

Autarkes Reversibles Festoxid-Brennstoff- /Elektrolysezellen-System (rSOC) als zukunftssträchtige Power-to-Gas-Technologie

Michael PREININGER¹ (*), Bernhard STOECKL¹, Vanja SUBOTIC¹, Richard
SCHAUPERL², Christoph HOCHENAUER¹

¹ Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25b, A-8010 Graz, Tel.: +43 316 873-4209, Fax: +43 316 873-7305, michael.preininger@tugraz.at, www.tugraz.at/institute/iwt

² AVL List GmbH, Hans-List-Platz 1, A-8020 Graz, Tel.: +43 316 787-2168, Fax: +43 316 787-3799, richard.schauperl@avl.com, www.avl.com

Kurzfassung: Das Anliegen hinsichtlich ökologischer und umweltpolitischer Themen steigt stetig aufgrund des globalen Klimawandels, der Großteils durch den Treibhauseffekt verursacht wird. CO₂ ist dabei mit mehr als 80% das primäre Treibhausgas, das durch menschliche Aktivitäten ausgestoßen wird. Eine äußerst zukunftssträchtige Lösung einer hocheffizienten und umweltfreundlichen Energieerzeugung und -speicherung sind Power-to-Gas-Technologien (P2G), bei denen (überschüssige) elektrische Energie in Form von Gas gespeichert wird. Eine dazu fähige und vielversprechende Technologie ist dabei die Hochtemperatur-Brennstoffzelle, die Wasserstoff, Kohlenwasserstoffe sowie Reformatgase direkt in elektrische Energie elektrochemisch umwandelt. Zudem kann sie problemlos auch reversibel als Elektrolysezelle betrieben werden. Im Elektrolysebetrieb wird der Zelle anstelle des Brenngases entweder Wasserdampf (H₂O), Kohlendioxid (CO₂) oder ein Gemisch aus beiden Gasen (H₂O/CO₂ - Ko-Elektrolyse) zugeführt. Somit kann überschüssige Energie in Form eines Brenngases als chemischer Energieträger gespeichert werden oder als Synthesegas (H₂ + CO) für die Produktion synthetischer Brennstoffe eingesetzt werden. Durch die Ergänzung entsprechender Komponenten kann mit der Brennstoff-/Elektrolysezelle im reversiblen Betrieb ein autarkes Energieversorgungs-System realisiert werden.

Keywords: reversible Festoxidzelle, elektrochemische Charakterisierung, Elektrolyse, autarkes System

1 Einleitung

Umweltaspekte erhöhen stetig die Nachfrage nach erneuerbaren Energien und den Einsatz von alternativen Technologien. Hauptfaktoren dafür sind dabei die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen sowie die Erzeugung von Treibhausgasen durch Verbrennung dieser [1]. Ein bestimmter Anteil des zunehmend steigenden Energiebedarfs könnte durch die Verwendung von umweltfreundlicheren Energiequellen gedeckt werden. Zudem ist es durch entsprechende Energiespeichertechnologien möglich unabhängig von äußerlichen Einflüssen Energie zu speichern und wieder bereitzustellen. Die Energieträger und Systeme unterliegen bei der Umwandlung von Primär- zur Endenergie verschiedenen Verlusten [2].

Die Brennstoffzelle gewinnt als hocheffiziente Technologie zur Umwandlung von Brennstoffenergie in elektrische Energie zunehmend an Bedeutung und trägt zur Reduzierung

von klimaschädlichen Emissionen bei. Unter den Brennstoffzellen hat die oxidkeramische Hochtemperatur-Brennstoffzelle (engl. Solid Oxide Cell; SOC) den höchsten Wirkungsgrad und zeichnet sich durch eine herausragende Brennstoffflexibilität und durch die Verwendung von kostengünstigen Katalysatoren aus. SOCs sind elektrochemische Zellen, die sowohl im Brennstoffzellenmodus (SOFC) elektrische Energie erzeugen als auch im umgekehrten Betrieb als Elektrolyseur (SOEC) Wasserstoff oder Synthesegas produzieren können. Somit eignet sie sich zur stationären Wasserstoffherzeugung- und -speicherung im kleineren Maßstab. Als P2G-Lösung können SOCs in der Wasserelektrolyse Wasserstoff erzeugen. Die sogenannte Ko-Elektrolyse von Wasser und Kohlendioxid ermöglicht ohne Verbrauch von nicht-erneuerbaren Energien oder Treibhausgas-Emissionen die Herstellung von Synthesegas (H_2+CO). Das so erzeugte Synthesegas kann dann in einem nachfolgenden Schritt mit dem Fischer-Tropsch Verfahren weiter zu verschiedensten Kohlenwasserstoffen synthetisiert werden [3]. Im Brennstoffzellenbetrieb kann die SOC dann diese Gasgemische sowie mit Kohlenwasserstoffen wie Methan oder Reformationsprodukten aus Kerosin, Diesel oder Ethanol betrieben werden.

1.1 Festoxid-Brennstoff-/Elektrolysezellen als zukunftssträchtige Power-to-Gas-Technologie

Die Steigerung des Energieverbrauchs erfordert neue Energielösungen welche hohe Effizienz und saubere Energieerzeugung sichern. In diesem Sinne erscheinen Festoxidbrennstoffzellen als eine vielversprechende Energieumwandlungseinheit, die einen hohen elektrischen Wirkungsgrad durch die direkte Umwandlung chemischer Energie des gasförmigen Brennstoffs in elektrische Energie ohne verlustbehaftete Umwandlungsschritte ermöglicht. Da die SOFC-Systeme nicht durch den Carnot Prozess begrenzt sind, ist das Effizienzpotential nur durch die ideale Nernstspannung und den Zellwiderstand begrenzt [4]. Speziell von Vorteil dieser Technologie ist die Tatsache, dass im Kontrast zu Verbrennungskraftmaschinen (VKM) schon bei sehr kleinen Nennleistungen ein sehr hoher Wirkungsgrad dargestellt werden kann.



Abbildung 1 Brennstoffzellen-APU [5]

Im Brennstoffzellenbetrieb sind Hochtemperaturbrennstoffzellen-Systeme sowohl für die Energieerzeugung im kleinen Rahmen als auch für die großtechnische Energieerzeugung gut geeignet. SOFCs sind u.a. für kombinierte Wärme- und Stromerzeugung (z.B. micro-Combined Heat and Power, μ CHP), oder auch als mobile Anwendung in Form einer Auxiliary Power Unit (kurz APU) gut geeignet, da die zugrundeliegende Technologie sowohl Elektrizität

als auch Wärme aus einem einzigen Energieträger bereitstellen kann. Zudem können die Systeme mit vielen Arten von Kraftstoffen einschließlich Erdgas, Diesel, Biodiesel, Propan, Benzin und Kohlekraftstoff betrieben werden.

Abbildung 1 zeigt ein dieselbetriebenes Brennstoffzellensystem für die mobile Erzeugung von elektrischer Energie für Nutzkraftfahrzeuge. Die dafür notwendigen Komponenten sind dabei auf kleinstem Raum verbaut, wobei das Herzstück der APU von der SOFC-Einheit gebildet wird. Festoxidbrennstoffzellen als Brennstoffzelleneinheit im Vergleich zu PEM-Systemen bedürfen keiner komplexen Brennstoffaufbereitung und ermöglichen dadurch eine leichtere und kompaktere Ausführung. Ein weiterer Vorteil ist eine effiziente Stromgeneration aus Diesel mit hohen Wirkungsgraden und wodurch die SOC sehr energiesparend arbeitet. Eine derartige APU kann in alle kommerziellen Fahrzeuge integriert werden und ist verglichen mit konventionellen Diesel-APUs äußerst geräuscharm und verursacht sehr niedrige Emissionen. Neben der geringen emittierten Menge an Klimagasen wie z.B. Kohlendioxid sind auch Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x) ebenso vernachlässigbar, da die Oxidation des verwendeten Kraftstoffs bei niedrigeren Temperaturen, als für die NO_x-Produktion benötigt, auftritt. Für einen stabilen Betrieb der Brennstoffzelle werden Sulfate, Chloride und Phosphide aus den Brennstoffen entfernt, sodass fast keine Emissionen von Schwefeloxiden (SO_x) entstehen.



Abbildung 2 Stationäre APUs von Bosch Thermotechnik/Buderus (links)[6] und Ceramic Fuel Cells (rechts)[7]

Eine dezentrale Möglichkeit zur Wärme- und Stromerzeugung sind die Abbildung 2 dargestellten stationäre APUs von Bosch Thermotechnik/Buderus bzw. Ceramic Fuel Cells. Durch die Verwendung von Erdgas als Brennstoff werden der Primärenergieaufwand und der Ausstoß von Emissionen deutlich reduziert. Sie laufen nahezu kontinuierlich und durch einen hohen elektrischen Wirkungsgrad bieten diese Anlagen die Möglichkeit als ganzjähriger zuverlässiger und emissionsarmer Grundlastgenerator.

Wie bereits eingangs erwähnt kann eine Brennstoffzelle ganz einfach reversibel als Elektrolysezelle betrieben werden. Die Elektrolyse stellt dabei in diesem reversiblen System die Rückreaktion der Brennstoffzelle unter Zuführung von elektrischer Energie dar. Die Bereitstellung der notwendigen elektrischen Energie kann dabei prinzipiell CO₂ neutral durch

Strom aus Wasserkraft, Windkraft oder Photovoltaik erfolgen. Die Festoxidbrennstoffzelle kann im Gegensatz zur alkalischen und PEM Elektrolyse uneingeschränkt im reversiblen Modus als Festoxid-Elektrolysezelle (SOEC) betrieben werden und hat zudem einen erheblichen Wirkungsgradvorteil.

Die beispielhaft genannten Entwicklungen einer mobilen elektrischen Energieerzeugung sowie der stationären dezentralen Wärme- und Stromerzeugung mittels SOFC-Einheit zur Energieversorgung zeigen, dass sich die SOFC Technologie bereits auf einem hohen Entwicklungsstadium befindet. Die SOEC Technologie kann dabei von den jüngsten Forschungsergebnissen und der Weiterentwicklung der SOFC Technologie profitieren. Übergeordnetes Ziel dieser Forschungsarbeit ist der Nachweis der Funktionalität eines autarken reversibel betriebenen Gesamtsystems – sprich in Zeiten von Energieüberschuss kann mittels Elektrolyse Wasserstoff in der Wasserelektrolyse bzw. Synthesegas in der Ko-Elektrolyse erzeugt und gespeichert werden – P2G. Bei Energiebedarf können die gespeicherten Gase wiederum rückverstromt werden – G2P.

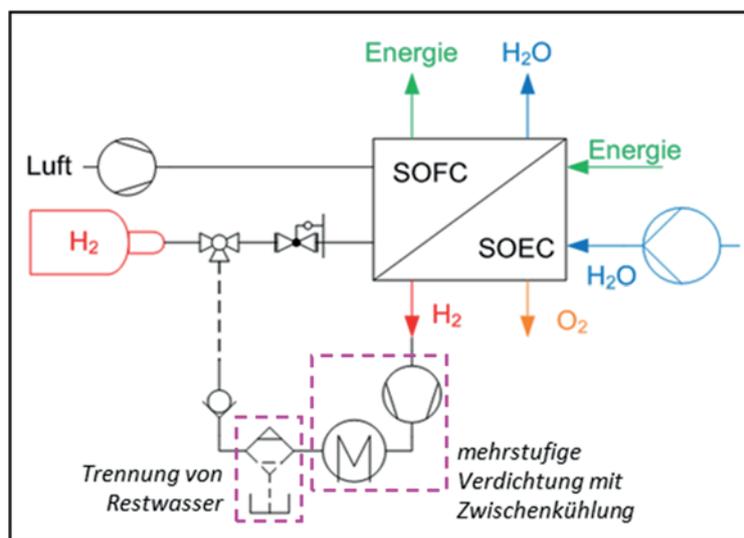


Abbildung 3 Schema des autarken reversiblen SOFC/SOEC-Konzepts

Die SOFC/SOEC-Einheit soll dazu in einer einheitlichen geschlossenen APU als Energieeinheit fungieren, siehe Abbildung 3. Hauptforschungsschwerpunkte sind dazu SOFC/SOEC-Einheiten unter unterschiedlichsten Betriebszuständen und verschiedenen Randbedingungen (Temperatur, Gaszusammensetzung, Belastung) zu betreiben. Dadurch sollen kritische Betriebszustände identifiziert und charakterisiert und durch ein Screening Performance Maps erstellt werden. Ein weiterer wesentlicher Punkt sind Untersuchungen des reversiblen SOFC/SOEC-Systems hinsichtlich Lebensdauer und Analysen von Schädigungsvorgängen und -mechanismen.

1.2 Funktionsprinzipien einer Festoxid-Brennstoff-/Elektrolysezelle

Die Festoxid-Brennstoff-/Elektrolysezelle (kurz SOC; solid oxide cell) wandelt die chemisch gebundene Energie eines Brennstoffes direkt in elektrische Energie um. Eine SOC Einzelzelle besteht grundlegend aus drei Schichten: dem oxidkeramischen gasdichten Festoxidelektrolyt und den zwei porösen elektrisch leitenden Elektroden (Anode und Kathode). Der

elektrochemische Vorgang in einer SOC im Brennstoffzellenmodus mit Wasserstoff als auch mit Reformat als Brennstoff ist in Abbildung 4(a) dargestellt. An der Kathode wird der benötigte Luftsauerstoff zugeführt, wo er zu Sauerstoffionen (O^{2-}) reduziert wird. Die Sauerstoffionen wandern durch den Elektrolyten zur Anode, wo sie mit dem Brennstoff reagieren. Diese Sauerstoffionen-Diffusion geschieht bei Betriebstemperaturen zwischen 600 bis 1000°C. Durch die hohen Temperaturen kann auf teure und seltene Materialien wie etwa Platin, das bei Niedertemperatur-Brennstoffzellen vonnöten ist, als Katalysator verzichtet werden [8].

Im umgekehrten Betrieb ändern sich zwar die Konventionen für Kathode und Anode, die Gas- und Luft-seitige An- bzw. Abströmung bleibt jedoch dieselbe. Das Funktionsprinzip der Zelle im Elektrolysebetrieb ist in Abbildung 4(b) dargestellt. Beim reversiblen Prozess kommt es somit zur Bildung von Sauerstoffionen (O^{2-}) an der Anode, welche durch den Elektrolyten diffundieren und somit den Sauerstoffgehalt anreichern. Diese Rückreaktion von Wasser (H_2O) unter Zuführung von elektrischer Energie zu Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) wird auch als Power-to-Gas bezeichnet. In einer analogen Weise kann im Elektrolysemodus H_2O und CO_2 (Ko-Elektrolyse) zu einem H_2/CO Synthesegas und O_2 umgewandelt werden.

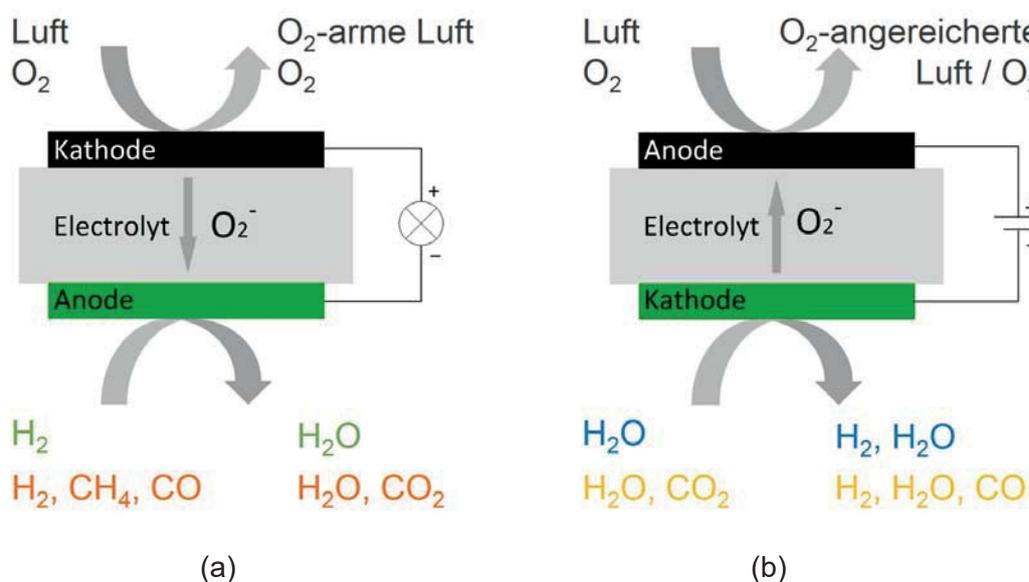


Abbildung 4 (a) Brennstoffzellen-Betrieb und (b) Elektrolyse-Betrieb

1.3 Festoxid- Zelldesign und -typen

Die zwei wesentlichen und aktuell verfolgten SOC-Konzepte sind tubulare und planare SOC, die sich jeweils zusätzlich in ihrem Aufbau unterscheiden können. Des Weiteren werden SOC hinsichtlich der tragenden Struktur unterschieden wobei zurzeit hauptsächlich folgende beiden Zelltypen verwendet werden: Anode (Elektrode) gestützte Zellen (ASC) und Elektrolyt gestützte Zellen (ESC).

Das ESC-Design verwendet eine dicke Elektrolytschicht als mechanische Unterstützung für dünne Anoden- und Kathodenschichten. Da der effiziente Zellenbetrieb möglich ist, wenn der ohmsche Widerstand des Elektrolyten minimiert ist, werden diese Zellen bei sehr hohen

Temperaturen – bis 1000°C – betrieben. Alternativ dazu kann der ohmsche Widerstand durch die Minimierung der Dicke der Elektrolytschicht verringert werden, was zum ASC-Design führt, bei dem die Anode die tragende Struktur der Zelle bildet. Der Elektrolyt besteht meist aus Yttrium dotiertem Zirkonoxid (YSZ). Die tragende Struktur der ASCs wird aus spröder Keramik oder einem Keramik-Metall-Verbund (Gemisch aus Nickel und Yttrium stabilisiertem Zirkonoxid (YSZ) oder Gadolinium dotiertem Ceroxid(GDC)) hergestellt. Abbildung 5(a) und Abbildung 5(b) zeigen die Struktur, Dickenverhältnisse und Bezeichnungen der eingesetzten ASC- bzw. ESC-Zellen. Aufgrund der Wahrscheinlichkeit höherer bereits erwähnter ohmscher Verluste des Elektrolyten in ECS können ASCs insgesamt eine bessere Zellenleistung aufweisen. Andererseits sind ESCs robuster und zeigen eine weitaus bessere Stabilität während Reduktions-Oxidations- und Thermo-Zyklen [9].

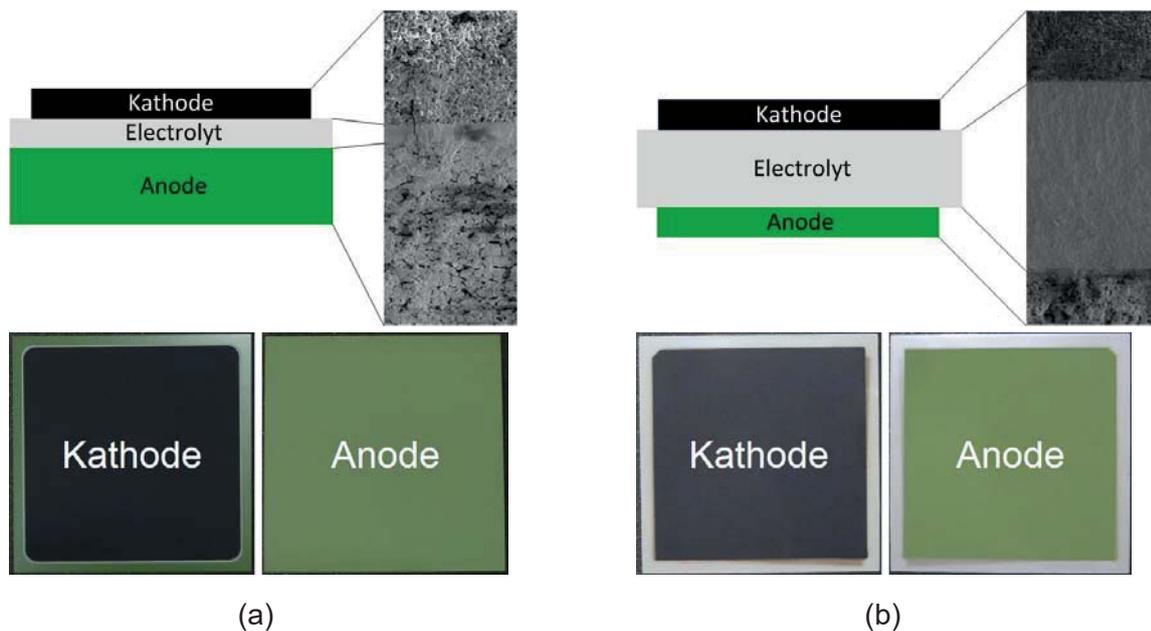


Abbildung 5 Typen (a) Anoden-gestützte Zelle (ASC) und (b) Elektrolyt-gestützte Zelle (ESC)

Weiters kann auch die Größe und Form von planaren SOC's variieren: sie sind als kleine kreisförmige Zellen, sogenannte Knopfzellen (engl. button cells), oder als große planare rechteckige Zellen ausgeführt. Aufgrund ihrer Größe und einfachen Bedienung sind Knopfzellen einfacher zu charakterisieren und zu untersuchen. Zudem haben sie ein gleichmäßiges Temperaturprofil und eine homogene Gas- und Potentialverteilung. Auch die Temperaturen von großen planaren Einzelzellen sind leicht beherrschbar während sich die Gas- und Gasstromverteilung sowie die Effektivität des elektrischen Kontakts über die Länge der Zelle erheblich verändert.

Durch das Übereinanderstapeln von mehreren Einzelzellen zu sogenannten Stacks können bei gleichbleibendem Strom ausreichend hohe Spannungen erzielt werden und somit das Leistungsvermögen im Brennstoffzellenmodus bzw. die Leistungsaufnahme im Elektrolysebetrieb vervielfacht werden. Dadurch wird im Endeffekt auch die Temperaturschichtung beeinflusst und das Temperaturmanagement erheblich erschwert.

2 Aktuelle Forschung

Festoxid-Brennstoff-/Elektrolysezellen (SOFC/SOEC) haben aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades, ihrer Brennstoffflexibilität und vor allem ihrer Fähigkeit, sowohl im Brennstoffzellen- als auch im Elektrolysemodus zu arbeiten, große Aufmerksamkeit erhalten. In den vergangenen Jahren wurden am Institut für Wärmetechnik (IWT) ausschließlich Einzelzellen im SOFC-Modus betrieben und untersucht. Im Mittelpunkt standen dabei Kohlenstoffablagerungen und Regenerationsmechanismen [10]. Die aktuellen Arbeiten an Einzelzellen fokussieren sich auf die Verwendung von attraktiveren Brennstoffen wie etwa Ammoniak.

Der Testbetrieb, die Untersuchung und die Charakterisierung von Stacks sind das Hauptaugenmerk dieses Forschungsvorhabens. Dabei werden unterschiedliche Stack-Konzepte mit verschiedenen Zelltypen und -größen ausgiebig nach entsprechenden Versuchsplänen systematisch getestet um die maximal möglichen sowie optimalen Betriebsbedingungen im wechselnden SOFC/SOEC-Betrieb ermittelt. Zudem werden die Stabilität, Lebensdauer und Zuverlässigkeit durch Langzeittests nachgewiesen.

2.1 Experimentelle Untersuchung und Charakterisierung von SOC-Stacks

Die systematisch aufeinander abgestimmten Tests im Brennstoff- bzw. Elektrolysemodus beinhalten unter anderem die in Abbildung 4 gezeigten Konfigurationen. Die gewählten Systemkonfigurationen werden experimentell durch Variation der Betriebstemperaturen, Brennstoffausnutzung im SOFC-Betrieb bzw. Dampfumsetzung im SOEC-Betrieb, der Leistungsabgabe bzw. Leistungsaufnahme sowie der Eingangsvolumenströme untersucht.

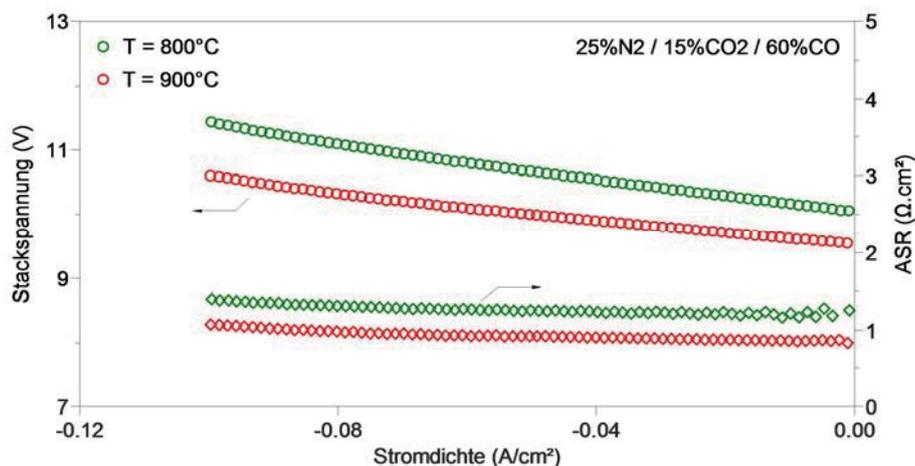


Abbildung 6 Performance eines Stacks mit ESC-Zellen bei reiner CO₂-Elektrolyse

Neben der Wasserelektrolyse und der Ko-Elektrolyse hat sich gezeigt, dass rSOCs auch unter reiner CO₂-Elektrolyse betrieben werden können, was einen Weg CO₂ in wertvolle Produkte umzuwandeln darstellt. Abbildung 6 zeigt die Stackperformance bei der Elektrolyse von reinem CO₂ (zu CO). Dazu wurden die Polarisationskurven aufgezeichnet sowie die flächenbezogenen Widerstände des Stacks bei 800 bzw. 900°C errechnet. Der Widerstand bei 900°C ist dabei vergleichbar mit jenem bei der Ko-Elektrolyse. Mittels der sogenannten elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) lassen sich einzelne Prozesse, die unter der jeweiligen

Betriebsart ablaufen darstellen und zuordnen. In Abbildung 7 sind die aufgezeichneten Impedanzspektren im Leerlauf sowie unter zwei verschiedenen Stromdichten eines Stacks mit Elektrolyt gestützten Zellen dargestellt. Die Spektren zeigen, dass die Polarisation auf der Kathode und somit der Zellwiderstand mit steigender Temperatur abnimmt und ein Großteil des Widerstands der Anoden-Polarisation zugeordnet werden kann.

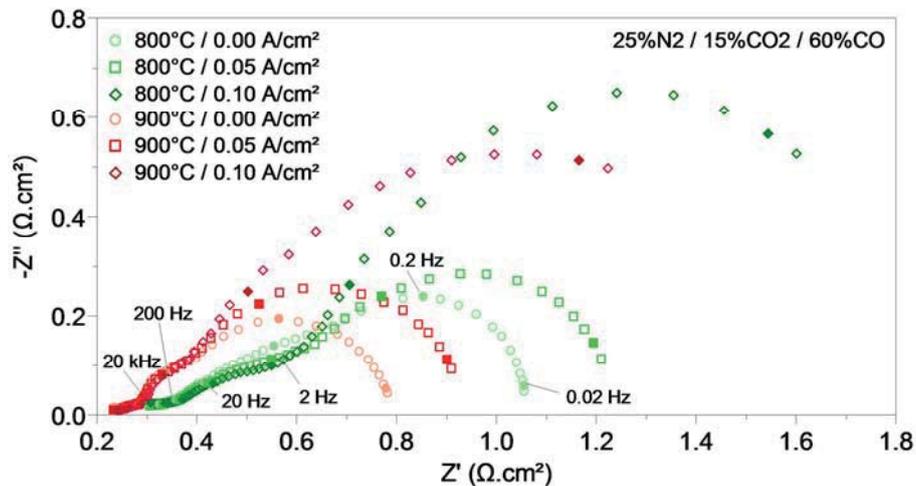


Abbildung 7 Impedanzspektren eines Stacks mit ESC-Zellen bei reiner CO₂-Elektrolyse

2.2 Langzeitstabilität

Im Anschluss zur Charakterisierung und Betriebsgrenzen-Ermittlung werden basierend auf den Ergebnissen Langzeittests durchgeführt. Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Verlauf der Stackspannung, der Einzelzellspannungen, der Gaskonzentrationen am Auslass sowie der Temperaturen. Der Langzeitversuch wurde unter Ko-Elektrolyse bei 0,16A/cm² mit einer Eingangskonzentration von H₂/H₂O/CO₂=20/70/10 bei 820°C durchgeführt. Dieser Test hat nach etwa 1060 Betriebsstunden einen signifikanten Anstieg zweier Einzelzellspannung (Degradation) und somit der Stackspannung gezeigt. Die übrigen Zellen zeigten eine konstante Spannungsentwicklung über die Zeit, wobei eine Zelle sogar eine negative Degradation aufwies – nach 1140h Betriebszeit wurde der Langzeittest gestoppt um den Stack und vor allem die Testumgebung durch etwaige Undichtheiten vor weiteren Schäden zu bewahren. [11]

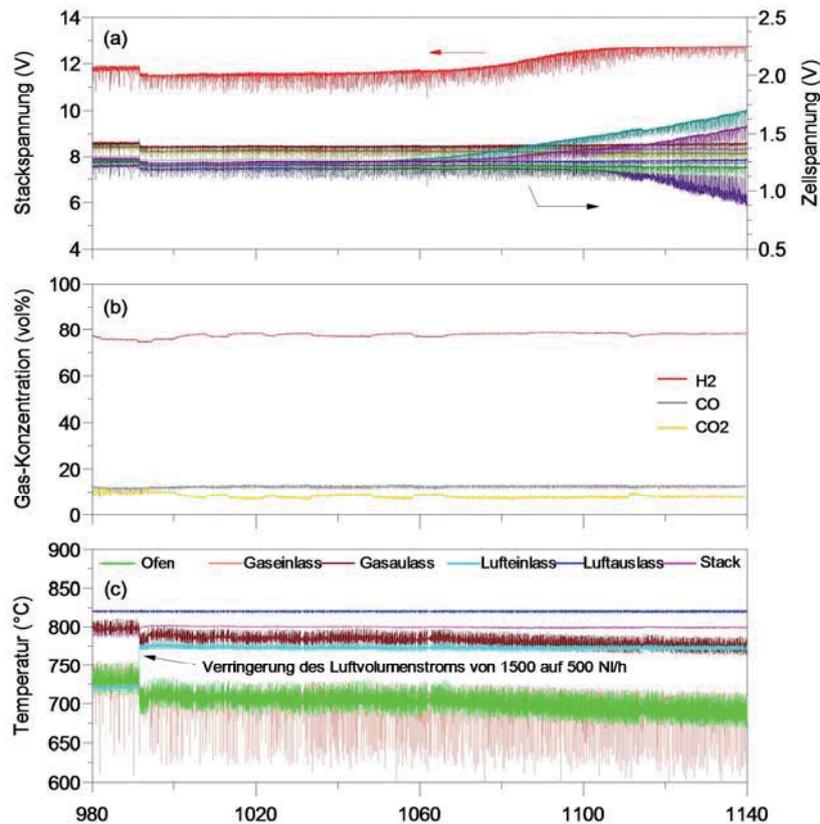


Abbildung 8 Langzeitversuch unter Ko-Elektrolyse

3 Schlussfolgerung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt die Möglichkeit einer hocheffizienten Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas durch Elektrolyse sowie auf. Dazu werden die Stacks als Teil des Gesamtsystems im Labor ausgiebig nach einem Versuchsplan systematisch getestet um einen optimalen Betrieb der wechselnden Anwendung von SOFC/SOEC zu ermitteln und die Langzeitstabilität, Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu eruieren.

Momentan verwendeten Akkus weisen aktuell eine sehr geringe elektrische Speicherdichte sowie unverhältnismäßig lange Ladezeiten auf. Durch die Speicherung der in diesem Vorhaben produzierten Gase in den P2G-Verfahren werden sehr hohe Energiespeicherdichten erreicht. Weiterer Teil dieser Arbeit ist die Auslegung und Spezifikation der für die Speicherung erforderlichen Komponenten. Als abschließendes Ziel ist eine Elektrolyse unter Druck als Schlüsselversuch angestrebt, da die Hochdruckelektrolyse aus thermodynamischer Sicht sinnvoll und effizient erscheint.

Ist es möglich die Technologie reversibel bei adäquater Lebensdauer zu betreiben kann sie in einem autarken System, einer Auxiliary Power Unit (APU) zur Energiebereitstellung sowie -speicherung fungieren. SOFC/SOEC-Systeme können somit einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten und ein wichtiger Bestandteil der Energiewende werden.

Danksagung

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung der Österreichischen Forschungsförderungs-gesellschaft FFG, die im Bereich der SOC zahlreiche Forschungsprojekte auf nationaler sowie internationaler Ebene fördert.

Literatur

- [1] Dodds, P.E., Staffell, I., Hawkes, A.D., Li, F., Gruenewald, P., McDowall, W., et al. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: a review. *International Journal of Hydrogen Energy* 2015;40(5):2065-83.
- [2] Bailera, M., Lisbona, P., Romeo, L.M., Espatolero, S. Power to gas projects review: lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:292-312.
- [3] Klerk, A.: Fischer-Tropsch Refining. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, 2003. – ISBN 978–3–527–32605–1
- [4] Singhal, Subhash C., Kendall, K. High Temperature Solid Oxide Fuel Cells, 2003, Elsevier
- [5] <https://www.eberspaecher.com/en/top-thema-01.html>
- [6] https://www.buderus.de/de/produkte/catalogue/alle-produkte/102411_logapower-fc10
- [7] Ceramic Fuel Cells: <http://www.solidpower.com/>
- [8] Subotic, V., Schluckner, C., Strasser, J., Lawlor, V., Mathe, J., Rechberger, J., et al. In-situ electrochemical characterization methods for industrial-sized planar solid oxide fuel cells part I: methodology, qualification and detection of carbon deposition. *Electrochimica Acta* 2016;207:224-36
- [9] Shy, S. S.; Hsieh, Y. D.; Huang, C. M.; Chan, Y. H. Comparison of Electrochemical Impedance Measurements between Pressurized Anode-Supported and Electrolyte-Supported Planar Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society* 2014;162(1):F172-F177
- [10] Stoeckl, B., Subotić, V., Reichholf, D., Schroettner, H., Hochenauer, C.: Extensive analysis of large planar SOFC: Operation with humidified methane and carbon monoxide to examine carbon deposition based degradation. *Electrochimica Acta* (2017).
- [11] Preininger, M., Wurm, J., Subotić, V., Schauerl, R., Hochenauer, C.: Performance characterization of a solid oxide cell stack with chromium-based interconnects (CFY). *International Journal of Hydrogen Energy* 2017;42(48):28653-64.