

## Exposé zukunftsweisender Einkommensoptionen für Biogasanlagenbetreiber

### Herstellung von Plattformchemikalien aus dem Fermentationsprozess für die stoffliche Nutzung



© Universität Hohenheim

Pol Straus, Benedikt Hülsemann | Universität Hohenheim

Dr. Verena Wilken | Landeskammer Niedersachsen

Mark Paterson | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Stand: Februar 2021

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projektes „Biogas Progressiv: Zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas) finanziert mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) aus dem Sondervermögen Energie- und Klimafond (FKZ: 22405416; 22407617; 22408117)

## Einleitung

Für zahlreichen Biogasanlagenbetreiber, stellt sich mit Ablauf der 1. EEG-Förderperiode nach 20 Jahren die Frage, wie ihre Anlage weiterhin rentabel regenerative Energie produzieren kann. Die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2021) vorgesehene Verlängerung der Vergütung über die Ausschreibungen für Biomasseanlagen bietet grundsätzlich die Möglichkeit eines Weiterbetriebs, allerdings sind dafür technisch sowie ökonomisch optimierte Anlagenkonzepte notwendig.

Mit dem Projekt „Biogas Progressiv – zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen (ProBiogas)“ wird das Ziel verfolgt, praxistaugliche Verfahrensoptionen für den Weiterbetrieb von Biogasanlagen zu evaluieren. Alle potenziellen Nutzungsoptionen, die im Projekt nicht techno-ökonomisch detailliert dargestellt werden konnten, werden in Form eines Konzeptsteckbriefs vorgestellt.

Bei den hier beschriebenen Verfahrensoptionen handelt es sich um Konzepte, die derzeit zum Beispiel nur über einen eingeschränkten Absatzmarkt verfügen, sich noch in der Entwicklung befinden, nicht die Marktreife erlangt haben oder nur unter sehr speziellen Bedingungen realisiert werden können. Sie alle eint jedoch, dass sie in Zukunft eine mögliche Einkommensquelle für landwirtschaftliche Biogasanlagen darstellen können.

Dieser Steckbrief soll als fundierte Entscheidungshilfe dienen, ob sich mit der Produktion von Plattformchemikalien für den Biogasbetrieb eine Erlössituation realisieren lässt.

### 1. Allgemeine Beschreibung

Ein Ansatz, zusätzliche Einnahmequellen im Biogassektor zu schaffen, stellt die Produktion von Edukten zur stofflichen Nutzung entlang der Wertschöpfungskette „Biogas“ dar. Dabei sollen organische Verbindungen, die während des Fermentationsprozesses entstehen, genutzt werden, um anschließend als sogenannte „Plattformchemikalien“ für die Weiterverarbeitung in anderen Industrien oder für die direkte stoffliche Nutzung vermarktet zu werden (Steinmüller 2011). Der Begriff „Plattformchemikalien“ definiert dabei Grundchemikalien, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden und als Ausgangsstoffe in der chemischen Industrie genutzt werden können. Bis jetzt werden diese üblicherweise aus Erdöl und Erdgas hergestellt, was sich aufgrund der Knappheit von fossilen Rohstoffen und aufgrund der Klimakrise zunehmend ändern wird (Ruppert et al. 2012). Anwendung finden diese organischen Verbindungen in den Bereichen der Pharma-, Kosmetik- und Lebensmittelindustrie sowie bei der Lösungsmittel-, Kraftstoff- oder Biopolymerherstellung von beispielsweise Polylactiden oder Polyhydroxyalkanoaten (PHA) (Steinbusch et al. 2011, Agler et al. 2011, Dröge und Jonville 2018, Groof et al. 2019). Neben dem Ansatz, dass das Biogas in der Wertschöpfungskette im Vordergrund steht, kann auch der Ansatz angewandt werden, dass die Produktion der Plattformchemikalien im Vordergrund steht und nur Reststoffe und Nebenprodukte aus der stofflichen Nutzung über anaerobe Vergärung genutzt werden, sodass der Biogasprozess zur Abfallverwertung des Prozesses verwendet wird.



Entlang der Wertschöpfungskette „Biogas“ kann an unterschiedlichen Punkten für die Gewinnung von Plattformchemikalien angesetzt werden und je nach Art der Biomasse und angestrebtem Zielprodukt, können die folgenden Eingriffspunkte zur Abtrennung unterschieden werden:

- frische Biomasse
- silierte Biomasse
- (zweiphasige) anaerobe Vergärung
- Weiterverarbeitung des Biogases.

Die Ansatzpunkte entlang der Wertschöpfungskette Biogas sowie die jeweiligen Zielprodukte der Plattformchemikalienbereitstellung sind in Abbildung 1 dargestellt.

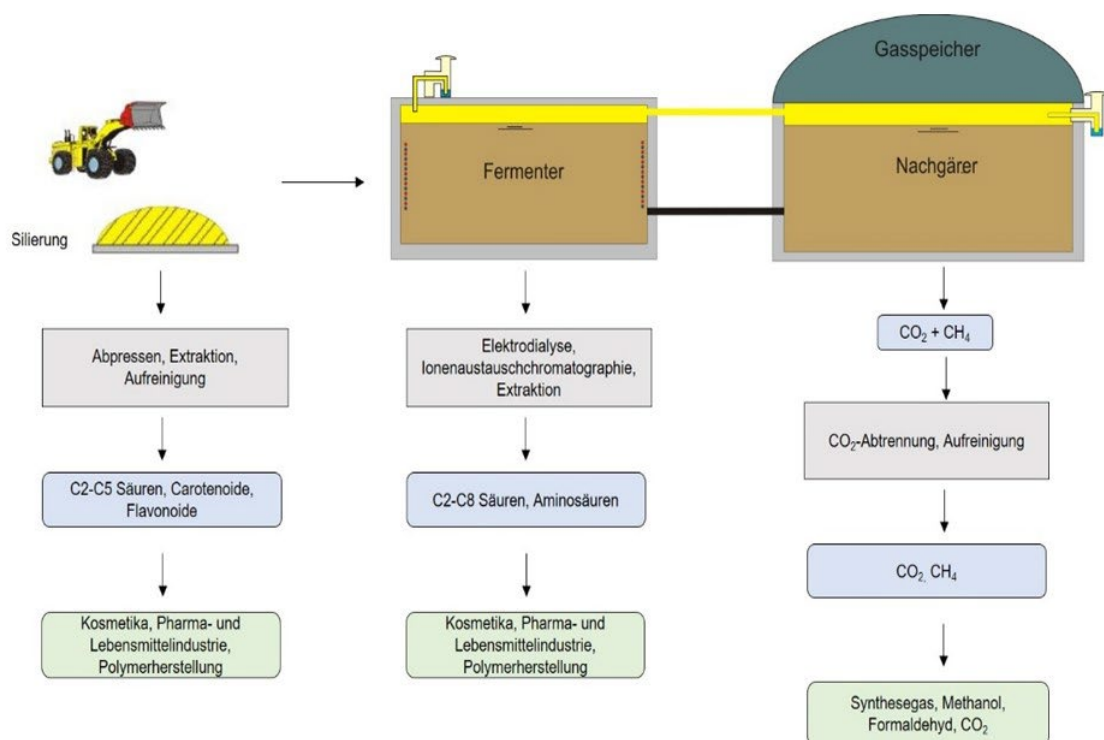


Abbildung 1: Bereitstellung von Plattformchemikalien entlang der Wertschöpfungskette einer Biogasanlage (eigene Darstellung)

## 2. Verfahrenstechnische Beschreibung

Die Plattformchemikalien können, wie bereits erwähnt, an unterschiedlichen Punkten dem Biogasprozess entnommen werden. Zur weiteren Synthese sind unterschiedliche Plattformchemikalien als Zielprodukte interessant. Typische Zielprodukte sind kurz- bis mittelkettige Säuren, Alkohole und Naturfarbstoffe wie Carotinoide oder Flavonoide (Agler et al. 2011, Groof et al. 2019, Dröge und Jonville 2018). Auch die stoffliche Nutzung von Kohlendioxid könnte in Zukunft Potenziale bieten, die Wirtschaftlichkeit der

Biogasbetriebskonzepte zu steigern. Im Folgenden soll ein Überblick über die unterschiedlichen Zielprodukte gegeben werden.

### **Carbonsäuren**

Kurz- und mittelkettige Carbonsäuren bergen das größte Potenzial zur Vermarktung als Plattformchemikalien, da sie einerseits vielseitig einsetzbar sind und andererseits in großen Mengen anfallen.

Kurzkettige Carbonsäuren (C3–C5) wie Butter- und Bernsteinsäure sowie ihre Ester und auch mittelkettige Säuren (C6–C8) wie Capron- und Caprylsäure finden große Anwendung in der Herstellung von Kosmetika und Aromastoffen (Steinbusch et al. 2011, Steinbrenner et al. 2019) und werden während der Acidogenese beim anaeroben Abbau der Biomasse im Biogasprozess erzeugt.

Milchsäure wird in der Lebensmittelbranche eingesetzt und fällt im Zuge der Silierung und damit Haltbarmachung der Biomasse in großen Mengen an (Castillo Martinez et al. 2013, Papendiek 2010). Nach EU-Regelung ist sie als Säuerungs-, Konservierungsmittel und als Farbstabilisator für die Lebensmittelproduktion unter der E-Nummer E 270 zugelassen (BMEL 2015). Andere Anwendungsbereiche sind die Kosmetik- und Pharmaindustrie, die chemische Industrie, z. B. Herstellung von Acrylsäure, oder in der Abwasserklärung (Datta und Henry 2006, Strazzer et al. 2018). Für diese Anwendungszwecke sind hohe Reinheitsgrade notwendig. Nähere verfahrenstechnische und rechtliche Untersuchungen und Fakten sind nicht bekannt.

Kurz- und mittelkettige Carbonsäuren finden außerdem breite Anwendung in der Polymerherstellung: biokompatible Kunststoffen wie Polylactid aus Milchsäure, Polyamid oder als Substrat zur Herstellung von Polyhydroxyalkanoaten (PHA) (Reddy und Mohan 2012, Papendiek 2010).

### **Aminosäuren**

Ein weiteres mögliches Produkt, das aus der Wertschöpfungskette einer Biogasanlage ausgekoppelt werden könnte, sind Aminosäuren. Die können als gemischtes Aminosäurepulver entweder als Futtermittel oder, bei hoher Qualität, als Nahrungsergänzungsmittel vermarktet werden (Steinmüller 2011). Grassilagenpresssaft wurde dazu von Steinmüller (2011) per Ionenaustausch von störenden Ionen befreit, dann wurden Aminosäuren und Carbonsäuren per Membrantrennverfahren voneinander getrennt und die Aminosäuren mittels Verdrängungschromatographie gewonnen. Der Presskuchen und der extrahierte Presssaft wurden anschließend in der Biogasanlage vergärt.

### **Carotenoide und Flavonoide**

Aussortiertes Gemüse wie Karotten, Paprika oder Tomaten enthalten beträchtliche Mengen an Carotinoiden und Lutein, welche vor der Einsilierung extrahiert und als natürliche Lebensmittel- und Futtermittelfarbstoffe genutzt werden können. In den nach EU-Regelung



zugelassenen Lebensmittelzusatzstoffen werden Carotine unter den E-Nummern E 160a-f geführt (BMEL 2015).

Flavonole, wie beispielsweise das von Dröge und Jonville (2018) aus Erbsenresten extrahierte Quercetin, finden breite Anwendung in Kosmetik und Pharmazie aufgrund ihrer antioxidativen Wirkung. Sowohl eine Extraktion vor als auch nach der Einsilierung ist möglich, da nach der Silierung zwar deutlich weniger Quercetin extrahiert werden kann, dieses jedoch im nicht glycosidierten Zustand vorliegt, was einen positiven Effekt auf die antioxidative Wirkung von Flavonolen hat (Dröge und Jonville 2018).

### **Kohlendioxid zur stofflichen Nutzung**

Kohlendioxid aus dem Biogasprozess kann ebenfalls als Plattformchemikalie zur Herstellung von Methanol, Formaldehyd oder Synthesegas dienen. Dabei ist die vergleichsweise hohe Aufkonzentration im Biogasprozess und im Abgas von großem Vorteil.

Zudem ist eine direkte stoffliche Nutzung des Kohlendioxids vorstellbar. Als Trockeneis wird CO<sub>2</sub> vor allen Dingen in der Lebensmittelindustrie und beim Transport von tiefgekühlten Waren genutzt. Auch als Lebensmittelzusatzstoff wird Kohlendioxid unter der Bezeichnung E 290 als Konservierungsmittel oder als Zutat und Säuerungsmittel in Erfrischungsgetränken eingesetzt. Die Anforderungen an Qualität und Reinheit des CO<sub>2</sub> sind angesichts der Anwendung im Lebensmittelbereich entsprechend hoch (BMEL 2015). In flüssiger Form kommt CO<sub>2</sub> zudem als Lösungsmittel, z. B. beim Entkoffeinieren von Kaffee (BMEL 2015, Kalinichenko et al. 2016), zum Einsatz.

### **3. Anknüpfungspunkte zur Biogasanlage**

Die Anknüpfung an den Biogasprozess kann an unterschiedlichen Punkten erfolgen. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

#### **Frische Biomasse**

Entlang der Biogas-Wertschöpfungskette stellt der erste Eingriffspunkt die frische Biomasse dar. So kann es je nach Biomasse und Zielsubstanz von Vorteil sein, bereits vor dem Einsilieren der Biomasse das Material zu extrahieren, da im Zuge des Silierprozesses Zielprodukte abgebaut werden können. So wurde von Dröge und Jonville (2018) nachgewiesen, dass die Carotenoidextraktion aus Karotten idealerweise vor dem Einsilieren erfolgen sollte. Im Zuge der Silierung wurden ca. 90 % der wichtigsten Zielsubstanzen Lutein und  $\beta$ -Carotenoid abgebaut. Die extrahierten Reststoffe können nachfolgend mit oder ohne zuvor durchgeführter Silierung anaerob vergärt werden. Abhängig von der genutzten Biomasse kann sich die Silierung, nach abgeschlossener Extraktion, schwierig gestalten und nur in Kombination mit gut silierfähigem Material, wie Maissilage, durchgeführt werden. Dröge und Jonville (2018) konnten beispielsweise nach der Extraktion von Quercetin aus Erbsenresten diese nur in der Co-Silierung mit Mais erfolgreich einlagern. Die Extraktion erfolgte dabei im Technikumsmaßstab mit der ASE-Methode (Accelerat Solven Extraction). Bei dieser Methode kann mittels hohem Druck und hoher Temperatur die





Extraktionseffizienz erhöht werden (Gey 2008). Dröge und Jonville (2018) berichten von einer hohen Extraktionseffizienz ohne Einsatz von giftigen organischen Lösungsmitteln.

## **Silierung**

Die Silierung stellt die Standardmethode der Biomasse-Konservierung im Bereich Biogas dar. Unter Sauerstoffabschluss bauen natürlich im Substrat vorkommende Mikroorganismen einen Teil des Substrates ab und säuern dabei das Substrat, hauptsächlich durch die Bildung von Milchsäure, an und machen es dadurch haltbar.

Durch die aktive Zugabe spezieller Milchsäurebakterienkulturen und Puffersubstanzen kann dieser Vorgang beschleunigt und erhöhte Säurekonzentrationen erreicht werden. So können Milchsäurekonzentrationen in Mais- und Amaranthsilagen um fast 92 % gesteigert werden (Haag et al. 2015).

Durch das Abpressen von Silage kann Silagesaft gewonnen werden, welcher bedeutende Konzentrationen an organischen Säuren aus dem Silierprozess aufweist. Zielprodukte sind Milchsäure, Essigsäure, Buttersäure (Kamm und Kamm 2004, Thang und Novalin 2008, Haag et al. 2015) und Aminosäuren (Steinmüller 2011). Für die Säuregewinnung kann durch gezieltes Verändern von Pufferkapazität und Trockenmassekonzentration der Silierungsprozess in Richtung erhöhter Buttersäurekonzentrationen gesteuert werden. Je nach Substrat kann es zudem zu einer erhöhten Konzentration an Alkoholen kommen, welche ebenfalls als potenzielle Zielprodukte in Frage kommen (Haag et al. 2015, Dröge und Jonville 2018).

Die Aufreinigung kann in nachfolgenden Verfahrensschritten über Elektrodialyse (Thang et al. 2005) oder Ionenaustauschchromatographie erfolgen (Steinmüller 2011, Thang und Novalin 2008). Weitere Ansätze sind das Aufkonzentrieren organischer Säuren über Nanofiltration und Umkehrosmose, bisweilen Flüssig-Flüssig-Extraktionen mit Dimethylether und Methylisobutylketon und anschließender Destillation. Jänisch et al. (2019) erreichten so eine Aufkonzentrierung der organischen Säuren um den Faktor 19, zum Teil für die Flüssig-Flüssig-Extraktion sogar um den Faktor 115. Der zurückbleibende Presskuchen kann als Substrat für die Biogasherstellung genutzt werden, wobei es bei einer Silierung in Richtung erhöhter Buttersäurekonzentrationen mit anschließender Abzweigung der Säuren zu geringeren Methanerträgen kommt, welche sich bei Maissilage in einer Größenordnung von 18 % weniger Methanertrag pro Hektar im Vergleich zu nicht abgepresster Maissilage belaufen (Steinbrenner et al. 2019). Die geringeren Methanerträge lassen sich jedoch im Hinblick auf den theoretisch höheren monetären Wert der aufgereinigten Säuren im Bereich der stofflichen Nutzung aus wirtschaftlicher Sicht positiv bewerten (Steinmüller 2011).

## **Zweiphasige anaerobe Vergärung**

Ein Ansatz, um bessere Steuerung und Zugriff auf die einzelnen Prozessstufen der anaeroben Vergärung zu ermöglichen, ist das Aufteilen des Prozesses in zwei Phasen und das Schaffen optimaler Prozessbedingungen für die einzelnen Abbauschritte, sodass Hydrolyse, Acidogenese und Acetogenese räumlich und zeitlich von der Methanogenese



getrennt werden (Wrenn und Angenent 2008). Dabei steht vor allem die Akkumulation unterschiedlicher Carboxylatverbindungen, die entlang der Hydrolyse und Acidogenese entstehen, im Mittelpunkt. Da hier das Hauptaugenmerk auf einen möglichst hohen Ertrag an Carboxylaten gelegt wird, spricht man auch von der Carboxylat-Plattform (Agler et al. 2011). Der Fokus liegt auf kurz- und mittelkettigen Carbonsäuren, welche gezielt hergestellt und isoliert werden sollen (Agler et al. 2011, Steinbusch et al. 2011).

Über die gezielte Anpassung von organischer Raumbelastung, Verweilzeit, Temperatur, Pufferkapazität und pH-Wert des Biogasprozesses kann die Produktausbeute in der ersten Phase stark beeinflusst werden (Wrenn und Angenent 2008, Strazzera et al. 2018).

Optimale Bedingungen für einen erhöhten Säurertrag sind leicht saure Bedingungen bei einem pH-Wert zwischen 6 und 7 (Jiang et al. 2013). Auch die Temperatur ist in Fermentern mit gemischter mikrobieller Zusammensetzung von essenzieller Bedeutung und muss je nach Ausgangs- und Zielprodukt gezielt angepasst werden (He et al. 2012).

Die Wasserstoffkonzentration beeinflusst maßgeblich den Säurertrag. So zeigten Angenent et al. (2004), dass eine erhöhte Wasserstoffkonzentration die Bildung von Buttersäure deutlich bevorzugt, da die Weiterreaktion zur Essigsäure inhibiert wird. Dementsprechend sind bei niedrigen Wasserstoffkonzentrationen deutlich höhere Ausbeuten an Essigsäure möglich.

Um den Säurertrag zu maximieren und verstärkt in Richtung Buttersäure zu steuern, ist es laut Lim et al. (2014) von Vorteil, sehr niedrige Konzentrationen an Sauerstoff in den Fermenter einzuführen, da sich dies positiv auf fakultativ anaerobe und acidogene Mikroorganismen auswirkt.

Um eine stabile und kontinuierliche Produktion sicherzustellen, sollte die Raumbelastung im Allgemeinen nicht zu hoch gewählt werden und sollte entsprechend der restlichen Versuchsparameter (Temperatur, Substrat, Mikrobiom) fallspezifisch angepasst werden (Jiang et al. 2013, Strazzera et al. 2018). Die Aufreinigung der Säure mittels Filtration und Umkehrosmose wurde im Projekt „Optigär“ angedacht. Die Idee wurde allerdings bisher nicht umgesetzt (EIFER 2020).

### **Weiterverarbeitung des Produkts „Biogas“**

Die Verstromung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen stellt in der Biogasbranche die zurzeit gängigste Vermarktungsstrategie dar. Rund 98 % der Biogasanlagen in Deutschland nutzen das hergestellte Biogas in der Vor-Ort-Verstromung, während rund 2 % der Anlagen Biogas aufbereiten und das Gas entweder ins Gasnetz einspeisen oder als Kraftstoff vermarkten (Daniel-Gromke et al. 2017).

Biogas setzt sich zu 50–75 % aus CH<sub>4</sub>, 35–50 % CO<sub>2</sub> und 2–10 % anderen Bestandteilen (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) zusammen (FNR 2016). Da bei der Verstromung nur der CH<sub>4</sub>-Anteil im Biogas genutzt wird, sind Strategien zur wirtschaftlichen Nutzung des CO<sub>2</sub> anzustreben.

Erste Forschungsansätze zur CO<sub>2</sub>-Nutzung zur Herstellung von Plattformchemikalien sind Kombinationen elektrochemischer und biotechnologischer Katalysen. Ausgehend von CO<sub>2</sub>



werden mittels einer Gasdiffusionskathode C1-Intermediate wie Methanol oder Formaldehyd gebildet, die in einem nachgeschalteten Fermentationsschritt zu Milchsäure und Monoterpenen umgesetzt werden. Ein Prototypsystem und das dazugehörige Verfahren ließ sich das Fraunhofer Institut im Jahr 2018 patentieren (Csepei et al. 2018).

Die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> für solche Verfahren kann grundsätzlich durch Biogasanlagen erfolgen. Wobei dies an Biomethaneinspeiseanlagen besonders begünstigt wird, da durch die CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus dem Biogas das Kohlendioxid hochrein vorliegt und die Abtrennung bereits ein Standardverfahren bei der Biomethanproduktion ist.

Auch zur Herstellung von Synthesegas kann sowohl CO<sub>2</sub> als auch CH<sub>4</sub> genutzt werden. Während Methan dabei seit jeher ein wichtiger Ausgangsstoff für die Synthesegasherstellung darstellt, wenn auch für gewöhnlich aus Erdgas, finden auch Ansätze zur Nutzung von CO<sub>2</sub> als Ausgangsstoff zunehmend an Bedeutung (Linde Engineering 2019). Das von BASF und Linde entwickelte und in einer Pilotanlage angewandte DryRef-Verfahren ermöglicht zudem die Nutzung des CO<sub>2</sub> aus anderen Prozessen und erlaubt es, Synthesegase mit erhöhten CO-Gehalten zu generieren (Linde Engineering 2019). Ein weiterer Ansatz wird im Exposé zum Thema Biowachse thematisiert.

Eine Herstellung von Synthesegas über elektrochemische Reduktion von CO<sub>2</sub> ist ebenfalls Gegenstand intensiver Forschung (Hernández et al. 2017).

#### **4. Ökonomische Angaben**

Ökonomische Angaben sind bisher kaum zu treffen, da die Anwendungen bisher alle höchstens im Labor- und Technikumsmaßstab umgesetzt worden sind. Vor allem die Auftrennung scheint die Kosten hochzutreiben. Dröge und Jonville (2018) berichten von Preisen für Quercetin-Extrakte von 6–18 €/kg, wobei die große Preisspanne aufgrund der starken Schwankungen der Extraktmenge herrührt. Der Marktpreis wird hingegen mit 10–40 €/kg angegeben.

Im Projekt „Optigär“ wurden für eine 250-kW-Biogasanlage Investkosten von 360.000 € und Betriebsmittelkosten von 100.000 €/a (5 €/m<sup>3</sup> Gärrest) abgeschätzt (EIFER 2020). Es konnte zudem ermittelt werden, dass die Betriebskosten und die Erlöse für das Säuregemisch in ähnlichen Größenbereichen liegen und die Produktion somit unter optimalen Bedingungen wirtschaftlich sein könnte.

Die Vermarktung von Einzelsäuren wird dann als interessant angesehen, wenn die Konzentrationen im Gärsubstrat weiter erhöht werden oder mittels eines Trennschrittes mehrere Säuren vereinzelt werden können. Die Forschungsergebnisse zeigen zudem, dass der Einsatz von Maissilage wirtschaftlicher ist als der von Grassilage im Falle der Säureabtrennung.

#### **5. Marktrelevanz und Absatzmärkte**

Die Produktion von Plattformchemikalien im Biogasprozess hat bisher keinerlei Marktrelevanz. Es sind bisher kaum Versuche im Labormaßstab durchgeführt worden und eine Realisierung im Praxismaßstab ist bisher in keinem Forschungsprojekt angedacht.





Der Markt für Plattformchemikalien wächst, er ist aber stark von einer ausreichenden Verfügbarkeit von günstiger Biomasse bzw. dem Preis von Rohöl und Zucker abhängig. Als Märkte wären z. B. für Buttersäure die Herstellung von Kunststoffen, Aromen oder die Nutzung zur Herstellung von Extraktions solventen zu nennen (EIFER 2020).

## 6. Rechtliche Belange und Förderungen

Sowohl rechtliche Belange als auch konkrete Förderungen für Biogasanlagen sind im Falle der Plattformchemikalienherstellung derzeit nicht bekannt. Für eine wirtschaftliche Umsetzung der Produktion von Plattformchemikalien ist zunächst weitere Forschungsarbeit im Labor notwendig, sodass momentan auch mit keiner Förderung für die Praxis zu rechnen ist.

## 7. Chancen und Hürden

Angesichts begrenzter fossiler Rohstoffreserven und den ökologischen Problemen, die mit ihrer Nutzung einhergehen, gewinnen Bioraffinerien und der Zweig der Bioökonomie im Hinblick auf eine gesellschaftliche Entwicklung im Sinne der Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung. Die steigende Nachfrage nach Produkten auf Basis erneuerbarer Ressourcen schafft neue Märkte und die Möglichkeit, bisher nicht genutzte wirtschaftliche Potenziale zu erschließen. So ist das Wertschöpfungspotenzial bei Produkten zur stofflichen Nutzung im Allgemeinen aufgrund verbesserter Kaskadennutzung etwa um das vier- bis neunfache höher als bei der reinen energetischen Nutzung und fördert zudem zusätzlich die Entwicklung im ländlichen Raum (Carus et al. 2010, Papendiek 2010).

Für Biogasanlagen mit einer Größe von mehr als 1 MW und solche mit bereits installierter Technik zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung, könnte die Nutzung von CO<sub>2</sub> eventuell von Interesse sein, da hier ein Teil der nötigen Investitionen bereits getätigt wurden und CO<sub>2</sub>, welches in signifikanten Mengen anfällt, gewinnbringend vermarktet werden könnte. Allerdings ist eine Bestandsanalyse der gewonnenen Reinheit von Kohlendioxid und eine Abschätzung der Investitionen zur weiteren Aufreinigung von CO<sub>2</sub> und zum Abfüllen und Transport der gewonnenen Gase notwendig (IndustrieGaseVerband e.V. 2018).

Sowohl verfahrenstechnisch als auch wirtschaftlich stellen nach wie vor die Trennverfahren zur Aufbereitung zu reinen Produkten die größte Herausforderung dar. So machen Trenn- und Aufbereitungsverfahren ca. 60 % der Gesamtkosten zur Herstellung von Plattformchemikalien aus mikrobiologischen Systemen aus (Li et al. 2016). Die teure Aufreinigung der einzelnen Produkte stellt die größte wirtschaftliche Hürde dar, da beispielsweise unaufgereinigte Säuremischungen mit einem Marktwert von 1,0–2,3 €/kg aktuell nicht annähernd wirtschaftlich vermarktet werden können (Jänisch et al. 2019).

Zudem scheitern zurzeit noch Verfahren zur Auftrennung von reinen isolierten Zielprodukten an ihrer geringen Effizienz. Die Gärsubstrate besitzen eine sehr breite mikrobielle Zusammensetzung, welche viele unterschiedliche Stoffwechselprodukte generieren. Dies wird verstärkt durch den Fakt, dass die Inputsubstrate der Biogasanlage Kohlenhydrate, Proteine und Fette enthalten und somit viele Stoffwechselwege in der Produktbildung involviert sind und der Prozess sich schwieriger steuern lässt als das bei einheitlichem



Substrat und einheitlicher mikrobieller Zusammensetzung der Fall ist (Angenent et al. 2004, Jiang et al. 2011, Tsuge 2002). Aufgrund der breiten Masse an unterschiedlichen Bakterien, die am Prozess beteiligt sind, ist zudem ein Großteil der mikrobiellen Zusammensetzung in Biogasfermentern kaum bekannt (Kundu et al. 2017).

Die Aufreinigung der einzelnen Säuren, sowohl aus der Silierung als auch aus der Hydrolyse, erweist sich schwierig. Es ist möglich, Lösungen mit hohen Konzentrationen an kurz- bis mittelkettigen Carbonsäuren zu generieren, jedoch konnten bisher in Systemen mit mehreren Inputsubstraten und daraus resultierenden mikrobiellen Kulturen keine Lösungen mit ausreichenden Konzentrationen an Milch- oder anderen organischen Säuren hergestellt werden (Steinmüller 2011, Steinbrenner et al. 2019, Jänisch et al. 2019). Ähnliche Probleme stellen sich auch für andere Produkte, wie z. B. Aminosäuremischungen, die in Pilotprojekten aufgrund von Unreinheiten nur zu relativ niedrigen Preisen vermarktet werden konnten (Steinmüller 2011).

Die Polymerherstellung benötigt ebenfalls Rohstoffe in Reinform bei der Herstellung von Kunststoffen auf Basis eines speziellen Bausteins wie Polylactid oder von Mischkunststoffen wie PHA. PHA sind mikrobielle Polyester, die von unterschiedlichen Mikroorganismen unter nährstofflimitierten Bedingungen hergestellt werden (Urtuvia et al. 2014). Die gefütterten Säuren haben maßgeblichen Einfluss auf Eigenschaften und Art der produzierten PHA, sodass für eine gezielte Produktion eine möglichst vollständige und einheitliche Trennung der unterschiedlichen Säuren zur gezielten Fütterung der Mikroorganismen anzustreben wäre (Strazzera et al. 2018).

Es bedarf daher beim aktuellem Stand der Technik weiteren Bedarf zur Weiterentwicklung und Forschung der bestehenden Trennverfahren (Li et al. 2016, Rebecchi et al. 2016, Jänisch et al. 2019). Momentan sind die möglichen Anwendungen der isolierten Naturstoffe aufgrund der fehlenden Reinheit signifikant eingeschränkt, da besonders im Lebensmittel- und Pharmabereich hochreine Stoffe benötigt werden, die frei von stofffremden Kontaminationen sind. So werden beispielsweise für den Einsatz von Kohlendioxid in der Lebensmittelindustrie nach EU-Gesetzgebung eine Reinheit von mindestens 99 %, für den Einsatz in der Pharmaindustrie laut Europäischem Arzneibuch sogar eine Reinheit von 99,5 % gefordert (IndustrieGaseVerband e.V. 2018).

Ein Großteil der Verfahren ist außerdem noch wenig praxiserprobt, da die meisten Arbeiten bis dato nur im Labormaßstab umgesetzt wurden und erst wenige Pilot- und Praxisanlagen existieren, sodass sich das Konzept „Plattformchemikalien aus dem Fermentationsprozess zur stofflichen Nutzung“ wohl erst noch verstärkt in der Praxis beweisen muss, bevor es sich als Vermarktungsstrategie für die Zukunft durchsetzen kann (KTBL 2017, Umweltbundesamt 2019).



## 8. Weiterführende Informationen

Weitere Informationsquellen in Zusammenhang mit Biogas und Plattformchemikalien sind nicht bekannt.

Die Herstellung von Plattformchemikalien aus anderen Reststoffen ist allerdings in einer Vielzahl an Projekten ein großes Thema. Die RWTH Aachen z. B. forscht im Rahmen eines Exzellenzclusters an maßgeschneiderten Kraftstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (RWTH 2010). Zwei weitere Beispiele sind ein Forschungsverbund, der vom BMEL gefördert wird und auf Basis von Raps die Herstellung von Plattformchemikalien untersucht sowie die Firma Evonik, die 2013 eine Anlage zur Produktion der Plattformchemikalie Aminolaurinsäure auf Basis von Palmkernöl in der Slowakei eröffnet hat. Aus der Chemikalie sollen Kunststoffe produziert werden (BMEL 2014).



## Literatur

- Agler, M. T.; Wrenn, B. A.; Zinder, S. H.; Angenent, L. T. (2011): Waste to bioproduct conversion with undefined mixed cultures: the carboxylate platform. In: Trends in biotechnology 29(2), pp. 70–78, DOI: 10.1016/j.tibtech.2010.11.006
- Angenent, L. T.; Karim, K.; Al-Dahhan, M. H.; Wrenn, B. A.; Domínguez-Espinosa, R. (2004): Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. In: Trends in biotechnology 22(9), pp. 477–485, DOI: 10.1016/j.tibtech.2004.07.001
- BMEL (2014): Bioökonomie in Deutschland - Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft. Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
- BMEL (2015): Liste zugelassener Lebensmittelzusatzstoffe nach ihren E-Nummern. Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
- Carus, M.; Raschka, A.; Piotrowski, S. (2010): Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland, Nova Institut (Hg.)
- Castillo Martinez, F. A.; Balciunas, E. M.; Salgado, J. M.; Domínguez González, J. M.; Converti, A.; Oliveira, R. P. d. S. (2013): Lactic acid properties, applications and production: A review. In: Trends in Food Science & Technology 30(1), pp. 70–83, DOI: 10.1016/j.tifs.2012.11.007
- Csepei, L. I.; Gärtner, T.; Schmid, J.; Sieber, V. (2018): Innovative cascade processes for CO<sub>2</sub> conversion into fuels and chemicals. In: Chemie Ingenieur Technik 90(9), S. 1142, DOI: 10.1002/cite.201855022
- Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Trommler, M.; Reinholz, T.; Völler, K. et al. (2017): Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum (Hg.)
- Datta, R.; Henry, M. (2006): Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies — a review. In: J. Chem. Technol. Biotechnol. 81(7), pp. 1119–1129, DOI: 10.1002/jctb.1486
- Dröge, S.; Jonville, M. C. (2018): Stoffliche und energetische Nutzung von Karotten, Apfeltrester und Resten aus der Erbsenverarbeitung. Prüf- und EIFER (2020): Entwicklung effizienter zweiphasiger Biogasanlagen über eine gekoppelte energetische und stoffliche Nutzung nach Abtrennung von Hydrolyseprodukten (Optigär); Teilvorhaben 3: Umweltbewertung, Ökonomie, Überführungskonzept; Forschungsinstitut Pirmasens e. V. Pirmasens (EIFER) FKZ: 224-006-15
- FNR (2016): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. Hg Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 7. Auflage
- Gey, M. (2008): Instrumentelle Analytik und Bioanalytik, Springer Verlag, 2.Auflage



- Groof, V. de; Coma, M.; Arnot, T.; Leak, D. J.; Lanham, A. B. (2019): Medium Chain Carboxylic Acids from Complex Organic Feedstocks by Mixed Culture Fermentation. In: *Molecules* (Basel, Switzerland) 24(3), DOI: 10.3390/molecules24030398
- Haag, N. L.; Nägele, H.-J.; Fritz, T.; Oechsner, H. (2015): Effects of ensiling treatments on lactic acid production and supplementary methane formation of maize and amaranth - an advanced green biorefining approach. In: *Bioresource technology* 178, pp. 217–225, DOI: 10.1016/j.biortech.2014.08.048
- He, M.; Sun, Y.; Zou, D.; Yuan, H.; Zhu, B.; Li, X.; Pang, Y. (2012): Influence of Temperature on Hydrolysis Acidification of Food Waste. In: *Procedia Environmental Sciences* 16, pp. 85–94, DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.012
- Hernández, S.; Amin Farkhondehfal, M.; Sastre, F.; Makkee, M.; Saracco, G.; Russo, N. (2017): Syngas production from electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> : current status and prospective implementation. In: *Green Chem.* 19(10), pp. 2326–2346, DOI: 10.1039/c7gc00398f
- IndustrieGaseVerband e.V. (2018): Leitlinien für gute Verfahrenspraxis zur Herstellung, Abfüllung und Distribution von Lebensmittelgasen. Berlin (IGV-TL-01L-Rev1)
- Jänisch, T.; Reinhardt, S.; Pohsner, U.; Böringer, S.; Bolduan, R.; Steinbrenner, J.; Oechsner, H. (2019): Separation of volatile fatty acids from biogas plant hydrolysates. In: *Separation and Purification Technology* 223, pp. 264–273, DOI: 10.1016/j.seppur.2019.04.066
- Jiang, J.; Zhang, Y.; Li, K.; Wang, Q.; Gong, C.; Li, M. (2013): Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate. In: *Bioresource technology* 143, pp. 525–530, DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.025
- Jiang, Y.; Marang, L.; Kleerebezem, R.; Muyzer, G.; van Loosdrecht, M. C. M. (2011): Polyhydroxybutyrate production from lactate using a mixed microbial culture. In: *Biotechnology and bioengineering* 108(9), pp. 2022–2035, DOI: 10.1002/bit.23148
- Kalinichenko, A.; Havrysh, V.; Perebyynis, V. (2016): Evaluation of Biogas Production and Usage Potential. In: *Ecological Chemistry and Engineering S* 23(3), pp. 387–400, DOI: 10.1515/eces-2016-0027
- Kamm, B.; Kamm, M. (2004): Principles of biorefineries. In: *Applied microbiology and biotechnology* 64(2), S. 137–145. DOI: 10.1007/s00253-003-1537-7
- KTBL (2017): Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress vom 26. bis 27. September 2017 in Bayreuth, Hg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt
- Kundu, K.; Sharma, S.; Sreekrishnan, T. R. (2017): Influence of process parameters on anaerobic digestion microbiome in bioenergy production: Towards an improved understanding. In: *Bioenergy Research* (10), pp. 288–303





- Li, Qian-Zhu; Jiang, Xing-Lin; Feng, Xin-Jun; Wang, Ji-Ming; Sun, Chao; Zhang, Hai-Bo et al. (2016): Recovery Processes of Organic Acids from Fermentation Broths in the Biomass-Based Industry. In: Journal of microbiology and biotechnology 26(1), pp. 1–8, DOI: 10.4014/jmb.1505.05049
- Lim, J. W.; Chiam, J. A.; Wang, J.-Y. (2014): Microbial community structure reveals how microaeration improves fermentation during anaerobic co-digestion of brown water and food waste. In: Bioresource technology 171, pp. 132–138, DOI: 10.1016/j.biortech.2014.08.050
- Linde Engineering (2019): Verbundvorhaben: DryRef2 - energieeffiziente Synthesegaserzeugung durch trockene Reformierung im industriellen Maßstab. Pullach
- Ruppert, A., M.; Weinberg, K.; Palkovits, R. (2012): Hydrogenolysis Goes Bio: From Carbohydrates and Sugar Alcohols to Platform Chemicals. In: Angewandte Chemie 51(11), S. 2564–2601, DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201105125>
- Papendiek, F. (2010): Bioraffinerien: Die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe und die Verlagerung ihrer Veredelung in den ländlichen Raum. Diplomarbeit, Universität Potsdam, Potsdam
- Rebecchi, S.; Pinelli, D.; Bertin, L.; Zama, F.; Fava, F.; Frascari, D. (2016): Volatile fatty acids recovery from the effluent of an acidogenic digestion process fed with grape pomace by adsorption on ion exchange resins. In: Chemical Engineering Journal 306, pp. 629–639, DOI: 10.1016/J.CEJ.2016.07.101
- Reddy, M. V.; Mohan, S. V. (2012): Influence of aerobic and anoxic microenvironments on polyhydroxyalkanoates (PHA) production from food waste and acidogenic effluents using aerobic consortia. In: Bioresource technology 103(1), pp. 313–321, DOI: 10.1016/j.biortech.2011.09.040
- RWTH (2010): Erste Ergebnisse der Exzellenzinitiative. In: RWTH Themen, S. 22–26
- Steinbrenner, J.; Nägele, H.-J.; Buschmann, A.; Hülsemann, B.; Oechsner, H. (2019): Testing different ensiling parameters to increase butyric acid concentration for maize silage, followed by silage separation and methane yield potential of separated solids residues. In: Bioresource Technology Reports 7, p. 100193, DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100193
- Steinbusch, K. J. J.; Hamelers, H. V. M.; Plugge, C. M.; Buisman, C. J. N. (2011): Biological formation of caproate and caprylate from acetate: fuel and chemical production from low grade biomass. In: Energy Environ. Sci. 4(1), pp. 216–224, DOI: 10.1039/C0EE00282H
- Steinmüller, H. (2011): Demonstrationsanlage zur Gewinnung von Milchsäure und Aminosäuren aus Silagen von Dauergrünland und Feldfutter bei der Biogasanlage der Ökoenergie Utzenaich GmbH. Linz
- Strazzera, G.; Battista, F.; Garcia, N. H.; Frison, N.; Bolzonella, D. (2018): Volatile fatty acids production from food wastes for biorefinery platforms: A review. In: Journal of environmental management 226, pp. 278–288, DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.039



Thang, V. H.; Koschuh, W.; Kulbe, K. D.; Novalin, S. (2005): Detailed investigation of an electrodialytic process during the separation of lactic acid from a complex mixture. In: Journal of Membrane Science 249(1-2), pp. 173–182, DOI: 10.1016/j.memsci.2004.08.033

Thang, V. H.; Novalin, S. (2008): Green biorefinery: separation of lactic acid from grass silage juice by chromatography using neutral polymeric resin. In: Bioresource technology 99(10), pp. 4368–4379, DOI: 10.1016/j.biortech.2007.08.045

Tsuge, T. (2002): Metabolic improvements and use of inexpensive carbon sources in microbial production of polyhydroxyalkanoates. In: Journal of Bioscience and Bioengineering 94(6), pp. 579–584, DOI: 10.1016/S1389-1723(02)80198-0

Umweltbundesamt (2019): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle. Hg. Umweltbundesamt, Dessau

Urtuvia, V.; Villegas, P.; González, M.; Seeger, M. (2014): Bacterial production of the biodegradable plastics polyhydroxyalkanoates. In: International journal of biological macromolecules 70, pp. 208–213. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2014.06.001

Wrenn, B. A.; Angenent, L. T. (2008): Optimizing Mixed-Culture Bioprocessing To Convert Wastes into Bioenergy. pp. 179–194, DOI: 10.1128/9781555815547.ch15

