



Berg Huettenmaenn Monatsh (2025) Vol. 170 (4): 211–216
<https://doi.org/10.1007/s00501-025-01574-9>
© The Author(s) 2025

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Laborsetups und Pilotanlage zur Methanpyrolyse im Metallbad

Stefan Wibner, David Neuschitzer, David Scheiblehner, Christoph Scherr, Andreas Sprung und Helmut Antrekowitsch

Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen 28. Februar 2025; angenommen 4. März 2025; online publiziert 18. März 2025

Zusammenfassung: Die katalytische Zersetzung von Methan (CH_4) in flüssigen Metallen ist als vielversprechende Technologie für die Herstellung von CO_2 -freiem Wasserstoff (H_2) zu sehen. Bei diesem Verfahren wird CH_4 in ein flüssiges, katalytisch aktives Metall eingebracht und zersetzt, wodurch H_2 und fester Kohlenstoff entstehen. Um in diesem strategisch wichtigen Forschungssegment einen wesentlichen Beitrag leisten zu können, wurde an der Montanuniversität Leoben die dafür erforderliche Infrastruktur in Form eines Forschungszentrums für Wasserstoff und Kohlenstoff geschaffen. Dieser Artikel gibt zuerst einen Überblick zu den bisher entwickelten Versuchssetups im Labormaßstab, die für die Pyrolyse von Methan im Metallbad konzipiert wurden. Anschließend erfolgt die Vorstellung der im Forschungszentrum errichteten Pilotanlage, wobei auf die Aggregate eingegangen wird, die für die Untersuchung verschiedener Prozessparameter der CH_4 -Pyrolyse sowie für eine umfassende Produktstrombehandlung erforderlich sind. Das zentrale metallurgische Aggregat stellt eine Induktionsschmelzanlage dar, welche sowohl bei Umgebungsdruck als auch bei bis zu 10 bar betrieben werden kann. Die anschließende Behandlung des Produktstroms erfolgt mittels Heißgasfilter und Wärmetauscher, um den bei der Methanzersetzung entstehenden festen Kohlenstoff sowie weitere Zersetzungsprodukte abzutrennen. Mittels einer Membrananlage ist es anschließend möglich, den partikelfreien Gasstrom, der hauptsächlich aus Wasserstoff und nicht umgesetztem Methan besteht, an H_2 anzureichern. Durch den Einsatz einer thermischen Nachverbrennungsanlage werden schlussendlich alle bei diesem Prozess entstehenden Produkte vollständig neutralisiert.

Dipl.-Ing. Dr. mont. S. Wibner (✉)
Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie,
Montanuniversität Leoben,
Franz Josef-Straße 18,
8700 Leoben, Österreich
stefan.wibner@unileoben.ac.at

Schlüsselwörter: Methanpyrolyse, Pilotanlage, Wasserstoff, Kohlenstoff, Metallbad

Laboratory Setups and Pilot Plant for Methane Pyrolysis in Liquid Metals

Abstract: The catalytic decomposition of methane (CH_4) in liquid metals is a promising technology for the production of CO_2 -free hydrogen (H_2). In this process, CH_4 is introduced into a liquid, catalytically active metal and decomposed, producing H_2 and solid carbon. In order to make a significant contribution in this strategically important research segment, the University of Leoben has created the necessary infrastructure in the form of a research centre for hydrogen and carbon. This article first provides an overview of the experimental setups developed to date on a laboratory scale, which were designed for the pyrolysis of methane in a molten metal bath. The pilot plant constructed in the research centre is then presented, with a description of the units required for the investigation of various process parameters of CH_4 pyrolysis and for comprehensive product stream treatment. The central metallurgical unit is an induction melting plant that can be operated at both ambient pressure and up to 10 bar. The subsequent treatment of the product stream is carried out by means of a hot gas filter and heat exchanger to separate the solid carbon produced during methane decomposition, as well as other decomposition products. Using a membrane system, it is then possible to enrich the particle-free gas stream, which consists mainly of hydrogen and unreacted methane, with H_2 . Finally, a thermal post-combustion chamber is used to completely neutralise all the products created during this process.

Keywords: Methane pyrolysis, Pilot plant, Hydrogen, Carbon, Metal bath

1. Allgemeines

Die Methanpyrolyse gilt als vielversprechende Technologie zur Erzeugung von Wasserstoff als Energieträger und Kohlenstoff als Rohstoff. Aufgrund der bislang fehlenden industriellen Anwendungen ist die Entwicklung dieses Verfahrens derzeit Gegenstand vieler Forschungsprojekte. Im deutschsprachigen Raum forschen renommierte Einrichtungen, wie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Technische Universität München und die Montanuniversität Leoben (MUL), an dieser Technologie [1, 2].

Das Konzept der Methanpyrolyse ist seit 1930 bekannt, und die industrielle Nutzung wird seit den 1960er-Jahren diskutiert. Die Methanzersetzung wurde bisher nur zur Erzeugung von Industrieruß, bekannt als Carbon Black, kommerziell genutzt. Ein Beispiel dafür ist das Kvaerner-Verfahren, bei dem ein thermisches Plasma genutzt wird, um ein möglichst reines Kohlenstoffprodukt zu erhalten. Darüber hinaus setzt das Unternehmen Monolith Materials in Olive Creek in Nebraska (USA) seit 2016 ein Verfahren ein, das dem Kvaerner-Prozess sehr ähnlich ist. Thermische Plasmapoly-Anlagen weisen ein „Technology Readiness Level“ (TRL) von 8 auf, während Anlagen mit nicht-thermischem Plasma derzeit bei einem TRL von 5 bis 6 liegen. Hier ist als Beispiel der Methan-Plasmapolymer der Fa. Graforce zu nennen. Die Fa. BASF in Ludwigshafen betreibt des Weiteren den weltweit ersten industriell eingesetzten Kohlenstoff-Wanderbettreaktor zur Methanpyrolyse (TRL 6) [3–8].

Andere Konzepte, wie die Methanpyrolyse in einer Metallschmelze, weisen einen TRL von 2 bis 5 auf, d. h. sie gehen nicht weit über den Labormaßstab hinaus. Die Gründe dafür sind vor allem in den Skalierungs- und Konstruktionsproblemen der Reaktoren für den Dauerbetrieb zu sehen. Die Anwendung der vielversprechendsten Technologien im industriellen Maßstab wird frühestens in fünf bis zehn Jahren vorhergesagt [5, 8].

Methan, der Rohstoff für diese Pyrolysetechnologie, ist der Hauptbestandteil von Erdgas, das in der Natur in beträchtlichen Mengen in weltweit verteilten Lagerstätten vorkommt und damit eine attraktive Energiequelle darstellt. Neben diesem fossilen Energieträger gibt es auch andere vielversprechende Möglichkeiten, z. B. die Erzeugung von Biogas und dessen Nutzung als Methanquelle [9].

An der MUL wird die Methanpyrolyse in Flüssigmetallblasensäulenreaktoren untersucht, wobei das verwendete Metall bzw. die Legierung eine katalytische Wirkung auf die Methanzersetzung ausübt. Zu diesem Zweck existieren be-

reits technisch ausgereifte Laboranlagen, die in verschiedenen Publikationen vorgestellt und beschrieben wurden (siehe [10–14]). Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich sowohl auf die Optimierung der Zusammensetzungen der katalytisch aktiven Metalllegierungen als auch auf die Skalierung der entsprechenden Laboranlagen mit kontinuierlicher Prozessentwicklung. Aus diesem Grund erfolgte der Aufbau einer Pilotanlage in einem eigens dafür errichteten Forschungszentrum für Wasserstoff und Kohlenstoff, welches ebenfalls Teil der Universität ist.

In diesem Beitrag wird zum einen ein Überblick zu den am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie der MUL bestehenden Laboranlagen zur Methanpyrolyse im Metallbad gegeben. Zum anderen erfolgt die Vorstellung der Pilotanlage, wobei der Schwerpunkt auf den Aggregaten liegt, die für die Untersuchung verschiedener Prozessparameter, welche die CH_4 -Pyrolyse beeinflussen, sowie für eine umfassende Produktstrombehandlung erforderlich sind.

2. Flüssigmetallblasensäulenreaktoren im Labormaßstab

An der Montanuniversität Leoben wird die Methanzersetzung in Flüssigmetallblasensäulenreaktoren im Labormaßstab in verschiedenen Anlagen untersucht. In diesem Zusammenhang wurden aufbauend auf dem Versuchsssetup für Voruntersuchungen bereits vier Scale-up-Stufen konzipiert, bei denen jeweils verschiedene Änderungen und Anpassungen erfolgten. Diese Setups unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich des Reaktorvolumens, der Höhe der Flüssigmetallblasensäule, des zugeführten CH_4 -Volumenstroms und der Methaneinbringung in die Schmelze.

Folgende Versuchsssetups wurden bereits realisiert:

- Versuchsaufbau 1.0: Versuchsssetup für die ersten Voruntersuchungen (nicht mehr im Einsatz)
- Versuchsaufbau 1.1: Laborreaktor für die Entwicklung der katalytisch wirkenden Metalllegierungssysteme
- Versuchsaufbau 2.1: Laborreaktor im größeren Maßstab zur Prozessoptimierung
- Versuchsaufbau 2.2: Laborreaktor im größeren Maßstab mit gesteigerter Badhöhe, zur Prozessoptimierung
- Versuchsaufbau 3.1: Letzte Scale-up-Stufe des Laborreaktors, zur weiteren Prozessoptimierung

TABELLE 1
Wesentliche Parameter der unterschiedlichen Labor-Versuchsssetups

Parameter	Versuchsssetup			
	1.1	2.1	2.2	3.1
Max. Metallbadvolumen [dm^3]	0,25	1,50	3,30	4,40
Innendurchmesser des Reaktors (Tiegel) [mm]	65	110	110	150
Max. Metallbadhöhe [mm]	70	160	350	250
Technologie der CH_4 -Einbringung	Lanze	Lanze	Lanze	Bodenspüler mit Gasvorwärmung
Inputvolumenstrom von CH_4 [NI/min]	0,1–0,5	1–5	1–5	Bis zu 50

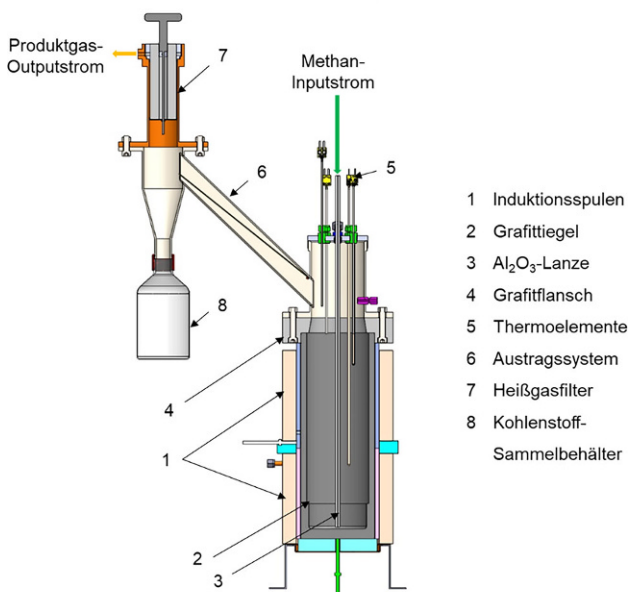


Abb. 1: Schematische Darstellung des Versuchssetups 2.2 mit wesentlichen Bestandteilen [14]

In Tab. 1 sind die wichtigsten Parameter der im Labormaßstab aufgebauten, sich im Einsatz befindlichen Versuchssetups zur Untersuchung der Methanpyrolyse im Flüssigmetallblasensäulenreaktor zusammengefasst.

Das Versuchssetup 1.1, welches für die Entwicklung der katalytisch wirkenden Metalllegierungssysteme Anwendung findet, wurde näher von Scheiblehner et. al [10] beschrieben. Für genauere Erläuterungen zur Scale-up-Stufe 2.1, bei der neben einem höheren CH₄-Inputvolumenstrom auch ein größeres Schmelzevolumen eingesetzt wird, erfolgt der Verweis auf Neuschitzer et al. [12]. Einige Vorteile sind hierbei das verbesserte Austragssystem für Kohlenstoff und das optimierte Temperaturmonitoring. Bei dem in Abb. 1 gezeigten Versuchssetup 2.2 handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Stufe 2.1, die bereits von Neuschitzer [14] beschrieben wurde.

Der in Abb. 1 dargestellte Flüssigmetallblasensäulenreaktor besteht aus einem Grafitriegel mit einem Innendurchmesser von 110 mm und einer Höhe von etwa 390 mm, sodass eine maximale Metallbadtiefe von 350 mm möglich ist. Das enthaltene Metall wird induktiv von zwei vertikal angeordneten Induktionsspulen erwärmt, deren Regelung über zwei MU1200-Induktionsöfen von der Fa. Indutherm stattfindet.

Die Zuführung von Methan in die Schmelze erfolgt über eine Al₂O₃-Lanze von oben, wobei der Inputvolumenstrom über Massendurchflussregler einstellbar ist. Hierbei handelt es sich um eine Kapillarrohrlanze mit einem Außendurchmesser von 8 mm und sechs Einzelkapillaren mit einem Durchmesser von jeweils 0,8 mm.

Die Temperaturüberwachung der Schmelze und des Gasraumes oberhalb der Flüssigmetallsäule erfolgt mit Thermolementen vom Typ N, wobei für die Messung der Schmelzbadtemperatur Thermolementschutzrohre erforderlich sind.

Die Produkte der Methanpyrolyse, fester Kohlenstoff und wasserstoffreiches Produktgas, werden über ein geneigtes Austragsrohr in einer Reaktorhöhe von ca. 450 mm aus dem beheizten Teil ausgetragen. Der sich bildende Kohlenstoff ist zum Teil mit makroskopischen Metalltröpfchen verunreinigt, welche durch Platzen der Gasblasen an der Badoberfläche entstehen – das sogenannte „Bubble bursting“ [15, 16]. Durch das geneigte Austragssystem soll deren Austritt aus dem Reaktor aufgrund der höheren Dichte im Vergleich zum Kohlenstoff verhindert werden. Anschließend erfolgt die Abtrennung des Kohlenstoffs vom Produktgas mittels Heißgasfilter und dessen Sammlung im dafür vorgesehenen Behälter.

Die Konzentrationen der Hauptkomponenten im Produktgas werden mit verschiedenen Gasanalysatoren von der Fa. ABB bestimmt. Dabei erfolgt die Ermittlung der H₂-Gehalte mittels Leitfähigkeitsanalysator Caldos27, während CH₄, CO₂ und CO mit der Infrarot-Absorptionsmesszelle Uras26 und die O₂-Konzentrationen über den paramagnetischen Sauerstoffanalysator Magnos206 gemessen werden. Die Bestimmung von O₂, CO₂ und CO dient in erster Linie der Prozessüberwachung. Die Methanumsetzungsrate und die Wasserstoffausbeute werden auf Grundlage der Konzentrationen von CH₄ bzw. H₂ berechnet.

Wesentlich zu erwähnen ist, dass die Zersetzung von Methan über verschiedene Zwischenprodukte wie C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ oder C₆H₆ stattfindet, aus denen unter bestimmten Prozessbedingungen polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) gebildet werden können [17–19]. Um die Kondensation dieser in den Gasanalysatoren zu verhindern, wird das Produktgas nach dem Heißgasfilter in einen wassergekühlten Kondensator geleitet, wo die Abtrennung der PAK stattfindet.

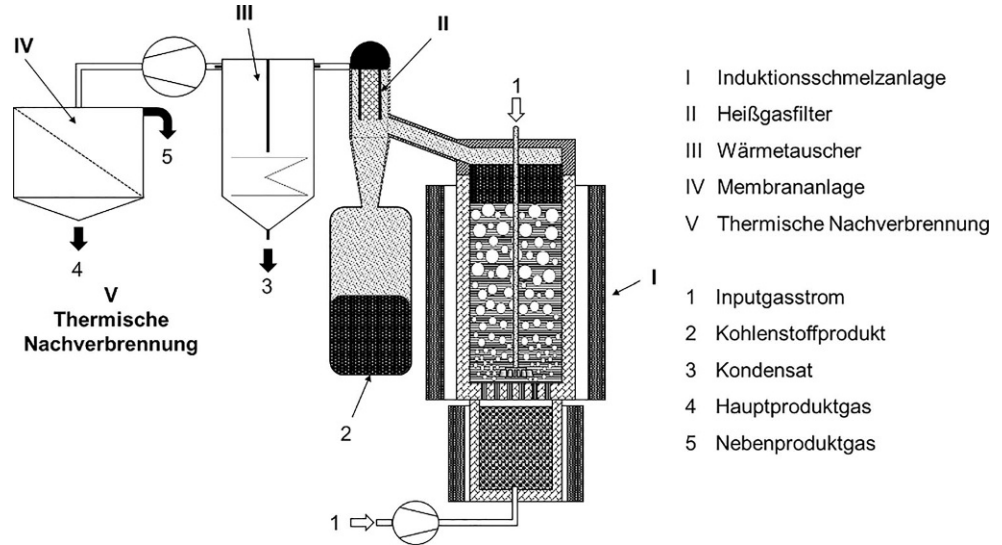
3. Pilotanlage zur Methanpyrolyse im Metallbad

An der Montanuniversität Leoben wurde im eigens dafür errichteten Forschungszentrum für Wasserstoff und Kohlenstoff eine Pilotanlage zur weiteren Entwicklung des Methanpyrolyseprozesses aufgebaut. Diese besteht aus dem Aggregat, in welchem auch die Methanzersetzung stattfindet und umfasst weitere Systeme, die eine vollständige Produktgasaufbereitung und Kohlenstoffabtrennung ermöglichen. Als Hauptaggregat fungiert zum einen eine Induktionsschmelzanlage, die den flüssigen Metallkatalysator enthält, in welchen das Methan eingeleitet wird. Zum anderen wird zukünftig auch die CH₄-Zersetzung in einer Plasmaanlage möglich sein.

Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Versuchssetups im Labormaßstab können in der geplanten Pilotanlage des Flüssigmetallblasensäulenreaktors folgende Prozessparameter eingestellt werden:

- Metallbadvolumen: bis zu 160 dm³
- Innendurchmesser der Reaktoren (drei verschiedene Tiegel): 150 mm, 300 mm, 600 mm
- Metallbadhöhe: max. 400–1000 mm (je nach Tiegel)

Abb. 2: Schematische Darstellung der Pilotanlage zur Methanpyrolyse im Flüssigmetallblasensäulenreaktor im Forschungszentrum für Wasserstoff und Kohlenstoff



- Technologie der CH₄-Einbringung: Lanze, Bodenspülstein, Rotor (Impeller)
- Inputvolumenstrom von CH₄: bis zu 12 Nm³/h (entspricht 200 NI/min)
- Pyrolyse bei erhöhtem Druck möglich: bis zu 10 bar einstellbar
- Temperaturen der Metallschmelze: bis zu 1600 °C

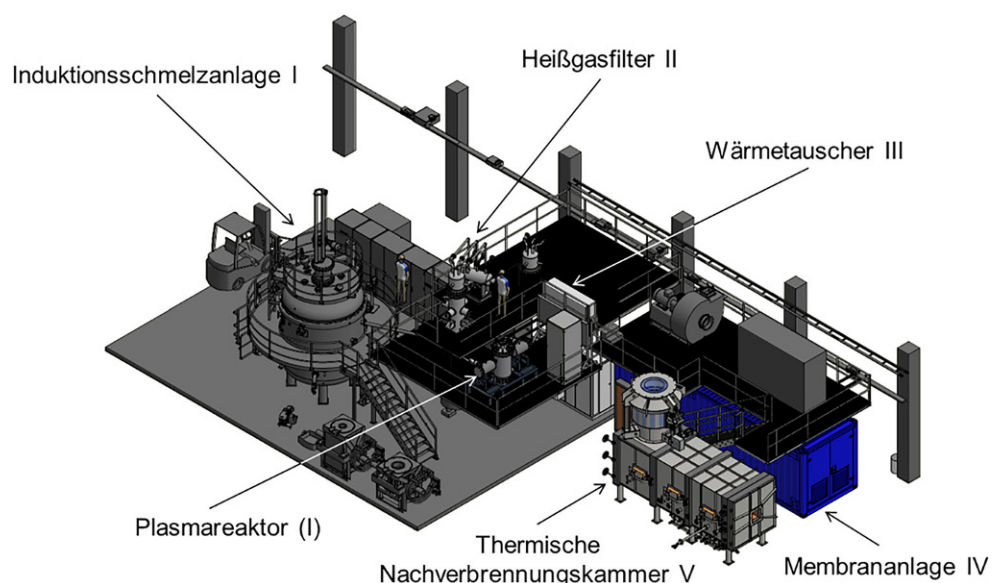
Abb. 2 zeigt eine schematische Darstellung der Pilotanlage zur Methanpyrolyse im Flüssigmetallblasensäulenreaktor mit den jeweiligen Hauptaggregaten (I bis V). In Abb. 3 ist die zugehörige Modelldarstellung mit denselben Anlagen zu sehen.

Komponente I stellt die Induktionsschmelzanlage dar, in der drei verschiedene Tiegelgrößen mit entsprechend angepassten Induktionsspulenabmessungen eingesetzt werden können. Um den Einfluss des Drucks auf die Methanzersetzung im Metallbad untersuchen zu können, befinden sich diese Spulen in einem wassergekühlten Dop-

pelmanteldruckkessel von der Fa. ABS GmbH, der für den Einsatz bei bis zu 10 bar geeignet ist. Dieser Behälter weist einen Durchmesser von 2,5m und ein Volumen von etwa 15m³ auf. Der Deckel ist schwenkbar ausgeführt, sodass ein Wechsel der drei Induktionsspuleneinsätze mittels Kran möglich ist. Nach Beendigung des jeweiligen Versuchs kann die Schmelze direkt im Druckbehälter in eine Kokille gegossen werden, da die Induktionsspuleneinsätze mit den entsprechenden Tiegeln kippbar ausgeführt sind. Die Einleitung des Methans ins Schmelzbad erfolgt entweder über den Deckel mit Hilfe von Lanzen bzw. Rotoren oder über Bodenspüler. Hauptlieferant der Induktionsschmelzanlage ist die Fa. Xerion Berlin Laboratories GmbH, wobei die Induktionsspulen mit der zugehörigen Steuerung von der Fa. Induga GmbH stammen. Zwei dieser genannten Spuleneinsätze sind auch in Abb. 3 neben dem Druckkessel gezeigt.

Wie bereits erwähnt, ist auch die thermische Zersetzung von CH₄ in einer Plasmaanlage möglich. Diese kann dann

Abb. 3: Modelldarstellung der Pilotanlage zur Methanpyrolyse im Forschungszentrum für Wasserstoff und Kohlenstoff



als Aggregat I anstelle der Induktionsschmelzanlage betrieben werden, wobei die nachfolgenden Anlagenkomponenten zur Produktgasbehandlung gemäß den Abb. 2 und 3 gleich bleiben.

Eine weitere Schlüsselkomponente des Systems stellt der als „Blow-Back-Filter“ ausgeführte Heißgasfilter (Anlage II) von der Fa. Pall dar. Dieser sorgt dafür, dass das Produktgas vom gebildeten festen Kohlenstoffprodukt abgetrennt wird. Er besteht aus einem Gehäuse aus hochwarmfestem Stahl und wird bei ca. 500 °C betrieben, um die Kondensation von PAK zu verhindern, die zu einer Verstopfung der keramischen Filterkerzen führen würden. Der sich an der Oberfläche dieser Filterelemente bildende Filterkuchen wird in Abhängigkeit vom Differenzdruck durch Rückblasen mit Methan entfernt, wodurch das Kohlenstoffprodukt in den Konus des Filtergehäuses fällt und sich im darunterliegenden Behältnis sammelt. Darüber hinaus kann der Heißgasfilter auch bis zu einem Druck von 10 bar betrieben werden.

Komponente III zeigt einen Wärmetauscher, der dazu dient, unerwünschte Zersetzungsprodukte (vor allem PAK) durch Kondensation zu entfernen. Dazu wird der Produktgasstrom auf Raumtemperatur abgekühlt, sodass diese Zwischenprodukte in flüssiger Form abgeschieden werden können. Dies ist notwendig, um den Gasstrom anschließend der Membrananlage (Aggregat IV) zuzuführen. Sie besteht aus einem Verdichter und einem mehrstufigen Membranabscheider mit dem Ziel, das nicht umgesetzte CH₄ vom erzeugten Wasserstoff abzutrennen.

Im letzten Aggregat der Pilotanlage, der thermischen Nachverbrennungskammer (Anlage V), findet die vollständige Verbrennung der Produktgase statt. Ziel ist es dabei, alle bei der Pyrolyse entstehenden Reaktionsprodukte vollständig zu neutralisieren. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit, die Produktgase aus jedem der einzelnen Hauptaggregate direkt in die thermische Nachverbrennungskammer zu führen. So kann beispielsweise der Gasstrom aus der Induktionsschmelzanlage bei Störung des Heißgasfilters direkt in der thermischen Nachverbrennungskammer neutralisiert werden.

Zusätzlich ist festzuhalten, dass es sich bei der Pilotanlage um einen Forschungsreaktor handelt, sodass keine weitere Verwendung oder Speicherung des gebildeten Wasserstoffs stattfindet. Allerdings besteht die Möglichkeit der umfassenden Analytik des Produktgasstroms zwischen den einzelnen Hauptaggregaten, um einerseits eine stabile Prozesssteuerung zu gewährleisten und andererseits zur Datensammlung bei den jeweiligen Versuchskampagnen, wodurch in weiterer Folge eine Prozessoptimierung möglich ist. Bezüglich des erzeugten Kohlenstoffproduktes ist festzuhalten, dass dieses teilweise mit Metallen aus der katalytisch wirkenden Schmelze verunreinigt ist, weshalb es weiteren Behandlungsschritten (mechanisch, hydrometallurgisch usw.) unterzogen werden muss. Daher ist auch eine exakte Kohlenstoffanalytik unerlässlich.

4. Zusammenfassung

Bei der Methanpyrolyse handelt es sich um eine vielversprechende Technologie zur Wasserstoffproduktion, die gleichzeitig festen Kohlenstoff erzeugt. Obwohl das Verfahren seit dem frühen 20. Jahrhundert bekannt ist, steht es erst im letzten Jahrzehnt im Fokus der Forschung und Industrie, insbesondere aufgrund der Dekarbonisierung in allen Wirtschaftssektoren und der steigenden Wasserstoffnachfrage.

Die Montanuniversität Leoben beschäftigt sich seit dem Jahr 2020 intensiv mit der Methanpyrolyse in flüssigen, katalytisch aktiven Metallschmelzen. Daher wurden unterschiedlichste Reaktorkonzepte im Labormaßstab konzipiert, um katalytisch wirkende Metalllegierungen zu untersuchen und eine kontinuierliche Prozessentwicklung zu ermöglichen sowie Prozessparameter zu optimieren.

Neben den Laboranlagen erfolgte an der MUL der Aufbau einer Pilotanlage in einem eigens dafür errichteten Forschungszentrum für Wasserstoff und Kohlenstoff, die eine größere Skalierung und eine breitere Untersuchung verschiedener Prozessparameter ermöglicht. Sie umfasst eine Induktionsschmelzanlage, ein Plasmaaggregat sowie Systeme zur Kohlenstoffabtrennung und Produktgasaufbereitung. Ziel muss es sein, Methan effizient zu zersetzen, um die Produkte Wasserstoff und Kohlenstoff in einer Reinheit zu gewinnen, sodass eine weitere Verwendung dieser möglich ist. Die Pilotanlage dient Forschungszwecken, weshalb der erzeugte Wasserstoff zwar nicht gespeichert, allerdings umfassend analysiert wird.

Als zukünftige Herausforderungen den Methanpyrolyseprozess betreffend sind insbesondere die weitere Skalierung, die Stabilität des Dauerbetriebs und die Qualität des erzeugten Kohlenstoffproduktes zu sehen. Zusammenfassend handelt es sich um ein vielversprechendes Verfahren, weshalb dessen Erforschung und Weiterentwicklung von hoher gesellschaftlicher Relevanz ist.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Heidelberger, M.: Hydrogen from Natural Gas without CO₂ Emissions (2019). https://www.kit.edu/kit/english/pi_2019_141_hydrogen-from-natural-gas-without-co2-emissions.php#:~:text=Methane%20pyrolysis%20will%20allow%20for,future%20climate%20neutral%20energy%20supply. Zugegriffen: 28. Febr. 2025

2. Wiedemann, K.: Neues Pyrolyseverfahren für preiswerten Wasserstoff (2021). <https://edison.media/umwelt/neues-pyrolyseverfahren-fuer-preiswerten-wasserstoff/25216862/>. Zugegriffen: 28. Febr. 2025
3. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: RECCS-Studie (2008). https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/RECCS_Endbericht_02_Kap4-8.pdf. Zugegriffen: 28. Febr. 2025
4. EnergyMonitor: Commercial-scale methane pyrolysis: the key to carbon-negative hydrogen (2022). <https://www.energymonitor.ai/sponsored/commercial-scale-methane-pyrolysis-the-key-to-carbon-negative-hydrogen>. Zugegriffen: 28. Febr. 2025
5. Runeel, D.: Technology landscape: key players in methane pyrolysis (2021). <https://www.luxresearchinc.com/blog/technology-landscape-key-players-in-methane-pyrolysis/>. Zugegriffen: 28. Febr. 2025
6. Graforce: Methan-Plasmalyzer (2022). <https://www.graforce.com/produkte/methan-plasmalyzer>. Zugegriffen: 28. Febr. 2025
7. BASF: Innovative Verfahren für eine klimafreundliche Chemie (2021). <https://bericht.basf.com/2021/de/aktionaere/basf-am-kapitalmarkt/methanpyrolyse.html>. Zugegriffen: 28. Febr. 2025
8. Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., Kolb, T.: State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *ChemBioEng Rev.* **7**(5), 150–158 (2020)
9. Vesovic, V.: METHANE (2011). <https://www.thermopedia.com/content/951/>. Zugegriffen: 28. Febr. 2025
10. Scheiblehner, D., Neuschitzer, D., Wibner, S., Sprung, A., Antrekowitsch, H.: Hydrogen production by methane pyrolysis in molten binary copper alloys. *Int. J. Hydrogen Energy* **48**(16), 6233–6243 (2023)
11. Scheiblehner, D., Antrekowitsch, H., Neuschitzer, D., Wibner, S., Sprung, A.: Hydrogen production by methane pyrolysis in molten Cu-Ni-Sn Alloys. *Metals* **13**(7), 1310 (2023)
12. Neuschitzer, D., Scheiblehner, D., Antrekowitsch, H., Wibner, S., Sprung, A.: Methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor for CO₂ free production of hydrogen. *Energies* **16**(20), 7058 (2023)
13. Ebner, T., Sprung, A., Hochfellner, A., Samberger, S., Antrekowitsch, H.: Preliminary investigations on methane pyrolysis for the production of H₂ in a molten metal bath. *World Metall. Erzmetall* **74**(2), 84–89 (2021)
14. Neuschitzer, D.: Production of carbon and hydrogen by methane pyrolysis: assessment of chemical properties of carbon produced via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor. *Proc. SIPS* **12**, 89–104 (2023)
15. Müller, K.T., Holappa, L., Neuschütz, D.: Control of ejections caused by bubble bursting in steelmaking processes. *Steel Res. Int.* **74**(2), 61–69 (2003)
16. Han, Z., Holappa, L.: Bubble bursting phenomenon in Gas/Metal/Slag systems. *Metall. Mater. Trans. B* **34**, 525–532 (2003)
17. Fau, G., et al.: Methane pyrolysis: Literature survey and comparisons of available data for use in numerical simulations. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **104**, 1–9 (2013)
18. Hu, C., et al.: Methane pyrolysis in preparation of pyrolytic carbon: Thermodynamic and kinetic analysis by density functional theory. *Chin. J. Aeronaut.* **33**(3), 1064–1073 (2020)
19. Matheu, D.M., et al.: Mechanism generation with integrated pressure dependence: a new model for methane pyrolysis. *J. Phys. Chem. A.* **107**(41), 8552–8565 (2003)

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.