

Effizienzbewertung biomassebasierter PtX-Systeme

Natascha Eggers, M.Eng.* , Dr.-Ing. Torsten Birth

Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
Konvergente Infrastrukturen | Energie- und Ressourceneffiziente Systeme
39106 Magdeburg | Sandtorstraße 22

*natascha.eggers@iff.fraunhofer.de

Abstract

Die Energiewirtschaft der Zukunft benötigt für eine sichere, flexible und CO₂-neutrale Energieversorgung neben dem Netzausbau insbesondere Kapazitäten zur Speicherung von volatilen regenerativen Energien. Power-to-X-Systeme bieten als Sektorenkopplungstechnologien eine Lösung für die Speicherung und Nutzung in Strom-, Wärme- und gasbasierten Systemen. Sie können daher entscheidend zur Dekarbonisierung des Energie-, Chemie- und Mobilitätssektors beitragen.

Ein Großteil der Power-to-X-Systeme setzt sich aus verschiedenen technisch bewährten Verfahren zusammen. Neben neuen Ansätzen kommen zum Beispiel die Wasserelektrolyse, die Brennstoffzellentechnologie und auch biologische Prozesse, wie die Biogasherstellung, zum Einsatz. Erst durch die Kopplung dieser Einzelprozesse ergibt sich ein Power-to-X-System, wodurch neue Möglichkeiten der flexiblen Nutzung regenerativer Ressourcen erschlossen werden können.

In Folge des Zusammenschlusses verschiedener Prozesse ergeben sich jedoch Herausforderungen für die Effizienzbewertung des Gesamtsystems. Für nahezu jeden (Teil-)Prozess bestehen unterschiedliche Methoden und Kennzahlen zur Bewertung der Systemeffizienz. Die resultierenden Benchmarks sind häufig nicht vergleichbar, sodass eine ganzheitliche Bewertung des Power-to-X-Systems, bei der die tatsächliche Grenze der Optimierbarkeit aufgezeigt werden kann, nur selten möglich ist.

Eine Antwort auf dieses Problem bietet die Methode des Physikalischen Optimums. Diese basiert auf einem Vergleich des realen Prozesses mit einem idealisierten Referenzprozess, welcher unter Zuhilfenahme der Grundlagen der Thermodynamik und unter Berücksichtigung physikalischer und gesetzlicher Grenzen modelliert werden kann. Dadurch ist die Methode universell auf technische Prozesse anwendbar und dennoch für jeden Vorgang ultimativ.

In diesem Paper wird das Anwendungspotenzial der Methode des Physikalischen Optimums für die Effizienzbewertung von Power-to-X-Systemen, unter besonderer Berücksichtigung biologischer Prozesse, analysiert. Die Anwendung wird am Beispiel des Fermentationsvorgangs einer Biogasanlage verdeutlicht.

1. Bedeutung von Biomasse für Power-to-X-Verfahren

Die energetische Umwandlung und stoffliche Nutzung fossiler Energieträger kann als Hauptgrund für die Emission von Treibhausgasen identifiziert werden. Erneuerbare Energiequellen haben, besonders unter Einsatz sogenannter Power-to-X (PtX)-Technologien, ein hohes Potenzial der Reduzierung des Bedarfes an fossilen Energieträgern. PtX dient heute nicht mehr nur der Zwischenspeicherung von Energie aus regenerativen Quellen, sondern vor allem der Sektorenkopplung und trägt zur Dekarbonisierung der Sektoren bei. Während bei der ursprünglichen Power-to-Gas-Technologie noch die Speicherung von Überschussstrom in Form von chemischer Energie im Fokus stand, erschließt PtX immer mehr Sektoren durch die Verknüpfung bestehender Prozesse zu neuen Technologiepfaden.

Eine Übersicht möglicher Nutzungspfade von PtX ist in Abbildung 1 dargestellt. Diese Abbildung bietet einen ersten Eindruck über die Vielfalt von PtX und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

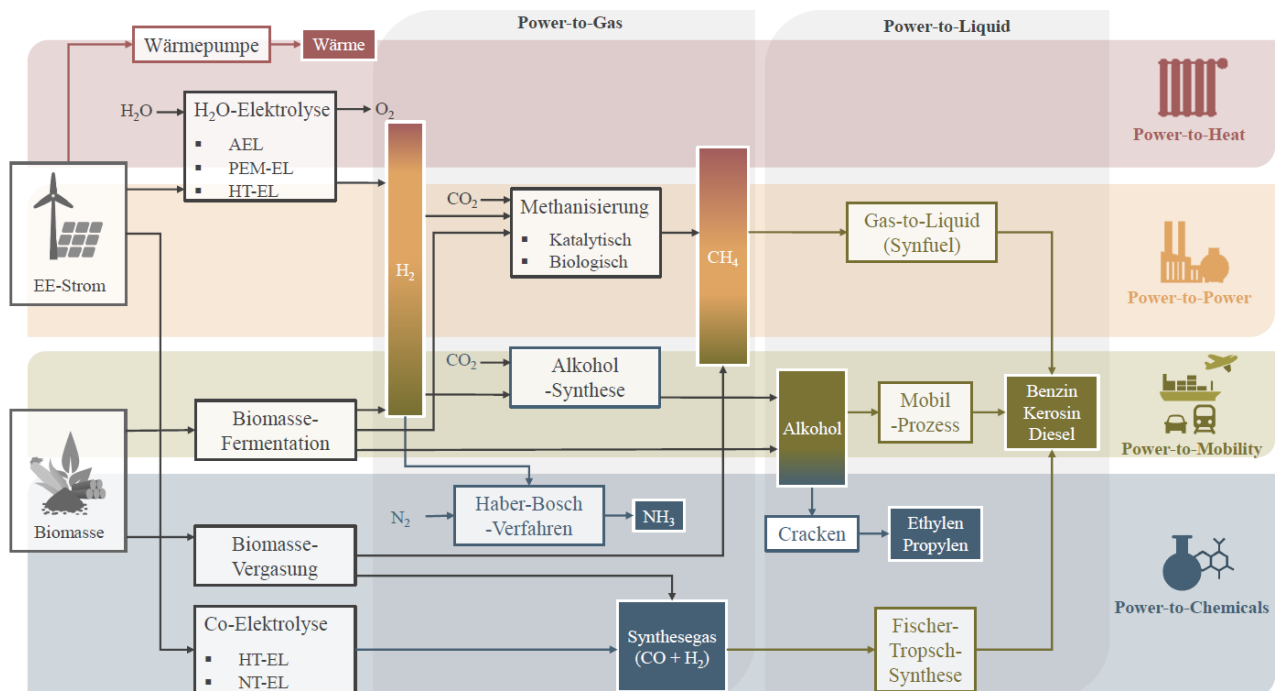


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Nutzungspfade von Power-to-X inklusive der Überschneidungen verschiedener Prozessschritte und der jeweiligen Einzelprozesse (eigene Darstellung nach M. Sterner, 2017; C. Schenuit et al., 2016; W. Leitner et al., 2018)

Neben der Nutzung elektrischer Energie aus Wind-, Solar- oder Wasserkraft gewinnt Biomasse als alternativer Träger erneuerbarer Energie an Bedeutung. Technologien der Sektorenkopplung ermöglichen neben der Produktion von Bio- und Synthesegas auch die Gewinnung von Alkoholen oder Wasserstoff. Sie stellen eine Verknüpfung der Nutzung von Biomasse mit dem Wärme-, Strom- und Mobilitätssektor sowie der chemischen Industrie dar und können zusätzlich zur Dekarbonisierung dieser Sektoren beitragen.

Sowohl die energetische als auch die stoffliche Nutzung von Biomasse erfordert eine weitere Aufbereitung des Energieträgers und lässt sich in die biochemische, die physikalische und chemische sowie die thermische Umwandlung unterscheiden. (N. Rothermel, 2018, S.7)

Für die Sektorkopplung sind besonders jene Verfahren relevant, bei denen die Überführung von Biomasse in direkt nutzbare Energieträger wie beispielsweise Wasserstoff, Methan oder Ethanol möglich ist. Für eine Kopplung mit dem Chemie-Sektor sind außerdem Verfahren zur Produktion von Synthesegas relevant.

Der Fokus dieses Papers liegt auf der Integration der biologischen Wasserstoff-Produktion zur Steigerung der Energieeffizienz von Biogasanlagen. In diesem Zusammenhang erfolgt zunächst die Diskussion bestehender Herausforderungen bei der Bewertung der System-Effizienz von PtX-Verfahren sowie eine Vorstellung der Methode des Physikalischen Optimums (PhO). Anschließend wird die Anwendung dieser Methode am Beispiel der fermentativen Biogasproduktion verdeutlicht.

2. Herausforderungen der Bewertung der System-Effizienz von Power-to-X-Verfahren

Sowohl bei der Planung als auch beim Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen und Prozesse spielt die Prozessoptimierung eine zentrale Rolle. Sie dient dazu, die Effizienz eines Prozesses und damit den Einsatz der notwendigen Ressourcen zu verbessern.

In der Vergangenheit wurden, je nach wirtschaftlicher Situation und politischen sowie ökologischen Interessen, verschiedene Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz entwickelt (C. Keichel, 2017, S. 1). Als Grundlage für die Bewertungs- und Optimierungsansätze dienen in der Regel produktbezogene Kennzahlen, sogenannte Benchmarks oder Referenzwerte.

Bei der Effizienzbewertung technischer Prozesse ist die Grundlage meist der Vergleich des realen Prozesses mit einem Referenzprozess, der beispielsweise den theoretisch maximalen Nutzen oder den minimalen Aufwand des Prozesses bestimmt. Auf Basis dieses Vergleichs kann eine Kennzahl gebildet werden, die ein Maß für die Effizienz des betrachteten Prozesses darstellt. In Abhängigkeit von der Bewertungsmethode werden unterschiedliche Referenzprozesse zur Beurteilung der Ressourceneffizienz verwendet.

Diese Methoden zur Beurteilung der Systemeffizienz werden in der Industrie allerdings kritisch bewertet, da die verwendeten Referenzwerte produktspezifische Unterschiede realer Anlagen weitgehend vernachlässigen (A. Paukzitat, 2006, S.9). Dies gilt für typische Vertreter wie den Wirkungsgrad und den Gütegrad zur Prozessbewertung.

Im Falle des Wirkungsgrades wird der tatsächliche Nutzen mit dem realen Aufwand verglichen. Der reale Aufwand stellt nach dem Energieerhaltungssatz den maximalen Nutzen des Prozesses dar. Der

Grenzwert des Wirkungsgrades von 100 % beschreibt den reversiblen Grenzfall des betrachteten Prozesses. Dieser entspricht einem Perpetuum Mobile zweiter Art und in der Realität unter keinen Umständen erreicht werden. Die tatsächliche Effizienzsteigerung, die durch Verbesserungsmaßnahmen erreicht werden kann, kann in Konsequenz nicht über den Wirkungsgrad dargestellt werden. (M. Sterner, 2017, S. 10)

Infolge der Vernachlässigung anlagenspezifischer Merkmale kommen in der Praxis vor allem Benchmarks zum Einsatz, die separat für die Bewertung einer definierten Produktionskette entwickelt wurden und den aktuellen Stand der Technik einbeziehen. Diese sind jedoch nicht mit anderen Verfahren vergleichbar oder auf diese übertragbar. (C. Keichel, 2017, S. 1)

Aufgrund der mangelnden Vergleichbarkeit dieser Benchmarks können selbst Prozesse, die zum gleichen Produkt führen, nicht hinsichtlich ihrer Effizienz gegeneinander abgewogen werden. Diese Tatsache führt zu Herausforderungen bei der Bewertung von Sektorenkopplungstechnologien wie PtX. Die Einzelprozesse einer PtX-Kette sind in der Regel technisch etabliert und können einzeln, aber nicht als Gesamtes bewertet werden.

Bei Methoden, mit denen das Optimierungspotenzial verschiedener Prozesses zuverlässig abgebildet werden kann, muss ein Referenzprozess herangezogen werden, der das potenzielle Optimum der zu bewertenden Anlage beschreibt. Hierzu gibt es in der Literatur verschiedene Ansätze, bei denen die best-verfügbare Technik als Referenzprozess für die Effizienzbewertung berücksichtigt wird, zum Beispiel unter Einbezug der gegebenen Infrastruktur (C. Drumm et al., 2013, S. 103) oder der maximal vertretbaren Anschaffungskosten (G. J. M. Phylipsen et al., 1997, S. 719). Allerdings sind diese Referenzprozesse stark von aktuellen Literaturdaten abhängig und unterliegen einem Wandel entsprechend dem Stand der Technik.

Für die Effizienzbewertung eines Prozesses besteht die größte Herausforderung darin, das theoretische Optimum des technischen Vorgangs unter Berücksichtigung der Anlagenspezifik zu ermitteln und gleichzeitig eine Unabhängigkeit des Referenzprozesses vom Stand der Technik und Forschung zu schaffen. Durch die grenzwertorientierte Modellierung des theoretischen Optimums kann eine kontinuierliche Anpassung des Referenzprozesses ausgeschlossen werden.

Eine Methode, die grundsätzlich darauf abzielt, das Optimierungspotenzial eines Prozesses zu bestimmen, ist die Methode des PhOs nach D. Volta. Diese ermöglicht den sektorenübergreifenden Vergleich verschiedener Prozesse und ermöglicht gleichzeitig die Bildung einer ultimativen Kennzahl. Eine erneute Betrachtung und Modellierung dieser Bezugsgröße aufgrund der Entwicklung des Standes der Technik und der Forschung kann deshalb ausgeschlossen werden.

3. Grundlagen der Methode des Physikalischen Optimums

Die Methode des PhOs basiert auf dem Vergleich des zu evaluierenden realen Prozesses mit einem physikalisch optimalen Referenzprozess, dem PhO. Das PhO wird nach D. Volta unter Berücksichtigung der für einen bestimmten technischen Prozess geltenden physikalischen Naturgesetze bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass die Physik die Gesetze der Chemie und der Biologie einschließt. (D. Volta, 2014, S. 32) Das PhO ist somit das Äquivalent eines thermodynamisch idealen Prozesses und in der technischen Umsetzung unter keinen Umständen zu übertreffen (C. Keichel, 2017, S. 12) Aus diesem Grund ist das PhO für den jeweils betrachteten Prozess ultimativ. (D. Volta, 2014, S. 32)

Um den physikalisch optimalen Referenzprozess zu bestimmen, müssen nach D. Volta sämtliche Formen der Verlustarbeit ausgeschlossen werden. In diesem Zusammenhang wird der Begriff „Verlust“ umgangssprachlich für aufzubringende Ressourcen verwendet, die in Folge von Umwandlungsprozessen nicht mehr direkt nutzbar sind. In Abhängigkeit von der Komplexität des jeweiligen (Teil-)Systems basiert das PhO auf einfachen mathematischen Beziehungen oder auf der Simulation eines physikalisch idealen Referenzprozesses.

Die Abweichung der Betriebsweise des realen Prozesses vom PhO kann durch den PhO-Faktor dargestellt werden. Dieser wird nach D. Volta durch den Quotienten aus der realen und der physikalisch optimalen zu leistenden Arbeit gebildet und ist demzufolge ein Maß für die Effizienz des Prozesses (Gleichung 1). (N. Beckmann, 2017, S. 35) Das Verfahren ist umso effizienter, je näher der PhO-Faktor am Grenzwert von eins liegt.

Es können sowohl Leistungswerte (vgl. Gleichung 2) als auch Verbrauchswerte (vgl. Gleichung 1) verwendet werden. Abhängig davon kann sowohl die Effizienz eines Prozesses in einem bestimmten Zeitintervall als auch zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden. Neben der Bewertung des Gesamtprozesses ist somit auch eine Bewertung verschiedener Prozesszustände, wie beispielsweise der Inbetriebnahme oder der Abschaltung, möglich.

PhO – Faktor

$$F_{PhO}^B = \frac{B_{real}}{B_{PhO}} \geq 1 \quad (1)$$

B_{PhO} Physikalisch optimaler Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses

B_{real} Realer Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses

\dot{B}_{PhO} Momentaner physikalisch optimaler Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses

\dot{B}_{real} Momentaner realer Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses

z.B. [kJ]

z.B. [kJ]

z.B. [kW]

z.B. [kW]

PhO – Leistungsfaktor

$$f_{PhO}^b = \frac{\dot{B}_{real}}{\dot{B}_{PhO}} \geq 1 \quad (2)$$

4. Anwendungsbeispiel: Fermentationsvorgang einer Biogasanlage

Die Anwendung der Methode des PhOs auf biomassebasierte PtX-Systeme erfolgt derzeit im Rahmen des Verbundprojektes HyPerFerment I. Partner in diesem Projekt sind die MicroPro GmbH, die Streicher Anlagenbau GmbH und Co. KG und das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. Ziel ist die Erforschung und Etablierung eines mikrobiologischen Verfahrens zur Produktion von Wasserstoff sowie die Integration dieser sogenannten „Dunkelfermentation“ in bestehende Biogasanlagen. Das Projekt knüpft an vorhergehende Untersuchungen der MicroPro GmbH an. Diese wird die mikrobiologische Verfahrensentwicklung innerhalb des Projektes fortsetzen. Die anlagentechnische Umsetzung wird durch die Streicher Anlagenbau GmbH und Co. KG erfolgen.

Neben der technischen Umsetzung hat die Energieeffizienz des Anlagenbetriebes hohe Priorität. Diese wird vom Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF bewertet und optimiert und bildet den Fokus des vorliegenden Papers.

In Folge des aktuellen Projektstandes liegen derzeit lediglich erste Untersuchungen zum PhO der fermentativen Biogasproduktion vor. Eine Anwendung der Methode auf weitere Schritte der Biogasanlage mit integrierter Dunkelfermentation ist im Verlauf des Projektes geplant.

In den Kapiteln 4.1 – 4.3 erfolgt die beispielhafte Anwendung der Methode des PhOs auf den biologischen Vorgang der Biogasproduktion. Die erforderliche Wärmezufuhr, der Aufwand für die Durchmischung innerhalb des Fermenters sowie die Zufuhr von Co-Substraten und Wasser werden in dieser Betrachtung zunächst nicht berücksichtigt und müssen im weiteren Verlauf des Projektes als gesonderter Teilprozess des Systems betrachtet werden. Die Validierung des Modells für das PhO des betrachteten Teilprozesses erfolgt in Kapitel 4.4 auf Basis von durch die Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg bereitgestellten Versuchsergebnissen.

4.1 Systemmodell und Bilanzgrenzen

Zur Bewertung der fermentativen Biogasproduktion ist zunächst festzulegen, in welchem Kontext das Verfahren betrachtet werden soll. Dementsprechend ist zu prüfen, welches Ziel mit der Durchführung des Verfahrens verfolgt wird. Daraus wird der Aufwand des Verfahrens und die Optimierungsfrage abgeleitet.

In diesem Beispiel ist das Ziel der betrachteten fiktiven Biogasanlage aus einer definierten Substratmenge einen möglichst großen Methanertrag zu erzielen. Der Aufwand des Verfahrens besteht dementsprechend in der einzusetzenden Substratmenge und ist für diesen Fall sowohl in der Realität als auch im PhO definiert.

Um den Prozess optimieren zu können, muss untersucht werden, welcher Nutzen maximal generiert werden kann. In diesem Beispiel wird die Stoffmenge an gebildetem Methan je eingesetztem Mol

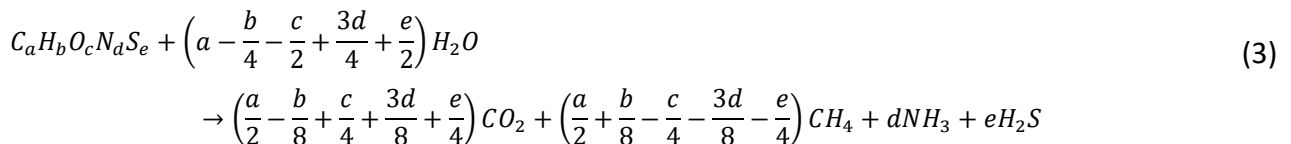
Substrat als Nutzen betrachtet. Es muss untersucht werden, wie viel Methan maximal, das heißt physikalisch optimal, je Mol Substrat bereitgestellt werden kann.

4.2 Bestimmung des idealen Referenzprozesses

Bei der Modellierung des idealen Referenzprozesses wird, wie nach D. Volta beschrieben, sämtliche Verlustarbeit vernachlässigt (D. Volta, 2014, S.33). Der maximale Nutzen des Prozesses kann in diesem Fall auf Basis des Biomethan-Potenzials (BMP) des zugeführten Substrats berechnet werden. Dieses resultiert aus der stöchiometrischen Bilanz nach Buswell und Boyle (Gleichung 3). (S. Ohl, 2011, S.19)

Bei dieser allgemeinen Betrachtung wird ausschließlich reines Methan als Nutzen berücksichtigt. Für einen konkreten Anwendungsfall können beispielsweise zusätzlich die Einspeisekriterien des lokalen Erdgasnetzes berücksichtigt werden.

Stöchiometrie der fermentativen Biogasproduktion nach Buswell und Boyle



Theoretisches Biomethanpotenzial des Substrates nach Buswell und Boyle in

$$BMP_{th,Substrat} = \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4}\right) \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right] \quad (4)$$

Bei der Bestimmung des PhOs muss jener Anteil des eingesetzten Substrates berücksichtigt werden, der aus nicht vergärbaren Stoffen wie Lignin besteht. Eine Umwandlung dieses Anteils zu Biomethan ist auch unter physikalisch optimalen Bedingungen nicht möglich. (M. Kaltschmitt et al., 2016, S. 1611) Das physikalisch optimale BMP wird daher aus Gleichung 5 abgeleitet.

$$BMP_{PhO} = BMP_{th,Substrat} - BMP_{th,Lignin} * x_{Lignin} \quad (5)$$

$BMP_{th,Lignin}$ Theoretisches Biomethanpotenzial des Lignins [mol mol⁻¹_{Substrat}]

x_{Lignin} Stoffmengenanteil des Lignins im Substrat [mol mol⁻¹_{Substrat}]

4.3 Darstellung des maximalen Optimierungspotenzials

Vergleicht man die unter physikalisch optimalen Bedingungen gebildete Methan-Stoffmenge (vgl. Gleichung 5) mit dem tatsächlichen Methanertrag kann der PhO-Faktor des Fermentationsvorganges bestimmt werden (Gleichung 6). Auf der Grundlage dieses Wertes kann beurteilt werden, wie effizient das Substrat umgesetzt wird und wie groß das Optimierungspotenzial zur Steigerung der Biogasausbeute des Prozesses ist.

$$F_{PhO} = \frac{BME_{real}}{BMP_{PhO}} \quad (6)$$

BME_{real} Realer Methanertrag je mol Substrat [mol mol⁻¹_{Substrat}]

4.4 Validierung des Modells für das PhO der fermentativen Biogasproduktion

Für die Validierung des Modells zur Beschreibung des PhOs des biologischen Vorganges innerhalb des Fermenters einer Biogasanlage liegen Informationen aus einer Elementaranalyse von Weizenstroh sowie experimentell ermittelte Biogaserträge unter Einsatz von Weizenstroh als Substrat vor. Die Daten stammen aus an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg am Standort Bergedorf durchgeführten Versuchsreihen. Die Bestimmung der Stoffdaten erfolgte nach VDI-Norm 4630.

Die Elementaranalyse des untersuchten Weizenstroh-Substrates ließ auf die Summenformel $C_{3,71}H_{6,47}O_{2,75}N_{0,044}S_{0,005}$ schließen. Die Analyse der Inhaltsstoffe ergab einen Lignin-Massenanteil von 24,71 %.

Es wurden mehrere Versuchsreihen zur Messung des Biomethanertrages im Labormaßstab in Batch-Prozessen durchgeführt. Bei allen Versuchsreihen betrug die Temperatur im Reaktor 41 °C. Aufgrund des hohen Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnisses von Weizenstroh kam ein stickstoffhaltiges synthetisches Co-Substrat zum Einsatz, welches Rindergülle nachempfunden wurde. Der Biomethangehalt im Reaktor wurde jeweils für 30 Tage mittels Infrarotanalyse beobachtet. Nach 30 Tagen konnte bei keinem der Versuche eine weitere Biomethanproduktion detektiert werden. Der Methanertrag der Versuchsreihen entsprach im Durchschnitt einem Normvolumen von 287,2 ml pro g_{Substrat} .

Für die Berechnung des PhOs des zu untersuchenden Fermentationsprozesses erfolgt zunächst die Bestimmung des BMPs des zugeführten Weizenstrohs auf Basis der Stöchiometrie von Buswell und Boyle (vgl. Kapitel 4.2 Gleichung 4) unter Berücksichtigung der ermittelten stöchiometrischen Zusammensetzung des Weizenstrohs (Gleichung 7).

$$\begin{aligned}
 BMP_{th,Substrat} &= \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3}{8}d - \frac{e}{4} \right) \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right] & (7) \\
 &= \left(\frac{3,71}{2} + \frac{6,47}{8} - \frac{2,75}{4} - \frac{3}{8}0,044 - \frac{0,005}{4} \right) \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right] \\
 &= 1,9585 \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right]
 \end{aligned}$$

a, b, c, d, e Stöchiometrische Koeffizienten entsprechend der Summenformel $C_aH_bO_cN_dS_e$ des Substrates [-]

$BMP_{th,Substrat}$ Theoretisches Biomethanpotenzial des Substrates $[mol_{CH_4} mol_{Substrat}^{-1}]$

Analog hierzu erfolgt die Bestimmung des BMPs von Lignin. Hierzu wird die mittlere stöchiometrische Zusammensetzung von Lignin ($C_9H_{9,1}O_3(OCH_3)_1$) angenommen, welche aus vorherigen Untersuchungen an der HAW Hamburg bekannt ist (Gleichung 8).

$$\begin{aligned}
 BMP_{th,Lignin} &= \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3}{8}d - \frac{e}{4} \right) \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right] & (8) \\
 &= \left(\frac{10}{2} + \frac{12,1}{8} - \frac{4}{4} - \frac{3}{8}0 - \frac{0}{4} \right) \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right] \\
 &= 5,5125 \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right]
 \end{aligned}$$

$BMP_{th,Lignin}$ Theoretisches Biomethanpotenzial von Lignin [$mol_{CH_4} mol_{Lignin}^{-1}$]

Für die Bestimmung des PhOs muss der Stoffmengenanteil des Lignins bekannt sein. Dieser wurde deshalb auf Basis der molaren Massen des Substrates und des Lignins aus dem Massenanteil an Lignin im Weizenstroh berechnet (Gleichung 9).

$$\begin{aligned}
 x_{Lignin} &= w_{Lignin} * \frac{M_{Weizenstroh}}{M_{Lignin}} = w_{Lignin} * \frac{C_{3,71}H_{6,47}O_{2,75}N_{0,044}S_{0,005}}{C_{10}H_{12,1}O_4} & (9) \\
 &= w_{Lignin} * \frac{C_{3,71}H_{6,47}O_{2,75}N_{0,044}S_{0,005}}{C_{10}H_{12,1}O_4} \\
 &= w_{Lignin} * \frac{3,71 * M_C + 6,47 * M_H + 2,75 * M_O + 0,044 * M_N + 0,005 * M_S}{10 * M_C + 12,1 * M_H + 4 * M_O} \\
 &= 0,27 \frac{g_{Lignin}}{g_{Weizenstroh}} * \frac{3,71 * 12 \frac{g}{mol} + 6,47 * 1 \frac{g}{mol} + 2,75 * 16 \frac{g}{mol} + 0,044 * 14 \frac{g}{mol} + 0,005 * 32 \frac{g}{mol}}{10 * 12 \frac{g}{mol} + 12,1 * 1 \frac{g}{mol} + 4 * 16 \frac{g}{mol}} \\
 &= 0,27 \frac{g_{Lignin}}{g_{Weizenstroh}} * \frac{95,766 \frac{g_{Weizenstroh}}{mol_{Weizenstroh}}}{196,1 \frac{g_{Lignin}}{mol_{Lignin}}} \\
 &= 0,1319 \frac{mol_{Lignin}}{mol_{Weizenstroh}}
 \end{aligned}$$

M_{Lignin} Molare Masse des Lignins mit der Summenformel [$g mol^{-1}$]
 $C_9H_{9,1}O_3(OCH_3)_1$

$M_{Weizenstroh}$ Molare Masse des Weizenstrohs mit der Summenformel [$g mol^{-1}$]
 $C_{3,71}H_{6,47}O_{2,75}N_{0,044}S_{0,005}$

w_{Lignin} Massenanteil des Lignins im Substrat [$g_{Lignin} g_{Substrat}^{-1}$]

Das physikalisch optimale Biomethanpotenzial für Weizenstroh ergibt sich auf Basis von Gleichung 5 aus Gleichung 10.

$$\begin{aligned}
 BMP_{PhO} &= BMP_{th,Substrat} - BMP_{th,Lignin} * x_{Lignin} & (10) \\
 &= 1,9585 \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right] - 5,5125 \left[\frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}} \right] * 0,1319 \frac{mol_{Lignin}}{mol_{Weizenstroh}} \\
 &= 1,2314 \frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}}
 \end{aligned}$$

Für die an der HAW Hamburg durchgeführten Versuchsreihen ergibt sich ein PhO-Faktor von 0,9621 (Gleichung 11). Die Nähe dieses Wertes zum Grenzwert des PhO-Faktors von eins beweist, dass das PhO unter idealisierten Laborbedingungen erreicht werden kann und als Grenze der Optimierbarkeit des biochemischen Vorganges anzusehen ist.

$$\begin{aligned}
 F_{PhO} &= \frac{BME_{real}}{BMP_{PhO}} & (11) \\
 &= \frac{1,1847 \frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}}}{1,2314 \frac{mol_{CH_4}}{mol_{Substrat}}} \\
 &= 0,9621
 \end{aligned}$$

5. Ausblick und Fazit

In diesem Paper konnte aufgezeigt werden, dass die Anwendung der Methode des PhOs auf biologische Stoffumwandlungsprozesse angewendet werden kann. In Folge der Festlegung des Vorgehens innerhalb der Methode im Rahmen der VDI 4663 kann die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Methode auf weitere Prozesse und Vorgänge innerhalb des vorgestellten Prozesses der Biogasanlage mit integrierter Dunkelfermentation sichergestellt werden. Im Rahmen des HyPerFerment I Projektes ist die Betrachtung sämtlicher weiterer Teilprozesse sowohl des Biogas-Fermenters als auch der gesamten Anlage geplant. Darüber hinaus ist in weiteren Arbeiten und Projekten die Anwendung der Methode des PhOs auf chemische Prozesse innerhalb von PtX vorgesehen.

6. Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BME	Biomethan-Ertrag
BMP	Biomethan-Potenzial
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
PhO	Physikalisches Optimums
PtX	Power-to-X

7. Formelzeichen und Indizes

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
\dot{B}_{PhO}	Momentaner physikalisch optimaler Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses	z.B. [kW]
\dot{B}_{real}	Momentaner realer Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses	z.B. [kW]
B_{PhO}	Physikalisch optimaler Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses	z.B. [kJ]
B_{real}	Realer Ressourcenbedarf für den Betrieb eines Prozesses	z.B. [kJ]
M_i	Molare Masse der Komponente i	[g mol ⁻¹]

w_i	Massenanteil der Komponente i im Substrat	$[\text{g g}_{\text{Substrat}}^{-1}]$
x_i	Stoffmengenanteil der Komponente i im Substrat	$[\text{mol mol}^{-1}_{\text{Substrat}}]$
a, b, c, d, e	Stöchiometrische Koeffizienten entsprechend der Summenformel $C_aH_bO_cN_dS_e$ des Substrates	$[-]$
BME_{real}	Realer Methanertrag je mol Substrat	$[\text{mol mol}^{-1}_{\text{Substrat}}]$
$BMP_{th,i}$	Theoretisches Biomethanpotenzial der Komponente i je Mol Substrat	$[\text{mol mol}^{-1}_{\text{Substrat}}]$

8. Literaturverzeichnis

- N. Beckmann: „Wechselwirkungsanalyse zwischen dem physikalischen Optimum, dem betriebswirtschaftlichen Optimum und dem Carbon-Footprint-Optimum (PhO-BwO-CFO), Dissertation, Technische Universität Clausthal (2017)
- C. Drumm, J. Busch, W. Dietrich, J. Eickmans, A. Jupke: „STRUCTese – Energy efficiency management for the process industry“, *Chemical Engineering and Processing*, 67, S. 99 – 110 (2013)
- M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer: „Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren“ Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg (2016)
- C. Keichel: „Methode der grenzwertorientierten Bewertung“, Dissertation, Technische Universität Clausthal (2017)
- W. Leitner, R. Eichel, K. Wagemann: „Erneuerbare Energien vielfältig nutzen – Öffentlicher Statusbericht des Kopernikus-Projektes P2X“, Erforschung, Validierung und Implementierung von Power-to-X-Konzepten, Frankfurt am Main (2018)
- S. Ohl: „Ermittlung der Biogas- und Methanausbeute ausgewählter Nawaro“, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (2011)
- A. Paukzstat: „Anlagenspezifische Referenzformeln als Basis für die Allokation von CO₂-Emissionsberechtigungen“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2006)
- G. J. M. Phylipsen, K. Blok, E. Worrel: „International comparisons of energy efficiency-Methodologies for the manufacturing industry“, *Energy Policy*, 25, S. 715-725 (1997)
- N. Rothermel: „Erzeugung eines wasserstoffreichen Produktgases aus Biomasse mittels Wasserdampfvergasung und anschließender CO₂-Abscheidung“, Dissertation, Universität Stuttgart (2018)
- C. Schenuit, R. Heuke, J. Paschke: „Potenzialatlas Power-to-Gas – Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen“, Deutsche Energie-Agentur GbH (dena) (2016)
- M. Sterner: „Energiewirtschaftliches Kurzgutachten. Notwendigkeit und Chancen für Power-to-X-Technologien“ (2017)

D. Volta: „Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz von Produktionsprozessen“, Dissertation, Technische Universität Clausthal (2014)

