

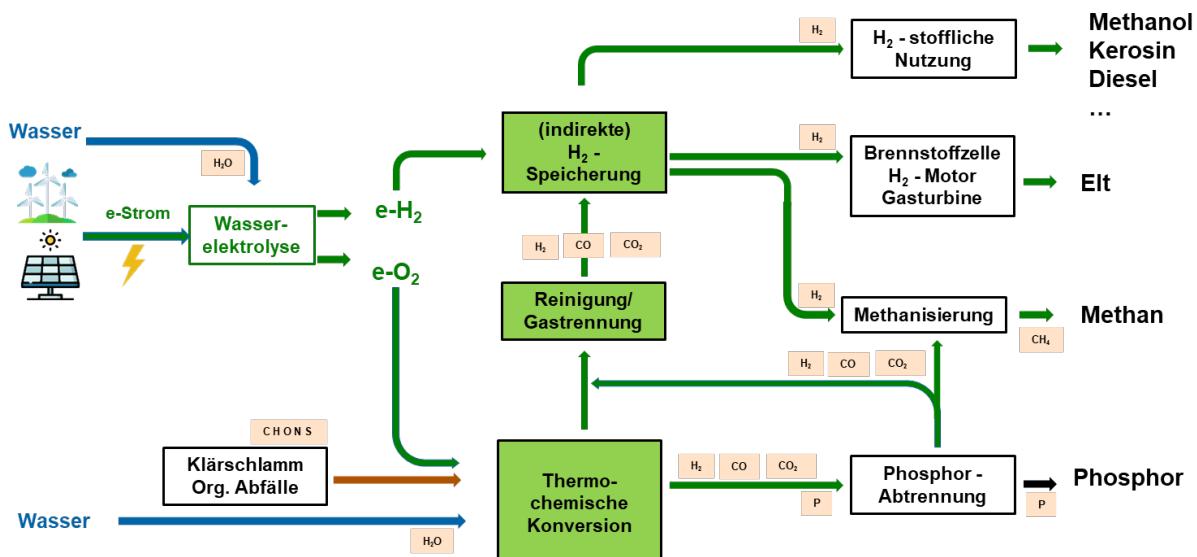
# HERSTELLUNG VON WASSERSTOFF AUS BIOGENEN REST- UND ABFALLSTOFFEN

Eric FRANKE<sup>1(\*)</sup>, Julien GÖTHEL<sup>4(\*)</sup>, Andreas HERRMANN<sup>2</sup>, Shreyas Rohit SRINIVAS<sup>1</sup>, Jessica Schneider<sup>3</sup>, Uwe PAHL<sup>4</sup>, Andreas RICHTER<sup>1</sup>, Martin GRÄBNER<sup>1</sup>

## Kurzbeschreibung des Konzeptes

Die fortschreitende Defossilisierung und Dekarbonisierung zentraler Wirtschaftssektoren erfordert die Entwicklung robuster, ressourceneffizienter und wirtschaftlich tragfähiger Verfahren zur Herstellung und Speicherung von Wasserstoff. Thermochemische Verfahren zur Wasserstoffgewinnung rücken zunehmend in den Fokus. Besonders biogene Rest- und Abfallstoffe, darunter Klärschlamm mit einem jährlichen Aufkommen von rund 1,7 Mio. t in Deutschland [1], stellen eine bislang unzureichend genutzte Rohstoffquelle dar. Sie enthalten neben organischem Kohlenstoff zur Synthesegaserzeugung auch kritische Elemente wie Phosphor, dessen Rückgewinnung im Zuge der nationalen Abfall- und Klärschlammverordnung eine wachsende Bedeutung erhält. Durch eine effiziente Rückgewinnung und Nutzung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors könnte die Importabhängigkeit Deutschlands um bis zu 40% reduziert werden [2]. Parallel dazu werden alternative, skalierbare Wasserstoffspeicher- verfahren benötigt, um die Kosten und Risiken konventioneller Speichertechnologien zu reduzieren. Die reversible Eisenreduktion bietet hierbei einen vielversprechenden Ansatz, da Eisen als chemisch stabiler, sicher transportierbarer und hochzyklischer Energiespeicher fungieren kann. [3]

Das Verbundprojekt *InnoTeam Bio2H<sub>2</sub>* verfolgt die Entwicklung eines ganzheitlichen, labortechnisch validierten Prozesskonzepts zur gekoppelten Wasserstofferzeugung, Phosphorrückgewinnung und chemischen Energiespeicherung. Die Prozesskette besteht aus drei Teilschritten.



Zuerst erfolgt die thermochemische Konversion organischer Reststoffe zu einem wasserstoff- und kohlenmonoxidreichen Synthesegas. Durch eine geeignete Prozessführung unter inerten und reduzierenden Bedingungen werden Phosphorverbindungen im Temperaturbereich von 970-1050°C

<sup>1(\*)</sup>Eric.Franke@iec.tu-freiberg.de, <sup>4(\*)</sup>Julien.Goethel@ambarte.de

<sup>1</sup>Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, TU Bergakademie Freiberg | Fuchsmühlenweg 9 D | 09599 Freiberg, Deutschland

<sup>2</sup>DBI-Virtuhcon GmbH | Halsbrücker Str. 32 | 09599 Freiberg, Deutschland

<sup>3</sup>MIVIA AG | Halsbrücker Str. 32 | 09599 Freiberg, Deutschland

<sup>4</sup>AMBARtec AG | Erna-Berger-Straße 17 | 01097 Dresden, Deutschland

reduziert, in die Gasphase überführt und somit für eine anschließende Trennung zugänglich gemacht. Laborversuche zeigen, dass unter diesen Bedingungen bis zu 98 % des im Einsatzstoff enthaltenen Phosphors in die Gasphase überführt werden kann. Anschließend wird der gasförmige Phosphor selektiv abgeschieden und als Wertstoff zurückgewonnen, wodurch eine stoffliche Nutzung für chemische Grundstoffprozesse oder Düngemittelanwendungen ermöglicht wird. [4] Zuletzt dient das phosphorabgereicherte Synthesegas der Energiespeicherung und direkten Wasserstoffgewinnung. Die Integration in den Chemical-Looping-Prozess mit Eisenoxid ermöglicht die Nutzung dieses biogenen Schwachgases zur Reduktion des Eisenoxids, gefolgt von einer Reoxidation mit Wasserdampf zur Wasserstofferzeugung. Der entscheidende verfahrenstechnische Vorteil liegt in der intrinsischen Gasreinigung und CO<sub>2</sub>-Aufkonzentration im Reduktionsschritt, während im Oxidationsschritt ein hochreiner, gasmatrixfreier Wasserstoff entsteht. Zudem eröffnet dieser Pfad durch die Verwendung biogenen Kohlenstoffs in Kombination mit einer potenziellen CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Reduktionsabgas die Möglichkeit zu negativen Emissionen (BECCS), während gleichzeitig ein Abfallstrom energetisch oder stofflich genutzt wird. [5]

Für die technische Realisierung dieser Prozesskette ist ein tiefes Verständnis der Materialdegradation der Eisenpellets im Reduktions- und Oxidationszyklus von zentraler Bedeutung. Hierzu wird im Projekt ein KI-gestütztes metallographisches Analyseverfahren entwickelt, das eine automatisierte, objektive Bewertung von Gefügeveränderungen ermöglicht. Diese Analysen liefern wichtige Informationen für die Prozesssteuerung, insbesondere hinsichtlich Zonenwachstum, Porenentwicklung und mechanischer Stabilität, und tragen zur Optimierung der Zyklfestigkeit der Eisenpellets bei.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Projekts ist die CFD-gestützte Strömungssimulation. Die Simulationsergebnisse werden genutzt, um Hotspots, ungleichmäßige Konversionszonen, lokale Reduktionsgradienten sowie potenzielle Anströmungsprobleme der Eisenpellets zu identifizieren. Aufbauend darauf wird eine vereinfachte 1D-Modellierung entwickelt, die eine rechenzeiteffiziente Darstellung der Stoff- und Reaktionsumsätze erlaubt und damit eine schnelle Bewertung von Prozessvarianten ermöglicht.

Das integrierte Konzept des Projekts *Bio2H<sub>2</sub>* bietet somit mehrere technologische Synergien: Die thermochemische Konversion erzeugt nicht nur ein wasserstoffreiches Gas, sondern ermöglicht gleichzeitig die nahezu vollständige Abtrennung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors. Die eisenbasierte Wasserstoffspeicherung stellt einen innovativen Weg dar, den Energieinhalt dieses Gases sicher, kompakt und zyklenstabil zu speichern. Die Kombination aus experimentellen Untersuchungen, KI-gestützter Materialcharakterisierung und Strömungssimulation schafft die Grundlage für eine wissenschaftlich fundierte und industriell skalierbare Prozessentwicklung. Damit zeigt das Projekt einen neuartigen, ganzheitlichen Ansatz zur Kopplung von Reststoffverwertung, Wasserstofftechnologie und Rohstoffsicherung auf, der einen bedeutenden Beitrag zur nachhaltigen Energiewirtschaft der Zukunft leisten kann.

## Referenzen

- [1] Statistisches Bundesamt, "80% des Klärschlamms aus kommunalen Kläranlagen im Jahr 2022 thermisch verwertet", zu finden unter <https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/12/>
- [2] Mayer N., Kaltschmitt M. Closing the phosphorus cycle: Current P balance and future prospects in Germany. *J. Cleaner Prod.* 2022; 347: 131272. doi:10.1016/j.jclepro.2022.131272
- [3] J. Göthel, K. J. Burkmann, and O. Volkova, "Review and Evaluation of Ceramic-Stabilized Iron Oxides for Use as Energy Storage Based on Iron-Steam Process," *Steel Research Int.*, vol. 96, no. 5, Art. no. 2400265, 2025, doi: 10.1002/srin.202400265.
- [4] Franke E, Shalnev S, Jahn J, Pietschner T, Gräßner, M. Experimental investigations of thermochemical phosphorus release behavior from sewage sludge under inert and reducing conditions. *Journal of Cleaner Production* 2025: 144687. doi:10.1016/j.jclepro.2025.144687
- [5] H. Wang, X. Li, and J. Xu, "Long-term cycling stability of iron oxide oxygen carriers under high-frequency redox operation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, 131103, 2022.