

Wasserstoff aus Biogas

Erfolgskonzept vom Bauernhof

Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland bleibt hinter den Erwartungen zurück, was innovative Lösungen für die nachhaltige Produktion unabdingbar macht. Das Projekt „BioH2Ref“ zeigt, wie durch die dezentrale **Dampfreformierung von Biogas effizient und klimafreundlich Wasserstoff erzeugt** werden kann. Gemeinsam mit Forschungspartnern entwickelte die BtX energy GmbH eine Pilotanlage, die sämtliche Reinheitsanforderungen erfüllt und mit einem negativen THG-Fußabdruck überzeugt. **Im Projekt wurden thermodynamische und kinetische Herausforderungen gemeistert**, wodurch eine Leistung von 115 kg Wasserstoff pro Tag bei einem Kaltgaswirkungsgrad von über 60 Prozent erreicht werden konnte. Die Technologie bietet eine marktreife, THG-negative Lösung für erneuerbaren Wasserstoff **und trägt wesentlich zur Reduktion von Treibhausgasen und zur Erreichung der Klimaziele bei**. Der vorliegende Beitrag beschreibt die technologischen Grundlagen sowie die Ergebnisse des Projektes.

von: Dr.-Ing. Andy Gradel, Leon Müller-Noell (beide: BtX energy GmbH) & Christopher Wünnig (RWTH Aachen)

Der Wasserstoffhochlauf in Deutschland verläuft schleppend. Während nach wie vor diskutiert wird, in welcher Anwendung grüner Wasserstoff primär sein Zuhause finden soll, sind durch internationale Betrugsfälle die THG-Quoten zusammengebrochen und relevante Förderprogramme aufgrund des Loches im KTF auf Eis gelegt. Umso mehr ist es jetzt von Bedeutung, wirtschaftliche Lösungen zur nachhaltigen Wasserstoffherzeugung zu finden.

Durch die zunehmende Bedrohung des Biogasanlagenbestandes nach dem EEG-Ende ist die dezentrale Dampfreformierung von Biogas hier eine prädestinierte Lösung, die im BMWK-Förderprojekt „BioH2Ref“ jüngst in die Marktreife überführt wurde. Die BtX energy GmbH hat zusammen mit dem Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen und der Familie Schleupen auf deren Hof in Krefeld eine Pilotanlage aus dem F&E-Stadium in die Anwendung überführt. Das Produkt er-

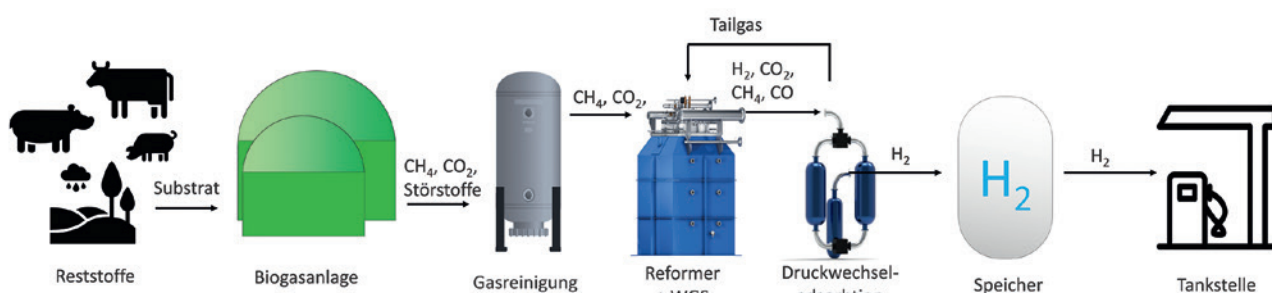
füllt dabei sämtliche Reinheitsanforderungen und ist derzeit Rekordhalter in der Klimabilanz durch einen negativen THG-Fußabdruck.

Technologische Grundlagen

Prozessgrundlagen

Die Dampfreformierung von Biogas ist stark verwandt mit der herkömmlichen Wasserstoffproduktion aus Erdgas, birgt aber gewisse Herausforderungen an die Thermodynamik und die Erreichung hoher Effizienzen. Aufbereitetes Wasser in Form von Dampf wird hier mit entschwefeltem Rohbiogas katalytisch in ein wasserstoffreiches Synthesegas reformiert. Durch einen oder mehrere Wassergas-Shift-Reaktoren mit nachgeschalteter Kühlung und Druckwechseladsorption wird hieraus reiner Wasserstoff gewonnen. Das sogenannte Tailgas der Abscheidung kann zur Wärmebereitstellung für die endotherme Reaktion im Reformier eingesetzt werden. **Abbildung 1** zeigt das Schema der Dampfreformierung von Biogas.

Abb. 1: Schema der Dampfreformierung von Biogas



Quelle: BtX energy GmbH

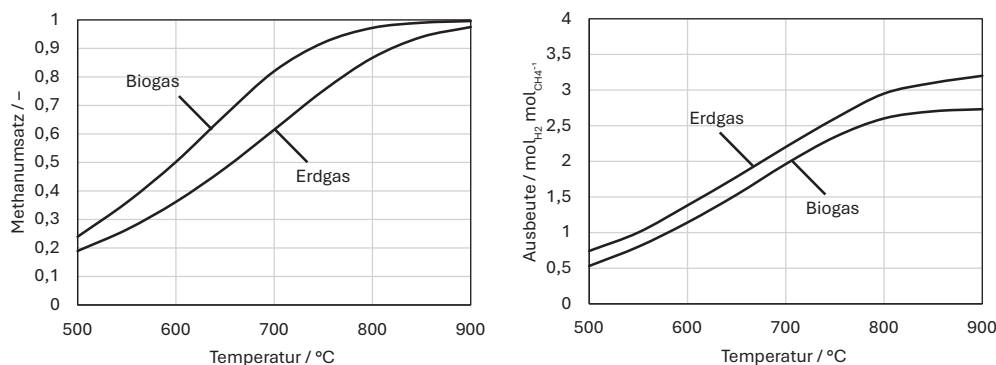


Abb. 2: Methanumsatz und Wasserstoffausbeute bei thermodynamischem Gleichgewicht im primären Reformierer

Thermodynamik

Im Vergleich zum reinen Prozessschema unterscheidet sich die Thermodynamik in der direkten Reformierung von Biogas aufgrund des hohen CO_2 -Anteils im Gas wesentlich. Kohlenstoffdioxid stellt dabei jedoch keine tote Komponente dar, sondern nimmt über die sogenannte Trockenreformation aktiv an der Wasserstoffbildung teil. Das thermodynamische Gleichgewicht ist daher bei den richtigen Anlagenparametern günstiger für einen höheren Umsatz als bei der reinen Methanreformierung. **Abbildung 2** zeigt beispielhaft den Methanumsatz sowie die Wasserstoffausbeuten für Erdgas sowie Biogas mit 50 Prozent CH_4 und 50 Prozent CO_2 bei 10 bar über unterschiedliche Temperaturen.

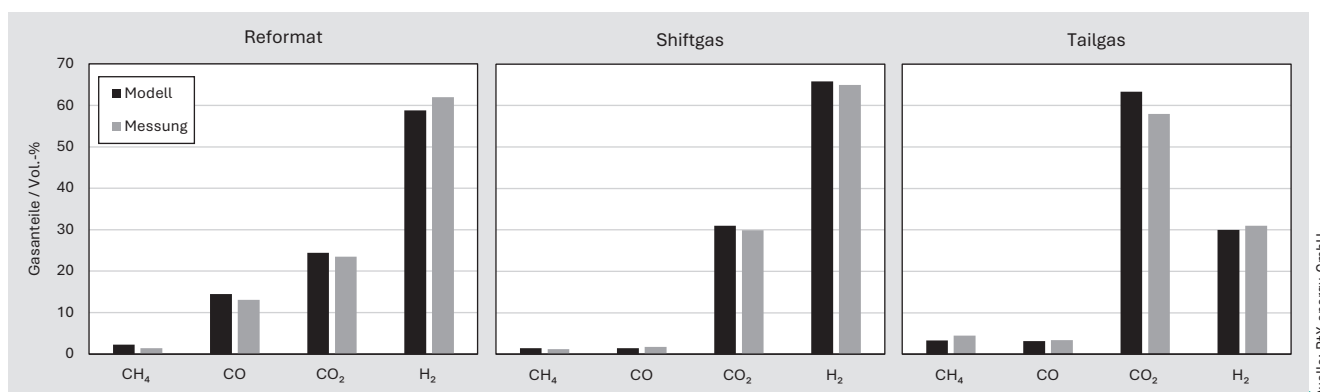
Wie in der spezifischen Wasserstoffausbeute zu erkennen ist, ist das Gleichgewicht durch den hohen CO_2 -Anteil im Eingangsgas im Vergleich zum Erdgas leicht benachteiligt, weshalb eine effiziente nachgeschaltete Shift-Stufe essenziell für hohe Erträge ist. Im Projekt BioH2Ref wurde daher vermehrt Fokus auf die thermische und kinetische Optimierung dieser Prozessstufe gelegt, die durch ein geschicktes Reaktorkonzept mit integriertem Wärmetausch das Kohlenmonoxid aus dem Reformat fast vollständig (< 2 Prozent Rest-CO) wandelt.

Herausfordernd waren außerdem die Erreichung hoher Umsätze und Effizienzen bei gleichzeitiger Erfüllung der Reinheitsanforderungen, da der Prozess nicht nur von den thermodynamischen Bedingungen abhängig ist, sondern auch von katalysatorspezifischen Reaktionsraten, effizientem Wärmetausch und bestmöglicher Kopplung von Quellen und Senken.

Modellprognosen

Im Rahmen von BioH2Ref und dem Schwesterprojekt BioH2Log wurden vom Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen, vom Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik der Technischen Universität München und von BTX energy eine Vielzahl von numerischen Reaktor- und Prozessmodellen verfasst. Für die Schaffung einer grundlegenden Erwartungshaltung wurde ein Gleichgewichtsmodell für die beiden Reaktoren in ein händisch programmiertes Prozessmodell integriert, das Wärmebereitstellung, Verluste sowie Kondensat und Druckwechseladsorption betrachtet. Das Prozessmodell konnte den Anlagenbetrieb in den meisten Fällen mit über 95 Prozent Genauigkeit vorhersagen, die prognostizierten und gemessenen Gaszusammensetzungen für einen Beispielparametersatz sind in **Abbildung 3** dargestellt.

Abb. 3: Modellprognosen und Messdaten zur Gaszusammensetzung, Feed = $18 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$, $\text{S/C} = 3$



Das Modell half durch Variation unterschiedlicher Parameter wie Reaktor- oder Abgastemperaturen, Optimierungspotenziale zu identifizieren, und prognostizierte den technisch mit der aktuellen Anlagenkonfiguration erreichbaren Wirkungsgrad von knapp 62 Prozent, der im Projekt dann auch fast real erreicht wurde. Weitere Optimierungsmöglichkeiten wurden außerdem für zukünftige F&E-Arbeiten an der Technologie aus den Modellen interpretiert.

Im Rahmen des Projektes wurde ein weiteres Modell für die einzelnen Reaktorschritte entwickelt, das auf thermodynamischen und kinetischen Grundlagen basiert und durch umfangreiche Messdaten validiert wurde. Dieses Modell ermöglicht nicht nur präzise Prognosen über die Wasserstoffausbeute, sondern erlaubt auch eine detaillierte Analyse des Wirkungsgrades der gesamten Prozesskette. In **Abbildung 4** sind die trockenen Gaszusammensetzungen in Reformereinheit und Wassergas-Shift über die Reaktorlänge dargestellt. Die an der Anlage aufgenommenen Messdaten sind ebenfalls in den Diagrammen sichtbar. Die Modellierungsergebnisse weisen nur geringe Abweichungen von den Messwerten auf, was die hohe Genauigkeit und Va-

lidität der verwendeten Modellansätze unterstreicht. In diesem Betriebspunkt mit 78 Prozent Last ist eine Produktionsmenge von 3,59 kg H₂/h zu erwarten. Das eingesetzte Biogas weist einen Methangehalt von 55 Prozent CH₄ und 45 Prozent CO₂ auf.¹

Mit diesen Erkenntnissen können Betriebsparameter gezielt optimiert werden, um sowohl die Produktionsmenge als auch die Effizienz weiter zu steigern.

Vorteile der Wasserstoffproduktion aus biogenen Reststoffen

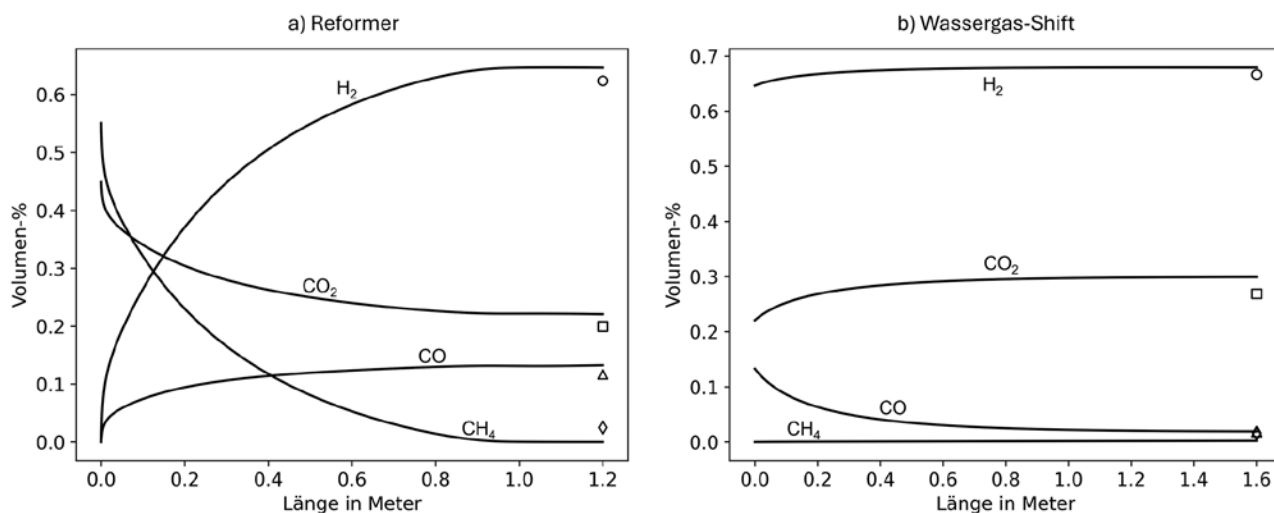
Grundsätzlich wird bei der Produktion von biogenem Wasserstoff nur klimaneutrales Kreislauf-CO₂ transportiert und, abhängig von den eingesetzten Verfahren, ggf. emittiert. Reststoffe wie Gülle werden jedoch in der Regel als Wirtschaftsdünger genutzt, der auf dem Feld klimaschädliche Methanemissionen verursacht. Durch das Einfangen und die Nutzung dieser schädlichen Gase in der Biogasanlage wird das Produkt als effektive THG-Senke anerkannt. Außerdem kann in dieser Prozesskette zusätzlich das ursprünglich pflanzliche Kreislauf-CO₂ aus den eingesetzten Futterpflanzen abgeschieden und genutzt werden, um die Senke zusätzlich zu verstärken.

Biogener Wasserstoff ist demnach derzeit die einzige marktreife Lösung für eine THG-negative Produktion, welche im Projekt BioH2Ref auch anerkannt und zertifiziert wurde. Dieser Faktor ist nicht nur für die Umwelt relevant, sondern auch ein erheblicher Hebel für eine schnelle Wirtschaftlichkeit, da das Produkt als fortschrittlicher Biokraftstoff seit 2023 am THG-Quotenhandel teilnehmen darf, aber auch z. B. auf den Zertifikatehandel in der Industrie angerechnet werden kann. Zum Projektende ist der THG-Quotenpreis zwar durch die aktuellen Klimabetrugsfälle stark eingebrochen, dennoch erreicht das Kilogramm Wasserstoff auch bei einem Börsenpreis von 80 Euro toCO₂-1 noch einen Zusatzerlös von rund 5 Euro. Zu Zeiten von Börsenpreisen von über 400 Euro toCO₂-1 waren dies entsprechend über 25 Euro pro Kilogramm, was deutlich über den Gestehungskosten liegt.

Technologische Fortschritte und Ergebnisse

Der Projektstart von BioH2Ref begann 2022 mit der Modifikation einer Methanreformeranlage für den direkten Einsatz mit Biogas. Die Anlage wurde im Herbst 2022 fertiggestellt und erstmalig mit Erdgas zu Testzwecken be-

Abb. 4: Modellprognosen und Messdaten zur trockenen Gaszusammensetzung in Reformereinheit und Wassergas-Shift, Feed = 25 Nm³ h⁻¹ (78 % Last), S/C = 3,22, H₂_Prod = 3,59 kg/h



Quelle: IOT, RWTH Aachen

¹ Kee – Chemically Reacting Flow (Kap. 9) 2003



Quelle: BtX energy GmbH

trieben, im Frühjahr 2023 wurde sie nach Erteilung der Baugenehmigung und Integration dann auch am Zielort Krefeld wieder in Betrieb genommen. **Abbildung 5** zeigt die fertige Anlage auf dem Lefkeshof in Krefeld.

Die ersten Ergebnisse waren erwartungsgemäß herausfordernd – zu Beginn limitierten technische Faktoren wie unbekannte Katalysator-Reaktivitäten beim Einsatz von Biogas und Hürden im Wärmeeintrag durch ein grundlegend anderes Brennverhalten des Mischgases die erreichbare Nennleistung auf ca. 50 Prozent und den Kaltgaswirkungsgrad auf knapp unter 50 Prozent. Das dreijährige BMWK-Förderprojekt konnte jedoch alle technischen Hürden identifizieren und beheben, sodass am Ende eine Nennleistung von 115 Prozent (ent-

spricht einer Produktion von $115 \text{ kg}_{\text{H}_2} \text{ d}^{-1}$) mit über 60 Prozent Kaltgaswirkungsgrad erreicht werden konnte. Die in den ersten Messungen noch identifizierten Spuren von CO und H_2O im Produkt sind heute ebenfalls nicht mehr zu messen bzw. unterhalb der zulässigen Grenzwerte.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden in zahlreichen Versuchsreihen und Modifikationen 2023 und 2024 Druckverluste optimiert, Reaktoren verbessert oder ausgetauscht, Parameter variiert, eine zweite Booster-Shift-Stufe nachgerüstet und viele weitere Prozessoptimierungen implementiert. Die technischen Daten der Pilotanlage in Krefeld und einer heute erhältlichen kommerziellen Anlage gibt BtX nun wie in **Tabelle 1** dargestellt an. ▶

Abb. 5: Biogasreformeranlage auf dem Lefkeshof in Krefeld

Tabelle 1: Technische Daten der Pilotanlage in Krefeld und einer kommerziellen Anlage		
Technischer Parameter	Pilotanlage	kommerzielle Anlage
Wirkungsgrad H_2	55-60 %	
Wirkungsgrad Wärme	15-20 %	
Systemeffizienz	70-80 %	
Ausgangsdruck	10 bar	
Produktreinheit	DIN EN 17124	
Biogasverbrauch	$50 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$	$200 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$
Stromverbrauch	ca. 10 kW	ca. 40 kW
Nenn-Produktionskapazität	100 kg d^{-1}	400 kg d^{-1}
Platzbedarf	40' Container	25' + 40' Container + 20' PSA
Installationskosten	ca. 1.5 Mio. Euro	ca. 3 Mio. Euro

Quelle: BtX energy GmbH

Ebenfalls innerhalb des Projektes wurde die THG-Bilanz der gesamten Prozesskette vom Tier bis zum Wasserstoff ermittelt. Als Grundlage hierfür wurde das gesetzlich für den Quotenhandel zugelassene Zertifizierungssystem „REDCert“ verwendet, damit die Anlage auch marktnah für einen zukünftig geplanten Absatz zertifiziert werden konnte. Durch die Methanvermeidung wurde hierbei eine THG-Bilanz von rund $-22 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{äq}} \text{ kg}_{\text{H}_2}^{-1}$ bilanziert und bestätigt, durch Eigenstromnutzung wäre noch mehr möglich. Gegen Diesel gerechnet ergibt das eine Minderung von rund $30 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{äq}}$ pro vertanktem Kilogramm Wasserstoff, die kleine Pilotanlage kann bei Vollauslastung demnach rund $1.200 \text{ t CO}_{2\text{äq}}$ jährlich einsparen.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Wasserstoff aus biogenen Quellen ist per Definition der Europäischen Kommission ein fortschrittlicher Biokraftstoff und genießt damit die gleichen Vorteile (steuerliche Vergünstigungen und Anerkennung im THG-Minderungsquotenhandel für Treibstoffe) [1]. Voraussetzung hierfür ist, dass Substrate nach Anhang IX der EU-Richtlinie 2018/2001 als Edukt eingesetzt werden. Im nationalen Recht wurde dies 2021 bei der Novellierung des Bundesimmissionsschutzgesetzes verankert und im Februar 2024 in § 13 der 37. BImSchV. als direkter Verweis auf die 38. ergänzt. Als fortschrittlicher Biokraftstoff kann dieser Wasserstoff dementsprechend doppelt angerechnet werden [2, 3, 4].

Etabliert wurde dies auch in zahlreichen Investitionsförderprogrammen für H_2 -Technologien, die explizit mindestens anteilig eine Vertankung von Wasserstoff aus der Elektrolyse mittels erneuerbarer Energien oder dem Einsatz von biogenen Reststoffen als Förderkriterium für die Infrastrukturkosten voraussetzen. Der Startpunkt wäre perfekt: Zahlreiche Biogasanlagen mit Gülle-, Mist- und Bioabfalleinsatz fallen aus dem EEG und stehen teilweise aufgrund der wegfallenden Wirtschaftlichkeit kurz vor der Abschaltung.

Hinderlich hingegen sind viele der aktuellen Entwicklungen wie die vollständige Streichung von Zuschüssen für Wasserstofffahrzeuge sowie das zum Jahresstart geplante Förderprogramm für Erzeugungsanlagen für klimafreundliche Treibstoffe. Erschwerend kommt außerdem hinzu, dass der THG-Quotenmarkt sich nach wie vor nicht vom drastischen Einbruch durch falsch zertifizierte Biokraftstoffimporte im Jahr 2023 erholt hat und viele Projekte somit aktuell unwirtschaftlich sind. Auch wenn die Erlöse aufgrund der negativen THG-Bilanz beim richtigen Substrat noch höher sind als die einer Elektrolyse – der Steigbügelhalter „Bio-Wasserstoff“ als Turbo für den Wasserstoffhochlauf könnte mit den richtigen Förderinstrumenten deutlich beschleunigt werden und die Wirtschaftlichkeitslücke bis zur breiten Implementierung von Wasserstofftechnologien schließen.

Fazit

Biogener Wasserstoff war bis vor dem Projekt BioH2Ref zwar als Nischentechnologie im F&E-Stadium manchem Insider bekannt, wurde im Rahmen des Projektes aber erstmalig marktreif präsentiert und demonstriert. Das erfolgreich abgeschlossene Vorhaben hat gezeigt, dass das Produkt zuverlässig, sauber und effizient direkt am Hof hergestellt werden kann und den Industrieanforderungen gerecht wird.

Biowasserstofftechnologien sind im Allgemeinen im Gegensatz zur Elektrolyse aus fluktuierenden Quellen dauerlastfähig und können damit schnell eine verlässliche Quelle für erneuerbaren Wasserstoff darstellen. Durch die Verhinderung von Methanemissionen der Substrate sowie die beschriebenen Möglichkeiten zur Schaffung von C-Senken durch CCU ist der Einsatz von Biomasse derzeit die einzige Möglichkeit zur Herstellung von Wasserstoff mit einer negativen THG-Bilanz. Dies bietet durch die Anerkennung im Quotenhandel eine schnelle Wirtschaftlichkeit und einen hohen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele. ■

Literatur

- [1] Europäische Kommission: Fragen und Antworten zu den delegierten Rechtsakten der EU über erneuerbaren Wasserstoff, 2023. Online unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda_23_595
- [2] Bundesministerium der Justiz: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, Berlin 2024.
- [3] Bundesministerium der Justiz: Verordnung zur Neufassung der Siebenunddreißigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 1, 2 (Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote), Berlin 2024.
- [4] Bundesministerium der Justiz: Achtunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 1, 2, Berlin 2024.

Die Autoren

Dr.-Ing. Andy Gradel ist Geschäftsführer und Gründer der BtX energy GmbH.

Leon Müller-Noell ist Projektleiter für Wasserstoff aus Biogas und verantwortlich für Genehmigung und Versuchsbetrieb der Pilot-Reformeranlage bei der BtX energy GmbH.

Christopher Wünnig ist Promovend und Wissenschaftler im Projekt BioH2Ref am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen.

Kontakt:

Dr.-Ing. Andy Gradel
BtX energy GmbH
Albert-Einstein-Str. 1
95028 Hof
Tel.: 0171 2642839
E-Mail: andy.gradel@btx-energy.de
Internet: www.btx-energy.de

Leon Müller-Noell
BtX energy GmbH
Albert-Einstein-Str. 1
95028 Hof
Tel.: 0176 24773723
E-Mail: leon.mueller-noell@btx-energy.de
Internet: www.btx-energy.de

Christopher Wünnig
RWTH Aachen
Kopernikusstr. 10
52074 Aachen
Tel.: 0241 80-25949
E-Mail: wuenning@iob.rwth-aachen.de
Internet: www.iob.rwth-aachen.de

„Blauer, türkiser und grüner Wasserstoff haben schon heute das Potenzial, THG-Emissionen im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik um 50 bis 95 Prozent zu senken.“

DR.-ING. FRIEDEMANN MÖRS

*Gruppenleiter Verfahrenstechnik an der DVGW-Forschungsstelle
am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie*



© DVGW

Wir regeln Wasserstoff.



Der Einsatz von Wasserstoff erfordert veränderte und neue technische Sicherheitsstandards und Anforderungen bei Bau und Betrieb von Gasanlagen.

Mit dem H₂-Regelwerk legt der DVGW den aktuellen Stand der Technik vor und unterstützt Sie beim sicheren und effizienten Einsatz von Wasserstoff.

Jetzt informieren auf
shop.wvgw.de/wasserstoff-regelwerk/

➔ www.h2-dvgw.de