

FOCUS ON

Konferenzbeiträge

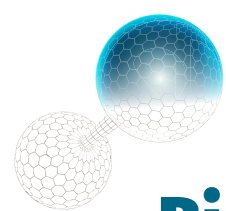
BIO ENERGIE UND WASSER STOFF

**»Wasserstoff aus
biogenen Reststoffen«
vom 29. & 30. April 2025**

Neue Entwicklungen
bis hin zur kommerziellen
Anwendung



2|2025



Bioenergie & Wasserstoff

Ergebnisse des Statusseminars (29. & 30.04.2025)

»Wasserstoff aus biogenen Reststoffen«

EDITORIAL

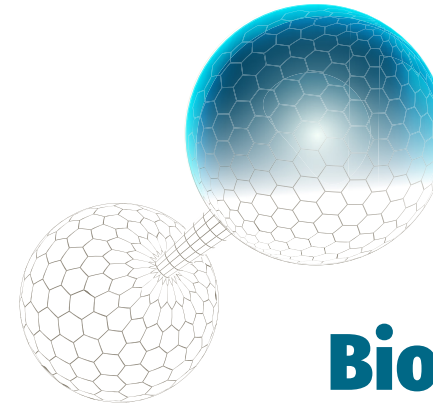
Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) unterstützt die Entwicklung der energetischen Biomassenutzung, um vielversprechende Forschungsergebnisse rasch in die Praxis zu überführen und den Transfer von Technologien und Innovationen für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende zu beschleunigen. Der Fokus liegt dabei auf zukunftssträchtigen, effizienten und wirtschaftlichen Technologien für die Erzeugung von Strom und Wärme sowie im Verkehrssektor, mit einem Schwerpunkt auf intelligenten Systemen und der Kopplung von Sektoren. Wasserstoff ist

Am 29. und 30. April 2025 fand im Rahmen des Förderprogramms ein zweitägiges Statusseminar zum Schwerpunktthema **»Wasserstoff aus biogenen Reststoffen«** statt. Diese Veranstaltung bot eine Plattform für die Diskussion und den Austausch von Forschungsergebnissen. Die Teilnehmenden hatten die Gelegenheit, sich über die neuesten Entwicklungen in diesem Bereich zu informieren und ihre eigenen Erfahrungen und Ergebnisse mit anderen zu teilen:

Das Forschungsvorhaben **BioH2Log** erprobt Logistikkonzepte für die dezentrale Produktion und Verteilung von grünem Wasserstoff aus Biogas, um den Hochlauf der nationalen Wasserstoffwirtschaft zu unterstützen und eine rentable Alternative für Biogasanlagen zu schaffen. **BioH2Ref** entwickelte eine Pilotanlage zur Wasserstoffproduktion aus Biogas durch Dampfpreformierung. Diese erreicht eine Effizienz von über 60 % und produzierte hochreinen Wasserstoff, der die Anforderungen für PEM-Brennstoffzellen erfüllt. **WasteWood2Fuel** arbeitet an der dezentralen Produktion und Methanolsynthese, um den Einsatz von Elektrolyse-Sauerstoff zu ermöglichen. Die Forschungsprojekte **HyPerFerment** und **H2Verg** erforschen die Nutzung biogener Reststoffe für Wasserstoffproduktion durch Dunkelfermentation und Biomassevergasung. Das Projekt **BiogasGoesHydrogen** erarbeitet ein innovatives Reaktorkonzept für die Wasserstofferzeugung aus Biogas. **BiDroGen** erstellte eine containerisierte Lösung für die Wasserstofferzeugung aus pelletiertem Restholz durch Kombination von Wassergas-Shift-Technologie und modularen Abscheidungstechniken, um das Restgas weiterzuverwenden. Das Forschungsprojekt **RhoTech2** untersucht nachhaltige H₂-Produktion mit Hilfe von Purpurbakterien, welche Fruktose aus biogenen Reststoffen wie Fruchttrester nutzen. Ziel ist eine wirtschaftliche und umweltfreundliche Produktion von Wasserstoff durch »Dunkel-Photosynthese«.

Das Förderprogramm »Energetische Biomassenutzung« blickt auf eine erfolgreiche Forschungsgeschichte zurück. Es wurde 2008 vom Bundesumweltministerium ins Leben gerufen, liegt aktuell die Verantwortung für das Programm beim BMWE. Der Förderbereich »Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe« ist inzwischen Teil des 8. Energieforschungsprogramms. Weitere Informationen zur Einreichung von Projektideen finden sich [hier](#).

Wir wünschen Ihnen viel Vergnügen beim Lesen der Konferenzbeiträge.



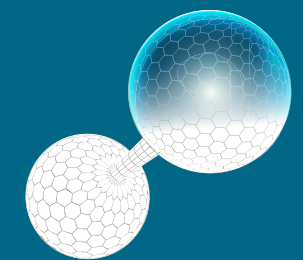
Bioenergie & Wasserstoff

Ergebnisse der Tagung (29. & 30.04.2025)

»Wasserstoff aus biogenen Reststoffen«

- 8 Edwin Hirtreiter, Dr.-Ing. Andy Gradel, Dr.-Ing. Hans-Peter Schmid,
Christopher Wüning, Dr.-Ing. Sebastian Rehfeldt,
Prof. Dr.-Ing. Harald Klein
***Dynamische Modellierung einer Dampfreformierungsanlage
für die Produktion von Wasserstoff aus Biogas***
- 14 Christopher Wüning, Leon Müller-Noell, Dr.-Ing. Andy Gradel,
Johannes Hüls, Christian Wuppermann
BioH2Ref – Grüner Wasserstoff aus Biogas
- 22 Dr.-Ing. Matthias Welzl, Aliena Lamberty, Markus Kollmer,
Dr.-Ing. Andy Gradel, Dr. Andreas Apfelbacher, Neil Krause,
Simon Kolb, Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess,
Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann
***WasteWood2Fuel - Entwicklung einer Technologie zur dezentralen
Synthese von Flüssigkraftstoffen aus festen biogenen
Reststoffen***
- 30 Natascha Eggers, Dr. Fabian Giebner, William Würpel
***Biogener Wasserstoff – Anwendungsszenarien für Dunkel-
fermentation und Biomassevergasung***
- 38 Alexander Feldner, Dr.-Ing Peter Treiber, Prof. Dr.-Ing Jürgen Karl
***Autarke Wasserstoffgewinnung aus Biogas mittels Reformierung
und CO-Verbrennung***
- 43 Andreas Molle, Dr.-Ing. Andy Gradel
Wasserstoffgewinnung aus Restholz
- 46 Dr. Caroline Autenrieth, Prof. Dr. Robin Ghosh
***Auf dem Weg zu einem zirkulären bioökonomischen
Geschäftsmodell für die Produktion von H₂, biogenem CO₂
und hochwertigen Produkten***
- 53 Impressum

BIOENERGIE & WASSERSTOFF



Beiträge des Statusseminars »Wasserstoff aus biogenen
Reststoffen« vom 29. und 30. April 2025



Edwin Hirtreiter, Dr.-Ing. Andy Gradel, Dr.-Ing. Hans-Peter Schmid,
Christopher Wüning, Dr.-Ing. Sebastian Rehfeldt,
Prof. Dr.-Ing. Harald Klein

Dynamische Modellierung einer Dampfreformierungsanlage für die Produktion von Wasserstoff aus Biogas

Einleitung

BioH2Log | FKZ 03EI5452

Biogene Wasserstoffproduktion mit innovativer Verteillogistik

BioH2Ref | FKZ 03EI5440

Dezentrale Wasserstoffaufbereitung von Biogas durch Dampfreformierung

Keywords

Biogas, dynamische Simulation, Wasserstoff, Dampfreformierung

Institutionen & Kontakt

Edwin Hirtreiter^{1*}, Dr.-Ing. Andy Gradel^{1,2},
Dr.-Ing. Hans-Peter Schmid³, Christopher Wüning⁴,
Dr.-Ing. Sebastian Rehfeldt¹, Prof. Dr.-Ing. Harald Klein¹

¹Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Department of Energy and Process Engineering, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching.

²BtX energy GmbH, Esbachgraben 1, 95463 Bindlach.

³WS Reformer GmbH, Dornierstraße 14, 71272 Renningen.

⁴RWTH Aachen, Lehrstuhl für Nachhaltige Thermoprozesstechnik und Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, Kopernikusstraße 10, 52074 Aachen.

* E-Mail korrespondierende Wissenschaftende: edwin.hirtreiter@tum.de

Wasserstoff wird als Schlüsselfaktor für das Erreichen der Klimaneutralität in Deutschland bis zum Jahr 2045 angesehen [1]. Die Bundesregierung Deutschland rechnet mit einem starken Anstieg des nationalen Wasserstoffbedarfs von rund 55 TWh im Jahr 2020 auf 90 bis 110 TWh im Jahr 2030 [1]. Im Vergleich dazu zeigt eine Metastudie des Fraunhofer Instituts, dass aktuelle Studien einen Wasserstoffbedarf von ca. 80 TWh im Jahr 2030 erwarten [2]. Allerdings wird auch klargestellt, dass bei hohen Treibhausgasminderungszielen von mehr als 80 % der Wasserstoffbedarf stark zunimmt und bis zu 800 TWh im Jahr 2050 erreichen kann [2].

Das übergeordnete Ziel des Förderprojekts BioH2Log ist es, den Hochlauf der nationalen Wasserstoffwirtschaft entsprechend den Zielen der nationalen Wasserstoffstrategie [1,3] zu unterstützen, indem die Wertschöpfungskette zur Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff aus Biogas untersucht wird. Für die Produktion von Wasserstoff aus Biogas wird die Technologie der Dampfreformierung eingesetzt, welche Stand der Technik bei der Produktion von grauem Wasserstoff aus Erdgas ist [4,5]. Aufgrund der Ähnlichkeit der Technologien wird die Dampfreformierung von Biogas bereits als marktreife Technologie mit einem Technology Readiness Level (TRL) von 7 bis 8 angesehen [6].

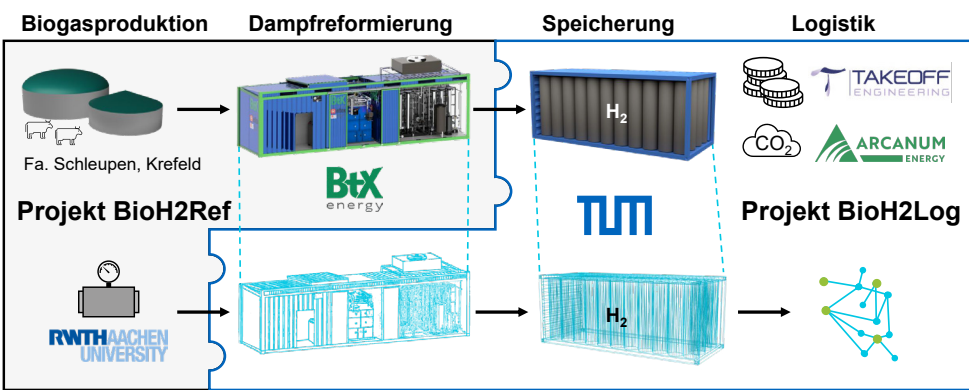
Die dezentrale Struktur der rund 9.900 Biogasanlagen (Stand 2022) [12] in Deutschland könnte vorteilhaft genutzt werden, um regionale Wasserstoffhubs aufzubauen und das Wasserstoffkernnetz [13] zu ergänzen. Hierfür werden im Projekt BioH2Log Logistikkonzepte entwickelt, welche nicht nur auf die Verteilung von grünem Wasserstoff aus Biogas anwendbar, sondern auch auf Elektrolysewasserstoff übertragbar sind. Dadurch wird sichergestellt, dass auch Abnehmer mit kleinen Abnahmevolumina abseits des Wasserstoffkernnetzes mit grünem Wasserstoff versorgt werden können und somit ein frühzeitiger Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ermöglicht werden kann.

Die Herstellung von grünem Wasserstoff aus Biogas stellt eine zusätzliche Option für einen rentablen Weiterbetrieb von Biogasanlagen dar. Im Jahr 2023 wurden rund 6 % des innerdeutschen Stromverbrauchs durch

Biogas gedeckt [7]. Um dieses Potential von Biogas für das Erreichen nationaler Klimaziele trotz auslaufender Förderungen aus dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) aufrechtzuerhalten und zu erweitern, müssen Pläne für einen wirtschaftlichen Weiterbetrieb von Biogasanlagen erarbeitet werden [8–11]. Studien zeigen, dass ein sinnvoller Weiterbetrieb im Strommarkt möglich ist, wenn bspw. das Substrat gewechselt oder die Stromproduktion flexibel gestaltet wird [8–11]. Allerdings ist auch ein Wechsel des Produkts auf Biomethan oder, wie im Projekt BioH2Log gezeigt, auf grünen Wasserstoff denkbar.

Projektübersicht & Projektziele

Biogas ist ein Gemisch aus Methan und Kohlenstoffdioxid. Es wird durch die anaerobe Vergärung von Biomasse in einer Biogasanlage erzeugt und kann nachfolgend direkt in einer Dampfreformierungsanlage zu Wasserstoff umgesetzt werden. Der produzierte Wasserstoff wird unter Druck in sogenannten Multiple Element Gas Container (MEGC) gespeichert. Die aus mehreren Typ IV Gasbehältern bestehende Wasserstoffcontainer sind für unterschiedliche Nominaldrücke und Kapazitäten verfügbar. Schlussendlich kann der produzierte Wasserstoff mit diesen Speichersystemen zum Abnehmer transportiert werden. Das Verbundvorhaben BioH2Log (FKZ 03EI5452), initiiert von der Firma TakeOff Engineering, untersucht seit Projektstart im Januar 2022 zusammen mit dem Projekt BioH2Ref (FKZ 03EI5440) die gesamte Wertschöpfungskette der grünen Wasserstoffproduktion aus Biogas (Abb. 1).



Der erste Teil der Prozesskette wurde im Projekt BioH2Ref untersucht. Eine Biogasanlage der Familie Schleupen stellte Biogas für die Dampfreformierungsanlage von BtX energy bereit. Mithilfe der Dampfreformierungsanlage konnte Wasserstoff in der Qualitätsstufe 5.0 produziert werden [14]. Als akademischer Partner des Konsortiums BioH2Ref hat die RWTH Aachen zusätzliches Messequipment für die Erprobung der Dampfreformierungsanlage bereitgestellt und die durchgeführten Messkampagnen begleitet. Nach erfolgreichem Projektabschluss des Projekts BioH2Ref im Dezember 2024 steht die Technologie der Dampfreformierung von Biogas nun bereit für den Marktstart.

Abbildung 1: Zusammenarbeit der Projekte BioH2Ref und BioH2Log

Der zweite Teil der Prozesskette, untersucht im Projekt BioH2Log, schließt nahtlos an den Arbeiten des Projekts BioH2Ref an. Der Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik der Technischen Universität München führt experimentelle Untersuchungen an einem Wasserstoffspeichercontainer durch. Hierfür wurde ein MEGC mit Temperatur, Druck- und Durchflusssmesstechnik ausgerüstet und es werden unterschiedliche Befüll- und Entnahmevorgänge experimentell erfasst. Mithilfe der erhobenen Messdaten der Dampfreformierungsanlage und des Wasserstoffspeichercontainers werden dynamische Modelle der jeweiligen Prozesseinheiten entwickelt und validiert. Zusätzlich wird am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München ein digitaler Zwilling der Wasserstofflogistik entwickelt. Dieser digitale Zwilling wird verwendet, um die Verteilung des dezentral produzierten Wasserstoffs an in der Region verteilte Abnehmer zu simulieren und zu optimieren. Der Projektkoordinator Take-Off Engineering ermittelt die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette. Durch eine Optimierung der Verteillogistik soll die Entwicklung von lukrativen Geschäftsmodellen möglich sein und grüner Wasserstoff kostengünstig zur Verfügung gestellt werden können. TakeOff Engineering führt zudem mit ARCANUM Energy Systems umfangreiche Markanalysen durch. ARCANUM Energy Systems führt die ökologische Bewertung der Prozesskette durch und berechnet das resultierende Treibhausgasminderungspotential.

Zusammen mit den Projektergebnissen aus BioH2Ref werden mit Abschluss des Projekts BioH2Log dynamische Modelle für die Wasserstofferzeugung aus Biogas, die Wasserstoffspeicherung und die Verteillogistik zur Verfügung stehen. In Verbindung mit den durchgeführten ökonomischen und ökologischen Studien soll ein reibungsloser Transfer der Biowasserstofftechnologie aus der Forschung in die Wirtschaft ermöglicht werden.

Dynamische Simulation der BioH2Ref Pilotanlage

Prozesssimulationen werden in der chemischen Industrie in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus einer Anlage eingesetzt (Abb. 2). In der Konzeptionsphase (engl. Conceptual Design) entsteht zunächst die Idee einer chemischen Anlage. Mit Hilfe von stationären Simulationen wird ein Verfahrenskonzept entwickelt sowie Massen- und Energiebilanzen berechnet. Außerdem werden die Machbarkeit und verschiedene Prozessvarianten untersucht. Im weiteren Verlauf des sogenannten Basic Engineerings wird der Prozess optimiert und auf Basis der stationären Simulation werden die erforderlichen Apparate und Ausrüstungsteile ausgelegt. Schließlich wird die Schätzung der Investitions- und Betriebskosten in der Regel anhand der stationären Prozesssimulation berechnet.

Am Ende des Basic Engineering unterstützen dynamische Simulationen Sicherheitsstudien (engl. Hazard and Operability Studies – HAZOP). Im Detailed Engineering kann ein vorläufiges Tuning der Regler in der dynamischen Simulation erprobt werden. Auch An- und Abfahrvorgänge werden simuliert. Für die Inbetriebnahme und den Betrieb der Anlage werden

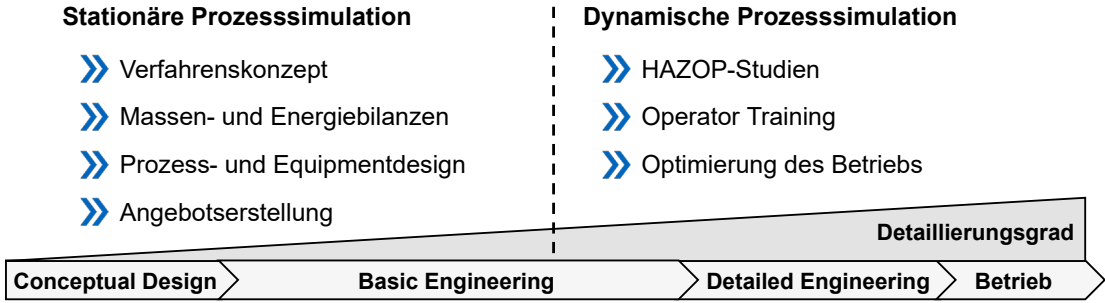


Abbildung 2: Einsatz von Prozesssimulationen im Lebenszyklus einer chemischen Anlage

Anlagenbetreiber mit sogenannten Operator Training Systems, welche auf Grundlage von umfangreichen dynamischen Simulationen entwickelt werden, trainiert. Während des Betriebs der chemischen Anlage können die dynamischen Simulationen durch Betriebsdaten verbessert, validiert und zur Optimierung genutzt werden. Ausgehend von einer einfachen stationären Simulation in der Konzeptionsphase nimmt der Detaillierungsgrad dieser Prozesssimulationen stetig zu, wobei die dynamische Simulation versucht, das tatsächliche Anlagenverhalten möglichst präzise vorherzusagen.

Im Projekt BioH2Log entwickelt der Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik der Technischen Universität München eine dynamische Simulation für die sich im Betrieb befindliche BioH2Ref Pilotanlage, deren Fließbild in Abb. 3 gezeigt ist. Biogas wird zunächst verdichtet, vorgewärmt und nachfolgend einer Entschwefelung durchgeführt. Diese Entschwefelung ist notwendig, um Schwefelkomponenten aus dem Biogas zu entfernen, die als Katalysatorgift für die nachfolgend eingesetzten Katalysatoren wirken. Das entschwefelte Biogas wird daraufhin zusammen mit aufgereinigtem Wasser dem Dampfreformer zugeführt. In diesem Reaktor laufen die Dampfreformierungsreaktion nach Gl. (1) und die Wassergas-Shift-Reaktion nach Gl. (2) parallel auf einem in Rohre gefüllten Nickelkatalysator ab [15].



In Summe überwiegt der endotherme Charakter der Dampfreformierungsreaktion, ersichtlich an der hohen, positiven molaren Standardreaktionsenthalpie $\Delta \bar{H}_R^0$. Aus diesem Grund muss Wärme für die in den Reformierrohren ablaufenden Reaktionen bereitgestellt werden. Hierzu wird ein Teilstrom des Biogases innerhalb der Reformierbox verbrannt.

In dem nachfolgenden Hochtemperatur-Shiftreaktor (HT-Shift) mit Eisen-Chrom-Katalysatoren [15,16] läuft lediglich die gleichgewichtslimitierte Wassergas-Shift-Reaktion aus Gl. (2) ab. Hierdurch kann die Wasserstoffausbeute weiter erhöht werden. Die freiwerdende Reaktionswärme durch die exotherme Wassergas-Shift-Reaktion wird genutzt, um den Biogasfeed für die Entschwefelung vorzuwärmen [17]. Ein nachfolgender Mitteltemperatur-Shiftreaktor (MT-Shift) mit Kupfer-Zink-Aluminium-Katalysatoren [15,16] wird eingesetzt, um die Wasserstoffausbeute nochmals zu verbessern.

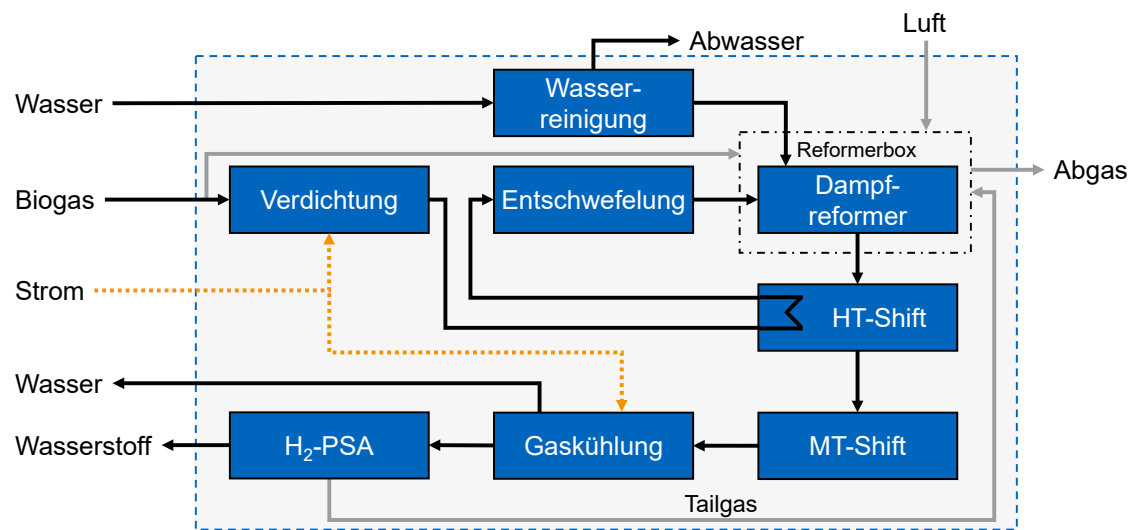


Abbildung 3: **Prozessflussbild der BioH2Ref Pilotanlage in Krefeld.**
HT-Shift: Hochtemperatur-Shift,
MT-Shift: Mitteltemperatur-Shift,
PSA: Druckwechseladsorption

Nach der MT-Shift wird das nasse Gas abgekühlt und Wasser auskondensiert. Eine nachgeschaltete Druckwechseladsorption (engl. Pressure Swing Adsorption – PSA) stellt Wasserstoff 5.0 bereit. Das resultierende Abgas der PSA, genannt Tailgas, wird in der Reformerbox zusammen mit Biogas verbrannt.

Mithilfe der im Rahmen von BioH2Ref erhobenen Messdaten wird die dynamische Simulation der Pilotanlage angepasst und validiert. Hierfür wurden in Messkampagnen an der Pilotanlage einzelne Parameter, wie das Dampf- Kohlenstoff-Verhältnis, der Reformerdruck, die Reformertemperatur und die Anlagenlast, ausgehend von einem Basisbetriebszustand variiert. Sowohl die stationären Anlagenzustände als auch die dynamischen Betriebsdaten bei der Durchführung einer Parameteränderung wurden aufgezeichnet und werden für die Validierung der dynamischen Simulation verwendet.

Ziel dieser dynamischen Simulation ist es, den Anlagenbetrieb der BioH2Ref Pilotanlage korrekt abzubilden und zu verbessern. Beispielsweise kann mit Parameterstudien eine verbesserte Kombination an Prozessparametern für unterschiedliche Lastpunkte mithilfe der dynamischen Simulation ermittelt werden. Diese Kombination an Prozessparametern kann im Anschluss in der Realität an der Pilotanlage erprobt werden. Zudem können Betriebsstrategien mit Hilfe der dynamischen Simulation optimiert werden.

Zusammenfassung & Ausblick

Neben der Entwicklung eines dynamischen Modells der BioH2Ref Pilotanlage für die Produktion von Wasserstoff aus Biogas wird parallel ein dynamisches Modell eines Wasserstoffspeichercontainers erarbeitet. Dieses wird ebenfalls mit Messdaten eines aktuell im Betrieb eines Gaslieferanten befindlichen Wasserstoffspeichercontainers validiert. Das Modell des Wasserstoffspeichercontainers ist unabhängig von der Art der Wasserstofferzeugung und kann somit beispielsweise für die Berechnung der Speicherung von blauem Wasserstoff oder grünem Wasserstoff aus Elektrolyse eingesetzt werden. In Verbindung mit den Projektergebnissen aus dem Projekt BioH2Ref, dem

digitalen Zwilling der Logistik entwickelt durch den Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, sowie den ökonomischen und ökologischen Betrachtungen der Industriepartner TakeOff Engineering und ARCANUM Energy Systems, stehen zum Projektabschluss von BioH2Log Simulationswerkzeuge bereit, um einen zeitnahen Hochlauf einer grünen Wasserstoffwirtschaft zu beschleunigen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung der Verbundprojekte BioH2Ref (03EI5440) und BioH2Log (03EI5452) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) und die Projektbetreuung durch den Projektträger Jülich (PtJ).

Verwendete Symbole	
$\Delta \bar{H}_R^0$	Molare
[J mol ⁻¹]	Standardreaktionsenthalpie
Abkürzungen	
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
HAZOP	Sicherheitsstudie, Hazard and Operability Study
HT-Shift	Hochtemperatur-Shift
MEGC	Multiple Element Gas Container
MT-Shift	Mitteltemperatur-Shift
PSA	Druckwechseladsorption, Pressure Swing Adsorption
TRL	Technology Readiness Level

Literatur

- [1] BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. BMWi, Berlin.
- [2] Wietschel M, Zheng L, Arens M, Hebling C, Ranzmeyer O, Schaadt A, Hank C, Sternberg A, Herkel S, Kost C et al. (2021): Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Fraunhofer IEG/ISE/ISI, Karlsruhe, Freiburg, Cottbus.
- [3] BMWi (2022): Fortschrittsbericht Zur Umsetzung Der Nationalen Wasserstoffstrategie. BMWi, Berlin.
- [4] IEA (2019): The Future of Hydrogen – Seizing Today’s Opportunities. IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (Stand 15.05.25)
- [5] IEA (2024): Global Hydrogen Review 2024. IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024> (Stand 15.05.2025)
- [6] Gradel A, Pauletto G, Mach U, Birth-Reichert T, Hanke J (2023): Wasserstoff aus biogenen Reststoffen – Der dezentrale Turbo für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft. In: gwf Gas + Energie 164, pp. 54–59.
- [7] DESTATIS (2024): Stromerzeugung 2023: 56 % aus Erneuerbaren Energieträgern - Pressemitteilung Nr. 087. DESTATIS. URL: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_087_43312.html#:~:text=Mit%20einem%20Anteil%20von%2056,2023%20um%206%2C7%20%25.\(Stand 15.05.2025\)](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_087_43312.html#:~:text=Mit%20einem%20Anteil%20von%2056,2023%20um%206%2C7%20%25.(Stand%2015.05.2025))
- [8] Daniel-Gromke J, Rensberg N, Denysenko V, Barchmann T, Oehmichen K, Beil M, Beyrich W, Krautkremer B, Trommler M, Vollprecht J et al. (2020): Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [9] Matschoss P, Wern B, Baur F (2024): Die Bioenergie in der Energiewende und die „Post-EEG-Frage“ – Eine Synopse von Post-EEG-Studien. IZES, Saarbrücken.
- [10] Paterson M, Dotzauer M, Matschoss P, Rensberg N, Wern B (2024): Auswertung von Post-EEG-Projekten – Schlussfolgerungen für die Biogas-Praxis. KTBL, Darmstadt.
- [11] Grösch N, Baldauf T, Trox C, Saidi A, Zörner W, Grüner V, Häner J, Mehnert S, Baumkötter D, Brüggig E et al. (2024): Biogas Nach Dem EEG - (Wie kann’s weitergehen? – Handlungsmöglichkeiten für Anlagenbetreibende. Technische Hochschule Ingolstadt, FH Münster, C.A.R.M.E.N. e.V., ifeu Heidelberg.
- [12] Fachverband Biogas Branchenzahlen (2023): 2022 und Prognose der Branchenentwicklung 2023. Fachverband Biogas. URL: https://www.biogas.org/fileadmin/redaktion/dokumente/presse/branchenzahlen/23-09-25_Biogas_Branchenzahlen-2022_Prognose-2023.pdf (Stand 15.05.2025).
- [13] FNB Gas (2024): Kernnetzgenehmigung: Grünes Licht für Europas größtes Wasserstoffnetz. FNB Gas, Berlin. URL: [https://fnb-gas.de/news/kernnetzgenehmigung-gruenes-licht-fuer-europas-groesstes-wasser-stoffnetz/#:~:text=Ein%20Meilenstein%20f%C3%BCr%20die%20Energiewende,des%20klimaneutralen%20Energiesystems%20der%20Zukunft.\(Stand 15.05.2025\).](https://fnb-gas.de/news/kernnetzgenehmigung-gruenes-licht-fuer-europas-groesstes-wasser-stoffnetz/#:~:text=Ein%20Meilenstein%20f%C3%BCr%20die%20Energiewende,des%20klimaneutralen%20Energiesystems%20der%20Zukunft.(Stand%2015.05.2025).)
- [14] Jenke S (2024): Technologischer Durchbruch: Wasserstoff aus Gülle und Mist erreicht 99,999% Reinheit. H₂ News. URL: [https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/technologischer-durchbruch-wasserstoff-aus-guelle-und-mist-erreicht-99999-reinheit/#:~:text=Herstellungsverfahren-,Technologischer%20Durchbruch%3A%20Wasserstoff%20aus%20G%C3%BClle%20und%20Mist%20erreicht%2099%2C999%25%20Reinheit,\(5.0\)%20aus%20landwirtschaftlichen%20Reststoffen.\(Stand 15.05.2025\).](https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/technologischer-durchbruch-wasserstoff-aus-guelle-und-mist-erreicht-99999-reinheit/#:~:text=Herstellungsverfahren-,Technologischer%20Durchbruch%3A%20Wasserstoff%20aus%20G%C3%BClle%20und%20Mist%20erreicht%2099%2C999%25%20Reinheit,(5.0)%20aus%20landwirtschaftlichen%20Reststoffen.(Stand%2015.05.2025).)
- [15] Aasberg-Petersen K, Dybkjær I, Ovesen C V, Schjødt N C, Sehested J, Thomsen S G (2011): Natural Gas to Synthesis Gas – Catalysts and Catalytic Processes. In: J. Nat. Gas Sci. Eng. 3, pp. 423–459. doi:10.1016/j.jngse.2011.03.004.
- [16] Smith R J B, Loganathan M, Shantha M.S. (2010): A Review of the Water Gas Shift Reaction Kinetics. In: Int. J. Chem. React. Eng. 8 (1). doi:10.2202/1542-6580.2238.
- [17] Hirtreiter E, Gradel A, Schmid H-P, Wünnig C, Rehfeldt S, Klein H (2025): Hydrogen from Biogas: Dynamic Modeling of an Integrated Shift Reactor. In: Chem. Ing. Tech. doi: 10.1002/cite.12007.

Christopher Wüning, Leon Müller-Noell, Dr.-Ing. Andy Gradel,
Johannes Hüls, Christian Wuppermann



BioH2Ref – Grüner Wasserstoff aus Biogas

Ziel des Projektes

BioH2Ref | FKZ 03EI5440

Dezentrale Wasserstoffaufbereitung von
Biogas durch Dampfreformierung

Keywords

Biowasserstoff, Bioenergie, Biogas,
Wasserstoff, Dampfreformierung

Das Projekt BioH2Ref hatte zum Ziel, eine Pilotanlage zur Herstellung von grünem Wasserstoff aus Biogas zu entwickeln und zu betreiben. Der Fokus liegt auf der direkten Dampfreformierung von Biogas, um eine dezentrale und effiziente Wasserstoffproduktion zu ermöglichen. Das Projekt strebte die technologische Reife dieses Prozesses an und sollte die Realisierung einer Wasserstoffinfrastruktur mit regionaler Wertschöpfung vorantreiben. Das Projekt ist zudem seit 12/24 abgeschlossen und hat seine Ziele wie geplant erreicht.

Rahmenbedingungen

Die Energiewende in Deutschland erfordert eine deutliche Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch, um fossile Energieträger zu ersetzen und Klimaziele einzuhalten. Aktuell liegt der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch bei 20 %, während im Stromsektor bereits 54,4 % erreicht wurden [1].

Dieser erneuerbare Strom bietet die Grundlage für die nachhaltige Produktion von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse. Grüner Wasserstoff gilt als zentraler zukünftiger Energieträger für die Sektorenkopplung in Industrie, Verkehr und Wärmeversorgung.

Neben der Elektrolyse gibt es weitere Methoden zur nachhaltigen Wasserstoffherzeugung, insbesondere der Dampfreformierung von Biogas. Wasserstoff aus Biogas bietet Vorteile durch die teilweise Speichermöglichkeit von Biogas und Substrat sowie seine Unabhängigkeit von Tageszeit und Wetter. Das Biomassepotential aus Abfall und Reststoffen wird jedoch bislang energetisch nur unvollständig genutzt [4].

In Deutschland waren im Jahr 2024 rund 9.900 Biogasanlagen [3] in Betrieb, die überwiegend Strom aus Biogas mittels Blockheizkraftwerken (BHKW) erzeugen. Die EEG-Förderung für diese Anlagen begann im Jahr 2001 und läuft aktuell für viele Betreiber aus, da die 20-jährige Förderperiode endet. Dies stellt sie vor wirtschaftliche Herausforderungen, da die Strommarktpreise häufig nicht kostendeckend sind. Eine vielversprechende Alternative bzw. Folgeoption ist die Umstellung auf die Dampfreformierung von Biogas zur Wasserstoffproduktion.

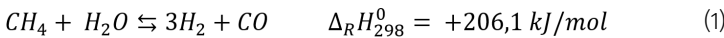
Im Rahmen des Projekts „Dezentrale Wasserstoffaufbereitung von Biogas durch Dampfreformierung“ (BioH2Ref) wurde eine Pilotanlage entwickelt, die bei Volllast 100 kg H₂/Tag produziert. Ziel war es, diese Technologie zur Marktreife zu führen. Durch den Einsatz von Rohbiogas aus Reststoffen wie

Gülle und Mist anstelle fossiler Brennstoffe werden Treibhausgasemissionen signifikant gesenkt.

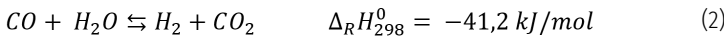
Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projekts zeigen die Herausforderungen und Erfolge während der Projektlaufzeit. Durch innovative Verfahren der Wasserstoffherstellung aus Biogas können nicht nur ökologische Vorteile erzielt werden, sondern auch wirtschaftliche Perspektiven und eine Folgeleistung für Betreiber von Biogasanlagen geschaffen werden. Die Erkenntnisse aus dem Projekt eröffnen neue Möglichkeiten für eine dezentrale Treibstoffversorgung und tragen somit entscheidend zur Erreichung der nationalen Klimaziele bei.

Dampfreformierung

Die Dampfreformierung von Biogas ist ein chemischer Prozess, bei dem Methan (CH₄) und Wasser (H₂O) in Gegenwart eines Katalysators zu Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO) umgewandelt werden. Diese Reaktion ist stark endotherm und erfordert hohe Temperaturen, typischerweise im Bereich von 700 bis 1000 °C. Der grundlegende Reaktionsmechanismus lässt sich durch die folgende Gleichung beschreiben:

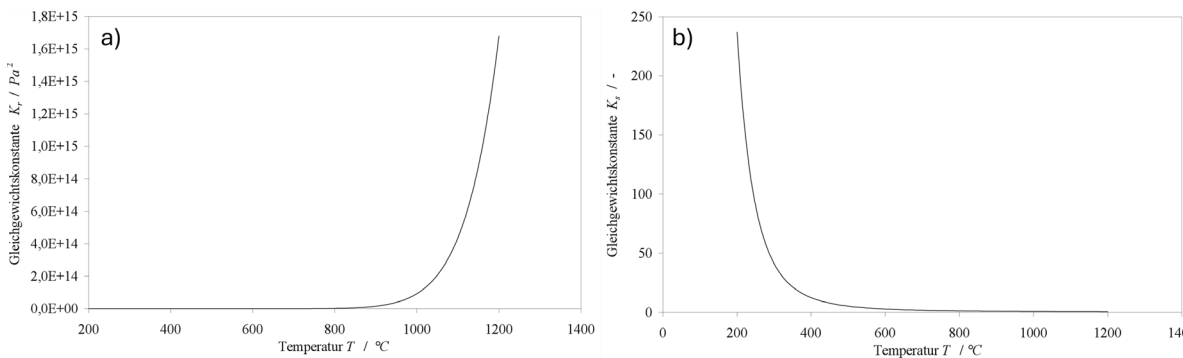


Zusätzlich zur Dampfreformierungsreaktion findet anschließend die Wassergas-Shift-Reaktion statt, die das Kohlenmonoxid weiter in Wasserstoff und Kohlendioxid umwandelt:



In Abbildung 1 sind die Gleichgewichtskonstanten der Methan-Dampfreformierung und der Wassergas-Shift-Reaktion dargestellt. Während die Reformierung mit steigender Temperatur stärker abläuft (endotherm), nimmt die Gleichgewichtskonstante der exothermen Shift-Reaktion bei höheren Temperaturen ab.

Abbildung 1: Gleichgewichtskonstante K_f in Abhängigkeit der Temperatur T bei der (a) Dampfreformierung von Methan und der (b) Wassergas-Shift-Reaktion [6]



Der Dampfreformierungsprozesses wird neben der Temperatur von verschiedenen Prozessparametern wie Wasserzugabe, Anlagendruck und Last beeinflusst. Aus der Wasserzugabe ergibt sich das Verhältnis von Wasserdampf zu Kohlenstoff (Steam-to-Carbon-Verhältnis):

$$(S/C)_{ratio} = \frac{n_{H_2O}}{n_C} \quad (3)$$

Institutionen & Kontakt

Christopher Wüning^{1*}, Leon Müller-Noell²,
Dr.-Ing. Andy Gradel², Johannes Hüls¹,
Christian Wuppermann¹

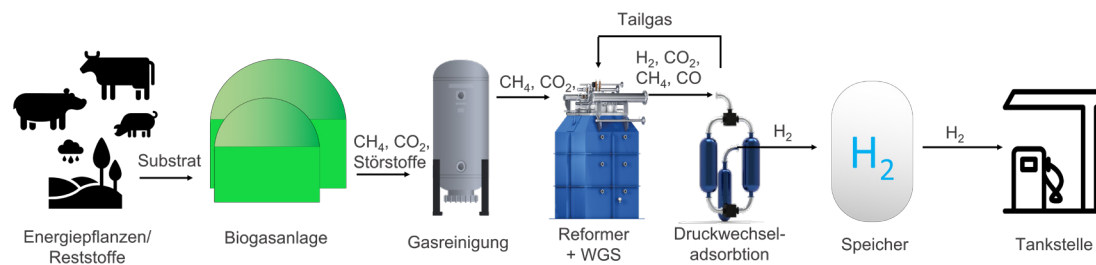
¹ RWTH Aachen, Lehrstuhl für Nachhaltige Thermoprozesstechnik und Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, Kopernikusstraße 10, 52074 Aachen.

² BtX energy GmbH, Esbachgraben 1, 95463 Bindlach.

* E-Mail korrespondierende Wissenschaftende: wuenning@iob.rwth-aachen.de

Durch gezielte Einstellung dieser Parameter lässt sich die Wasserstoffausbeute maximieren und die Anlageneffizienz verbessern. Ein hoher Methan-gehalt im Biogas steigert die Prozesseffizienz, da weniger inertes CO₂ als Edukt mitgeführt wird und dadurch die Wasserstoffausbeute pro Normkubikmeter Biogas zunimmt.

Abbildung 2: Schematischer Ablauf der Wasserstoffherzeugung aus Biogas



Nach Gasreinigung im Aktivkohlefilter wird das verdichtete Biogas in einem thermochemischen Prozess im Reformersmodul zu Synthesegas umgesetzt. Auf die Erhöhung des Wasserstoffgehalts in zwei Wassergas-Shift-Stufen folgt die Gaskühlung und -Auftrennung mittels Druckwechseladsorption. Die Rückgewinnungsrate der PSA bezeichnet den Anteil des Zielgases, also Wasserstoff, der nach dem Trennprozess gewonnen wird im Verhältnis zu der Menge des abgeschiedenen Wasserstoffs und wird durch folgende Formel berechnet:

$$R_{PSA}(\%) = \frac{Prod_{kgH_2}}{Prod_{kgH_2} + Tailgas_{kgH_2}} \quad (4)$$

Während das abgeschiedene Restgas (»Tailgas«) zur Effizienzsteigerung in der Reformerbrennkammer umgesetzt wird, kann der abgeschiedene hochreine Wasserstoff zur weiteren Verwendung verdichtet und gespeichert werden.

THG-Quote und -Bilanz des produzierten Wasserstoffs

Die Treibhausgas-minderungsquote (THG-Quote) ist ein zentrales klimapolitisches Instrument zur Förderung erneuerbarer Energieträger im Verkehrssektor. Sie wurde im Rahmen der Umsetzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 (RED II) [5] in das Bundes-Immissionsschutzgesetz (37. BImSchV) [2] aufgenommen und verpflichtet die Inverkehrbringer von Kraftstoffen, die THG-Emissionen ihrer Produkte schrittweise zu reduzieren. Zur Bewertung des Minderungspotenzials verschiedener Kraftstoffe dient ein fossiler Referenzwert von 94 g CO₂/MJ gemäß RED II [4].

Bei Biogasanlagen sind die THG-Emissionen maßgeblich abhängig vom eingesetzten Substratmix sowie von der technischen Ausgestaltung der Anlage. Für Biomethan oder Wasserstoff im Verkehr werden entsprechende Vergleichswerte in der Richtlinie definiert.

Die THG-Quote wurde als Anreizsystem zur Markteinführung erneuerbarer Kraftstoffe konzipiert. Aktuelle Betrugsfälle, insbesondere im Zusammenhang mit gefälschten Zertifikaten und fragwürdigen Upstream Emission Reductions (UER), haben zu einem starken Preisverfall der THG-Zertifikate und einem erheblichen Vertrauensverlust in das System geführt. Dadurch ist der ursprüngliche Anreiz zur Emissionsreduktion deutlich geschwächt, was die Marktdurchdringung nachhaltiger Kraftstoffe erschwert und die Effektivität der THG-Quote insgesamt mindert.

Diese Entwicklung erschwert die wirtschaftliche Verwertung innovativer, emissionsarmer Energieträger wie biogenem Wasserstoff erheblich. Zur Wiederherstellung des Vertrauens in die THG-Quote und zur Stärkung des Anreizes für erneuerbare Kraftstoffe werden Zertifikatskontrollen verschärft, Transparenz erhöht und gesetzliche Rahmenbedingungen angepasst.

Für den im Projekt BioH2Ref produzierten Wasserstoff ist eine funktionierende und verlässliche THG-Quote daher essenziell, um eine angemessene Vergütung über die Anrechnung im Verkehrssektor zu ermöglichen und einen nachhaltigen Beitrag zur Treibhausgasreduktion zu leisten. Die Pilotanlage war die erste in Deutschland, die erfolgreich die REDcert-Zertifizierung für die Produktion von grünem Wasserstoff aus biogenen Reststoffen erhielt. Damit ist die Anlage offiziell für den Treibhausgashandel zugelassen und ermöglicht in der deutschen Gesetzgebung eine doppelte Anrechnung der eingesparten CO₂-Emissionen gemäß den Vorgaben der THG-Quote. Durch REDcert wurde eine Einsparung der THG-Emissionen von 15,4 kgCO₂eq/kg H₂ zertifiziert. Dieser Wert könnte zukünftig, durch die Einrechnung von selbst erzeugtem Strom aus dem Biogas aus Gülle und Mist im BHKW, noch weiter auf -22 kgCO₂eq/kgH₂ sinken. Der produzierte Wasserstoff ist somit bilanziell eine CO₂-Senke.

Aktivitäten und Maßnahmen

Im Rahmen des BioH2Ref-Projekts wurde eine Pilotanlage zur Wasserstoffproduktion aus Biogas auf einem Landwirtschaftsbetrieb in Krefeld mit Biogasanlage installiert und in Betrieb genommen. Die Versuchsdurchführung umfasste mehrere Phasen: Zunächst wurden Kurzzeitversuche durchgeführt, um die grundlegenden Prozessparameter zu validieren. Anschließend folgten Langzeitversuche unter Volllast, wobei stichprobenartig die Wasserstoffqualität analysiert wurde. Wichtige Betriebsparameter wie Druck, Reformertemperatur und das Wasserdampf-Methan-Verhältnis wurden systematisch variiert, um deren Einfluss auf die Effizienz der Wasserstoffproduktion zu untersuchen. Abbildung 3 zeigt das schematische Fließbild von Biogasanlage über Reformeranlage bis Wasserstoff-tankstelle mit allen Messstellen und Stoffströmen.

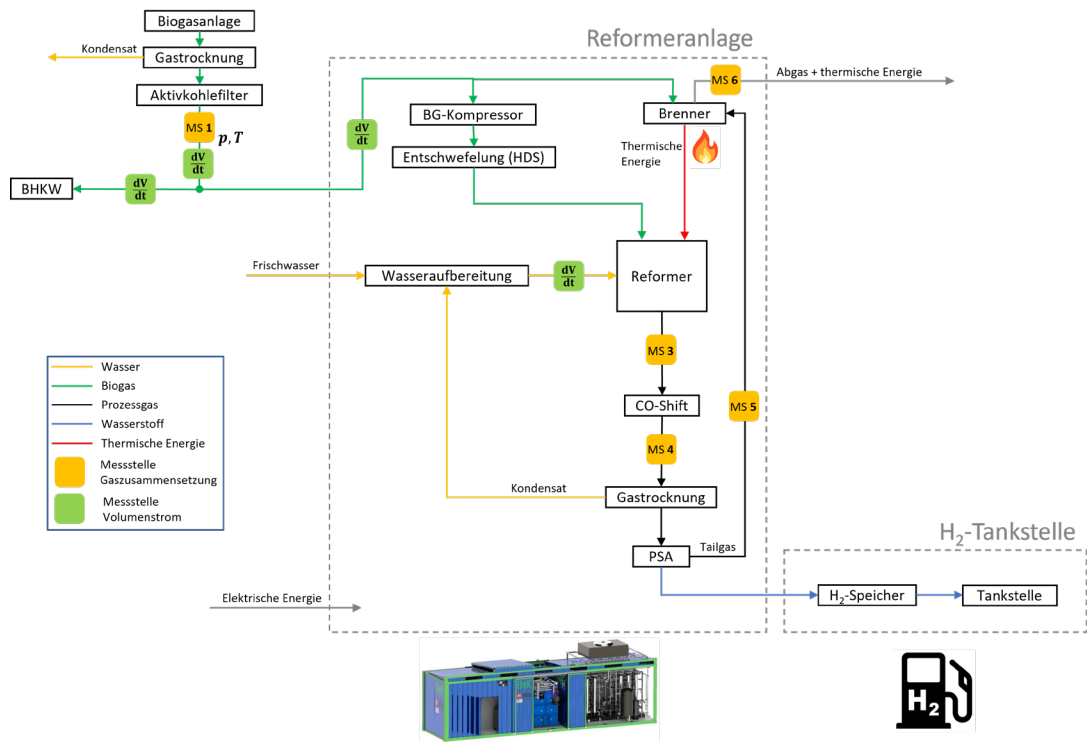


Abbildung 3: Schematisches Fließbild von Biogasanlage zu Wasserstofftankstelle

Abbildung 4: Analysenzertifikat der Wasserstoff-Beprobung

Im Rahmen des Projekts wurden Wasserstoffbeprobungen durchgeführt, um die Qualität des erzeugten Wasserstoffs zu ermitteln und die Einhaltung der relevanten Standards zu überprüfen. Diese Analysen bestätigten, dass der produzierte Wasserstoff die Anforderungen an Reinheit und Qualität gemäß der DIN EN 17124 für (PEM)-brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge erfüllt und zusätzlich eine Reinheitsklasse von 5.0 (99,999%) erreicht wurde:

Analysenzertifikat		RWTH-DE-03		18.03.2025
Angebot / Projekt-Nr. ZSW:		ANG-108203 / P-107962		
Bestellung Kunde:		Nr. 4700033109-173		
Behälter-ID (Fülldruck):		MT1714-13 / MT1719-48 / NG810 / NG877 / D220000 (10 bar)		
Probenbeschreibung / Ursprung:		H2 / PN Kunde		
Datum Probenahme:		04.12.2024		
Datum Probeneingang:		09.12.2024		
Analysenzeitraum:		10.12.2024-18.03.2025		
Bearbeiter ZSW (Kürzel):		KP, KF, BF, EW		
Bestandteile	Messmethode	Grenzwert EN 17124:2022 in µmol/mol	Messwert ± Messunsicherheit* in µmol/mol	
H ₂ O	Taupunktspiegel	5	1,8 ± 0,2	
Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	GC-FID	2	< 0,2	
CH ₄	GC-PDHID	100	< 0,1	
O ₂	GC-PDHID	5	< 0,5	
He	GC-TCD	300	< 4	
Ar	GC-PDHID	300	0,77 ± 0,14	
N ₂	GC-PDHID	300	< 1	
CO ₂	GC-PDHID	2	0,71 ± 0,10	
CO	OFCEAS	0,2	< 0,01	
Gesamt-Schwefelverbindungen	TD-GC-FPD	0,004	< 0,001	
HCHO	OFCEAS	0,2	0,032 ± 0,01	
HCOOH	OFCEAS	0,2	< 0,01	
NH ₃	OFCEAS	0,1	< 0,01	
Gesamt-Halogenverbindungen	GC-ECD	0,05	< 0,02	
Summe CO/HCHO/HCOOH	berechnet	0,2	≤ 0,052	
Summe der Verunreinigungen	Σ (quantifiziert)	300	≤ 9,17	
Wasserstoff-Index	100 - Σ (quantifiziert)	99,970%	≥ 99,999%	

* Unsicherheiten von Prüfgasen, Messgerät und Messreihe sind mit einem Erweiterungsfaktor von k=2 berücksichtigt.

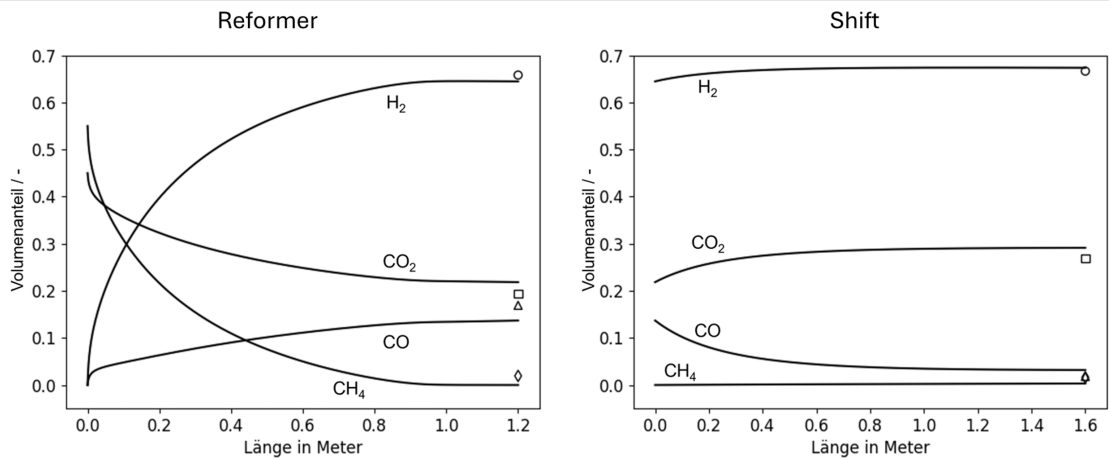
Alle Ergebnisse liegen innerhalb der Spezifikation.

Im Projektverlauf wurde der Shiftreaktor mit einer Begleitheizung verbessert, um ein schnelleres Anfahren der Reformeranlage zu ermöglichen. Zudem wurde eine zweite Shift-Einheit integriert, um den CO-Gehalt im

Prozessgas bei hohem Biogasvolumenstrom auf unter 2 Vol.-% zu senken, sodass die Anforderungen der Druckwechseladsorptionsanlage eingehalten werden. Dadurch ist es möglich ein niedrigeres S/C-Verhältnis einzustellen, wodurch der Wirkungsgrad verbessert wird. Die zur Dampfreformierung benötigte Prozesswärme wird durch einen biogasbetriebenen FLOX®-Brenner bereitgestellt. Zur Bewertung der Emissionsqualität wurden stichprobenartig Abgasmessungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass im FLOX®-Betrieb [8] signifikant geringere NOx-Emissionen entstehen (14 ppm) als im konventionellen Flammenbetrieb (48 ppm). Gleichzeitig konnten keine unverbrannten Kohlenwasserstoffe nachgewiesen werden, was auf eine vollständige Verbrennung hinweist. Zudem wurde das Biogas hinsichtlich seines Potenzials für CO₂-Abscheidung und -Nutzung analysiert. Unter Annahme einer CO₂-Abscheideeffizienz von 80 % ergibt sich ein mögliches CO₂-Senkenpotenzial von etwa 250 t/Jahr, wodurch sich Optionen wie Düngung in Gewächshäusern und weitere CCU/CCS-Anwendungen erschließen.

Die Versuche führten zum Nachweis der Funktionalität des Gesamtprozesses mit einer Effizienz von über 60 % Kaltgaswirkungsgrad von Biogas zu Wasserstoff. Zudem stimmen die Ergebnisse aus den Versuchen mit einer Genauigkeit von 95 % gegenüber den zuvor zur Validierung erstellten Modellen überein, wie in den folgenden Grafiken beispielhaft für einen Parametersatz dargestellt wird. In Abbildung 5 sind die Modellprognosen sowie die gemessenen Werte der trockenen Gaszusammensetzung in Reformer und Shift gegeben. Die Modellierungsergebnisse weisen nur geringe Abweichungen von den Messwerten auf, was die hohe Genauigkeit und Validität der verwendeten Modellansätze unterstreicht. Der in der Abbildung gezeigte Betriebspunkt lässt mit 78 % Last eine Produktionsmenge von 3,59 kgH₂/h erwarten. Das eingesetzte Biogas weist einen Methangehalt von 55 Vol.-% CH₄ und 45 Vol.-% CO₂ auf.

Abbildung 5: Modellberechnungen der Gaszusammensetzung Reformat und Shiftgas



Der Einfluss verschiedener Versuchsparameter auf die Systemleistung wurde anhand der Messdaten aus den Langzeitversuchen (siehe Tabelle 1) mittels einer Pearson-Korrelationsanalyse quantifiziert [7]. Der Pearson-Korrelationskoeffizient r liegt im Intervall $r \in [-1,1]$, wobei ein Betrag von $|r|=1$ eine perfekte lineare Korrelation und $r=0$ keine lineare Beziehung zwischen den betrachteten Variablen anzeigt.

Tabelle 1: Basisfall- und Einzelparametervariationen im Versuchsbetrieb

	Druck [bar]	Reformer-temperatur [°C]	S/C [-]	Last [Nm³/h] (%)
Basisfall	10	750	3,25	25 (78 %)
Minimum	9	750	2,5	12,8 (40 %)
Maximum	11	850	3,5	32 (100 %)
Schrittweite	0,5	25	0,25	3,2 (10 %)

Der optimale Systemwirkungsgrad sowie die maximale Wasserstoffausbeute wurden jeweils analysiert. Die höchste Wasserstoffausbeute von 3,75 kg/h wurde bei einer Reformertemperatur von 750 °C, einer Shifttemperatur von 386 °C, einem Systemdruck von 9,1 bar, einem Biogasdurchsatz von 25 Nm³/h mit einem Methangehalt von ca. 55 Vol.-% sowie einer Wasserzufuhr von 65 l/h erreicht. Trotz der höheren absoluten Reaktorauslastung wurde die maximale Wasserstoffausbeute nicht bei Volllast, sondern bei ca. 75 % erreicht, da in diesem Bereich die PSA-Rückgewinnungsrate signifikant höher lag. Hinsichtlich der maximalen H₂-Ausbeute zeigen, wie erwartet, der Biogasvolumenstrom (r = 0,9) sowie die PSA- Rückgewinnungsrate (r = 0,9) eine starke positive Korrelation. Ebenfalls signifikant ist der Einfluss der Wasserzugabe (r = 0,8) und der Shifttemperatur (r = 0,7). Geringe bis keine Korrelation zeigten sich beim Methangehalt des Biogases (r = 0,3) und dem Systemdruck (r = 0). Die Reformertemperatur (r = -0,7) weist einen negativen linearen Zusammenhang zur H₂-Ausbeute auf, das bedeutet, dass bei höheren Reformertemperaturen geringere Produktwasserstoffmengen gemessen wurden.

Als maßgeblicher Kennwert erlaubt der Kaltgaswirkungsgrad eine energetische Bewertung der stofflichen Umwandlung bei der Dampfreformierung von Biogas. Er gibt an, wie effizient die chemische Energie des Edukts in nutzbaren Wasserstoff überführt wird:

$$\eta_{KG} = \frac{\dot{n}_{H_2} \cdot H_{u,H_2}}{\dot{n}_{Biogas} \cdot H_{u,Biogas}} \tag{5}$$

Der höchste gemessene Kaltgaswirkungsgrad von über 60 % wurde bei 809 °C Reformertemperatur, 400 °C Shifttemperatur, 11 bar Systemdruck und 40 l/h Wasserzufuhr erzielt, wobei die H₂-Ausbeute bei 3,12 kg/h lag. Die Parameter, die sich am stärksten positiv auf den Kaltgaswirkungsgrad auswirken sind ebenfalls die PSA-Rückgewinnungsrate (r = 0,8), der Biogasvolumenstrom (r = 0,7) sowie die Shifttemperatur (r = 0,7), der Stromverbrauch (r = 0,4) und die Wasserzugabe (r = 0,4). Einen geringen Einfluss hatten der Methangehalt im Biogas (r = 0,1). Das S/C-Verhältnis (r = -0,3) sowie die Reformertemperatur (r = -0,4) zeigen einen negativen linearen Zusammenhang zum Kaltgaswirkungsgrad.

Ein niedrigeres S/C-Verhältnis, das durch die Erweiterung um einen zweiten Wassergas-Shiftreaktor realisierbar wurde, verbessert den Wirkungsgrad, da der geringere Wasserdampfanteil den Heizbedarf verringert. Hohe Reformertemperaturen erhöhen zwar die Reaktionsgeschwindigkeit, führen jedoch zu einem erhöhten Energieeinsatz und wirken sich somit negativ auf den Kaltgaswirkungsgrad aus. Zudem begünstigt höhere Temperatur in der Shift-Stufe den CO-Umsatz und trägt somit ebenfalls zur Steigerung der Wasserstoffausbeute und des Systemwirkungsgrads bei.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt BioH2Ref konnte gezeigt werden, dass die Produktion von hochreinem Wasserstoff aus Biogas technisch umsetzbar ist. Die im System realisierte Dampfreformierung mit nachgeschalteter CO-Shift-Stufe und Druckwechseladsorption liefert Wasserstoff technischer Reinheit 5.0, der zusätzlich die Anforderung von (PEM)-Brennstoffzellen erfüllt. Die im Projekt errichtete Wasserstofftankstelle wird derzeit zu einer Abfüllanlage für Bündel- und Trailerbefüllung umgerüstet. Es entsteht die Möglichkeit, erneuerbare Energie dezentral zu erzeugen und mit kurzen Transportwegen lokal bereitzustellen. Für den zukünftigen Betrieb ist eine Anpassung der Anlage zur Automatisierung und Fernbedienung vorgesehen, um einen flexibleren Betrieb zu gewährleisten. Es wird bereits eine skalierte Reformierungsanlage mit der vierfachen Produktionskapazität (400 kgH₂/Tag) errichtet, die das Projekt in die direkte Verwertung und somit den Markteintritt der Technologie überführt.

Literatur

[1] BMW – Geschäftsstelle derArbeitsgruppe erneuerbare Energienstatistik, Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland (2025).

[2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 37. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (37. BimSchV), 19.04.2024, pp. 1050–1191.

[3] Bundesverband bioenergie e.V., abgerufen am: 23.06.2025. [Link](#)

[4] Deutsches Biomasseforschungszentrum (2023): Biomassepotenziale aus Abfällen und Reststoffen, Hintergrundpapier Stand und Perspektiven der DBFZ Ressourcendatenbank und der aktuellen Datenlage. 12.2023. [Link](#).

[5] Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2018). Europäisches Parlament und Rat.

[6] Leinfeld R (2004): Reaktionskinetische Untersuchung zur Methan-Dampf-Reformierung und Shift-Reaktion an anoden oxidkeramischer Brennstoffzellen. Universität Erlangen-Nürnberg, pp. 15–18. [Link](#)

[7] Siebertz K, van Bebbler D, Hochkirchen T (2017): Korrelationsanalyse, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, pp. 381–394. DOI: 10.1007/978-3-662-55743-3_11

[8] Wünning J A, Wünning J G (1997): Flameless oxidation to reduce thermal no-formation. In: Progress in Energy and Combustion Science. 23, 1. pp. 81–94. DOI. 10.1016/S0360-1285(97)00006-3

Danksagung

Das Projekt mit dem Förderkennzeichen 03EI5440 wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Weitere Inforamtionen

Institut: <https://www.iob.rwth-aachen.de/gruenen-wasserstoff-aus-biogas-erzeugen/>
Unternehmen: <https://btx-energy.de/projekte/bioh2ref/>

Abkürzungen

EEG	Erneuerbare Energien
BHKW	Blockheizkraftwerk
THG	Treibhausgas
PSA	Druckwechseladsorption (engl.: Pressure Swing Adsorption)
PEM	Polymerelektrolytmembran
S/C	Wasserdampf zu Kohlenstoff (engl.:Steam to Carbon)

Dr.-Ing. Matthias Welzl, Aliena Lamberty, Markus Kollmer, Dr.-Ing. Andy Gradel, Dr. Andreas Apfelbacher, Neil Krause, Simon Kolb, Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess, Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann

WasteWood2Fuel – Entwicklung einer Technologie zur dezentralen Synthese von Flüssigkraftstoffen aus festen biogenen Reststoffen

Hintergrund und Projektziele

WasteWood2Fuel | FKZ 03EI5483

Entwicklung einer Technologie zur dezentralen Synthese von Flüssigkraftstoffen aus festen biogenen Reststoffen

Keywords

Holzvergasung, Methanolsynthese, Fischer-Tropsch-Synthese, Wassergas-Shift-Reaktor, Sektorkopplung

Institutionen & Kontakt

Dr.-Ing. Matthias Welzl¹*, Aliena Lamberty¹, Markus Kollmer², Dr.-Ing. Andy Gradel³, Dr. Andreas Apfelbacher⁴, Neil Krause⁴, Simon Kolb⁴, Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess⁵, Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann¹

¹UBT Future Energy Lab Wunsiedel GmbH, Rot-Kreuz-Str. 6, 95632 Wunsiedel

²Burkhardt GmbH, Kreutweg 2, 92360 Mühlhausen

³BtX energy GmbH, Esbachgraben 1, 95463 Bindlach

⁴Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, An der Maxhütte 1, 92237 Sulzbach-Rosenberg

⁵Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik der Universität Bayreuth, Universitätsstraße 30, 95440 Bayreuth

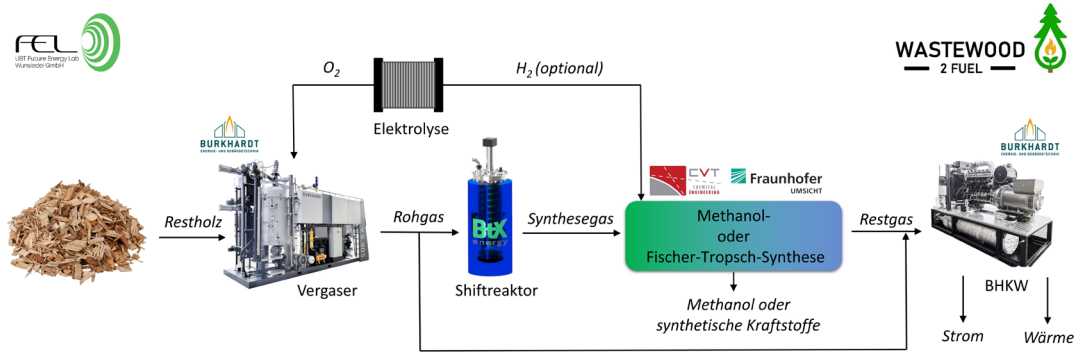
* E-Mail korrespondierende Wissenschaftende: matthias.welzl@fel-wunsiedel.de

Viele energieintensive Anwendungsfelder wie der Flug- und Lkw-Verkehr stehen vor der großen Herausforderung, dass sie nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer defossilisiert werden können. Der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen wie Fischer-Tropsch-Derivaten oder Methanol ist ein vielversprechender Lösungsansatz, jedoch ist zur Herstellung der Kraftstoffe eine Kohlenstoffquelle erforderlich. Dieser Kohlenstoff kann klimaneutral nur unter sehr hohem Energieaufwand mittels Direct Air Capture (DAC) oder aus biogenen und daher weitgehend klimaneutralen Reststoffen gewonnen werden. Vor allem im Hinblick auf die Nutzung von Reststoffen sind in den Eckpunkten für eine nationale Biomassestrategie [1] seit 2022 klare Schwerpunkte gesetzt. Resthölzer aus der Industrie oder Abfallhölzer, die aus der Herstellung von Holzprodukten stammen oder am Ende des Lebenszyklus stehen, sind eine prädestinierte Kohlenstoffquelle. Bisher gibt es keine geeigneten Prozesse zur direkten Nutzung des Kohlenstoffs für die Herstellung von Kraftstoffen, jedoch kann die Biomasse zunächst durch thermochemische Vergasung in Synthesegas und anschließend in Methanol oder Fischer-Tropsch-Kraftstoffe umgesetzt werden [2]. Zur Biomassevergasung wird üblicherweise Luft als Vergasungsmittel eingesetzt, was zu einem hohen Inertgasanteil im Synthesegas und zu einer geringen Effizienz bei der Erzeugung von Kraftstoffen führt.

Das Projekt WasteWood2Fuel zielt daher darauf ab, den in Abbildung 1 dargestellten Prozess und die dazu notwendigen Technologien weiterzuentwickeln, um den Einsatz von Elektrolyse-Sauerstoff zur Vergasung zu ermöglichen. Dadurch kann in gekoppelten Energiesystemen eine nachhaltige, dezentrale Synthese von Flüssigkraftstoffen aus festen biogenen Reststoffen unter Nutzung aller Produkte realisiert werden.

Zur Erreichung dieses Ziels umfasst das Projekt WasteWood2Fuel folgende Hauptbestandteile:

- Analyse und Modellierung der beiden Synthesepfade (Fischer-Tropsch und Methanol) sowie des Gesamtsystems hinsichtlich technischer Machbarkeit, Effizienz, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit;
- Optimierung und Erprobung der Vergasertechnologie bei Einsatz von Elektrolyse-Sauerstoff zur Steigerung der Syntheseeffizienz durch Minimierung des Stickstoffgehaltes;
- Errichtung einer Technikumsanlage zur Validierung und Demonstration des Gesamtprozesses.



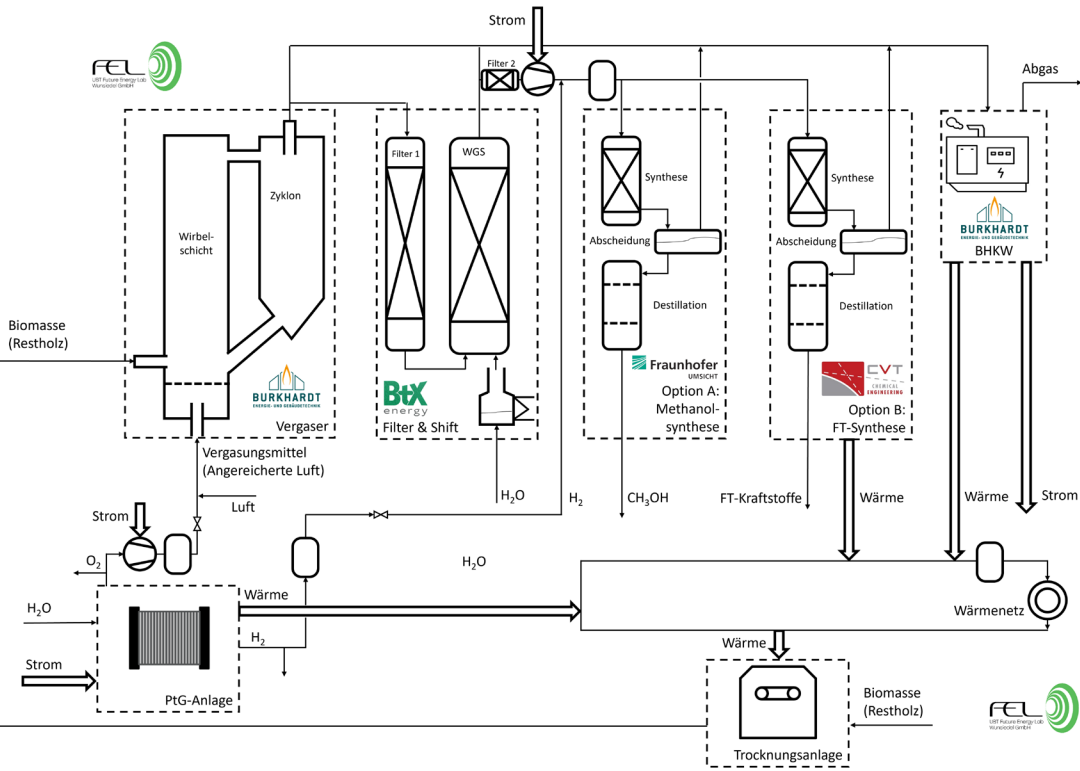
Kombinierte Wärme-, Strom- und Kraftstofferzeugung in gekoppelten Energiesystemen

Zur Analyse und Bewertung des Gesamtsystems werden zunächst ausgehend vom Biomasse-Reststoffpotenzial und von möglichen Elektrolysestandorten Szenarien zur Systemintegration definiert. In Deutschland wurden 2015 ein Drittel des technischen Biomasse-Reststoffpotenzials nicht genutzt oder eine Nutzung war nicht belegt, was einem Biomasse-Reststoffpotenzial von 30,9 Mio. t im Jahr entspricht [3]. 38 % des ungenutzten Biomasse-Reststoffpotenzials sind dabei Waldrestholz [3]. Deutschland hat den größten Holzvorrat eines Landes in Europa, wobei vor allem der Süden mit einer großen Waldfläche herausragt [4]. Das Potenzial für Elektrolysestandorte in Deutschland [5] ist insbesondere in Regionen wie dem Rhein-Main-Gebiet oder Nordrhein-Westfalen groß. Diese Regionen bieten durch vorhandene Chemieparks, Flughäfen sowie den intensiven Frachtverkehr günstige Voraussetzungen und könnten daher als potenzielle Abnehmer für synthetische Kraftstoffe wie Methanol identifiziert werden. Abwärme sowie Wärme aus Blockheizkraftwerken (BHKW) lassen sich zudem sowohl in Nahwärmenetzen als auch für industrielle Prozesswärme effizient nutzen. Neben diesen Regionen bietet sich insbesondere eine Integration in regionale Energiesysteme in Süddeutschland in der Nähe von Holzverarbeitender Industrie und Elektrolysestandorten an. Abbildung 2 zeigt das Schema der kombinierten Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung mit beiden Optionen (Methanol- und Fischer-Tropsch (FT)-Synthese) in einem möglichen Integrationsszenario.

In diesem Szenario wird die Anlage zur kombinierten Wärme-, Strom- und Kraftstofferzeugung mit einer Elektrolyseanlage, einem Wärmenetz sowie einer Biomasse-Trocknungsanlage gekoppelt. Im Rahmen von WasteWood2Fuel werden die Hauptkomponenten und Anlagen (z.B. Synthesegaserzeugung, Methanolsynthese, FT-Synthese (FTS), BHKW) sowie die Systeme und Komponenten, die zur Optimierung der Systemintegration erforderlich sind, technisch und ökonomisch modelliert. Das Simulationsmodell ermöglicht die Berechnung von zeitaufgelösten Stoff- und Energieströmen zur szenarienbasierten Simulation und Optimierung des Gesamtprozesses. Basierend auf den Simulationsergebnissen erfolgt die Bewertung und Analyse des Gesamtsystems anhand von energetischen, exergetischen, ökologischen und ökonomischen Kriterien für ausgewählte Szenarien.

Abbildung 1: Übersicht des Prozesses zur dezentralen Synthese von Flüssigkraftstoffen aus festen biogenen Reststoffen

Abbildung 2: Schema der kombinierten Erzeugung von Wärme, Strom und Flüssigkraftstoffen aus biogenen Reststoffen mit den Produktionsoptionen Methanol und FT-Kraftstoff



Vergasertechnologie mit Sauerstoff angereicherter Vergasungsluft

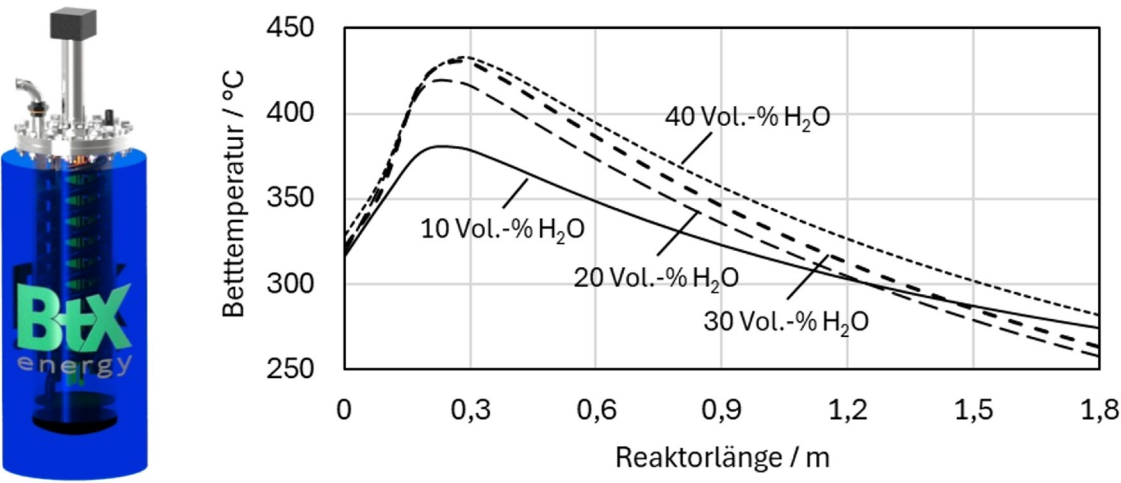
Es ist Stand der Technik, dass in dezentralen Holzvergasanlagen als Vergasungsmittel (Sauerstoffquelle) Luft eingesetzt wird. Aus dem Einsatz von Luft resultiert, dass das produzierte Synthesegas zu einem erheblichen Anteil aus Stickstoff (40 bis 50 Vol.-%) besteht. Beim Einsatz des Synthesegases in einem Verbrennungsmotor spielt der Stickstoffgehalt eine untergeordnete Rolle. Bei der Nutzung in Syntheseverfahren ist der Stickstoffgehalt im Synthesegas jedoch von großer Relevanz. Je niedriger der Stickstoffgehalt ist, desto effizienter ist die chemische Umsetzung. Zur Verminderung des Stickstoffgehaltes des Synthesegases wird im Projekt WasteWood2Fuel die Holzvergasertechnologie mit Sauerstoffangereicherter Vergasungsluft erprobt. Für die Versuche wurde ein serienmäßiger Hackschnitzel-Holzvergaser der Burkhardt GmbH mit einer Sauerstoffversorgung ausgestattet. Der Sauerstoff wird über Druckflaschenbündel bereitgestellt. Für die Bewertung und Validierung der Versuche sowie für die Überwachung des Prozesses wurde eine erweiterte Messtechnik in die Versuchsanlage integriert.

Bei der ersten Versuchsreihe wurde der serienmäßige Holzvergaser mit schrittweise zunehmendem Sauerstoffgehalt im Vergasungsmittel betrieben. Das wesentliche Ergebnis dieser Testläufe ist, dass der Vergasungsprozess bis zu einer Sauerstoff-Substitutionsrate (Anteil des reinen Sauerstoffs am Gesamtsauerstoffbedarf) von 20 % stabil bleibt (bisher noch relativ kurze Versuchsdauer). In diesem Betriebspunkt konnte der Stickstoffgehalt um circa 8 % (relativ) im Vergleich zum herkömmlichen Betrieb mit ausschließlich Vergasungsluft reduziert werden. Der Versuch mit einer Sauerstoff-Substitutionsrate von 25 % musste innerhalb kurzer Zeit abgebrochen werden, da der Prozess zu stark negativ beeinflusst wurde. Es wurde erwartet, dass für einen hinreichenden und stabilen Betrieb der Versuchsanlage mit Sauerstoff-angereicherter Vergasungsluft zum einen konstruktive Anpassungen an der Anlage und zum anderen Anpassungen an der Prozessregelung in der Steuerungssoftware erforderlich werden. Dies hat sich mit der ersten Versuchsreihe bereits bestätigt. In einem nächsten Schritt wird die Versuchsanlage über eine längere Versuchsdauer mit der Sauerstoff-Substitutionsrate von 20 % betrieben, um mögliche Auswirkungen auf den Umsetzungsprozess zu untersuchen. In Anpassungsschleifen wird die Anlagentechnologie zur Steigerung des Sauerstoffanteils im Vergasungsmittel weiterentwickelt. Abschließend werden das Maximum für den Sauerstoffgehalt im Vergasungsmittel bzw. die maximal mögliche Stickstoff-Reduzierung ermittelt.

Gasaufbereitungs- und Shift-Reaktortechnologie

Zur Gasaufbereitung im Projekt WasteWood2Fuel wird eine in einem Vorgängerprojekt (BiDRoGen: Anm. Hg: siehe Seite 44-47) zur reinen Wasserstofferzeugung entwickelte Reaktortechnologie mit zusätzlichen Vor- und Nachreinigungsstufen erweitert und auf den Betrieb für die Bereitstellung von möglichst optimalem Synthesegas angepasst. Hierfür wurden numerische Modelle weiterentwickelt und Parameterstudien, zunächst für trockenes Holzgas aus der nicht mit Sauerstoff angereicherten Luftvergasung (26 Vol.-% CO, 20 Vol.-% H₂, 9 Vol.-% CO₂, 2 Vol.-% CH₄, 43 Vol.-% N₂), durchgeführt. Abbildung 3 zeigt das thermische Verhalten (axiales Temperaturprofil) des Reaktorsystems mit rekuperativer Kühlung.

Abbildung 3: Modellergebnisse zum thermischen Verhalten des vorgesehenen Shiftreaktors bei unterschiedlichen zusätzlichen Wasserdampf-Mengen



Anhand der Ergebnisse des Projektpartners Burkhardt GmbH müssen diese Studien für das thermisch anspruchsvollere Gas mit Sauerstoffanreicherung angepasst und ggf. das Reaktorkonzept für die realen Versuchsreihen entsprechend modifiziert werden. Die Simulation des Shiftreaktors wurde anschließend um die Methanolsynthese erweitert, um entsprechende Sensitivitäten auf die CO-CO₂-H₂-Zusammensetzung zu ermitteln. Die Simulationsergebnisse geben hier bereits jetzt Aussicht auf über 40 % Kaltgaswirkungsgrad, auch bei hohen Stickstoffanteilen.

Methanol-Synthesetechnologie

Im Rahmen des Teilprojekts zur Methanolsynthese erfolgt die experimentelle Durchführung an einer Versuchsanlage zur Direktsynthese bei Fraunhofer UMSICHT. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Optimierung der Produktausbeute sowie der qualitativen und quantitativen Analyse der entstehenden Produkte. Ziel ist es, das Potenzial zur Methanolproduktion aus Synthesegas, das mittels der thermochemischen Vergasung von Holz (s. Vergasertechnologie mit Sauerstoff angereicherter Vergasungsluft) erzeugt wurde, systematisch zu evaluieren.

Die Produktanalyse erfolgt sowohl über die Untersuchung des Produktöls als auch mittels eines integrierten Online-Gaschromatographen (GC). Die Anlage befindet sich im Technikumsmaßstab und verfügt über einen Doppelrohrreaktor mit einem Innendurchmesser von 20 mm sowie einer geregelten Öltemperierung. Der GC sind mit zwei Flammenionisationsdetektoren (FID) sowie zwei Wärmeleitfähigkeitsdetektoren (WLD) ausgestattet, wodurch eine kontinuierliche Analyse von Permanentgasen sowie Alkoholen mit Kohlenstoffkettenlänge im Bereich von C1 bis C7 ermöglicht wird.

Abbildung 4: Versuchsanlage zur Methanolsynthese



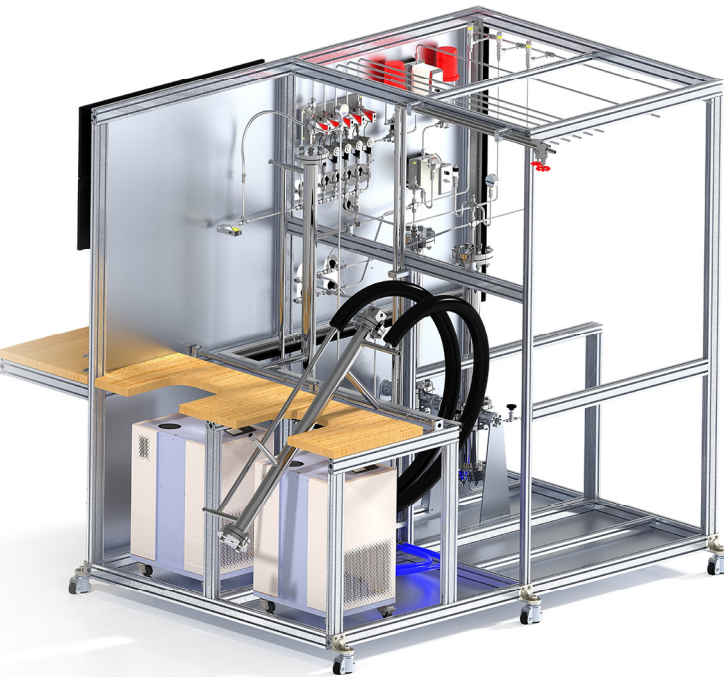
Zur Kondensation der flüchtigen Komponenten ist ein Ringkühler installiert, der über ein Glykol-basiertes Kühlsystem betrieben wird. Die Gasversorgung der Anlage erfolgt über angeschlossene Gasflaschen, wodurch eine flexible Zusammensetzung des eingespeisten Synthesegases realisiert werden kann. Darüber hinaus ist die Anlage mit einem Kompressor ausgestattet, der im Rahmen des Projekts als Verdichter für das Synthesegas dient. Dieser ermöglicht die simultane Versorgung sowohl der Methanolsyntheseanlage als auch der Anlage zur Fischer-Tropsch-Synthese mit komprimiertem Reaktionsgas. Abbildung 4 zeigt die zur Synthese genutzte Anlage.

Fischer-Tropsch-Synthesetechnologie

Das Teilprojekt der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) zielt auf die Entwicklung experimentell gesicherter Reaktormodelle als Grundlage für die Ausarbeitung modularer, dezentraler FTS-Reaktoren ab. Im Rahmen früherer Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik der Universität Bayreuth wurde ein detailliertes 2D-Reaktormodell eines Festbett-Rohrreaktors entwickelt, das neben Stoff- und Wärmebilanzen auch weitere Effekte wie den Druckverlust durch die Katalysatorschüttung, die Änderung des molaren Gasstroms infolge der voranschreitenden Reaktion hin zu größeren Molekülen sowie den Einfluss von Wasserdampf auf die Reaktivität berücksichtigt [6–8].

Zur Validierung dieses Modells wurde ein ölgekühlter Einzelrohrreaktor im Technikumsmaßstab entworfen. Der Reaktordurchmesser orientiert sich dabei an kommerziell eingesetzten Reaktordurchmessern, die Bettlänge hingegen ist im Vergleich deutlich kürzer gewählt als die 10–20 m in kommerziellen Anlagen [9]. Da jedoch die kritische Zone der stark exothermen FTS üblicherweise innerhalb der ersten 1–2 m liegt, erlaubt auch eine kürzere Bettlänge eine adäquate Validierung. Das gesamte FTS-Anlagenkonzept ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 5: Anlagenkonzept des ölgekühlten Fischer-Tropsch-Einzelrohrreaktors



Der Reaktor wird zur Temperaturüberwachung mit einem faseroptischen Temperaturmesssystem ausgestattet, das die Aufnahme radialer und axialer Temperaturprofile in der Katalysatorschüttung ermöglicht. Diese Temperaturprofile bilden zusammen mit der nachgeschalteten Gasanalyse und der Massenstrommessung den Kern der Validierung. Nach der Validierung des Reaktormodells sollen durch simulative Parameterstudien die Reaktordimension und die Betriebsparameter unter den gegebenen Randbedingungen der Holzvergasung weiter optimiert werden. Ziele sind ein thermisch stabiler Prozess sowie die Maximierung der Kraftstoffausbeute. Ausgehend von diesen Parameterstudien soll anschließend ein digitales Rohrbündelreaktormodul entworfen werden, das im Kontext der Gesamtanlage den Prozess vom Restholz bis zum flüssigen Rohkraftstoff abbilden kann.

Ausblick

Im bisherigen Projektverlauf von WasteWood2Fuel wurden erste vielversprechende Ergebnisse aus Modellen und Versuchsreihen generiert. So ist eine erste Sauerstoffanreicherung des Vergasungsprozesses gelungen und es konnten erste positive Aussichten auf eine angemessene Effizienz der Synthesepfade anhand von Modellen gegeben werden. Im zweiten Projektjahr sollen die einzelnen Komponenten (Shiftreaktor an Vergaser, Synthesereaktoren) in Betrieb genommen und die Einzelprozesse erprobt werden. Ziel ist es, nach dieser Erprobung im dritten Projektjahr (2027) eine gemeinsame Anlage im Realmaßstab des Vergasers und Shiftreaktors mit angeschlossenem Synthesestrang im Technikumsmaßstab (< 10 Nm³/h Rohgas) zu betreiben und Erfahrung zu sammeln. Anhand dieser Versuchsergebnisse und der entwickelten Simulationsmodelle kann dann eine Skalierung abgeleitet und die wirtschaftliche Umsetzung im Realmaßstab des Gesamtprozesses bewertet werden. In Abhängigkeit der Projektergebnisse soll die weitere Skalierung der Technologie zur dezentralen Synthese von Flüssigkraftstoffen aus festen biogenen Reststoffen vorangetrieben werden. Als möglicher Standort zur weiteren Erprobung der Technologie im Realmaßstab bietet der Energiepark Wunsiedel hervorragende Voraussetzungen.

Literatur

[1] BMWF; BMEL; BMUV (2022): Eckpunkte für eine nationale Biomassestrategie (NABIS). URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/nabis_eckpunkte_bf.pdf (Stand 02.07.2025).

[2] Karl J (2012): Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt. München: Oldenbourg.

[3] Brosowski A, Adler P, Erdmann G, Stinner W, Thrän D, Mantau U, Blanke C, Mahro B, Hering T, Reinholdt G (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen: Status Quo in Deutschland. URL: https://mediathek.fnr.de/downloadable/download/sample/sample_id/1251/ (Stand 02.07.2025).

[4] BMEL (2024): Der Wald in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur. URL: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/vierte-bundeswaldinventur.pdf?__blob=publicationFile&v=17 (Stand 02.07.2025).

[5] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2024): H2 PoWerD. URL: <https://www.h2-powerd.de> (Stand 02.07.2025).

[6] Jess A, Kern C (2023): Significance of Pressure Drop, Changing Molar Flow, and Formation of Steam in the Accurate Modeling of a Multi-Tubular Fischer–Tropsch Reactor. In: Processes, 11 (11), pp. 3281.

[7] Kern C, Jess A (2023): Improvement of a Multi-Tubular Fischer–Tropsch Reactor with Gas Recycle by Appropriate Combination of Axial Activity Distribution and Gas Velocity. In: Catalysis Science & Technology, 13 (8), pp. 2212–2222.

[8] Kern C, Jess A (2023): Performance of a Multi-Tubular Fischer–Tropsch Reactor with Two Catalytic Zones of Different Intrinsic Chemical Activity. In: Catalysis Science & Technology, 13 (19), pp. 5425–5438.

[9] Kern C, Jess A (2024): Design and Technoeconomic Analysis of Fischer–Tropsch Fixed-Bed Synthesis with Cobalt-Based Catalysts. In: Energy Technology, 112 (6), pp. 2301534.

Natascha Eggers, Dr. Fabian Giebner, William Würpel

Biogener Wasserstoff – Anwendungsszenarien für Dunkelfermentation und Biomassevergasung



Biogener Wasserstoff – Ist orange das neue grün?

Angesichts des steigenden Bedarfs an klimaneutralen Energieträgern rückt Wasserstoff zunehmend in den Fokus der Energiesysteme. Während »grüner« Wasserstoff auf Basis von Elektrolyse derzeit als Referenzpfad gilt, bleibt die Erschließung biogener Rest- und Abfallstoffe als zusätzliche Quelle weitgehend ungenutzt. Die Nutzung solcher Ressourcen kann insbesondere im ländlichen Raum eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Ergänzung darstellen – etwa durch die Integration in bestehende Infrastrukturen oder durch die dezentrale Nutzung.

Keywords

Dunkelfermentation, Biomassevergasung, Potenzialanalyse

H2Verg | FKZ 03EI5445

Wasserstoff aus der Vergasung von Biomasse – Feldmessungen, Ermittlung von Anwendungsbedingungen und Prozessbewertung

HyPerFerment II | 03EI3016

Entwicklung eines mikrobiologischen Verfahrens und Erprobung einer Pilotanlage zur fermentativen Wasserstofferzeugung

Institutionen & Kontakt

Natascha Eggers^{1,2*}, Dr. Fabian Giebner³, William Würpel⁴

¹ Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Sandtorstraße 22, 39106 Magdeburg

² Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Stiftstraße 69, 20999 Hamburg

³ MicroPro GmbH,

Magdeburger Str. 26B, 39245 Gommern

⁴ DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig

* E-Mail korrespondierende Wissenschaftende: natascha.eggers@iff.fraunhofer.de
natascha.eggers@haw-hamburg.de

Im Fokus der beiden Projekte HyPerFerment und H2Verg steht daher die Frage, wie biogene Reststoffe effizient zur Bereitstellung von Wasserstoff genutzt werden können. Beide Projekte verfolgen das gemeinsame Ziel, die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Wasserstoffproduktion aus organischen Abfällen zu untersuchen, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der eingesetzten Technologien und Zielsubstrate.

HyPerFerment zielt darauf ab, bestehende Biogasanlagen durch den Einsatz der Dunkelfermentation zur Wasserstoffproduktion zu erweitern. Im Zentrum stehen flüssige und leicht vergärbare Reststoffe, die in einem eigens entwickelten Prozess fermentativ zu Wasserstoff und CO₂ umgesetzt werden. Die Integration in bestehende Infrastrukturen soll eine hohe Praxistauglichkeit und geringe Investitionshürden ermöglichen. H2Verg hingegen konzentriert sich auf die stoffliche Nutzung fester biogener Reststoffe wie Altholz, Grünschnitt oder Altpapier durch Biomassevergasung. Ziel ist die Entwicklung eines modularen, dezentral einsetzbaren Verfahrens zur Vergasung und anschließenden Wasserstoffgewinnung. Dabei sollen insbesondere Stoffströme erschlossen werden, die in bestehenden biologischen Verfahren bislang nicht nutzbar sind.

Beide Ansätze ergänzen sich komplementär und verfolgen das übergeordnete Ziel, biogene Reststoffe als strategische Ressource für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft zu erschließen.



Abbildung 1: Projektstruktur HyPerFerment – Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur Integration der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen im Rahmen von Projektphase 1 und 2.

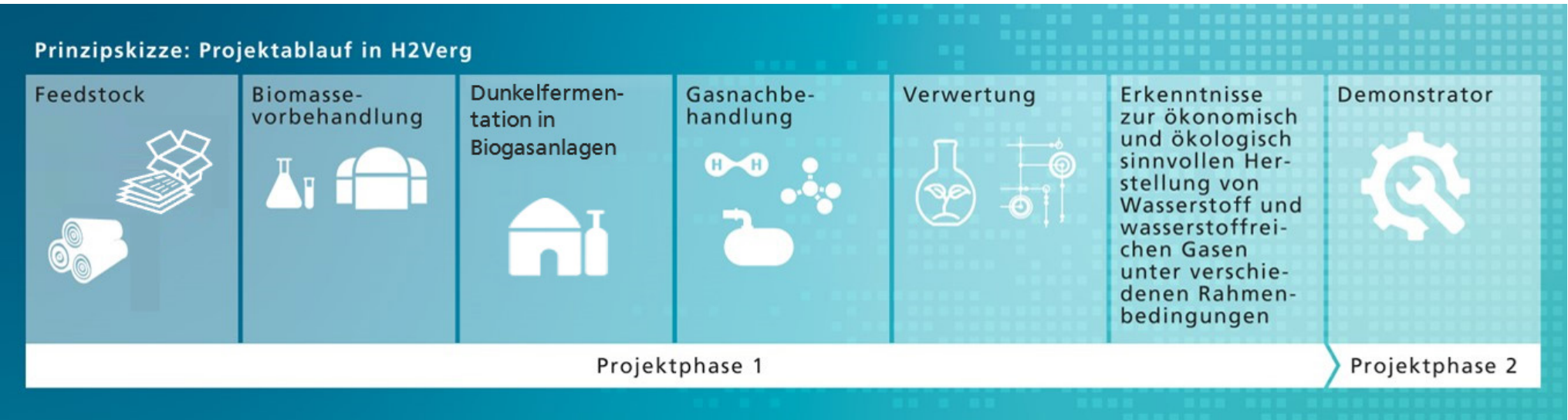


Abbildung 2: Projektstruktur H2Verg – Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur Entwicklung dezentraler Vergasungstechnologien für biogene Feststoffe bis zur Demonstratorentwicklung.

Anwendungsszenarien und -potenziale

Sowohl HyPerFerment als auch H2Verg folgen einem vergleichbaren methodischen Vorgehen, das jeweils auf die Untersuchung von Reststoffpotenzialen, die Entwicklung geeigneter Prozessketten und die Bewertung der technologischen Umsetzung abzielt. Die Projekte bestehen aus mehreren Arbeitspaketen, die u. a. Stoffstromanalysen, technische Entwicklung, Demonstrationsvorhaben und techno-ökonomische Bewertungen beinhalten. In der vorliegenden Veröffentlichung werden jedoch ausschließlich die Ergebnisse der Standort- und Potenzialanalysen betrachtet, die als Grundlage für die übergreifende Bewertung der Einsatzmöglichkeiten biogener Reststoffe für die Wasserstoffbereitstellung dienen.

HyPerFerment – Standortanalyse für Dunkelfermentation in Biogasanlagen

Ziel des Projekts HyPerFerment ist die Entwicklung und Erprobung eines mikrobiologischen Verfahrens zur fermentativen Wasserstofferzeugung, das sich in bestehende Biogasanlagen integrieren lässt. Die Dunkelfermentation soll dabei als zusätzliche Verwertungsstufe für geeignete Reststoffe dienen und dabei die Dunkelfermentation als zusätzliche Verwertungsstufe für geeignete Reststoffe etablieren. Perspektivisch soll so ein modulares Verfahren entstehen, das mit geringen technischen Anpassungen eine signifikante Erweiterung der Wasserstoffbereitstellung im ländlichen Raum erlaubt.

Im Rahmen von HyPerFerment wurde eine deutschlandweite Standortanalyse durchgeführt, um Biogasanlagen zu identifizieren, die sich besonders für die Integration eines Dunkelfermenters eignen. Dabei wurde ein dreistufiges Auswahlverfahren angewendet, das auf öffentlich zugänglichen Datenbanken wie der Biogas Datenbank, dem Marktstammdatenregister (MaStR) und ergänzenden Literaturwerten basiert.

1. Datum der Inbetriebnahme

Als erstes Auswahlkriterium diente das Inbetriebnahmedatum der Anlagen. Berücksichtigt wurden insbesondere Anlagen, die zwischen 2004 und 2008 errichtet wurden. Diese erreichen in den Jahren 2024 bis 2028 das Ende ihres 20-jährigen EEG-Förderzeitraums und müssen im Zuge eines Repowerings ohnehin in technische Umrüstungen investieren. Der Einbau eines Dunkelfermenters könnte somit in geplante Modernisierungen integriert werden, ohne zusätzliche Stillstandzeiten zu verursachen.

2. Installierte elektrische Leistung

In einem zweiten Schritt wurde die installierte Leistung der Anlagen berücksichtigt. Basierend auf Wirtschaftlichkeitsanalysen für verschiedene Modellanlagen aus dem Leitfaden Biogas wurde ein Grenzwert

von 500 kW elektrischer Leistung festgelegt. Unterhalb dieser Schwelle wären die Investitionen in einen zusätzlichen Fermenter und eine Gasaufbereitung (z. B. PSA-System) nur schwer wirtschaftlich darstellbar.

3. Substratverwendung

Schließlich wurde die Eignung der eingesetzten Substrate bewertet. Bevorzugt wurden Anlagen, die hauptsächlich oder ausschließlich erneuerbare Rohstoffe (RRM) wie Maissilage oder Zuckerrübe verwenden. Diese zeichnen sich durch einen höheren Gehalt leicht vergärbare Kohlenhydrate aus, was die Wasserstoffausbeute in der Dunkelfermentation deutlich steigert. Anlagen mit hohem Anteil an Gülle oder anderen schwer abbaubaren Fraktionen wurden ausgeschlossen.

Nach Anwendung aller drei Filter verblieben rund 1.534 Biogasanlagen als potenziell geeignete Standorte. Die Analyse basiert auf konservativen Annahmen und stellt somit ein realistisches Mindestpotenzial dar.

H2Verg – Potenzialabschätzung für Reststoffe in der Vergasung

Das Projekt H2Verg verfolgt das Ziel, ein modulares Konzept für die dezentrale Wasserstoffproduktion durch Biomassevergasung zu entwickeln. Im Fokus stehen feste biogene Reststoffe, die bisher kaum zur Herstellung von Wasserstoff genutzt werden. Die Technologie soll so ausgelegt werden, dass sie unabhängig von bestehenden Infrastrukturen einsetzbar ist – etwa im industriellen Umfeld oder an dezentralen Sammelstellen.

Zur Abschätzung des theoretischen Wasserstoffpotenzials fester biogener Reststoffe wurde im Projekt H2Verg auf eine deutschlandweite Stoffstromanalyse zurückgegriffen, die vom Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) bereitgestellt wurde. Diese enthält Angaben zum technischen Biomassepotenzial in Tonnen Trockensubstanz pro Jahr für verschiedene Reststoffe, darunter forstwirtschaftliche Nebenprodukte wie Rinde und Waldrestholz aber auch weitere relevante lignozellulosehaltige Materialien wie Altpapier und Grüngut. [1]

Um daraus ein Wasserstoffpotenzial abzuleiten, wurden für jede Biomassefraktion spezifische Umwandlungsfaktoren in kg H₂ pro kg eingesetzter Trockensubstanz bestimmt. Grundlage war ein thermodynamisches Prozessmodell einer Vergasung mit anschließender Gasreinigung und Aufbereitung mittels Wassergas-Shift-Reaktor und Druckwechsel-Adsorption. Die Wasserstoffausbeuten berücksichtigen bereits die Verluste durch CO₂ und die Aufbereitungseffizienz.

Tabelle 1 zeigt exemplarisch die resultierenden Umrechnungswerte bei Verwendung von Luft als Vergasungsmedium:

Tabelle 1: Wasserstoffausbeuten für ausgewählte Reststoffarten (kg H₂ pro kg TM Biomasse, berechnet für den Fall der Luftvergasung)

Reststoffart	H ₂ -Ertrag [kg H ₂ /kg TM Biomasse]
Altpapier	0,0779
Grüngut	0,0737
Getreidestroh	0,0669
Biogut aus priv. Haushalten	0,0389
Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen	0,0520
Waldrestholz (Laub, Nadel)	0,0660
Rinde	0,0811
Sägenebenprodukte	0,0706
Sonstiges Industrieholz	0,0710
Holz von Landschaftspflegeflächen	0,0693

Diese Werte wurden mit den jeweiligen verfügbaren Mengen multipliziert, um das theoretische maximale Wasserstoffpotenzial abzuschätzen. Dabei handelt es sich bewusst um eine Bruttoabschätzung, die weder infrastrukturelle Einschränkungen noch Nutzungskonkurrenzen berücksichtigt. Ebenso wurde keine ökonomische Bewertung durchgeführt. Ziel war es, jene Fraktionen mit dem höchsten H₂-spezifischen Potenzial zu identifizieren und so eine fundierte Grundlage für die Auswahl geeigneter Demonstratorstandorte zu schaffen.

Aktuelle bzw. zu erwartende Ergebnisse

HyPerFerment – Standortanalyse und Wirtschaftlichkeit der Dunkelfermentation

Im Rahmen von HyPerFerment wurde das Potenzial zur Integration der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen umfassend analysiert. Dazu wurden über 10.000 Biogasanlagen in Deutschland hinsichtlich relevanter Kriterien ausgewertet, darunter Anlagengröße, Substratmix, Standortstruktur sowie technische Voraussetzungen für eine nachgeschaltete Wasserstoffproduktion. Basierend auf diesen Daten wurden rund 1.468 Biogasanlagen sowie 50 Biomethananlagen identifiziert, bei denen die Integration eines Dunkelfermenters innerhalb von fünf Jahren als wirtschaftlich tragfähig eingeschätzt wird. Diese Einschätzung basiert auf einem Referenzsystem mit einem 10 m³-Fermenter, das für die Ermittlung der spezifischen Wasserstoffgestehungskosten herangezogen wurde. Die Analyse ergab Produktionskosten von ca. 1,63 €/kg H₂, wobei Potenziale zur weiteren Kostensenkung durch Skalierung und Prozessintegration bestehen. Das geschätzte technische Potenzial des orangefarbenen Wasserstoffs aus diesen Anlagen beträgt rund 48.916 t H₂ pro Jahr. Dies entspricht etwa 3 % des aktuellen Wasserstoffbedarfs in Deutschland. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzung bestehender Biogasinfrastrukturen eine praktikable Option darstellt, um kurzfristig zur Wasserstoffversorgung beizutragen – insbesondere im ländlichen Raum.

H2Verg – Theoretisches Potenzial der Biomassevergasung

Die Potenzialanalyse im Projekt H2Verg umfasste zehn verschiedene feste biogene Reststoffe, darunter forstwirtschaftliche Nebenprodukte wie Rinde und Waldrestholz aber auch weitere relevante lignozellulosehaltige Materialien wie Altpapier und Grüngut. Grundlage bildeten die technischen Biomassepotentiale der Ressourcendatenbank des deutschen Biomasseforschungszentrums, ergänzt durch Simulationsergebnisse zur Wasserstoffausbeute. [1] Die Simulation beinhaltet dabei die Prozessschritte der Vergasung und mehrstufigen Gasaufbereitung mittels Wassergas-Shift-Reaktor und Druckwechsel-Adsorption. Um den Einfluss des Mediums zur Vergasung der biogenen Reststoffe zu identifizieren, wurden verschiedene Medien wie Luft und Wasserdampf in Kombination mit Sauerstoff betrachtet. Die folgende Tabelle zeigt für den Fall mit Luft als Vergasungsmedium beispielhaft die gemittelten technischen Biomassepotenziale für einen Betrachtungszeitraum von 2010 bis 2020 sowie die daraus berechneten Wasserstoffpotenziale unter Verwendung der ermittelten Faktoren in Tabelle 1.

Tabelle 2: Gemittelte technische Biomassepotenziale ausgewählter Reststoffarten im Betrachtungszeitraum 2010–2020 sowie die daraus resultierenden Wasserstoffpotenziale

Reststoff	Technisches Biomassepotential [10³ t TM]	Resultierendes H₂-Potential [10³ t]
Altpapier	15.257	1.188
Grüngut	10.380	765
Getreidestroh	10.024	670
Biogut aus priv. Haushalten	2.754	107
Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen	900	47
Waldrestholz (Laub, Nadel)	9.393	620
Rinde	1.436	116
Sägenebenprodukte	8.155	576
Sonstiges Industrieholz	1.400	99
Holz von Landschaftspflegeflächen	2.073	144
Summe	61.773	4.333

Die Analyse der Ergebnisse bei Verwendung von Luft als Vergasungsmedium zeigt, dass sich das gesamte theoretische Wasserstoffpotenzial im Betrachtungszeitraum 2010–2020 im Bereich von vier bis fünf Millionen Tonnen bewegte und nur geringfügigen Schwankungen unterlag. Das gemittelte, aufsummierte Wasserstoffpotenzial in Höhe von 4.333.000 Tonnen (vgl. Tabelle 2) liegt deutlich über dem derzeitigen Wasserstoffbedarf Deutschlands. Es handelt sich hierbei allerdings um ein Bruttopotenzial unter Idealbedingungen. Technische, logistische und rechtliche Einschränkungen reduzieren die realistisch nutzbare Menge erheblich – genaue Aussagen hierzu sind Gegenstand laufender Arbeiten im Projekt.

Eine Kostenanalyse ist derzeit noch nicht abgeschlossen, da zentrale Parameter – etwa zur Wirtschaftlichkeit der Gasaufbereitung und zur Nutzung anfallender Nebenprodukte wie Biokohle – noch evaluiert werden müssen. Derzeit steht die Validierung des Prozesskonzepts unter realen Bedingungen im Fokus, u. a. mit Blick auf die Flexibilität, Modularität und Dezentralisierbarkeit des Systems.

Gemeinsame Herausforderungen und Ausblick

Beide Projekte zeigen auf, dass biogene Reststoffe ein bisher unzureichend genutztes, aber hochrelevantes Potenzial für die Wasserstoffbereitstellung darstellen. Trotz technologischer Unterschiede sind die Herausforderungen in vielen Bereichen vergleichbar:

- Rechtliche Unsicherheiten hinsichtlich der Reststoffnutzung, insbesondere im Hinblick auf die Abfallverordnung und das Düngerecht
- Marktzugang für orangefarbenen Wasserstoff, insbesondere in Abgrenzung zu etablierten grünen Pfaden
- Integration in bestehende oder neue Infrastrukturen, sowohl technisch als auch logistisch

Für beide Projekte stehen in den kommenden Monaten Demonstrationsvorhaben im Vordergrund. Im Fall von HyPerFerment sollen erweiterte Substrattests, die Integration der Gasaufbereitung und praxisnahe Betriebsdaten die Wirtschaftlichkeitsannahmen validieren. Bei H2Verg liegt der Fokus auf der Weiterentwicklung des Vergasers, der Prozessbewertung und dem Aufbau eines Demonstrators mit stoffstromspezifischer Anpassung. Langfristig bieten beide Ansätze das Potenzial, zur Diversifizierung nachhaltiger Wasserstoffpfade beizutragen – und insbesondere im Zusammenspiel eine breite Palette an Reststoffen in die Wasserstoffwirtschaft zu integrieren.

Weiterführende Informationen

<https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/projekte/03EI5445>
www.hyperferment.de

Alexander Feldner, Dr.-Ing Peter Treiber, Prof. Dr.-Ing Jürgen Karl

Autarke Wasserstoffgewinnung aus Biogas mittels Reformierung und CO-Verbrennung

Ziel des Projektes

Das Projekt „BiogasGoesHydrogen“ [1], [2] hatte zum Ziel die dezentrale Wasserstoffherzeugung aus Biogas durch die Entwicklung eines innovativen Reaktorkonzepts zu vereinfachen und gleichzeitig effizienter zu machen. Dabei wurde insbesondere die additive Fertigung (3D-Druck) genutzt, um komplexe aber auch kompakte geometrische Strukturen herzustellen, die verschiedene Prozessschritte kombinieren und eine optimierte Wärmeintegration ermöglichen. Dies sollte helfen, Prozessverluste zu reduzieren, die Systemkomplexität zu verringern und die wirtschaftliche Umsetzung zu erleichtern und zu beschleunigen. Das Konsortium vereinte dafür die Expertise der FAU Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik), WS Reformer, Hydrogenious und der infra Fürth.

Ergebnisse

Im Mittelpunkt stand die katalytische Reformierung von Biogas bei welcher das darin enthaltene Methan und Kohlendioxid zusammen mit Dampf in Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid umgewandelt wird. Die endotherme Reaktion findet bei hohen Temperaturen (idealerweise über 700°C) statt und erfordert neben einem entschwefelten Biogas eine genaue Abstimmung der Betriebsparameter, insbesondere des Dampf-zu-Kohlenstoff-Verhältnisses (engl. steam-to-carbon, S/C), um Kohlenstoffbildung und eine Deaktivierung des Katalysators zu verhindern. Die FAU führte umfassende theoretische Analysen sowie ein Screening kommerzieller Reformierkatalysatoren durch. Dabei wurden vier verschiedene Katalysatoren mit unterschiedlichen Trägermaterialien und Geometrien untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass eine effiziente Wärmeübertragung auf den Katalysator entscheidend für die Gesamt-Performance ist. Kleinere Partikelgrößen ermöglichen eine dichtere Schüttung, verbessern dadurch die Wärmeübertragung und führen zu höheren Reaktionsraten. Hinsichtlich der Betriebsparameter erwiesen sich hohe Temperaturen bis zu 900°C als vorteilhaft. Gleichzeitig beeinflusst das Dampf-zu-Kohlenstoff-Verhältnis maßgeblich die Wasserstoffausbeute: Während höhere S/C-Werte (> 1,5) die H₂-Ausbeute steigern, sollte gemäß den Untersuchungen ein Mindestwert von 0,5 gewählt werden, um die Bildung von elementarem Kohlenstoff und damit die Deaktivierung des Katalysators zu verhindern. Gleichzeitig limitiert die interne Wärmebereitstellung zur Dampferzeugung das S/C-Verhältnis auf maximal 2,5. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden mithilfe von Auslegungs-Berechnungen und Simulationen ein Reaktordesign entwickelt, das gezielt auf die Anforderun-

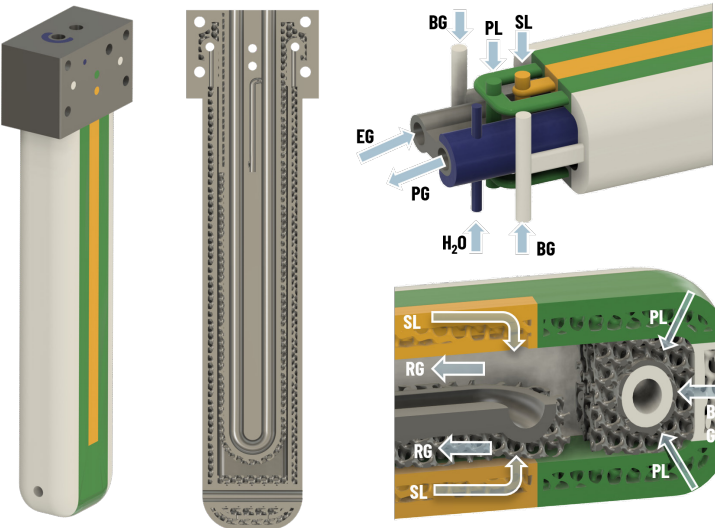


Abbildung 1: Additiv gefertigtes Reformer-konzept; rechts: Schnittansicht mit Gasführung (EG: Eduktgas, PG: Produktgas, BG: Brenngas, PL: Primärluft, SL: Sekundärluft, RG: Rauchgas)

gen und Eigenschaften der Reformierung abgestimmt ist (vgl. Abbildung 1). Das Reaktorkonzept basiert auf einer Kombination aus Rohr- und Plattenreaktor und eines modularen Aufbaus zum einfachen Scale-up. Durch U-förmige Reformer-Kanäle mit 10 mm Innendurchmesser kann sowohl ein hoher Wärmeeintrag in den Katalysator als auch eine gezielte Führung der Temperaturverteilung im Reformer realisiert werden. Ergänzt wurde die Reformierung durch eine effiziente Vorwärmung und Wärmerückgewinnung sowie eine interne Dampferzeugung. Eine gezielt gestufte Verbrennung erfolgt in feinen Gitterstrukturen neben der Reformierung um die Wärme optimal auf die Reaktionszone zu übertragen (vgl. Abbildung 1).

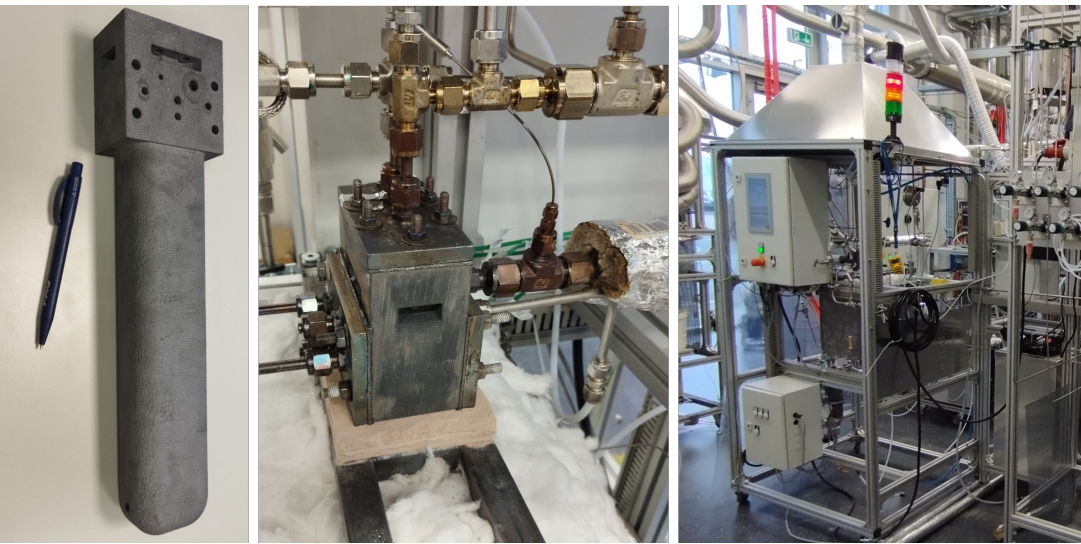


Abbildung 2: Links: 3D-Druck des SiSiC-Reaktor, Mitte: Gasanbindung des Reaktors mittels Flanschverbindungen; Rechts: Versuchstand zur Untersuchung der Reformierung

Der gesamte Reaktor wurde additiv aus siliziuminfiltriertem Siliziumcarbid (SiSiC) gefertigt, welches bei Temperaturen bis 1350°C herausragende thermische Eigenschaften und hohe mechanische Festigkeit kombiniert. Mittels metallischer Flansche wurde er in einen Versuchstand integriert (vgl. Abbildung 2) und experimentell untersucht. Die Tests mit synthetischem Biogas zeigten stabile Betriebsbedingungen über einen Leistungsbereich von 1000 bis 3000 WCH₄ bei Edukt-Raumgeschwindigkeiten (gas hourly space velocity bzw. GHSV) von bis zu 75.000 h⁻¹.

Keywords

Katalytische Reformierung, Biogas, Wasserstoff, Reaktorentwicklung, additive Fertigung

BiogasGoesHydrogen | FKZ 03EI5435

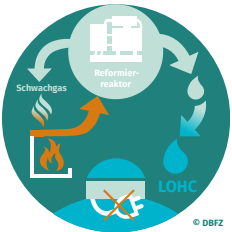
Autarke Wasserstoffgewinnung aus Biogas mittels Reformierung und CO-Verbrennung

Institutionen & Kontakt

Alexander Feldner*, Dr.-Ing Peter Treiber, Prof. Dr.-Ing Jürgen Karl

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg, <https://www.evt.tf.fau.de/>

* E-Mail korrespondierende Wissenschaftende: alexander.feldner@fau.de



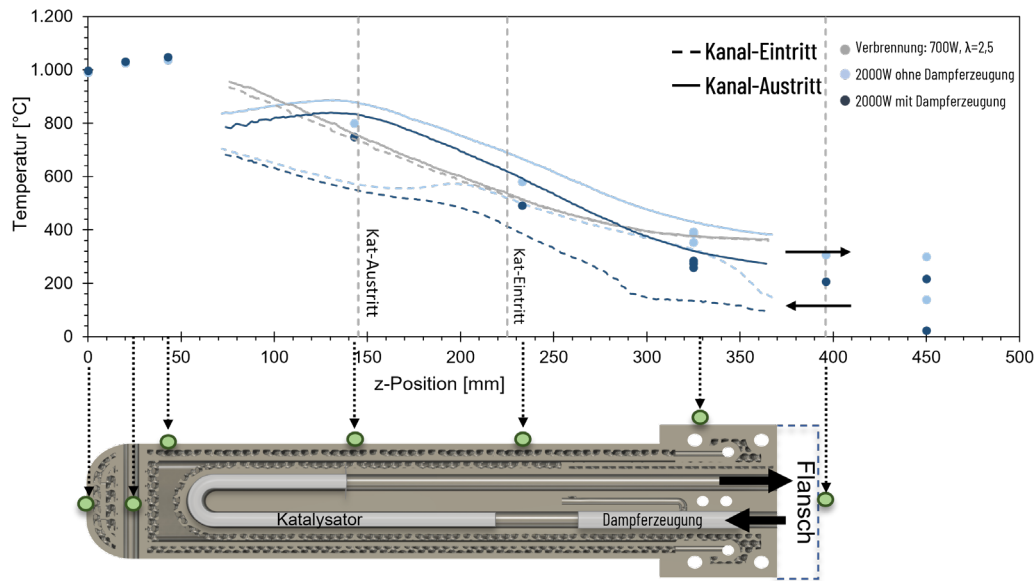


Abbildung 3: Temperaturverteilung innerhalb des Reaktors bei Verbrennung (grau), Reformierung mit externer Dampferzeugung (hellblau) und interner Dampferzeugung (dunkelblau) @ 4 bar_g, S/C = 1,5

Tabelle 1: Ergebnisse des Reformers für verschiedene Betriebspunkte (CH₄:CO₂ = 1:1; S/C = 1,5; λ = 1,5, p_{Ref} = 4 bar_g)

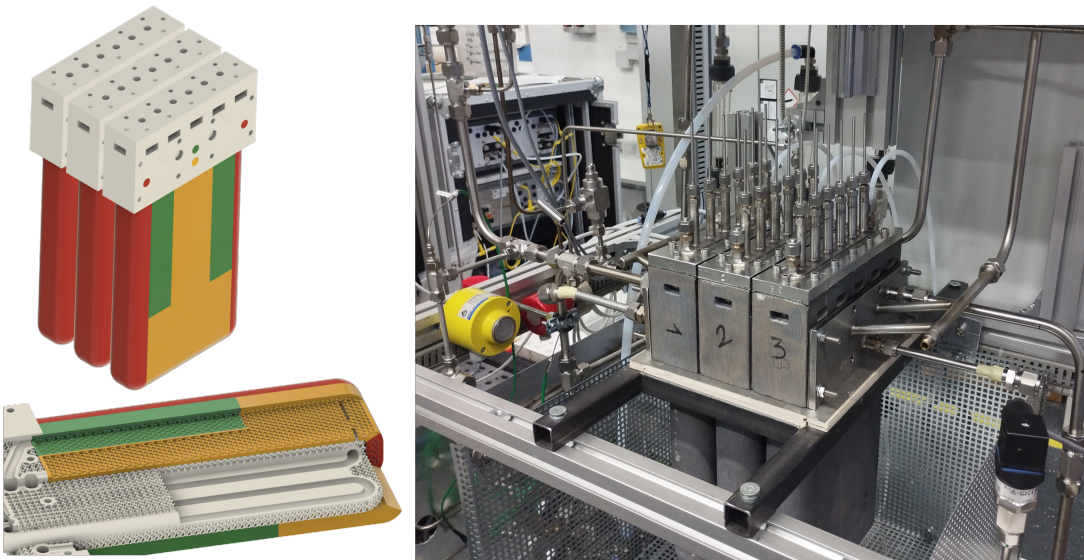
* Dampferzeugung innerhalb des Reformers

Der Methanumsatz lag dabei im Bereich von 95–99 % (vgl. Tabelle 1). In dem gut 350 mm langen Reaktor konnte durch die optimierte Wärmeintegration ein Temperaturgradient von über 1000°C in der Brennzzone bis hinunter auf ca. 300°C im Bereich der Gasanbindung erreicht werden (vgl. Abbildung 3), während die Gase und das Wasser mit Raumtemperatur dem Reaktor zugeführt werden konnten.

P_{Ref} [kW_{CH₄}]	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,5*	2,0*
P_{Comb} [kW]	0,9	1,2	1,4	1,5	1,7	1,2	1,4
Produkt-H₂ [-]	57,2	56,9	56,7	56,4	56,0	56,7	56,5
Produkt-CH₄ [-]	0,3	0,1	0,2	0,8	1,2	0,1	0,5
Produkt-CO₂ [-]	19,4	18,8	19,0	21,0	21,5	18,4	19,8
Produkt-CO [-]	23,1	24,2	24,1	21,8	21,3	24,8	23,2
GHSV [h⁻¹]	25 k	37 k	50 k	62 k	75 k	37 k	50 k
x_{CH₄} [%]	98,8	99,3	99,1	96,3	94,7	99,4	97,8
Kaltgas-Wirkungsgrad [%]	47,4	50,6	53,6	55,2	55,2	55,8	58,6

Der erzielte Kaltgaswirkungsgrad lag mit bis zu 58 % trotz der insgesamt guten Reaktorperformance noch unter dem theoretisch möglichen Niveau. Ursache hierfür waren signifikante Wärmeverluste über die Reaktorhülle, die aufgrund der kompakten Bauweise und des dadurch ungünstigen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses trotz effizienter interner Wärmerückgewinnung 30 - 50 % der eingesetzten Biogasleistung ausmach-

ten. Dies erhöhte den Bedarf an Brenngas in der Verbrennung und wirkte sich negativ auf den Gesamtwirkungsgrad aus (vgl. Tabelle 1). Um diese Verluste zu minimieren und gleichzeitig die Skalierbarkeit des Konzepts zu demonstrieren, wurde ein Reformerstack aus drei additiv gefertigten Modulen realisiert (Abbildung 4), der sich derzeit in der Inbetriebnahme befindet. Jedes Modul enthält drei Reaktionskanäle, sodass für den Stack eine Leistung von etwa 30 kWCH₄ bei deutlich reduzierten Wärmeverlusten erwartet wird. Die interne Gasverteilung verringert den Aufwand zur Gasanbindung, während die modulare Bauweise eine flexible Anpassung an unterschiedliche Wasserstoffherstellungskapazitäten erlaubt. Mit dem Reformerstack soll abschließend das Proof-of-Concept einer flexiblen und skalierbaren Wasserstoffproduktion aus Biogas auf Basis eines additiv gefertigten Reformerkonzepts erbracht werden.



Ergänzend zu der Entwicklung des Reformers wurde die Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette von der Biogasanlage über die Reformierung bis zur Wasserstoffspeicherung im Projektkonsortium umfassend bewertet. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei die Kosten des eingesetzten Biogases, die Anlagenauslastung und der Gesamtwirkungsgrad. Die Anlagenkosten spielen gemäß den Betrachtungen eine eher untergeordnete Rolle, können sich aber durch Intensivierung oder Einsparung verschiedener Prozessschritte, erreicht z.B. durch die Nutzung additiv gefertigter Komponenten, positiv auswirken. Die Ergebnisse zeigten, dass besonders bei einer hohen Anlagenauslastung, der Nutzung günstiger Substrate (z. B. Gülle) und einer Förderung CO₂-neutraler Prozesse eine wirtschaftliche Umsetzung gut möglich ist. Für kleinere bis mittlere Biogasanlagen ergeben sich bei über 7000 Betriebsstunden pro Jahr Gestehungskosten des Wasserstoffs von etwa 4-6 €/kgH₂, wobei die niedrigeren Werte insbesondere bei der Verwendung von Wirtschaftsdünger (z.B. Gülle) als Hauptsubstrat erreicht werden. Der größte Kostenanteil entfällt dabei auf die Biogaserzeugung selbst. Ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit ist die Möglichkeit, durch die Anrech-

Abbildung 4: CAD-Modell des Scale-Ups und des Reformer-Stacks (links), integrierter Reformer-Stack vor Inbetriebnahme (rechts)

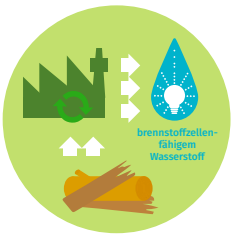
nung von THG-Quoten im Kraftstoffsektor zusätzliche Erlöse zu erzielen. Abhängig vom CO₂-Minderungspotenzial und dem aktuellen Quotenpreis liegen diese Zusatzerlöse derzeit zwischen etwa 1,10 und 2,70 €/kgH₂. In Phasen höherer Quotenpreise waren bereits deutlich höhere Erlöse möglich. Voraussetzung für die Anrechnung ist eine Treibhausgasminde- rung von mindestens 65 %, die zum Beispiel durch einen ausreichend hohen Anteil an Gülle als Substrat erreicht werden kann [3].

Fazit

Als zentrale Erkenntnisse aus dem Projekt lässt sich festhalten, dass die Wasserstoffproduktion aus Biogas technisch verhältnismäßig unproble- matisch und stabil umsetzbar ist, sofern ein schwefelfreies Gas, ein ausrei- chendes Dampfangebot und eine möglichst hohe Wärmezufuhr vorliegen. Eine wirtschaftliche Umsetzung ist besonders durch den Verkauf des Wasserstoffs im Kraftstoffsektor und den dadurch anrechenbaren THG- Quoten möglich. Der in dem Projekt entwickelte additiv gefertigte Reaktor aus SiSiC zeigte ein sehr gutes Betriebsverhalten, bei idealen Umsatzgra- den und guter Wärmeintegration. Er verdeutlicht das Potenzial der additi- ven Fertigung für Anwendungen in der Hochtemperatur-Verfahrenstechnik durch die Integration mehrerer Verfahrensschritte in einer Komponente. Der Gesamt-Wirkungsgrad soll nun in weiteren Schritten durch Untersu- chungen im Scale-Up gesteigert werden und damit das Proof-of-concept für eine leistungsfähige Wasserstofferzeugung aus Biogas in einem additiv gefertigten Reformer erbracht werden.

Literatur

[1] Feldner A, Treiber P, Karl J (2025): "Abschlussbericht BiogasGoesHydrogen: Autarke Wasser- stoffgewinnung aus Biogas mittels Reformierung und CO-Verbrennung".
[2] Feldner A, Treiber P, Karl J (2025): "BiogasGoesHydrogen: Autarke Wasserstoffgewinnung aus Biogas mittels Reformierung und CO-Verbrennung". In: Händler T, Röbisch J: Focus on: Bioenergie und Wasserstoff: Neue Entwicklungen bis hin zur kommerziellen Anwendung. Projektergebnisse 2023-2024. S. 32-41. Doi: 10.48480/m18p-ys30.
[3] Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (2018): "Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)," Amtsblatt der Europäischen Union. L 328, 82–209.



Andreas Molle, Dr.-Ing. Andy Gradel

Wasserstoffgewinnung aus Restholz

Ziel der Projektes

Ziel des F&E-Projektes BiDroGen ist die Entwicklung einer containerisier- ten Gesamtlösung zur Bereitstellung von Wasserstoff aus pelletiertem Restholz. Die beiden Partnerinstitutionen verfolgen hierfür im Einzelnen die Ziele der Entwicklung einer speziell für Holzgas ausgelegten dezent- ralen Wassergas-Shift-Technologie (BtX energy GmbH) der Entwicklung einer modularen Abscheidung für hochreinen Wasserstoff mittels des FHT- Verfahrens (Ferro-Hy-Tunnel), Abtrennung mittels Reineisenrohren. Durch die Kombination der beiden Verfahren kann abschließend ein im Wasser- stoffgehalt maximiertes Synthesegas zur Gewinnung reinen Wasserstof- fes getrennt werden und das Restgas z.B. weiterhin für die Verstromung genutzt werden.

Keywords

Biowasserstoff, Bioenergie, Restholz, Wasserstoff

BiDroGen | FKZ 03EI5438

Wirtschaftliche, dezentrale und mobile Herstellung von Grünem Wasserstoff ausdem Unterkorn (< 20 mm) von der pelletierten Industrierestholzverwertung in einer Containerlösung

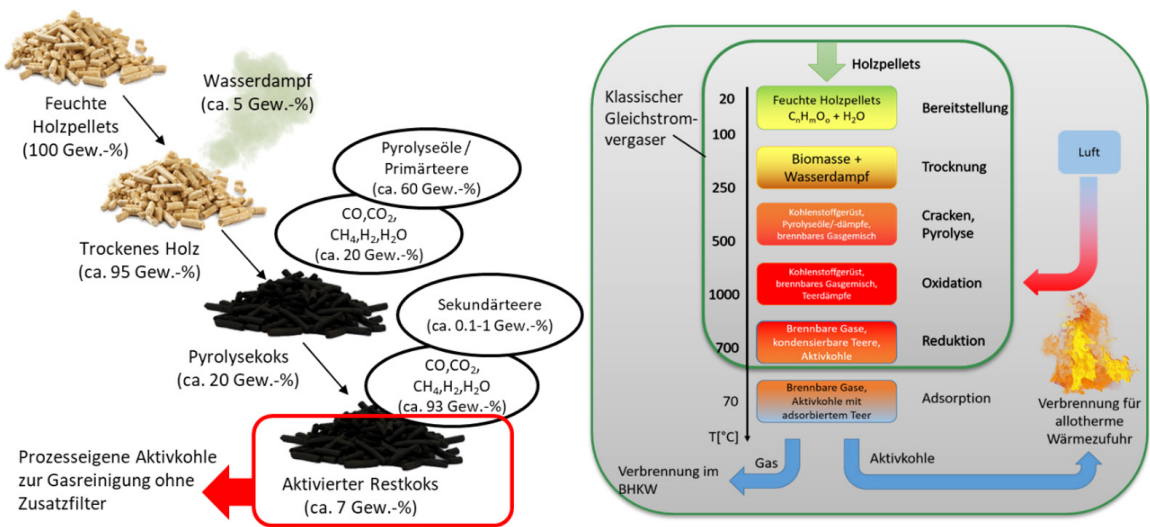
Aktivitäten und Maßnahmen

Ursprung der Projektidee ist das besonders teearme Holzgas aus dem patentierten AutAllo-Verfahren, also einem teils autotherm und teils allotherm beheizten Vergasungsverfahren, in dem ein Teil der Holzkoh- le kontrolliert aus dem Prozess ausgetragen wird und in einer gekühlten Adsorptionszone als Aktivkohlefilter arbeitet [1]. Abbildung 1 zeigt das Prozessschema und die einzelnen Schritte mit ungefähren Massenanteilen und Temperaturen.

Institutionen & Kontakt

Andreas Molle*, Dr.-Ing. Andy Gradel
BtX energy GmbH, www.btx-energy.de

* E-Mail korrespondierende Wissenschaftende:
andreas.molle@btx-energy.de



Aufgrund der hohen Gasreinheit eignet sich dieses Gas vergleichsweise gut für eine Weiterverarbeitung in katalytischen Prozessen wie der Wasser- stofferzeugung oder Flüssigkraftstoffsynthese. Für diese Prozesse muss

Abbildung 1: Prozessschritte des AutAllo-Holzvergaser als Basis für sauberes Holzgas

ein in der Luftvergasung meist mit 20 bis 25 Vol.-% CO sehr reaktives Gas jedoch kontrolliert geshiftet werden, um den Wasserstoffgehalt entweder zu maximieren oder für andere Prozesse einzustellen. Im Projekt BiDRoGen soll der H₂-Gehalt für die Gewinnung reinen Wasserstoffes maximiert werden, Abbildung 2 zeigt die Gesamtkette der Wasserstoffgewinnung aus Holzgas mit einer beispielhaften motorischen Nutzung des Restgases und den am Projektvergaser gemessenen Konzentrationen.

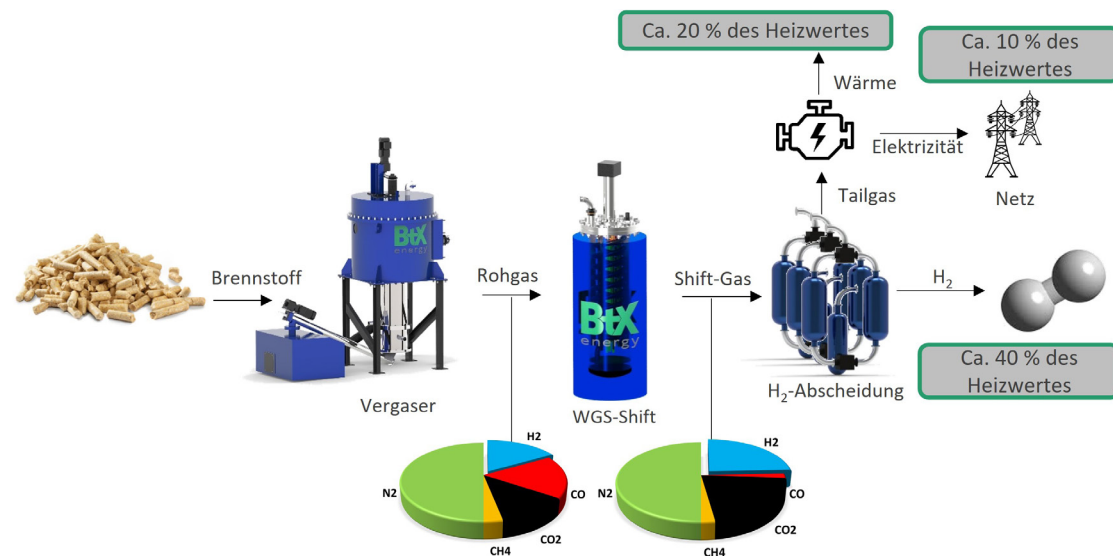


Abbildung 2: Prozessdarstellung und technische Grenzen der Wasserstoffherzeugung aus Holzgas

Die Herausforderung in der Entwicklung einer geeigneten Shift-Technologie liegt in den besonderen Anforderungen des Holzgases. Einerseits soll das Gas in der dezentralen Anwendung keine aufwändige Reinigung bis in den ppb-Bereich für Komponenten wie Benzol oder H₂S durchlaufen müssen, daher müssen robuste Katalysatoren gewählt werden. Diese Robustheit bieten nur Hochtemperatur-Katalysatoren, die in einem Bereich von mindestens 300 °C, maximal aber ca. 500 °C arbeiten können, wobei die Ausbeute mit steigender Temperatur schlechter wird. In der Großverfahrenstechnik arbeitet man hier mehrstufig, was aus Gründen der Wirtschaftlichkeit jedoch im Projekt vermieden werden soll [2].

Eine passende Shift-Reaktortechnologie für Holzgas muss also einerseits kaltes, grob gereinigtes Gas auf Reaktionstemperatur bringen, gleichzeitig aber zugunsten der Ausbeute und zur Vermeidung einer Deaktivierung der Katalysatoren in der reaktiven Zone gekühlt werden.

Es wurde daher im ersten Projektjahr eine modulare Reaktortechnologie mit internem Wärmetausch zwischen Eingangsgas und reaktiver Schüttung entwickelt, die somit beide Herausforderungen löst.

Der im Vorhaben entwickelte Reaktor ist in der Lage, Holzgas unter Dampfzugabe auf unter 3 % Rest-CO zu konvertieren, ohne dabei externe Energiezufuhr oder -abfuhr zu benötigen.

Derzeit (Stand 06/25) wird parallel beim Projektpartner A.H.T. die Abscheideeinheit im Container vorbereitet. Das Projekt wurde kostenneutral verlängert, da sich dieses Arbeitspaket als herausfordernder bzw. zeintensiver als im Antrag erwartet zeigte. Anschließend soll die kombinierte Technologie bis zum reinen Wasserstoff erprobt werden.

Aktuelle und zu erwartende Ergebnisse

Für die Auslegung des Reaktors wurde im Projekt ein numerisches Modell entwickelt und dann in die Dimensionierung überführt. Gleichzeitig wurde ein komplexer reaktorinterner Wärmetauscher für das Temperaturmanagement in der Schüttung zur Erreichung einer maximalen Ausbeute entwickelt. Die Aufbereitung des Holzgases mittels Wassergas-Shift konnte weitgehend im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich entwickelt und erprobt werden. Abbildung 3 zeigt den Reaktor und die Versuchsergebnisse für die einstufige, selbsttragende Wassergas-Shiftreaktion des Holzgases.

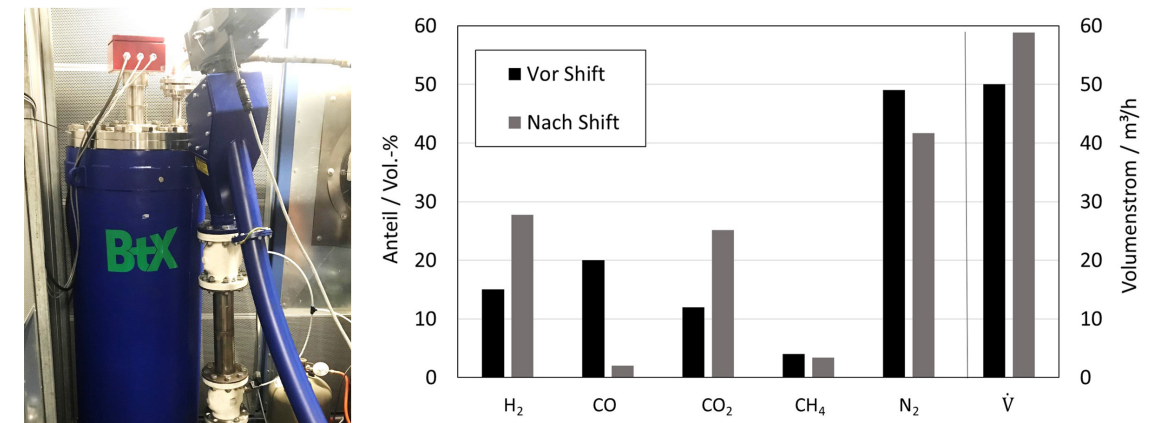


Abbildung 3: Versuchsergebnisse (rechts) des neu entwickelten Shift-Reaktors (links)

Ersichtlich ist hier die Erreichung des Zieles eines CO-Gehaltes von unter 3 Vol.-% zur Maximierung der Wasserstoffausbeute und gleichzeitig Erleichterung der Trennbarkeit auch bei der Nutzung anderer Trennverfahren wie bspw. der CO-empfindlichen Druckwechseladsorption.

Die im Projekt entwickelte Shift-Reaktortechnologie wurde mittlerweile in das Produktangebot der BtX aufgenommen und derzeit erstmalig vertrieben. Als einstufige dezentrale Komplettlösung bietet sie zahlreichen Anwendungen eine Basis zur kostengünstigen Synthesegasaufbereitung.

Literatur

- [1] Gradel A (2020): Gleichstromvergasung von Holzpellets mit integrierter Adsorption von Teerkomponenten (Dissertation), Universität Bayreuth
- [2] Kirm I, Brandin J, Sanati M (2007): Shift catalysts in biomass generated synthesis gas, Topics in Catalysis, Vol. 45, 31-37. Doi: 10.1007/s11244-007-0236-5

Dr. Caroline Autenrieth, Prof. Dr. Robin Ghosh

Auf dem Weg zu einem zirkulären bioökonomischen Geschäftsmodell für die Produktion von H₂, biogenem CO₂ und hochwertigen Produkten

Ziel des Projektes

Keywords

Biowasserstoff, Purpurbakterien, „Dunkel-Photosynthese“, Trester, Carotinoide

RhoTech2 | FKZ 03EI5475

Industrielle Umsetzung von Wasserstoff-Produktion aus Fruchtsaft-Abfällen mit Hilfe von Purpurbakterien

Insitutionen & Kontakt

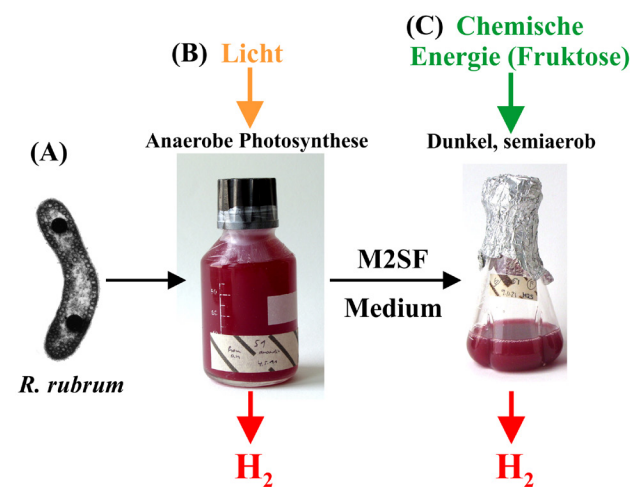
Dr. Caroline Autenrieth^{1*}, Prof. Dr. Robin Ghosh²

¹Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
²Universität Stuttgart, Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

* E-Mail korrespondierende Wissenschaftende: caroline.autenrieth@ipa.fraunhofer.de

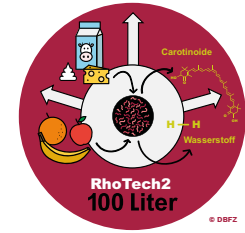
Photosynthetische Mikroorganismen, insbesondere Purpurbakterien, sind natürliche H₂-Überproduzenten [1]. Die H₂-Freisetzung wirkt hierbei als eine Art „Sicherheitsventil“, wenn die Zellen bei zu hoher Lichteinstrahlung durch die photosynthetischen Reaktionen in einen über-reduzierten Zustand kommen. Durch Übertragung der überschüssigen Elektronen auf Protonen (d.h. H₂-Bildung) mit Hilfe spezieller Enzyme, können die Zellen diesem Stress-Zustand, in dem der Stoffwechsel nicht mehr effektiv funktioniert, entkommen. Allerdings hat die Notwendigkeit von Licht eine wirtschaftliche Umsetzung dieses Bio-H₂-Produktionsprozesses bislang verhindert, da eine effiziente Beleuchtung im industriellen Maßstab (d.h. im Kubikmeter-Bereich) auch mit den ausgeklügeltsten Photobioreaktoren nicht umsetzbar ist. Mit dem Purpurbakterium *Rhodospirillum rubrum* können wir jedoch das photosynthetische H₂-Produktionspotential auch im Dunkeln ausschöpfen (Abb. 1), was ein Scale-Up mit herkömmlichen Edelstahl-Bioreaktorsystemen ermöglicht. Bei diesem „Dunkel-Photosynthese“-Prozess wird, mit Hilfe eines speziellen Nährmediums (M2SF, [2]), chemische Energie aus Fruktose genützt (anstelle von Lichtenergie). Die Verstoffwechselung der Fruktose führt in *R. rubrum* dazu, dass die inneren Membranen der Bakterien in einen über-reduzierten Zustand kommen (wie bei zu hoher Lichteinstrahlung), was seinerseits als Signal dafür wirkt, dass alle photosynthetischen Gene, auch die für die H₂-Produktion, eingeschaltet werden.

Abbildung 1: (A) Das Purpurbakterium *R. rubrum*; (B) Bekannter Prozess - anaerobe Photosynthese - unter N-Limitierung kann H₂ produziert werden; (C) durch ein spezielles Medium (M2SF) kann das Photosystem im Dunkeln unter semiaeroben Bedingungen induziert werden. Hier ist *R. rubrum* bis jetzt einzigartig unter den Purpurbakterien. (©Robin Ghosh, Universität Stuttgart)



Biogene Rest- und Abfallstoffe, insbesondere Trester aus der Fruchtsaft-Verarbeitung, enthalten noch sehr viel Fruktose und können somit als Ausgangsmaterial für das „Dunkel-Photosynthese“-Nährmedium dienen,

was den Prozess nachhaltig macht. Allerdings ist das Produkt Wasserstoff, im Vergleich zu anderen biotechnologisch erzeugten Produkten, relativ billig, was eine wirtschaftliche Umsetzung erschwert. Im RhoTech2-Projekt wollen wir dieser Herausforderung begegnen und den ersten wirtschaftlichen Prozess zur nachhaltigen Produktion von H₂ mit Hilfe photosynthetischer Bakterien entwickeln.



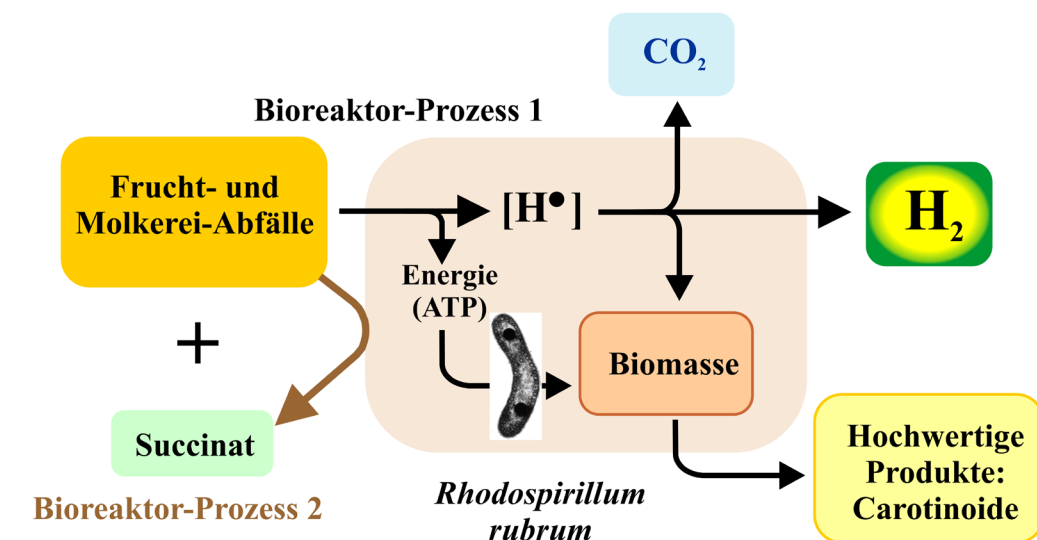
Aktivitäten und Maßnahmen

Um unsere biologische H₂-Erzeugung mittels Purpurbakterien wirtschaftlich zu machen verwenden wir einerseits biogene Rest- und Abfallstoffe als Nährsubstrat für den Bioreaktor-Prozess, und andererseits produzieren wir im gleichen Prozess simultan andere hochwertige Produkte, wie z.B. biogenes CO₂ und Carotinoide, die in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie zum Einsatz kommen können (Abb.2).

Im RhoTech2-Projekt bilden wir die gesamte Wertschöpfungskette ab, d.h. die nahezu vollständige Verwertung der biogenen Reststoffe zu H₂, CO₂ und Carotinoiden. In einer 100-Liter-Pilotanlage auf dem Gelände eines Fruchtsaftbetriebs werden die technischen Herausforderungen der H₂-Produktion aus Fruchttrester bearbeitet, Strategien für die Umsetzung des Kubikmeter-Industriemaßstabs entwickelt und eine Markteinführung evaluiert.

Im Standard-M2SF-Medium sind die Substrate Fruktose und Succinat (Bernsteinsäure), wobei Fruktose essentiell für den „Dunkel-Photosynthese“-Effekt ist. Das zweite, normalerweise sehr teure Substrat, Succinat, kann mit einem Prozess, den unser Kooperationspartner Prof. Dr. H. Grammel (HBC, Biberach) entwickelt hat, auch aus Fruktose mit *R. rubrum* produziert werden. Ursprünglich war angedacht gewesen, industriell hergestellte Fruktose aus der Maisverarbeitung zu verwenden, die den Weltmarkt überschwemmt und von daher sehr billig ist (ca. 400 € / metrische Tonne - das ist übrigens der Grund, warum viele Lebensmittel (z.B. Fruchtojoghurt) zu viel Fruktose enthalten, was gesundheitliche Schäden (bis hin zu Krebs) verursachen kann!).

Abbildung 2: Übersicht über den M2SF-Produktionsprozess. Gasprodukte sind H₂ und biogenes CO₂. Schwefelhaltige Substanzen oder CO sind nicht vorhanden. Das teure zweite Substrat, Succinat, wird in einem parallel-laufenden zweiten Bioreaktor-Prozess ebenfalls mit *R. rubrum* produziert. (©Robin Ghosh, Caroline Autenrieth, Universität Stuttgart [4].)



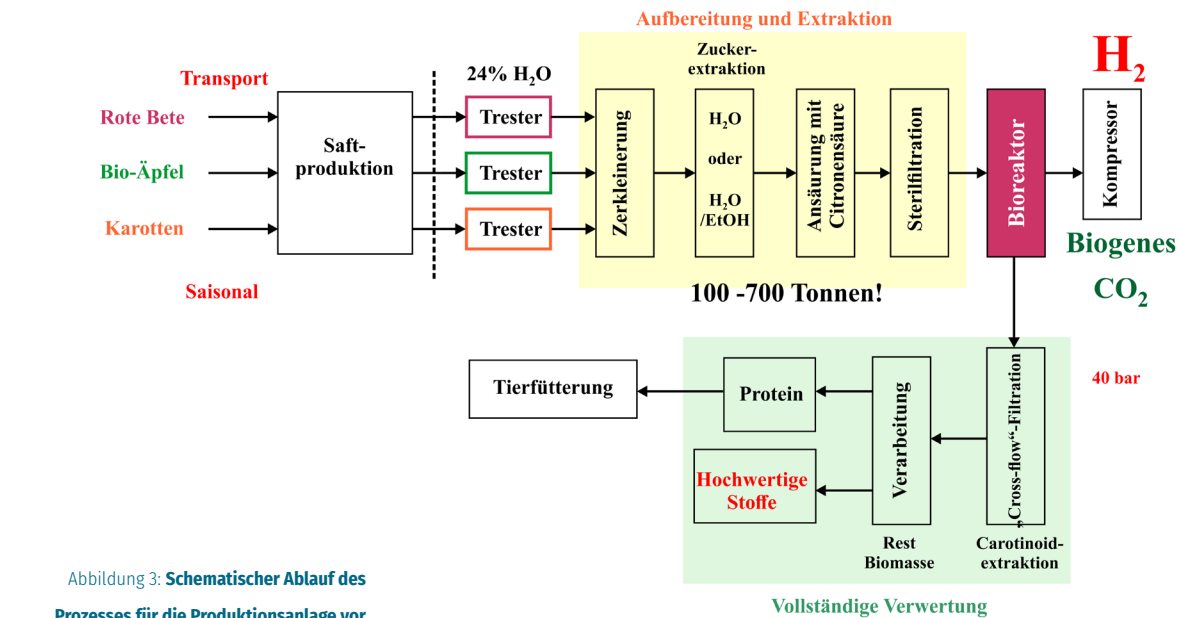


Abbildung 3: Schematischer Ablauf des Prozesses für die Produktionsanlage vor Ort. Nach der Fruchtsaftproduktion wird der verbliebene Trester zerkleinert und dann mit H₂O extrahiert. Der Extraktionssaft wird durch die Zugabe von Zitronensäure stabilisiert und unmittelbar vor Zugabe in den Bioreaktor sterilfiltriert. Die Gasprodukte (H₂ und CO₂) aus dem Bioreaktor werden mit Hilfe eines Kompressors komprimiert für die weitere Verwendung. Am Ende des Prozesses wird die Biomasse mit umweltfreundlichen Lösungsmitteln bearbeitet um hochwertige Stoffe (wie Carotinoide) zu extrahieren, und die übrig gebliebene Biomasse (Protein) wird für die Tierfütterung benutzt. (©Robin Ghosh, Universität Stuttgart)

Vor einiger Zeit (im Rahmen des Vorläuferprojektes RhoTech) haben wir allerdings festgestellt, dass die aus Trester gewonnene Fruktose ebenfalls sehr effizient für die H₂-Produktion mit *R. rubrum* genutzt werden kann [3,4]. Trester enthält immer noch beträchtliche Mengen an Zucker, die *R. rubrum* als Substrat nutzen kann. In Deutschland stehen tausende von Tonnen Trester zur Verfügung, die aus der Frucht- und Gemüsesaft-Herstellung stammen, und häufig entweder verbrannt oder für die landwirtschaftliche Nutzung (Tierfutter, Dünger) eingesetzt werden. Da diese Abfälle nicht als „NAWARO“ klassifiziert sind, sind sie für die Biogasanlage nicht geeignet, allenfalls gegen Gebühr.

In unserem BMWF- (vormals BMWK)-geförderten RhoTech2-Projekt entwickeln wir eine Anlage, in der der Trester für die Produktion von H₂ und hochwertigen Stoffen verwertet wird, und mit der der Prozess als Geschäftsmodell dargestellt werden soll (Abb. 3).

Obwohl der Prozess auch CO₂ produziert, ist die Gesamtgasproduktion sehr „sauber“, und es fehlt komplett an CO oder schwefelhaltigen Substanzen (Spuren von organischen Säuren wie Essigsäure oder Buttersäure können jedoch vorhanden sein, sind aber leicht abtrennbar), so dass das CO₂ auch industrielle Anwendung in speziellen Bereichen (Diagnostik, Klinik, Lebensmittelindustrie) findet. Nach dem Ablauf des Gasproduktionsprozesses, welchen wir vorerst als Fed-Batch Verfahren entwickeln, kann die *R. rubrum*-Biomasse noch zur Gewinnung hochwertiger Stoffe (z.B. Carotinoide) mit umweltfreundlichen organischen Lösungsmitteln extrahiert werden [5], und die verbleibenden Proteinreste können dann noch zu Tierfutter verarbeitet werden.

Erwartete Ergebnisse

Chemische Analysen von H₂O-extrahiertem Trester zeigen, dass Trester aus Bio-Äpfeln und Rote Bete (von unserem Kooperationspartner Bayer Gemüse- und Fruchtsaft GmbH) weit mehr Fruktose enthält als Karotten-Trester, was sie für den *R. rubrum*-Prozess geeigneter macht (Abb. 4).

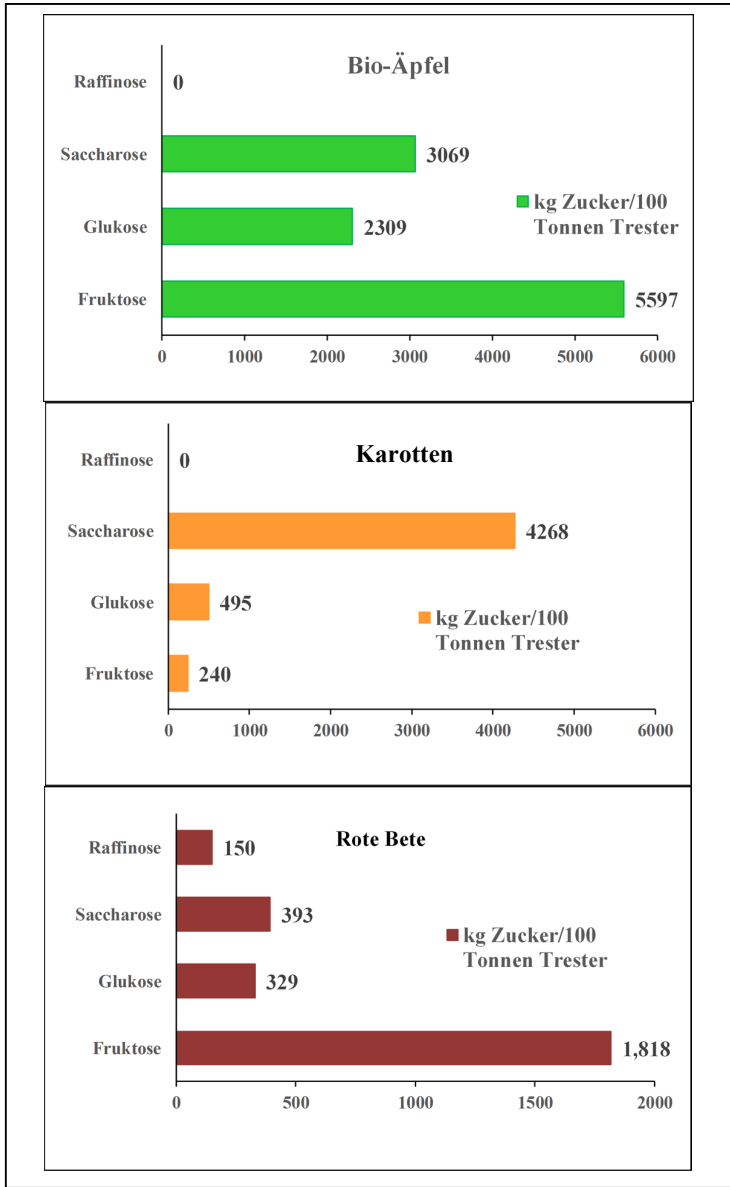


Abbildung 4: Zuckeranalyse von Trester aus verschiedenen Quellen. Der Zucker-gehalt wurde mit HPLC quantifiziert. Glukose kann bislang nicht verwertet werden. Allerdings enthält Karotten-safttrester-Extrakt sehr viel Saccharose, welche, nach Einwirkung von Invertase, auch verwertbare Fruktose zu Verfügung stellen würde. Andere Trester-Sorten, die potentiell vielversprechend sind (z.B. aus Pflaumen- oder Heidelbeeren-Fruchtsaftproduktion), werden noch untersucht. (©Robin Ghosh, Universität Stuttgart)

Ein wesentlicher Faktor, der den Erfolg des Prozesses beeinflusst, ist die Konservierung und Verarbeitung von größeren Mengen Trester in sehr kurzer Zeit. Die Herausforderung wird in Tabelle 1 ersichtlich:

Kulturmedium	Menge H ₂ /3000 l Kultur	Benötigte Fruktose/3000 l Kultur	Benötigter Trester
M2SF+	60 g	3 kg	0,16 Tonnen
M2SF+	180 g	30 kg	1,64 Tonnen
M2SF+ + N ₂ ase	900 g	30 kg	1,64 Tonnen
NCD + N ₂ ase	9 kg	150 kg ?	8,24 Tonnen

Tabelle 1: Berechnete Mengen von H₂, welche in einer 3000 l Kultur zu erwarten sind. M2SF+ ist eine Weiterentwicklung von M2SF; +N₂ase, biotechnologische Induktion der Nitrogenase (N₂ase), welche zu einer ca. 5-fachen Erhöhung von H₂-Produktion führt; HCD, High Cell Density (Medium) – ein Fed-Batch M2SF-basiertes Verfahren, welches von unserem Kooperationspartner, Prof. Dr. H. Grammel (HBC, Biberach), entwickelt wurde [6]. Die Menge an benötigtem Trester basiert auf unseren Analysen mit Trester aus Rote Bete (1,8 Tonnen Fruktose/100 Tonnen Trester (C. Autenrieth und R. Ghosh, Manuskript in Vorbereitung)).

Die erwähnten Berechnungen nehmen allerdings an, dass nur ca. 6 % der zugefütterten Fruktose als H₂ erscheint, wobei die restliche Fruktose in die Produktion von Biomasse geht. Diese Verteilung kann sowohl gentechnisch als auch Prozesstechnisch beeinflusst werden. Wir verfolgen zur Zeit eine Strategie, in welcher wir die Biomasse-Produktion während der H₂-Produktionsphase limitieren, so dass die Nutzung von Trester für Letzteres wesentlich effizienter wird (insgesamt um ungefähr den Faktor 5). Eine weitere positive Beobachtung ist, dass (z.B.) Trester-Extrakte aus Rote Bete und Bio-Äpfeln deutlich mehr H₂ produzieren als von ihrem Fruktosegehalt allein zu erwarten wäre. Die Ursache dafür wird zur Zeit intensiv untersucht.

Wir erwarten bis Ende 2026 demonstriert zu haben, dass nutzbare Mengen von H₂ aus Trester produziert werden können, und den Prozess nahezu marktreif zu haben. Der 3000l-Projektteil wird ein Meilenstein in der Entwicklung von Purpurbakterien für H₂-Produktion sein.

Literatur

- [1] BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie (2021): Stellungnahme: Biomasse und Bioenergie als Teil der Wasserstoffwirtschaft. URL: <https://www.energetische-biomassennutzung.de/de/node/72> (Stand 01.07.2025).
- [2] Ghosh R, Hardmeyer A, Thoenen I, Bachofen R (1994): Optimization of Sistrom medium for the semi-aerobic growth of Rhodospirillum rubrum with the maximal yield of photosynthetic membranes. Applied Environmental Microbiology Bd. 60, pp. 1698-1700.
- [3] Autenrieth C, Shaw S, Gosh R (2021): New approach for the construction and calibration of gas-tight setups for biohydrogen production at the small laboratory scale. Metabolites Bd. 11, 667.
- [4] Autenrieth C, Ghosh R (2023): RhoTech: Neue Strategie zur Wasserstoff-Produktion aus Frucht- und Molkerei-Abfällen mit Hilfe von Purpurbakterien. In: Thrän D., Händler T. (Hrsg.): Focus on: Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt: Projektergebnisse 2021-2022. Fokusheft Energetische Biomassennutzung, Leipzig, ISSN (online): 2701-1860, ISBN: 978-3-946629-94-8, DOI: 10.48480/hvyq-3t55. pp. 154-161:
- [5] Autenrieth C, Ghosh R (2019): The methoxylated, highly conjugated C40 carotenoids, spirilloxanthin and anhydrorhodovibrin, can be separated using high performance liquid chromatography with safe and environmentally friendly solvents. Metabolites Bd. 9, 20.
- [6] Zeiger L, Grammel H (2010): Model-based high cell density cultivation of Rhodospirillum rubrum under respiratory dark conditions. Biotechnol. Bioeng. 105, pp. 729-739.

HERAUSGEBENDE	Tina Händler, Joshua Röbisch DBFZ Deutsches Biomasseforschungsfentrum gemeinnützige GmbH Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig www.energetische-biomassenutzung.de Fokusheft Energetische Biomassenutzung Focus on: Bioenergie und Wasserstoff Konferenzbeiträge des Statusseminars 29. & 30.04.2025.
GESCHÄFTSFÜHRUNG	Prof. Dr. mont. Michael Nelles (wiss. Geschäftsführer) Dr. Christoph Krukenkamp (admin. Geschäftsführer)
REDAKTION/V.I.S.D.P.	Tina Händler
LAYOUT & SATZ	Joshua Röbisch
BILDER	Diverse Bilder, sofern nicht am Bild vermerkt: © DBFZ. Titelgestaltung: Joshua Röbisch Das DBFZ ist nicht verantwortlich für den Inhalt der eingereichten Beiträge. Die Verantwortung für die Texte sowie der Bilder/Grafiken liegt bei den Autor:innen.
FÖRDERUNG	Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. © 2025 Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne die schriftliche Genehmigung der Heraus- geber:innen vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf anderen digitalen Datenträgern. ISSN: 2701-1860 (online) ISBN: 978-3-949807-32-9 DOI: 10.48480/g25p-6q02

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger:



Begleitforschung:

