

Nutzung von umschaltbaren Brennstoffzellen- und Elektrolyseanlagen in der Sektorkopplung

Robert Hankers*, Stefan Best, Carsten Cosse und Detlef Schulz

Elektrische Energiesysteme

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

D-22043 Hamburg, Holstenhofweg 85

*E-Mail: robert.hankers@hsu-hh.de

Kurzfassung—Mit zunehmendem Fortschreiten der Energiewende zeigt sich, dass zur erfolgreichen Bewältigung dieser weitere Maßnahmen neben dem Umstieg auf eine regenerative Energieerzeugung notwendig sind. Insbesondere die wetterabhängige Fluktuation der erneuerbaren Energieerzeuger führt zu großen Belastungen des Stromnetzes. Die Kopplung des Stromsektors mit den Sektoren der anderen Versorgungsnetze, Gas und Wärme, bieten ein riesiges Potenzial zur Bewältigung der daraus resultierenden Probleme. Dementsprechend sind Lösungen gefragt, die diese Sektorkopplung umsetzen und neue Möglichkeiten zur Entlastung der Stromnetze sowie zur Versorgung der Verbraucher aufzeigen. Eine solche Lösung stellt die Kopplung der Sektoren Strom, Gas und Verkehr mit Hilfe von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren auf Wasserstoffbasis dar. Am Beispiel eines elektrischen Busbetriebshofes soll in einem Forschungsprojekt gezeigt werden, dass durch den Einsatz von umschaltbaren Brennstoffzellen- und Elektrolysesystemen (UBES) Vorteile in der Wirtschaftlichkeit der Notstromversorgung kritischer Infrastrukturen erzielt werden können. Erste Auswahlkriterien der zu verwendenden Technologie und die grundlegende Beschreibung des Forschungsprojekts, sowie die Vorstellung der in Frage kommenden Technologien, erfolgen in diesem Artikel.

Stichworte—Power-to-Gas, Sektorkopplung, Brennstoffzellen, Elektrolyse, Notstromversorgung

ABKÜRZUNGEN

UBES	umschaltbares Brennstoffzellen- und Elektrolysesystem
PtG	Power to Gas
HSU	Helmut-Schmidt-Universität
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell, Feststoffoxid-Brennstoffzelle
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell, Feststoffoxid-Elektrolysezelle
PEM-FC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PEM-EC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolysezelle

I. EINLEITUNG

Die Reduzierung von Treibhausgasemissionen zur Begrenzung der weltweiten Klimaerwärmung stellt einerseits eine große Herausforderung dar und birgt andererseits die Chance für eine Entwicklung hin zur nachhaltigen Energieversorgung der Gesellschaft. Im Zuge der Energiewende wird angestrebt, 60 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2050

durch erneuerbare Energien abzudecken [1]. Um diese Klimaschutzziele zu erreichen, wird zukünftig eine nahezu vollständige Dekarbonisierung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr notwendig sein. Die Stromversorgung wird beispielsweise bereits zu beträchtlichen Teilen durch Windkraft- und Photovoltaikanlagen erbracht, wobei der Anteil dieser Erzeuger am Energiemix zukünftig noch weiter steigen wird. Die Energieerzeugung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen fluktuiert jedoch wetterabhängig, wodurch die Netzstabilität der elektrischen Versorgungsnetze beeinträchtigt wird. Zudem erfordert der Transport der Energie einen weiteren Ausbau der elektrischen Versorgungsnetze. Zum Ausgleich der Fluktuationen werden Energiespeicher mit einer hohen Speicherkapazität benötigt, wobei die Verwendung von Batteriespeichern in der erforderlichen Größenordnung nicht ökonomisch wäre [2]. Um dennoch die zukünftige Energiesicherheit der Sektoren zu gewährleisten, bedarf es neuer Konzepte. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Begriffe „Sektoren“ bzw. „Sektorkopplung“ in der Literatur nicht einheitlich verwendet werden. In diesem Fall sind damit die Verbrauchssektoren Gas, Wärme, Elektrizität und Verkehr gemeint.

Power-to-Gas (PtG) wird von essentieller Bedeutung sein, um die benötigte Speicherkapazität bereitzustellen und damit die Sektoren Elektrizität, Wärme und Verkehr zu koppeln. Bei PtG wird elektrische Energie mittels Elektrolyse in chemische Energie in Form von Gas umgewandelt. In einem Anwendungsfall wird Wasserstoff durch elektrolytische Spaltung von Wasser erzeugt. Wasserstoff erfüllt aufgrund seiner hohen Energiedichte und weiten Systemskalierbarkeit alle Anforderungen an einen zukünftigen klimafreundlichen Energieträger. Wasserstoff kann lokal in Druck-, oder Flüssigspeichern zwischengespeichert werden, wobei weitere Speichermethoden, wie beispielsweise Metallhydridspeicher, erforscht werden. Außerdem sind der Transport und die Speicherung auch in der bestehenden Erdgasinfrastruktur möglich, da Wasserstoff anteilig in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden kann. Die enorme Speicherkapazität des Erdgasnetzes erlaubt so die langfristige Speicherung von Energie [3]. Daraus entsteht wiederum eine hohe Flexibilität der Energieerzeugung und des Energieverbrauches. Der auf diese Art klimaneutral erzeugte Wasserstoff kann

zusätzlich der sich parallel zur Elektromobilität entwickelnden Wasserstoff-Mobilität zur Verfügung gestellt werden. Optional kann in einem weiteren Schritt, der Methanisierung, aus Wasserstoff synthetisches Erdgas (SNG) erzeugt werden. In dem EU-Projekt Helmeth konnte durch die Nutzung von Synergien zwischen Festoxid-Elektrolyse und anschließender Methanisierung ein Wirkungsgrad von über 75 % erreicht werden [4]. Bei Bedarf kann die im Wasserstoff gespeicherte Energie auch auf andere Weise größtenteils wieder genutzt werden. Beispielsweise kann in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung damit zusätzlich eine Verbindung zum Wärmesektor geschaffen werden. Eine andere Möglichkeit, aus Wasserstoff oder auch aus SNG wieder elektrische Energie zu erzeugen, bieten Brennstoffzellen.

Neue Applikationen ergeben sich durch die Sektorkopplung und Energiespeicherung mit PtG-Technologien zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch. In integrierten Anlagen kann durch umschaltbare Brennstoffzellen- und Elektrolysesysteme (UBES) elektrische Energie zwischengespeichert und wieder rückverstromt werden. Beispielsweise wird im Forschungsprojekt Hotflex überschüssiger Wind- und Sonnenstrom in Wasserstoff umgewandelt [5]. Dieser wird dem Erdgas zur Versorgung der Gasturbinen des Kraftwerks im österreichischen Mellach als klimaneutraler Brennstoff zugegeben. Dabei wird eine reversibel betriebsfähige Festoxid-Brennstoffzelle eingesetzt, die hinsichtlich der Möglichkeit der Eigen- und Notstromversorgung getestet werden soll.

In einem beantragten Forschungsprojekt der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) ist vorgesehen, ein über Metallhydridspeicher mit dem Gasnetz gekoppeltes UBES als Notstromversorgung und Regelkraftwerk am Beispiel eines Busbetriebshofes für Elektrobusse zu untersuchen und ein entsprechendes Leitsystem zu entwickeln. Dies soll sowohl die Nutzung für die Stromversorgung in Notsituationen, als auch die dauerhafte, wirtschaftliche Verwendung eines UBES im Regelbetrieb ermöglichen. In der Funktion als Regelkraftwerk kann das Stromnetz durch den Ausgleich fluktuierender Erzeugungsleistungen erneuerbarer Energieerzeuger stabilisiert werden. Alternativ kann es Lastspitzen eines Verbrauchers, wie zum Beispiel des Busbetriebshofes, abdecken. Bei Netzausfall kann ein UBES die Notstromversorgung zur Funktionserhaltung kritischer Infrastruktur sicherstellen, wie beispielsweise Krankenhäuser, Tankstellen, Wasserwerke und der öffentliche Personennahverkehr.

II. KRITERIEN FÜR DIE WAHL DES UBES IM FORSCHUNGSPROJEKT

Für den beschriebenen Anwendungsfall eines UBES in der Notstromversorgung von Elektrobusbetriebshöfen gelten besondere Anforderungen an die zu verwendende Brennstoffzellentechnologie. Obwohl das Hauptaugenmerk auf der zuverlässigen Stromversorgung im Falle eines Netzausfalls

liegt, beschäftigt sich das Projekt auch allgemein mit den Möglichkeiten, die der Einsatz von UBES mit sich bringt. Durch den Wechsel zwischen Energieein- und -speicherung ergeben sich interessante Betriebsszenarien, die die Wirtschaftlichkeit einer Nutzung des UBES auch unabhängig von Notfallsituationen erhöhen können. Beispielsweise kann das UBES Lastschwankungen innerhalb der Versorgungsnetze puffern und so zum Ausgleich fluktuierender Erzeuger wie bspw. Wind- oder Sonnenenergie beitragen. Ebenso kommt eine Glättung der Lastkurve des Busbetriebshofes zum Laden der Elektrobusse in Frage, was einen wirtschaftlichen Anreiz für den Einsatz seitens der Betreiber darstellt. Die Anforderungen an die Dynamik sind hierbei jedoch grundsätzlich andere als beim Betrieb als Notstromaggregat, weshalb es Unterschiede in den UBES hinsichtlich ihrer Eignung für derartige Projekte gibt. Für die angestrebte Funktion zur Notstromversorgung inklusive dem wirtschaftlichen Betrieb in der Sektorkopplung ergeben sich folgende Anforderungen:

- Kaltstartfähigkeit und schnellstmögliche Einsatzbereitschaft
- Hohe Dynamik zur Reaktion auf plötzliche Lastschwankungen
- Vertretbarer Aufwand bei der Installation und Instandhaltung
- Flexibilität hinsichtlich der Einsatzzeit und -dauer
- Ausgereifter Entwicklungsstand für einen zuverlässigen Betrieb bei hohem Wirkungsgrad

Zur technischen Umsetzung eines UBES existieren verschiedene Varianten: Zum einen Doppelstrangsysteme mit getrennter Elektrolyse- und Brennstoffzelleneinheit und zum anderen reversible Brennstoffzellensysteme. Bei den reversibel arbeitenden Systemen handelt es sich entweder um Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Brennstoffzellen oder um Festoxid-Brennstoffzellen. Die Eigenschaften dieser Systeme werden im Folgenden beleuchtet und schließlich hinsichtlich der Anforderungen für UBES bewertet.

III. AUSFÜHRUNGSFORMEN DER KOPPLUNG VON STROM UND GAS MIT UBES

Anlagen zur Sektorkopplung verbinden die unterschiedlichen Sektoren der Energieversorgung miteinander, um so Synergieeffekte zu nutzen. UBES ermöglichen diese Kopplung zwischen den Strom- und Gasnetzen. Während die Anlage im Elektrolysemodus betrieben wird, kann überschüssige, elektrische Energie aus dem Stromnetz entnommen werden und dem Gasnetz in Form von Wasserstoffgas als chemische Energie zugeführt werden. Im Brennstoffzellenmodus entnimmt die Anlage dem Gasnetz chemische Energie und wandelt diese primär in elektrische Energie, aber auch Wärme um. Herausforderungen ergeben sich hierbei auch durch die Randbedingungen: Für die Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz gilt eine Obergrenze von 5 Vol.-% [7]. Sollte diese Grenze erreicht werden, müsste der erzeugte Wasserstoff entweder lokal gespeichert oder anderweitig verwendet werden, beispielsweise zur Methanisierung oder zur Betankung

von Wasserstofffahrzeugen. Für eine direkte Entnahme von Wasserstoff aus dem Gasnetz muss, je nach Ausführung der Anlage, eine Dampfreformierung oder Filtereinrichtung vorgeschaltet werden, um möglichst reinen Wasserstoff für den Brennstoffzellenbetrieb zur Verfügung zu stellen.

Bei einem Einzelstrang wird die gesamte Funktionalität eines UBES über eine kombinierte Zelle realisiert, die wie in Abb. 1 dargestellt sowohl im Elektrolyse- als auch im Brennstoffzellenmodus arbeiten kann.

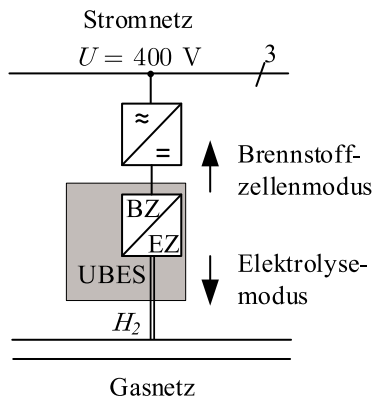


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Einzelstranges zur Sektorkopplung

Die Funktion des UBES wird in der Ausführungsform als Doppelstrang von zwei separaten Komponenten, der Elektrolyse- und der Brennstoffzelle realisiert. In der Brennstoffzelle wird dabei die chemische Energie des Brennstoffes in elektrische Energie und Wärme gewandelt, während die Elektrolysezelle in der Umkehrreaktion elektrische in chemische Energie wandelt. Dieses Prinzip ist in Abb. 2 dargestellt.

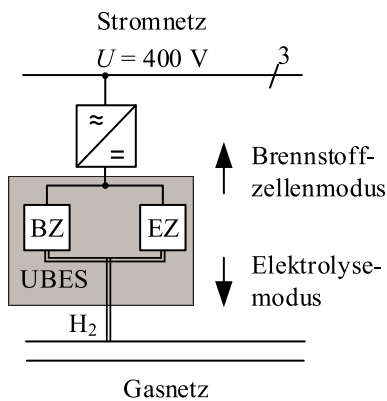


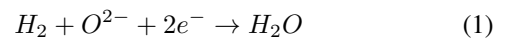
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Doppelstranges zur Sektorkopplung

Sowohl Einzel- als auch Doppelstranganlagen können in unterschiedlichen Bauformen ausgeführt werden, wobei in diesem Beitrag die Festoxid- sowie die Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Bauweisen näher betrachtet werden sollen. Beiden Bauformen ist gemein, dass ein elektrisch isolierender Elektrolyt, der für eine bestimmte Art von Ionen durchlässig

ist, zwischen zwei Elektroden angeordnet wird, um eine Zelle aufzubauen. Die Elektroden werden jeweils über Gasdiffusionsschichten mit den unterschiedlichen Gasen versorgt und in einem Stack, bei dem mehrere Einzelzellen in Reihe verschaltet werden, kommen Bipolarplatten hinzu, die die einzelnen Zellen voneinander trennen. Die jeweilige Funktionsweise dieser Technologien wird im Folgenden erklärt.

A. Festoxid-Bauweise

Bei Festoxid-Zellen besteht die Elektrolyt-Schicht zwischen den Elektroden aus einer speziellen Keramik, meist mit Yttrium stabilisiertes Zirkonoxid (YSZ) [8], [9]. Diese Keramik weist im Temperaturfenster von 600 °C bis 1000 °C eine hohe Leitfähigkeit für Sauerstoffionen (O^{2-}) auf [8]. Bei einer Festoxid-Brennstoffzelle (engl. "Solid Oxide Fuel Cell", SOFC) ergibt sich die folgende Anoden- (Gl. 1) bzw. Kathodenreaktion (Gl. 2).



In Abb. 3 wird schematisch der Prozess innerhalb einer SOFC verdeutlicht.

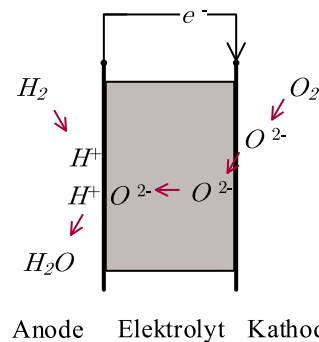


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Vorgänge innerhalb einer SOFC

Die porösen Elektroden werden bei SOFC meist aus dem Elektrolytmaterial hergestellt, da die jeweiligen Elektrodenreaktionen an der Grenzfläche zwischen Gasphase, Elektrolyt und Elektrode am schnellsten ablaufen [10]. An der Anode wird das Wasserstoffmolekül gespalten und mit den Sauerstoffionen zu Wasser verbunden. Dieser Prozess wird durch reine Metalle katalysiert, meistens durch Nickel [8], welches auf die poröse Elektrode aufgebracht ist. Die Aufspaltung des Sauerstoffmoleküls an der Kathode wird bei SOFC als der limitierende Schritt der Gesamtreaktion gesehen. Dieser wird nur durch die hohen Temperaturen innerhalb der SOFC, sowie die Kathodenmaterialien, üblicherweise mit einer Perowskit-Struktur (ABO_3), ermöglicht [10]. SOFC erreichen aktuell Wirkungsgrade von bis zu 62 % [11].

Festoxid-Elektrolyse-Zellen (engl. "Solid Oxide Electrolysis Cell", SOEC), sind analog zu SOFC aufgebaut. Der Prozess in SOEC verläuft genau umgekehrt zur SOFC. Zur

Veranschaulichung können in Abb. 3 alle Pfeilrichtungen umgekehrt werden, um den Prozess in der SOEC darzustellen. Aufgrund der elektrischen Umpolung bei der SOEC wird die Elektrodenbezeichnung im Vergleich zur SOFC vertauscht, sodass die Wasserstoffelektrode bei der SOEC die Kathode darstellt. Die Katalysatorbeschichtung der Elektroden unterscheidet sich nicht von der SOFC, sodass Zellen auch in beiden Funktionen genutzt werden können, dann als sogenannte reversible SOFC [12], [13]. Osinkin et al. [13] berichten für eine solche Zelle von einem Wirkungsgrad von elektrischer Energie, zu Wasserstoff und zurück in elektrische Energie von 70 % bis 75 %.

Aufgrund der hohen Temperaturen benötigen SOFC/EC relativ lange An- und Abfahrzeiträume, um Wärmespannungen und damit Risse im Elektrolyten zu vermeiden. Um die Lebensdauer dieser Zelltypen zu maximieren, sollten sie idealerweise ständig auf Betriebstemperatur gehalten werden, was im Standby zu erheblichen Energiekosten führt. Vorteilhaft ist jedoch, dass SOFC neben reinem Wasserstoff auch mit Methan und Wasserdampf betrieben werden können, da eine Dampfreformierung in der Zelle aufgrund der hohen Betriebstemperatur möglich ist [8]. Analog ist eine Methanisierung des erzeugten Wasserstoffes in der SOEC ebenfalls möglich [14].

B. Polymer-Elektrolyt-Membran-Bauweise

PEM-FC besitzen eine Elektrolytschicht aus einem Polymer, welche durchlässig für Protonen (H^+) ist. Die Elektrodenreaktionen sind für die Anode in Gl. 3 und für die Kathode in Gl. 4 dargestellt.

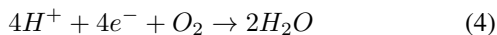


Abb. 4 zeigt schematisch die Reaktionsvorgänge innerhalb der PEM-FC.

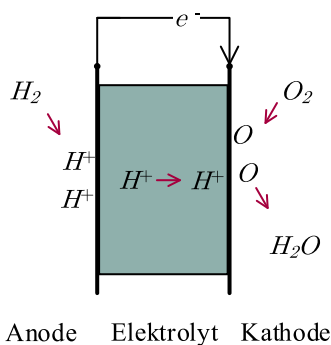


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Vorgänge innerhalb einer PEM-FC

An der Anode wird das Wasserstoffmolekül durch die Katalysatorbeschichtung auf Elektrode und Membran aufgespalten, sodass Protonen entstehen, die durch den Elektrolyt

transportiert werden können. Die üblichen Katalysatormaterialien an dieser Elektrode sind Platin oder Platinlegierungen auf Kohlenstoff, insbesondere auf Nanostrukturen [15]. Als Elektrolyt dient in den meisten Zellen Perfluorsulfonsäure-Copolymer, welches im befeuchteten Zustand eine sehr hohe Leitfähigkeit für Protonen aufweist. Kommerziell wird es zum Beispiel von der Firma DuPont unter dem Markennamen NafionTM vertrieben. Die Kathode der Brennstoffzelle ist häufig ebenfalls mit einer Platinlegierung in Kombination mit Kohlenstoff-Nanostrukturen beschichtet. Hier gibt es allerdings auch Bestrebungen, auf günstigere Nickel-Katalysatoren auszuweichen [15], [16]. PEM-FC weisen einen Wirkungsgrad im Bereich von 40 % bis 50 % auf [18].

In PEM-Elektrolyse-Zellen (PEM-EC) werden die Prozesse der Brennstoffzelle genau umgekehrt. Während an der Wasserstoffelektrode weiterhin Platin-basierte Katalysatoren eingesetzt werden, wird an der Sauerstoffelektrode, an der das Wassermolekül aufgespalten wird, auf Katalysatoren wie Iridium- oder Rutheniumdioxid gesetzt [17]. Insbesondere die Kombination aus hohem elektrischem Potential und einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre sorgt bei PEM-EC an der Sauerstoffelektrode für besondere Materialanforderungen, da die üblichen Materialien für Elektrode, Gasdiffusionsschicht und Bipolarplatte unter diesen Bedingungen korrodieren [19]. PEM-EC erreichen derzeit Wirkungsgrade von etwa 60 % bis 70 % [18].

Analog zu den reversiblen SOFC werden aktuell auch umschaltbare PEM-FC (URFC) erforscht, die einen reversiblen Betrieb mit einer einzelnen PEM-Zelle ermöglichen. Ein Umschalten zwischen Brennstoffzellen- und Elektrolysemodus kann in der URFC entweder durch eine elektrische Umpolung der Elektroden oder durch einen Wechsel der Medienversorgung realisiert werden. Wird eine elektrische Umpolung vorgenommen, verbleiben Wasserstoff und Sauerstoff stets in voneinander getrennten Kammern, gleichzeitig verändert sich jedoch beim Umschalten der Reaktionsvorgang an den Elektroden von einer Reduktion zur Oxidation bzw. umgekehrt. Diese Problematik kann durch einen Medienwechsel umgangen werden. Allerdings führt dies dazu, dass beide Elektrodenkammern und die daran angeschlossene Gasverteilung korrosionsfest ausgeführt werden müssen. Zudem wird ein zusätzlicher Prozessschritt zum Spülen notwendig, um eine versehentliche Vermischung von Wasserstoff und Sauerstoffgasen zu vermeiden. Kühne et al. [19] haben für eine URFC einen Wirkungsgrad für die Kette Strom-Wasserstoff-Strom von 36,52 % erreicht, allerdings begründet sich dieser geringe Wirkungsgrad im ungünstig gewählten Betriebspunkt bei geringer Temperatur. Eine Steigerung von bis zu 80 % sollte durch den Betrieb im optimalen Punkt möglich sein.

IV. ANWENDUNGEN VON UBES IN DER NOTSTROMVERSORGUNG EINES BUSBETRIEBSHOFES

Wie in der Einleitung erwähnt wurde, soll in einem Forschungsprojekt an der Helmut-Schmidt-Universität der Einsatz von UBES in der Notstromversorgung eines Elektrobusbetriebshofes eingesetzt werden. Das Hauptaugenmerk wird

dabei vor allem auf der Systemintegration der UBES und deren Vernetzung mit den Leitwarten der Strom- und Gasnetzbetreiber liegen. Für den Einsatz in diesem System wurde vorab eine Analyse durchgeführt, welches der in Kapitel III vorgestellten Systeme am vorteilhaftesten erscheint. Dabei wurden die in Kapitel II definierten Kriterien als Grundlage für die Entscheidung genommen und die jeweiligen UBES-Typen anhand dieser Kriterien bewertet. Die Auswertung ist in Tabelle I dargestellt.

TABELLE I: VERGLEICH DER EINZELNEN TECHNOLOGIEN FÜR DIE ANWENDUNG IN DER NOTSTROMVERSORGUNG EINES ELEKTROBUSBETRIEBSHOFES

Ausführung	Dynamik	Aufwand	Flexibilität	Entwicklung
SO-Einzel	--	+	--	+
SO-Doppel	o	-	-	
PEM-Einzel	+	+	o	-
PEM-Doppel	++	-	++	+

++ sehr gut, + gut, o moderat, - schlecht, -- sehr schlecht

Hinsichtlich der Dynamik wird das größte Potenzial bei einem PEM-FC/EC-Doppelstrangsystem gesehen. Generell sind die PEM-Technologien den Feststoffoxiden in diesem Punkt überlegen, da sie an keine feste Temperatur gebunden sind und in unterschiedlichen Arbeitspunkten betrieben werden können. Hier ist die Fähigkeit der PEM-Zellen vorteilhaft, auf dynamische Lastschwankungen mit einer entsprechenden Leistungsanpassung reagieren zu können. Verstärkt wird dies noch durch ein Doppelstrang-System, welches die Umschaltzeiten zwischen den Betriebsmodi „Brennstoffzelle“ und „Elektrolyse“ minimieren kann. Da hier zwei komplette Systeme mit der Nennleistung ausgelegt werden müssen, ist der Aufwand für den Einsatz von Doppelstrang-Systemen allerdings deutlich höher.

Zwischen den SO-Zellen als Doppelstrang und den PEM-Zellen als Doppelstrang lässt sich für diesen konkreten Anwendungsfall hinsichtlich des zu erwartenden Aufwands bei der Installation kein wesentlicher Unterschied feststellen, da beide Zellentypen als fertige Systeme erhältlich sind und die Maßnahmen zur Systemintegration jeweils ähnlich komplex ausfallen. Einzelstrangsysteme sind prinzipbedingt weniger komplex in der Einbindung, da hier nur eine Systemkomponente installiert werden muss. Herausforderungen ergeben sich hier allerdings im Betrieb und da insbesondere beim Umschalten zwischen den Betriebsmodi, wie in Kapitel III beschrieben wurde. Die notwendigen Maßnahmen zur Regelung der Anlagen gestalten sich prinzipiell bei allen Systemen ähnlich und wird deshalb an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Hinsichtlich der Flexibilität ist ebenfalls die PEM-Zelle im Vorteil zu sehen. Neben schnellen Laständerungen ist hier das wesentliche Merkmal die Kaltstartfähigkeit sowie die Möglichkeit eines schnellen Ausschaltens. Für die SO-Zellen stellen beide Vorgänge eine hohe thermische Belastung dar, welche im schlimmsten Fall zu einer Zerstörung der Zellen führen könnte. Hier müssen ausreichend lange Zeiträume zum Vorwärmen bzw. Abkühlen der Zellen eingeplant werden, was eine flexible Anwendung deutlich erschwert. Die Alternative wäre, wie bereits erwähnt, ein Betrieb im Standby-Modus auf

Betriebstemperatur, was einen erheblichen Energieeinsatz und somit Einbußen in der Wirtschaftlichkeit zur Folge hätte.

Einzig beim derzeitigen Entwicklungsstand lässt sich ein deutlicher Vorteil der SO-Zellen feststellen. In aktuellen industriellen Großprojekten kommen nahezu ausschließlich SO-Zellen zum Einsatz, welche einen höheren Wirkungsgrad als PEM-Zellen aufweisen [11], [13], [18]. SO-Doppelstrang-Systeme sind nach dem Kenntnisstand der Autoren bisher noch nicht zum Einsatz gekommen, da es für deren Betrieb noch keine sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten gibt. Grundsätzlich ist die Technik aber sehr weit entwickelt und bekannt. Ähnliches, jedoch mit der Einschränkung eines generell noch ausgeprägteren Forschungsbedarfs der PEM-Technologie, gilt für das PEM-Doppelstrang-System. Da hier im Wesentlichen zwei PEM-Systeme eingesetzt werden, welche für sich bereits bis zur Marktreife entwickelt wurden, ist ein Forschungsbedarf vor allem in Hinsicht auf die PEM-Technologie allgemein zu sehen. Anders verhält es sich beim PEM-Einzelstrang-System. Wie in [19] gezeigt wurde, sind die Herausforderungen bei der Entwicklung von funktionsfähigen URFCs nach wie vor beträchtlich. Hier könnte durch geeignete Anwendungsmöglichkeiten, von denen es grundsätzlich viele gibt, eine Weiterentwicklung angestoßen werden.

Als Schlussfolgerung aus dem Vergleich der Technologien wurde für das geplante Forschungsvorhaben das PEM-Doppelstrangsystem ausgewählt. Die bei den Ladevorgängen von Elektrobussen auftretenden Lastspitzen können durch ein PEM-Doppelstrangsystem gut abgedämpft werden. Ebenso kann überschüssige Energie aus dem Stromnetz aufgenommen und für die Erzeugung von Wasserstoff verwendet werden. Als Hauptbestandteil des Forschungsprojekts ergibt sich, auch in Hinsicht der Notwendigkeit von Einsatzmöglichkeiten für die Weiterentwicklung von URFC, die systemtechnische Implementierung von PEM-Zellen in ein UBES und dessen Anbindung an die Leitwarten der Versorgungsnetze.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurden die grundlegenden Funktionsweisen unterschiedlicher Brennstoffzellen- und Elektrolysesysteme vorgestellt und deren Vor- und Nachteile hinsichtlich eines Einsatzes in der Notstromversorgung eines Elektrobusbetriebshofs erörtert. Es zeigt sich, dass derzeit PEM-Doppelstrang-Systeme am ehesten für einen derartigen Einsatz in Frage kommen. Eine Weiterentwicklung der URFC-Technologie könnte in der Zukunft für Kosten- und Materialeinsparung sorgen, setzt jedoch vielversprechende Anwendungsfälle für diese Technologie voraus. Zur Untersuchung eines solchen Anwendungsfalles und zur Entwicklung der notwendigen Schnittstellen und Systeminfrastrukturen wird das geplante Forschungsprojekt eine Anwendung von UBES in der Notstromversorgung demonstrieren.

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), "Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende - Energie der Zukunft", Berlin, 2018

- [2] 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
- [3] R. van Basshuysen, "Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb: Wege zur klimaneutralen Mobilität", Springer Wiesbaden, 2015
- [4] Karlsruher Institut für Technologie (KIT), "HELMETH – Power-to-SNG mit hohem Wirkungsgrad", [Online]. Verfügbar: www.sek.kit.edu/downloads/2019-datenblatt-helmeth.pdf. [letzter Zugriff am 27.05.2019]
- [5] Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV), "Reversible Anlage für die Steiermark", *Wasserstoff-Spiegel*, Bd. 23, Nr. 3, S. 21
- [6] 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, 2014
- [7] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, "Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz", Technische Richtlinien, G 14, November 2007.
- [8] A. Boudghene Stambouli und E. Traversa, "Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 6, Nr. 5, S. 433-455
- [9] R. Ma, F. Gao, E. Breaz, Y. Huangfu und P. Briois, "Multidimensional Reversible Solid Oxide Fuel Cell Modeling for Embedded Applications", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, Bd. 33, Nr. 2, S. 692-701
- [10] E. Olsson, X. Aparicio-Anglès und N. H. de Leeuw, "Ab initio study of vacancy formation in cubic LaMnO₃ and SmCoO₃ as cathode materials in solid oxide fuel cells", *J. Chem. Phys.*, Bd. 145, Beitrag 199901
- [11] J. Kupecki, "Modeling, Design, Construction, and Operation of Power Generators with Solid Oxide Fuel Cells," Springer International, 2018
- [12] G. Schiller, A. Ansar, M. Lang und O. Patz, "High temperature water electrolysis using metal supported solid oxide electrolyser cells (SOEC)", *J Appl Electrochem*, Bd. 39, Nr. 2, S. 293-301
- [13] D. A. Osinkina, N. M. Bogdanovicha, S. M. Beresneva, E. Yu. Pikalovaa, D. I. Bronina und Yu. P. Zaikova, "Reversible Solid Oxide Fuel Cell for Power Accumulation and Generation", *Russian Journal of Electrochemistry*, Bd. 54, Nr. 8, S. 740-746
- [14] B. Chen, H. Xu und M. Ni, "Modelling of SOEC-FT reactor: Pressure effects on methanation process", *Applied Energy*, Bd. 185, Nr. 1, S. 814-824
- [15] V. Mehta und J. S. Cooper, "Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing", *Journal of Power Sources*, Bd. 114, Nr. 1, S. 32-53
- [16] H. R. Litkahi, A. Bahari und R. Ojani, "Synthesis of Pt-Ni-Fe/CNT/CP nanocomposite as an electrocatalytic electrode for PEM fuel cell cathode", *J Nanopart Res*, Bd. 19, Nr. 8, Beitrag. 278
- [17] G. Aragón-González, A. León-Galicia, R. González-Huerta, J. M. Rivera Camacho und M. Uribe-Salazar, "Hydrogen production by a PEM electrolyser", *Journal of Physics: Conference Series*, Bd. 582, Beitrag 012054
- [18] C. Lamy, "From hydrogen production by water electrolysis to its utilization in a PEM fuel cell or in a SO fuel cell: Some considerations on the energy efficiencies", *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 41, Nr. 34, S. 15415-15425
- [19] P. Kühne, M. Wenske, M. Heuer und M. Wolter, "Unitized reversible PEM fuel cells for flexible electrical energy storage," in *International ETG Congress*, 28-29.11.2017, Bonn