

Reversible SOCs als Bindeglied zwischen Plus-Energie-Quartieren und Strom-, Wärme- sowie Gasnetz

Dominik Jankowski^{1,2,*}, Anton Seidl^{1*}, Robert Pratter², Johanna Ganglbauer^{2*},
Christof Bernsteiner², Christoph Hochenauer¹, Vanja Subotić¹

¹ Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25b, 8010 Graz
+43 (316) 873 4209, dominik.jankowski@tugraz.at, www.tugraz.at/institute/iwt/home

² 4ward Energy Research GmbH, Reininghausstraße 13a, 8020 Graz,
www.4wardenergy.at/de

Kurzfassung: Zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudeenergiesektor sind alternative Energieerzeugungs- und Energiespeicherkonzepte notwendig. Technologien, die quartiersbezogen zentral sommerliche Überschussenergie aus erneuerbaren Energien speichern und in weniger ertragreichen Monaten wieder in Strom und Wärme zurückwandeln, sind als Eigenschaften beispielsweise den Elektrolyse- bzw. Brennstoffzellensystemen zuzuordnen. Im Projekt Cell4Life wird ein solches System, bestehend aus einer reversibel arbeitenden Festoxidzelle (rSOC) theoretisch und im labormaßstab im Kontext eines Plus-Energie-Quartiers (PEQ) auf dessen funktionale Integrität hin untersucht. Ein Projektziel ist dabei die Optimierung der dynamischen Betriebsweise, für die es zum einen statische Optimierungsversuche am Prüfstand und zum anderen Gesamtsystemsimulationen bedarf. In dieser Veröffentlichung wird vorgestellt, welche Betriebsweisen statisch optimiert und welche Systemkonzepte innerhalb einer Simulation untersucht werden. Für ein städtisches PEQ hat sich ein rSOC-System, das die Dampfelektrolyse im SOEC-Modus nutzt und im SOFC-Modus mit Wasserstoff und Methan betrieben wird, als am sinnvollsten erwiesen. Darüber hinaus werden reale Betriebsweisen aufbauend auf Wasserstoffbeimischungen in das örtliche Gasnetz in experimentellen Versuchen betrachtet. Basierend auf theoretischen Bedarfsdaten aus dem „PEQ21“ in Wien werden drei Optimierungsszenarien definiert, die neben dem Langzeit- auch den Kurzzeitbetrieb der rSOC-Anlage betrachten.

Keywords: rSOC, Plus-Energie-Quartier, System-Optimierung, Erneuerbare Energien

1 Einleitung

Die Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudeenergiesektor erfordert im Vergleich zur bestehenden Energieerzeugung alternative Energie- und Speicherkonzepte. Trotz hohem Anteil erneuerbaren Stroms und der Verwendung effizienter Verbrennungstechnologien zur Wärmezeugung, sind mehr als ein Zehntel der CO₂-Emissionen Österreichs auf den Gebäudeenergiesektor zurückzuführen [1]. Eine Möglichkeit zur Reduktion der Emissionen ist die Verbesserung der Energieversorgung hin zu klimaneutralem Standard.

Ein Ansatzpunkt hierfür ist im Sinne der natürlichen Jahreszyklen sommerlichen Energieüberschuss aus erneuerbaren Energien in Wasserstoff umzuwandeln, zu speichern

und in weniger ertragreichen Monaten wieder in elektrische und thermische Energie umzusetzen. Neben Proton-Exchange-Membrane Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (PEM-KWK), stehen reversibel betriebene Festoxidzellen-KWKs (rSOC-KWK) im Fokus mehrerer Forschungsprojekte [2]. Dabei wird der Vorteil genutzt, ein Gerät sowohl im Elektrolyse-Modus (SOEC) als auch im Brennstoffzellen-Modus (SOFC) zu betreiben.

Neben dem klassischen Betrieb von Brennstoffzellen mit Wasserstoff, zeichnet sich die rSOC-Technologie durch eine hohe Brennstoffflexibilität aus. Kohlenwasserstoffen wie Methan oder Diesel und andere Wasserstoffderivate wie Ammoniak können als Brennstoff verwendet werden, wodurch die Nutzung dieser Technologie zusätzlich als sogenannte Brückentechnologie in Frage kommt und für die Energietransformation von fossilen hin zu erneuerbaren Energieträgern erfolgsversprechend ist.

Die rSOC-KWK-Anlagen haben bisher allerdings noch keine vollständige Marktreife erreicht. Im Zentrum aktueller Forschungstätigkeiten liegt vor allem die Verlängerung der Lebensdauer, deren Einflussfaktoren beispielsweise (i) die passende Betriebsweise, (ii) die Reduktion der Ein- und Ausschaltvorgänge, (iii) die Optimierung der Brennstoffwechsel und (iv) die optimale Einbindung in die vorhandene Infrastruktur sind. Auch die bestmögliche Skalierung der Systemkomponenten bildet einen entscheidenden Faktor zur Erlangung der vollständigen Marktreife. Dies spiegelt sich zusätzlich in einem hohem Investitionsaufwand wider, der prognostiziert bis 2030 auf ein Drittel reduziert werden soll und somit zu bestehenden fossilen Systemen konkurrenzfähig werden kann [3].

Im Forschungsprojekt Cell4Life [4] wird die Frage wie rSOC-Systeme in PEQs zur Anwendung kommen können, theoretisch sowie labortechnisch betrachtet. Der Fokus liegt einerseits auf der Optimierung der Betriebsparameter von Hochtemperaturbrennstoffzellen basierend auf Laboruntersuchungen und andererseits auf einer umfassenden techno-ökonomischen Analyse im Kontext von PEQs. Um das betrachtete rSOC-System unter realistischen Bedingungen zu erforschen, werden die Untersuchungen an einem Neubauquartier mit Plus-Energie-Ziel in Wien ausgerichtet [5]. Die Ergebnisse helfen bei der anwendungsnahen Dimensionierung der Komponenten in der Gesamtsystemsimulation sowie bei der Untersuchung der dynamischen Betriebsweise von rSOC-Systemen im labormaßstab.

2 Methoden

Um den dynamischen Betrieb der rSOC-KWK-Anlage zu optimieren, werden zwei Säulen benötigt. Neben experimentellen Versuchen unter statischen Bedingungen bildet die Gesamtsystemsimulation die zweite Säule. Im Folgenden wird die Herangehensweise an die experimentellen Versuche sowie die Gesamtsystemsimulation beschrieben.

Der erste Abschnitt beschreibt das Auswahlverfahren der technischen Betriebsmöglichkeiten von rSOC-KWK-Systemen in PEQs anhand aktuell oder zukünftig potenziell vorhandener Infrastrukturen. Dabei wird zusätzlich das Potenzial verschiedener Brennstoffe im SOFC-Betrieb rechnerisch gegenübergestellt. Die daraus folgende Auswahl der Betriebsweise bildet die Grundlage für statisch-experimentelle Betriebsoptimierungen. Im zweiten Abschnitt wird die Herangehensweise beschrieben, die für die Gesamtsystembetrachtung und die Untersuchung des zeitvarianten Betriebs der rSOC-Anlage notwendig ist.

2.1 Technische Betriebsmöglichkeiten

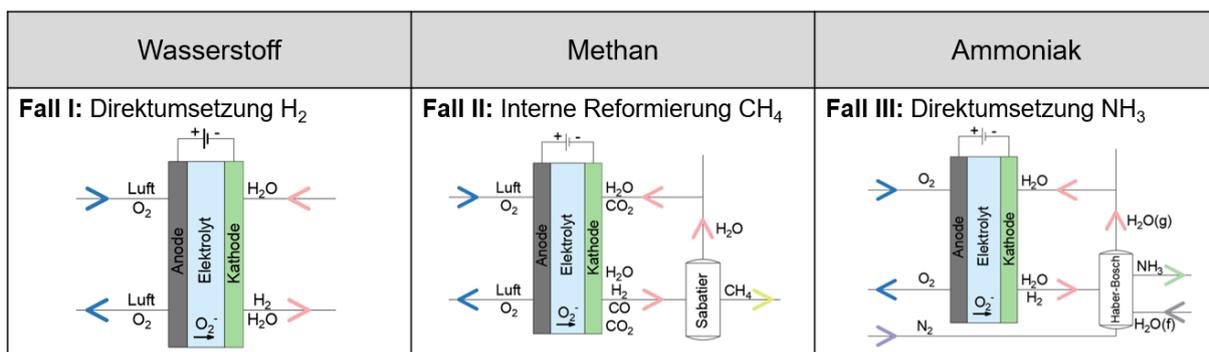
Die Festlegung der technischen Betriebsmöglichkeiten bildet die Grundlage für die statische Betriebsoptimierung und damit die erste Säule der dynamischen Optimierung. Die rSOC-Technologie lässt die elektrochemische Umsetzung verschiedener Kraftstoffe zu. Dazu gehören neben Wasserstoff beispielsweise gasförmige Kohlenwasserstoffe wie Methan, Propan sowie andere Verbindungen wie Ammoniak. Die Kombination der Brennstoffflexibilität mit einem PEQ ergibt verschiedene saisonale Energiespeicherszenarien, die es zu untersuchen gilt. Aus diesem Grund wird in dieser Veröffentlichung die energetische Betrachtung verschiedener Kraftstoffe miteinander verglichen und die dazugehörige Kraftstoffaufbereitung näher erläutert. Es wird untersucht, welche Kraftstoffe sich am besten für die Verwendung in einem Plus-Energie-Quartier eignen. Konkret zählen darunter die aktuell am häufigsten genannten Wasserstoffträger: (i) purer Wasserstoff selbst, (ii) Biomethan sowie (iii) Ammoniak.

Neben der rechnerischen Analyse des SOFC-Betriebs wird auch die Möglichkeit der Speicherung des Mediums in einem PEQ sowie die Implementierung in die Gebäudeenergieversorgung diskutiert. Dabei wird in Betracht gezogen, dass das PEQ redundant an das lokale Versorgungsnetz, bestehend aus örtlichem Gasverteil-, Trinkwasser- sowie Fernwärmenetz, angeschlossen ist.

Elektrolysebetrieb

Im SOEC-Betrieb werden im Gegensatz zu den Betriebsmöglichkeiten im SOFC-Betrieb, die Anlagenbestandteile sowie Vor- und Nachteile innerhalb einer Diskussion erfasst. Die Schwerpunkte dieser Diskussion sind in erster Linie die Speicher- und Netzinfrastruktur vor Ort. Hierfür werden die folgenden Betriebsmöglichkeiten näher untersucht (siehe Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Betriebsmöglichkeiten SOEC



Der am weitesten untersuchte und verbreitete Fall (I) ist die Dampfelektrolyse zur Wasserstoffherstellung. Neben der Speicherung von Wasserstoff in Druckbehältern wird die Einspeisung in das örtliche Gasnetz diskutiert, in dem aktuell eine Beimischung von 10 vol.-% gesetzlich erlaubt ist [6].

Um synthetisches Methan herzustellen, wird im zweiten Fall die Co-Elektrolyse mit einem Methanisierungsreaktor nach dem Sabatier-Verfahren diskutiert. Im übergeordneten Prozess wird Wasserdampf und CO₂ der Kathodenseite zugeführt und zu Synthesegas (H₂ und CO)

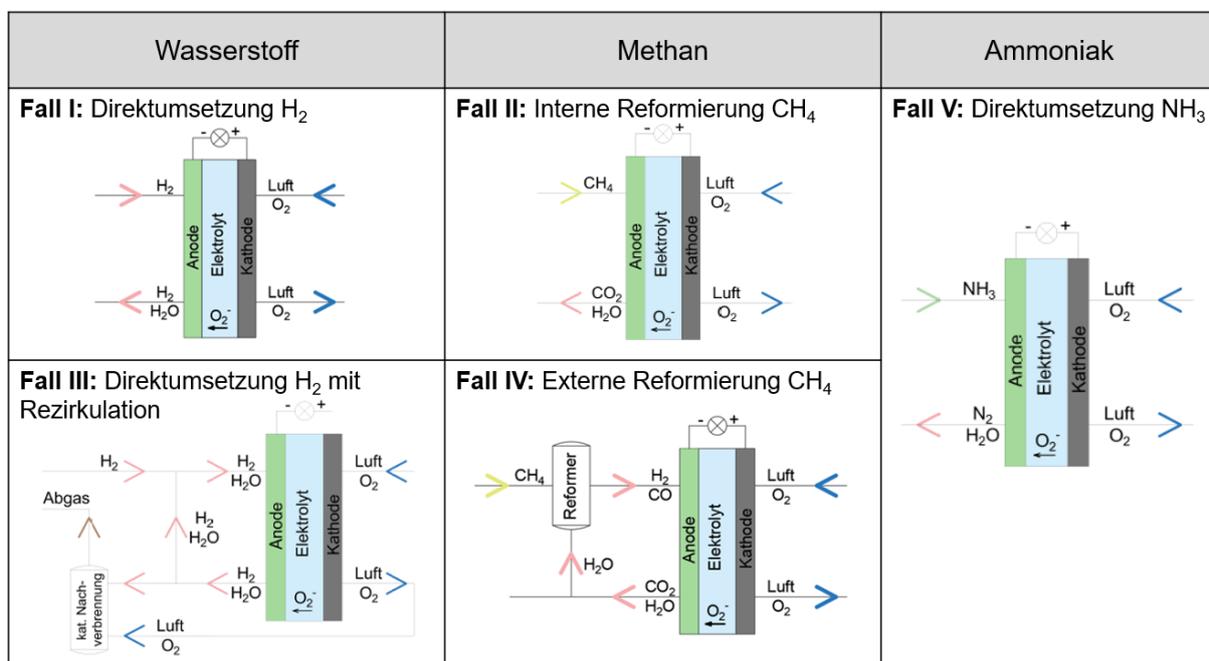
umgewandelt. Unter erhöhtem Druck wird anschließend aus Synthesegas synthetisches Methan erzeugt, das wiederum lokal gespeichert oder in das bestehende Gasnetz eingespeist werden kann.

Der dritte Fall besteht aus einer Dampfelektrolyse-SOEC, die mit einem Haber-Bosch-Reaktor (HB-Reaktor) gekoppelt ist. Dabei wird dem HB-Verfahren Wasserstoff, Wasserdampf und extern bereitgestellter Stickstoff zugeführt und zu Ammoniak umgewandelt. Dieser kann wiederum in Behältern gespeichert oder extern Vertrieben wird.

Brennstoffzellenbetrieb

In Tab. 2-2 sind fünf verschiedenen SOFC-Betriebsmöglichkeiten dargestellt, die die oben genannten Brennstoffe Wasserstoff, Biomethan, und Ammoniak integrieren.

Tab. 2-2: Betriebsmöglichkeiten SOFC



Im Fall (I) und (II) wird gespeicherter Wasserstoff als Brennstoff direkt zu elektrischem Strom und Wärme umgesetzt, wobei im Fall (II) eine Gasrückführung auf Brennstoffseite implementiert ist. Grund hierfür sind konstruktive und damit technische Grenzbedingungen, die die Gasumsetzung (Fuel Utilization, FU) auf der Anodenseite auf $FU = 80\%$ limitieren.

Die Fälle (III) und (IV) beinhalten die Verwendung von synthetischem Methan aus dem Gasspeicher oder Biomethan aus dem lokalen Gasnetz als Brennstoff für die Brennstoffzelle. Dabei soll zwischen interner und externer Reformierung unterschieden werden. Die interne Reformierung bietet gegenüber der externen Reformierung den Vorteil einer verringerten Anlagenkomplexität. Währenddessen kann sich bei der Reformierung von Methan fester Kohlenstoff bilden, der die Reaktivität der SOFC herabsetzt. Deshalb bedient man sich einer externen Reformierung, um den Reformierungsprozess und die Umsetzung der Reformate örtlich zu trennen. In diesem Fall soll die Dampfreformierung (DR) mit der Wassergas-Shift-Reaktion (WSR) betrachtet und von einer idealen Umsetzung aller Edukte ausgegangen

werden (siehe Tab. 2-3). Die Abwärme innerhalb des Stacks durch die Umsetzung von Wasserstoff und Kohlenmonoxid wird anschließend als Prozesswärme für die endotherme Dampfreformierung verwendet.

Im letzten Fall (V) wird gespeicherter Ammoniak als Brennstoff verwendet, der sich bis zum Zelleingang unter idealen Bedingungen vollständig in dessen Bestandteilen (H_2 und N_2) zersetzt hat. Durch das Aufheizen der Gase auf Betriebstemperatur ($T = 800\text{ }^\circ\text{C}$) wird die Zersetzungstemperatur von Ammoniak, die zwischen $400\text{ }^\circ\text{C}$ und $600\text{ }^\circ\text{C}$ liegt überschritten.

Tab. 2-3: Reaktionsgleichungen zu Betriebsmöglichkeiten SOFC

Fall	Brennstoff	Betriebsart	Reaktionsgleichungen
I	Wasserstoff (H_2)	Direktumsetzung	$2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O(g)$
II		Direkt + Rezirkulation	
III	Biomethan (CH_4)	Interne Reformierung	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O(g)$
IV		Externe Reformierung	$CH_4 + H_2O(g) \leftrightarrow CO + 3H_2$ (DR) $CO + H_2O(g) \leftrightarrow CO_2 + H_2$ (WSR) $2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O(g)$
V	Ammoniak (NH_3)	Interne Spaltung	$2NH_3 + \frac{3}{2}O_2 \leftrightarrow N_2 + 3H_2O(g)$

In die rechnerische Bewertung fließen die theoretisch mögliche Reaktionsabwärme Q_{ab} , die Nernst-Spannung ϕ_N sowie der thermodynamische Wirkungsgrad η_{th} der Reaktion ein. Erstere lässt eine Beurteilung der Abwärme auf Zell- bzw. Reaktionsebene zu, was für die Auswahl des Brennstoffs in einem PEQ sehr wichtig ist. Um eine Vergleichbarkeit verschiedener Zellen und Stacks zu ermöglichen, blieben verschiedene konstruktive und wärmeerzeugende Verlustarten, wie beispielsweise Ohm'sche Verluste unberücksichtigt. Die Nernst-Spannung lässt abschätzen, wie hoch die elektrische Leistung unter Open-Circuit-Verhältnissen im Brennstoffvergleich ausfällt. Schließlich kann über den thermodynamischen Wirkungsgrad die Aussage getroffen werden, wieviel Energie vom Brennstoff über die SOFC verwendet werden kann. Die Berechnung der theoretisch möglichen Reaktionsabwärme Q_{ab} wird mit Hilfe der Entropieänderung ΔS bei einer Betriebstemperatur von $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ mit Hilfe der Gleichung (1) berechnet.

$$Q_{ab} = \Delta S \cdot \Delta T \quad (1)$$

Der Vergleich der verschiedenen Nernst-Potentiale wird mit Gleichung (2) durchgeführt.

$$\phi_N = \phi_0 - \frac{R \cdot T}{z_e \cdot F} \cdot \ln \left(\prod_m \left(\frac{p_m}{p^0} \right)^{v_{st,m}} \right) \quad (2)$$

ϕ_0 ist dabei das reversible Zellpotential unter Standardbedingungen ($T^0 = 298,15 \text{ K}$; $p^0 = 1 \text{ bar}$), R die universelle Gaskonstante, T die Temperatur unter Betriebsbedingungen, z_e die Ladungszahl aus der Reaktionsgleichung sowie F die Faraday-Konstante. Mit dem letzten Term wird die Gaszusammensetzung an der Zelle rechnerisch erfasst. Da durch verschiedene konstruktive Maßnahmen, die Benetzung der Anode mit Produkten und der Kathode mit Edukten unterschiedlich ausfallen kann, wird eine homogene Gasverteilung angenommen.

Der thermodynamische Wirkungsgrad bildet das Verhältnis zwischen der theoretisch nutzbaren und der theoretisch verfügbaren Energiemenge eines Stoffes unter Standardbedingungen und wird mit Gleichung (3) berechnet.

$$\eta_{th} = \frac{\Delta_r G^0(T, p^0)}{\Delta_r H^0(T, p^0)} \quad (3)$$

2.2 Gesamtsystemoptimierung

Die zweite Säule zur Optimierung der dynamischen Betriebsweise von rSOC-Systemen bildet die Gesamtsystemsimulation und der daraus erzeugte elektrische und thermische Lastverlauf für dynamische Laborversuche. Um diese Lastverläufe zu erzeugen sind neben Anpassungen des Simulationsmodells zwei Elemente notwendig: (i) eine Datengrundlage bestehend zeitlich aufgelösten elektrischen sowie thermischen Bedarfsdaten aus einem PEQ und (ii) Optimierungsszenarien bestehend aus verschiedenen zeitlichen Dynamiken.

Die Datengrundlage bilden die elektrischen und thermischen Bedarfs- und Erzeugerprofile aus einem Neubauquartier mit Plus-Energie-Ziel in Wien [5]. Konkret handelt es sich dabei um simulierte stündliche Leistungswerte des elektrischen Strombedarfs, des Wärmebedarfs, des Warmwasserbedarfs, des Kältebedarfs sowie der Photovoltaik-Erzeugung aus dem Projekt „Zukunftsquartier 2.0“. Aufbauend auf diesen Profilen, werden Systemkomponenten der rSOC-KWK-Anlage skaliert.

Die anschließende Diskussion der Optimierungsszenarien legt den Fokus zum einen auf eine möglichst hohe zeitliche Auslastung der rSOC-KWK-Anlage, um die Lastwechsel zu minimieren und einen längeren Betrieb zu ermöglichen. Ein weiterer Aspekt, der sich daraus ergibt, ist eine schnellere Transformation der auch umliegenden Quartiere, da ein Austausch von Gasen bzw. elektrischer oder thermischer Energie durch örtliche Netze möglich wird. Des Weiteren ist ein Schwerpunkt die möglichst effiziente Speicherung der sommerlichen Überschussenergie für weniger ertragreiche Monate. Daraus werden zeitlich zwei Szenarien definiert. Ersteres soll die erzeugten erneuerbaren Gase langfristig speichern, währenddessen zweiteres in Konkurrenz zu Batteriespeichern im kurzzeitigen Betriebsbereich untersucht werden soll.

Für die Simulation des Energie-Gesamtsystems wird die open-source Modellumgebung HiSim (House Infrastructure Simulator) [2] eingesetzt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Dieser Abschnitt ist in zwei Teile unterteilt: (i) Festlegung der technischen Betriebsweise sowie (ii) Festlegung der Optimierungsszenarien innerhalb der Gesamtsystemsimulation.

3.1 Festlegung der technischen Betriebsweise von SOEC und SOFC

Elektrolysebetrieb

Für den Elektrolysebetrieb, der vor allem im Sommer stattfindet, ist die Betriebsweise mit reinem Wasserstoff am sinnvollsten. Ausschlaggebend dabei ist in erster Linie die, gegenüber von CH_4 und NH_3 , geringere Anlagenkomplexität und damit der geringere Investitionsaufwand. Neben der Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in Druckbehältern, bietet sich die Einspeisung von Wasserstoff in das lokale Gasnetz an. Dadurch verringert sich die lokale Speichergröße. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass mittelfristig zentrale Wasserstoffnetze geplant und realisiert werden, wodurch die Variante einer reinen H_2 -Elektrolyse der richtige Ansatz zur Speicherung von überschüssigem und erneuerbarem Strom ist.

Wird der höhere Anlagenaufwand von Methanisierungsreaktoren in Verbindung mit einer SOEC außenvorgelassen, ist aufgrund der aktuell verfügbaren Gasinfrastruktur und die Möglichkeit der Einspeisung Fall (II) ein weiteres realistisches Betriebsszenario. Da es sich im übergeordneten Kontext um ein städtisches Plusenergiequartier handelt, wird nicht davon ausgegangen, dass örtliche CO_2 -Ressourcen für die Co-Elektrolyse zur Verfügung stehen, wodurch eine Anlieferung durch eine externe Lieferkette bereitgestellt werden muss. Im ländlichen Raum oder in der Nähe von industriellen Anlagen ist der Betrieb der Co-Elektrolyse in Verbindung mit einem Methanisierungsreaktor jedoch empfehlenswert. Ähnliches gilt für den dritten Fall, für den Stickstoff bereitgestellt werden muss. Fällt dieser in einem industriellen Prozess als Abfallprodukt an, kann die Verwendung einer Ammoniak-Lösung empfehlenswert sein.

Brennstoffzellenbetrieb

Die Ergebnisse aus den Berechnungen zur potenziellen Reaktionsabwärme Q_{ab} , des Nernst-Potentials ϕ_N und zum thermodynamischen Wirkungsgrad η_{th} tabellarisch dargestellt (siehe Tab. 3-1). Es ist anzumerken, dass es sich bei den Ergebnissen um rein theoretische Werte handelt, deren Systemgrenze um die Reaktion in der Zelle selbst gelegt wurde. Ausnahme bildet dabei die abgegebene Reaktionswärme, in dessen Systemgrenze die Rezirkulation einbezogen wurde.

Es ist zu sehen, dass die Wärmeabgabe pro Mol für die Umsetzung von Wasserstoff mit Rezirkulation (Fall II) höher ist als ohne Rezirkulation (Fall I). Es wird angenommen, dass sich durch die Rezirkulation eine vollständige Brenngasumsetzung realisieren lässt. Im Vergleich zu den anderen Fällen besitzt Fall II die höchste Wärmeabgabe. Im direkten Vergleich dazu besitzt die interne Reformierung von CH_4 (Fall III) die niedrigste Wärmeabgabe. Dies liegt vor allem an der endothermen Reaktion der Dampfreformierung. Darüber hinaus ist der thermodynamische Wirkungsgrad für den dritten Fall am höchsten, wodurch bei der

Verwendung von Methan ein höherer Anteil der im Gas enthaltenen Energiemenge theoretisch umsetzen lässt. Die Werte der externen Reformierung (Fall IV) sind die Gleichen zu Fall I und V, was dadurch zu begründen ist, dass Methan nach dem Reformier vollständig zu H_2 und CO_2 umgesetzt wurde und in der Zelle die reine Wasserstoffoxidation stattfindet. Ähnliches wird für den fünften Fall angenommen, bei dem sich Ammoniak schon vor Ankunft in der Zelle in dessen Bestandteile zersetzt hat.

Tab. 3-1: Berechnungsergebnisse SOFC

Fall	Brennstoff	Betrieb	Q_{ab} in kJ/mol _{Brennstoff}	ϕ_N in V	η_{th} in %
I	H_2	Ohne Rezirkulation	47,8	1,06	83
II	H_2	Mit Rezirkulation	59,8	1,06	83
III	CH_4	Interne Reformierung	0,3	1,07	92
IV	CH_4	Externe Reformierung	47,8	1,06	83
V	NH_3	Interne Spaltung	47,8	1,06	83

In einem PEQ können verschiedene Verhältnisse zwischen elektrischem und thermischem Bedarf auftreten. So können im Wesentlichen zwei Fälle entstehen. Einerseits wird neben elektrischer Energie keine Wärme und andererseits neben elektrischer Energie auch thermische Energie benötigt. Aus diesem Grund wird eine Zwei-Gase-Lösung aus einem gemischten SOFC-Betrieb mit Wasserstoff und/oder Methan als sinnvoll erhalten. Aufgrund der potenziellen Kohlenstoffablagerung innerhalb der Zelle wird jedoch eine externe Reformierung angestrebt. Die innerhalb der Zelle abgegebene Wärme wird für die Dampfreformierung im externen Reformier verwendet.

Für die Optimierung des statischen rSOC-Betriebs können daraus abgeleitet vier verschiedene Betriebspunkte für den SOFC-Betrieb und ein Betriebspunkt für den SOEC-Betrieb festgelegt werden (siehe Tab. 3-2).

Tab. 3-2: Statische Betriebspunkte SOEC und SOFC

Szenario	Betriebsmodus	Brennstoff(e)
1	SOEC	Wasserdampf
2	SOFC	100 % H_2
3	SOFC	20% H_2 80% CH_4
4	SOFC	10% H_2 90% CH_4
5	SOFC	100% CH_4

3.2 Optimierungskonzepte für das rSOC-System

Für die Analyse des rSOC-Systems zur Energieversorgung von PEQs wurden mehrere Integration- und Betriebsmodelle definiert, die mittels Simulationen untersucht und hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Eignung beurteilt werden. Dabei wurde zwischen verschiedenen Zielsetzungen unterschieden. Dazu gehören (i) der statische Betrieb des rSOC-Systems sowie (ii) die dynamische Betriebsweise des rSOC-Systems.

Szenario 1: Langzeitspeicherung mit konstantem Betrieb

Das übergeordnete Ziel dieses Szenarios ist es den bestehenden Energieüberschuss aus den Sommermonaten in die Wintermonate zu transferieren und im Dauerbetrieb die größtmögliche Ausnutzung zu erfahren. Dazu wird das rSOC-System in den Sommermonaten permanent (24/7) im SOEC-Betrieb betrieben. Die PV-Anlage wird so dimensioniert, dass an sonnigen Sommertagen ein relevanter Energieüberschuss entsteht.

Aus dem gespeicherten Wasserstoff sowie aus Biomethan wird im SOFC-Betrieb Strom und Wärme zur Versorgung des PEQ gewonnen. Das Verhältnis zwischen Strom und Wärme kann über die verwendeten Gasgemische eingestellt werden. Der erzeugte Strom wird entweder direkt im PEQ verwendet. Die anfallende Wärme wird zur Versorgung des PEQ mit Raumwärme und zur Trinkwasseraufbereitung verwendet.

Szenario 2: Langzeitspeicherung mit variablem Betrieb

Das Szenario 2 ist ähnlich dem ersten Szenario aufgebaut, jedoch erfolgt der Betrieb nicht starr (24/7), sondern variabel auf Basis von Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen. Das Ziel der Langzeitspeicherung und die damit einhergehende Unterscheidung in Sommer- und Winterbetrieb bleibt bestehen.

Im Sommerbetrieb (SOEC) wird täglich anhand einer Ertrags-Prognose aus Photovoltaik sowie einer Verbrauchsprognose der voraussichtlich erreichbare Überschussstrom ermittelt. Reicht dieser laut Prognose aus, um den SOEC-Betrieb über eine Mindestlaufzeit hinaus zu gewährleisten, wird die Einschaltentscheidung für diesen Tag getroffen. Es ist anzunehmen, dass in diesem Szenario sowohl die Batterie als auch der Druckgasspeicher kleiner als in Szenario 1 dimensioniert werden können. Durch den intelligenten Betrieb wird eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit erhofft.

Im Winter wird der SOFC-Betrieb aktiviert. Dieser erfolgt ähnlich dem Szenario 1 mit dem Unterschied, dass der Betrieb ebenfalls nicht starr (24/7) erfolgt, sondern nur dann, wenn laut Prognosen ein Strombedarf besteht.

Szenario 3: Kurzzeitspeicherung mit variablem Betrieb

In diesem Szenario wird von dem Ziel der Langzeitspeicherung abgesehen und das System als Kurzzeitspeicher, also in einer Art Tag/Nacht-Betrieb betrieben. Der Tagbetrieb erfolgt analog zum Sommerbetrieb in Szenario 2. Wird ein PV-Überschuss prognostiziert, wird das System im SOEC-Betrieb betrieben. In den Nachtstunden bzw. an (Sommer)tagen ohne PV-Überschuss wird das System jedoch nicht wie in Szenario 2 deaktiviert, sondern in den SOFC-Betrieb umgeschaltet. Dann wird aus dem gespeicherten Wasserstoff bzw. aus weiteren Gasen Strom und Wärme erzeugt. Im Vergleich mit den beiden anderen Szenarien kann der Druckgasspeicher deutlich kleiner dimensioniert werden. Allerdings wird in diesem Szenario der Vorteil von Wasserstoff als Langzeitspeicher nicht genutzt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Aus der Definition der Betriebsmöglichkeiten sowie der Optimierungsszenarien für die Gesamtsystemsimulation ergibt sich ein umfassender Startpunkt für die experimentellen Untersuchungen. Die rSOC-Anlage soll dabei in reiner Dampfelektrolyse im SOEC-Modus und in einem kombinierten Wasserstoff-Methan-Betrieb im SOFC-Modus betrieben werden. Aufgrund des geringeren Anlagenaufwands ist der reine Wasserstoff-Ansatz die beste Lösung für den Betrieb in einem PEQ. Darüber hinaus ist durch die notwendige Redundanz zum Gasnetz der Betrieb eines kombinierten Wasserstoff-Methan-Systems im SOFC-Modus am besten geeignet. So kann Methan dem Wasserstoff zugeführt werden, um eine geringere Wärmeabgabe des Systems zu erzeugen. Anwendungsfälle für solche Betriebsweisen wären Übergangsphasen im Frühling oder Herbst, in denen der Heizaufwand geringer als im Winter ist. Aufbauend auf der Festlegung der Betriebsweisen, lassen sich für die labortechnischen Untersuchungen verschiedene Betriebspunkte definieren.

Ein weiterer Bestandteil zur Realisierung des dynamischen Versuchsplans ist das Ergebnis der Gesamtsystemsimulation. Aus dieser ergibt sich schließlich die transiente Betriebsweise innerhalb eines theoretischen PEQs. Um das technisch und wirtschaftlich beste Systemszenario zu verwenden, wurden drei verschiedene Betriebskonzepte erstellt, die im weiteren Projektverlauf miteinander verglichen werden. Dabei werde die Größen der Systemkomponenten optimal aufeinander abgestimmt und elektrische sowie thermische Bedarfskurven erzeugt.

Im weiteren Projektverlauf fließen diese Ergebnisse in die Optimierung der statischen Versuchspunkte ein. Darüber hinaus bildet die statische Optimierung und die durch die Simulation erlangten Bedarfskurven die Grundlage für die dynamische Optimierung des rSOC-Systems an einem Systemprüfstand.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt GmbH, "Klimaschutzbericht 2023," 2023.
- [2] M. Lamagna, D. Groppi, and B. Nastasi, "Reversible solid oxide cells applications to the building sector," 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.387.
- [3] H. Europe, "Strategic Research and Innovation Agenda Final Draft," 2020.
- [4] 4ward Energy Research GmbH, "Reversible SOCs als Bindeglied zwischen Strom-Wärme- & Gasnetz zur Autarkie- und Resilienzsteigerung von Quartieren." Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.4wardenergy.at/de/referenzen/cell4life-1>
- [5] P. Schöfmann *et al.*, "Zukunftsquartier 2.0 Replizierbare, thermisch und elektrisch netzdienliche Konzeption von (Plus-Energie-) Quartieren im dichten urbanen Kontext Weg zum Plus-Energie-Quartier in Wien," 2023, Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>
- [6] ÖVGW, ÖVGW G B210 - Gasbeschaffenheit. Austria, 2021.