

SOFC-Systemlösungen für Wohngebäude

C. HESCHL, P. KLANATSKY, F. WENIG
Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria
M. PEINSIPP
Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: Due to the high operating temperature of the Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) various fuels (natural gas, biogas, hydrogen, methanol, SNG, BtL etc.) could be used. However, the lifecycle of fuel cells essentially depends on their respective heating rate in the start-up and shut-down cycle. High heating rates cause high thermal stresses in the stacks, which lead to high degradation rates. Therefore, SOFC-systems react slowly and cannot meet fast changes in power demand. Hence, an efficient, decentral integration of SOFC-systems requires an optimized overall system configuration with short time storage units which can avoid fast load changes and enhance the demand side flexibility.

For developing of such optimized system configuration, the energy demands of residential buildings were investigated. For that purpose, high-resolution thermal and electrical load profiles were generated for multi-family houses with the simulation tool synPRO and were analyzed with the post-processing tool Matlab. In addition, a CFD-stack model was used to identify the influence of the kinetics of the chemical reactions and the electrochemical losses on the temperature distribution in the stack. The results were used to derive a numerically efficient white-box-model. Based on this white-box-model, different SOFC-system concepts were characterized and the waste heat utilizations on different temperature levels were analyzed.

The results show that SOFC-systems with short time storages can adapt to the electricity and heat demands very well. The use of the electricity grid on district basis allows realizing load balance potentials and decentralized waste heat potentials. Hence, heat distribution losses can be minimized which leads to an efficient energy supply system.

1. EINLEITUNG

Brennstoffzellen setzen die chemisch gebundene Energie des Brennstoffes direkt in Elektrizität um. Der Umweg über die Wärmeerzeugung und die Nutzung der Volumenänderungsarbeit kann somit umgangen werden. Im Gegensatz zu den Wärmekraftmaschinen ist der theoretische Wirkungsgrad der Brennstoffzelle somit nicht durch den Carnot-Wirkungsgrad limitiert, sodass deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade im Vergleich zu gasmotorbetriebenen BHKW-Systemen erreicht werden können. Für stationäre Anwendungen konzentrieren sich die Entwicklungen verstärkt auf die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellensysteme (PEMFC) und auf die Festoxid-Brennstoffzellensysteme (SOFC). Im Gegensatz zur PEMFC können SOFC-Systeme kohlenwasserstoffbasierte Brennstoffe direkt umsetzen und bieten somit eine höhere Brennstoffflexibilität. Die kommerzielle Marktdurchdringung erfordert jedoch eine optimierte Systemkonfiguration, um die thermischen und elektrischen Lastanforderungen möglichst gut abdecken zu können. Insbesondere sind dazu folgende Anforderungen zu beachten:

An-/Abfahrzyklen und Lebensdauer

SOFC-Brennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen von 650 – 1000 °C und erfordern daher einen möglichst konstanten Betrieb. Während des Ein- und Ausschaltvorganges treten bedingt durch die unterschiedlichen Materialpaarungen hohe thermische Dehnspannungen auf, sodass u.a. die Dichtheit der Stacks negativ beeinflusst wird. Um dieses Problem zu umgehen, sind geeignete Systemlösungen und Regelungsstrategien erforderlich, die einen möglichst langen Voll- und Teillastbetrieb ermöglichen.

Brennstoffband und Emissionen

Als Universalbrennstoff wird Wasserstoff in Brennstoffzellen eingesetzt. Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC, MCFC) erlauben aufgrund ihrer hohen Betriebstemperaturen neben dem Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff auch den Einsatz von Erdgas, Kohlegas, Methanol, Benzin, Flüssiggas usw. Die dazu notwendige Reformierung des Brennstoffes kann dazu extern oder auch intern erfolgen. Emissionen wie NO_x, SO_x und Partikel treten beim Brennstoffzellenbetrieb im Gegensatz zu motorischen Blockheizkraftwerken praktisch nicht auf. Auch die im urbanen Bereich (Industrie benachbart von Wohngebäuden) sensiblen Schallemissionen können durch den Einsatz von Brennstoffzellen verringert werden.

Zeitliche Kohärenz von Wärme- und Strombedarf für Wohngebäude

Im Gebäudeenergiesektor ist die Kohärenz des Wärme- und Strombedarfs nicht zu jedem Zeitpunkt identisch gegeben. Während in den Wintermonaten der Wärmebedarf den Strombedarf deutlich übersteigt, zeigt sich im Sommer eher das gegenteilige Szenario. Der Wärmebedarf zur Hausenergieversorgung setzt sich aus dem Raumwärmebedarf und Wärmebedarf für die Brauchwasserbereitung zusammen. Der Gesamtwärmebedarf im Wohnbau wird daher stark vom Nutzerverhalten und vom Gebäudebestand beeinflusst. Die Ableitung einer optimalen Betriebsweise erfordert somit eine detaillierte thermische und elektrische Lastanalyse von einzelnen Wohneinheiten und Gebäudeverbänden unter Berücksichtigung des individuellen Nutzerverhaltens. Erst dadurch kann eine sinnvolle Einbindung von SOFC-Konzepten analysiert und optimierte Gesamtsystemlösungen abgeleitet werden.

Temperaturniveau der Abwärme bzw. sinnvolle exergetische Verwertung

SOFC-Brennstoffzellen liefern Abwärme im Hochtemperaturbereich von bis zu 700 °C. Verglichen mit alternativen Technologien wie dem Gasmotor ist dieses Niveau wesentlich höher. Aus exergetischer Sicht betrachtet, erscheint es nicht sinnvoll mit dieser Wärme „nur“ Raumwärme mit niedrigem Temperaturniveau zu erzeugen. Vielmehr eignet sich dieses Temperaturniveau zur Erzeugung von Prozesswärme oder Prozessdampf mit hoher exergetischer Wertigkeit (Krankenhäuser, Lebensmittel- und pharmazeutische Produktionsbetriebe, Wäschereien, etc.).

Der effiziente Einsatz von SOFC-Systemen setzt somit eine geringe Anzahl an An- und Abfahrzyklen sowie eine optimale Nieder- und Hochtemperatur-Wärmeauskopplung für die Wärmeversorgung voraus. Dazu ist eine Anpassung des SOFC-Systems an die jeweiligen Anwendungsfelder erforderlich. Aus diesem Grund werden zunächst die verbraucherseitigen Anforderungen des Wohnbaus analysiert und der konzeptionelle Aufbau von SOFC-Systemen vorgestellt. Ausgehend von den damit verbundenen verfahrenstechnischen Teilprozessen werden die zur Analyse erforderlichen thermodynamischen Grundlagen abgeleitet und das für die Optimierungsstudien entwickelte Simulationsmodell beschrieben. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der mit den Simulationsmodellen erzielten Ergebnisse in Form einer Gegenüberstellung der erzielbaren Abwärmenutzungspotenziale.

2. VERBRAUCHERSEITIGE ANFORDERUNGEN

Um das Abwärmenutzungspotenzial eines SOFC-Systems analysieren zu können, sind genaue Informationen über den elektrischen Energie- und Wärmebedarf der einzelnen Verbraucherkategorien erforderlich. In diesem Abschnitt werden daher die elektrischen und thermischen Lastprofile von unterschiedlichen Wohnbauten analysiert.

Die für Wohnbauten herangezogenen Lastprofile wurden mit Hilfe der Software synPRO (vgl. Fischer et al., 2015 und Fischer et al., 2016) generiert und mit modellbasierten Analysealgorithmen ausgewertet. Die Simulationsdaten liefern zeitlich hoch aufgelöste Lastprofile für die Energie zur Brauchwassererwärmung, die Heizenergie und die elektrische Energie. Die Lastprofile wurden für ein Einfamilienhaus mit einer Wohneinheit, ein Mehrfamilienhaus mit 20 Wohneinheiten, fünf Mehrfamilienhäuser mit jeweils 9 Wohneinheiten, fünf Mehrfamilienhäuser mit jeweils 40 Wohneinheiten und sechs Doppelhaushälften

mit jeweils 2 Wohneinheiten erzeugt und analysiert. In Tab. 1 sind die untersuchten Gebäudevarianten zusammengefasst.

Tab. 1: Zusammenfassung der untersuchten Gebäudevarianten.

Gebäudetyp	Anzahl der Gebäude	Anzahl der Wohneinheiten pro Gebäude	Heizwärmebedarf [kWh/m ² a]
Einfamilienhaus	1	1	53,6
Mehrfamilienhaus	1	20	41,9
Mehrfamilienhaus	5	9	27,0 bis 39,0
Mehrfamilienhaus	5	40	22,1 bis 38,6
Doppelhaushälfte	6	2	19,0 bis 34,7

Die Datenanalyse der einzelnen Gebäude umfasst die Auswertung der Energiebedarfsverteilung pro Jahr, den stündlichen Anteil an Warmwasserwärmebedarf und elektrischen Energiebedarf gemittelt über das gesamte Kalenderjahr, den stündlichen Anteil an Warmwasserwärmebedarf und elektrischen Energiebedarf gemittelt über die einzelnen Monate sowie die Häufigkeitsverteilung des Verhältnisses zwischen elektrischer und thermischer Energie. Darüber hinaus wurden auch Histogramme zur Beurteilung des benötigten Strom-Wärme-Verhältnisses erzeugt. Dieses Verhältnis ist in Bezug auf die erforderliche Stromkennzahl des SOFC-Systems von besonderer Bedeutung. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass durch die Verwendung von Speichern und des elektrischen Netzes Lastverschiebungspotenziale genutzt und die Betriebsbedingungen optimiert werden können. Zur Verdeutlichung sind in Abb. 1 und Abb. 2 die Häufigkeitsverteilungen des Strom-Wärme-Verhältnisses eines Mehrfamilienhauses mit 40 Wohneinheiten und 78 Bewohnern dargestellt. Die Lastprofile wurden mit dem Simulationsprogramm synPRO ohne Berücksichtigung eines Speichers mit einer Zeitschrittweite von einer Minute ermittelt. Der Warmwasser-

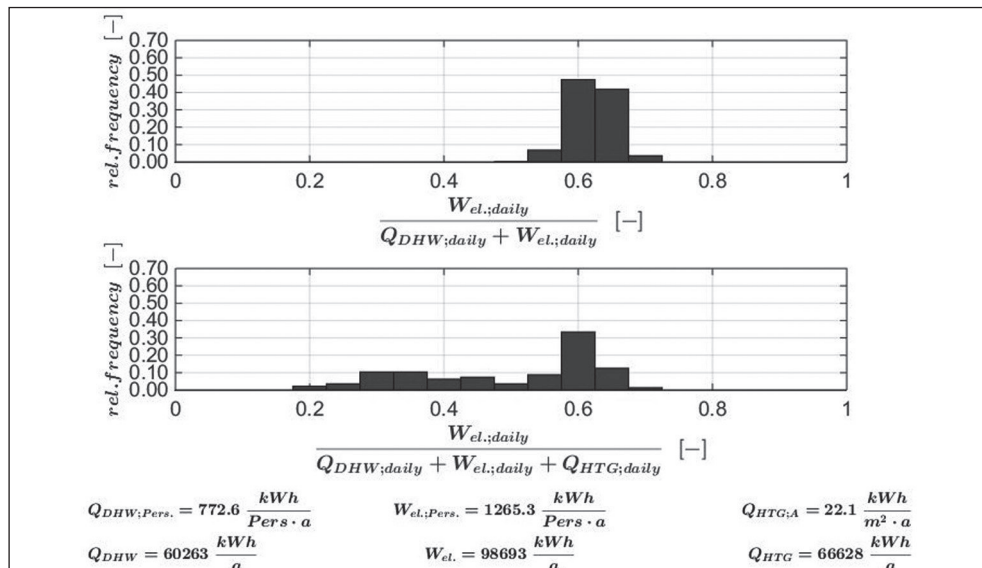


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung des Strom-Wärme-Verhältnisses für ein Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten und 78 Bewohnern und einer Mittelungszeit der Lastprofile von 24 Stunden.

wärmebedarf betrug $Q_{DHW} = 60.263 \text{ kWh/a}$, der elektrische Energiebedarf $W_{el} = 98.693 \text{ kWh/a}$ und der Heizwärmebedarf $Q_{HTG} = 66.628 \text{ kWh/a}$. Die Abb. 1 zeigt die Auswertung der 24-Stundenmittelwerte und Abb. 2 die Auswertung der 1-Stundenmittelwerte. Aufgrund des geringen Einflusses der Jahreszeit auf den Warmwasserwärmebedarf (DHW) ist der Schwankungsbereich des Strom-Wärme-Verhältnisses bei Berücksichtigung des Heizwärmebedarfs (HTG) deutlich größer.

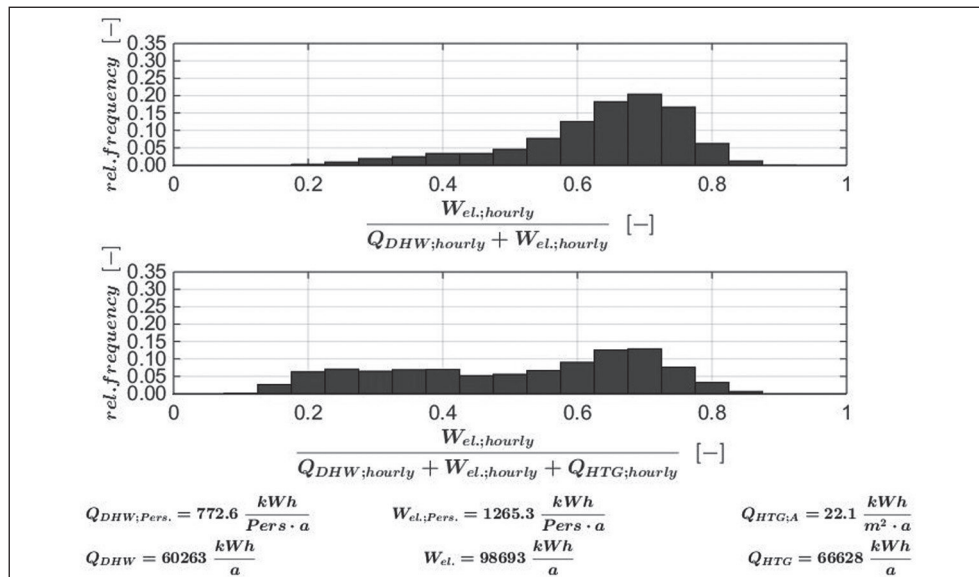


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung des Strom-Wärme-Verhältnisses für ein Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten und 78 Bewohnern und einer Mittelungszeit der Lastprofile von einer Stunde.

Darüber hinaus zeigen die Abb. 1 und Abb. 2, dass die Mittelungszeit einen wesentlichen Einfluss auf das Strom-Wärme-Verhältnis hat. Werden größere Speicher eingesetzt, wird der Wertebereich für das Strom-Wärme-Verhältnis kleiner und BHKW-Systeme mit konstanten Stromkennzahlen können effizienter eingesetzt werden. Die Integration eines Wärmespeichers zur Lastverschiebung des Warmwasserwärmebedarfs ist auch in Hinblick auf das Kosten-Nutzenverhältnis besonders interessant. Die Nutzung der Abwärme für die Warmwasserbereitung hätte zudem einen weiteren Vorteil. Aufgrund der hohen Kathoden-Luftüberschusszahl ist die Kondensationstemperatur im Abgas sehr gering. Die Nutzung der Kondensationswärme setzt daher ein geringes Temperaturniveau voraus. Dieses geringe Temperaturniveau kann durch ein geeignetes Wärmetauschermodul zur Warmwasserbereitung erreicht werden.

3. SOFC-SYSTEMANALYSE

3.1 PRINZIPIELLER AUFBAU

Werden SOFC-Anlagen mit kohlenwasserstoffhaltigen Energieträgern betrieben, wird in der Regel der Brennstoff zunächst reformiert und das Reformat der Brennstoffzelle zugeführt. In Abhängigkeit des gewählten Reformierungsverfahrens muss dabei Wärme zu- oder abgeführt werden. Bei der elektrochemischen Umsetzung des Reformats in der Zelle selbst ist zu beachten, dass mit zunehmendem Umsetzungsgrad die Zellenspannung sinkt. Aus diesem Grund erfolgt keine vollständige Umsetzung des Reformats im Brennstoffzellenstack. Um dennoch die restliche chemisch gebundene Energie nutzbar zu machen, wird eine Nachverbrennung durchgeführt. Die elektrochemische Oxidation im Stack und die Nachverbrennung

laufen dabei bei hohen Temperaturen ab, sodass prinzipiell die freiwerdende thermische Energie für den Reformierungsprozess bereitgestellt werden kann. Abb. 3 zeigt eine Übersicht der wesentlichen Verfahrensschritte und der dabei auftretenden Stoff- und Energieströme.

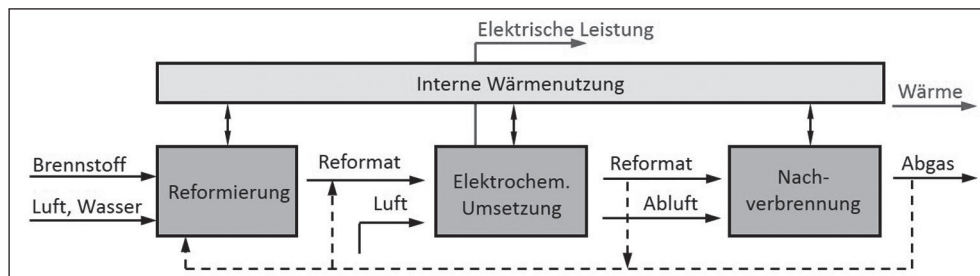


Abb. 3: Stoff- und Energieströme eines SOFC-Systems nach Heschl et al. (2017).

3.2 THERMODYNAMISCHE MODELLIERUNG EINES SOFC-SYSTEMS

3.2.1 Reformiermodellierung

Die thermodynamischen Zustandsänderungen im Reformer sowie in der Brennstoffzelle selbst laufen in der Regel bei konstantem Druck und bei konstanter Temperatur ab. Durch die Verwendung von Katalysatoren wird zudem das chemische Gleichgewicht rasch erreicht, sodass die Reaktionskinetik für die Gesamtsystemsimulation eine untergeordnete Rolle spielt. Die Entwicklung von Simulationsmodellen für den Reformer und der Brennstoffzelle wurde daher auf Basis der chemischen Gleichgewichtsthermodynamik abgeleitet. Die dazu notwendigen Stoffdaten wurden mit Hilfe der NIST-JANAF Stoffdatenbank (Chase, 1998) ermittelt. Nähere Informationen zur verwendeten Reformiermodellierung sind in Heschl et al. (2017) enthalten.

3.2.2 Modellierung des SOFC-Stacks

Beim White-Box-Modell erfolgt die Modellierung des SOFC-Stacks mit Hilfe einer stationären Stoffstrom- und Energiebilanz über dem gesamten Stack. Das dabei verwendete Bilanzgebiet ist in Abb. 4 dargestellt. Neben den ein- und austretenden Stoffströmen werden Wärmeverluste und die abgegebene elektrische Leistung berücksichtigt. Die Bilanzierung erfolgt skaliert für eine Zelle. Dabei wird eine homogene Massenstromverteilung im Anoden- und Kathodenkanal angenommen.

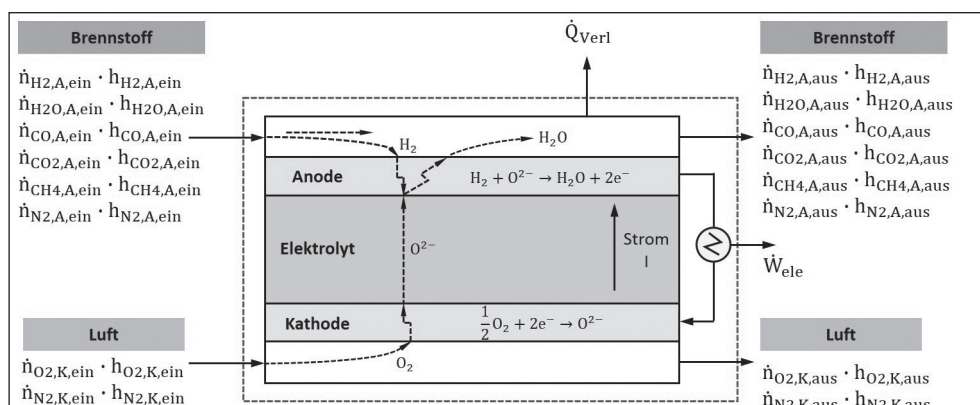


Abb. 4: Stoff- und Energiebilanz der SOFC-Zelle (Heschl et al., 2017)

Die anodenseitige Gaszusammensetzung am Eintritt ist durch den Reformier und ggf. durch die Anodenabgasrückführung vorgegeben.

Für die kathodenseitig eingeleitete Luft werden die Stoffmengenanteile mit 21 % Sauerstoff und 79 % Stickstoff vorgegeben. Mit Hilfe von CFD-Simulationen konnte gezeigt werden, dass aufgrund der guten Wärmeleitung der Interkonnektoren sowie der Manifolds die Lufttemperatur am Kathodenaustritt und die Gastemperatur am Anodenaustritt nur geringe Abweichungen aufweisen. Innerhalb des White-Box-Modells wurde daher angenommen, dass beide Temperaturen übereinstimmen. Die Regelung der Kathodenluftmenge erfolgte über die Vorgabe der Luftüberschusszahl und die Regelung der Kathodenlufteintrittstemperatur über die Stackaustrittstemperatur. Die Vorgabe der Anodeneintrittstemperatur ergibt sich aus der Mindesttemperatur zur Vermeidung der Bildung von festem Kohlenstoff. Die elektrischen Verluste wurden messtechnisch vom Hersteller ermittelt und in Form einer temperaturabhängigen Fit-Funktion zur Verfügung gestellt. Innerhalb des Stacks entstehen aufgrund der chemischen Reaktionen, der elektrischen Widerstände und der Wärmeverluste Temperaturgradienten. Für die richtige Anwendung der temperaturabhängigen ASR-Werte (Area Specific Resistance) ist daher eine Information über den Temperaturverlauf innerhalb des Stacks erforderlich.

Tab. 2: Abweichungen des White-Box-Modells gegenüber der gemessenen Stack-Leistung.

Versuchsreihe	Betriebsstunden	Last	Abweichung
	h	%	%
V01	863	100	-2,3
V02	2.351	100	0,3
V03	5.270	50	1,7
V04	7.360	90	-1,4
V05	15.568	100	-2,4
V06	15.664	75	-0,1
V07	15.760	50	1,0

Aufgrund der bereits erwähnten Wärmeleiteigenschaften stimmt die Festkörpertemperatur nur am Austritt gut mit der Anoden- und Kathodengastemperatur überein. Für den Eintrittsbereich ist daher eine Extrapolation der Temperatur für die Bestimmung des ASR-Wertes erforderlich. Die Entwicklung dieser Näherungsgleichung erfolgte mit Hilfe einer umfangreichen CFD-Parameterstudie. Für die Berücksichtigung der Degradation wurden Feldversuchsdaten ausgewertet, eine lineare Widerstandsfunktion in Abhängigkeit der Betriebsstunden ermittelt und in das Stack-Modell integriert. Die Schließung des Gleichungssystems erfolgte mit Hilfe der thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen und die numerische Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems mit Hilfe des Engineering Equation Solvers. Die Berücksichtigung der Degradation erfolgte über eine experimentelle Ermittlung der zeitlichen Änderung des ASR-Wertes. In der Tab. 2 sind die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen elektrischen Leistungen für unterschiedliche Lastfälle und Betriebsstunden zusammengefasst.

3.2.3 Modellierung des Gesamtsystems

Für die Gesamtsystemsimulation wurde ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem die in Abb. 5 dargestellte Systemkonfiguration analysiert werden kann. Durch die Einbindung von Regulierventilen kann das Anodenabgasrezirkulationsverhältnis individuell eingestellt werden. Zudem kann der externe Reformier sowohl adiabatisch als auch nichtadiabatisch betrieben werden. Somit können alle relevanten Systemvarianten abgebildet und studiert werden. Die Umsetzung des SOFC-Simulationsmodells erfolgte in der Programmier-

umgebung EES (Engineering Equation Solver). Weitere Details zu den Berechnungsgrundlagen sind in Heschl et al. (2017) enthalten.

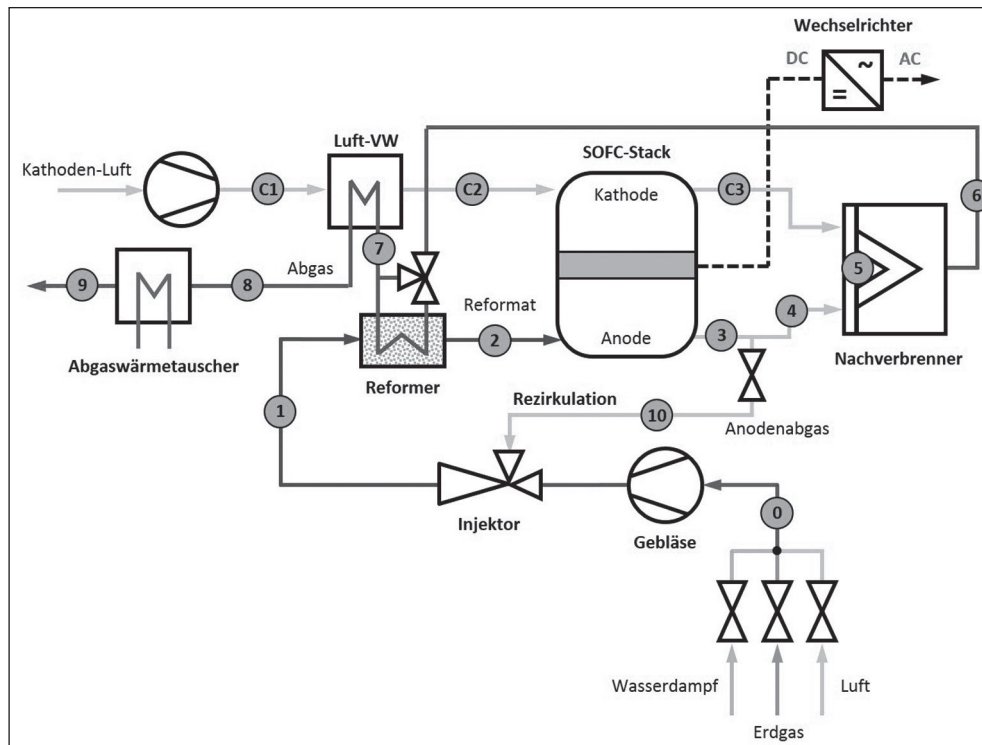


Abb. 5: Schaltbild des analysierten SOFC-Systems (Heschl et al., 2017)

Folgende Vereinfachungen wurden bei der Entwicklung des Simulationsmodells getroffen:

- Ideales Gasverhalten wird für die Kathodenluft, das Anodengas, das Brenngas und das Abgas vorausgesetzt.
- Das System ist ideal wärmedämmt und hat keine Wärmeverluste.
- Druckverluste werden im System vernachlässigt.
- Der Energieaufwand für Gebläse, Injektor, Nachbrenner usw. werden durch den Eigenverbrauchswirkungsgrad berücksichtigt.
- Der Stack wird über ein White-Box-Modell beschrieben.
- Die Temperatur des Anodengases (3) und des Kathodengases (C3) sind am Austritt des Stacks identisch.

3.3 SOFC-SYSTEMANALYSEN ZUR BEWERTUNG DES ABWÄRMENUTZUNGSPOTENZIALS

Die Stromkennzahl eines SOFC-Systems hängt wesentlich vom gewählten Reformierungsverfahren ab. Somit kann die Anpassung an die verbraucherseitige Lastverteilung auch über das Brennstoffaufbereitungsverfahren erfolgen. Mit der partiellen Oxidation (POX) werden elektrische Wirkungsgrade bis ca. 35 % erreicht. Grund für die geringe Stromproduktion ist der mit der Oxidation verbundene Exergieverlust. Wird Wasserdampf zur Reformierung verwendet, kann der elektrische Wirkungsgrad auf bis ca. 65 % erhöht werden. In diesem Zusammenhang ist die Nutzung des Anodenabgases zur Methan-Reformierung

besonders interessant (Anoden Off-gas Recirculation AOGR). Dabei werden das Kohlenmonoxid und der Wasserdampf im Anodenabgas zur Reformierung genutzt. Eine zusätzliche Anlage zur Wasserdampfbereitstellung ist somit nicht notwendig.

Die beiden Systemvarianten POX und AOGR können weite Bereiche des elektrischen Wirkungsgrades abdecken. Für die Beurteilung des Abwärmenutzungspotenzials werden daher die beiden Systemvarianten „Partielle Oxidation“ und „Anodenabgas-Rückführung“ mittels numerischer Simulationen näher analysiert. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Eigenverbrauchswirkungsgrad: 92 %
- Wirkungsgrad des Wechselrichters: 97 %
- Kathodenluft- und Brennstoffeintrittstemperatur: 25 °C
- Betriebsdruck: 1 bar (absolut)
- Abgastemperatur nach dem Abgaswärmetauscher: $T_9 = 25$ °C
- Reformer-Austrittstemperatur: 750 °C
- Die Regelung der Kathodenluftvorwärmung erfolgt über die Stack-Austrittstemperatur. Der Sollwert für die Stack-Austrittstemperatur wird dabei mit 850 °C vorgegeben.

Innerhalb der durchgeführten Systemsimulationen wurden die Luftüberschusszahl λ_{FC} und der Umsetzungsgrad der Brennstoffzelle variiert. Der Umsetzungsgrad U wurde dabei wie folgt definiert:

$$U = \frac{(4 \dot{n}_{CH_4} + \dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{Eintritt} - (4 \dot{n}_{CH_4} + \dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{Austritt}}{(4 \dot{n}_{CH_4} + \dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{Eintritt}} \quad (1)$$

Für den Systemvergleich wurden die energetischen Kennzahlen η_{el} und ψ gemäß Gleichung (2) und Gleichung (3) ermittelt.

$$\eta_{el} = \frac{W_{ele, Nutz}}{\dot{m}_{Br} H_u} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{W_{ele, Nutz}}{W_{ele, Nutz} + Q_{Nutz}} \quad (3)$$

In Tab. 3 sind die ermittelten Systemkennzahlen in Abhängigkeit des ASR-Wertes, des Umsetzungsgrades U und der Stack-Luftüberschusszahl λ_{FC} für das SOFC-System mit POX-Reformer zusammengefasst. Die Luftüberschusszahl des adiabaten Reformers betrug ca. $\lambda_{POX} = 0,332$. Nach Heschl et al. (2017) ist bei einer Reformertemperatur von 750 °C eine minimale Luftüberschusszahl von $\lambda_{POX} = 0,28$ erforderlich, um die Bildung von festem Kohlenstoff zu vermeiden. Die elektrischen Wirkungsgrade liegen bei $\lambda_{POX} = 0,332$ zwischen 37 und 42 %, wobei die höchsten elektrischen Wirkungsgrade bei geringeren ASR-Werten und hohen Umsetzungsgraden realisiert werden können. Weiterführende Simulationen haben gezeigt, dass durch die Reduktion der Luftüberschusszahl auf $\lambda_{POX} = 0,28$ der elektrische Wirkungsgrad um ca. 3 % erhöht werden kann. Der Einfluss der Luftüberschusszahl λ_{FC} auf den elektrischen Wirkungsgrad ist hingegen gering und kann aufgrund der als konstant angenommenen ASR-Werte nicht näher spezifiziert werden. Die Luftüberschusszahl λ_{FC} hat jedoch einen wesentlichen Einfluss auf das Temperaturniveau vor dem Abgaswärmetauscher T_8 . Das Temperaturniveau wird durch die Reduktion der Luftüberschusszahl von 4 auf 3 um 118,4 K bis 134,4 K vermindert und damit der Exergieanteil der nutzbaren Abwärme deutlich reduziert. Die Reduktion der Luftüberschusszahl erhöht zudem die Kondensationstemperatur T_9 des Abgases um ca. 5 K, sodass die Kondensationswärme besser genutzt werden kann. Die praktische Realisierung einer geringeren Luftüberschusszahl hängt jedoch von der Temperaturentwicklung entlang des Stacks ab. Die ohmschen Verluste und die elektrochemischen Reaktionen führen zu einer Wärmeproduktion, die wiederum zu großen Temperaturgradienten im Stack führen können. Durch eine interne Reformierung können diese Gradienten reduziert werden, indem die benötigte Dampfreformierungsenergie zur Anodenraumkühlung genutzt wird.

Tab. 3: Berechnete Kennzahlen der SOFC-Systeme ($T_2 = 750 \text{ }^\circ\text{C}$).

SOFC-System	ASR	U	λ_{FC}	η_{el}	ψ	$T_8 \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{9s} \text{ (}^\circ\text{C)}$
POX-Reformierung	0,5	0,75	3	0,42	0,39	658,8	42,9
POX-Reformierung	0,5	0,75	4	0,42	0,39	532,8	38,3
POX-Reformierung	0,5	0,85	3	0,46	0,43	618,0	42,9
POX-Reformierung	0,5	0,85	4	0,46	0,43	499,6	38,3
POX-Reformierung	1,0	0,85	3	0,40	0,37	677,1	42,9
POX-Reformierung	1,0	0,85	4	0,40	0,37	547,6	38,3
AOGR-Reformierung	0,5	0,75	3	0,64	0,61	317,8	36,5
AOGR-Reformierung	0,5	0,75	4	0,64	0,61	248,6	31,5
AOGR-Reformierung	0,5	0,85	3	0,66	0,64	310,8	37,3
AOGR-Reformierung	0,5	0,85	4	0,66	0,64	243,2	32,2
AOGR-Reformierung	1,0	0,85	3	0,51	0,49	429,5	37,3
AOGR-Reformierung	1,0	0,85	4	0,51	0,49	335,1	32,2

Die Simulationsergebnisse für ein SOFC-System mit Anodenabgas-Rezirkulation (AOGR) sind im unteren Teil der Tab. 3 dargestellt. Bei allen Parametervariationen betrug das Verhältnis zwischen dem Anodenabgasvolumenstrom und dem Rezirkulationsvolumenstrom 0,4. Im Vergleich zur POX-Reformierung wird ein wesentlich höherer elektrischer Wirkungsgrad erreicht. Dieser liegt zwischen 51 und 66 %. Folglich reduziert sich die Abgastemperatur T_8 gegenüber dem POX-System deutlich. Die Reduktion der Luftüberschusszahl λ_{FC} von 4 auf 3 bewirkt eine geringere Temperaturreduktion. Diese liegt bei den simulierten AOGR-Systemen zwischen 67,6 K bis 94,4 K. Die Erhöhung der Luftüberschusszahl von 3 auf 4 führt zu einer Reduktion der Kondensationstemperatur im Abgas um ca. 5 K.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass SOFC-Systeme in Kombination mit Kurzzeitspeichern aufgrund ihrer flexiblen Konfigurationsmöglichkeiten an die individuellen Strom- und Wärmebedürfnisse angepasst werden können. Die Nutzung des elektrischen Netzes auf Distriktebene ermöglicht zudem Lastausgleichspotenziale zu realisieren und gleichzeitig dezentrale Abwärmenutzungspotenziale zu verwirklichen. Dadurch können die thermischen Verteilverluste minimiert und eine effiziente und resiliente Energieversorgung erzielt werden.

DANKSAGUNG

Die Untersuchungen wurden durch das Programm „Stadt der Zukunft“ im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (FFG Projektnummer 850052) gefördert.

LITERATUR

- Chase M.W. (1998) NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, ISBN 1-56396-831-3
- Fischer D., Härtl A., Wille-Haussmann B. (2015) Model for electric load profiles with high time resolution for German households. Energy and Buildings

- Fischer D., Wolf T., Scherer J., Wille-Haussmann B. (2016) A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hotwater load profiles for German household. *Energy and Buildings*
- Heddrich P. (2012) Thermodynamische Analyse von SOFC-Systemkonzepten und experimentelle Validierung. Dissertation an der Technischen Universität Clausthal
- Heschl C., Terkovic E., Peinsipp M., Zach F. (2017): SOFC-Abwärmenutzung für Gebäude und Industrie. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Projektbericht im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Kontakt Daten Autor:

Christian Heschl

Steinamangerstraße 21

7423 Pinkafeld

E-Mail: christian.heschl@fh-burgenland.at