Kaliumhydroxid (KOH) oder Ammoniak (NH_3) verwendet [19].

Die alkalische Behandlung spaltet die Lignin-Kohlenhydrat-Bindungen, was zum Aufquellen der gesamten Struktur der Biomasse führt [20]. Außerdem werden Esterverbindungen innerhalb der Lignocellulose gelöst und die physischen Eigenschaften der Biomasse verändern sich: sie weist eine erhöhte spezifische Oberfläche und Porosität auf, bei gleichzeitig verringerter Kristallinität der Cellulose [43, 44]. Mikroorganismen und Enzyme können das Substrat dann leichter enzymatisch abbauen [18]. Die Vorbehandlung mit alkalischen Chemikalien hat den Vorteil, dass die Senkung des pH-Werts vermieden wird [18]. Bei stark verholzter / lignifizierter Biomasse ist die Vorbehandlung mit Basen wohl besser geeignet als die saure Vorbehandlung. Die Hydrolyse läuft zwar bereits ohne zusätzliche Temperaturerhöhung ab, allerdings kann eine höhere Temperatur den Aufschluss verbessern [18].

Aus mehreren Studien folgern Zheng et al. [20], dass die alkalische Vorbehandlung mit Natronlauge (NaOH) für Stroh wirtschaftlich und machbar ist. So wurde z. B. Weizenstroh über 5 Tage bei 37 °C mit 4 % NaOH vorbehandelt, was zu einer Zunahme der Methanausbeute um 112 % führte [20]. Eine Vorbehandlung von Maisstroh mit 6 % NaOH erzielte im Vergleich zu unbehandeltem Maisstroh eine um 48 % höhere Biogausbeute. Auch bei Gras als Substrat fand man in verschiedenen Untersuchungen höhere Gaserträge als ohne Behandlung [18]. In einer weiteren Studie von Wang et al. [45] wurde u. a. Weizenstroh und Maisstroh für 2 h in 2 % NaOH-Lösung bei 80 °C getaucht, im Anschluss gewaschen, neutralisiert und getrocknet, bevor mithilfe von Enzymen die im Stroh vorhanden Mehrfachzucker zu Einfachzuckern hydrolysiert wurden. Auch hier zeigte sich die Effektivität des Verfahrens: die Ausbeute der Hydrolyse konnte um rund 32 % für Weizenstroh bzw. um 15 % für Maisstroh gesteigert werden. Zusätzlich konnte die strukturelle Veränderung der Biomasse (Auflösen der homogenen Faserstruktur, Bildung von Öffnungen und Vertiefungen in der Oberfläche) durch mikroskopische Aufnahmen bestätigt werden (vgl. Bild 15).

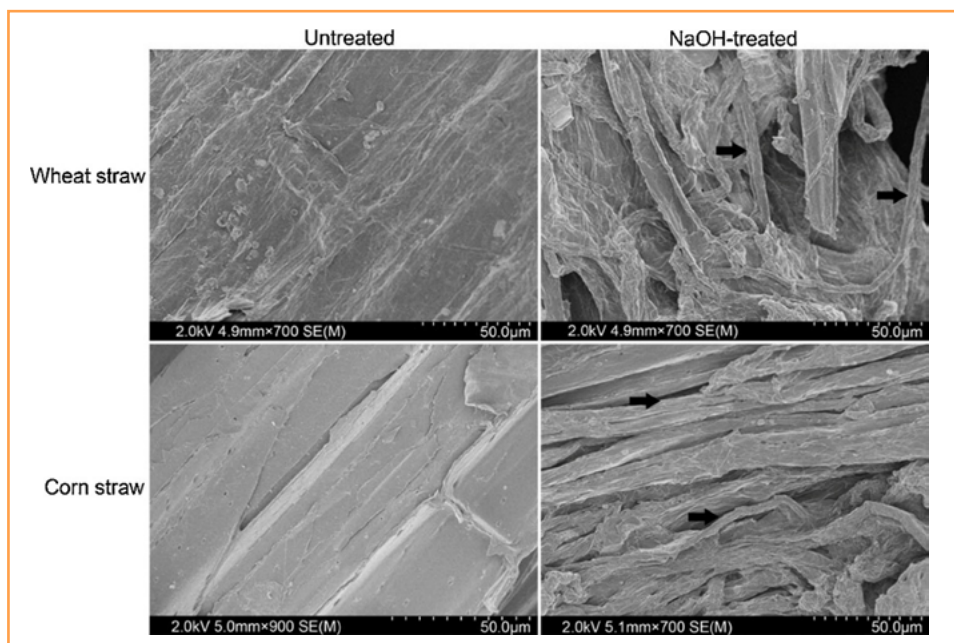


Bild 15: Behandlungseffekt von NaOH auf Weizenstroh (oben: links unbehandelt, rechts behandelt) und Maisstroh (unten: links unbehandelt, rechts behandelt). Abbildung modifiziert nach Wang et al. [45]

Am Institut für Landtechnik der LfL wurden ebenfalls vergleichbare alkalische Vorbehandlungsversuche mit Reststoffen und Erntenebenprodukten durchgeführt. Dazu wurden die Substrate für 24 h in 0,7 % NaOH-Lösung bei Raumtemperatur untergetaucht und anschließend durch Schleudern wieder entwässert, jedoch nicht neutralisiert. Es bestätigten sich die in der Literatur berichteten positiven Effekte auf Biogaspotenzial und Abbaukinetik (Abbaukinetik berechnet aus der Zeit bis zum Erreichen von 50 % des Methanpotenzials). Die erzielten Ergebnisse sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Ergebnisse der am ILT durchgeführten Versuche

	Substrat	Unbehandelt	Behandelt	Steigerung
Methanpotenzial	Separierte Rindergülle (feste Phase, 26 % TS)	177 L/kg oTS	262 L/kg oTS	48 %
	Körnermaisstroh (35 % TS)	266 L/kg oTS	340 L/kg oTS	55 %
	Rapsstroh (60 % TS)	152 L/kg oTS	235 L/kg oTS	28 %
Abbaukinetik	Separierte Rindergülle (feste Phase, 26 % TS)	0,12 1/d	0,13 1/d	8 %
	Körnermaisstroh (35 % TS)	0,14 1/d	0,16 1/d	14 %
	Rapsstroh (60 % TS)	0,11 1/d	0,14 1/d	27 %

Ein Nachteil des Tauchverfahrens in NaOH-Lösung ist der Anfall von großen Mengen Lauge, in der sich auch gelöste organische Verbindungen aus der Biomasse befinden. Für die erfolgreiche Praxisanwendung der NaOH-Vorbehandlung muss daher zuerst eine Methode gefunden werden, wie das NaOH und die gelösten organischen Verbindungen aus der Lösung zurückgewonnen werden können. Damit könnte der Einsatz von NaOH und Wasser reduziert und die Biogasausbeute erhöht werden. Insgesamt ließe sich damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verbessern. Alternativ zum Tauchverfahren könnte die zu behandelnde Biomasse auch mit NaOH-Lösung eingeweicht werden (Feuchtaufschluss), wie es bereits in den 1980er Jahren in der DDR mit Getreidestroh zu Fütterungszwecken durchgeführt wurde [42]. Dabei wird die Biomasse mit NaOH-Lösung auf einen Ziel-TS eingestellt und kurz aerob gelagert, jedoch nicht in Lösung getaucht. Zumindest bei fester Biomasse (Stroh) ließe sich

dadurch das Problem der Beseitigung oder Wiederverwertung der NaOH-Lösung vermeiden, außerdem muss strohige Biomasse für die Fermentation ohnehin angemaischt werden. Kalilauge (KOH) hat eine ähnliche Wirkung wie Natronlauge (NaOH). Da sie aber viel teurer ist, ist schon aus wirtschaftlichen Gründen ein größerer Einsatz fraglich. Vorbehandlungen mit Ammoniak (NH₃) wurden ebenfalls intensiv geprüft, da diese Chemikalie wenig kostet und nicht korrosiv ist. Sie hatte im Versuch eine geringere toxische Wirkung und konnte zudem rückgewonnen werden [19]. Jedoch ist der Aufschluss mit Ammoniak gegenüber der Natronlauge weniger intensiv, und eine zu hohe Ammoniakkonzentration kann den Mikroorganismen im Fermenter schaden.

Allgemein ist die Wirksamkeit der basischen Chemikalien vom Substrat, vom Ligningehalt und von den Behandlungsbedingungen abhängig [17]. Sie sind besser geeignet für Substrate mit geringe-

rem Ligningehalt [19] und daher effektiver bei landwirtschaftlichen Rückständen, die weniger stark verholzt sind [17]. Der Vorteil der alkalischen gegenüber der sauren Vorbehandlung ist, dass die basischen Verbindungen im Fermenter die während der initialen Acidogenese (Versäuerungsphase) gebildeten Säuren zumindest teilweise neutralisieren. Eine Anhebung des pH-Werts in den Neutralbereich kann die Methanogenese sogar beschleunigen.

3.2 Saure Vorbehandlung

Bei einer sauren Vorbehandlung wird die Biomasse typischerweise mit verdünnter Säure (z. B. Schwefelsäure H_2SO_4 , oder Schwefeldioxid SO_2) und gegebenenfalls mit Dampf mit ca. 150 – 180 °C behandelt. Bei diesem Prozess werden die Glucose-(1,4)-Bindungen (Abb. 2) gelöst und die Cellulose in Zucker aufgespalten / depolymerisiert. Hemicellulosen, die aus Monosacchariden wie z. B. Mannose, Glukose, Xylose und Arabinose aufgebaut und wesentlich kurzkettiger sind, werden hierdurch ebenfalls aufgeschlossen. Mit einer Säurevorbehandlung sind daher hohe Zuckerausbeuten bei der Hydrolyse möglich [17; 16].

Für eine maximale Ausbeute an Zuckern ohne die Bildung von Inhibitoren müssen die Bedingungen (Temperatur, Behandlungszeit, Säurekonzentration) bei der Behandlung dem eingesetzten Einsatzstoff entsprechend optimiert werden [17]. Bei der Säurebehandlung von Hemicellulosen und ligninhaltigen Strukturen können auch hemmende Nebenprodukte (Inhibitoren) wie z. B. Furfural und insbesondere Vanillin (ein Phenol) gebildet werden. Bestimmte, für den Prozess relevante Mikroorganismen können diese Nebenprodukte nur begrenzt tolerieren. Wird ein kritischer Wert erreicht, haben diese Stoffe eine hemmende Wirkung. Zu bedenken ist auch, dass

ACHTUNG!

Natronlauge, Kalilauge, Löschkalk und Branntkalk können bei Kontakt mit der Haut und den Augen zu schweren Reizungen und Verätzungen führen! Bei allen alkalischen Chemikalien handelt es sich um Gefahrstoffe, die mit entsprechender Vorsicht zu handhaben sind!

Siehe hierzu auch die Fachinformationen des Biogas Forum Bayern:

[„Hinweise zum sicheren Umgang mit Gefahrstoffen, Teil 1: Rechtliche Grundlagen, Kennzeichnung, Gefährdungsbeurteilung“](#)

eine zusätzliche Neutralisation der Säuren vor der Fermentation nötig ist [21].

Das schwer hydrolysierbare Lignin kann nur mit sehr starken, konzentrierten und oxidierenden Säuren, wie z.B. Schwefelsäure oder Salpetersäure gelöst werden. Untersuchungen von Ahmad et al. [19] ergaben eine höhere Löslichkeit von Lignin in Zeitungspapier unter Verwendung von Salpetersäure (HNO_3). H_2SO_4 wird am häufigsten verwendet, weil sie kostengünstig, sehr reaktiv und leicht verfügbar ist. Konzentrierte Säuren sind allerdings toxisch, korrosiv und gefährlich und erfordern besondere Schutzmaßnahmen. Bei ihrer Verwendung benötigt man Reaktoren mit besonders korrosionsbeständigen Materialien, die Bildung von Inhibitoren ist möglich, und die so vorbehandelten Substrate müssen aufwändig neutralisiert werden, bevor sie im Fermenter enzymatisch oder mikrobiell abgebaut werden können [21]. Die Kosten dafür sind viel höher als bei anderen, z. B. physikalischen Vorbehandlungsmethoden, weshalb diese Art der chemischen Vorbehandlung nur sehr selten durchgeführt wird.

ACHTUNG!

Bei Säuren handelt es sich um Gefahrenstoffe. Es sind unbedingt entsprechende Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung dieser Stoffe zu treffen!

Siehe hierzu auch die Fachinformationen des Biogas Forum Bayern:

[Hinweise zum sicheren Umgang mit Gefahrstoffen Teil 1: Rechtliche Grundlagen, Kennzeichnung, Gefährdungsbeurteilung](#)

3.3 Oxidative Vorbehandlung

Bei der oxidativen Vorbehandlung werden starke Oxidationsmittel wie z. B. Ozon (O_3) oder Wasserstoffperoxid (H_2O_2) eingesetzt. Ozon kann durch Hochspannung direkt erzeugt oder als Gas eingeleitet werden. Ziel ist es, Hemicellulose und Lignin oxidativ zu spalten, um den Lignocellulose-Komplex aufzubrechen und Cellulose für die enzymatische Spaltung zugänglich zu machen [16]. Diese Behandlung wird jedoch aus Kostengründen nur sehr selten eingesetzt. Auch besteht die Gefahr der Bildung von oxidierten Carbonsäuren und Peroxiden, die auch als Inhibitoren wirken können.

Wasserstoffperoxid in Konzentration von 30 % in wässriger Lösung ist einfacher verfügbar als Ozon [20] und hat bei lignocellulosehaltigen Einsatzstoffen eine ähnliche Wirkung wie eine alkalische Vorbehandlung [1]. Für einen wirksamen Abbau des Lignins muss hierbei ein enger pH-Bereich von 10 bis 12 eingehalten werden. Für einen effektiven Ligninaufschluss ist das Massenverhältnis zwischen H_2O_2 und der Biomasse wichtig. Die Behandlung mit 4 % H_2O_2 bei thermophilen Bedingungen (etwa ab 50 °C) führte zu einem besseren anaeroben Abbau von Sonnenblumenstängeln und folglich zu einem Anstieg der Methanproduktion um 33 % [18]. Hendriks und Zeeman [16] geben für die Verwendung von H_2O_2 ein pH-Maximum von 11,5 an. Unter einem pH-Wert von 10,0 findet keine Delignifizierung mehr statt, oberhalb von pH 12,5 wurde ebenfalls kei-

ne Wirkung von H_2O_2 auf den enzymatischen Abbau festgestellt [16]. Der Hauptvorteil dieser Methode ist, dass bei der richtigen Konzentration von H_2O_2 anscheinend nur geringe Mengen an Hemmstoffen entstehen und das Wasserstoffperoxid zudem vollständig zerfällt [18]. Bei zu hohen Konzentrationen können jedoch Oxidationsprodukte entstehen, die eine toxische Wirkung haben und insbesondere anaerobe Mikroorganismen hemmen können. Auch sollte beachtet werden, dass durch die oxidative Vorbehandlung gegebenenfalls ein Teil des vorhandenen Biogaspotentials vernichtet wird.

4. Biologische Verfahren

Von den verschiedenen Methoden zum Substrataufschluss ist die biologische Vorbehandlung noch am wenigsten untersucht, in vielen Bereichen besteht noch Forschungsbedarf. Mit zunehmendem Verständnis der Bedürfnisse der Mikroorganismen und der Mechanismen steigen aber die Möglichkeiten, geeignete Mikroben oder Konsortien ökonomisch und ökologisch vorteilhaft zum Lignocelluloseabbau einzusetzen. Der prinzipielle Vorteil der biologischen Aufbereitung liegt darin, dass die „mikroskopisch kleinen Akteure“ einen Teil der Substrate zu ihrer Vermehrung und Enzymproduktion verwenden und dass keine oder kaum Hilfsstoffe für einen dauerhaften Substratabbau zugesetzt werden müssen. Bei der Behandlung mit Enzymen aus industrieller Produktion ist dies anders, da diese nur eine bestimmte Zeit lang wirksam sind, im Prozess ab-

gebaut werden und deshalb regelmäßig bei Bedarf zugesetzt werden müssen (siehe hierzu auch die Fachinformation des Biogas Forum Bayern [„Marktübersicht Zusatz- und Hilfsstoffe in Biogasanlagen“](#)).

Bei der biologischen Vorbehandlung mit Mikroorganismen werden lebende Bakterien oder Pilze eingesetzt, die lignocellulolytisch wirksame Enzyme bilden. Diese greifen die chemische Struktur der Lignocellulose an, Pilze mit ihren Hyphen auch physikalisch, sie verändern die Lignin-Struktur und verbessern die Löslichkeit von Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Durch den Aufbruch der Ligninschicht entsteht eine größere Angriffsfläche für die im Biogasprozess aktiven Mikroorganismen und der Zugang zu den energiereichen Verbindungen wird erleichtert.

4.1 Einsatz von Bakterienkulturen

Eine Vielzahl von Bakterien ist in der Lage, Lignocellulose bzw. deren Bestandteile Cellulose und Hemicellulose enzymatisch aufzuspalten. Dabei gelten Cellulose und Hemicellulose als leichter hydrolysierbar und können von vielen verschiedenen Bakterien abgebaut werden (z. B. *Cellulomonas fimi* und *Thermomonospora fusca*; [22]). Einige Bakteriengruppen (z. B. viele Clostridien) besitzen neben frei sekretierten Enzymen spezialisierte Multienzymkomplexe (Cellulosome), in denen neben synergistisch wirkenden Cellulasen und Hemicellulasen eine Cellulose-Binde-Domäne integriert ist, um die Substrate direkt zu attackieren.

Der Abbau von Lignin ist zwar die Domäne der aeroben Weißfäulepilze, es ist aber bekannt, dass auch manche Bakterien Peroxidasen und Laccasen bilden können und somit das enzymatische Potential für den Ligninabbau aufweisen. Der bakterielle Abbau von Lignin ist allerdings bisher noch kaum untersucht und wegen der Gefahr der

Bildung inhibierender Verbindungen auch nicht unbedingt erwünscht. Um eine möglichst effektive mikrobielle Vorbehandlung zu erzielen, ist ein Einsatz von mikrobiellen Konsortien mit Spezialisten für die einzelnen Aufschlussschritte am erfolgversprechendsten.

An der LfL wurde ein Voraufschluss von Gras- und Maissilage mit bakteriellen Kulturen (z.B. *Clostridium thermocellum*, *C. stercorarium*, Mischungen mit diesen und verschiedene Anreicherungskonsortien) u. a. im einstufig thermophilen sowie mesophilen Betrieb in Batch- und Durchflussansätzen untersucht [23]. Für Maissilage wurde wohl wegen der ohnehin hohen Abbaueffizienz nur ein geringfügig gesteigerter Methanertrag erreicht, bei Grassilage war vermutlich wegen des intensivierten Proteinabbaus eine verstärkte Ammoniak-Toxizität zu beobachten. Das bedeutet aber nicht, dass die Kulturen wirkungslos waren: die starke Säureproduktion nach der Inokulation zeigte, dass Hydrolyse und Acidogenese

intensiviert waren. Die angeimpften Organismen starben aber wohl wegen nicht passender Umwelt- bzw. Prozessbedingungen schnell ab.

Generell erweist sich die Etablierung einer prozessfremden Kultur zur Bioaugmentation in einem funktionierenden Biogasprozess als schwierig, da sie sich in der vorhandenen Biozönose schlecht behaupten kann und rasch ausgeschwemmt wird [24]. Bei zweistufigem Betrieb mit mikrobiellem Voraufschluss sollte diese Problematik reduziert sein. In einem separaten, speziell zum Voraufschluss und entsprechend den Bedürfnissen der eingesetzten Mikroorganismen gestalteten Prozess ist die Chance wesentlich größer, dass sich

die Konsortien etablieren und vermehren.

4.2 Pilzbasierte Verfahren

Pilze gehören zu den effektivsten Verwertern lignocellulosereicher Biomasse (LCB). Einen guten Überblick zum Thema liefert die Publikation von Bomble et al. [25]. Den aktuellen Kenntnisstand fassen Sunar et al. [51] zusammen.

Da Pilze beträchtliche Mengen Enzyme produzieren können, die in der Lage sind Fasern aufzuschließen, eignen sie sich gut zur Behandlung von LCB. Eine vorgelagerte Behandlung erfolgt durch aerobe und anaerobe Kulturen, wobei anaerobe Stämme neueren Studien zufolge auch direkt in Fermentern eingesetzt werden können.

Vor allem anaerobe Pilze gelten als Schlüsselorganismen, da ihre natürliche Rolle im Verdauungstrakt von Wiederkäuern funktionale Parallelen zu anaeroben Systemen aufweist. Durch ihre Fähigkeit zur Gärung liefern sie metabolische Vorstufen und Elektronen, die direkt zu Methan umgewandelt werden können. Darüber hinaus verfügen sie über eine ausgeprägte enzymatische Ausstattung und sind zudem in der Lage, mechanisch auf die Fasern einzuwirken. Das ermöglicht ihnen den schwer verdaulichen Ligninmantel pflanzlicher Zellwände abzulösen, wodurch Cellulose und Hemicellulose nutzbar werden. Auf diese Weise steigt die Hydrolyserate, die als limitierender Faktor anaerober Systeme gilt.

Ein gezielter Zusatz solcher Pilze bewirkt einen Synergieeffekt mit Bakterien und Methanogenen, was die Methanausbeute um 20 – 60 % erhöhen kann [46]. Optimierte Konsortien aus Pilzen, Bakterien und Methanogenen ermöglichen darüber hinaus eine nahezu vollständige Lignocellulose-Verwertung im Reaktor [48].

Unter Laborbedingungen wurde für pilzliche Enzyme eine bis zu 50-fache höhere Aktivität im Vergleich zu extrazellulären Enzymen beobachtet [47]. Der Einsatz ganzer Zellen bietet somit klare Vorteile gegenüber rein enzymatischen Verfahren, insbesondere da durch die Selbsterhaltung Kosten eingespart werden.

Auch aerobe lignocellulolytische Pilze können Biomasse aufschließen. Hierzu zählen insbesondere Braun- und Weißfäulepilze, wobei letztere in der Lage sind, Lignin direkt aufzuschließen. Durch ihre Sauerstoffabhängigkeit eignen sie sich zur Vorbehandlung von Biogassubstraten oder auch zum Aufschluss abgepresster Gärrestfasern aus Biogasanlagen [29].

Beim Einsatz aerober Pilze wird LCB zwar sehr schnell und effizient aufgeschlossen, ein Teil der organischen Substanz wird aber veratmet, wobei

relativ viel pilzliche Biomasse aufwachsen kann. Wenn dies nicht vermieden wird, entstehen a priori Verluste, die in anaeroben Prozessen nicht anfallen. Außerdem können beim Abbau für den Methanbildungsprozess toxische Verbindungen entstehen. Besonders wenn die Ligninfraktion enzymatisch angegriffen wird, entstehen phenolische Verbindungen wie z. B. Vanillin, welche [30] nachgewiesenermaßen Prozesshemmungen verursachen [31].

Das Potenzial verschiedener Pilzgruppen wurde zur Vorbehandlung von Bioabfall unter aeroben [26] und zur Vorbehandlung von Maissilage und Rohrkolben sowie Heu unter anaeroben Bedin-

gungen [27; 28] untersucht. Zudem wurde der direkte Einsatz von anaeroben Pilzen im kontinuierlichen System [50] und in Form von optimierten Laborkulturen analysiert [48]. Die genannten Studien wurden allerdings im Labormaßstab durchgeführt. Aktuell wird der Einsatz anaerober und aerober Pilze in Technikums- oder Pilotanlagen intensiv erforscht. Die kontinuierliche Kultivierung anaerober Pilze in großtechnischem Maßstab konnte allerdings bisher nicht realisiert werden. Unserer Kenntnis nach werden derzeit noch keine lignocellulolytischen Pilze zur Substratbehandlung in großtechnischen Biogasanlagen eingesetzt.

4.3 Enzymeinsatz

Enzyme sind industriell hergestellt und nicht mehr wie Mikroorganismen lebendig und vermehrungsfähig. Der Sammelbegriff „Enzyme“ beinhaltet ein breites Spektrum an verschiedenen Proteinen wie z. B. Proteasen, Cellulasen, Hemicellulasen, Amylasen, Pectinasen, Laccasen oder Peroxidasen. Als biologische Katalysatoren beschleunigen sie meist sehr spezifisch bestimmte stofflichen Reaktionen und Abbauvorgängen oder ermöglichen diese sogar erst. Beispielsweise greifen Hemicellulasen typischerweise keine Cellulose an, und selbst bei den cellulospaltenden Cellulasen gibt es große Unterschiede in der Wirksamkeit und im Wirksamkeitsbereich. Als Einsatzorte kommen die Einsatzstoffe, die Fermenter und der (ggf. abgepresste) Gärrest in Frage. Eine Einführung in die Thematik findet sich in [32] und die Fachinformation „Marktübersicht Zusatz- und Hilfsstoffe in Biogasanlagen“ des Biogas Forum Bayern listet kommerzielle Hersteller auf. Brémond et al. [2] stellen aktuelle Produkte und Anwendungsberichte auch für landwirtschaftliche Reststoffe vor.

In einem optimal funktionierenden Fermenter produzieren die Mikroorganismen die erforderlichen Enzyme ständig selbst in ausreichender Konzentration. Ein Enzymzusatz bringt hier keine

Verbesserung. Enzyme sind nur eine gewisse Zeit aktiv, sie werden von den Mikroorganismen abgebaut und als Substrate verwertet. Enzympräparate müssen dem Prozess daher kontinuierlich zugeführt werden.

Der Einsatz von spezifisch zusammengestellten Enzympräparaten kann also von Nutzen sein, wenn bestimmte Prozessschritte suboptimal ablaufen und die Methanausbeute nicht den Erwartungen entspricht. Solche Situationen können beispielsweise auftreten, wenn die (lignocellulose-reiche) Biomasse nicht ausreichend (vor)aufgeschlossen ist, das Methanpotential im Gärrest (z. B. in Form unverdauter Fasern) noch erheblich ist, Schwimmschichten in den Gärbehältern oder im Gärrestlager nicht mehr abgebaut werden oder die erforderliche Rührenergie infolge hoher Viskosität in Fermentern massiv ansteigt.

In solchen Fällen kann ein Enzymeinsatz bei den Substraten, in Fermentern oder (abgepressten) Gärrestfasern sinnvoll, in Notsituationen sogar

die einzige Möglichkeit sein. Allerdings ist die biotechnologische Herstellung solcher Enzympräparate aufwändig und entsprechend kostenintensiv [32; 33]. Es muss daher situationsabhängig sorgsam abgewogen werden, ob ein Einsatz von Enzymen ökonomisch sinnvoll ist und nicht andere Maßnahmen wie beispielsweise die Veränderung des Fütterungsmanagements die bessere, weil kostengünstigere Alternative darstellen.

5. Fazit

Um speziell den Abbau lignocellulosereicher Biomasse in Biogasanlagen durch eine Vorbehandlung zu steigern, stehen eine Reihe physikalischer, chemischer und biologischer Verfahren zur Verfügung. Mehrstufige Anlagenkonzepte und physikalische Aufschlussverfahren sind in der landwirtschaftlichen Praxis bereits weit verbreitet, chemische und biologische Verfahren weniger oder noch gar nicht (Tab. 3).

Tab. 3: Verbreitung von Aufbereitungsverfahren in der landwirtschaftlichen Biogasproduktion

Verfahren	Verbreitet	Wenig angewendet	Nicht praxiserprobt
Schneidmühle (Rotacut)	x		
Hammermühle	x		
Querstromzersetzer	x		
Kugelmühle		x	
Rotierende Zahnscheibe	x		
Extruder		x	
Elektrokinetik		x	
Ultraschall (-Kavitation)	x		
Kavitation		x	
Dampfexplosion		x	
Thermo-Druck Hydrolyse		x	
Alkalische Behandlung			x
Säurebehandlung			x
Oxidative Behandlung			x
Bakterien			x
Pilze			x
Enzyme	x		

Insbesondere für landwirtschaftliche Reststoffe ist eine initiale physikalische Behandlung zur Zerkleinerung der Einsatzstoffe wie z.B. Häckseln – wenn diese nicht ohnehin Bestandteil des Ernteprozesses ist – kaum zu umgehen, will man die Einbring-, Förder- und Rührtechnik schonen und prozessbiologische Probleme vermeiden. In der vorliegenden Fachinformation werden weitergehende Vorbehandlungsmethoden vorgestellt. Bei ihrem Einsatz können gegebenenfalls auch Substrate in der Biogasanlage verwertet werden, die ansonsten gemieden würden.

Physikalische Vorbehandlungsverfahren werden in vielen Biogasanlagen bereits standardmäßig eingesetzt. Der erforderliche Energieeinsatz ist allerdings oft beträchtlich. Weiterhin sind Faktoren wie Störstoffanfälligkeit, Wartungsbedarf und Hemmstoffbildung für eine ökonomische Betrachtung zu berücksichtigen. Entsprechende Erfahrungen aus der Praxis sind in die vorliegende Fachinformation eingeflossen.

Die chemische Vorbehandlung ist typischerweise mit dem Einsatz von Gefahrstoffen verbunden. Die Produktion der Chemikalien ist kostenintensiv, es besteht die Gefahr der Bildung von Störstoffen und abhängig von der Natur der Chemikalien sind auch schädliche Umweltwirkungen nicht auszuschließen. Dementsprechend ist ihr Einsatz in der Praxis aktuell vernachlässigbar und wird dies wohl auf absehbare Zeit auch bleiben. Bei biologischen Verfahren wird insbesondere dem Einsatz lebender Mikroorganismen oder Mischungen von solchen ein hohes Potential zur Verbesserung des Aufschlusses lignocellulosereicher Biomasse zugeschrieben. Diese Techniken stecken aber, abgesehen von gängigen Arbeitsschritten wie z. B. der Silierung, mangels solider Kenntnisse zu den Mikroorganismen und ihren Bedürfnissen noch in den Kinderschuhen. Die Forschung zur mikrobiologischen Substrataufbereitung läuft allerdings intensiv: es können daher bald praxisreife Anwendungen erwartet werden.

Der Einsatz von Enzymen bzw. Enzymmischungen aus industrieller Produktion wird bereits vielfach beworben. In bestimmten Notsituationen, wie beispielsweise bei verfestigten Schwimmschichten, gibt es hierzu aktuell auch kaum sinnvolle Alternativen. Die Produktionskosten der Enzyme sind allerdings erheblich und ihre Aktivitätszeit ist sehr begrenzt. Manche Verfahren könnten aber in Kombination mit physikalischer Unterstützung künftig für den Einsatz bislang nicht genutzter Reststoffe an Bedeutung gewinnen.

Für alle der genannten Verfahren gilt, dass der mit dem Einsatz verbundene Aufwand dem Nutzen gegenübergestellt und bewertet werden sollte – dies nicht nur monetär, sondern auch hinsichtlich ökologischer Effekte.

Literatur

1. Wagner, A.; Lackner, N.; Mutsch-Lechner, M.; Prem, E.; Markt, R.; Illmer, P. (2018): Biological Pretreatment Strategies for Second-Generation Lignocellulosic Resources to Enhance Biogas Production. *Energies*, 11(7), 1797.
2. Brémond, U.; De Buyer, R.; Steyer, J.p.; Bernet, N.; Carrere, H. (2018): Biological pretreatments of biomass for improving biogas production: an overview from lab scale to full-scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 583-604.
3. Montgomery, Lucy F.R.; Bochmann, Günther (2014): Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. Technical brochure. IEA Bioenergy. 978-1-910154-05-2
4. Andrade, D.; Heuwinkel, H.; Gronauer, A. (2009): Optimierung der Prozesskette zur Methangewinnung aus Grünlandaufwuchs. Abschlussbericht. Als Teilprojekt im Biogas Crops-Network (BCN) Grundlagen der Biogasgewinnung aus pflanzlicher Biomasse. Förderkennzeichen: 03SF0317B
5. Bhutto, A. W.; Qureshi, K.; Harijan, K.; Abro, R.; Abbas, T.; Bazmi, A.a.; Karim, S.; Yu, G. (2017): Insight into progress in pretreatment of lignocellulosic biomass. *Energy* 122, 724-745.
6. Rodriguez, C.; Alaswad, A.; Benyounis, K.y.; Olabi, A.g. (2017): Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 1193-1204.
7. Brückner, C.; Sawatzki, T. (2011): Effizienzsteigerung in Biogasanlagen. Schriftenreihe Heft 35/2011, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15095>
8. Mönch–Tegeder, M. (2014): Untersuchungen zur Verwertbarkeit von Pferdemist im Biogasprozess; Dissertation; Universität Stuttgart–Hohenheim. <https://hohpublica.uni-hohenheim.de/items/ba53a8a0-d765-42e1-9c83-07ce24f6e456>
9. Andrade, D.; Barth, J.; Lichti., F. (2018): Bio-shred - Systematische Evaluation der mechanischen Zerkleinerung als Substratvorbehandlung in der Biogaserzeugung. Teilvorhaben 3. Unveröffentlicht
11. Duque, A.; Manzanares, P.; Ballesteros, M. (2017): Extrusion as a pretreatment for lignocellulosic biomass: fundamentals and application. *Renewable Energy* 114, 1427-1441.
12. Das, A.; Mondal, C.; Roy, S. (2015): Pretreatment methods of lignocellulosic biomass: a review. *Journal of Engineering Science and Technology review* 8 (5), 114-165.
13. Schröder, K. (2012): Substratdesintegration bei einer Biogasanlage durch Ultraschalltechnik. Bachelor Thesis; Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg; http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2012/1835/pdf/lsab12_89.pdf
14. Carrere, H.; Antonopoulou, G.; Affes, R.; Passos, F.; Battimelli, A.; Lyberatos, G.; Ferrer, I. (2016): Re view of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: from lab scale research to full-scale application. *Bioresource Technology* 199, 386-397.
15. Klarl, Johannes (2007): Verfahrenstechnische Optimierung einer Biogasanlage mit Vergärung hoher Anteile an Kleegrassilage. Diplomarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising-Weihenstephan. Fachbereich Land- und Ernährungswirtschaft.
16. Hendriks, A.t.w.m.; Zeeman, G. (2009): Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 100, 10-18.

17. Singh, J.; Suhag, M.; Dhaka, A. (2015): Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: A review. *Carbohydrate Polymers* 117, 624-631.
18. Paudel, S.; Banjara, S.; Choi, O.; Park, K.; Kim, Y.; Lee, J. (2017): Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges. *Bioresource Technology* 245, 1194 – 1205.
19. Ahmad, S.; Pathak, V.v.; Kothari, R.; Singh, R.p. (2017): Prospects for pretreatment methods of lignocellulosic waste biomass for biogas enhancement: opportunities and challenges. *Biofuels*, DOI: 10.1080/17597269.2017.1378991.
20. Zheng, Y.; Zhao, J.; Xu, F., Li, Y. (2014): Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science* 42, 35-53.
21. Brodeur, G.; Yau, E.; Badal, K.; Collier, J. (2011): Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review. *Enzyme Research* 787532, pp. 17; doi: 10.4061/2011/787532.
22. Sharma, H.k.; Xu, C.; Qin, W. (2017): Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuels and Bioproducts: An Overview. *Waste and Biomass Valorization*, 1-17.
23. FNR (2010): Abschlussbericht des Verbundvorhabens IBMN (Intensivierung des anaeroben Biomasseabbaus zur Methanproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen): <https://www.fnr.de/fileadmin/projektdatenbank/22011805.pdf>
24. Tsapekos, P.; Kougias, P. G.; Va Sileiou, S. A.; Treu, L.; Campanaro, S.; Lyberatos, G.; Angelidaki, I. (2017): Bioaugmentation with hydrolytic microbes to improve the anaerobic biodegradability of lignocellulosic agricultural residues. *Bioresource Technology*, 234, 350-359
25. Bomble, Y. J.; Lin, C.y.; Amore, A.; Wei, H.; Holwerda, E.k.; Ciesielski, P.n.; Donohoe, B.s.; Decker, S.r.; Lynd, L.r.; Himmel, M.e. (2017): Lignocellulose deconstruction in the biosphere. *Current Opinion in Chemical Biology*, 41, 61-70.
26. Mutschlechner, M.; Illmer, P.; Wagner, A.o. (2015): Biological pretreatment: Enhancing biogas production using the highly cellulolytic fungus *Trichoderma viride*. *Waste Management* 43:98-107. doi:10.1016/j.wasman.2015.05.011
27. Nkemka, V.; Gilroyed, B.; Yanke, J.; Gruninger, R. And Vedres, D. (2015): Bioaugmentation with an anaerobic fungus in a two-stage process for biohydrogen and biogas production using corn silage and cattail. *Bioresource Technology* 185:79-88.
28. Dollhofer, V.; Dandikas, V.; Dorn-In, S.; Bauer, C.; Lebuhn, M.; Bauer, J. (2018): Accelerated biogas production from lignocellulosic biomass after pre-treatment with *Neocallimastix frontalis*. *Bioresource Technology*, 264, 219-227.
29. Santi, G.; Muzzini, V.g.; Galli, E.; Proietti, S.; Moscatello, S.; Battistelli, A. (2015): Mycelial growth and enzymatic activities of white-rot fungi on anaerobic digestates from industrial biogas plants. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(7), 1713-1719.
30. Barakat, A.; Monlau, F.; Steyer, J.p.; Carrere, H. (2012): Effect of lignin derived and furan compounds found in lignocellulosic hydrolysates on biomethane production. *Bioresource Technology*, 104, 90-99.
31. Lin, R.; Cheng, J.; Ding, L.; Song, W.; Zhou, J.; Cen, K. (2015): Inhibitory effects of furan derivatives and phenolic compounds on dark hydrogen fermentation. *Bioresource Technology*, 196, 250-255.
32. Christy, P.m.; Gopinath, L.r.; Divya, D. (2014): A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through

enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 167-173.

33. Parawira, W. (2012): Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production. *Critical Reviews in Biotechnology*, 32(2), 172-186.

34. Klingspor, G. (2018): Ultraschall Desintegration von Biomasse - Funktionsprinzip und Besonderheiten. Schriftliche Mitteilung, Ultrawaves – Wasser- und Umwelttechnologien GmbH, Hamburg.

35. Wenner, C. (2018): Steigerung des Abbaugrades von Mischschlamm durch eine elektrokinetische Aufbereitung. Schriftliche Mitteilung.

36. Neumann (2016): Strom lässt Zellen platzen. In: *Top agrar - Energie-Magazin* 02/2016. Münster.

37. Yu, G., He, P., Shao, L., Zhu, Y., 2009. Enzyme extraction by ultrasound from sludge flocs. *J. Environ. Sci.* 21, 204-210. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074208622524>

38. Eder, B., 2004. Untersuchungen zur Verbesserung des Stoffstrommanagements auf Kläranlagen - Auslegungsansätze von Ultraschallanlagen zur Klärschlammbehandlung: Dissertation. Oldenbourg.

39. Koch, K., Lippert, T., Sabadini, N.H., Drewes, J.E., 2017. Tube reactors as a novel ultrasonication system for trouble-free treatment of sludges. *Ultrason. Sonochem.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417717300573>

40. Appels, L., Houtmeyers, S., Van Mechelen, F., Degrève, J., Van Impe, J., Dewil, R., 2012. Effects of ultrasonic pre-treatment on sludge characteristics and anaerobic digestion. *Water Sci. Technol.* 66, 2284–2290. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.415>

41. Nickel, K., Neis, U., 2007. Ultrasonic disintegration of biosolids for improved biodegradation. *Ultrason. Sonochem.*, Selected papers from the Tenth Meeting of the European Society of Sonochemistry 10th Meeting of the European Society of Sonochemistry 14, 450–455.

42. Block, H.-J.; Weissbach, F.; Prym, R. (1985): Untersuchungen zum Feuchtaufschluß von Stroh mit Natronlauge. In: *Arch. Tierern.* 35 (1), S. 61–80. DOI: 10.1080/17450398509426968.

43. Kim, Jun Seok; Lee, Y. Y.; Kim, Tae Hyun (2016): A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. In: *Bioresour. Technol.* 199, S. 42–48. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.

44. Kumari, Dolly; Singh, Radhika (2018): Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. In: *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 90, S. 877–891. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.111.

45. Wang, Wen; Wang, Xiaoman; Zhang, Yu; Yu, Qiang; Tan, Xuesong; Zhuang, Xinshu; Yuan, Zhenhong (2020): Effect of sodium hydroxide pretreatment on physicochemical changes and enzymatic hydrolysis of herbaceous and woody lignocelluloses. In: *Ind. Crops Prod.* 145, S. 112145. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112145.

46. Akyol, Çağrı; Ince, Orhan; Bozan, Mahir; Ozbayram, E. Gozde; Ince, Bahar (2019): Fungal bioaugmentation of anaerobic digesters fed with lignocellulosic biomass: What to expect from anaerobic fungus *Orpinomyces* sp. In: *Bioresour. Technol.* 277, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.01.024.

47. Hsin, Kuan-Ting; Lee, HueyTyng; Huang, Yu-Chun; Lin, Guan-Jun; Lin, Pei-Yu; Lin, Ying-Chung Jimmy; Chen, Pao-Yang (2025): Lignocellulose degradation in bacteria and fungi: cellulosomes and industrial relevance. In: *Frontiers in*

Microbiology Volume 16 - 2025. Online verfügbar unter <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2025.1583746>

48. Xu, Xinrui; Su, Xiaohong; Wang, Xin; Qin, Guohui; Liu, Wei (2024): Bioaugmentation with targeted recombinant functional consortia to improve lignocellulosic biowaste co-anaerobic digestion performance. In: Chemical Engineering Journal 499, S. 156151. DOI: 10.1016/j.cej.2024.156151.

49. Janusz, Grzegorz; Pawlik, Anna; Sulej, Justyna; Swiderska-Burek, Urszula; Jarosz-Wilkolazka, Anna; Paszczynski, Andrzej (2017): Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. In: FEMS microbiology reviews 41 (6), S. 941–962. DOI: 10.1093/femsre/fux049.

50. Shetty, Deepa; Joshi, Akshay; Dagar, Sumit Singh; Kshirsagar, Pranav; Dhakephalkar, Prashant K. (2020): Bioaugmentation of anaerobic fungus *Orpinomyces joyonii* boosts sustainable biomethanation of rice straw without pretreatment. In: Biomass and Bioenergy 138, S. 105546. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105546.

51. Sunar, Shiva Lall; Kumara, Madhu Kumar; Oruganti, Raj Kumar; Khadka, Kishan Kumar; Panda, Tarun K.; Bhattacharyya, Debraj (2025): Pretreatment and anaerobic co-digestion of lignocellulosic biomass: Recent developments. In: Bioresource Technology Reports 30, S. 102133. DOI: 10.1016/j.biteb.2025.102133.

Zitiervorlage: Kissel, R., Henkelmann, G., Steindl, M., Flad, V., Chovghi, C., Lebuhn, M., Seidel, J., Koch, K., Hülsemann, B. (2026): Substrataufbereitung - Zur Verbesserung des Abbaus faserreicher Biomasse. In: Biogas Forum bayern, 2. Auflage - 05/2026, Hrsg. ALB Bayern e. V., www.biogas-forum-bayern.de/bif8, Stand [Abrufdatum]



Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und
Landwirtschaftliches Bauwesen (ALB)
in Bayern e. V.
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon	08161 / 887-0078
Telefax	08161 / 887-3957
E-Mail	info@alb-bayern.de
Internet	www.alb-bayern.de