

Co-Elektrolyse als Schlüsseltechnologie in Power-to-X Anwendungen

Daniel REINER(*)¹, Srđan MARKOVIĆ¹, Hartmuth SCHRÖTTNER^{2,3},
Christoph HOCHENAUER¹, Vanja SUBOTIĆ¹

¹ Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, A-8010 Graz,
+43 (316) 873 7805, daniel.reiner@tugraz.at, www.iwt.tugraz.at

² Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalyse (FELMI), Technische Universität Graz,
Steyrergasse 17, A-8010 Graz, www.felmi-zfe.at

³ Zentrum für Elektronenmikroskopie Graz (ZFE), Steyrergasse 17, A-8010 Graz,
www.felmi-zfe.at

Kurzfassung: Die Co-Elektrolyse in Festoxidelektrolysezellen (Solid Oxide Electrolysis Cells – SOEC) besitzt ein hohes Potenzial für Power-to-X-Anwendungen, da Wasserdampf und Kohlendioxid direkt und mit hoher elektrischer Effizienz zu Synthesegas (H_2+CO) umgesetzt werden können. Außerdem erlaubt die Co-Elektrolyse den Wegfall eines separaten Reverse-Water-Gas-Shift-Schrittes, wodurch eine Vereinfachung der Prozesskette und eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades erzielt werden. Der vorliegende Beitrag untersucht das Langzeitverhalten einer SOEC-Einzelzelle im Kontext der Methanolherstellung. Auf Basis stöchiometrischer Berechnungen erfolgt die Definition geeigneter Einlassgaszusammensetzungen zur Einstellung eines H_2/CO -Verhältnisses von etwa 2 im Produktgas. Die experimentellen Untersuchungen umfassen einen Dauerbetrieb einer dieser Gaszusammensetzungen von über 280 Stunden bei einer Betriebstemperatur von rund 800 °C. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Einfluss der Gaszusammensetzung und insbesondere des Durchflusses auf der Lufterlektrode auf Effizienz und Langzeitstabilität. Erhöhte Betriebstemperaturen führen zwar zu einer Effizienzsteigerung, können jedoch eine beschleunigte Degradation der Zelle begünstigen.

Keywords: Co-Elektrolyse, Power-to-X (PtX), Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC), Langzeit Untersuchung

1 Einleitung

Der stetig wachsende Anteil von Wind- und Solarenergie an der globalen Stromerzeugung erhöht den Bedarf an Technologien, die überschüssige erneuerbare Elektrizität effizient in speicher- und transportfähige chemische Energieträger überführen können. Aktuelle Analysen des Internationalen Energieamtes (IEA) sowie des Ember-Instituts zeigen, dass erneuerbare Energien im Jahr 2024 bereits mehr als 32 % zur weltweiten Stromerzeugung beitragen und weiterhin ein starkes Wachstum verzeichnen [1], [2]. Mit zunehmender Volatilität der Stromerzeugung gewinnen daher Power-to-X-Konzepte (PtX) als sektorübergreifende Kopplungstechnologien zunehmend an Bedeutung. Sie ermöglichen die flexible Umwandlung

elektrischer Energie in gasförmige oder flüssige Energieträger sowie chemische Grundstoffe (vgl. Abbildung 1). Unter den verfügbaren Elektrolysetechnologien zeichnen sich Festoxid-Elektrolysezellen (Solid Oxide Electrolysis Cells, SOEC) durch hohe elektrische Wirkungsgrade von etwa 70-85% aus [3], [4]. Diese resultieren insbesondere aus den hohen Betriebstemperaturen von etwa 600 bis 900 °C, die eine verbesserte Reaktionskinetik sowie eine teilweise Deckung des Energiebedarfs durch Prozesswärme erlauben. Darüber hinaus ermöglichen SOECs neben der Wasserelektrolyse auch die elektrochemische Umsetzung von Kohlendioxid. Die direkte Co-Elektrolyse von Wasserdampf (H_2O) und CO_2 zu Synthesegas (H_2+CO) bietet den zusätzlichen Vorteil, dass ein separater Reverse-Water-Gas-Shift-(RWGS)-Reaktor entfällt und damit der Gesamtprozess an Komplexität verliert [5]. Als Kohlenstoffquelle können unterschiedliche CO_2 -Ströme genutzt werden, etwa industrielle Abgase, die häufig bereits Wasserdampf enthalten, oder CO_2 aus Direct-Air-Capture- und Carbon-Capture-and-Storage-Anlagen. Die Zusammensetzung des erzeugten Synthesegases ist dabei maßgeblich für die Eignung für nachgelagerte PtX-Routen. Typische H_2/CO -Verhältnisse liegen bei etwa 2 für die Methanol- (I) sowie die Fischer-Tropsch-Synthese (II) [6], [7] und bei etwa 3 für die Methanisierung (III) [8]. Neben den elektrochemischen Reaktionen beeinflusst insbesondere das RWGS-Gleichgewicht die resultierende Gaszusammensetzung und damit die Produktqualität.

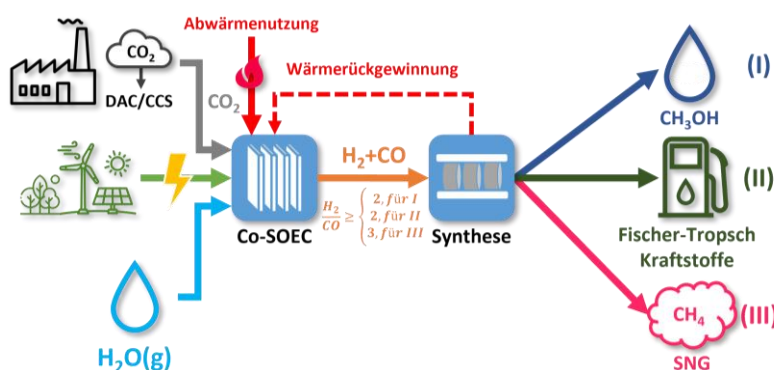


Abbildung 1: Mögliche Power-to-X Szenarien.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die PtX-Route der Methanolherstellung betrachtet, bei der Methanol über die Hydrierung von CO synthetisiert wird. Die stöchiometrische Anforderung eines H_2/CO -Verhältnisses von 2 (vgl. Reaktion (1)) definiert die zentrale Randbedingung für die im Langzeitbetrieb untersuchten Betriebspunkte der SOEC-Einzelzelle. Da CO_2 ebenfalls als Edukt in der Methanolsynthese eingesetzt werden kann, wird im Co-Elektrolyse-Produktgas bewusst kein zusätzlicher Grenzwert für den CO_2 -Gehalt vorgegeben. Dies vereinfacht die Auswahl geeigneter Einlassgaszusammensetzungen und erlaubt eine gezielte Analyse des Einflusses von Temperatur, Stromdichte und Gasführung auf die Stabilität der Synthesegaszusammensetzung.



1.1 Funktionsprinzip der Co-Elektrolyse

Die Co-Elektrolyse beschreibt die gleichzeitige elektrochemische Umsetzung von Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) zu einem wasserstoff- und

kohlenmonoxidreichen Synthesegas (H_2/CO). Aus Sicht der Gesamtreaktionen kann der Prozess als Überlagerung der Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse und der CO_2 -Elektrolyse verstanden werden. Während bei der H_2O -Elektrolyse Wasserdampf endotherm zu Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird (siehe Reaktion (2) [9]), erfolgt bei der CO_2 -Elektrolyse die Umsetzung von Kohlendioxid zu Kohlenmonoxid und Sauerstoff (siehe Reaktion (3) [10]). In der Co-Elektrolyse laufen beide Reaktionen parallel ab, sodass die gleichzeitige Erzeugung von H_2 und CO bei Abgabe von Sauerstoff resultiert.

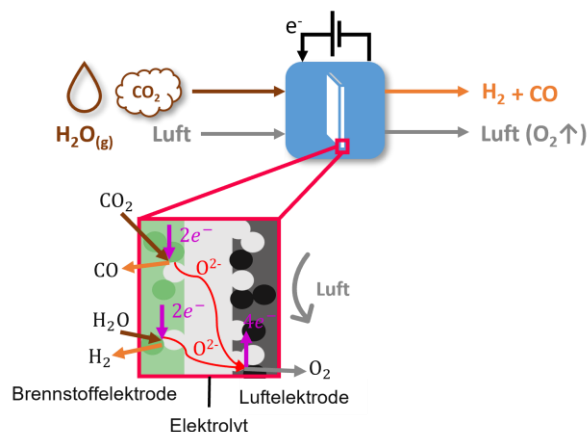
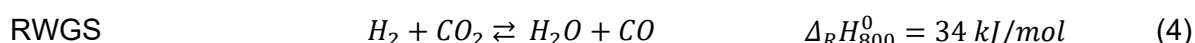
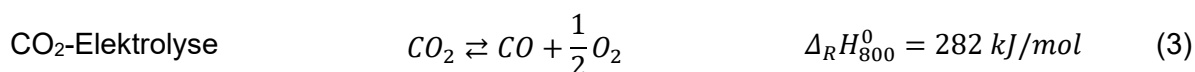
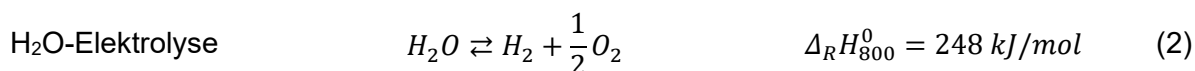


Abbildung 2: Funktionsprinzip der Co-Elektrolyse.

Die Zusammensetzung des Synthesegases kann über das Verhältnis von H_2O zu CO_2 im Eduktstrom gezielt eingestellt werden. Insbesondere in Festoxidelektrolyseuren begünstigen hohe Betriebstemperaturen die Thermodynamik, da ein Teil der Reaktionsenthalpie durch Wärme bereitgestellt wird. Zusätzlich beeinflussen chemische Gleichgewichtsreaktionen die Produktzusammensetzung: Durch das gleichzeitige Vorhandensein von gebildetem H_2 und CO_2 kann über die leicht endotherme Reverse-Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS) CO und H_2O entstehen, siehe Reaktion (4) [11]. Dies reduziert die Wasserstoffausbeute und verändert das resultierende H_2/CO -Verhältnis. Zu den Vorteilen der Co-Elektrolyse zählen daher die direkte Erzeugung eines synthesesgeeigneten Gasgemisches, eine hohe Gesamteffizienz im Hochtemperaturbetrieb sowie die Nutzung von CO_2 als Kohlenstoffquelle. Nachteile ergeben sich aus der komplexen Reaktionskinetik, der Beeinflussung der Gaszusammensetzung durch Nebenreaktionen wie die RWGS sowie den hohen Anforderungen an Materialien und Systemstabilität bei erhöhten Betriebstemperaturen.



2 Experimentelle Untersuchung der Co-Elektrolyse

Zur Durchführung von Einzelzellversuchen unter Co-Elektrolysebedingungen kam ein speziell entwickelter Prüfstand zum Einsatz (vgl. Abbildung 3). Der Versuchsaufbau besteht im

Wesentlichen aus einer geregelten Gasversorgung, einem eigens entwickelten Dampferzeuger, mehreren elektrisch beheizten Gasvorwärmern sowie einem Ofensystem. Die Einstellung und Mischung der Einlassgase erfolgt über Massendurchflussregler (MFC), während der Wasserdampf separat mittels eines Dampferzeugers bereitgestellt wird. Dieser wird mit deionisiertem Wasser über eine Pumpe versorgt. In der vorliegenden Arbeit wurden kommerzielle, brennstoffelektrodengetragene SOEC-Einzelzellen untersucht. Die Zellen besitzen eine Gesamtfläche von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ bei einer aktiven Brennstoffelektrodenfläche von $9 \times 9 \text{ cm}^2$. Es handelt sich um kommerziell verfügbare elcoCell® ASC-300C-Zellen der Firma Elcogen AS [12]. Der Zellaufbau umfasst eine Ni/YSZ-Brennstoffelektrode mit einer Dicke von etwa $294 \text{ }\mu\text{m}$, einen rund $6 \text{ }\mu\text{m}$ dicken YSZ-Elektrolyten sowie eine LSC-Luftelektrode mit GDC-Diffusionsbarriere von ca. $15 \text{ }\mu\text{m}$. Die Zelle wurde in einem speziell entwickelten keramischen Gehäuse montiert, das eine detaillierte Temperaturerfassung über die aktive Elektrodenfläche erlaubt. Hierzu kamen insgesamt zwölf Thermoelemente in unmittelbarer Nähe der Brennstoff- und Luftelektrode zum Einsatz. Dieses keramische Gehäuse ist im SOEC-Ofen positioniert und mit den Gasleitungen verbunden, wo es auf 800°C Betriebstemperatur gehalten wird. Zur Vermeidung von Kondensation und zur Sicherstellung definierter Gastemperaturen dienen die elektrischen Vorwärmer. Nach dem Ofenaustritt werden die Abgase kondensiert und einer Nachverbrennung zugeführt bevor diese in die Umgebung gelangen. Ergänzt wird der Aufbau durch Stromversorgung für die Elektrolyse, Impedanzmesssystem und Gasanalytik, wodurch eine umfassende In-operando-Charakterisierung unter Co-Flow-Betrieb möglich ist.

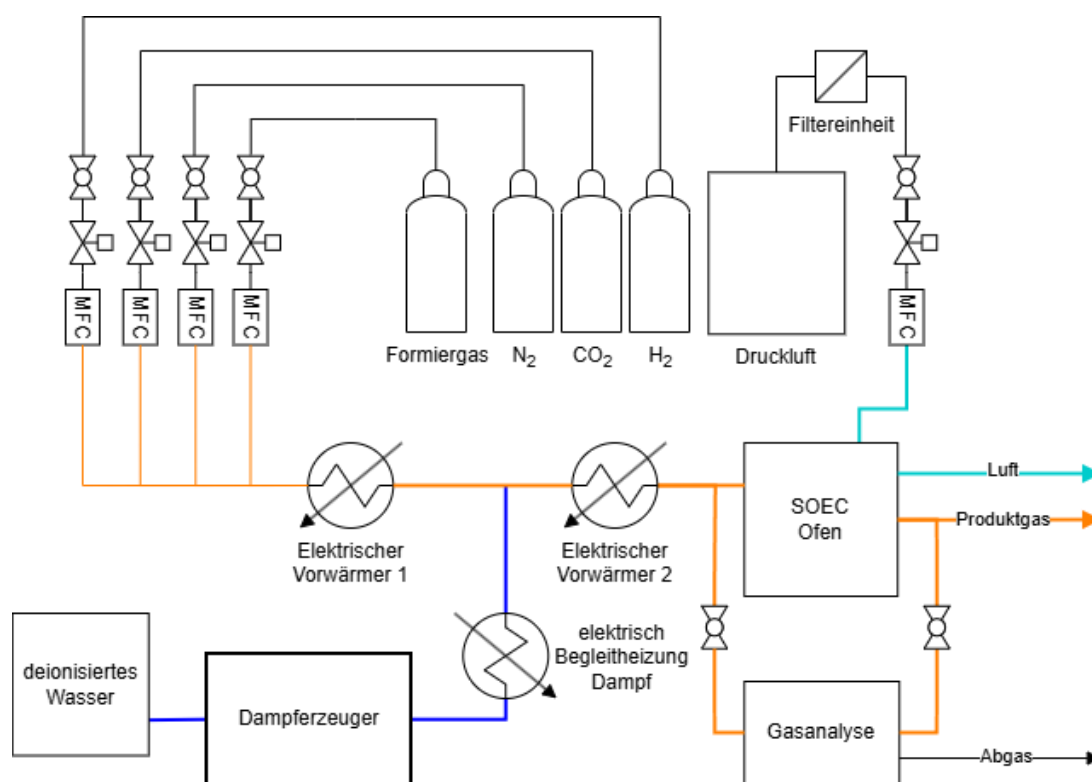


Abbildung 3: Schema für SOEC-Untersuchungen am IWT.

Während des Zellbetriebs wurden Temperatur, Zellspannung, Stromstärke sowie die Gaszusammensetzung kontinuierlich mit einer Abtastrate von 0.33 Hz erfasst und aufgezeichnet. Zur Untersuchung des elektrochemischen Verhaltens und der

Gesamtpformance der Zelle wurde in regelmäßigen Abständen von zwei Stunden eine elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) durchgeführt. Die EIS-Messungen erfolgten galvanostatisch unter Überlagerung eines Wechselstromsignals mit einer Amplitude von 4% des jeweiligen Gleichstrom-Betriebspunktes.

2.1 Bestimmung eines geeigneten Gasgemisches für die Co-Elektrolyse

Das Berechnungsmodell zur Bestimmung der Gaszusammensetzung am Ausgang eines SOEC basiert auf der Reaktantenausnutzung (RU). Es gibt das Verhältnis des tatsächlich im elektrochemischen Prozess umgewandelten Brennstoffs zur Gesamtmenge des zugeführten Brennstoffs an. (siehe Gleichung (5) [13]).

$$RU = \frac{\dot{n}_{utilized}}{\dot{n}_{input}} \quad (5)$$

Die Menge des umgewandelten Brennstoffs wird anhand des Faraday'schen Gesetzes berechnet. (siehe Gleichung (6) [13])

$$\dot{n}_{utilized} = \frac{I}{z \cdot F} \quad (6)$$

wobei I der Strom mit 60.75A ist, z die Anzahl der pro Mol Brennstoff übertragenen Elektronen und F die Faraday-Konstante (96485.331 C/mol). Für die Reduktion von CO_2 and H_2O sind 2 Elektronen ($z = 2$) erforderlich, um jeweils 1 Mol CO und H_2 zu erzeugen. Zur Berechnung des Auslassgemisches mit dem Einlassgemisch können RU und Massenbilanzen verwendet werden. Diese Methode berücksichtigt nicht RWGS und bezieht sich nur auf die elektrochemischen Reaktionen. Für die Langzeituntersuchungen wurden vier Gasgemische von Tabelle 1 betrachtet. Zwei Gemische enthalten kein anfängliches CO am Einlass, (CoEloCO: Co-Elektrolyse ohne CO -Zusatz; CoEloCOrec: Co-Elektrolyse ohne CO -Zusatz mit Gasrezirkulation, daher höhere H_2 - und CO -Anteile). Ergänzend wurden zwei Gemische mit CO -Zusatz am Einlass untersucht (CoElmCO: Co-Elektrolyse mit CO -Zusatz; CoElmCOrec: Co-Elektrolyse mit CO -Zusatz und Gasrezirkulation). Bei alle Gaszusammensetzungen kam ein gleicher Volumenstrom mit 0.55slpm auf der Lufterlektrode zum Einsatz, um mögliche Effekte auf die Lufterlektrode bei reduzierten Durchfluss zu untersuchen.

Tabelle 1: Berechnete mögliche Gaszusammensetzungen für die Langzeitversuche.

Name	Inlet				Outlet					RU [%]	\dot{V} [slpm]
	H_2 [vol%]	H_2O [vol%]	CO_2 [vol%]	CO [vol%]	H_2 [vol%]	H_2O [vol%]	CO_2 [vol%]	CO [vol%]	H_2/CO		
CoEloCO	10	52.2	37.8	0	32.33	29.88	21.63	16.17	2.0	42.78	1.1
CoEloCOrec	26.45	40.21	20.11	13.23	52.12	14.55	7.274	26.06	2.0	63.82	1.1
CoElmCO	10	62.81	15.66	11.54	36.08	36.73	9.16	18.04	2.0	41.78	1.3
CoElmCOrec	23.59	43.08	21.54	21.54	45.31	21.36	10.68	22.65	2.0	50.41	1.3

Die Analyse des Nyquist-Diagramms in Abbildung 4 zeigt, dass CoElmCO die geringsten Polarisationsverluste (niedrigster R_p , Abstand linker X-Achsenschnittpunkt mit theoretischem

rechtem Schnittpunkt) aufweist, während CoEloCO und CoElmCOrec etwas höhere Verluste besitzen. Die Polarisationsverluste für CoEloCOrec sind deutlich höher als bei allen anderen Vorversuchen.

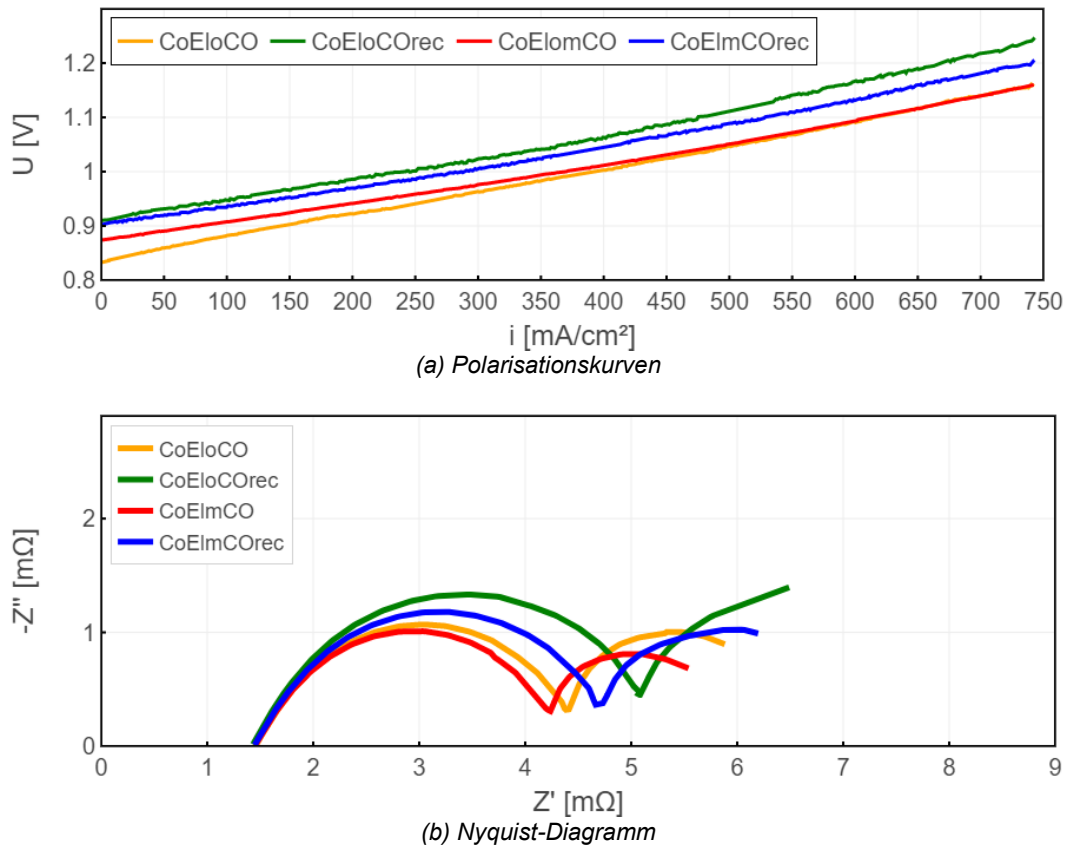


Abbildung 4: Polarisationskurve & EIS-Spektren von Vorversuchen im Nyquist-Diagramm: CoEloCO, CoEloCOrec, CoElmCO und CoElmCOrec bei einer Temperatur von 800 °C und einem Strom von 60.75 A (750mA/cm²).

Die Gaszusammensetzung am Zellausgang wurde für jede der Testvorversuchsreihen mit dem Gasanalysator bestimmt. Die entsprechenden Messdaten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Um in weiterer Folge die geeignetste Gaszusammensetzung für den Langzeitversuch zu wählen, erfordert es weitere Entscheidungskriterien. Zum einen spielt der Leistungsbedarf bei industriellen Anwendungen eine wichtige Rolle sowie eine möglichst hohe Umsetzung an CO₂. Die für die Elektrolyse erforderliche Leistung ergibt sich durch Messung der Zellspannung für jeden dieser Vorversuche bei einem maximalen Strom von 60.75 A und Anwendung der folgenden Formel $P = U \cdot I$. Für eine Vergleich aller kommt folgende Gleichung zum Einsatz.

$$\Delta P = \frac{|P_{\text{experiment}} - P_{\text{CoEloCO}}|}{P_{\text{CoEloCO}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Die Umwandlung von CO₂ (X_{CO_2}) (siehe Gleichung (8)) wurde unter der Annahme berechnet, dass die Volumenströme des trockenen Gases am Einlass $\dot{V}_{\text{tot,dry,in}}$ und am Auslass $\dot{V}_{\text{tot,dry,out}}$ der Zelle gleich sind. $Y_{\text{CO}_2,\text{dry}}$ steht dabei für die mit der Gasanalyse gemessenen trockenen Anteile von CO₂ am Ein- und Auslass der Zelle.

$$X_{CO_2} = \frac{\dot{V}_{tot,dry,in} \cdot Y_{CO_2,dry,in} - \dot{V}_{tot,dry,out} \cdot Y_{CO_2,dry,out}}{\dot{V}_{CO_2,dry,in}} \quad (8)$$

Die Ergebnisse für ΔP und X_{CO_2} können ebenfalls Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Gemessene trockene Gaszusammensetzungen am Zellausgang und Entscheidungskriterien für die Auswahl der optimalen Gaszusammensetzung für den Langzeittest.

No	Name	H ₂ [%]	CO ₂ [%]	CO [%]	H ₂ /CO	Leistungs- bedarf P [W]	Rel. Leistung ΔP [%]	CO ₂ Umsetzung X_{CO_2} [%]
1	CoEloCO	45.41	25.07	22.02	2.062	63.13	0	67.9
2	CoEloCOrec	56.71	8.81	27.55	2.058	76.11	10	74.8
3	CoElmCO	47.60	23.30	22.85	2.083	70.80	2	57.0
4	CoElmCOrec	52.21	15.07	25.95	2.012	73.92	7	63.9

Aufgrund des geringsten Leistungsbedarfs für die Elektrolyse, und der zweitgrößten Umsetzung an CO₂ in CO und der geringen Verluste (siehe Polarisationskurven & Nyquist-Diagramm in Abbildung 4) eignet sich CoEloCO als Gaszusammensetzung für den Langzeittest am besten und kam daher bei der Langzeituntersuchung zum Einsatz.

2.2 Langzeituntersuchung der Co-Elektrolyse in PtX zur Methanolherstellung

Abbildung 5 zeigt die zeitliche Entwicklung der Zellspannung sowie des H₂/CO-Verhältnisses während des Langzeitversuchs bei einer Stromdichte von 750 mA/cm² und einer Betriebstemperatur von 800°C unter Verwendung des in Abschnitt 2.1 ausgewählten Gasgemisches. Zu Beginn des Versuchs ist eine typische initiale Verbesserung erkennbar, die nach etwa 52h abgeschlossen war. Anschließend ging die Zellspannung nach rund 228h in einen nahezu linearen Verlauf über. Die Degradationsrate r_d im Zeitraum zwischen t_1 und t_2 , berechnet gemäß Gleichung (9), betrug 6.01%/1000h.

$$r_d = \frac{U_{t_2} - U_{t_1}}{U_{t_1}} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot 1000 \frac{h}{h} \cdot 100\% \quad (9)$$

In der Literatur liegen bislang nur wenige Untersuchungen zur Degradationsrate von SOECs im Co-Elektrolysebetrieb vor; insbesondere für kommerzielle Zellen industrieller Größe für Produktgasanwendungen sind nach Kenntnis der Autoren keine entsprechenden Daten verfügbar. Ariane et al. [14] prognostizierten in einer Simulation bei 750°C (50K niedriger als in dieser Arbeit) eine Degradationsrate r_d von 3.96%/1000h, während Wolf et al. [15] für ein abweichendes Gasgemisch bei 800°C eine deutlich höhere Degradationsrate von 16%/1000h berichteten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass steigende Stromdichten die Degradation weiter beschleunigen können. Tao et al. [16] zeigten bei 1500mA/cm² eine Degradationsrate von 15%/1000h und bei 2000mA/cm² sogar 30%/1000h im Co-Elektrolysebetrieb. Vor diesem Hintergrund liegt die in dieser Arbeit ermittelte Degradationsrate, unter den in den meisten Studien berichteten Werten, ist jedoch weiterhin nicht ausreichend für einen industriellen Einsatz. Trotz der hier gewählten, im Vergleich zu Herstellerempfehlungen (Elcogen) deutlich

höheren Stromdichte zur Untersuchung der Zellgrenzen wurde eine Umsetzungsrate (RU) von etwa 43% erreicht. Industriell relevante Umsetzungsraten von etwa 70% ohne weitere Erhöhung der Stromdichte würden eine Reduktion des Gasdurchsatzes erfordern, was wiederum die Gesamtproduktivität verringert. Ein möglicher Ansatz zur Erhöhung der RU und der Gesamtumsetzung stellt daher die Rezirkulation des Produktgases dar. Gleichzeitig muss betont werden, dass die Definition industriell relevanter Betriebsbedingungen stets unter Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte der Synthesegaserzeugung erfolgen sollte. Des Weiteren ist anzumerken, dass die gewählte Betriebstemperatur zur Förderung der endothermen Reaktionen im vom Hersteller empfohlenen oberen Grenzeinsatzbereich liegt, was auch zu einer Erhöhten Degradation führen kann.

Nach Abschluss der initialen Verbesserung stabilisierte sich das H₂/CO-Verhältnis bei etwa 2.08 und lag damit nahe an dem während der Auswahl der Gaszusammensetzung gemessenen Wert. Aufgrund der In-situ-Messung von H₂ und CO mit dem Gasanalysator sowie der hohen Sensitivität der eingesetzten Sensoren im Gerät weist das H₂/CO-Verhältnis eine stärkere Streuung auf als die Zellspannung. Zudem wurden zwei kurzzeitige Peaks detektiert, die auf einen temporären Ausfall des CO-Signals des Gasanalysators zurückzuführen sind und folglich zu erhöhten berechneten H₂/CO-Werten führten.

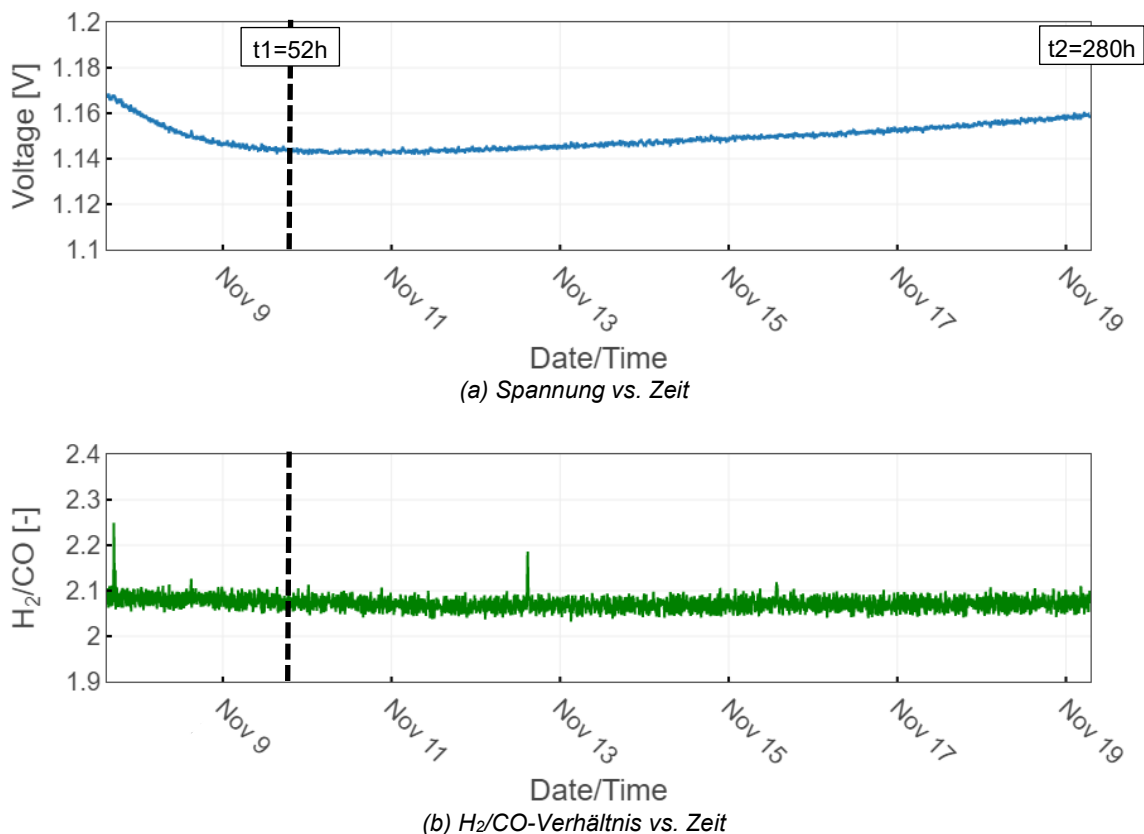


Abbildung 5: Spannung und H₂/CO-Verhältnis des Langzeitexperiments a bei einer Temperatur von 800 °C und einem Strom von 60.75 A (750mA/cm²).

Abbildung 6 zeigt die elektrochemische Charakterisierung der Degradationsphase anhand der EIS-Spektren vom Beginn nach der initialen Verbesserungsphase bei 52h bis zum Ende des Betriebs nach 280h. Die zwischen 52h und 280h aufgenommenen Messkurven sind in Intervallen von jeweils 24h dargestellt (bis 256h und abschließend bei 280h), was einer

betrachteten Degradationsdauer von insgesamt 228 h entspricht. Zur Verdeutlichung der zeitlichen Entwicklung der Verluste sind die Kurven farbcodiert vom Beginn bis zum Ende der Degradationsphase. Im Nyquist-Diagramm lassen sich über den gesamten Untersuchungszeitraum keine Veränderungen des ohmschen Widerstands (R_{Ω} , linker Schnittpunkt auf X-Achse) feststellen, der konstant bei etwa $1.5\text{m}\Omega$ verbleibt. Zwei charakteristische Bögen treten auf, die einem Bereich mit hochfrequenten (linker Bogen) und einem mit niederfrequenten Prozessen (rechter Bogen) zugeordnet werden können. Während der Polarisationswiderstand (breite des Bogens) des hochfrequenten Bogens mit fortschreitender Betriebsdauer kontinuierlich zunimmt, bleiben die niederfrequenten Verluste weitgehend unverändert. Dies deutet auf eine zunehmende Verschlechterung ladungsübertragungsdominierter Prozesse auf der Brennstoff- und/oder Lufolektrode hin, während diffusionsbedingte Mechanismen kaum beeinflusst werden. In der Folge steigt der Gesamtpolarisationswiderstand (Abstand linker Schnittpunkt mit theoretischem rechtem Schnittpunkt auf X-Achse) kontinuierlich an, was den in dem Spannungsverlauf beobachteten allmählichen Anstieg der Zellspannung erklärt. Mögliche Ursachen dafür sind Agglomeration der Elektrode, bedingt durch die erhöhten Betriebstemperatur, und der geringere Luftdurchfluss der erhöhte lokale Potentiale auf der Lufolektrode zur Folge hat, was wiederum die Degradation beschleunigen kann.

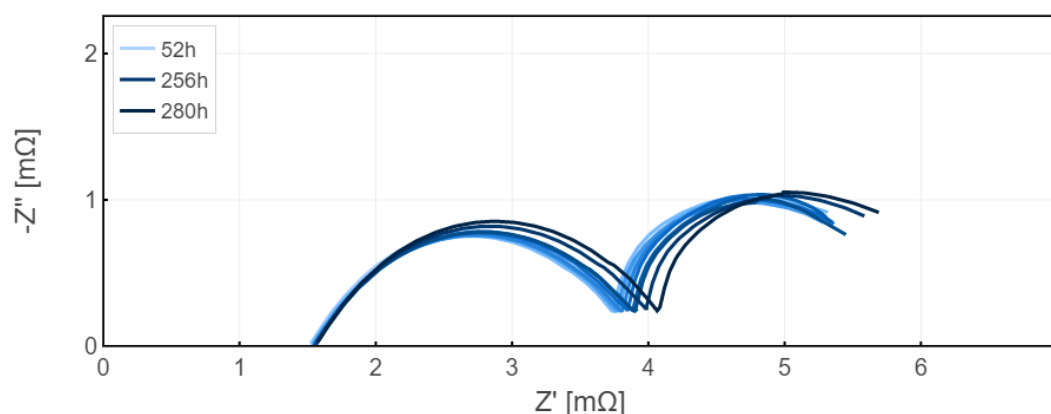


Abbildung 6: EIS-Spektren des Langzeitexperiments nach 52 bis 280 Stunden: bei einer Temperatur von $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem Strom von 60.75 A (750mA/cm^2).

3 Ausblick und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse dieses Beitrags unterstreichen das hohe Potenzial der Co-Elektrolyse als Schlüsseltechnologie innerhalb zukünftiger Power-to-X-Konzepte zur Herstellung klimaneutraler Syntheseprodukte. Trotz des noch frühen Entwicklungsstands konnte gezeigt werden, dass unter geeigneten Betriebsbedingungen ein stabiles H_2/CO -Verhältnis für die Methanolsynthese über lange Betriebszeiten realisierbar ist. Die Langzeituntersuchungen bei erhöhter Temperatur und Stromdichte belegen eine initiale Verbesserungsphase, gefolgt von einer moderaten Degradation, die mit $6.01\%/100\text{ h}$ unter vergleichbaren Literaturwerten liegt. Damit wird deutlich, dass die gezielte Wahl der Betriebsparameter einen entscheidenden Einfluss auf die elektrochemische Stabilität besitzt.

Für den industriellen Einsatz sind jedoch weitere Reduktionen der Degradationsrate erforderlich. Zukünftige Arbeiten werden sich daher auf den Betrieb bei geringeren Temperaturen und Stromdichten sowie auf erhöhte Luftdurchflüsse konzentrieren. Aufbauend

auf den hier vorgestellten Ergebnissen bilden diese Untersuchungen eine Grundlage zur weiteren Optimierung der Co-Elektrolyse und zur Erschließung ihres vollen Potenzials innerhalb nachhaltiger PtX-Prozessketten.

4 Literatur

- [1] IEA, „Renewables 2024 – Analysis - IEA“, Paris, 2024. Zugegriffen: 18. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
- [2] EMBER, „Global Electricity Review 2025“, Apr. 2025. Zugegriffen: 18. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025/>
- [3] F. Ferrete *u. a.*, „Solid Oxide Electrolyzers Process Integration: A Comprehensive Review“, *Processes* 2025, Vol. 13, Bd. 13, Nr. 8, Aug. 2025, doi: 10.3390/PR13082656.
- [4] M. A. Laguna-Bercero, „Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review“, *J. Power Sources*, Bd. 203, S. 4–16, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2011.12.019.
- [5] Y. Wang, T. Liu, L. Lei, und F. Chen, „High temperature solid oxide H₂O/CO₂ co-electrolysis for syngas production“, *Fuel Processing Technology*, Bd. 161, S. 248–258, Juni 2017, doi: 10.1016/J.FUPROC.2016.08.009.
- [6] M. Ostadi, E. Rytter, und M. Hillestad, „Boosting carbon efficiency of the biomass to liquid process with hydrogen from power: The effect of H₂/CO ratio to the Fischer-Tropsch reactors on the production and power consumption“, *Biomass Bioenergy*, Bd. 127, S. 105282, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2019.105282.
- [7] R. Baratti *u. a.*, „Analysis of Methanol Production from Bio-syngas Through an Innovative Reactor“, *Chem. Eng. Trans.*, Bd. 117, S. 91–96, 2025, doi: 10.3303/CET25117016.
- [8] C. Mebrahtu *u. a.*, „Integrated Co-Electrolysis and Syngas Methanation for the Direct Production of Synthetic Natural Gas from CO₂ and H₂O“, *ChemSusChem*, Bd. 14, Nr. 11, S. 2295–2302, Juni 2021, doi: 10.1002/CSSC.202002904.
- [9] M. A. Laguna-Bercero, „Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review“, *J. Power Sources*, Bd. 203, S. 4–16, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2011.12.019.
- [10] S. D. Ebbesen und M. Mogensen, „Electrolysis of carbon dioxide in Solid Oxide Electrolysis Cells“, *J. Power Sources*, Bd. 193, Nr. 1, S. 349–358, Aug. 2009, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2009.02.093.
- [11] M. Zhu, Q. Ge, und X. Zhu, „Catalytic Reduction of CO₂ to CO via Reverse Water Gas Shift Reaction: Recent Advances in the Design of Active and Selective Supported Metal Catalysts“, *Transactions of Tianjin University*, Bd. 26, Nr. 3, S. 172–187, Juni 2020, doi: 10.1007/S12209-020-00246-8/FIGURES/14.
- [12] Elcogen AS, „Solid oxide electrolysis cells“. Zugegriffen: 20. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://elcogen.com/products/solid-oxide-electrolysis-cells/>

- [13] R. O'Hayre, S.-W. Cha, W. Colella, und F. B. Prinz, „Fuel Cell Fundamentals“, *Fuel Cell Fundamentals*, Mai 2016, doi: 10.1002/9781119191766.
- [14] A. D. N. Kamkeng und M. Wang, „Long-term performance prediction of solid oxide electrolysis cell (SOEC) for CO₂/H₂O co-electrolysis considering structural degradation through modelling and simulation“, *Chemical Engineering Journal*, Bd. 429, S. 132158, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.CEJ.2021.132158.
- [15] S. E. Wolf, V. Vibhu, E. Tröster, I. C. Vinke, R. A. Eichel, und L. G. J. de Haart, „Steam Electrolysis vs. Co-Electrolysis: Mechanistic Studies of Long-Term Solid Oxide Electrolysis Cells“, *Energies (Basel)*., Bd. 15, Nr. 15, S. 5449, Aug. 2022, doi: 10.3390/EN15155449/S1.
- [16] Y. Tao, S. D. Ebbesen, und M. B. Mogensen, „Degradation of solid oxide cells during co-electrolysis of steam and carbon dioxide at high current densities“, *J. Power Sources*, Bd. 328, S. 452–462, Okt. 2016, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2016.08.055.