

Dezentraler Wasserstoff aus Biomasse

Bernd Stoppacher, Robert Zacharias, Michael Lammer, Sebastian Bock, Karin Malli und Viktor Hacker

Wasserstoff, Biogas, RESC-Prozess, Chemical Looping

Der Reformer Steam Iron Cycle (RESC), eine Weiterentwicklung des Eisen-Dampf-Prozesses, bietet eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit der dezentralen Wasserstoffherstellung. Das auf Reduktions- und Oxidationsreaktionen basierende Chemical Looping System ist in der Lage, hochreinen Wasserstoff aus Biogas, vergaster Biomasse und gasförmigen Kohlenwasserstoffen zu erzeugen. Da eine Reinheit von > 99.999 % bereits im RESC Prozess erreicht wird, sind im Gegensatz zu konventionellen Verfahren, wie Dampfreformierung oder autotherme Reformierung, keine weiteren Reinigungsschritte im System notwendig. Zudem kann das System, durch Abscheidung von hochreinem Stickstoff und Kohlenstoffdioxid, wertvolle Nebenprodukte erzeugen und als Negativemissionstechnologie betrieben werden.

Decentralized hydrogen from biomass

The Reformer Steam Iron Cycle (RESC), a further development of the iron-steam process, offers an efficient and cost-effective option for decentralized hydrogen production. The chemical looping system based on reduction and oxidation reactions is capable of producing high-purity hydrogen from biogas, gasified biomass and gaseous hydrocarbons. Since a purity of > 99.999 % is already achieved in the RESC process, no further purification steps are necessary in the system, in contrast to conventional processes such as steam or autothermal reforming. In addition, the system can generate valuable by-products by separating high purity nitrogen and carbon dioxide and can be operated as a negative emission technology.

1. Einleitung

Ein wesentlicher Faktor für den erfolgreichen Einsatz von Wasserstoff als Energieträger ist dessen flächendeckende regionale Verfügbarkeit. Die Versorgung mit Wasserstoff aus dezentraler Produktion ist dabei von besonderer Bedeutung, da lange Wegstrecken und aufwändige Transportsysteme vermieden werden. Neben elektrischem Strom aus Photovoltaik und Windenergie steht besonders die Verwertung von Biomasse im Fokus. Dieser Ansatz berücksichtigt die Thematik der Gasspeicherung und des Transports und ermöglicht eine kontinuierliche Steigerung der Produktionskapazität, die direkt mit der wachsenden Nachfrage verbunden ist. Österreich strebt bis 2040 den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft an, die von der Erzeugung des Gases bis zur Nutzung alle Bereiche abdecken soll [1]. Auf europäischer Ebene haben, im Rahmen des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015, 28 Mitgliedstaaten der Europäischen Union bekräftigt,

den globalen mittleren Temperaturanstieg auf unter 2 °C zu begrenzen. Ein Weg zur notwendigen Dekarbonisierung der Energiegewinnung, -verteilung, -speicherung und -nutzung im Rahmen dieser Energiewende bietet der Einsatz von Wasserstoff in unterschiedlichen Sektoren mit einem geschätzten Umfang von 2.250 TWh Wasserstoff (2050), dies entspricht etwa einem Viertel des Gesamtenergiebedarfs der Europäischen Union [2].

Für die Nutzung von Wasserstoff stehen eine Reihe von Anwendungen zur Verfügung. Indem Wasserstoff ins existierende (Erd-) Gasnetz eingebracht wird, können fossile Gase substituiert und eine Dekarbonisierung des Netzes erreicht werden. Alternativ kann Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas, auch aus Wasserstoff und CO₂ synthetisiert werden [3]. Auf diese Weise können Verbraucher konventionelle Technologien trotz fortschreitender Dekarbonisierung weiterhin verwenden. In der Stahlproduktion erlaubt der Einsatz von erneuerbar er-

zeugtem Wasserstoff den Verzicht auf Reduktionsmittel wie Kohlenmonoxid aus fossilen Quellen [4]. Einen Schwerpunkt zukünftiger Anwendungen repräsentiert die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger bzw. Kraftstoff im Mobilitätssektor. Fortschrittliche Brennstoffzellensysteme verstromen das Gas mit hohem Wirkungsgrad und tragen so zu einer klima- und umweltschonenden Elektromobilität bei.

Aktuell erfolgt die Wasserstoffproduktion vorwiegend zentral durch Dampfreformierung, Trockenreformierung oder katalytisch-partielle Oxidation aus fossilen Rohstoffen. Hierbei ist eine anschließende Druckwechseladsorption für die Aufreinigung des Wasserstoffes erforderlich. Der Wasserstoff wird daraufhin komprimiert oder verflüssigt zum Verbraucher transportiert, was aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte kosten- und energieintensiv ist [5].

Eine vielversprechende Alternative ist die dezentrale Wasserstoffproduktion aus regional verfügbaren, erneuerbaren Ressourcen. Eine der wesentlichen Herausforderungen der dezentralen Wasserstoffproduktion ist das Erreichen der benötigten Produktgasreinheit für Polymelektrolyt-Brennstoffzellen (PEFC) in Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV). Nach ISO 14687-2:2012 werden die Anforderungen für die Reinheit von Wasserstoff als Kraftstoff für PEFC für Straßenfahrzeuge definiert. Ausgewählte Kriterien sind in **Tabelle 1** ersichtlich.

2. Reformer Steam Iron Cycle (RESC)

Schon im frühen 20. Jahrhundert wurde der Eisen-Dampf-Prozess zur Erzeugung von Wasserstoff für Luftschiffe eingesetzt [6]. Aus diesem einstufigen, ineffizienten Prozess wurde an der Technischen Universität Graz der patentierte

RESC Prozess (Reformer Steam Iron Cycle) entwickelt. Dieser nutzt Rohstoffe wie Erdgas, Biogas oder vergaste Biomasse, um hochreinen Wasserstoff herzustellen. Die Einbindung des Prozesses im Kontext aktueller Wasserstoffproduktionstechnologien ist in **Bild 1** dargestellt.

Der zyklische Prozess basiert auf der Reformierung verschiedener Kohlenwasserstoffe unter Zugabe von Wasserdampf zu Synthesegas in einem Dampfreformer. Das Synthesegas wird in weiterer Folge für die Reduktion eines auf Eisenoxid basierten Sauerstoffträgermaterials bei erhöhten Temperaturen verwendet [5,7-9]. Im zweiten Schritt wird durch die Oxidation des Aktivmaterials mit Wasserdampf hochreiner Wasserstoff produziert, der nach Bedarf auch bei hohem Druck freigesetzt werden kann (siehe **Bild 2**) [8]. Um Wasserstoff von höchster Reinheit in der Oxidationsphase herzustellen, müssen Kohlenstoffablagerungen im System während der Reduktionsphase vermieden werden. Dies wurde durch thermogravimetrische Analysen von Hacker et al. [9] gezeigt. Fraser et al. [10] ermittelten eine Prozesseffizienz von bis zu 75 % (LHV-basiert) bei der Umwandlung verschiedener Kohlenwasserstoffe wie Methan, Heptan und Oktan.

Tabelle 1: Grenzwerte für Wasserstoff als Kraftstoff für Straßenfahrzeuge nach ISO 14687:2012

H₂-Reinheit	99,97 % [-]
Gesamtgehalt Nicht-Wasserstoff-Gase	300 ppm
H₂O	5 ppm
CO₂	2 ppm
CO	0,2 ppm

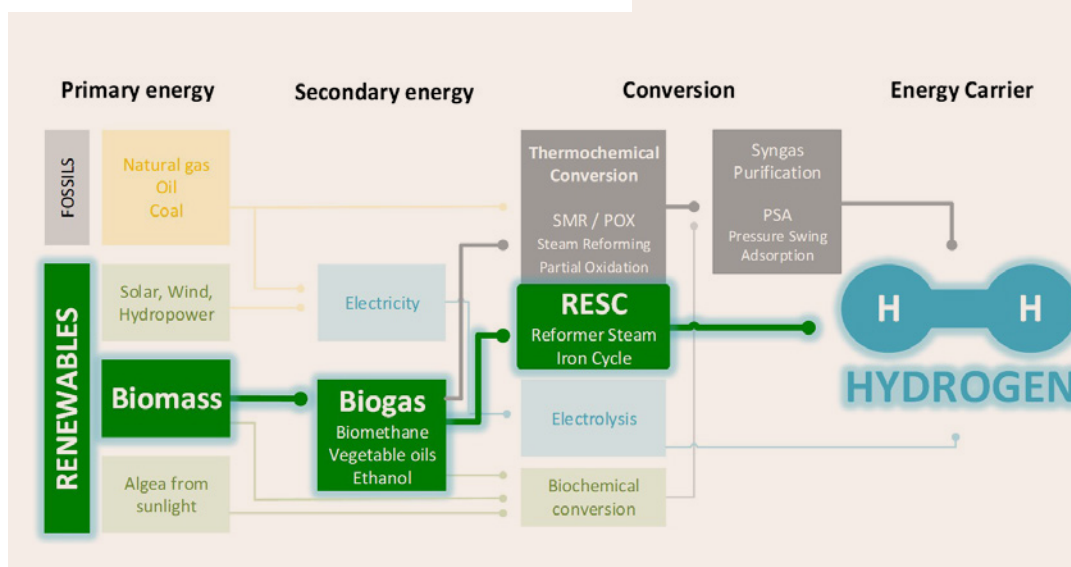


Bild 1: Der RESC im Kontext verschiedener Wasserstoffproduktionstechnologien (Copyright TU Graz)

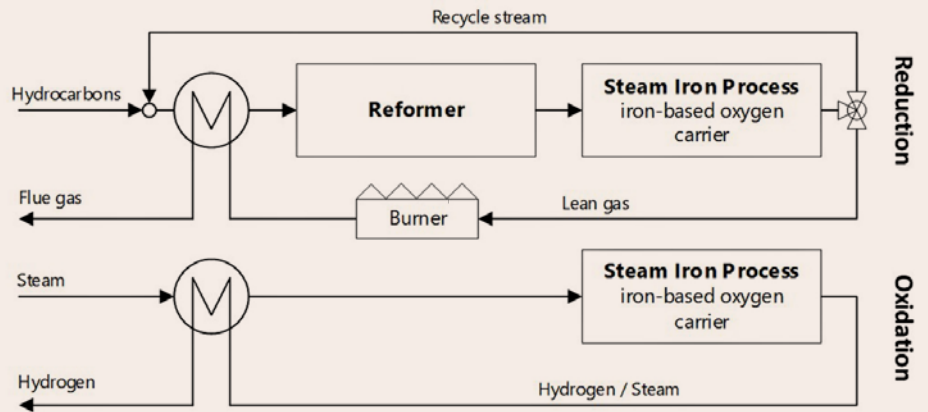


Bild 2: Zweistufiges Prozessschema des RESC-Prozesses zur Wasserstoffherzeugung (vgl. [16])

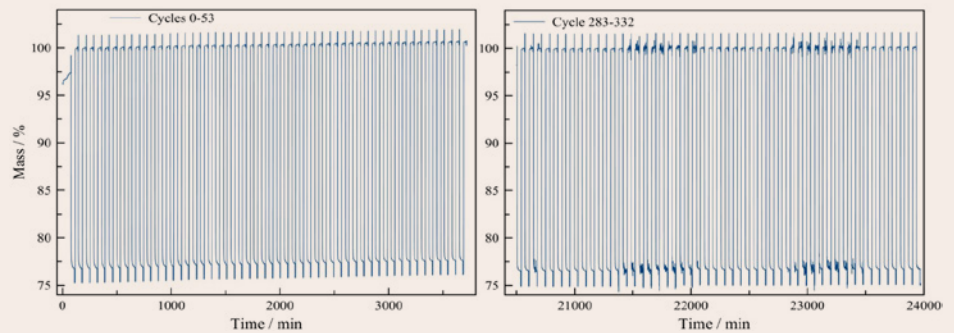


Bild 3: Langzeit-Stabilitätsmessung des entwickelten Sauerstoffträgers über mehr als 300 Zyklen [Copyright TU Graz]

Das Verfahren erlaubt unterschiedliche Möglichkeiten der Prozessführung. Für die dezentrale Wasserstoffproduktion wurde der Festbettreaktor aufgrund des kompakten Aufbaus sowie der niedrigeren mechanischen Materialbelastungen gewählt. Außerdem bietet der Festbettbetrieb die Möglichkeit, chemisch gebundene Energie in Form des reduzierten Metalloxids zu speichern und zeitversetzt zu oxidieren. Damit wird eine bedarfsorientierte und von der Verfügbarkeit der Rohstoffe unabhängige Wasserstoffherstellung gewährleistet. Dies erscheint besonders attraktiv, da die volumetrische Speicherdichte des Metalloxids kommerziell verfügbare 700 bar Wasserstoffdruckspeicher übertrifft und gleichzeitig nur geringe Kosten für das Speichermaterial anfallen. Der zweistufige Prozess kann somit fluktuierende Rohstoffangebote bzw. Produktnachfrage systemintegriert ausgleichen, wodurch sich dieser ideal für die Verwertung von erneuerbaren Primärenergieträgern eignet.

Abgesehen von der (Druck-) Wasserstoffproduktion bietet die Technologie die Möglichkeit das aus den kohlenwasserstoffhaltigen Ressourcen freiwerdende CO₂ in hoher Reinheit abzutrennen [11, 12]. Im Rahmen der For-

schungstätigkeiten an der Technischen Universität Graz wird seit der Jahrtausendwende vor allem an der Optimierung der Prozessführung, sowie der Materialentwicklung zur Verbesserung von Stabilität und Reaktivität der metalloxidbasierten Kontaktmasse gearbeitet.

3. Materialforschung

Die Entwicklung eines langzeitstabilen Sauerstoffträgermaterials zur Wasserstoffherzeugung war eine notwendige Voraussetzung für eine wirtschaftliche Umsetzung des neuen Verfahrens. Für den Einsatz eisenbasierter Materialien als reaktive Schüttung sprechen die hohe Austauschkapazität, die einfache Handhabung des ungiftigen Materials und geringe Kosten [5]. Durch umfangreiche Testserien konnten die Herausforderungen im Bereich der Zyklenstabilität durch die Zugabe hochschmelzender Additive bewältigt werden. Die Reaktivität verschiedener Mischungen wurde zuerst in ex-situ Lebensdauertests über mehrere hundert Zyklen nachgewiesen. Anschließend wurden vielversprechende Materialien in Laborsystemen auf Austauschkapazität und mechanische Stabilität untersucht.

Ein zentrales Thema war die Optimierung des Metalloxids hinsichtlich der hohen Reaktionstemperaturen von bis zu 1000 °C, welche zur Versinterung und dementsprechenden Aktivitätsverlusten der eingesetzten Eisenoxide führen können. In zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten wurde die stabilisierende Wirkung von hochschmelzenden Metalloxiden wie beispielsweise Al_2O_3 untersucht [5]. In Vorversuchen konnte dieser Effekt auch für den Eisen-Dampf-Prozess unter Druck bestätigt werden [13]. Weiters kann durch gezielte Beimischung von Fremdmetallen, sowie durch die Vergrößerung der Oberfläche der Kontaktmasse, die Reaktivität der Kontaktmasse bei niedrigen Temperaturen erhöht werden. Vorversuche diesbezüglich zeigten, dass beispielsweise PtO_2 , RuO , CeO_2 , PdO und CuO das Potenzial haben, die Reaktivität bei niedrigen Temperaturen zu erhöhen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts HyStORM (Hydrogen Storage via Oxidation and Reduction of Metals) wurde zur Optimierung des eisenbasierten Sauerstoffträgers eine Evaluierung von unterschiedlichen Herstellungsverfahren durchgeführt. Dazu wurden vielversprechende Synthesemethoden aus der Fachliteratur herangezogen und anschließend in Vorversuchen im Labormaßstab umgesetzt. Die Auswahl der Synthesemethoden wurde vor allem basierend auf wichtigen Parametern, wie der Durchführbarkeit und Skalierbarkeit getroffen, um die für den Laborreaktor benötigte Menge reproduzierbar herstellen zu können.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde für die Auswahl einer Synthesemethode des Materials die einfache industrielle Herstellbarkeit, sowie eine langzeitstabile Sauerstoffaustauschkapazität als wichtigstes Auswahlkriterium definiert. Die gewählte Imprägnierungsmethode weist in beiden Punkten ausgezeichnete Ergebnisse auf und wurde durch weiterführende Forschung für den Einsatz in Hochdrucken optimiert.

Durch umfangreiche Stabilitätsmessungen mit Hilfe von Thermogravimetrie wurde die Stabilität und Reaktivität von Pulverproben oder einzelnen Pellets in der Größenordnung von einigen Milligramm ermittelt (Bild 3). Das Upscaling der Lebensdaueruntersuchungen in industriell relevante Maßstäbe im Laufe des Projekts zeigte jedoch, dass Ergebnisse von Materialtests im Labormaßstab nicht ohne weiteres auf pelletierte Materialien für den Einsatz in Festbettreaktoren übertragbar sind. Einerseits vermindert sich der Gas-Feststoff-Kontakt im Festbettssystem, andererseits kann die mechanische Beanspruchung durch das Eigengewicht der Schüttung Auswirkungen auf die Stabilität haben.

4. Prozessentwicklung

Neben der Materialforschung wurde am Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der Tech-

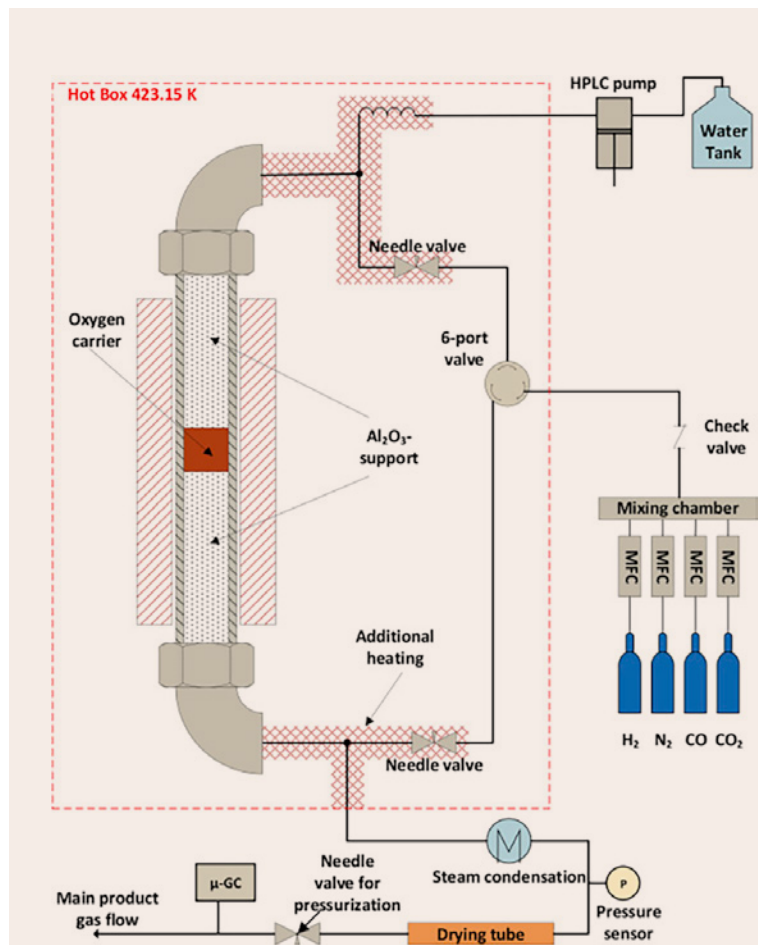


Bild 4: Aufbau der Hochdruck-Versuchsanlage für Drücke bis maximal 100 bar [12] (Copyright TU Graz)

nischen Universität Graz in Kooperation mit den im Projekt beteiligten Industriepartnern Rouge H₂ Engineering GmbH und AVL List GmbH die Komponentenentwicklung und die Prozessoptimierung durchgeführt.

4.1 Hochdruckwasserstoffherstellung

Das Ziel der Forschungstätigkeiten im Rahmen des Projekts HyStORM war der Nachweis der Hochdruckwasserstoffbereitstellung bei einem Druck von bis zu 100 bar direkt aus dem Prozess. Im Vordergrund stand die Entwicklung eines neuartigen Speicherprozesses, bestehend aus:

- der Umsetzung von erneuerbaren Rohstoffen zu Synthesegas
- der Beladung des Speichers mit Synthesegas
- der Entladung des Speichers zur Bereitstellung von hochreinem Wasserstoff bei 100 bar.

Um die Ergebnisse aus den erfolgreichen Vorversuchen validieren zu können, wurden Versuche in einer Testanla-

ge durchgeführt. Die Anforderungen für die Bereitstellung von Druckwasserstoff wurden wie folgt definiert:

- eine maximale Betriebstemperatur von 850 °C
- ein maximaler Betriebsdruck von 100 bar
- Verwendung von normierten Bauteilen, um bei Bedarf einen einfachen und kostengünstigen Austausch zu ermöglichen.

Anlagenschema und Testsystem sind in **Bild 4** dargestellt.

In mehreren Versuchsserien konnte der Wasserstoffdruck Schritt für Schritt bis zu 100 bar gesteigert werden. Die durchgeführten Experimente unterstrichen die Eignung des RESC für die Hochdruckwasserstofffreisetzung bis 100 bar mit einer Wasserstoffreinheit von > 99,99 % [11].

Weiters konnte die exzellente Stabilität des eingesetzten Sauerstoffträgermaterials auch unter hohem Druck nachgewiesen werden [7]. Eine Kohlenstoffbildung und die damit einhergehende Entstehung von Verunreinigungen im Produktgas konnte durch die Identifikation der kritischen Prozessparameter erfolgreich vermieden werden.

Im Rahmen der Gesamtsystemanalyse rückte die Möglichkeit der prozessintegrierten CO₂-Abtrennung immer mehr in den Fokus. Innovative Ansätze ermöglichen dabei die Sequestrierung des reinen Kohlendioxidstroms im Prozess. In Laborversuchen konnte nachgewiesen werden, dass eine simultane Kohlenstoffdioxidabscheidung während der Speicherbeladung und die darauffolgende Entladung von Hochdruckwasserstoff mit dem Eisen-Dampf-Prozess möglich ist [13]. Dadurch wird bei der Verwendung von biogenen Ressourcen ein negativer

CO₂-Fußabdruck erreicht (Negative Emission Technology). Die ermittelte Reinheit des Hochdruckwasserstoffs nach den Kohlenstoffabtrennungs-Experimenten lag bei bis zu 99,3 %.

4.2 Optimierung der Wasserstoffreinheit

Das breite Anwendungsspektrum hinsichtlich unterschiedlicher erneuerbarer Ressourcen wie Biogas, vergaseter Biomasse oder Bioethanol ist ein wesentlicher Vorteil des RESC-Prozesses. Je nach verwendetem Primärenergieträger, sowie der vorhandenen Begleitkomponenten kann es bei der Reduktionsreaktion zur Ablagerung von festem Kohlenstoff oder zur ungewollten Reaktion mit dem Metalloxid kommen. Bei der anschließenden Oxidation mit Dampf kann neben der Bildung von Wasserstoff in diesem Fall auch Kohlenmonoxid, Kohlendioxid oder andere Verunreinigungen freigesetzt werden. Da diese Spurenverunreinigungen bereits im niedrigen ppm- und ppb-Bereich zu einer Schädigung in PEFCs führen können, muss deren Abscheidung während der Reduktion durch Optimierung der Reaktionsbedingungen verhindert werden.

Verunreinigungen des Rohstoffes durch Ammoniak, Kohlenwasserstoffe und Schwefelverbindungen dürfen ebenfalls nicht in den produzierten Wasserstoff gelangen, da diese die Brennstoffzellen potenziell schädigen. Typischerweise befinden sich in erneuerbaren Primärenergieträgern auch eine Reihe von höheren aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, Alkohole, sowie Produkte der unvollständigen Zersetzung dieser am Katalysator. Ein weiteres Ziel des Projektes HyStORM war die Charakterisierung der Auswirkungen dieser Komponenten auf die Wasserstoffqualität und die eingesetz-

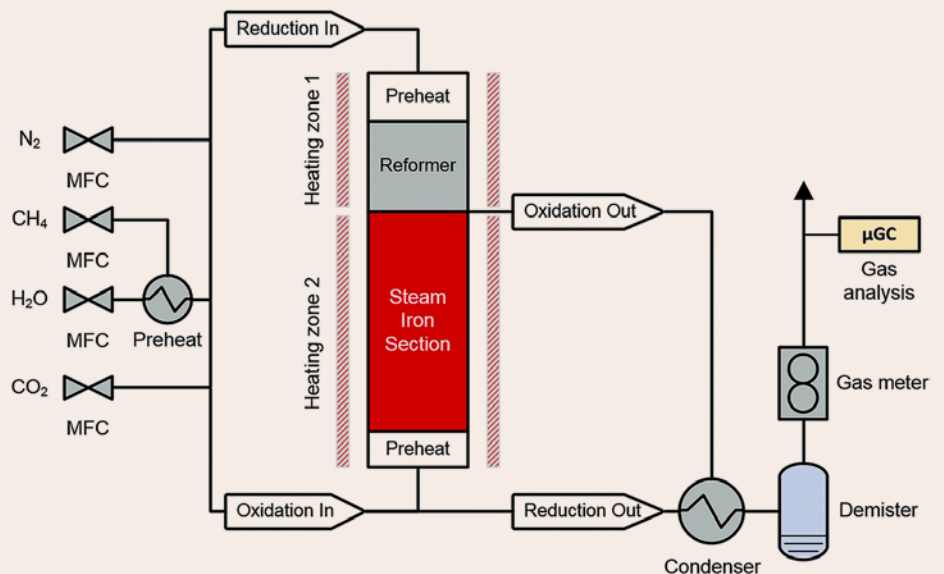


Bild 5: Darstellung des OSOD-Reaktorsystems [14]

ten Eisenoxide. Eine Kontamination des produzierten Wasserstoffes durch Schwefel kann theoretisch erfolgen, wenn sich während der Reduktion feste Schwefelverbindungen wie beispielsweise Eisensulfide bilden. Dies ist in geringem Maße während der Reduktionsreaktion möglich. Bei der anschließenden Oxidation können diese Schwefelverbindungen mit Dampf zu SO_x bzw. mit Wasserstoff zu H_2S reagieren und den produzierten Wasserstoff verunreinigen.

Nach erfolgreichen Tests in kleineren Laborsystemen wurden weitere Versuchsreihen in einem 10 kW Laborreaktorsystem mit synthetischem Biogas und Methan durchgeführt (siehe **Bild 5**). Das System besteht aus einem Reaktor, der für die Reformierung und die darauffolgende Reduktions- und Oxidationsreaktionen in zwei Segmente geteilt ist. Das im Reformerteil erzeugte Synthesegas wird für die unmittelbar darauffolgende Reduktion des Sauerstoffträgers verwendet. Anschließend wird der Sauerstoffträger mit Wasserdampf oxidiert um hochreinen Wasserstoff herzustellen. Dieses Laborreaktorsystem eignete sich ausgezeichnet für die Durchführung von Versuchen zur Validierung zuvor generierter Simulationsdaten im Hinblick auf die Prozesseffizienz bei unterschiedlichen Betriebspunkten.

Die eingesetzten synthetischen Biogaszusammensetzungen orientierten sich an Daten aus der Literatur. Im System konnten die wesentlichen Ergebnisse von thermodynamischen Simulationen hinsichtlich der Prozesseffizienz bestätigt werden. Die erreichte Wasserstoffqualität von bis zu 99,999 % übertraf durch die optimierte Prozessführung sogar Ergebnisse in kleineren Laborreaktoren [14]. Im Rahmen des Projektes wurden auch erfolgreiche Langzeittests zur Reformierung von Bioethanol und

synthetischem Biogas mit insgesamt über 1.500 h Betriebsdauer durchgeführt.

Für ihre Arbeiten zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff wurde die Arbeitsgruppe Brennstoffzellen und Wasserstoffsysteme im Jahr 2017 mit dem Staatspreis Mobilität in der Kategorie „Forschen. Entwickeln. Neue Wege weisen“ vom heutigen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) ausgezeichnet. Als Anerkennung der engen Kooperation mit der Industrie und der wissenschaftlichen Leistung wurde die Arbeitsgruppe weiters mit dem HOUSKA-Anerkennungspreis 2017 sowie dem HOUSKA-Publikumspreis ausgezeichnet (**Bild 6**).

5. Wirtschaftlichkeit der dezentralen Wasserstoffherstellung

Um die Konkurrenzfähigkeit von Wasserstoff als Sekundärenergieträger zu gewährleisten, müssen die Kosten für Herstellung, Verteilung und Verwertungstechnologien auf das Niveau von konventionellen Energieträgern gesenkt werden. Dies kann durch eine dezentrale Form der Produktion erreicht werden. Im Fall der Wasserstoffherstellung mit Hilfe des RESC bei Biogasanlagen oder Holzgasanlagen vor Ort treten keine Transport- und Lagerkosten für den Primärenergieträger Biogas auf. Zudem können durch die Integration einer Tankstelle hohe Transportkosten für Wasserstoff vermieden werden.

Die konventionellen Verfahren zur dezentralen Wasserstoffherstellung benötigen einen zusätzlichen Reinigungsschritt in Form der Druckwechseladsorption, um die erforderliche Wasserstoffreinheit für Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen zu erreichen. Da diese Technologien

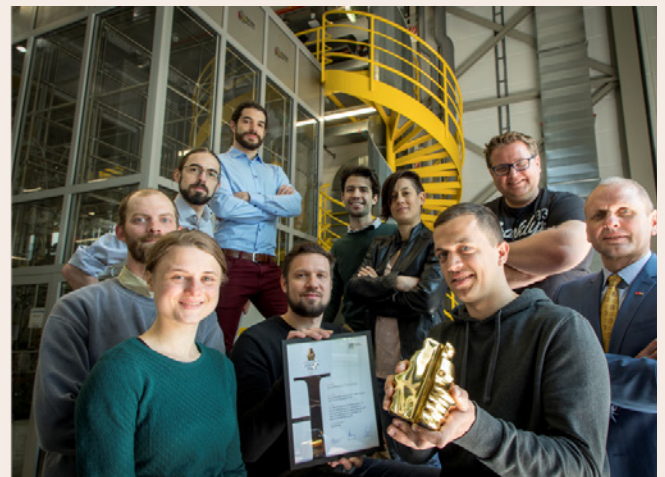


Bild 6: a) Preisverleihung des Staatspreis Mobilität (Copyright BMK); b) Arbeitsgruppe Brennstoffzellen- und Wasserstoffsysteme mit dem verliehenen Houska-Anerkennungspreis (Copyright TU Graz / Lunghammer)

für den zentralen, großtechnischen Einsatz in Raffinerien optimiert wurden, treten im dezentralen Betrieb Wirkungsgradverluste und somit zusätzliche Kosten auf. Im Vergleich zu den eben genannten konventionellen Produktionsverfahren ist der RESC-Prozess durch die wartungsarme, einstufige Prozessführung ohne Reinigungsschritt eine kostengünstige Alternative für die dezentrale Produktion von grünem Wasserstoff. Konkret sind nach einer Kostenabschätzung Herstellungskosten von 3,5-4,9 €/kg H₂ erreichbar, was der Vorgabe der Europäischen Kommission von 5 €/kg H₂ für Wasserstoff aus Biogas entspricht. Diese Kosten setzen sich im Wesentlichen aus den Investitionskosten, den Kosten des Biogases als Feed und der im Prozess verwendeten Materialien zusammen.

Die Abschätzung der Investitionskosten wurde mittels Korrelation nach Lange et al. [15] für petrochemische Verfahren durchgeführt (-50 % bis +100 %). Die Anlagenkosten für ein entsprechendes System, angekoppelt an eine bestehende Biogasanlage, wurden dadurch auf 0,3-1,2 €/kg H₂ geschätzt. Die Betriebskosten bestehen in erster Linie aus den Kosten des verwendeten Biogases, welche mit 2,5-3,5 €/kg H₂ geschätzt werden. Durch den Einsatz von preiswerten Eisenoxiden als Aktivmaterial im Prozess sind die weiteren zu erwartenden Materialkosten mit 0,06 €/kg H₂ sehr niedrig.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die flächendeckende, dezentrale Wasserstoffversorgung ist ein wesentlicher Baustein zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, sowie zur effizienten Nutzung lokal verfügbarer Ressourcen. Der vorgestellte Reformier-Eisen-Dampf-Prozess RESC ist ein effizienter und kosteneffektiver Prozess zur dezentralen Wasserstoffherstellung aus lokal verfügbaren, erneuerbaren Ressourcen.

Die Prozess- und Materialentwicklung an der Technischen Universität Graz im Rahmen des Projekts HyStORM, sowie der laufenden Folgeprojekte haben und werden in den nächsten Jahren wesentliche Fortschritte zur Implementierung des Prozesses beitragen. Bereits in einem frühen Projektstadium konnten dabei sehr aussichtsreiche Ergebnisse zur hochreinen Wasserstoffherzeugung mit einer Reinheit von > 99.999 % erzielt werden. Ein wesentlicher Faktor zur erfolgreichen Kommerzialisierung in den nächsten Jahren wird die weitere Materialentwicklung zur Lebensdauersteigerung sein. In der anhaltenden Diskussion zur Senkung der weltweiten Treibhausgasemissionen ist besonders die prozessintegrierte CO₂-Sequestrierung, welche negative Emissionen ermöglicht, ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation, und Technologie: Wasserstoffstrategie für Österreich, 2020
- [2] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: Hydrogen Roadmap Europe, 2019
- [3] Dincer, C. und Acar, I.: Review and evaluation of hydrogen production options for better environment, *J. Clean. Prod.*, vol. 218, pp. 835–849, 2019
- [4] Vogl, V.; Åhman, M. und Nilsson, L. J.: Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking, *J. Clean. Prod.*, vol. 203, pp. 736–745, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279
- [5] Hacker, V. und Voitic, G.: Recent advancements in chemical looping water splitting for the production of hydrogen, *RSC Adv.* 6, pp. 98267–98296, 2016, doi: 10.1039/C6RA21180A
- [6] Messerschmitt, A.: Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff durch abwechselnde Oxidation und Reduktion von Eisen in von außen beheizten, in den Heizräumen angeordneten Zersettern, 1911
- [7] Hacker, V.; Voitic, G.; Nestl, S.; Malli, K.; Wagner, J.; Bitschnau, B. und Mautner, F.-A.: High purity pressurised hydrogen production from syngas by the steam-iron process, *RSC Adv.*, vol. 6, pp. 53533–53541, 2016, doi: 10.1039/C6RA06134F
- [8] Hacker, V. et al.: Usage of biomass gas for fuel cells by the SIR process, *J. Power Sources*, vol. 71, pp. 226–230, 1998, doi: 10.1016/S0378-7753(97)02718-3
- [9] Hacker, V.; Vallant, R. und Thaler, M.: Thermogravimetric Investigations of Modified Iron Ore Pellets for Hydrogen Storage and Purification: The First Charge and Discharge Cycle, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, pp. 8993–8999, 2007, doi: 10.1021/ie0616491
- [10] Fraser, S.D.; Monsberger, M. und Hacker, V.: A thermodynamic analysis of the reformer sponge iron cycle, *J. Power Sources*, vol. 161, pp. 420–431, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.04.082
- [11] Zacharias, R.; Visentin, S.; Bock, S. und Hacker, V.: High-pressure hydrogen production with inherent sequestration of a pure carbon dioxide stream via fixed bed chemical looping, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 7943–7957, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.257>
- [12] Bock, S.; Zacharias, R. und Hacker, V.: Co-production of pure hydrogen, carbon dioxide and nitrogen in a 10 kW fixed-bed chemical looping system, *Sustain. Energy Fuels*, vol. 4, pp. 1417–1426, 2020, <https://doi.org/10.1039/C9SE00980A>
- [13] Nestl, S.; Voitic, G.; Lammer, M.; Marius, B.; Wagner, J. und Hacker, V.: The production of pure pressurised hydrogen by the reformer-steam iron process in a fixed bed reactor system, *J. Power Sources*, vol. 280, pp. 57–65, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.052>
- [14] Bock, S.; Zacharias, R. und Hacker, V.: Experimental study on high-purity hydrogen generation from synthetic biogas in a 10 kW fixed-bed chemical looping system, *RSC Adv.*, vol. 9, no. 41, pp. 23686–23695, 2019, doi: 10.1039/c9ra03123e
- [15] Lange, J.P., Sushkevich, V. L., Knorpp, A. J. and Van Bokhoven, J.A.: Methane-to-Methanol via Chemical Looping: Economic Potential and Guidance for Future Research, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b01407
- [16] Hacker, V.: A novel process for stationary hydrogen production: the reformer sponge iron cycle (RESC), *J. Power Sources*, vol. 118, pp. 311–314, 2003

Autoren



Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Viktor Hacker**
Technische Universität Graz |
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik |
Graz |
Tel.: +43 316 873 8780 |
viktor.hacker@tugraz.at



Dipl.-Ing. **Michael Lammer**
Technische Universität Graz |
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik |
Graz |
Tel.: +43 316 873 8795 |
michael.lammer@tugraz.at



Dipl.-Ing. **Bernd Stoppacher**
Technische Universität Graz |
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik |
Graz |
Tel.: +43 316 873 4971
bernd.stoppacher@tugraz.at



Dipl.-Ing. Dr. techn. **Sebastian Bock**
Technische Universität Graz |
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik |
Graz |
Tel.: +43 316 873 4984 |
sebastian.bock@tugraz.at



Robert Zacharias, MSc.
Technische Universität Graz |
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik |
Graz |
Tel.: +43 316 873 4985 |
robert.zacharias@tugraz.at



Dipl.-Ing. **Karin Malli**
Technische Universität Graz |
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik |
Graz |
Tel.: +43 316 873 8796 |
karin.malli@tugraz.at

29/
30/
Sep

Berlin

Handelsblatt Jahrestagung

Gas 2020

Die „**Future Role Of Gas**“ mit Leben füllen – tragen Sie dazu bei.

- Krisenbewältigung und Klimaschutz
- Globaler Gasmarkt
- Grüne Gase inklusive Wasserstoff
- Preise, Beschaffung und Vertrieb im Gasmarkt



Jetzt anmelden:
www.handelsblatt-gas.de