DOI: 10.24405/13901

Anforderungen an die Elektrolyse-Methan-Zelle

Carsten Cosse*, Stefan Best und Detlef Schulz
Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
D-22043 Hamburg, Holstenhofweg 85
*E-Mail: carsten.cosse@hsu-hh.de

***Kurzfassung*—Aufgrund des wachsenden Anteils von fluktuierenden erneuerbaren Energien an der Energieversorgung wächst der Bedarf an Energiespeichern mit großer Kapazität, um die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Insbesondere die Sektorenkopplung zwischen Strom- und Gasnetz über Power-to-Gas erlaubt kann die notwendige Speicherkapazität unter Ausnutzung schon bestehender Infrastruktur darstellen. Dabei wird Wasserstoff in der katalytischen Wasserspaltung unter Einsatz elektrischer Energie erzeugt und im Gasnetz gespeichert. Dabei ist die Kapazität bisher durch die maximale Konzentration von Wasserstoff im Gasnetz limitiert, sodass erst eine weiterführende Methanisierung des Wasserstoffes zu einer vollständigen Sektorenkopplung führt. In diesem Beitrag wird das Konzept einer neuartigen Elektrolyse-Methan-Zelle vorgestellt, die gleichzeitig die Komplexität des Power-to-Gas-Systems reduzieren und die Effizienz steigern soll. Indem beide Prozesse, Elektrolyse und Methanisierung, in einem Apparat vereint werden, können Temperatursynergien effizienter genutzt werden. Es wird ein Anforderungskatalog für den Methanisierungsreaktor in der Elektrolyse-Methan-Zelle definiert und die möglichen Reaktortechnologien werden miteinander verglichen. Da keine der etablierten Reaktortechnologien alle Anforderungen ausreichend erfüllt, wird mit der Hybrid-Plasma-Katalyse eine neue Reaktortechnologie in Betracht gezogen.**

***Stichworte*—Power-to-Gas, Methanisierung, Elektrolyse-Methan-Zelle, Hybrid-Plasma-Katalyse,**

NOMENKLATUR

3P	Drei-Phasen
EMZ	Elektrolyse-Methan-Zelle
FB	Festbett
GHSV	Raumgeschwindigkeit (engl. Gas Hourly Space Velocity)
HPK	Hybrid-Plasma-Katalyse
PtG	Power-to-Gas
SNG	synthetisches Methangas (engl. Synthetic Natural Gas)
WS	Wirbelschicht

I. EINLEITUNG

Effiziente und kostengünstige Technologien zur Energiespeicherung sind zu einem zentralen Aspekt im Bereich der klimaneutralen Energieversorgung geworden. Sie sind unerlässlich um die Fluktuationen der erneuerbaren Energien auszugleichen, die mit einem steigenden Anteil an der Energieversorgung beteiligt sind. Die notwendigen Speicherkapazitäten um Fluktuationen in großen Stromnetzen, wie z.B. dem deutschen Stromnetz, zu kompensieren wurden in [1] mit $1.5\,\mathrm{TW\,h}$ beziffert. Diese Kapazität könnte durch das Erdgasnetz, welches in Deutschland etwa $220\,\mathrm{TW\,h}$ in Form von chemischer Energie speichert [2], bereitgestellt werden. Power-to-Gas (PtG) ermöglicht die Kopplung von Strom- und Gasnetz, sodass sowohl die Speicherkapazität als auch die Leitungskapazitäten des bestehenden Gasnetzes auch für elektrische Energie nutzbar werden [1], [3]. Bei PtG wird überschüssige elektrische Energie in einem Elektrolyseur genutzt, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten, wie in Gl. 1 dargestellt.

$$2H_2O \rightleftharpoons 2H_2 + O_2; \Delta H^0 = 571.8\,\mathrm{kJ\,mol^{-1}} \quad (1)$$

Direkt dürfen im Gasnetz jedoch bisher nur limitierte Mengen Wasserstoff bis zu einer maximalen Konzentrationen von $5\,\mathrm{Vol.-\%}$ eingespeist werden [4]. Diese Limitierung der Speicherkapazität kann jedoch durch eine Methanisierung des Wasserstoffes umgangen werden, dafür werden Kohlendioxid und Wasserstoff im Sabatier-Prozess zu Methangas und Wasser umgewandelt (Gl. 2).

$$CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O; \Delta H^0 = -165\,\mathrm{kJ\,mol^{-1}} \quad (2)$$

Das so produzierte synthetische Methangas (SNG) kann als vollwertiger Ersatz unbegrenzt in das Gasnetz geleitet werden. Ein weiterer Vorteil des PtG-Konzeptes ist die freie Skalierbarkeit von Speicherkapazität und Leistung der Energiewandler. Da die gespeicherte Energie in jedem Sektor und in jeder Leistungsklasse genutzt werden kann, ermöglicht PtG beispielsweise die Nutzung von überschüssigem Windstrom im Mobilitätssektor in Form von erdgasbetriebenen Kfz [2]. Bisher konnten PtG-Systeme jedoch keinen nennenswerten Marktanteil erreichen, da ein geringer Systemwirkungsgrad und hohe Kosten einer Marktdurchdringung im Wege stehen. In Abschnitt 2 dieser Veröffentlichung wird ein Konzept zur Verbesserung von PtG-Systemen mit Hilfe einer neuartigen Elektrolyse-Methan-Zelle (EMZ) vorgestellt. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Anforderungen für den integrierten Methanisierungsreaktor, sowie die zu erwartenden Vorteile gelegt. Der dritte Abschnitt stellt den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Methanisierungsreaktoren vor und bewertet die Eignung der verschiedenen Möglichkeiten anhand der vorgestellten Anforderungen. In der Zusammenfassung wird das Ergebnis der Technologieanalyse präsentiert und eine neuartige Reaktortechnik wird vorgestellt, die einige Probleme der bestehenden Ansätze lösen könnte. Darüber hinaus werden

die weiteren Untersuchungen der Autoren zu dem vorgestellten Reaktorkonzept charakterisiert.

II. Konzept: Elektrolyse-Methan-Zelle

In bisher realisierten PtG-Anlagen werden Elektrolyse und Methanisierung in voneinander unabhängigen Apparaten realisiert, die entsprechende Prozesskette ist in Abb. 1 dargestellt.

In der vorgeschlagenen EMZ wird die Methanisierungsreaktion direkt im Gasauslasskanal eines Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyseurs realisiert. Somit kann auf Gaskonditionierung und Zwischenspeicherung zwischen Elektrolyse und Methanisierung verzichtet werden, die eine direkte Ausnutzung von Temperatursynergien zwischen den beiden Prozessen verhindert. Weiterhin kann der Anlagenaufwand, und damit die Kosten für das PtG-System, gesenkt werden, da weniger Komponenten die komplette Prozesskette darstellen können. In Abb. 2(a) ist der vereinfachte Prozess der EMZ dargestellt, Abb. 2(b) zeigt einen möglichen schematischen Aufbau der EMZ.

Besonderes Augenmerk bei der Entwicklung der EMZ liegt auf der Auswahl einer geeigneten Reaktortechnologie, um die Methanisierungsreaktion zu realisieren. Im Folgenden werden die Anforderungen, die sich aus der Integration der beiden Teilsysteme für den Reaktor ergeben, aufgeführt.

A. Anforderungen für den Reaktor

Die Zentrale Anforderung für den Methanisierungsreaktor ist ein möglichst vollständiger Umsatz des eingesetzten Kohlendioxid, bei einem möglichst stöchiometrischen Verhältnis der eingehenden Stoffströme, sodass eine hohe Konzentration von Methan im Produktgasstrom erreicht wird. Der Umsatz von Kohlendioxid wird definiert als Verhältnis des durch die Reaktion verbrauchten Stoffstromes zum in den Reaktor eingeleiteten Stoffstrom (Gl. 3). Das stöchiometrische Verhältnis der Eduktgase des Sabatier-Prozesses kann an den Koeffizienten der Reaktionsgleichung (Gl. 2) abgelesen werden, es liegt bei $\nu = 4/1(H_2/CO_2)$.

$$X_{CO_2} = \frac{\dot{n}_{CO_2,\text{in}} - \dot{n}_{CO_2,\text{out}}}{\dot{n}_{CO_2,\text{in}}} \tag{3}$$

Die Raumgeschwindigkeit ist definiert als Verhältnis des Normvolumenstromes der Eduktgase zum Gesamtvolumen des Reaktors (Gl. 4). Sie ist ein Maß für die Kompaktheit eines chemischen Reaktors.

$$GHSV = \frac{\dot{V}_\text{E}}{V_\text{R}} \tag{4}$$

Die nachfolgenden Anforderungen sind für eine optimale Funktion der Elektrolyse-Methan-Zelle definiert, ohne Rücksicht auf etwaige Limitationen verschiedener Reaktortechnologien. Eine Reaktortechnologie die sämtlich Anforderungen vollständig erfüllt würde eine direkte Einspeisung des trockenen Produktgases ohne weitere Aufbereitung auch bei stark fluktuierendem Betrieb ermöglichen.

- **Raumgeschwindigkeit (GHSV)** Der Reaktor muss einen signifikanten Umsatz ($X_{CO_2} > 95\,\%$) bei hoher Raumgeschwindigkeit ($GHSV > 10\,000\,\text{h}^{-1}$) und näherungsweise stöchiometrischer Gaszufuhr ($4 \leq \nu \leq 5$) erreichen. Der begrenzte Bauraum innerhalb des Gasauslasskanals des Elektrolyseurs erfordert ein kompaktes Reaktordesign bei gleichzeitig hohem Umsatz. Um eine komplizierte Abtrennung von nicht abreagiertem Kohlendioxid aus dem Produktgas, oder eine weitere Reaktorstufe zur vollständigen Methanisierung zu vermeiden, wird der Reaktor eher unter-stöchiometrisch mit Kohlendioxid versorgt. Dies geschieht um die zulässige Kohlendioxidkonzentration von $6\,\text{Vol.} - \%$ im trockenen Produktgas einzuhalten, und damit eine direkte Einspeisung in das Gasnetz zu ermöglichen [4].
- **Teillast** Der Umsatz des Reaktors soll im Bereich von $20 - 100\,\%$ der Nennraumgeschwindigkeit um weniger als $10\,\%$ vom Nennwert abweichen. Diese Anforderung ergibt sich aus der Betriebsweise von PtG-Systemen, die mit ihrer Leistungsaufnahme an das Überangebot durch fluktuierende erneuerbare Energien gebunden sein sollen. Daher werden die Systeme nur selten im Nennpunkt betrieben und müssen auch im Teillastbereich effizient funktionieren. Darüber hinaus sollte ein Teillastbetrieb auch die Lebensdauer des Reaktors, bzw. der eingesetzten Katalysatoren nicht beeinträchtigen. Auch die Anforderungen an die Zusammensetzung des Produktgases [4] müssen stets erfüllt werden.
- **Instationäres Verhalten** Eine instationäre Betriebsweise mit Gradienten entsprechend der Anforderungen für primäre Regelleistung [6] ($100\,\% \geq |\Delta GHSV(\Delta t)| > 5\,\%\ GHSV_\text{n}, \Delta t = 30\,\text{s}$) darf nur zu geringen Einbußen der Umsatzrate ($|\Delta X(CO_2)| < 10\,\%\ X_{CO_2,\text{n}}$) führen. Diese Anforderung besteht ebenfalls, da ein wirtschaftlicher Einsatz von PtG-System nur in Abhängigkeit des fluktuierenden Überangebotes von elektrischer Energie erfolgen kann. Daher müssen PtG-System auch bei instationärem Betrieb effizient arbeiten. Die Anforderungen an die Zusammensetzung des Produktgases [4] müssen auch unter instationären Bedingungen eingehalten werden.
- **Thermische Kompatibilität mit Elektrolyse** Die Effizienz der Elektrolysezelle darf durch die Integration des Methanisierungsreaktors nicht beeinträchtigt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturniveaus von Elektrolyse und Methanisierung (vgl. Abb. 1 und 2(a)) erfordert die Integration beider Prozesse in einem Apparat ein geeignetes Temperaturmanagement, oder eine Anpassung der beiden Temperaturfenster aneinander.
- **Kostenreduktion** Sowohl die Anschaffungs- als auch die Betriebskosten von EMZ sollen unterhalb der Kosten für vergleichbare herkömmliche PtG-Systeme mit getrenntem Aufbau liegen.
- **Reduktion der Systemkomplexität** Um der Grundidee der Reduktion des Anlagenaufwandes gerecht zu werden darf die EMZ nicht dazu führen, dass ein exter-

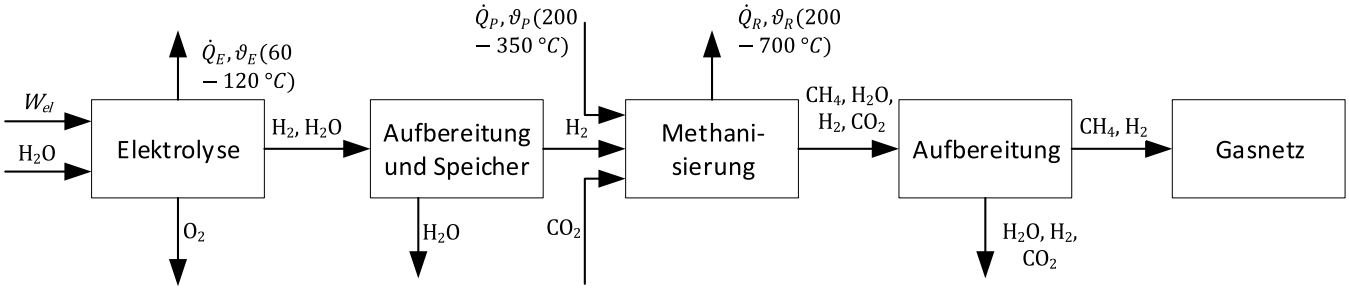

Abbildung 1: Typische Prozesskette der realisierten PtG-Anlagen (nach [5]).

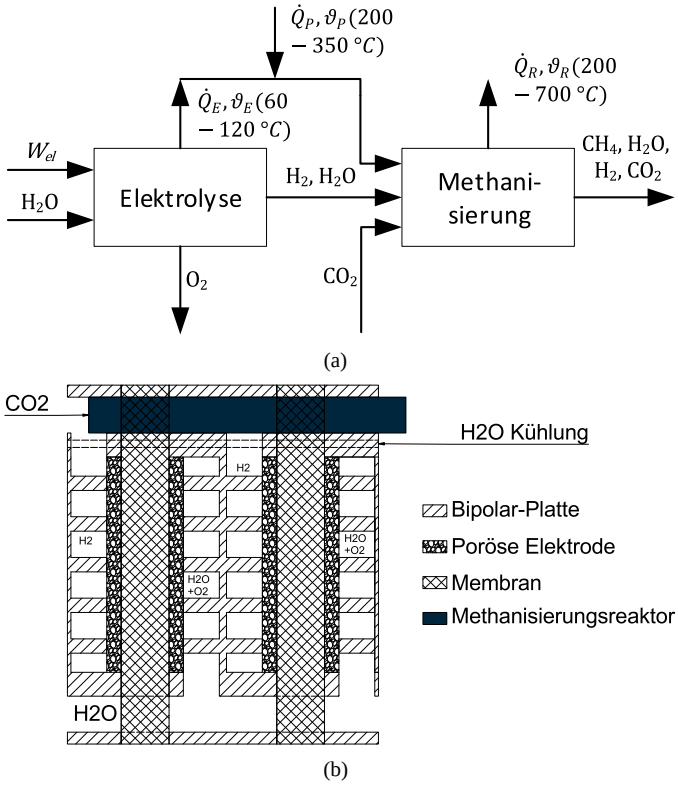

Abbildung 2: (a) Thermochemische Prozesskette der EMZ (nach [5]), (b) Schematischer Aufbau einer EMZ

ner chemischer Reaktor durch eine Vielzahl zusätzlicher Komponenten ersetzt wird, um den Betrieb der EMZ zu ermöglichen. Dies beinhaltet sowohl Komponenten einer nachgeschalteten Aufbereitung der Gase, als auch Komponenten um die Reaktoren an sich zu betreiben.

B. Erwartete Vorteile der EMZ

Durch die direkte Integration von Elektrolyse und Methanisierung in einem Apparat können die Temperatursynergien zwischen den Teilprozessen effizienter und ohne zusätzlichen anlagentechnischen Aufwand genutzt werden. Weiterhin stellt die EMZ eine flexible PtG-Technologie dar, die über einen weiten Lastbereich mit einem hohen Wirkungsgrad arbeitet. Diese Effizienzsteigerung des PtG-Systems trägt zu einer Senkung der Betriebskosten bei und steigert somit die Wettbewerbsfähigkeit von PtG. Außerdem ermöglicht die verkürzte Prozesskette einen Verzicht auf zusätzliche Zwischenspeicher für Wasserstoff, womit eine substantielle Reduktion der Anschaffungskosten für ein solches System erreicht werden kann.

III. Methanisierungsreaktoren

Die Methanisierung kann entweder in einem thermochemischen oder biologischen Reaktor erfolgen. Da die erreichbaren Raumgeschwindigkeiten der biologischen Methanisierung jedoch um Größenordnungen unterhalb der Anforderungen [7] liegen soll hier nicht näher auf diese Technologie eingegangen werden. Im thermochemischen Prozess liegt das thermodynamische Gleichgewicht der Sabatier Reaktion (Gl. 2) bei niedrigen Temperaturen auf der Seite der Produkte und wandert mit steigender Temperatur auf die Seite der Edukte. Dahingegen ist die Reaktionskinetik bei niedrigen Temperaturen sehr langsam und erreicht erst im Temperaturbereich von $250-400\,°\mathrm{C}$ technisch relevante Größenordnungen. Daher ist der entscheidende Aspekt bei der Auslegung von thermochemischen Reaktoren für die Methanisierung das Temperaturmanagement. Die Reaktionswärme des stark exothermen Prozesses (vgl. Gl. 2) muss abgeführt werden und gleichzeitig gilt es die notwendige Mindesttemperatur für eine schnelle Reaktionskinetik zu erhalten. Da die Aktivierungsenergie für die Reaktion sehr groß ist wird ein Katalysator benötigt, um die Reaktion auch bei technisch verträglichen Temperaturen zu realisieren. Als Katalysator werden Nickel, oder Metalle aus der Gruppe der Platinmetalle (Ruthenium, Rhodium, etc.) [8] verwendet. Der Katalysator wird in der Regel auf inerten Trägermaterialen wie Aluminiumoxid, Titandioxid oder anderen keramischen Materialien aufgebracht.

A. Drei-Phasen-Reaktoren (3P)

In 3P-Reaktoren wird ein chemisch inertes, flüssiges Medium durch den Reaktor und einen externen Wärmeübertrager zirkuliert um die Reaktortemperatur möglichst konstant im optimalen Bereich zu halten. Die Katalysatorpartikel werden durch die Strömung des Gases in einer Suspension gehalten und sind annähernd homogen im gesamten Reaktorvolumen verteilt. Das Eduktgas wird am Boden des Reaktors über Düsen oder eine poröse Filterplatte ebenfalls möglichst verteilt in den Reaktor eingeleitet, wie in Abb. 3 dargestellt.

Die im Vergleich zum Gas hohe Wärmekapazität des flüssigen Mediums, sowie die kontinuierliche Temperierung durch

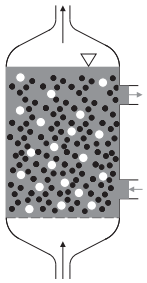

Abbildung 3: Schematisch Darstellung eines Drei-Phasen-Reaktors (fest = schwarz, flüssig = grau, gasförmig = weiß)

den externen Wärmeübertrager sorgen für eine sehr homogene Temperatur und Reaktionsverteilung im Reaktor und verhindern so ein thermisches Durchgehen des Reaktors. Je nach Auslegung kann die Zirkulation des Mediums durch die Durchströmung des Reaktors mit den Reaktionsgasen realisiert werden (natürlicher Umlauf), oder eine Förderpumpe wird eingesetzt. Nur beim Einsatz einer Förderpumpe kann auch ein Teillastbetrieb realisiert werden, da die niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten im Teillastbereich bei natürlichem Umlauf zu einem Absinken der Katalysatorpartikel auf den Boden des Reaktors führen. Die möglichen Raumgeschwindigkeiten für die Methanisierung in 3P-Reaktoren liegen im Bereich von $500-1000\,\mathrm{h}^{-1}$ [7], da der Massentransport über die Phasengrenzflächen den limitierenden Prozessfaktor darstellt.

B. Wirbelschichtreaktoren (WS)

WS-Reaktoren bestehen aus einem losen Bett von Katalysatorpartikeln und inerten Partikeln, die in einem Reaktor über einen Lochboden, bzw. einen Boden mit Austrittsdüsen eingebracht werden (Abb. 4).

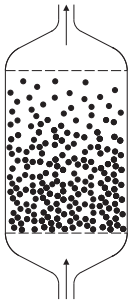

Abbildung 4: Schematisch Darstellung eines Wirbelschichtreaktors

Durch die Strömung der Eduktgase und eines chemisch inerten Trägergases wird das Partikelbett fluidisiert. In diesem Zustand können deutlich höhere Massen- und Wärmetransportraten im Reaktor erreicht werden, als bei einer starren Partikelschüttung. Es kann eine näherungsweise homogene Temperaturverteilung innerhalb des Reaktorbettes erreicht werden, sodass eine einstufige Methanisierung realisierbar ist [7]. Typische Raumgeschwindigkeiten die mit Wirbelschichtreaktoren für die Methanisierung erreicht werden können liegen zwischen $1500-3000\,\mathrm{h}^{-1}$ [9].

C. Festbettreaktoren (FB)

FB-Reaktoren weisen eine Reihe von unterschiedlichen Ausführungsformen auf, je nachdem worauf das Katalysatormaterial in den Reaktor eingebracht wird. Übliche Varianten sind lose Schüttungen von Körnern oder Pellets, wie in Abb. 5 dargestellt, aber auch mit Katalysatoren beschichtete Wabenstrukturen, oder Filze werden verwendet.

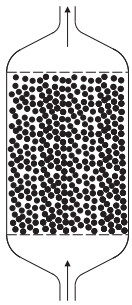

Abbildung 5: Schematisch Darstellung Festbettreaktors mit einer Schüttung von Katalysatorpartikeln als Bett.

Im Vergleich zu 3P- oder WS-Reaktoren weisen FB-Reaktoren geringe Wärmetransportraten auf, sodass eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Reaktors nur durch ein komplexes Temperierkonzept zu erreichen ist. Dies bedeutet komplexe Reaktorgeometrien um die Kontaktfläche zwischen Bett und Temperiermedium zu vergrößern, zum Beispiel durch einen Aufbau des Reaktors als Rohrbündel. Hierbei kann die Schüttung in oder zwischen den Rohren eingebracht werden. Trotz des komplexen thermischen Verhaltens ermöglichen FB-Reaktoren einen hohen Umsatz auch bei Raumgeschwindigkeiten im Bereich von $4000-16\,000\,\mathrm{h}^{-1}$ [8].

D. Bewertung der Reaktortechnologien

Auf Grundlage der vorgestellten Eigenschaften, sowie der anzustrebenden Anforderungen aus Abschnitt II-A soll eine Bewertung der unterschiedlichen Reaktortechnologien für eine Anwendung in EMZ durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle I dargestellt.

Tabelle I: Bewertung der Reaktortechnologien bzgl. der Anforderungen für EMZ

Anforderung	3P	WS	FB
Raumgeschwindigkeit	-	-	o
Teillast	o	o	+
Instationäres Verhalten	o	-	o
Thermische Kompatibilität	+	o	o
Kostenreduktion	-	-	o
Systemkomplexität	-	-	+

\+ = gut erfüllt, o = erfüllt, - = nicht erfüllt

IV. Zusammenfassung und Ausblick

EMZ bieten das Potential die Marktreife der PtG-Technologie durch Steigerung der Effizienz und Senkung der Kosten zu erreichen. Entscheidend für den Erfolg von EMZ wird die geeignete Reaktortechnologie, sowie deren Integration in die Elektrolyse sein, sodass die Anforderungen, die in Abschnitt II-A definiert wurden, erfüllt werden. Wie in Tabelle I dargestellt, ist von den etablierten Reaktortechniken keine ideal geeignet, um alle Anforderungen zu erfüllen. Daher soll im Rahmen der Forschung im Projekt "StBZuEL"eine neuartige Reaktortechnik, die Hybrid-Plasma-Katalyse (HPK) untersucht werden.

Die HPK-Technik verbindet einen herkömmlichen FB-Reaktor mit den Effekten einer dielektrischen Barriereentladung, um so die mögliche Raumgeschwindigkeit des Reaktors zu steigern und das Temperaturniveau des Reaktors zu senken. Ein grundsätzlicher Nachweis der Funktionalität dieser Reaktortechnologie wurde von Nizio et al. [10] erbracht. Es konnte gezeigt werden, dass auch im Temperaturbereich der Elektrolyse Umsätze von bis zu $80\,\%$ auch bei Raumgeschwindigkeiten von $50\,000\,\mathrm{h}^{-1}$ möglich sind. Ein beispielhafter schematischer Aufbau eines HPK-Reaktors ist in Abb. 6 zu sehen.

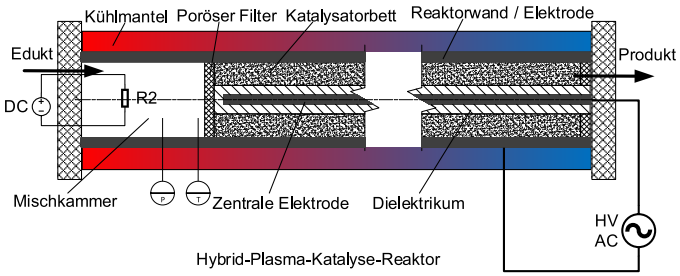

Abbildung 6: Schematischer Aufbau des geplanten HPK-Reaktors

Das Prinzip der HPK-Technik ist die Zufuhr der Aktivierungsenergie in Form eines nicht-thermischen Plasma, anstelle von hohen Temperaturen [12]. Das Plasma wird erzeugt, indem eine Wechsel- oder gepulste Gleichspannung mit hoher Amplitude zwischen zwei Elektroden im Reaktor angelegt wird. Durch eine dielektrische Barriere werden direkte Durchschläge und somit hohe Ströme, sowie thermische Belastungen durch Lichtbögen verhindert. Es kommt vor allem zu Oberflächenentladungen auf dem Dielektrikum und im Partikelbett zwischen den Elektroden. Eine Steuerung der Versorgungsspannung für das Plasma kann die Intensität des Plasma und damit die Reaktionsrate im Reaktor beeinflussen, sodass ein hoch dynamisches Verhalten des Reaktors erreicht werden kann [11]. Damit erfüllen HPK-Reaktoren mehr der in Abschnitt II-A definierten Anforderungen als alle herkömmlichen Reaktortechnologien.

Im Rahmen der Forschung an der Helmut-Schmidt-Universität soll ein Versuchsstand zur Untersuchung der Eignung der HPK-Technik für den Einsatz in EMZ entstehen. Die bisherigen Versuche wurden bei Drücken von maximal $1,013\,\mathrm{bar}$ durchgeführt, um bei Spannungen von $15\,\mathrm{kV}$ einen ausreichend großen Spalt zwischen den Elektroden realisieren zu können [10], [11]. Die Arbeiten an der Helmut-Schmidt-Universität sollen sich vor allem mit dem Betrieb von HPK-Reaktoren bei Drücken bis zu $20\,\mathrm{bar}$ befassen, da der Anteil von Wasserdampf am Elektrolysegas mit zunehmendem Druck sinkt. Da Wasserdampf auf der Produktseite des Sabatier-Prozess steht (vgl. Gl. 2), sorgt ein hoher Wasserdampfanteil im Elektrolysegas für eine Verschiebung des thermodynamischen Gleichgewichtes in Richtung der Edukte der Reaktion und verringert somit die Ausbeute des Reaktors. Weitere Informationen zu den geplanten experimentellen Untersuchungen können im Beitrag "Hybrid-Plasma-Katalyse zur Methanisierung im Power-to-Gas Prozess" in diesem Band gefunden werden.

Neben den experimentellen Untersuchungen sollen numerische Simulationen zur weiterführenden Analyse des komplexen Zusammenspieles von Plasma und thermochemischer Reaktion durchgeführt werden. Dafür sollen bestehende 0-D Modelle [13], [14] der Plasmachemie auf die relevanten Komponenten vereinfacht und in die thermochemische Simulation integriert werden. Darüber hinaus soll der Zusammenhang zwischen Plasmaintensität und der elektrischen Feldstärke bestimmt werden, sodass der vollständige Prozess in einer Simulation räumlich abgebildet werden kann. Dies ermöglicht die Simulation von EMZ im Gesamten, um so das Verständnis der Interaktionen zwischen den Teilprozessen zu erweitern.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des vom BMWi unter dem Förderkennzeichen 03ET6133A geförderten und in Kooperation mit Altran durchgeführten Projektes "Entwicklung und Test von elektrisch steuerbaren Membraneinheiten in Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen und Elektrolyseuren mit interner Methanisierung im Auslasskanal" erarbeitet.

Literatur

[1] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), "dena-Netzstudie II: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick auf 2025," Berlin, November 2010

[2] R. van Basshuysen, "Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb: *Wege zur klimaneutralen Mobilität*" , Springer Wiesbaden, 2015

[3] T. Schaaf, J. Grünig, M. R. Schuster T. Rothenfluh, A. Orth, "Methanation of CO2 - storage of renewable energy in a gas distribution system," *Energ Sustain Soc*, Bd. 4, Nr. 2

[4] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, "Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz," Technische Richtlinien, G 14, November 2007.

[5] D. Schulz, "High efficiency fuel cell," Europäische Patentanmeldung, EP2978875, März 25, 2014

[6] S. Spieker, J. Kopiske, G. Tsatsaronis, "Flexibilität aus Wind- und Photovoltaikanlagen im Regelenergiemarkt 2035," in *14. Symposium Energieinnovation: ENERGIE FÜR UNSER EUROPA*, 10.-12.02.2016, Graz

[7] M. Götz und F. Graf, "State of the Art and Perspectives of CO2 Methanation Process Concepts for Power-to-Gas Applications," in *International Gas Union Research Conference (IGRC 2014): Gas Innovations Inspiring Clean Energy*, 17-19.09.2014, Copenhagen: International Gas Union Represented by the Secretary General (IGU)

[8] E. Z. Golosman und V.N. Efremov, "Industrial Catalysts for the Hydrogenation of Carbon Oxides," *CATALYSIS IN INDUSTRY*, Bd. 4, Nr. 4, S. 267-283

[9] J. T. Cobb und R. C. Streeter, "Evaluation of Fluidized-Bed Methanation Catalysts and Reactor Modeling," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Bd. 18, Nr. 4, S. 672-678

[10] M. Nizio, A. Albarazi, S. Cavadias, J. Amouroux, M. E. Galvez, et al.. “Hybrid plasma-catalytic methanation of CO2 at low temperature over ceria zirconia supported Ni catalysts,” *Int. J. of Hydrogen Energy*, Bd. 41, Nr. 27, S.11584-11592

[11] B. Ashford und X. Tu, “Non-thermal plasma technology for the conversion of CO2,” *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Bd. 3, Nr. 2, S. 45-49

[12] U. Kogelschatz, “Fundamentals and Applications of Dielectric-Barrier Discharges,”, [Online], Verfügbar: https://www.researchgate.net/publication/228799858_Fundamentals_and_applications_of_dielectric-barrier_discharges [Abgerufen: 23.05.2019]

[13] P. M. J. Koelman, S. Heijkers, S. T., Mousavi, W. Graef et al., “A Comprehensive Chemical Model for the Splitting of CO2 in Non-Equilibrium Plasmas,”*Plasma Process Polym*, Bd. 14, Beitrag 1600155, 2017

[14] P. M. J. Koelman et al., “Studying complex chemistries using PLASIMO’s global model,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, Bd. 682, Beitrag 012034, 2016