

SOFC-Abwärmenutzung für Gebäude und Industrie

SOFC4City

C. Heschl, E. Terkovics,
M. Peinsipp, F. Zach

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

21/2019

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

SOFC-Abwärmenutzung für Gebäude und Industrie

SOFC4City

Christian Heschl
Fachhochschule Burgenland GmbH

Erich Terkovics, Michael Peinsipp
Forschung Burgenland GmbH

Franz Zach
Österreichische Energieagentur

Eisenstadt, Wien, August 2017

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Nomenklaturliste.....	8
Kurzfassung	10
Abstract.....	12
1 Einleitung und Aufgabenstellung	14
2 Ergebnisse	16
2.1 Verbraucherseitige Anforderungen	16
2.1.1 Anforderungen der Wohngebäude.....	16
2.1.2 Anforderungen seitens Industrie und Gewerbe.....	19
2.2 SOFC-Systemkonzepte	21
2.2.1 Prinzipieller Aufbau eines SOFC-Systems.....	21
2.2.2 Verfahrensprinzipien zur Reformierung	22
2.2.3 Dampfreformierung (Steam Reforming – SR).....	22
2.2.4 SOFC-Anlagensysteme.....	24
2.3 Thermodynamische Modellierung eines SOFC-Systems	30
2.3.1 Thermodynamische Grundlagen	30
2.3.2 Reformiermodell.....	36
2.3.3 SOFC-Stackmodellierung.....	40
2.3.4 SOFC-Systemsimulation	50
2.4 SOFC-Systemanalysen zur Abwärmenutzung	51
2.5 Rechtliche Rahmenbedingungen in der EU	56
2.5.1 Wichtige EU-Verordnungen und Richtlinien.....	56
2.5.2 Umsetzung von EU-Richtlinien in Österreich	67
2.5.3 Österreichische Bundes- und Ländergesetze, Richtlinien und Normen	74
2.6 Wirtschaftlichkeit einer SOFC-Brennstoffzellenanlage für Stromerzeugung und Warmwasserbereitung	77
3 Schlussfolgerungen	82
4 Ausblick und Empfehlungen	82
5 Verzeichnisse	83
5.1 Abbildungsverzeichnis	83
5.2 Tabellenverzeichnis	84
5.3 Literaturverzeichnis.....	84

Nomenklaturliste

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
ASR	$\Omega \text{ cm}^2$	Area Specific Resistance
F	C/mol	Faraday-Konstante
G	J	freie Gibbs-Energie
ΔG_R	J/mol	molare Gibbs-Reaktionsenthalpie
ΔG_{WGS}^0	J/mol	Gibbs-Standard-Reaktionsenthalpie für WGS-Reaktion
ΔG_{SR}^0	J/mol	Gibbs-Standard-Reaktionsenthalpie für Dampfreformierung
H	J	Enthalpie
ΔH_B^0	J/mol	molare Standardbildungsenthalpie
ΔH_R^0	J/mol	molare Standardreaktionsenthalpie
i		Laufvariable
I	A	Stromstärke
j		Laufvariable
K		Gleichgewichtskonstante
K_j		Gleichgewichtskonstante der Reaktion j
K_{WGS}		Gleichgewichtskonstante der Wassergas-Shift-Reaktion
K_{SR}		Gleichgewichtskonstante der Dampfreformierung (SR)
n	mol	Stoffmenge
n_e		Elektronenanzahl
$\dot{n}_{i,A,x}$	mol/s	Molenstrom Brennstoffkomponente i an der Stelle x (Anode)
$\dot{n}_{i,K,x}$	mol/s	Molenstrom Luftkomponente i an der Stelle x (Kathode)
\dot{n}_{O_2}	mol/s	Molenstrom an Sauerstoff der kathodenseitig reagiert
$\dot{n}_{react,f}$	mol/s	Anodenseitig reagierender Brennstoff
$\dot{n}_{i,A,x+\Delta x}$	mol/s	Molenstrom Brennstoffkomponente i an der Stelle $x+\Delta x$ (Anode)
$\dot{n}_{i,K,x+\Delta x}$	mol/s	Molenstrom Brennstoffkomponente i an der Stelle $x+\Delta x$ (Kathode)
p	bar	Gesamtdruck
p_0	bar	Referenzdruck
$\dot{q}_{cond,IC,x}$	W/m ²	Wärmeleitung Interkonnektor an der Stelle x
$\dot{q}_{cond,IC,x+\Delta x}$	W/m ²	Wärmeleitung Interkonnektor an der Stelle $x+\Delta x$
$\dot{q}_{cond,TL,x}$	W/m ²	Wärmeleitung tri-layer an der Stelle x
$\dot{q}_{cond,TL,x+\Delta x}$	W/m ²	Wärmeleitung tri-layer an der Stelle $x+\Delta x$
$\dot{q}_{conv,s-a}$	W/m ²	konvektiver Wärmeübergang zwischen Kathodenoberfläche und Luft
$\dot{q}_{conv,s-f}$	W/m ²	konvektiver Wärmeübergang zwischen Anodenoberfläche und Brennstoff
\dot{q}_{f-a}	W/m ²	Wärmeleitung zwischen den periodischen Kanälen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$\dot{q}_{\text{rad,s-a}}$	W/m ²	Strahlungswärmeaustausch von Kathodenoberfläche zu Luft
$\dot{q}_{\text{rad,s-f}}$	W/m ²	Strahlungswärmeaustausch von Anodenoberfläche zu Brennstoff
Q	C	elektrische Ladung
\dot{Q}_{Verl}	W	Wärmeverluste
r		Anzahl an Gleichgewichtsreaktionen
$R_{\text{cell}}(T)$	Ω	ohm'sche Verluste
$R_{\text{cell,ges}}(T)$		Temperaturabhängiger Gesamtwiderstand der Zelle
R_{univ}		universelle Gaskonstante
S	J/K	Entropie
ΔS_{B}^0	J/mol K	molare Standardbildungsentropie
ΔS_{R}^0	J/mol K	molare Standardreaktionsentropie
T	K	Temperatur
U	V	Spannung / Potentialdifferenz
U		Umsetzungsgrad
U_{Cell}	V	Zellspannung
U_{N}	V	Nernstspannung
W_{ele}	J	abgegebene elektrische Arbeit
y_i		Stoffmengenanteil der Komponente i
δ	m	Schichtdicke einer Zelle
ε		Reaktionskoordinate
η_{act}		Aktivierungsverluste
η_{conc}		Konzentrationsverluste
η_{el}		elektrischer Wirkungsgrad
μ_i	J/mol	Chemisches Potential der Komponente i
μ_i^0	J/mol	Chemisches Potential der Komponente i bei Temperatur T und Referenzdruck
μ_i, pure	J/mol	Chemisches Potential einer Gaskomponente i
ν_i		stöchiometrischer Koeffizient der Komponente i
ξ		Reaktionslaufzahl
λ_{CPOX}		Verbrennungsluftverhältnis partielle katalytische Oxidation
λ_{FC}		Verbrennungsluftverhältnis Brennstoffzelle
ψ		Dimensionslose Kennzahl

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Die hohen Betriebstemperaturen der SOFC-Brennstoffzellen erlauben grundsätzlich ein breites Brennstoffband (Erdgas, Biogas, Wasserstoff, Methanol,...), sodass auch fossile Energieträger durch erneuerbare Energieträger substituiert werden können (Second Generation Biofuels z.B.: SNG, BtL). Die Lebensdauer der SOFC-Brennstoffzellen wird jedoch wesentlich von der Aufheizrate und den An- bzw. Abfahrzyklen beeinflusst. Hohe Aufheizraten verursachen in den Stacks große Wärmespannungen, die wiederum zu hohen Degradationsraten führen können. Aus diesem Grund reagieren SOFC-Systeme träge und können rasche Bedarfsanforderungen nur eingeschränkt bedienen. Eine effiziente, dezentrale Integration von SOFC-Systemen setzt daher eine ganzheitlich optimierte Systemkonfiguration – die gleichzeitig die thermischen und elektrischen Lastanforderungen möglichst gut abdecken kann – voraus.

Inhalte und Zielsetzungen

In der gegenständlichen Sondierungsstudie werden zunächst die verbraucherseitigen Anforderungen für den Wohnbau und für ausgewählte Industrien identifiziert. Neben der Entwicklung von zeitlich hochaufgelösten thermischen und elektrischen Lastprofilen einzelner Wohneinheiten werden verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion großer Lastgradienten aufgezeigt. U.a. werden dazu der Einfluss von Kurzzeitspeichern auf die Häufigkeitsverteilung des Strom-Wärmeverhältnisses untersucht und die Wirkung der elektrischen Vernetzung von mehreren Wohngebäuden auf die zeitliche Entwicklung der Lastprofile diskutiert. Unter Ausnutzung des dabei festgestellten Flexibilisierungspotenzials werden mögliche SOFC-Systemkonfigurationen in Bezug auf das erzielbare Strom-Wärmeverhältnis und das Abwärmenutzungspotenzial für Wohngebäude und ausgewählte Industrienanwendungen analysiert. Abschließend erfolgt eine fundierte Abschätzung der rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von SOFC-Systemen unter Berücksichtigung der identifizierten Abwärmenutzungspotenziale.

Methodische Vorgehensweise

Die Entwicklung der thermischen und elektrischen Lastprofile für den mehrgeschoßigen Wohnbau auf Quartiersebene erfolgte mit Hilfe der Simulationstools synPRO. Zur Datenanalyse wurde ein eigenes Postprozessingtool mit der Programmierumgebung Matlab® entwickelt. Für die SOFC-Systemsimulation wurde ein numerisch effizientes Stack- und Reformiermodell programmiert. Dazu wurden zunächst CFD-Parameterstudien zur Beurteilung der Temperaturverteilung im Stack durchgeführt. Aufgrund der langen CFD-Rechenzeiten wurde zudem ein bestehendes eindimensionales Stack-Modell weiterentwickelt und mit den Ergebnissen der CFD-Simulationen sowie mit eigenen Messungen validiert. Darauf aufbauend

wurde die Auswirkung der Reaktionskinetik und der elektrochemischen Verluste auf die Temperaturverteilung im Stack und somit die effektive nutzbare Spannung untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Ableitung eines numerisch sehr effizienten White-Box-Modells und regelungstechnischer Strategien genutzt. Basierend auf diesem White-Box-Modell wurden unterschiedliche SOFC-Systemkonzepte charakterisiert und dessen Durchführbarkeit zur Wärmeauskopplung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus analysiert. Abschließend erfolgte die Ermittlung der rechtlichen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass SOFC-Systeme in Kombination mit Kurzzeitspeichern aufgrund ihrer flexiblen Konfigurationsmöglichkeiten an die individuellen Strom- und Wärmebedürfnisse sehr gut 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.

Ausblick

Im Zuge eines konkreten Folgeprojektes fließen die erzielten Ergebnisse in die Entwicklung und Realisierung eines SOFC-Systems ein. Darüber hinaus werden die entwickelten Simulationsmodelle in der Lehre des Masterstudienganges Gebäudetechnik und Gebäudemanagement eingesetzt. Dadurch wird das Grundverständnis für eine ganzheitlich optimierte SOFC-Systemlösung auf Branchenebene verbessert und gleichzeitig das Umsetzungspotenzial erhöht.

Abstract

Starting point/Motivation

Due to the high operating temperature of the SOFC fuel cell, various fuels (natural gas, biogas, hydrogen, methanol and others) could be used and fossil fuels could be substituted by renewable energy sources (second generation biofuels, e.g. SNG, BtL).

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 stress in the stacks, which leads to high degradation rates. Therefore, SOFC-systems react slowly and cannot meet fast changes in power demand. An efficient, decentral integration of SOFC-systems requires an optimized system configuration which can fulfil thermic and electric load demands at the same time.

Contents and Objectives

In the beginning of this project, the needs of end users in residential buildings and the needs of the most important industry branches were analyzed. Apart from developing high-resolution thermic and electric load profiles of individual flats, opportunities to avoid fast load changes were evaluated. Among others, short time storages were analyzed in terms of their influence on the ratio between heat and electricity consumption. Moreover, the effect of electric integration of residential buildings was investigated. Using the resulting flexibility potential possible SOFC-systems configurations were proposed, depending on the possible electricity/heat ratio, the potential of using waste heat and the use of the building (residential, industry branch, etc.). Moreover, a detailed analysis of the legal and economic issues related to SOFC-systems was performed, taking into account possible waste heat potentials.

Methods

The thermal and electrical load profiles for multi-family houses for various living quarters were developed with a simulation tool called synPRO. A specially developed post-processing tool within Matlab® was used for data analysis. For the SOFC-systems simulation a numerically efficient stack and reformer module were developed. Therefore, CFD-parameter studies were performed to qualify the temperature distribution in the stack. Due to long processing times a one-dimensional stack model was developed and validated with the CFD-simulation results and own measurements.

Based on that, the one-dimensional 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 build a numerically very efficient white-box-

model and control strategies. Based on this white-box-model, different SOFC-system concepts were characterized and the feasibility of heat extraction on different temperature levels was analyzed. Moreover, a detailed analysis of the legal and economic issues regarding SOFC systems was carried out.

Results

The results show that SOFC-systems with short time storages can adapt to the electricity and heat demands very well because of their flexibility regarding configuration. 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.

Prospects / Suggestions for future research

In a consecutive project, the results are used to develop a SOFC-system. Furthermore, the developed simulation models became part of the University of Applied Sciences' Master's Program „Building Technology and Building Management“. By way of this program, the understanding of an optimized SOFC-system can be enhanced in the industry and the potential of concrete SOFC-projects is increased.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

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 Hausenergiesektor ist die Kohärenz des Wärme- und Strombedarfs nicht permanent über das Jahr betrachtet 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.

Zeitliche Kohärenz von Wärme- und Strombedarf für die Industrie

Für die Industrieanwendung von Brennstoffzellen gelten andere Randbedingungen. In Lebensmittelproduktionsbetrieben wird beispielsweise aufgrund des hohen Marktbedarfes und nicht zuletzt aufgrund des hohen Preisdrucks 3-schichtig, 7 Tage in der Woche produziert. Zusätzlich werden hier Strom- und Wärme gleichzeitig benötigt. Wärme wird zum Hoherhitzen bzw. Konservieren der Lebensmittel (in UHT-Anlagen und aseptischen Produktionen) benötigt, Strom wird hingegen zum Antrieb der Maschinen und zur Kälteerzeugung für die Produktkühlung verbraucht. Bedingt durch den kohärenten Wärme- und Strombedarf sowie des durchgehenden Betriebs der Produktionsanlagen wäre der Brennstoffzelleneinsatz zur Grundlastdeckung mit minimalen Schaltzyklen bestens geeignet. Zur Spitzenlastabdeckung wird ein zusätzliches Aggregat (z.B. bestehender Dampfkessel oder zusätzlich ein Wärmespeicher,...) herangezogen.

Temperaturniveau der Abwärme bzw. sinnvolle exergetische Verwertung

SOFC-Brennstoffzellen liefern Abwärme im Hochtemperaturbereich von bis zu 500 – 600°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,...).

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. Innerhalb des gegenständlichen Projektes sollen daher die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zur effizienten Energieversorgung von Quartieren und Industrieanwendungen mittels SOFC-Systemen analysiert werden. Dazu werden zunächst im Kapitel 2.1 die verbraucherseitigen Anforderungen seitens des Wohnbaus und der Industrie analysiert. Anschließend werden im Kapitel 2.2 die technologischen Grundlagen von SOFC-Systemen zusammengefasst. Ausgehend von den darin enthaltenen verfahrenstechnischen Teilprozessen werden im Kapitel 2.3 die zur Analyse erforderlichen thermodynamischen Grundlagen abgeleitet und die für die Optimierungsstudien entwickelten Simulationsmodelle beschrieben. Basierend auf den im Kapitel 2.3 beschriebenen Simulationsverfahren und den im Kapitel 2.1 beschriebenen nutzerseitigen Anforderungen wird das Abwärmennutzungspotenzial sowohl für den Wohnbau als auch für die Industrie im Kapitel 2.4 untersucht. Abschließend erfolgt im Kapitel 2.5 eine Zusammenfassung der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen.

2 Ergebnisse

2.1 Verbraucherseitige Anforderungen

Um das Abwärmenutzungspotenzial eines SOFC-Systems analysieren zu können, sind genaue Informationen über den elektrischen Energie- und Wärmebedarf von den Verbrauchern erforderlich. In diesem Abschnitt werden daher die elektrischen und thermischen Lastprofile von unterschiedlichen Wohnbauten sowie die energetischen Anforderungen ausgewählter Industriezweige analysiert. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Datenanalysen zusammengefasst und die Grundlage für die Ableitung des Abwärmenutzungspotenzials geschaffen.

2.1.1 Anforderungen der Wohngebäude

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 das Warmwasser, 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 Tabelle 2-1 sind die untersuchten Gebäudevarianten zusammengefasst.

Tabelle 2-1: 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 Warmwasserbedarf und elektrischen Energiebedarf gemittelt über das gesamte Kalenderjahr, den stündlichen Anteil an Warmwasserbedarf 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 Abbildung 2-1 und 2-2 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 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 Abbildung 2-1 zeigt die Auswertung der 24-Stundenmittelwerte und Abbildung 2-2 die Auswertung der 1-Stundenmittelwerte.

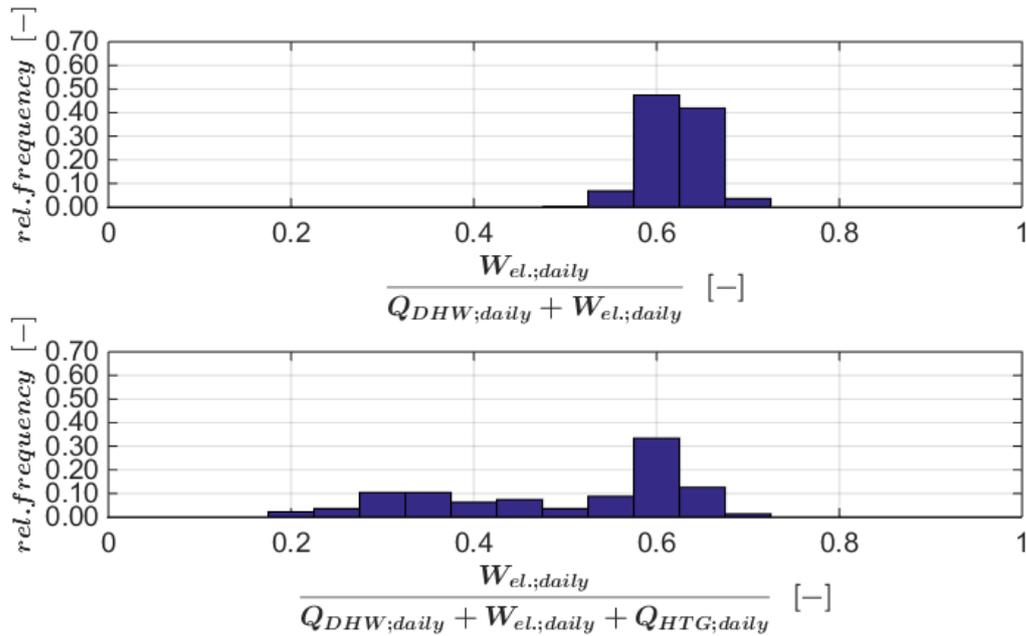


Abbildung 2-1: Häufigkeitsverteilung des Strom-Wärme-Verhältnisses für ein Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten und 78 Bewohnern und einer Mittelungszeit der Lastprofile von 24 Stunden.

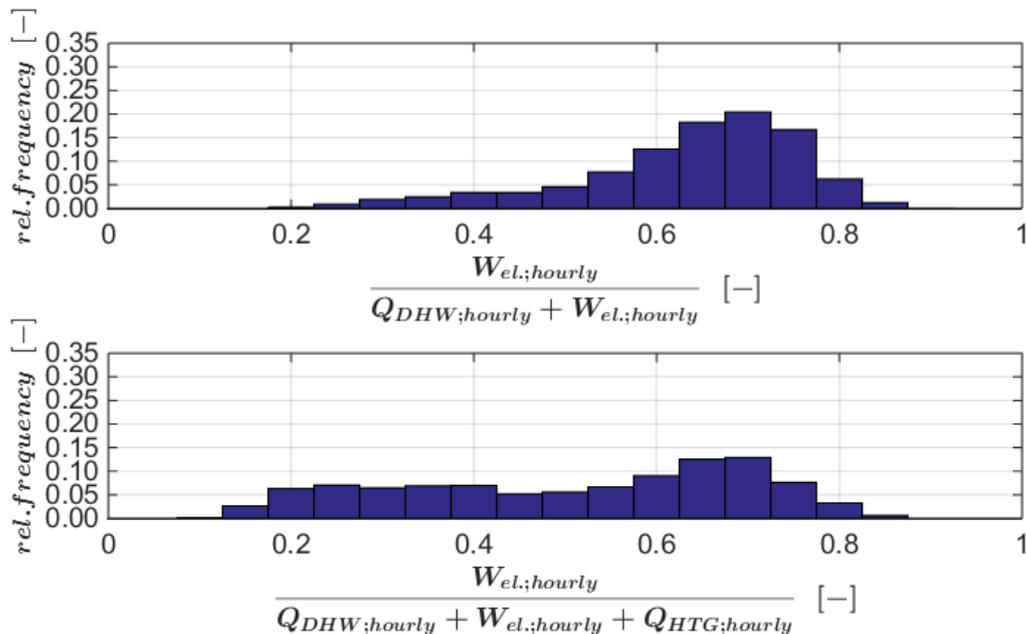


Abbildung 2-2: Häufigkeitsverteilung des Strom-Wärme-Verhältnisses für ein Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten und 78 Bewohnern und einer Mittelungszeit der Lastprofile von einer Stunde

Aufgrund des geringen Einflusses der Jahreszeit auf den Warmwasserbedarf ist der Schwankungsbereich des Strom–Wärme-Verhältnisses bei Berücksichtigung des Heizwärmebedarfs deutlich größer. Darüber hinaus zeigen die Abbildung 2-1 und 2-2, 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. Wird die Abwärme nur zur Warmwasserbereitung genutzt, liegt lt. Abbildung 2-1 das optimale Strom–Wärme-Verhältnis bei knapp über 60%. Soll das SOFC-System zusätzlich den Heizwärmebedarf abdecken, ist prinzipiell eine Reduktion der Stromkennzahl und somit die Erhöhung des Abwärmenutzungspotenzials möglich. Dazu müsste der Brennstoffumsatz im Stack reduziert und im Nachbrenner erhöht werden. Dies führt zur Minderung der Stromproduktion, sodass der elektrische Energiebedarf nicht abgedeckt werden kann. Unter diesem Gesichtspunkt wäre die Integration einer Zusatzheizung sinnvoll.

Für die Entwicklung eines optimalen Anlagendesigns ist neben dem Strom–Wärme-Verhältnis auch die zeitliche Entwicklung der Lastprofile zu berücksichtigen. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 2-3 den elektrischen Energiebedarf pro Minute eines mehrgeschoßigen Wohngebäudes mit neun Wohneinheiten. Deutlich sind die starken Lastschwankungen und der erhöhte Energiebedarf in den Abendstunden zu erkennen.



Abbildung 2-3: Mittels synPRO generiertes elektrisches Lastprofil eines Wohngebäudes mit 9 Wohneinheiten.

Auf der thermischen Seite können mit geringen Investitionskosten Lastverschiebungspotenziale mittels Wärmespeicher und modellbasierten Regelstrategien relativ einfach nutzbar gemacht werden. Die elektrische Energiespeicherung ist hingegen mit wesentlich größeren Kosten verbunden, sodass auch alternative Möglichkeiten zur Optimierung der Betriebsbedingungen einer SOFC-Anlage betrachtet werden müssen. Eine Alternative ist die Nutzung des SOFC-Systems innerhalb eines Mikronetzes. Durch das individuelle Nutzerverhalten der einzelnen Bewohner werden einzelne Lastspitzen ausgeglichen und die

Lastprofile weisen geringere Leistungsschwankungen auf. Dies wird durch das in Abbildung 2-4 dargestellte Lastprofil verdeutlicht. Das Lastprofil wurde ebenfalls mittels synPRO erstellt und repräsentiert den elektrischen Energiebedarf pro Minute von 15 Wohngebäuden mit insgesamt 135 Wohneinheiten.

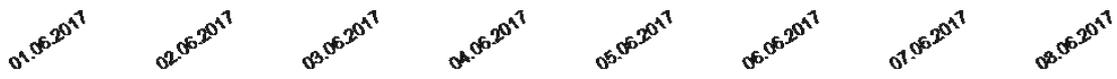


Abbildung 2-4: Mittels synPRO generiertes elektrisches Lastprofil von 15 Wohngebäuden mit insgesamt 135 Wohneinheiten.

Auffallend bei diesem Lastprofil ist, dass die einzelnen Tageslastgänge ähnliche Verläufe aufweisen, sodass die gebäudeübergreifende elektrische Vernetzung mit modellbasierenden Regelalgorithmen zur Modulation der elektrischen Leistung als äußerst sinnvoll erachtet werden kann.

2.1.2 Anforderungen seitens Industrie und Gewerbe

Folgende Darstellung zeigt die je nach Sparte unterschiedliche Aufteilung auf diverse Temperaturbereiche bzw. Anwendungszwecke (vgl. Abbildung 2-5).

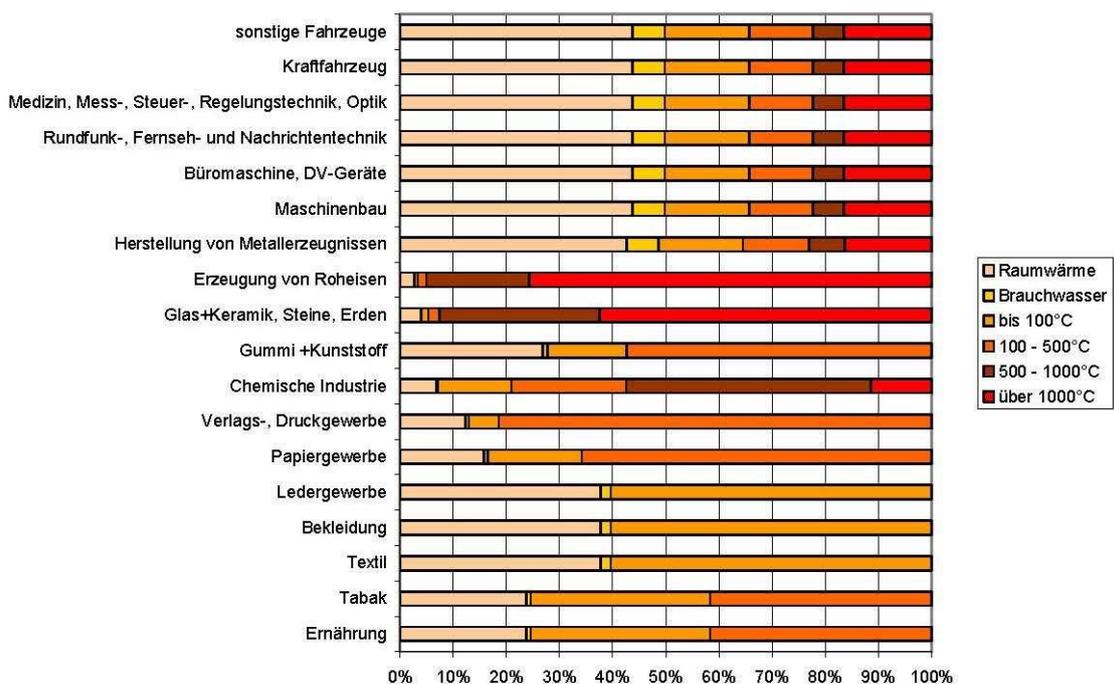


Abbildung 2-5: Aufteilung des Wärmebedarfs auf diverse Temperaturbereiche bzw. Anwendungszwecke (Pehnt et al., 2010)

Zum einen erkennt man, dass die Verhältnisse je nach betrachteter Branche (erwartungsgemäß) äußerst unterschiedlich sind. Zum anderen ergibt sich, dass an ein- und demselben Standort vielfach sehr unterschiedliche Temperaturniveaus benötigt werden, was vorteilhaft für eine kaskadierte Nutzung ist. Die ersten sieben angeführten Branchen sind z.B. untersuchenswert, da hier in etwa gleich große Anteile verschiedener Temperaturbereiche vorkommen, aber auch Papier, Tabak und Ernährung, evtl. auch Druck weisen eine günstige Verteilung auf.

Es muss dabei aber auch beachtet werden, dass innerhalb einer Branche je nach Erzeugnis und Verfahrensart erhebliche Unterschiede bestehen können. Eine Detailuntersuchung eines konkreten Betriebes lässt sich daher durch einen Blick auf diese indikative Darstellung nicht ersetzen.

Beachtet werden muss aber ebenso, dass der erste Schritt einer betrieblichen Optimierung nicht der Ersatz bzw. die Ergänzung der derzeitigen Wärmeerzeugung durch eine Brennstoffzellenanlage sein kann, sondern am Anfang immer die Untersuchung einer möglichen Prozessoptimierung stehen muss.

Der Bereich über 1000°C ist für SOFC-Brennstoffzellen nicht zugänglich. Dieser Bereich ist v.a. bei Erzeugung von Roheisen (Eisen schmilzt bei über 1500°C) und Glas- und Keramikindustrie vorherrschend.

Im Zuge der Projektarbeiten der FH Burgenland hat sich herausgestellt, dass ein Satteldampfdruck von 5-8 bar ein in der Industrie relevanter Bereich ist; speziell wurden hier Molkereien untersucht. Dies entspricht einer Temperatur von etwa 150°C bis 170°C und deckt sich auch mit der obigen Grafik, wonach 42% der Wärme in der Nahrungsmittelproduktion (unterste Rubrik) in den Bereich 100 bis 500°C fallen. Damit stellt sich die Nahrungsmittelindustrie als eine vielversprechende Industriesparte für SOFC-Anlagen dar.

Die nächste Abbildung 2-6 zeigt die in Österreich hinsichtlich des Energieverbrauchs relevanten Branchen. Die Einteilung deckt sich nicht ganz mit der obigen Grafik (einer deutschen Quelle), enthält aber dennoch vergleichbare Kategorien. Gänzlich auszuschließen ist eine Nutzbarkeit von kaskadierter Nutzung ohnehin in keiner Branche von Vornherein, von den Branchen mit hohem Energieverbrauch scheinen aber nur C23 und C24 kaum bis nicht geeignet.

2011 - Nutzenergiekategorien: Struktur 2005; Traktion Energiegesamtrechnung-konform (nur für produzierenden Bereich und Haushalte verfügbar)																	
ÖSTERREICH GESAMT Produzierender Bereich	ÖNACE 2008 Abteilungen	Raumheizung	Klimaanlage	Beleuchtung und EDV	Dampfheizung	Industrieöfen	Standmotoren	Kfz	Sonstiges	davon Warmwasser	davon Kühlung	davon Elektrothermie	davon Trocknung	davon weitere Zwecke	Gesamt	Gesamtsumme in GWh (TJ/3,6)	
		in TJ															
Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	C 10,11,12	2.054	420	584	9.592	4.966	4.848	2.800	2.053	330	1.542	0	45	136	27.317	7.588	
Anteilig		7,5%	1,5%	2,1%	35,1%	18,2%	17,7%	10,2%	7,5%	1,2%	5,6%	0,0%	0,2%	0,5%	100,0%		
Textil und Leder	C 13,14,15	499	64	173	1.011	603	1.278	164	101	10	1	0	5	84	3.893	1.081	
Anteilig		12,8%	1,6%	4,5%	26,0%	15,5%	32,8%	4,2%	2,6%	0,3%	0,0%	0,0%	0,1%	2,2%	100,0%		
Holzverarbeitung	C 16	1.847	81	193	11.078	5.286	5.780	2.586	4.194	8	0	0	4.044	142	31.046	8.624	
Anteilig		5,9%	0,3%	0,6%	35,7%	17,0%	18,6%	8,3%	13,5%	0,0%	0,0%	0,0%	13,0%	0,5%	100,0%		
Papier und Druck	C 17,18	5.068	114	1.288	46.202	535	15.000	385	1.570	46	19	0	315	1.191	70.160	19.489	
Anteilig		7,2%	0,2%	1,8%	65,9%	0,8%	21,4%	0,5%	2,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,4%	1,7%	100,0%		
Chemie und Petrochemie	C 20,21	1.648	327	400	15.884	11.802	13.966	416	228	18	17	0	20	174	44.671	12.409	
Anteilig		3,7%	0,7%	0,9%	35,6%	26,4%	31,3%	0,9%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	100,0%		
Steine und Erden, Glas	C 23	2.432	129	61	607	28.449	4.095	6.173	2.554	59	22	0	2.429	44	44.501	12.361	
Anteilig		5,5%	0,3%	0,1%	1,4%	63,9%	9,2%	13,9%	5,7%	0,1%	0,0%	0,0%	5,5%	0,1%	100,0%		
Eisen-/Stahlerzeugung, Nicht Eisen Metalle	C 24	9.609	141	1.072	2.542	27.139	14.361	770	873	349	0	0	327	197	56.507	15.696	
Anteilig		17,0%	0,2%	1,9%	4,5%	48,0%	25,4%	1,4%	1,5%	0,6%	0,0%	0,0%	0,6%	0,3%	100,0%		
Maschinenbau	C 25,26,27,28	9.923	473	1.422	202	6.715	7.202	3.068	1.396	158	228	360	1	649	30.400	8.445	
Anteilig		32,6%	1,6%	4,7%	0,7%	22,1%	23,7%	10,1%	4,6%	0,5%	0,8%	1,2%	0,0%	2,1%	100,0%		
Fahrzeugbau	C 29,30	2.753	133	370	8	517	1.839	443	200	13	20	2	30	135	6.264	1.740	
Anteilig		44,0%	2,1%	5,9%	0,1%	8,3%	29,4%	7,1%	3,2%	0,2%	0,3%	0,0%	0,5%	2,3%	100,0%		
Sonstiger Produzierender Bereich	C 22,31,32	2.999	445	641	858	679	4.550	1.202	406	48	13	0	95	250	11.780	3.272	
Anteilig		25,5%	3,8%	5,4%	7,3%	5,8%	38,6%	10,2%	3,4%	0,4%	0,1%	0,0%	0,8%	2,1%	100,0%		
Bau	F 41,42,43	4.542	74	773	47	1.342	7.791	9.995	6.417	42	0	0	147	6.228	30.983	8.606	
Anteilig		14,7%	0,2%	2,5%	0,2%	4,3%	25,1%	32,3%	20,7%	0,1%	0,0%	0,0%	0,5%	20,1%	100,0%		
Bergbau	B 07,08,09,9	158	22	50	1.859	927	3.390	2.459	400	6	0	0	120	274	9.265	2.574	
Anteilig		1,7%	0,2%	0,5%	20,1%	10,0%	36,6%	26,5%	4,3%	0,1%	0,0%	0,0%	1,3%	3,0%	100,0%		
SUMME Sachgüterproduktion, Bau und Bergbau		43.533	2.423	7.028	89.890	88.961	84.100	30.461	20.392	1.087	1.862	362	7.577	9.504	366.787	101.885	
Anteilig		11,9%	0,7%	1,9%	24,5%	24,3%	22,9%	8,3%	5,6%	0,3%	0,5%	0,1%	2,1%	2,6%	100,0%		

Abbildung 2-6: In Österreich hinsichtlich des Energieverbrauchs relevante Branchen, Quelle: Statistik Austria

2.2 SOFC-Systemkonzepte

2.2.1 Prinzipieller Aufbau eines SOFC-Systems

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. Abbildung 2-7 zeigt eine Übersicht der wesentlichen Verfahrensschritte und der dabei auftretenden Stoff- und Energieströme.

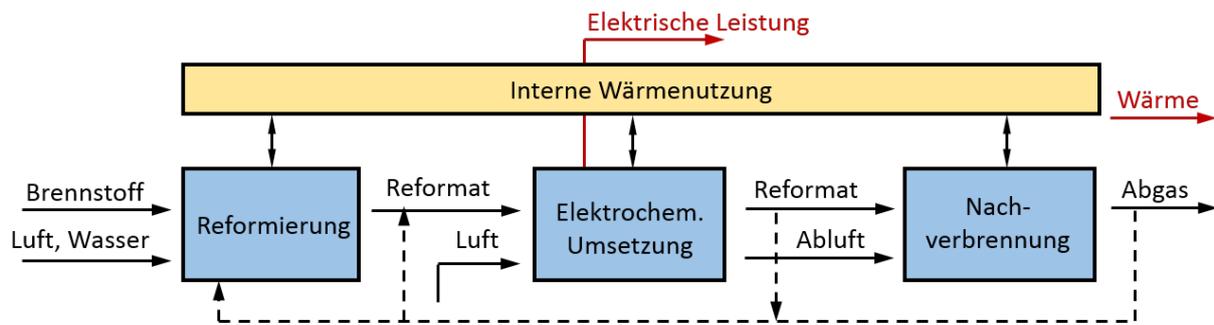


Abbildung 2-7: Stoff- und Energieströme eines SOFC-Systems nach Heddrich (2012)

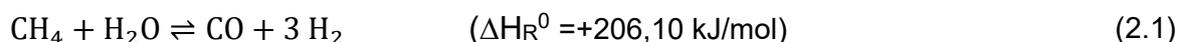
2.2.2 Verfahrensprinzipien zur Reformierung

Das erforderliche Synthesegas kann mit unterschiedlichen Reformierungsverfahren hergestellt werden. Die Unterscheidung der eingesetzten Verfahren erfolgt einerseits über die verwendeten Additive und andererseits über die Lokalität der Reformierung. Die wichtigsten Verfahren sind in den nachfolgenden Abschnitten kurz beschrieben.

2.2.3 Dampfreformierung (Steam Reforming – SR)

Bei der Dampfreformierung wird dem zu reformierenden Brennstoff Wasserdampf beigemischt. Es handelt sich dabei um einen allothermen Prozess, d.h. die Reaktion verläuft endotherm. Daher besteht die Möglichkeit, in das Gleichgewicht der Reaktion einzugreifen und es in Richtung der Reaktionsprodukte CO und H₂ zu verschieben (Prinzip von Le Chatelier und Braun).

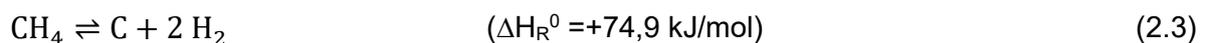
Die Hauptreaktion der Dampfreformierung für Methan kann wie folgt angeschrieben werden:



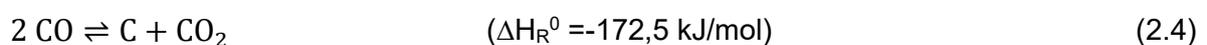
Parallel zur Hauptreaktion läuft die Wassergas-Shift-Reaktion ab, welche die Wasserstoffausbeute des Prozesses erhöht.



Neben diesen Reaktionen gehen auch Spaltreaktionen vonstatten, welche zur Bildung von Kohlenstoff führen. Einerseits läuft eine endotherme Spaltung von Methan ab:



Andererseits ist die Bildung von Kohlenstoff auch über eine exotherme Zersetzung von Kohlenmonoxid möglich:

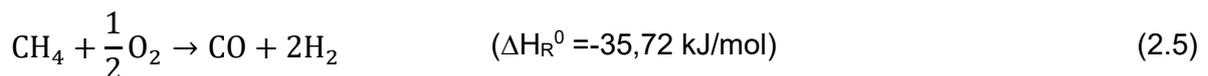


Das in dieser Hinsicht auftretende Gleichgewicht wird als Boudouard-Gleichgewicht bezeichnet.

Einfluss auf die Ausbeute des Synthesegases hat unter anderem der Gesamtdruck und der Anteil an Wasserdampf, der dem Brennstoff zugeführt wird. Beispielsweise bewirkt ein geringer Druck eine verbesserte Ausbeute des Anodengases. Zur Beschreibung der Dampfreformierungsreaktion können somit die Stoffmengenverhältnisse S/C bzw. O/C herangezogen werden (vgl. Abschnitt 2.3.2.3).

2.2.3.1 Partielle Oxidation (POx)

Erfolgt die Reformierung mittels partieller Oxidation, so wird ein Teil des Kohlenstoffs (z.B. Methan) durch zugeführten Sauerstoff oxidiert. Für die Hauptreaktion der partiellen Oxidation von Methan resultiert:



Parallel zur Hauptreaktion laufen auch wieder Nebenreaktionen ab, wie die Dampfreformierungsreaktion, die Wassergas-Shift-Reaktion und die trockene Kohlendioxid-reformierung.

Nicht nur über Druck und Temperatur, sondern auch über die Menge des zugeführten Sauerstoffs lässt sich die Ausbeute an Synthesegas steuern. Dadurch kann eine Reduzierung des eingebrachten Sauerstoffs und gleichzeitig eine Erhöhung des Wasserstoffs- bzw. Kohlenmonoxids im Anodengas bewirkt werden. Im Gegensatz zur Dampfreformierung, welche immer endothermen Reaktionscharakter aufweist, kann die partielle Oxidation bei höherem Verbrennungsluftverhältnis auch exotherm sein. In der Regel wird bei einer Reformierung mittels partieller Oxidation kein reiner Sauerstoff, sondern Luft eingebracht, welche die Synthesegasausbeute ebenfalls senkt.

Wird der Vorgang der partiellen Oxidation durch einen Katalysator unterstützt, wird von einer katalytischen partiellen Oxidation (catalytic partial oxidation, CPOX) gesprochen. Als Katalysatormaterialien werden Elemente der 8. Hauptgruppe gewählt, am häufigsten Nickel und Rhodium. Zur Gewährleistung einer hohen Langzeitstabilität des Katalysators darf der Schwefelanteil im eingesetzten Brennstoff nur gering sein (vgl. Heddrich, 2012).

2.2.3.2 Oxidative Dampfreformierung (OSR)

Die oxidative Dampfreformierung stellt eine Kopplung von Dampfreformierung und partieller Oxidation dar. Dabei werden neben dem Brennstoff auch Sauerstoff (Luft) und Wasserdampf in den Reformier eingbracht. Aus der Kombination der beiden Reformierungsverfahren geht hervor, dass sich die Vorteile der Dampfreformierung und der partiellen Oxidation optimierend ergänzen. Die freiwerdende thermische Energie der exothermen Verbrennungsreaktion stellt die Energie für die endotherm ablaufenden Reaktionen dar. Ein Spezialfall ist die sogenannte autotherme Reformierung, da hierbei keine Enthalpieänderung zwischen Eintritt und Austritt des Reformers resultiert. Somit ist für den stationären isothermen Betrieb weder eine Energiezufuhr noch eine Energieabfuhr notwendig.

2.2.3.3 Interne und externe Reformierung

Die Reformierung des verwendeten kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffs kann einerseits extern in einem vorgeschalteten Reformer stattfinden und / oder intern im Anodenraum des SOFC-Stacks erfolgen. Die interne Reformierung im Anodenraum wird durch die hohen Betriebstemperaturen des Stacks ermöglicht. Bei bestimmten Betriebszuständen kann es jedoch zu Kohlenstoffablagerungen auf der Anode oder zu einer Deaktivierung des Reformerkatalysators kommen. Zurzeit werden vermehrt partielle interne Reformierungsverfahren eingesetzt. Diese bestehen aus einer externen und einer internen Reformierung. Für den internen Reformierungsanteil ergibt sich daraus der Vorteil, dass die Abwärme im Stack zur Dampfreformierung direkt genutzt werden kann und somit geringere Temperaturgradienten im Stack erzielt werden können.

2.2.4 SOFC-Anlagensysteme

Um eine optimale interne Abwärmenutzung zu ermöglichen, sind für die unterschiedlichen Reformierungsverfahren individuelle Anlagenverschaltungen erforderlich. In den nachfolgenden Abschnitten sind diese kurz zusammengefasst.

2.2.4.1 SOFC-System mit CPOX-Reformer

Bei einem SOFC-System mit CPOX-Reformer erfolgt die Reformierung des Brenngases nach dem Verfahren der katalytischen, partiellen Oxidation. Im CPOX-Reformer wird aus Brenngas und Luft Synthesegas (Reformat) erzeugt und anodenseitig der SOFC zugeführt. Die kathodenseitig eingebrachte Luft wird mittels der Wärmeenergie aus dem Abgasstrom des Stacks und des Nachbrenners vorgewärmt. Abbildung 2-8 zeigt das Anlagenschema eines SOFC-Systems mit einem CPOX-Reformer.

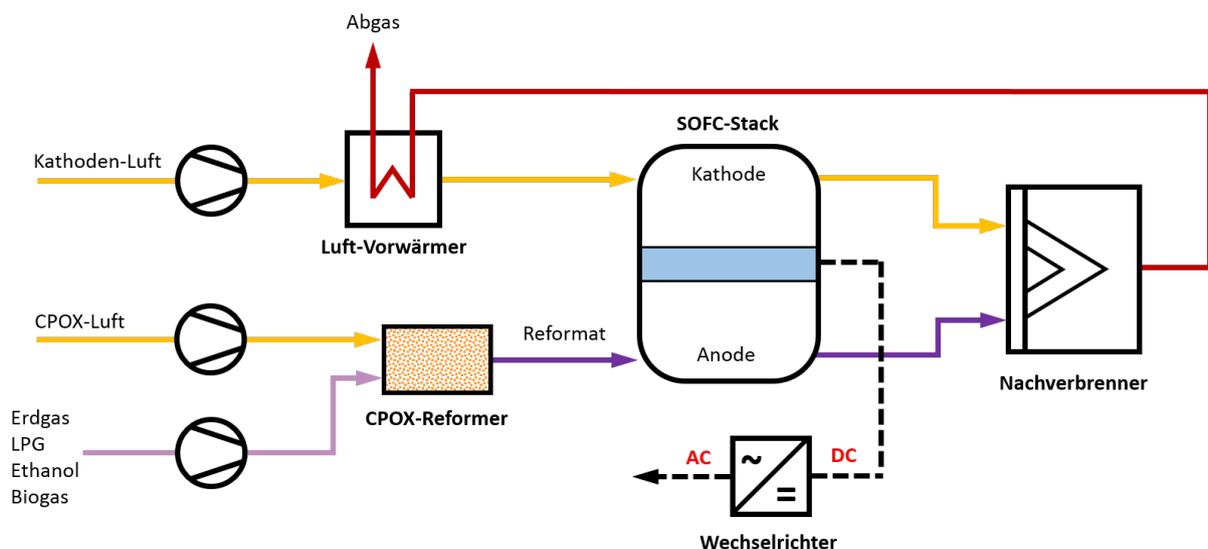


Abbildung 2-8: SOFC-System mit CPOX-Reformer.

Die Vor- und Nachteile der CPOX-Schaltung sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Tabelle 2-2: Auflistung der Vor- und Nachteile der CPOX-Anlagenverschaltung

Vorteile	Nachteile
Kein Wasserverbrauch	Maximaler elektrischer Wirkungsgrad bei ca. 35 %
Weniger Anlagenkomponenten erforderlich	Enger Betriebsbereich: $0,27 < \lambda < 0,36$
Kompakter, adiabater Reformier	Hoher Luftbedarf zur Stack-Kühlung
	Teurer Metall-Katalysator erforderlich
	Hohe Reformationstemperaturen zur Vermeidung der Bildung und Ablagerung von festem Kohlenstoff erforderlich
	Wahrscheinlichkeit zur Bildung von festem Kohlenstoff steigt mit der Komplexität der eingesetzten Kohlenwasserstoffe

2.2.4.2 SOFC-System mit Oxidativer Dampfreformierung (OSR)

Bei der oxidativen Dampfreformierung erfolgt eine Kopplung der partiellen Oxidation mit der Dampfreformierung. Dazu werden Luft, Wasserdampf und das Brenngas gemischt, wobei die durch die Oxidation frei werdende Energie für die Dampfreformierung zur Verfügung gestellt wird. Ist die Zustandsänderung dabei adiabatisch, handelt es sich um die sogenannte autotherme Reformierung (ATR). In diesem Grenzfall heben sich die exothermen und endothermen Reaktionsenergien auf und es ist keine zusätzliche Wärmezufuhr erforderlich.

In Abbildung 2-9 ist ein derartiges SOFC-System mit Abgaswärmerückgewinnung zur Kathodenluftvorwärmung dargestellt.

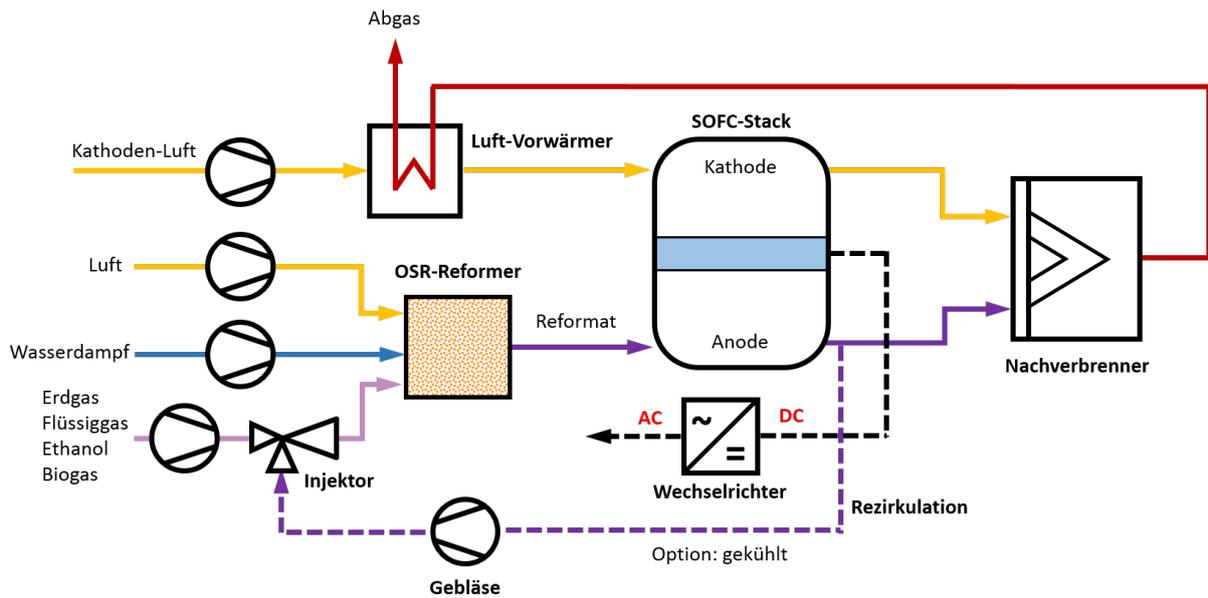


Abbildung 2-9: SOFC-System mit oxidativer Dampfreformierung und Anodenabgasrezirkulation (strichliert dargestellt)

Bei der Verwendung einer oxidativen Dampfreformierung kann zur Wirkungsgradsteigerung ein Teil des Anodenabgases dem Reformer zugeführt werden. Diese Maßnahme wird als Anodenabgasrückführung oder als Anodenabgasrezirkulation bezeichnet. In Abbildung 2-9 ist die Anodenabgasrückführung strichliert dargestellt.

Systeme mit der oxidativen Dampfreformierung können auch als Inselanlagen ausgeführt werden. In diesem Fall werden höhere Kohlenwasserstoffverbindungen (z.B. Flüssiggas, Diesel oder Benzin) als Brennstoff verwendet. In Tabelle 2-3 sind die Vor- und Nachteile der oxidativen Dampfreformierung zusammengefasst.

Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile der oxidativen Dampfreformierung

Vorteile	Nachteile
Höherer elektr. Wirkungsgrad im Vergleich zur CPOX-Schaltung	Externe Dampfzufuhr oder Anodenabgas-Rückführung
Geringere Wahrscheinlichkeit zur Bildung von festem Kohlenstoff	Messung und Überwachung der Rezirkulationsschleife (Gebläse, Injektor)
Niedrigere Reformationstemperatur	Langzeitstabilität des Rezirkulations-Gebläses
Adiabater Reformer	

2.2.4.3 SOFC-System mit Dampfreformierung

Hohe elektrische Wirkungsgrade werden auch durch die Verwendung eines Dampfreformers erreicht (vgl. Abbildung 2-10). Die Wärmeenergie des Nachbrenners wird dazu verwendet, um

die kathodenseitig zugeführte Luft, das Reformat, das Brenngas vorzuwärmen und die Verdampfung des Wassers zu gewährleisten. Das Brenngas wird zusammen mit dem erzeugten Wasserdampf in den Dampf-Reformer geleitet und Reformat mit einer Temperatur von ca. 800 °C hergestellt.

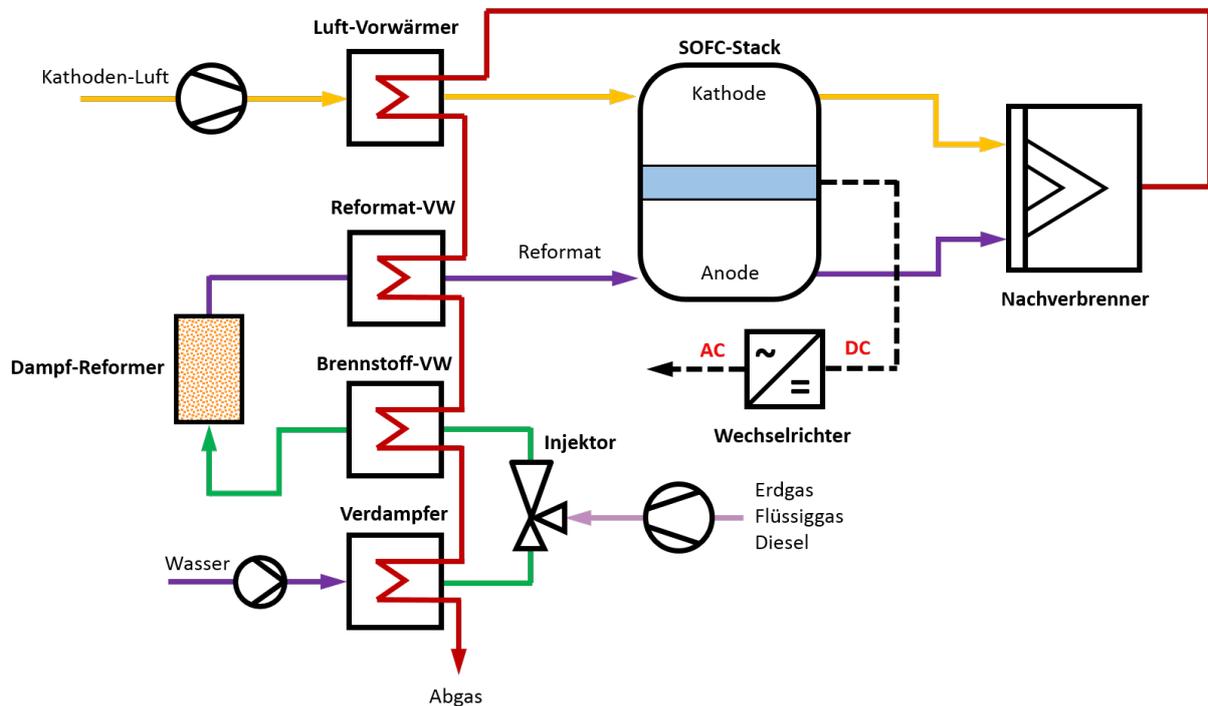


Abbildung 2-10: SOFC-System mit Dampfreformierung

Die Dampfreformierung wird für die Reformierung von komplexen Kohlenwasserstoffen häufig eingesetzt und vermehrt für größere Anlagen verwendet. Vor- und Nachteile der Dampfreformierung sind Tabelle 2-4 zu entnehmen.

Tabelle 2-4: Vor- und Nachteile der Dampfreformierung

Vorteile	Nachteile
Elektr. Wirkungsgrad bei 45-60 %	Hohe Komponentenzahl
Großer Betriebsbereich (S/C, T)	Kosten für Wasservorbereitung
Möglichkeit einer internen Reformierung (reduzierter Luftbedarf)	Zuverlässigkeit der Wasserversorgung
	Suboptimale Dynamik des Systems
	Großes Katalysatorvolumen

2.2.4.4 SOFC-System mit Anodenabgasrückführung

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert, können mit einer Anodenabgas-Rückführung (vgl. Abbildung 2-11) sehr hohe elektrische Wirkungsgrade erreicht werden. Da bereits im Anodenabgas Wasserdampf vorhanden ist, ist dazu keine oxidative Dampfreformierung notwendig. Eine einfache Anodenrezirkulation kann daher durch das direkte Vermischen des Brennstoffes mit einem Teil des Anodenabgases realisiert werden. Da dabei keine exotherme Oxidation erfolgt, muss dem Reformer zusätzlich Wärmeenergie zum Erreichen der erforderlichen Arbeitstemperatur zugeführt werden.

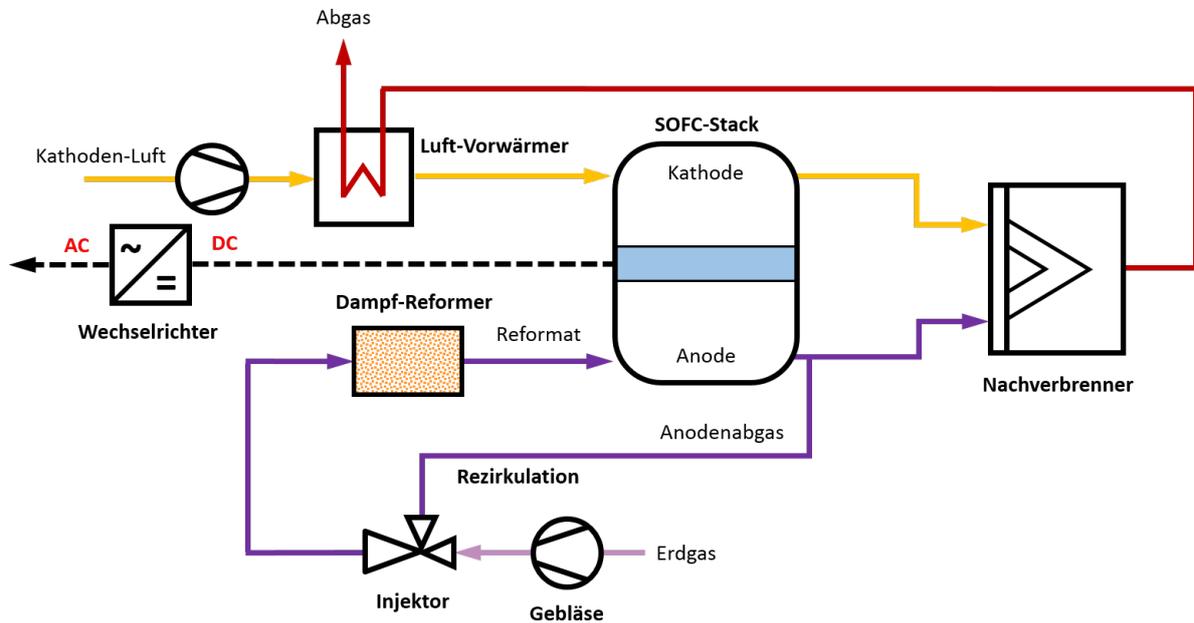


Abbildung 2-11: SOFC-System mit Anodenabgasrückführung

Die Vor- und Nachteile der Anodenabgasrückführung sind in Tabelle 2-5 zusammengefasst.

Tabelle 2-5: Vor- und Nachteile der Anodenabgas-Rückführung

Vorteile	Nachteile
Elektr. Wirkungsgrad größer 50 %	Rezirkulations-Gebläse wird benötigt
Geschlossener Wasserkreislauf	Regelung der Rezirkulationsschleife und der Reformeraustrittstemperatur ist herausfordernd (Vermeidung von festem Kohlenstoff)
Möglichkeit einer internen Reformierung (reduzierter Luftbedarf)	
Geringe Komponentenzahl	

2.2.4.5 SOFC-System mit serieller Stack-Verschaltung

Abbildung 2-12 zeigt ein zweistufiges System mit einer seriellen Verschaltung von Stacks zuzüglich eines CPOX- und Dampfreformers. Durch die Reihenschaltung von Stacks ist es möglich, den elektrischen Wirkungsgrad entsprechend zu verbessern. Dahingehend wird das Anodenabgas des ersten Stacks dazu verwendet, um über einen nachgeschalteten Dampfreformer weiteres Reformat zu erzeugen. Die Temperatur des Kathodenabgases wird durch Zufuhr von Umgebungsluft regelbar.

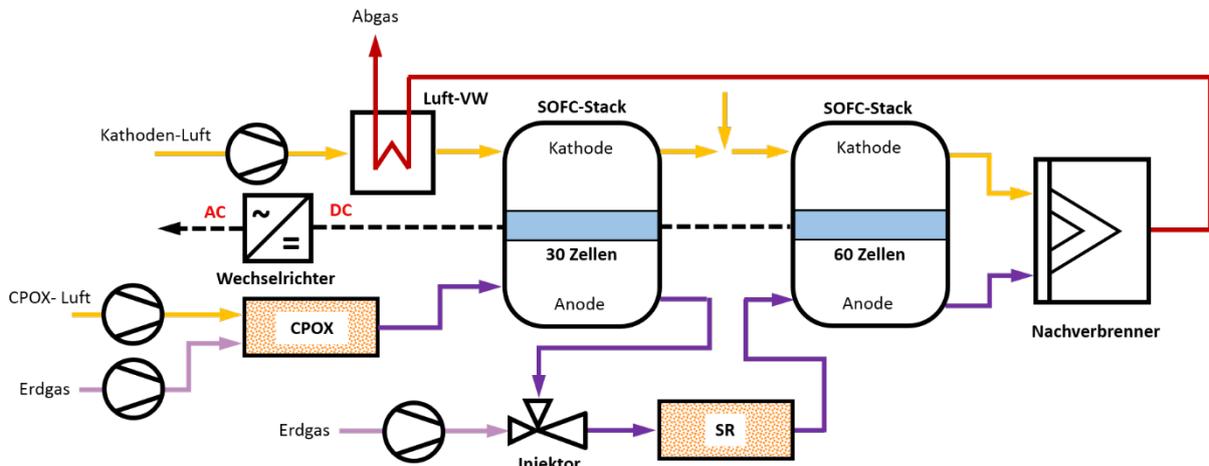


Abbildung 2-12: SOFC-System mit serieller Stack-Verschaltung

Eine Reihenschaltung von Zellen bewirkt eine Erhöhung der elektrischen Leistung bei gleicher Austrittsspannung und gleichbleibendem Brennstoffumsatz. In Abbildung 2-13 ist die elektrische Leistung einer Einzelzelle (gelbe Fläche) dargestellt, die bei einem Brennstoffumsatz von 0,8 als Fläche unter der Kurve berechnet werden kann. Durch eine Reihenschaltung (blaue Fläche) ist ersichtlich, dass eine höhere Spannung und ein geringerer Brennstoffumsatz erzielt wird.

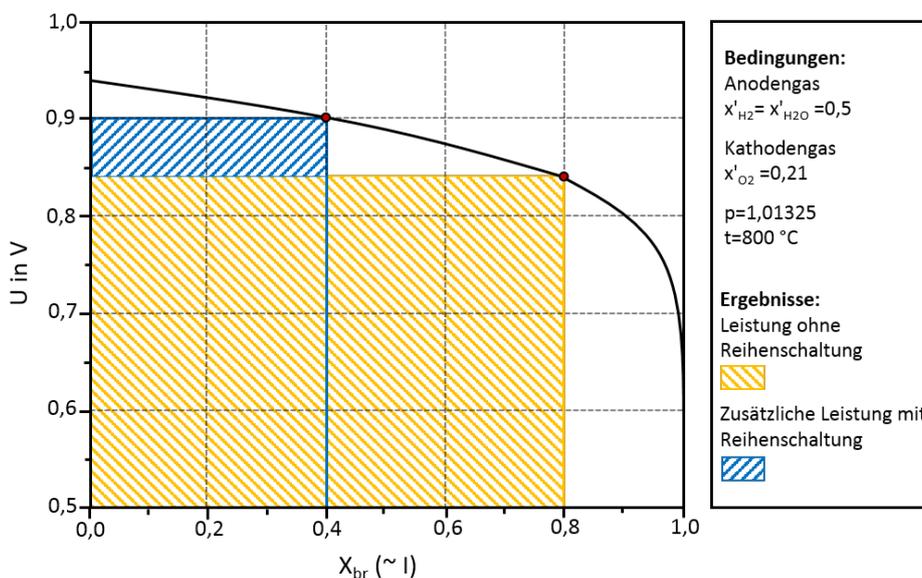


Abbildung 2-13: Elektrische Spannung einer Einzelzelle im Vergleich zu zwei in Reihe geschalteten Zellen (modifizierte Darstellung nach Jahn (2014))

Tabelle 2-6 zeigt sowohl die Vorteile als auch die Nachteile einer Reihenschaltung von SOFC-Stacks.

Tabelle 2-6: Vor- und Nachteile der seriellen Stack-Verschaltung

Vorteile	Nachteile
Hoher el. Wirkungsgrad ohne Wasservorbereitung oder Anodenabgas-Gebläse	Komplexe Leistungselektronik, komplexes Stack
Elektrischer Wirkungsgrad > 45 %	Zusätzliche Fluidströme

2.3 Thermodynamische Modellierung eines SOFC-Systems

2.3.1 Thermodynamische Grundlagen

Die thermodynamischen Zustandsänderungen im Reformier 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 Reformier und der Brennstoffzelle setzt daher ein Grundverständnis für die chemische Gleichgewichtsthermodynamik voraus. In den folgenden Abschnitten werden die dazu wesentlichen thermodynamischen Grundlagen erläutert.

2.3.1.1 Standardreaktionsenthalpie

Die Standardreaktionsenthalpie ΔH_R^0 entspricht der Enthalpieänderung, die pro Mol Umsatz unter Standardbedingungen ($T_0 = 298,15 \text{ K}$, $p_0 = 1,01325 \text{ bar}$) vorliegt. In diesem Sinne kann mit der Bestimmung der Standardreaktionsenthalpie festgestellt werden, ob eine Reaktion endotherm (Bedarf einer Wärmezufuhr) oder exotherm (Wärme wird frei) abläuft. Voraussetzung für die Ermittlung der Standardreaktionsenthalpie ist die sogenannte Standardbildungsenthalpie ΔH_B^0 , die sowohl für jedes Reaktionsprodukt als auch für jedes Reaktionsedukt benötigt wird.

Die Standardbildungsenthalpie ΔH_B^0 (in Englisch ΔH_f^0 , f für formation = Bildung) ist jene Energie, die bei der Bildung von einem Mol einer Substanz aus der stabilsten Form der reinen Elemente unter Standardbedingungen frei (exotherm) oder zugeführt (endotherm) wird. Die Einheit der molaren Standardbildungs- und Standardreaktionsenthalpie ist kJ/mol.

Standardbildungsenthalpien ΔH_B^0 von chemischen Verbindungen werden experimentell bestimmt und sind in Form von Stoffdatensammlungen bzw. Datenbanken verfügbar. Standardenthalpieänderungen werden meist für chemische Reaktionen, Phasenumwandlungen oder auch für Mischungsvorgänge angegeben. Für chemische Elemente in ihrem stabilsten Zustand (z.B. H_2 , N_2 , Li, ...) sind die Standardbildungsenthalpien definitionsgemäß Null.

Ist ΔH_B^0 von allen in der Reaktion vorkommenden chemischen Verbindungen bekannt, so kann die Standardreaktionsenthalpie ΔH_R^0 mit Hilfe des Satzes von Hess errechnet werden:

$$\Delta H_R^0 = \sum_{\text{Produkte}} \nu_i \cdot \Delta H_{B_i}^0 - \sum_{\text{Edukte}} \nu_i \cdot \Delta H_{B_i}^0 \quad (2.6)$$

$\Delta H_R^0 > 0$ Wärme muss zugeführt werden

$\Delta H_R^0 < 0$ Wärme wird frei

ν_i Stöchiometrischer Koeffizient

$\Delta H_{B_i}^0$ Änderung der molaren Standardbildungsenthalpie einer Verbindung

Die Standardreaktionsenthalpie ergibt sich somit aus der Differenz der Standardbildungsenthalpien von Reaktionsprodukten und Reaktionsedukten multipliziert mit ihren jeweiligen stöchiometrischen Koeffizienten. Nach dem Satz von Hess setzt sich die Standardreaktionsenthalpie eines Gesamtprozesses, unabhängig vom Reaktionsweg, additiv aus den Reaktionsenthalpien der Einzelprozesse zusammen. Die Anwendung des Satzes von Hess erfolgt meist bei experimentell schwer bestimmbareren Reaktionsenthalpien, wobei diese durch die Addition der einzelnen Reaktionswege errechnet werden.

2.3.1.2 Standardreaktionsentropie

Die Standardreaktionsentropie ΔS_R^0 wird analog zur Standardreaktionsenthalpie ΔH_R^0 über den Satz von Hess ermittelt. Anstatt der Standardbildungsenthalpien werden die Standardbildungsentropien ΔS_B^0 in kJ/mol K aus den Stoffdatenbanken entnommen.

$$\Delta S_R^0 = \sum_{\text{Produkte}} \nu_i \cdot \Delta S_{B_i}^0 - \sum_{\text{Edukte}} \nu_i \cdot \Delta S_{B_i}^0 \quad (2.7)$$

2.3.1.3 Gibbs-Energie (Freie Enthalpie)

Im Gegensatz zur Reaktionsenthalpie ΔH_R liefert die Gibbs-Energie Informationen, ob ein Prozess freiwillig abläuft. Die Änderung der Zusammensetzung im Laufe der Reaktion wird durch die Reaktionslaufzahl ξ (Reaktionsfortschritt) angegeben. Die Reaktionslaufzahl ist ein Maß dafür, wie viel Mol einer bestimmten Reaktion umgesetzt wurden. Abbildung 2-14 zeigt die Änderung der Steigung bei Fortschreiten der Reaktion, die bei konstanter Temperatur und konstantem Druck abläuft.

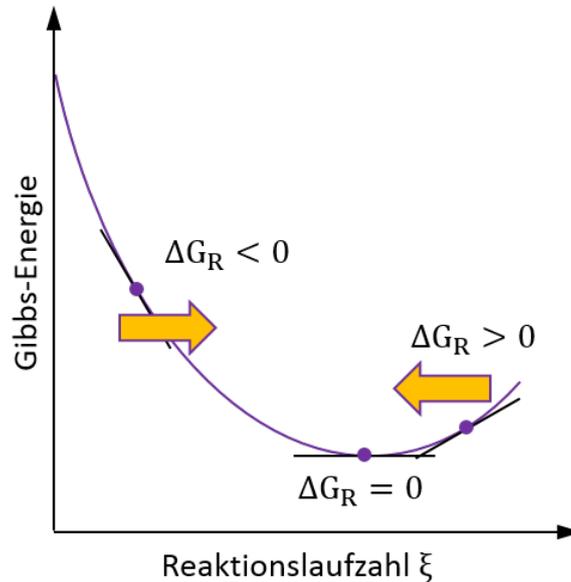


Abbildung 2-14: Gibbs-Energie in Abhängigkeit der Reaktionslaufzahl nach Atkins und de Paula (2006)

Ist die Gibbs-Energie einer Reaktion bekannt, so können hinsichtlich der Reaktionsrichtung drei Fälle unterschieden werden:

- $\Delta G_R < 0$: Eine Reaktion läuft spontan ab und die freiwerdende Gibbs-Energie steht als Nutzenergie zur Verfügung. Eine freiwillig ablaufende Reaktion wird als exergone Reaktion bezeichnet.
- $\Delta G_R = 0$: Sowohl Edukte als auch Produkte befinden sich im chemischen Gleichgewicht und die Reaktion hat keine thermodynamische Triebkraft mehr.
- $\Delta G_R > 0$: Die Reaktion läuft unfreiwillig ab und dies wird als endergone Reaktion bezeichnet. Um den Ablauf der Reaktion dennoch zu gewährleisten, muss Energie zugeführt werden. (Schwister & Leven, 2014)

D.h. erfolgen die Zustandsänderungen unter isobaren und isothermen Bedingungen, kann das thermodynamische Gleichgewicht relativ einfach mit Hilfe der Gibbs-Energie bestimmt werden. Die Gibbs-Energie ist allgemein wie folgt definiert:

$$G = H - T \cdot S \quad (2.8)$$

Aus der Differentiation von Gleichung 2.8 resultiert:

$$dG = dH - T dS - S dT \quad (2.9)$$

Erfolgt die Zustandsänderung mit konstanter Temperatur und konstantem Druck, so vereinfacht sich der Ausdruck zu:

$$dG = dH - T dS = dH - dQ_{rev} = dH - (dH - Vdp) = 0 \quad (2.10)$$

In einem Brennstoffzellensystem sind mehrere Spezies an den chemischen Reaktionen beteiligt. Die freie Gibbs-Energie ist daher auch von der Stoffmenge der beteiligten Substanzen abhängig:

$$G = G(T, p, n_1, n_2, n_3, n_4, \dots, n_c) \quad (2.11)$$

Bei der Bestimmung des totalen Differenzials der gesamten freien Gibbs-Energie muss daher auch die stoffmengenabhängige Änderung berücksichtigt werden:

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{p, n_i} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{T, n_i} dp + \sum_{i=1}^c \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, p, n_j, j \neq i} dn_i \quad (2.12)$$

Die partielle Ableitung der freien Gibbs-Energie in Richtung der Stoffmenge i wird als chemisches Potenzial der Komponente i bezeichnet:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, p, n_j, j \neq i} \quad (2.13)$$

Bei konstantem Druck und konstanter Temperatur muss für das chemische Gleichgewicht somit folgende Bedingung erfüllt sein:

$$dG = \sum_{i=1}^c \mu_i dn_i = 0 \quad (2.14)$$

Für mehrere gleichzeitig ablaufende Reaktionen kann die Änderung der Stoffmenge der Spezies i für die Reaktion j in Abhängigkeit der Reaktionskoordinate ε dargestellt werden (vgl. Klein und Nellis, 2012):

$$dn_i = \sum_{j=1}^r \nu_{i,j} d\varepsilon_j \quad \text{für } r \text{ Gleichgewichtsreaktionen} \quad (2.15)$$

Somit kann die Änderung der freien Gibbs-Energie in Abhängigkeit der stöchiometrischen Koeffizienten im Gleichgewichtszustand und bei konstantem Druck sowie bei konstanter Temperatur wie folgt dargestellt werden:

$$dG = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^r \nu_{i,j} \mu_i d\varepsilon_j = 0 \quad (2.16)$$

Diese Bedingung kann nur dann eingehalten werden, wenn für jede Reaktion

$$\sum_{i=1}^c \nu_{i,j} \mu_i = 0 \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.17)$$

gilt (vgl. Klein und Nellis, 2012).

Chemisches Gleichgewicht für Gasgemische

Zur Ermittlung des chemischen Gleichgewichtes einer Reaktion wird zunächst die Gibbs-Energie der Reaktion berechnet. Ist diese bekannt, so muss diejenige Spezies- bzw. Fraktionsverteilung der Produkte bestimmt werden, bei der die freie Gibbs-Energie den minimalen Wert erreicht. Chemisches Gleichgewicht liegt somit dann vor, wenn die Änderung der Gibbs-Energie (freie Reaktionsenthalpie) gleich Null ist bzw. die Gleichung (2.17) erfüllt wird. Zusätzlich zur Atombilanz können aus dieser Bedingung Gleichungen gewonnen werden, mit deren Hilfe die unbekanntenen Fraktionsanteile der Produkte bestimmt werden können.

Chemisches Gleichgewicht für ideale Gasgemische

Zur Bestimmung des chemischen Gleichgewichts eines Gasgemisches müssen die chemischen Potenziale der einzelnen Gaskomponenten ermittelt werden. Besteht das Gasgemisch aus idealen Gasen mit einer einheitlichen Temperatur, kann das chemische Potenzial über die Partialdrücke und die Temperatur berechnet werden:

$$\mu_i(T, p) = \mu_{i,pure}(T, p_i) = \bar{g}_i(T, p_i) = \bar{h}_i - T \bar{s}_i \quad (2.18)$$

Unter Verwendung der idealen Gasgleichung und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik lässt sich das chemische Potenzial wie folgt bestimmen:

$$\mu_i = \mu_i^0 + R_{univ} T \ln\left(\frac{y_i p}{p_0}\right) \quad (2.19)$$

Dabei ist μ_i^0 das chemische Potenzial der Spezies i für die Temperatur T und den Referenzdruck p_0 . Das chemische Potenzial entspricht somit der molaren spezifischen freien Gibbs-Energie \bar{g}_i^0 bei der Temperatur T und dem Referenzdruck p_0 .

$$\mu_i^0 = \bar{g}_i^0 = \bar{h}_i^0 - T \bar{s}_i^0 \quad (2.20)$$

Somit kann die Gleichgewichtsbedingung für ein ideales Gasgemisch wie folgt vereinfacht werden:

$$\sum_{i=1}^c \nu_{i,j} \mu_i = 0 \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.21)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2.19) und (2.20) in Gleichung (2.21) erhält man:

$$\sum_{i=1}^c v_{i,j} \left[\bar{g}_i^0 + R_{univ} T \ln \left(\frac{y_i p}{p_0} \right) \right] = 0 \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.22)$$

Durch Umformen kann die Gleichung (2.22) wie folgt dargestellt werden:

$$\sum_{i=1}^c v_{i,j} \bar{g}_i^0 = -R_{univ} T \sum_{i=1}^c \ln \left(\frac{y_i p}{p_0} \right)^{v_{i,j}} \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.23)$$

Der linke Ausdruck wird als Gibbs'sche Standard Reaktions-Energie oder als Freie Standard Reaktions-Enthalpie des Gasgemisches der Reaktion j bezeichnet:

$$\Delta G_j^0 = \sum_{i=1}^c v_{i,j} \bar{g}_i^0 \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.24)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Gibbs'sche Standard-Reaktions-Energie ΔG_j^0 nur eine Funktion der Temperatur ist. Durch Anwenden der logarithmischen Rechenregeln erhält man:

$$\sum_{i=1}^c \ln \left(\frac{y_i p}{p_0} \right)^{v_{i,j}} = \ln \left[\prod_{i=1}^c \left(\frac{y_i p}{p_0} \right)^{v_{i,j}} \right] \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.25)$$

$$\Delta G_j^0 = -R_{univ} T \ln \left[\underbrace{\prod_{i=1}^c \left(\frac{y_i p}{p_0} \right)^{v_{i,j}}}_{K_j} \right] \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.26)$$

Der Ausdruck innerhalb der rechteckigen Klammer in Gleichung (2.26) wird als Gleichgewichtskonstante der Reaktion j bezeichnet:

$$K_j = \prod_{i=1}^c \left(\frac{y_i p}{p_0} \right)^{v_{i,j}} \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.27)$$

Damit kann die Gleichgewichtsbedingung über die Gibbs'sche Standard Reaktions-Energie ΔG_j^0 und der Gleichgewichtskonstanten definiert werden:

$$\Delta G_j^0 = -R_{univ} T \ln(K_j) \quad \text{für } j = 1 \dots r \quad (2.28)$$

Die Gleichgewichtskonstante K_j hat für jede beliebige Reaktion einen charakteristischen Wert, der bei idealen Gasen nur temperaturabhängig ist und die Lage des Gleichgewichts eindeutig beschreibt. Mit Hilfe der Gleichgewichtskonstanten K_j kann somit die Lage des chemischen Gleichgewichts bestimmt werden. Wenn sich eine Reaktion im chemischen Gleichgewicht befindet, bedeutet dies nicht, dass ein vollständiger Reaktionsstillstand vorliegt. Es laufen weiterhin Reaktionen ab, die jedoch das Gleichgewicht der Reaktion nicht beeinflussen, da die Geschwindigkeit von Hin- und Rückreaktion exakt gleich ist (dynamisches Gleichgewicht). Auf welcher Seite das Gleichgewicht einer chemischen Reaktion liegt, kann mit Hilfe der Gleichgewichtskonstanten K ausgesagt werden (vgl. Tabelle 2-7).

Tabelle 2-7: Aussagen über das Reaktionsgleichgewicht

Wert von K_j	Lage des Gleichgewichts
$K_j \gg 1$	Praktisch vollständig auf der Seite der Produkte
$K_j \ll 1$	Praktisch vollständig auf der Seite der Edukte

Ist der Wert der Gleichgewichtskonstante sehr groß und positiv, so verschiebt sich das Gleichgewicht der Reaktion auf die Seite der Produkte. Weist K_j hingegen einen sehr kleinen Wert auf, so liegt das Gleichgewicht auf der Seite der Edukte.

2.3.2 Reformiermodell

2.3.2.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Wie im Abschnitt 2.2.2 angeführt, können mehrere Verfahren zur Reformierung in SOFC-Systemen eingesetzt werden. Um alle relevanten Systemverschaltungen nachbilden zu können, ist ein möglichst allgemeingültiger Modellansatz zu wählen. Dieser Modellansatz sollte sowohl die Simulation der Dampfreformierung (steam reforming – SR), die katalytische partiellen Oxidation (catalytic partial oxidation – CPOX), die Oxidative Dampfreformierung (OSR) als auch die Anodenabgasrückführung ermöglichen. Darüber hinaus sollte eine Abschätzung der Kohlenstoffbildungsgrenzen ermöglicht werden. Aus diesem Grund wurden zwei Simulationsmodelle entwickelt. Das erste Reformiermodell basiert auf den chemischen Gleichgewichtsbedingungen idealer Gasgemische und das zweite Modell berücksichtigt zusätzlich die Bildung von festem Kohlenstoff. Die letztere Modellvariante besitzt einen deutlich höheren numerischen Aufwand und wird daher nur zur Bestimmung der sicheren Betriebsparameter (Vermeidung der Kohlenstoffbildung) verwendet. Das Reformiermodell für ideale Gasgemische ist hingegen numerisch effizienter und wird für die Gesamtsystemsimulationen herangezogen. In den folgenden Abschnitten werden die beiden Modellansätze kurz beschrieben.

2.3.2.2 Reformiermodell für ideale Gasgemische

Um alle relevanten Reformierungsprozesse abbilden zu können, ermöglicht das Modell am Reformereinlass die Stoffströme der Gasspezien CH_4 , H_2O , CO , CO_2 , O_2 und N_2 vorzugeben. Aus der Atombilanz erhält man somit vier Gleichungen. Eine zusätzliche

Bestimmungsgleichung für den Sauerstoff erhält man aufgrund der unterstöchiometrischen Verbrennung. Darüber hinaus liefert der Energieerhaltungssatz eine weitere Bilanzgleichung. Zur Schließung des Gleichungssystems sind noch zwei weitere Bestimmungsgleichungen erforderlich. Diese erhält man über die chemische Gleichgewichtsbedingung für die Water-Gas-Shift Reaktion (WGS) und die Steam Reforming Reaktion (SR).

Für die Gleichgewichtskonstante der Wassergas-Shift-Reaktion (WGS) folgt:

$$K_{WGS} = \frac{y_{CO_2} \cdot y_{H_2}}{y_{CO} \cdot y_{H_2O}} \quad (2.29)$$

Für die WGS-Reaktion errechnet sich die Gibbs'sche Standard Reaktions-Energie ΔG_{WGS}^0 mit:

$$\Delta G_{WGS}^0 = G_{H_2}^0 + G_{CO_2}^0 - (G_{CO}^0 + G_{H_2O}^0) \quad (2.30)$$

Damit ist die Gleichgewichtsbedingung für die WGS-Reaktion mit

$$\ln(K_{WGS}) = -\frac{\Delta G_{WGS}^0}{R_{univ} T} \quad (2.31)$$

definiert.

Aufgrund der unterstöchiometrischen Oxidation ist kein Sauerstoff im Produktgas enthalten. Somit berechnet sich die Gleichgewichtskonstante für die SR-Reaktion mit:

$$K_{SR} = \frac{y_{H_2}^3 \cdot y_{CO}}{y_{H_2O} \cdot y_{CH_4}} \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^2 \quad (2.32)$$

Für die SR-Reaktion errechnet sich die Gibbs'sche Standard Reaktions-Energie ΔG_{SR}^0 mit:

$$\Delta G_{SR}^0 = 3 G_{H_2}^0 + G_{CO}^0 - (G_{CH_4}^0 + G_{H_2O}^0) \quad (2.33)$$

Damit ist die Gleichgewichtsbedingung für die SR-Reaktion mit

$$\ln(K_{SR}) = -\frac{\Delta G_{SR}^0}{R_{univ} T} \quad (2.34)$$

definiert.

2.3.2.3 Reformiermodell inkl. Berücksichtigung des festen Kohlenstoffs

Die Modellierung des Reformers unter Berücksichtigung des festen Kohlenstoffs erfolgte über die Minimierung der Gibbs-Energie. Die dazu notwendigen Stoffdaten wurden mit Hilfe der NIST-JANAF Stoffdatenbank (Chase, 1998) ermittelt. Die numerische Lösung des daraus resultierenden nichtlinearen Gleichungssystems erfolgte mit Matlab®. Um die Bildung des festen Kohlenstoffs analysieren und daraus die Betriebsgrenzen des Refomers ableiten zu können, wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt. Die Ergebnisse können in Form von Konturbildern für unterschiedliche Reformertemperaturen dargestellt werden und ermöglichen somit eine genaue Analyse der Betriebsgrenzen des SOFC-Systems. Beispielhaft sind in den nachstehenden Abbildungen die Bildungsrate von festem Kohlenstoff bei Reformierung von Methan ($\dot{n}_{CH_4} = 1 \text{ mol/s}$) für unterschiedliche Temperaturen, Luftüberschusszahlen und Steam-to-Carbon-Verhältnisse dargestellt.

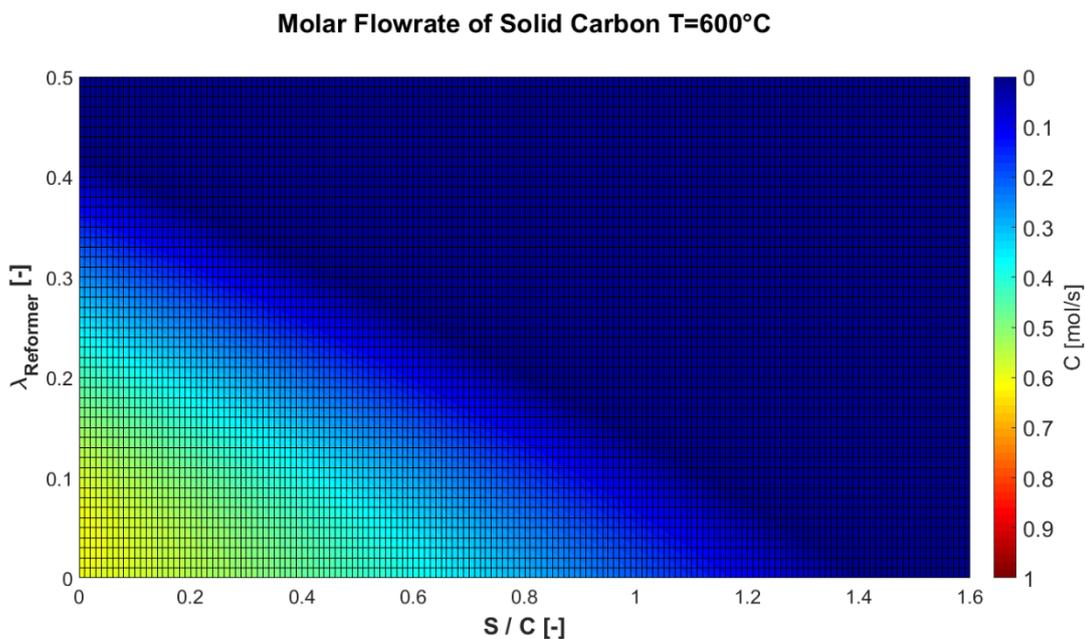


Abbildung 2-15: Bildungsrate von festem Kohlenstoff bei 600°C und $\dot{n}_{CH_4} = 1 \text{ mol/s}$

Molar Flowrate of Solid Carbon T=750°C

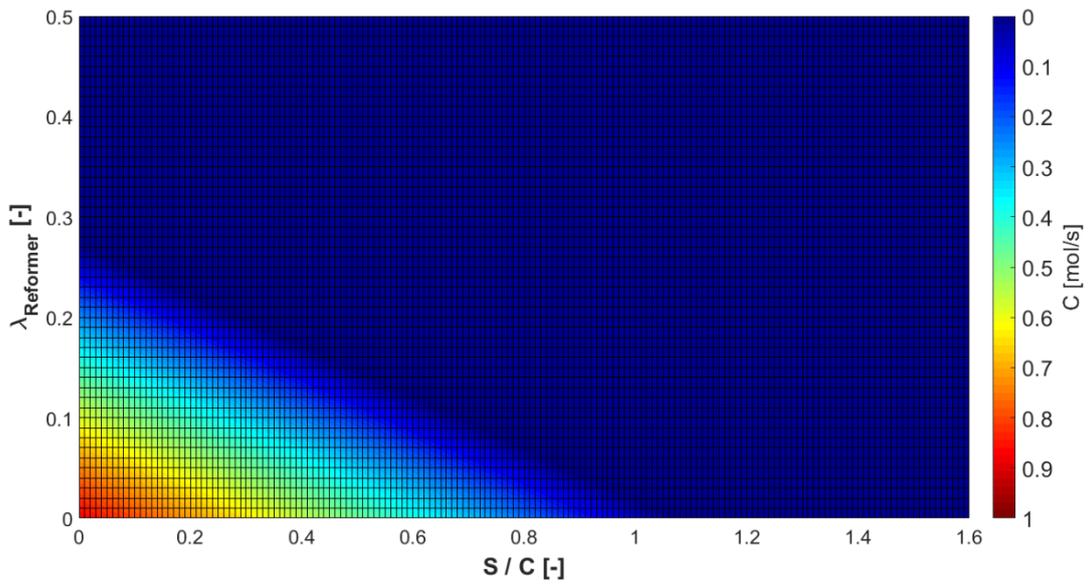


Abbildung 2-16: Bildungsrate von festem Kohlenstoff bei 750°C und $\dot{n}_{\text{CH}_4} = 1 \text{ mol/s}$

Molar Flowrate of Solid Carbon T=900°C

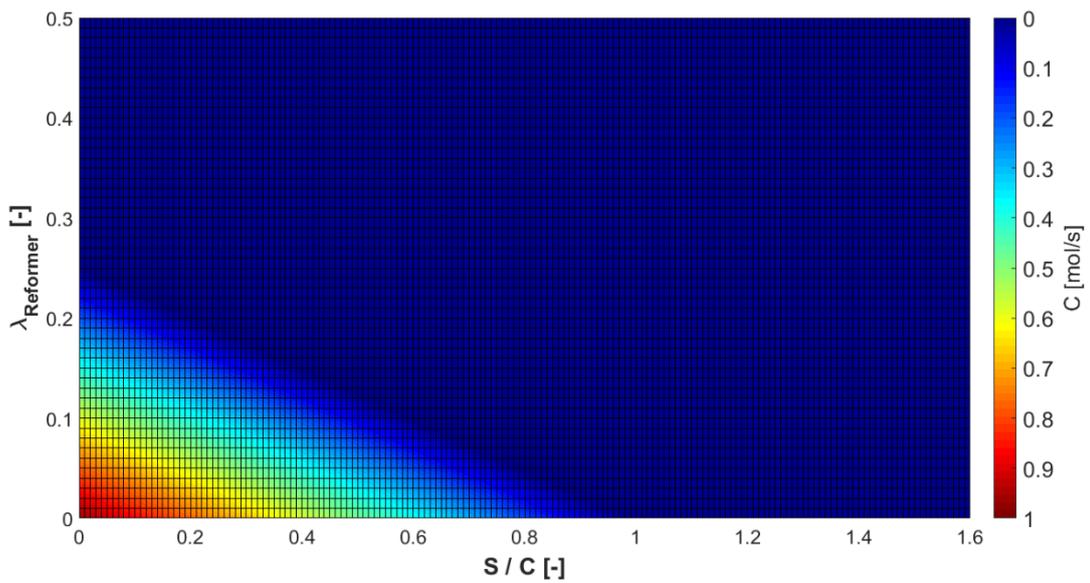


Abbildung 2-17: Bildungsrate von festem Kohlenstoff bei 900°C und $\dot{n}_{\text{CH}_4} = 1 \text{ mol/s}$

2.3.3 SOFC-Stackmodellierung

2.3.3.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Für die Gesamtsystemsimulation einer SOFC-Anlage ist auch ein Modell für die elektrochemischen Reaktionen im Stack erforderlich. Innerhalb des Projektes wurden dazu drei unterschiedliche Modelle entwickelt. Zur Analyse der Temperaturverhältnisse im Stack und im Bereich des Manifolds wurden dreidimensionale CFD Simulationen durchgeführt. Für die Systemsimulation wurden ein eindimensionales Modell sowie ein White-Box-Modell entwickelt. Das eindimensionale Modell berücksichtigt die Reaktionskinetik der SR-Reaktion entlang des Anodenkanals. Das White-Box-Modell verwendet die chemischen Gleichgewichtsbedingungen zur Bestimmung der Anodenaustrittsspezienverteilung. Die Grundlage aller Modellansätze stellt dabei die reversible elektrochemische Arbeit bzw. die reversible Zellenspannung dar. In den folgenden Abschnitten werden daher die thermodynamischen Grundlagen der reversiblen elektrochemischen Arbeit der SOFC-Brennstoffzelle dargestellt und die entwickelten Modelle beschrieben. Abschließend erfolgt eine Validierung der Modelle, die für die SOFC-Systemanalysen verwendet wurden.

2.3.3.2 Reversible elektrochemische Arbeit und Zellenspannung

Die Grundlage für die Funktion einer Brennstoffzelle bildet eine räumlich getrennte Redoxreaktion, die an den Grenzflächen zwischen der jeweiligen Elektrode und dem Elektrolyten auftritt. Die Zelle selbst besteht aus einem ionenleitenden und zugleich gasdichten Elektrolyten. Bei Festoxid-Brennstoffzellen kann nicht nur Wasserstoff, sondern auch Kohlenmonoxid oder Methan umgesetzt werden. Abbildung 2-18 zeigt das Prinzip einer Festoxid-Brennstoffzelle.

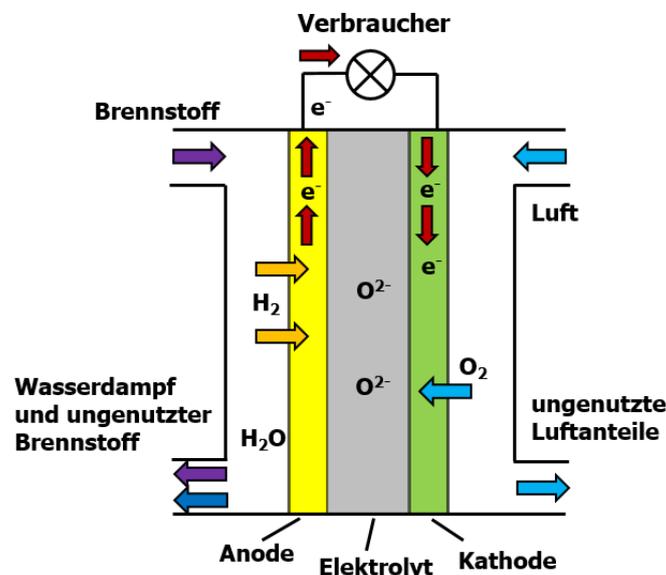


Abbildung 2-18: Funktionsschema einer Festoxid-Brennstoffzelle mit Wasserstoff

Der kathodenseitig zugeführte Sauerstoff diffundiert zunächst in Richtung Anode. Im Falle des Wasserstoffs erfolgt mit der Reduktion des Sauerstoffs an der Grenzfläche zwischen Kathode und Elektrolyten die Aufnahme von 2 Elektronen, was in weiterer Folge eine Ionisierung des Sauerstoffs bewirkt. In Abbildung 2-19 ist die Elektronenkonfiguration des Sauerstoffs an der Kathode dargestellt, ausgehend vom Neutralzustand des O-Atoms.

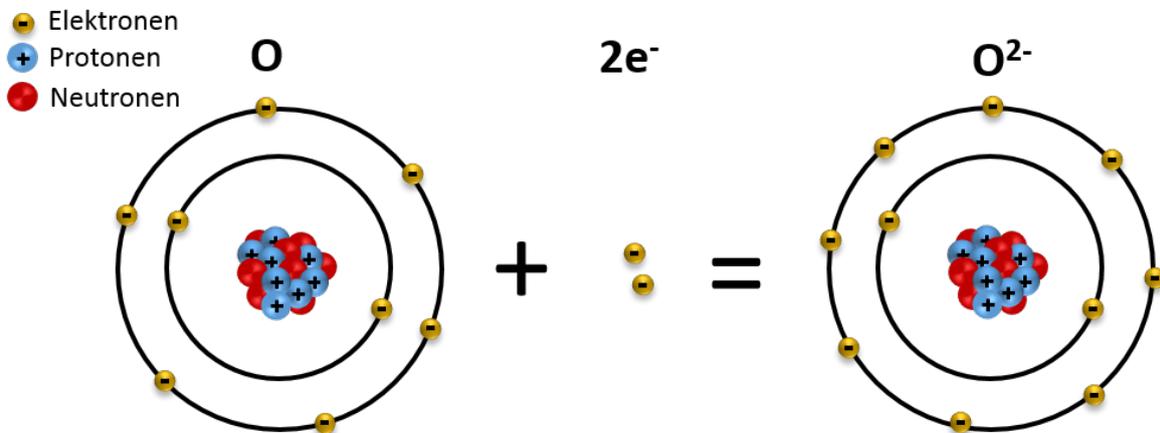


Abbildung 2-19: Reduktion von Sauerstoff an der Kathode

Es resultiert für die Kathodenseite somit:



Da durch die Materialzusammensetzung des Elektrolyten nur Ionen diffundieren können, gelangen die Sauerstoff-Ionen bis zur Grenzfläche von Elektrolyt und Anode. Die an der Grenzfläche auftretende Oxidation der Sauerstoff-Ionen mit dem Brennstoff (in diesem Fall Wasserstoff) führt zur Abgabe von 2 Elektronen.

Für die Oxidation an der Anode ergibt sich:



Als Reaktionsprodukt entsteht Wasserdampf, der neben den ungenutzten Anteilen von Brennstoff und Luft abgeführt wird. Für die Redoxreaktion der Brennstoffzelle kann somit angeschrieben werden:



Mit der Oxidation des Wasserstoffs entsteht ein Elektronenfluss, der über einen externen Stromkreislauf zum Verbraucher weitergeleitet wird und damit elektrische Arbeit zur Verfügung

stellt. Zudem kann die durch den exothermen Reaktionsvorgang freiwerdende Abwärme für die interne Reformierung und für Heizzwecke genutzt werden.

Die Bestimmung der zugeführten (Elektrolysebetrieb) und abgeführten (Brennstoffzellenbetrieb) elektrochemischen Arbeit kann durch den ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik abgeleitet werden. Demnach gilt:

$$dQ_{rev} = T dS = dU - dW_{rev} = dU + p dV - dW_{ele} \quad (2.38)$$

Dabei beinhaltet die reversible Arbeit die Volumenänderungsarbeit und die elektrische Arbeit.

Durch Substitution von dU über die Definitionsgleichung der Enthalpie und durch die Substitution von dS über die Definitionsgleichung der freien Gibbs-Energie

$$dH = dU + p dV + V dp \quad \text{und} \quad dG = dH - T dS - S dT \quad (2.39)$$

erhält man

$$dW_{ele} = dG + S dT - V dp \quad (2.40)$$

Wird eine isotherme und isobare Zustandsänderung in der Brennstoffzelle vorausgesetzt, ist die zu- oder abgeführte elektrische Arbeit nur mehr von der Änderung der freien Gibbs-Energie abhängig.

$$dW_{ele} = dG \quad (\text{gilt für } p=\text{konst. und } T=\text{konst.}) \quad (2.41)$$

Die Änderung der freien Gibbs-Energie kann bei idealem Gasverhalten über das chemische Potenzial (vgl. Abschnitt 2.3.1.3) bestimmt werden:

$$\Delta G = \sum_{i=1}^c \nu_i \mu_i = \sum_{i=1}^c \nu_i \left[\bar{g}_i^0 + R_{univ} T \ln \left(\frac{y_i p}{p_0} \right) \right] \quad (2.42)$$

Die molare spezifische freie Gibbs-Energie \bar{g}_i^0 ist wiederum von der Temperatur T und dem Referenzdruck p_0 abhängig (vgl. Gleichungen (2.19) bis (2.22)). SOFC-Brennstoffzellen können neben H_2 auch CO und CH_4 umsetzen. Aufgrund der schnellen SR- und WGS-Reaktion und der schnellen H_2 -Reaktionskinetik kann der Umsatz vernachlässigt werden. Für die Bestimmung der elektrochemischen Arbeit wird daher nur die nachstehende Reaktion betrachtet:



Somit ergibt sich folgende Bestimmungsleichung für die Änderung der freien Gibbs-Energie:

$$\Delta G = \sum_{i=1}^c \nu_i \mu_i = \bar{g}_{H_2O}^0 + R_{univ} T \ln\left(\frac{y_{H_2O} p}{p_0}\right) - \left(\bar{g}_{H_2}^0 + R_{univ} T \ln\left(\frac{y_{H_2} p}{p_0}\right) + \frac{1}{2} \bar{g}_{O_2}^0 + R_{univ} T \ln\left(\frac{y_{O_2} p}{p_0}\right) \right) \quad (2.44)$$

Daraus kann die Änderung für die freie Gibbs-Energie wie folgt zusammengefasst werden:

$$\Delta G = \bar{g}_{H_2O}^0 - \left(\bar{g}_{H_2}^0 + \frac{1}{2} \bar{g}_{O_2}^0 \right) + R_{univ} T \ln\left(\frac{y_{H_2O}}{y_{H_2} \cdot y_{O_2}^{0,5}} \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{0,5} \right) \quad (2.45)$$

Bleiben der Druck und die Temperatur konstant, kann somit die zu- oder abgeführte elektrische Arbeit berechnet werden:

$$\Delta W_{ele} = \bar{g}_{H_2O}^0 - \left(\bar{g}_{H_2}^0 + \frac{1}{2} \bar{g}_{O_2}^0 \right) + R_{univ} T \ln\left(\frac{y_{H_2O}}{y_{H_2} \cdot y_{O_2}^{0,5}} \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{0,5} \right) \quad (2.46)$$

Die elektrische Arbeit basiert auf einer Ladungsbewegung, die aus einer elektrischen Potentialdifferenz resultiert. Dahingehend kann die elektrische Arbeit über das Produkt von Potentialdifferenz und der Ladung berechnet werden:

$$W_{ele} = U \cdot Q \quad (2.47)$$

W_{ele} abgegebene elektrische Arbeit in J

U Potentialdifferenz in V

Q elektrische Ladung in C

Wenn angenommen wird, dass die Ladungen von Elektronen bewegt werden, dann folgt:

$$Q = n_e \cdot F \quad (2.48)$$

n_e Anzahl der Elektronen

F Faraday-Konstante

Die Gleichung (2.46) ist hinsichtlich der Arbeitsrichtung (zu- oder abgeführt) allgemeingültig und kann daher für den Brennstoffzellenbetrieb und gleichzeitig für den Elektrolysebetrieb verwendet werden. Da im Brennstoffzellenbetrieb die elektrische Arbeit abgegeben wird, ergeben sich negative Werte für ΔW_{ele} . Für die praktische Anwendung ist es daher sinnvoll ein negatives Vorzeichen voranzustellen. Wird dies berücksichtigt, kann die reversible Zellenspannung aus der Kombination von Gleichung (2.46), (2.47) und (2.48) wie folgt zusammengefasst werden:

$$U = -\frac{\Delta G}{n_e \cdot F} \quad (2.49)$$

Daraus ergibt sich für die reversible Zellenspannung folgender Zusammenhang:

$$U = -\frac{\bar{g}_{H_2O}^0 - \left(\bar{g}_{H_2}^0 + \frac{1}{2}\bar{g}_{O_2}^0\right) + R_{univ} T \ln\left(\frac{y_{H_2O}}{y_{H_2} \cdot y_{O_2}^{0,5}} \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{0,5}\right)}{n_e \cdot F} \quad (2.50)$$

Dieser Zusammenhang wird auch als Nernst-Gleichung bezeichnet. Der vom Partialdruck unabhängige Term ist lediglich von der zu Grunde gelegten elektrochemischen Reaktion und von der Temperatur abhängig. Somit lässt sich für eine bestimmte Betriebstemperatur und Gaszusammensetzung die Nernstspannung wie folgt vereinfachen:

$$U_N = U_0 - \frac{R_{univ} T}{n_e \cdot F} \ln\left(\frac{y_{H_2O}}{y_{H_2} \cdot y_{O_2}^{0,5}} \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{0,5}\right) \quad (2.51)$$

Die Nernstspannungen für unterschiedliche Brennstoffe, Drücke und Temperaturen sind in der Tabelle 2-8 zusammengefasst:

Tabelle 2-8: Nernstspannungen unterschiedlicher Brennstoffe

	Brennstoff		
	H ₂	CO	CH ₄
n _e	2	2	8
U ₀ [V] bei 25°C	1,185	1,333	1,037
U _N [V] bei 1000°C und 1 bar [V]	0,96	0,896	1,031
U _N [V] bei 25°C und 0,1 bar [V]	1,17	1,318	1,037
U _N [V] bei 1000°C und 0,1 bar [V]	0,897	0,833	1,031
U _N [V] bei 25°C und 10 bar [V]	1,199	1,348	1,037
U _N [V] bei 1000°C und 10 bar [V]	1,024	0,96	1,031

Die tatsächlich nutzbare Zellenspannung wird durch eine Vielzahl von Spannungsminderungseffekten beeinflusst. Prinzipiell wird dabei zwischen Verlusten, die vom Brenngasumsatz abhängig und unabhängig sind, unterschieden. Brenngasumsatz-unabhängige Verluste sind z.B. Verluste, die durch Undichtigkeiten oder durch Elektronenleitung des Elektrolyten entstehen. Die vom Brenngasumsatz abhängigen Spannungsminderungseffekte werden vorrangig durch die Aktivierungs- und Konzentrationsverluste sowie durch die ohm'schen Verluste bestimmt. Die Aktivierungs- und Konzentrationsverluste berücksichtigen die Reaktions- und Durchtrittsverluste an den Grenzflächen der Elektrolyten sowie Verluste aufgrund der Gasdiffusion in den Elektroden. Die

ohm'schen Verluste entstehen u.a. durch den elektrischen Widerstand der Elektroden und durch den Ionenleitungswiderstand im Elektrolyten.

$$U_{\text{cell}} = U_N - \sum \eta_{\text{act}} - \sum \eta_{\text{conc}} - I R_{\text{cell}}(T) \quad (2.52)$$

Für die Berechnung der Aktivierungs- und Konzentrationsverluste sind in der Literatur mehrere Modellansätze verfügbar (Braun, 2002; Danilov und Tade, 2009; Fan et al., 2015; Heddrich, 2012; Kupecki et al., 2015; Megel et al., 2010; Razbani et al., 2013; Schmidt und Braun, 2012). Messungen haben aber gezeigt, dass eine starke Temperaturabhängigkeit vorliegt und daher die Verluste durch eine temperaturabhängige Funktion zusammengefasst werden können (vgl. Milewski et al., 2011). Befindet sich der Umsatzgrad unter ca. 85%, so kann die effektive Zellenspannung folgendermaßen ermittelt werden:

$$U_{\text{cell}} = U_N - I R_{\text{cell, ges}}(T) \quad (2.53)$$

Der temperaturabhängige Gesamtwiderstand der Zelle $R_{\text{cell, ges}}(T)$ muss experimentell bestimmt werden.

2.3.3.3 White-Box-Stack-Modell

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 Abbildung 2-20 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.

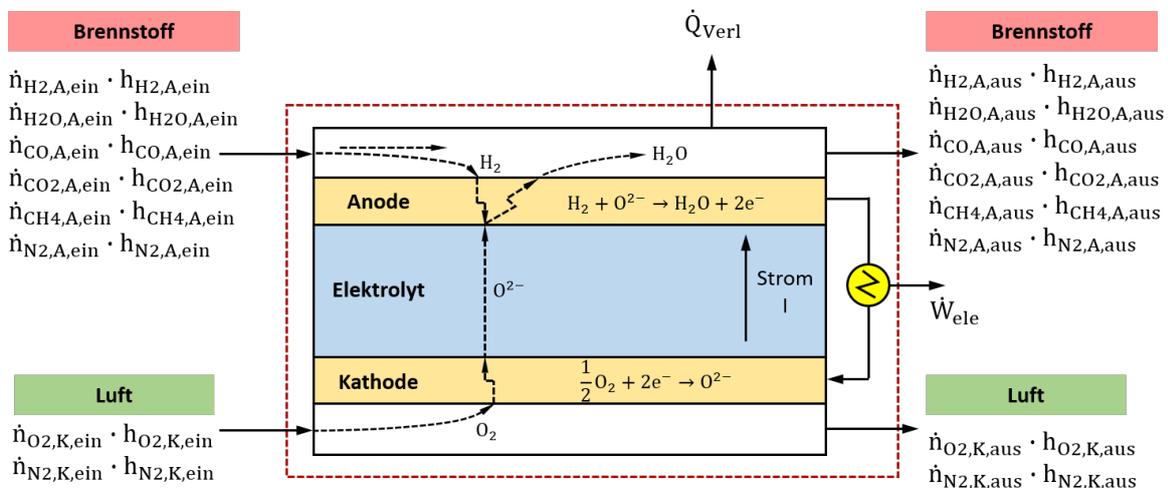


Abbildung 2-20: Stoff- und Energiebilanz der SOFC-Zelle

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

Kathodenseitig wird angenommen, dass die eingeleitete Luft aus den Stoffmengenanteilen 21 % Sauerstoff und 79 % Stickstoff besteht. Mit Hilfe von CFD-Simulationen konnte gezeigt

werden (vgl. Abschnitt 2.3.3.5), dass aufgrund der guten Wärmeleitung der Interkonnektoren sowie der Manifolds die Kathoden- und Anodenaustrittstemperaturen 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 Kathodenlufteintritts-temperatur über die Stackaustrittstemperatur. Die Vorgabe der Anodeneintrittstemperatur ergibt sich aus der Mindesttemperatur zur Vermeidung der Bildung von festem Kohlenstoff (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). 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. 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 (vgl. Abschnitt 2.3.3.5). 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 im Abschnitt 2.3.1.3 beschriebenen Berechnungsmethode zur Bestimmung des chemischen Gleichgewichts. Die numerische Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems erfolgte mit Hilfe von Matlab® und des Engineering Equation Solvers®. Für das Matlab-Modul wurden die Stoffdaten aus der NIST-JANAF Datenbank (Chase, 1998) und für das EES-Modul wurden die Stoffdaten der EES-Datenbank verwendet. Die Berücksichtigung der Degradation erfolgte über eine experimentelle Ermittlung der zeitlichen Änderung des ASR-Wertes. In der Tabelle 2-9 sind die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen elektrischen Leistungen für unterschiedliche Lastfälle und Betriebsstunden zusammengefasst.

Tabelle 2-9: Abweichungen des White-Box-Modells gegenüber der gemessenen Stack-Leistung.

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

2.3.3.4 Eindimensionales Stack-Modell

Das eindimensionale Stack-Modell wurde auf Basis der Arbeiten von Braun (2002) entwickelt. Das Modell berücksichtigt die Änderung der Stoffströme, der Temperatur, der Spannung und des elektrischen Stroms in Hauptströmungsrichtung. Dazu wird ein Kanal einer Zelle in diskrete Bilanzgebiete unterteilt, für diese die Stoff- und Energiebilanzen gebildet und damit die physikalischen und chemischen Größen gelöst (vgl. Abbildung 2-21). Die Wärmeleitung in x-Richtung wurde dabei mit dem Finiten Differenzenverfahren und quer zur x-Richtung mit Hilfe von Formfaktoren approximiert.

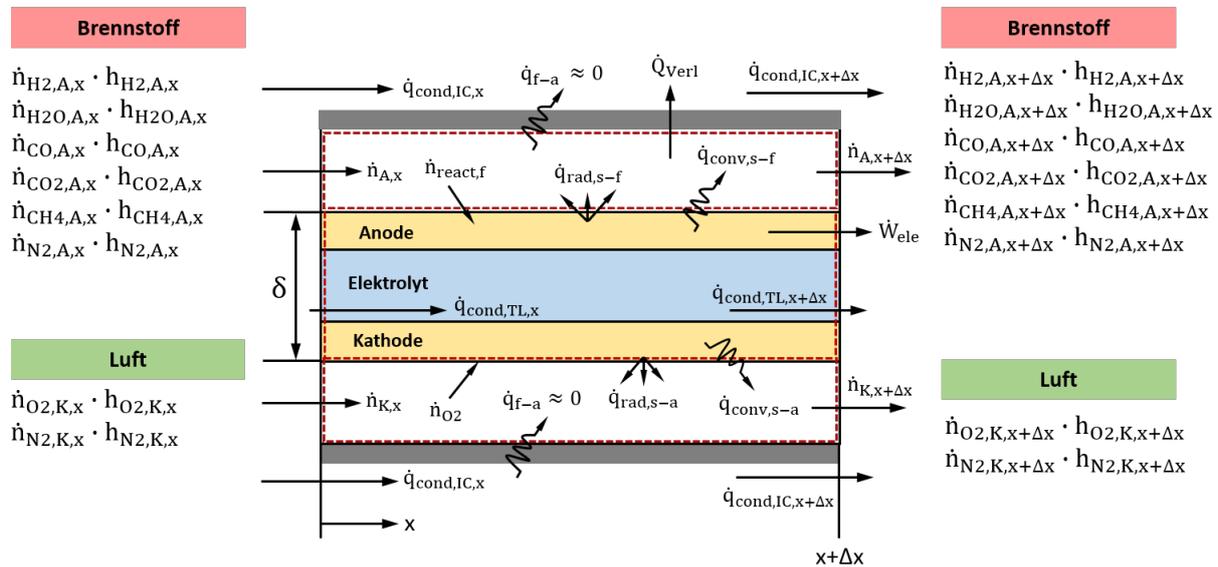


Abbildung 2-21: Stoff- und Energiebilanz eines diskreten Elements der SOFC-Zelle

Die Wärmestrahlung im Anoden- und Kathodenkanal wurde mit Hilfe des Helligkeitsverfahrens modelliert. Weitere Details zu den verwendeten Modellansätzen sind in Braun (2002) enthalten. In diesem Abschnitt werden daher nur die durchgeführten Modifikationen beschrieben. Die Wärmeverluste des Stacks wurden mittels Quelltermen in der Energiegleichung berücksichtigt. Wie beim White-Box-Modell wurden die elektrischen Verluste über eine temperaturabhängige, experimentell bestimmte Fit-Funktion modelliert und die Degradation über experimentell bestimmte Änderungsraten des ASR-Wertes berücksichtigt. Die Schließung des Gleichungssystems erfolgte mit Hilfe der im Abschnitt 2.3.1.3 beschriebenen Berechnungsmethode zur Bestimmung des chemischen Gleichgewichts. In der Tabelle 2-10 sind die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen elektrischen Leistungen für unterschiedliche Lastfälle und Betriebsstunden zusammengefasst.

Tabelle 2-10: Abweichungen des 1D Modells gegenüber der gemessenen Stack-Leistung.

Versuchsreihe	Betriebsstunden	Last	Abweichung
V01	863 h	100 %	-1,03 %
V02	2.351 h	100 %	2,16 %
V03	5.270 h	50 %	-0,31 %
V04	7.360 h	90 %	0,30 %
V05	15.568 h	100 %	-0,12 %
V06	15.664 h	75 %	0,18 %
V07	15.760 h	50 %	0,05 %

2.3.3.5 Dreidimensionales CFD-Modell

Für die dreidimensionale CFD-Simulation des SOFC-Stacks wurde das „Unresolved Electrolyte Modul“ des kommerziellen CFD-Code ANSYS Fluent® verwendet. Dabei wird der Elektrolyt als unendlich dünne, undurchlässige Schicht behandelt und somit räumlich nicht aufgelöst. Anode und Kathode werden als homogenes, poröses Medium approximiert. Der Anoden- und Kathodenkanal sowie die Interkonnektoren werden vollständig räumlich aufgelöst. Aufgrund der geringen Reynoldszahl im Anoden- und Kathodenkanal wurden für die Beschreibung der Impuls-, Wärme- und Stofftransportvorgänge nur molekulare Effekte berücksichtigt. Im Anodenkanal wurde zudem die WGS-Reaktion berücksichtigt.

Zur Berechnung der Aktivierungsverluste wird gewöhnlich die Butler-Volmer-Gleichung und für die Beschreibung der Leitungsverluste im Elektrolyt eine temperaturabhängige Fit-Funktion verwendet (Amiri et al., 2015; Bove und Ubertini, 2008; Van Biert, 2014). Eigene Validierungsrechnungen haben gezeigt, dass die vorgeschlagenen Modellansätze für die gegenständlich untersuchte Stack-Konfiguration zu größeren Abweichungen führen können. Aus diesem Grund wurden die aus Messungen ermittelten ASR-Werte verwendet, um eigene temperaturabhängige elektrische Widerstandsfunktionen abzuleiten. Diese wurden in das von ANSYS Fluent® bereitgestellte „Unresolved Electrolyte Modul“ via UDF-Programmierschnittstelle implementiert.

Um den numerischen Aufwand zu reduzieren, wurde die Geometrie des CFD-Modells stark vereinfacht. Das Berechnungsgitter umfasste lediglich einen Anoden- und einen Kathodenkanal. Die Transmissionswärmeverluste des Stackes wurden über eine stationäre eindimensionale U-Wert-Berechnung ermittelt und als Quellterm in der Energiegleichung berücksichtigt. Die Eintrittsgaszusammensetzung wurde mit Hilfe der im Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Gleichgewichtsthermodynamik für ideale Gasgemische ermittelt. Die Reformeraustrittstemperatur wurde mittels eigener Messungen bestimmt. Wie im Experiment wurde die Kathodenlufteintrittstemperatur über die Kathodenluftaustrittstemperatur geregelt. Die Degradation wurde über experimentell bestimmte Änderungsraten des ASR-Wertes approximiert. In der Abbildung 2-13 sind die Abweichungen zwischen den berechneten und

gemessenen elektrischen Leistungen für unterschiedliche Lastfälle und Betriebsstunden zusammengefasst.

Tabelle 2-11: Abweichungen des 3D-Modells gegenüber der gemessenen Stack-Leistung.

Versuchsreihe	Betriebsstunden	Last	Abweichung
V01	863 h	100 %	-1,58 %
V02	2.351 h	100 %	1,44 %
V03	5.270 h	50 %	0,40 %
V04	7.360 h	90 %	-0,36 %
V05	15.568 h	100 %	-0,63 %
V06	15.664 h	75 %	-0,03 %
V07	15.760 h	50 %	0,22 %

2.3.3.6 Zusammenfassender Vergleich der Stack-Modelle

In Tabelle 2-12 sind die ermittelten Abweichungen der einzelnen Stack-Modelle nochmals zusammengefasst. Die Abweichungen des White-Box-Modells liegen innerhalb einer Bandbreite zwischen -2,4 % bis +1,7 %. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt -0,46% und die Standardabweichung 1,62%. Die Abweichungen des 1D-Stack-Modells liegen innerhalb einer Bandbreite zwischen -1,0 % bis +2,2 %. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt -0,18% und die Standardabweichung 0,98%. Im Vergleich zum White-Box-Stack-Modell ermöglicht somit das 1D-Stack-Modell eine Verbesserung der Vorhersage-genauigkeit. Die Abweichungen des vereinfachten CFD-Modells liegen innerhalb einer Bandbreite zwischen -1,6 % bis +1,4 %. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt -0,08% und die Standardabweichung 0,94%. Im Vergleich zum 1D-Stack-Modell ermöglicht somit das vereinfachte CFD-Modell eine geringfügig verbesserte Vorhersagegenauigkeit.

Tabelle 2-12: Zusammenfassung der Abweichungen der einzelnen Stack-Modelle

Stack-Modell	Bandbreite	Mittelwert	Standardabweichung
White-Box-Modell	-2,4 % bis +1,7 %	-0,46 %	1,62 %
1D	-1,0 % bis +2,2 %	-0,18 %	0,98 %
3D vereinfachtes CFD Modell	-1,6 % bis +1,4 %	-0,08 %	0,94 %

Ein numerisch effizientes und stabiles Stack-Modell ist Grundvoraussetzung, um komplexe Gesamtsystemsimulationen und aufwendige Optimierungsrechnungen durchführen zu können. Das White-Box-Modell ist im Vergleich zum 1D- und 3D-Modell numerisch wesentlich stabiler und effizienter. Aus diesem Grund wurde trotz geringerer Genauigkeit das White-Box-Modell für die Gesamtsystemsimulation verwendet.

2.3.4 SOFC-Systemsimulation

Für die Gesamtsystemsimulation wurde ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem die in Abbildung 2-22 dargestellte Systemkonfiguration analysiert werden kann. Durch die Einbindung von Regulierventilen kann das Anodenabgasrezirkulationsverhältnis individuell eingestellt werden. Zudem kann der externe Reformer sowohl adiabatisch als auch nichtadiabatisch betrieben werden. Somit können alle im Abschnitt 2.2.2 angeführten Systemvarianten abgebildet und studiert werden. Die Umsetzung des SOFC-Simulationsmodells erfolgte in der Programmierumgebung EES (Engineering Equation Solver) und Matlab®.

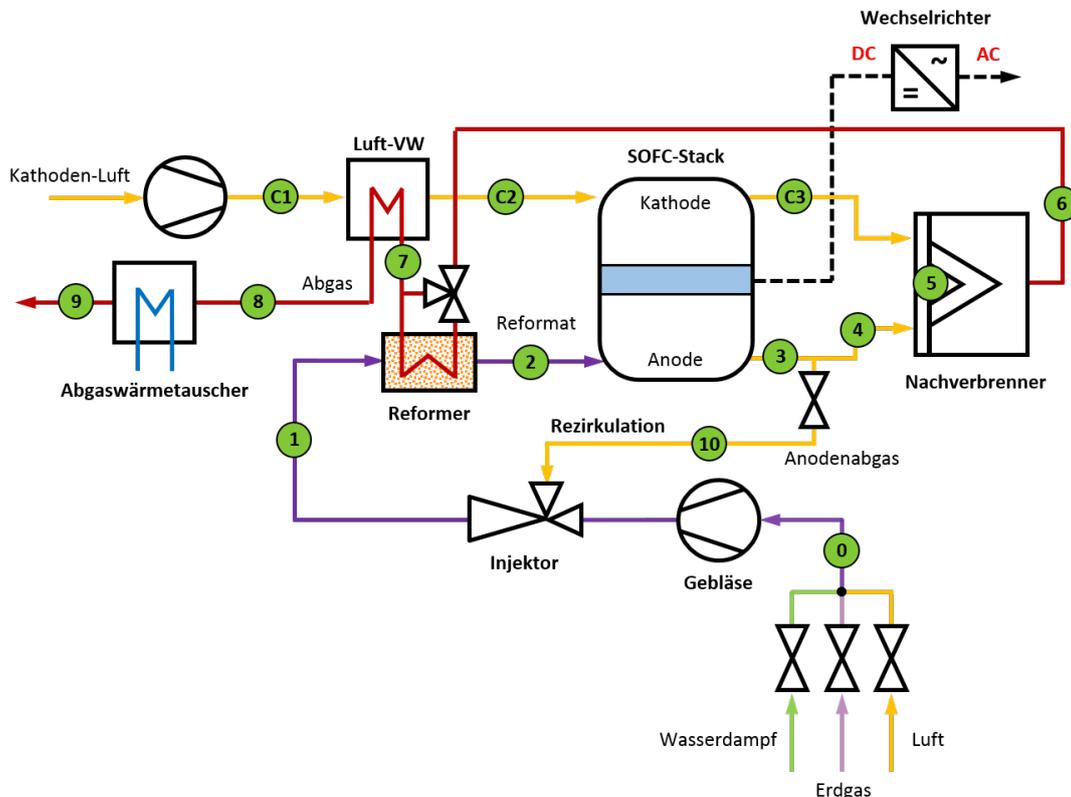


Abbildung 2-22: Schaltbild des analysierten SOFC-Systems

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 wärmedämmend und hat keine Wärmeverluste.
- Druckverluste werden im System vernachlässigt.
- Der Energieaufwand für die Gebläse, Injektor, Nachbrenner usw. werden durch den Eigenverbrauchswirkungsgrad berücksichtigt.
- Der Stack wird über das im Abschnitt 2.3.3.3 dargestellte White-Box-Modell beschrieben.
- Die Temperatur des Anodengases (3) und des Kathodengases (C3) sind am Austritt des Stacks identisch.

2.4 SOFC-Systemanalysen zur Abwärmenutzung

Die Stromkennzahl eines SOFC-Systems hängt wesentlich vom gewählten Reformierungsverfahren ab. Somit kann die Anpassung an die verbraucherseitige Lastverteilung auch über das Brennstoffaufbereitungsverfahren erfolgen. In Abbildung 2-23 sind die Reformierungsoptionen und der dabei erreichbare elektrische Wirkungsgrad dargestellt. 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.

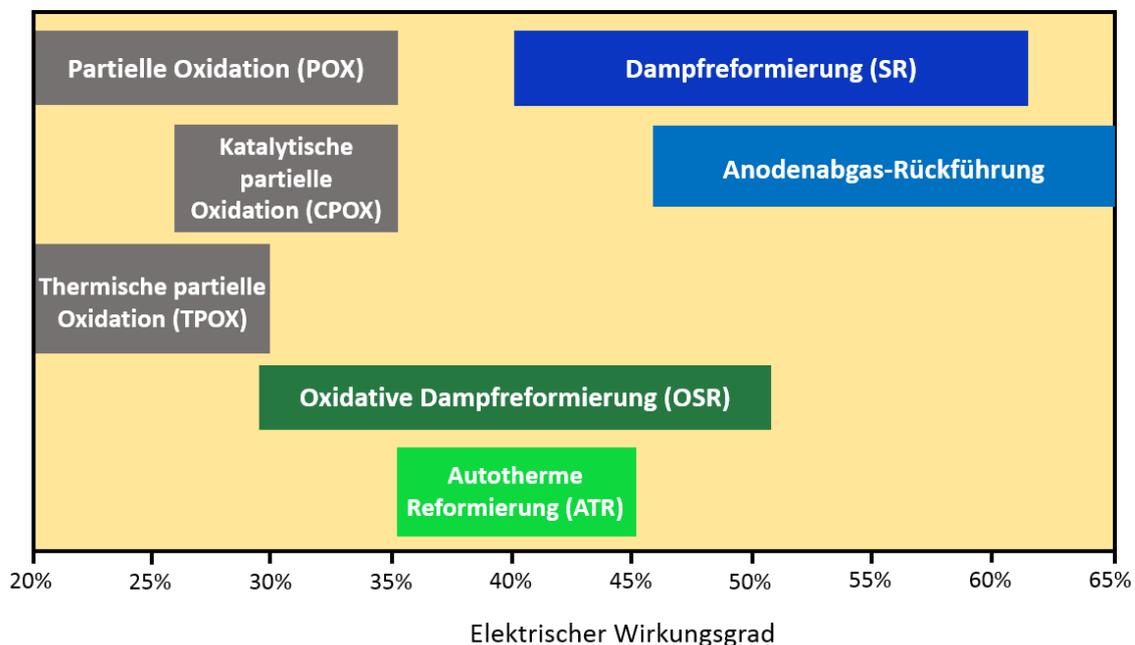


Abbildung 2-23: Elektrischer Wirkungsgrad von SOFC-Systemen mit unterschiedlichen Brennstoffaufbereitungsstrategien

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. Die Berechnungen basieren auf den in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Modellansätzen. Zusätzlich wurden folgende Annahmen getroffen:

- Eigenverbrauchswirkungsgrad: 92%
- Wirkungsgrad des Wechselrichters: 97%
- Kathodenluft- und Brennstoffeintrittstemperatur: 25°C

- Betriebsdruck: 1 bar (absolut)
- Abgastemperatur nach dem Abgaswärmetauscher: $T_9 = 25^\circ\text{C}$
- Reformers-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 wurde dabei wie folgt definiert:

$$U = \frac{(4 \dot{n}_{CH_4} + \dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{Eintritt} - (4 \dot{n}_{CH_4} + \dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{Austritt}}{(4 \dot{n}_{CH_4} + \dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{Eintritt}} \quad (2.54)$$

Für den Systemvergleich wurden die energetischen Kennzahlen η_{el} und ψ gemäß Gleichung (2.55) und Gleichung (2.56) ermittelt.

$$\eta_{el} = \frac{W_{ele, Nutz}}{\dot{m}_{Br} Hu} \quad (2.55)$$

$$\psi = \frac{W_{ele, Nutz}}{W_{ele, Nutz} + Q_{Nutz}} \quad (2.56)$$

In Tabelle 2-13 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 Abbildung 2-16 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_{9s} 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.

Tabelle 2-13: Berechnete Kennzahlen des SOFC-Systems mit adiabater POX-Reformierung ($T_2 = 750^\circ\text{C}$)

SOFC-System	ASR	U	λ_{FC}	η_{el}	ψ	T_8 [$^\circ\text{C}$]	T_{9s} [$^\circ\text{C}$]
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	0,75	3	0,37	0,34	704,4	42,9
POX-Reformierung	1,0	0,75	4	0,37	0,34	570,0	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

Die Simulationsergebnisse für ein SOFC-System mit Anodenabgas-Rezirkulation (AOGR) sind in Tabelle 2-14 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.

Tabelle 2-14: Berechnete Kennzahlen des SOFC-Systems mit Anoden-Off-Gas-Rezirkulation (AOGR) und interner Reformierung ($T_2 = 750^\circ\text{C}$)

SOFC-System	ASR	U	λ_{FC}	η_{el}	ψ	T_8 [$^\circ\text{C}$]	T_{9s} [$^\circ\text{C}$]
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	0,75	3	0,51	0,48	414,6	36,5
AOGR-Reformierung	1,0	0,75	4	0,51	0,48	323,5	31,5
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 Analyse des industriellen Abwärmenutzungspotenzials wurde anhand der Sattdampfproduktion mit Hilfe eines Abhitzekessels untersucht. Dazu wurden für unterschiedliche Dampfdrücke der Einfluss des gewählten SOFC-Systems, des ASR-Wertes, des Umsetzungsgrades U und der Luftüberschusszahl λ_{FC} auf die mögliche Dampfproduktion untersucht. Der dabei verwendete Aufbau des Abhitzekessels und das dazugehörige Q-T-Diagramm ist in Abbildung 2-24 dargestellt. Den Berechnungen wurde ein Pinch Point von 5 K und ein Approach Point von 5 K zugrunde gelegt.

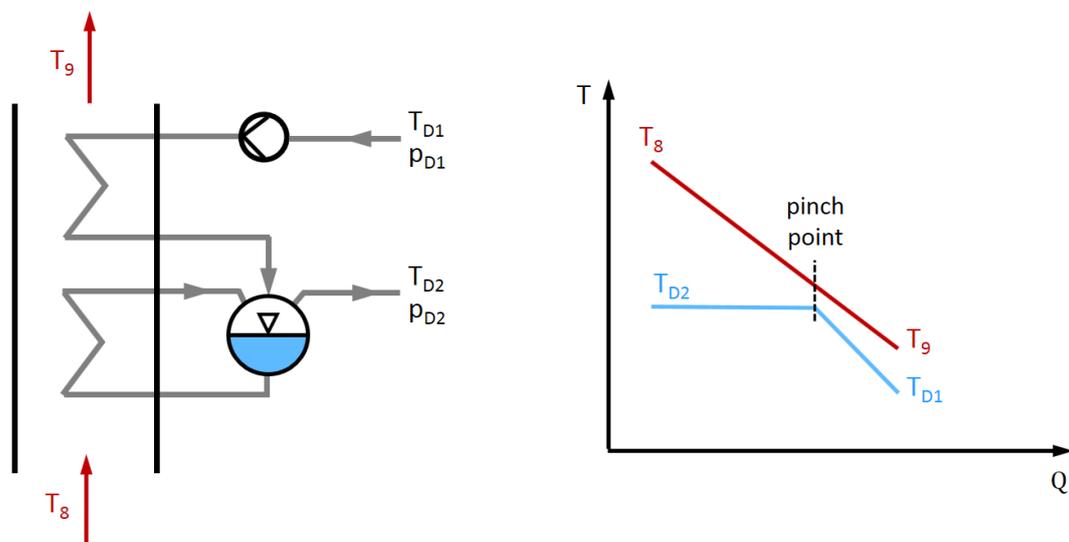


Abbildung 2-24: Links: Analysierter Abhitzekessel zur Sattdampfproduktion. Rechts: Q-T-Diagramm mit dem Abgastemperaturverlauf (rot) und dem wasserseitigen Temperaturverlauf (blau)

Die erzielten Berechnungsergebnisse sind für eine Speiswassereintrittstemperatur von $T_{D1} = 100^\circ\text{C}$ und einen Dampfdruck von 5 bar in Tabelle 2-15 zusammengefasst. Aufgrund der

höheren Abgastemperatur T_8 des POX-Systems können höhere Dampfmassenströme erreicht werden. Gleiches gilt für höhere ASR-Werte. Steigen der ohmsche Widerstand und die Aktivierungsverluste, erhöht sich die Dissipationsarbeit und die Abgastemperatur des SOFC-Systems wird größer. Der Einfluss des Umsetzungsgrades auf die Dampfproduktion ist ebenfalls ersichtlich. Mit höherem Umsetzungsgrad steigt der elektrische Wirkungsgrad und die Dampfproduktion wird vermindert. Interessant ist der Einfluss der Luftüberschusszahl λ_{FC} auf die mögliche Dampfproduktion und die Abgastemperatur T_9 . Durch die Reduktion der Luftüberschusszahl λ_{FC} erhöhen sich die Abgastemperatur T_8 und damit auch die Sattdampfproduktion. Die Abgastemperatur nach dem Abhitzekessel T_9 wird durch die Reduktion der Luftüberschusszahl λ_{FC} ebenfalls vermindert. Grund hierfür ist der etwas höhere Massenstrom in der Speisewasserleitung. Dieser kühlt die Abgase stärker ab und erhöht somit den Abgaswärmeausnutzungsgrad des Abhitzekessels.

Tabelle 2-15: Berechnete Abgastemperaturen und Dampfmassenströme ($T_2 = 750^\circ\text{C}$)

SOFC-System	ASR	U	λ_{FC}	T_9 [$^\circ\text{C}$]	\dot{m}_D/\dot{m}_{Br}
POX-Reformierung	0,5	0,75	3	106,8	11,0
POX-Reformierung	0,5	0,75	4	120,0	10,3
POX-Reformierung	0,5	0,85	3	111,1	10,1
POX-Reformierung	0,5	0,85	4	123,4	9,4
POX-Reformierung	1,0	0,75	3	102,0	12,1
POX-Reformierung	1,0	0,75	4	116,2	11,4
POX-Reformierung	1,0	0,85	3	104,9	11,5
POX-Reformierung	1,0	0,85	4	118,5	10,7
AOGR-Reformierung	0,5	0,75	3	141,5	4,7
AOGR-Reformierung	0,5	0,75	4	148,2	3,5
AOGR-Reformierung	0,5	0,85	3	142,2	4,4
AOGR-Reformierung	0,5	0,85	4	148,7	3,2
AOGR-Reformierung	1,0	0,75	3	132,0	7,7
AOGR-Reformierung	1,0	0,75	4	141,0	6,5
AOGR-Reformierung	1,0	0,85	3	130,5	7,8
AOGR-Reformierung	1,0	0,85	4	139,8	6,6

2.5 Rechtliche Rahmenbedingungen in der EU

Der Abschnitt behandelt im Wesentlichen fünf Richtlinien, die als relevant für den Brennstoffzellen-Markt betrachtet werden.

- Verordnung zur Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten, Kombiheizgeräten, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen – Labelling Regulation
- Verordnung zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten – Ecodesign Regulation
- Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)
- Energieeffizienz-Richtlinie – Energy Efficiency Directive (EED)
- Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen – Renewable Energy Sources Directive (RESD)

Danach wird auf die für Österreich spezifischen Umsetzungen eingegangen. Einige wichtige Bundes- und Landesgesetze werden daran anschließend auf Auswirkungen auf den Markt stationärer Brennstoffzellen analysiert. Da manche der oben erwähnten Dokumente europaweit als Verordnungen angewandt werden müssen, erscheint es sinnvoll, den Unterschied zwischen EU-Verordnungen und EU-Richtlinien zu erläutern.

EU-Verordnungen

Eine Verordnung (Regulation) ist ein bindender Rechtsakt. Eine EU-Verordnung muss demnach in der gesamten EU angewendet werden. Wenn die EU zum Beispiel den Namen eines landwirtschaftlichen Produkts, das von bestimmten Gegenden kommt, schützen will, verabschiedet das Europäische Konzil eine Verordnung. Ein Beispiel dazu wäre die Energieverbrauchsangabe mit Labels auf Produkten (siehe Kapitel 2.1.1)

EU-Richtlinien

Eine Richtlinie (Directive) ist ein Rechtsakt, der ein Ziel vorgibt, das die Mitgliedsstaaten erreichen müssen. Wie das Ziel erreicht wird, bleibt dem jeweiligen Land überlassen.

Die Mitgliedsstaaten haben bei den Richtlinien einen gewissen Handlungsspielraum.

2.5.1 Wichtige EU-Verordnungen und Richtlinien

In den folgenden Abschnitten werden ausgesuchte Verordnungen und Richtlinien beschrieben und analysiert, ob bzw. welche Auswirkungen sie auf die Markteinführung von Brennstoffzellensystemen haben können.

2.5.1.1 Energiekennzeichnungsverordnung

Langtitel: Verordnung zur Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten, Kombiheizgeräten, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen

Die Verordnung bildet einen gemeinsamen Handlungsrahmen für die Angleichung von nationalen Vorgaben betreffend Informationen für den Endverbraucher, vor allem bei der Etikettierung und den Standardinformationen zu energieverbrauchenden Produkten und anderen während des Einsatzes verwendeten Ressourcen sowie auch betreffend zusätzlicher Informationen über energieverbrauchende Produkte, die dem Endverbraucher helfen, energieeffizientere Produkte zu wählen.

Die Energiekennzeichnungsverordnung soll Produkte betreffen, durch deren Verwendung es zu einem direkten oder indirekten Verbrauch von Energie und Ressourcen kommt.

Um die Etikettierungsanforderungen für unterschiedliche Produktgruppen zu spezifizieren, sind unterschiedliche Regelungen erforderlich.

In der für stationäre Brennstoffzellen relevanten Verordnung (ErP LOT 1) werden Vorschriften für die Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit einer Nennleistung von höchstens 70 kW, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten mit höchstens 70 kW, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten mit höchstens 70 kW, Temperaturreglern und Solareinrichtungen und für die Bereitstellung zusätzlicher Produktinformationen für diese Geräte festgelegt.

Im Hinblick auf beträchtliche Energie- und Kosteneinsparungen für jeden einzelnen Heizgerätetyp wird mit dieser Verordnung eine neue Kennzeichnungsskala von A++ bis G für die Raumheizungsfunktion von Raumheizgeräten mit Heizkessel, Raumheizgeräten mit Kraft-Wärme-Kopplung, Raumheizgeräten mit Wärmepumpen, Kombiheizgeräten mit Heizkessel und Kombiheizgeräten mit Wärmepumpen eingeführt. Während die Klassen A bis G die verschiedenen Arten konventioneller Heizkessel abdecken, sofern diese nicht mit Kraft-Wärme-Kopplung oder Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen kombiniert sind, sollten die Klassen A+ and A++ den Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung oder von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen fördern.

Erwartete Auswirkung der Energiekennzeichnungsverordnung

Seit dem 26. September 2015 müssen Lieferanten, die Raumheizgeräte in den Verkehr bringen und/oder in Betrieb setzen, sicherstellen, dass jede einzelne Raumheizung ein Etikett aufweist, passend zu den am Standort gegebenen Energieeffizienzklassen für Raumheizung. Abbildung 2-25 zeigt das Etikett (Label) für eine Heizung mit Kraft-Wärme-Kopplung.

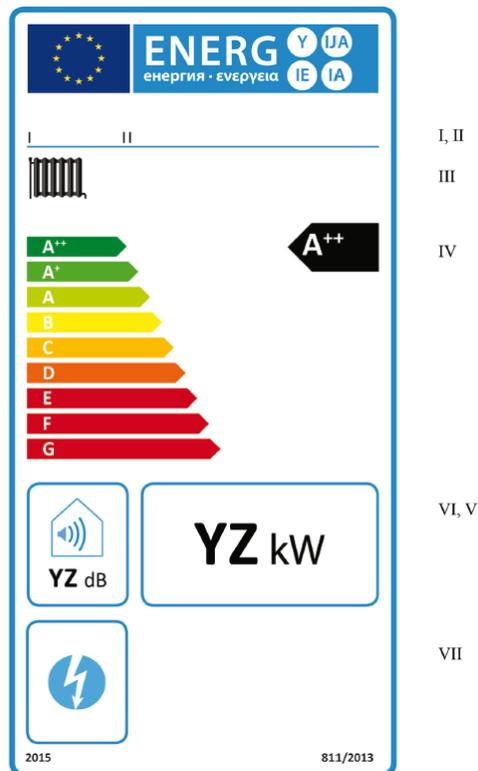


Abbildung 2-25: Label für Heizgerät mit Kraft-Wärme-Kopplung

Das Label muss die folgenden Informationen enthalten:

I. Name oder Warenzeichen des Lieferanten

II. Modellkennung des Lieferanten

III. Raumheizungsfunktion

IV. die Klasse für die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz; die Spitze des Pfeils, der die Klasse für die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz des Raumheizgerätes mit Heizkessel angibt, ist dabei auf derselben Höhe zu platzieren wie die Spitze des Pfeils der entsprechenden Energieeffizienzklasse

V. die Wärmenennleistung in kW, auf die nächste ganze Zahl gerundet

VI. den Schalleistungspegel LWA in Innenräumen in dB, auf die nächste ganze Zahl gerundet

Die saisonale Energieeffizienzklasse für Raumheizung aufgrund der saisonalen Raumheizungsenergieeffizienz-Zuordnung gemäß Tabelle 2-16.

Tabelle 2-16: Saisonale Energieeffizienzklassen für Raumheizung und Energieeffizienz η_s

Saisonale Energieeffizienzklassen für Raumheizung	Saisonale Raumheizung Energieeffizienz η_s in %
A ⁺⁺⁺	$\eta_s \geq 150$
A ⁺⁺	$125 \leq \eta_s < 150$
A ⁺	$98 \leq \eta_s < 125$
A	$90 \leq \eta_s < 98$
B	$82 \leq \eta_s < 90$
C	$75 \leq \eta_s < 82$
D	$36 \leq \eta_s < 75$
E	$34 \leq \eta_s < 36$
F	$30 \leq \eta_s < 34$
G	$\eta_s < 30$

In der folgenden Tabelle 2-17 wird eine Etikettierung eines Brennstoffzellen-Mikro-KWK-Heizgeräts der Etikettierung eines State-of-the-Art Gas-Brennwertkessels gegenübergestellt.

Tabelle 2-17: Gegenüberstellung Etikettierung

	Viessmann vitovolar 300-p	Viessmann vitodens 222-w
Technologie	PEM Brennstoffzellen-Mikro-KWK-Heizgerät	Gas-Brennwertkessel
Heizleistung [kW]	1 (20) ¹	3,2 – 35
Elektrische Leistung [kW]	0,75	0
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	37	0
Thermischer Wirkungsgrad [%]	53	98
Gesamtwirkungsgrad [%]	90	98
Wirkungsgrad nach ErP [%]	$37 * 2,5 + 53 = 145,5$	98
Etikettierung	A⁺⁺	A

Nachdem Strom mit dem Faktor 2,5 bewertet wird, erreicht die Brennstoffzelle trotz niedrigerer Gesamtenergieeffizienz (90% vs. 98%) eine höhere rechnerische Effizienz und damit eine höhere Effizienzklasse.

Im oberen Beispiel wurden zwei Viessmann-Produkte verwendet. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse bei gleichen Gerätetypen – Brennstoffzellen-Mikro-KWK-Heizgerät und State-of-the-Art Gas-Brennwertkessel (mit fast keiner Verbesserungsmöglichkeit) – von anderen Herstellern ähnlich sein werden.

Allgemein gesprochen macht die Etikettierung die Energieeffizienz von verschiedenen Produkten für Kunden sichtbarer. Wenn die Verwendung von Kraft-Wärme-Kopplungen mit den Etikettenklassen A+ und A++ (ab 2019 wird die Klasse A++ in zwei Klassen aufgespalten – dann wird auch A+++ möglich sein) gefördert wird, kann davon ausgegangen werden, dass sich das positiv auf die Markteinführung von Brennstoffzellensystemen niederschlägt und dass Kunden verstärkt in diese Systeme investieren.

Es sollte hier auch erwähnt werden, dass nicht nur Brennstoffzellen in den Klassen A+, A++ (und ab 2019 auch A+++) etikettiert werden, sondern auch Wärmepumpensysteme oder Gasheizkessel mit solarer Unterstützung etc. Die Auswirkungen auf den Brennstoffzellenmarkt hängen deshalb verstärkt von der Wirtschaftlichkeit, das heißt von den Fördermitteln für verschiedene erneuerbare Technologien ab. Im Gegensatz zu Wärmepumpen und

¹ Das Brennstoffzellengerät hat einen 20 kW-Gas-Spitzenlastkessel integriert. Zusammen mit diesem erreicht das Gerät eine Heizleistung von 20 kW.

Solarvorrichtungen haben Brennstoffzellensysteme den Vorteil, dass sie leicht installiert werden können, sofern eine Verbindung zum Erdgasnetz vorhanden ist.

2.5.1.2 Ökodesign-Verordnung

Langtitel: Verordnung zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten

Die Ökodesign-Verordnung bildet einen gemeinsamen Handlungsrahmen für Ökodesign-Anforderungen an energieverbrauchende Produkte und hat zum Ziel, den freien Warenverkehr im Binnenmarkt zu sichern. Die energieverbrauchenden Produkte müssen gesetzliche Mindestanforderungen erfüllen, damit sie auf den Markt gebracht und/oder in Betrieb genommen werden dürfen. Dies trägt zur nachhaltigen Entwicklung bei, weil die Energieeffizienz und das Umweltschutzniveau erhöht und zugleich die Sicherheit der Energieversorgung verbessert werden.

Es gibt unterschiedliche Verordnungen, um die Ökodesign-Anforderungen den Produktgruppen zuordnen zu können. Für Mikro-KWK-Systeme zum Beispiel trifft die Verordnung Nr. 813/2013 – „Raumheizgeräte und Kombi-Heizgeräte“ – zu und wird nachfolgend beschrieben.

Mit der Verordnung Nr. 813/2013 - „Raumheizgeräte und Kombi-Heizgeräte“ werden Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung im Hinblick auf das Inverkehrbringen und/oder die Inbetriebnahme von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit einer Wärmeleistung ≤ 400 kW festgelegt, einschließlich solcher, die Teil von Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen oder Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen im Sinne des Artikels 2 der delegierten Verordnung (EU) Nr. 811/2013 sind.

Die Ökodesign-Anforderungen in dieser Verordnung sollen den Energieverbrauch, den Schalleistungspegel und die Stickoxid-Emissionsgrenzen von Raumheiz- und Kombiheizgeräten in der gesamten Union harmonisieren, damit der Binnenmarkt besser funktioniert und die Umweltfreundlichkeit dieser Produkte erhöht wird.

Erwartete Auswirkungen der Ökodesign-Verordnung

Seit 26. September 2015 müssen Raumheizgeräte mit Kraft-Wärme-Kopplung die Ökodesign-Vorgaben zum Energieverbrauch einhalten (aufgrund der Bewertung von Strom mit 2,5, wie vorher ausgeführt, leicht erfüllbar) und die Stickstoffdioxid-Emissionen dürfen die Werte gemäß Tabelle 2-18 nicht übersteigen.

Tabelle 2-18: Ökodesign-Mindestanforderungen für Raumheizgeräte mit Kraft-Wärme-Kopplung

Saisonale Energieeffizienz von Raumheizgeräten η_s in %	Stickstoffoxid-Emissionen in mg/kWh			
	*)	**)	***)	****)
≥ 86	≤ 70	≤ 120	≤ 240	≤ 420

*) äußere Verbrennung, gasförmiger Brennstoff

**) äußere Verbrennung, flüssiger Brennstoff

***) Verbrennungsmotor mit innerer Verbrennung, gasförmiger Brennstoff

****) Verbrennungsmotor mit innerer Verbrennung, flüssiger Brennstoff

Wenn ein Produkt die oben angeführten Mindestanforderungen nicht erfüllt, darf es nicht am Markt platziert werden.

Die Ökodesign-Anforderungen an die saisonale Energieeffizienz korrelieren mit der Etikettierung der Produkte (siehe Kapitel 2.1.1). Je besser die saisonale Energieeffizienz ist, umso besser ist im Allgemeinen dessen Etikettierung.

Generell kann man davon ausgehen, dass durch die Ökodesign-Anforderungen der Markt durch die Entwicklung von effizienteren Produkten angekurbelt wird und ineffiziente Produkte früher oder später verschwinden. Die hohe Effizienz der Brennstoffzellen-Kraft-Wärme-Kopplungssysteme wird wesentlich dazu beitragen, dass die derzeitigen und auch zukünftigen Ökodesign-Anforderungen erfüllt werden.

Die derzeitigen Mindestanforderungen lassen jedoch noch Raum am Markt für eine Bandbreite an Technologien, zum Beispiel für konventionelle Öl- oder Gasbrennwertkessel. Die Richtlinie hat nur den Wechsel von der Nicht-Brennwerttechnik zur Brennwerttechnik in Gang gesetzt.

Die nächsten Kapitel (2.1.3 bis 2.1.5) behandeln die folgenden Richtlinien

- Richtlinie für Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD)
- Richtlinie für Energieeffizienz (EED)
- Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RES2)

Die erwarteten Auswirkungen der EU-Richtlinien hängen auch davon ab, wie sie in den einzelnen Mitgliedsstaaten gehandhabt werden. Deswegen werden in einem zweiten Schritt die spezifischen Auswirkungen auf Österreich analysiert (siehe Kapitel 2.2).

2.5.1.3 Richtlinie für die Gesamteffizienz von Gebäuden (EPBD)

Die Richtlinie für die Gesamteffizienz von Gebäuden bildet einen gemeinsamen Handlungsrahmen für die Verbesserung der Energieleistung von Gebäuden in der Union und

berücksichtigt dabei die Außentemperatur und die lokalen Gegebenheiten genauso wie die Anforderungen an das Innenraumklima und das Preis-Leistungsverhältnis.

Diese Richtlinie enthält Anforderungen hinsichtlich:

- a). des gemeinsamen allgemeinen Rahmens für eine Methode zur Berechnung der integrierten Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudeteilen,
- b). der Anwendung von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz neuer Gebäude und Gebäudeteile,
- c). der Anwendung von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von
 - i) bestehenden Gebäuden, Gebäudeteilen und Gebäudekomponenten, die einer größeren Renovierung unterzogen werden
 - ii) Gebäudekomponenten, die Teil der Gebäudehülle sind und sich erheblich auf die Gesamtenergieeffizienz der Gebäudehülle auswirken, wenn sie nachträglich eingebaut oder ersetzt werden und
 - iii) gebäudetechnischen Systemen, wenn diese neu installiert, ersetzt oder modernisiert werden,
- d). nationaler Pläne zur Erhöhung der Zahl der Niedrigstenergiegebäude,
- e). der Erstellung von Energieausweisen (Energy Performance Certificate, EPC) für Gebäude oder Gebäudeteile,
- f). regelmäßiger Inspektionen von Heizungs- und Klimaanlageanlagen in Gebäuden und unabhängiger Kontrollsysteme für Ausweise über die Gesamtenergieeffizienz und Inspektionsberichte.

Nachfolgend werden Artikel zur Richtlinie für die Gesamteffizienz von Gebäuden angeführt, die für die Markteinführung von Kraft-Wärme-Kopplungssystemen vermutlich relevant sind.

Artikel 4 – Festlegung von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz

Die Mitgliedstaaten ergreifen die erforderlichen Maßnahmen, um sicherzustellen, dass im Hinblick auf die Erreichung kostenoptimaler Niveaus Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden oder Gebäudeteilen festgelegt werden. Die Gesamtenergieeffizienz wird nach der in Artikel 3 genannten Methode berechnet. Die kostenoptimalen Niveaus werden nach dem in Artikel 5 genannten Rahmen für eine Vergleichsmethode berechnet, sobald dieser Rahmen verfügbar ist.

Artikel 6 – Neue Gebäude

Die Mitgliedstaaten ergreifen die erforderlichen Maßnahmen, um sicherzustellen, dass neue Gebäude die nach Artikel 4 festgelegten Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz erfüllen.

Bei neuen Gebäuden gewährleisten die Mitgliedstaaten, dass vor Baubeginn die technische, ökologische und wirtschaftliche Realisierbarkeit des Einsatzes von hocheffizienten alternativen Systemen wie den nachstehend angeführten, sofern verfügbar, in Betracht gezogen und berücksichtigt wird:

- a). dezentrale Energieversorgungssysteme auf der Grundlage von Energie aus erneuerbaren Quellen
- b). Kraft-Wärme-Kopplung
- c). Fern-/Nahwärme oder Fern-/Nahkälte, insbesondere, wenn sie ganz oder teilweise auf Energie aus erneuerbaren Quellen beruht
- d). Wärmepumpen

Artikel 7 – Bestehende Gebäude

Die Mitgliedstaaten ergreifen die erforderlichen Maßnahmen, um sicherzustellen, dass die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, die einer größeren Renovierung unterzogen werden, oder der renovierten Gebäudeteile erhöht wird, um die gemäß Artikel 4 festgelegten Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz zu erfüllen, sofern dies technisch, funktionell und wirtschaftlich realisierbar ist.

Artikel 8 – Gebäudetechnische Systeme

Die Mitgliedstaaten legen zur optimalen Energienutzung durch die gebäudetechnischen Systeme Systemanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz, die ordnungsgemäße Installation und angemessene Dimensionierung, Einstellung und Überwachung der gebäudetechnischen Systeme fest, die in bestehenden Gebäuden eingebaut werden. Die Mitgliedstaaten können diese Systemanforderungen auch auf neue Gebäude anwenden. Die Systemanforderungen werden für neue gebäudetechnische Systeme sowie für die Ersetzung und Modernisierung von gebäudetechnischen Systemen festgelegt und insoweit angewandt, als dies technisch, funktionell und wirtschaftlich realisierbar ist.

Artikel 9 – Niedrigstenergiegebäude

Die Mitgliedstaaten gewährleisten, dass bis 31. Dezember 2020 alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude sind und nach dem 31. Dezember 2018 neue Gebäude, die von Behörden als Eigentümer genutzt werden, Niedrigstenergiegebäude sind. Die Mitgliedstaaten erstellen nationale Pläne zur Erhöhung der Zahl der Niedrigstenergiegebäude. Diese nationalen Pläne können nach Gebäudekategorien differenzierte Zielvorgaben enthalten.

2.5.1.4 Richtlinie für Energieeffizienz (EED)

Die Richtlinie für Energieeffizienz bildet einen gemeinsamen Handlungsrahmen für die Förderung der Energieeffizienz in der Union. Damit soll sichergestellt werden, dass die 2020 Ziele der Union in Bezug auf das Energieeffizienz erreicht werden können und der Weg für weitere Effizienzverbesserungen geebnet wird.

Nachfolgend werden Artikel zur Richtlinie für Energieeffizienz angeführt, die für die Markteinführung von Kraft-Wärme-Kopplungssystemen vermutlich relevant sind.

Artikel 7 – Energieeffizienz Verpflichtungssysteme

Jeder Mitgliedstaat führt ein Energieeffizienzverpflichtungssystem ein. Dieses System muss gewährleisten, dass die Energieverteiler und/oder Energieeinzelhandelsunternehmen, die als verpflichtete Parteien gemäß Absatz 4 benannt wurden und im Hoheitsgebiet des jeweiligen

Mitgliedstaats tätig sind, bis zum 31. Dezember 2020 ein kumuliertes Endenergieeinsparziel erreichen.

Artikel 14 – Förderung von Effizienz bei der Wärme- und Kälteversorgung

Bis zum 31. Dezember 2015 führen die Mitgliedstaaten eine umfassende Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und der effizienten Fernwärme- und Fernkälteversorgung durch und teilen diese der Kommission mit. Wenn sie bereits eine gleichwertige Bewertung durchgeführt haben, teilen sie diese der Kommission mit.

Artikel 15 – Energieumwandlung, -übertragung bzw. -fernleitung und -verteilung

Die Mitgliedstaaten werden

- a). die Übertragung und Verteilung von Strom aus hocheffizienter KWK garantieren,
- b). für Strom aus hocheffizienter KWK einen vorrangigen oder garantierten Zugang zum Netz gewähren,
- c). bei der Inanspruchnahme von Stromerzeugungsanlagen eine vorrangige Inanspruchnahme von Strom aus hocheffizienter KWK vorsehen, soweit der sichere Betrieb des nationalen Stromnetzes dies zulässt.

2.5.1.5 Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RES2)

Die Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen bildet einen gemeinsamen Handlungsrahmen für die Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen und die Förderung der Nutzung dieser Energie. Das große Ziel der EU ist es, bis 2020 im Brutto-Energieendverbrauch einen 20 % Anteil an erneuerbaren Energiequellen zu erreichen. Jeder Mitgliedsstaat muss für seine Zielabrechnung im Jahr 2020 den Anteil der verwendeten erneuerbaren Energiequellen berücksichtigen. Der Anteil von erneuerbaren Energiequellen im Transportbereich muss im Jahr 2020 bei mindestens 10 % des Gesamtenergieverbrauchs in diesem Sektor liegen.

Artikel 4 – Nationale Aktionspläne betreffend erneuerbare Energie

Jeder Mitgliedsstaat ist verpflichtet, einen nationalen Aktionsplan betreffend erneuerbare Energie zu erstellen. Der Plan soll die nationalen Ziele betreffend den Anteil der zu verwendenden erneuerbaren Energiequellen in den Bereichen Transport, Strom, Wärme und Kälte für 2020 darstellen und dabei weitere politische Maßnahmen zum Thema Effizienz im Gesamtenergieverbrauch einbeziehen.

Anders formuliert: Die Auswirkungen der Richtlinie zur Verwendung von erneuerbarer Energie auf die Markteinführung von Brennstoffzellensystemen hängt davon ab, welche Rolle Brennstoffzellen im Aktionsplan eines Landes haben (siehe Kapitel 2.2).

2.5.1.6 Richtlinie 2009/73/EC für gemeinsame Regeln im internen Erdgasmarkt

Die Erdgasrichtlinie 2009/73/EC sieht einen Handlungsrahmen für den internen Erdgasmarkt vor, der auch die Regeln für die Verwendung der Gasinfrastruktur, wie z.B. die Übertragungs- und Verteilernetze, inkludiert. Solange es noch keine flächendeckende Wasserstoffwirtschaft

gibt, werden die Brennstoffzellen mit Erdgas betrieben. Die Bestimmungen in der Erdgasrichtlinie beeinflussen daher die Markteinführung von Brennstoffzellen.

Derzeit gibt es in zahlreichen EU-Mitgliedsstaaten einen großen Erdgasmarkt und ein eher beschränktes Potential den Erdgasverbrauch anzukurbeln. Das Gegenteil ist der Fall, die Nachfrage lässt nach und damit wird das Netz nicht vollständig genützt. Die Anzahl der kostentragenden Einheiten verringert sich und gleichzeitig bleiben die Kosten gleich oder steigen sogar. Dadurch erhöhen sich die Gastransportkosten pro Gasvolumeneinheit. Mit dem Prinzip von Angebot und Nachfrage betrachtet und unter Berücksichtigung von Preiselastizität führt das zusätzlich zu den angestrebten Energieeffizienzerhöhungen und durch die starke Konkurrenz seitens der Fernwärmesysteme zu einer noch stärker verminderten Nachfrage nach Erdgas.

Erdgas ist der reinste fossile Energieträger und wird noch eine lange Zeit in signifikanten Mengen im Raumheizungsbereich und wahrscheinlich auch in der Industrie und im Transportsektor verwendet werden. Damit weiterhin der reinste fossile Energieträger herangezogen und gleichzeitig die Energieeffizienz gesteigert wird, sollten Brennstoffzellensysteme installiert werden anstatt kombinierter Gasheizungen. Um das umzusetzen braucht es ein Brennstoffzellen unterstützendes Umfeld, das

- a. den Erdgasverbrauch erhöht und dabei andere fossile Energieträger ersetzt,
- b. die Treibhausgasemissionen verglichen mit anderen fossilen Energieträgern reduziert und
- c. eine dezentralisierte Stromerzeugung unterstützt, neben der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (RES-Elektrizität) und in Bereichen, wo aufgrund der bestehenden Rahmenbedingungen RES nicht möglich ist.

Es wird damit gerechnet, dass vor allem kombinierte Gasheizungen und Gaskessel durch Brennstoffzellensysteme ersetzt oder ergänzt werden. Auch mit Erdöl oder Kohle betriebene Heizungssysteme können durch Brennstoffzellensysteme ersetzt werden. In neuen Gebäuden könnten Brennstoffzellensysteme eine Standardausrüstung werden wie Fernwärme und Wärmepumpen.

Mit einer geeigneten Infrastruktur als Basis könnte eine Tarif-Struktur mit starken Anreizen für die Markteinführung und bedeutsame Marktdurchdringung (Teil des Business-Modells) generiert werden.

2.5.1.7 Richtlinie 2009/72/EC für gemeinsame Regeln im internen Strommarkt

Durch die immer weiter voranschreitende dezentrale Stromerzeugung, z.B. auch durch Brennstoffzellen, wird der Anteil des vom Endverbraucher erzeugten Stroms immer größer. Das hat zur Folge, dass die Strommenge, die über das Netz zum Endverbraucher transportiert wird, abnimmt (wenn der Stromverbrauch nicht höher wird als die Menge des vom Endverbraucher erzeugten Stroms).

Durch die reduzierte Menge des transportierten Stroms (verglichen mit dem Status quo), verringert sich die Anzahl der Kostenträger und verteuert sich dadurch (einen angemessenen Gewinn berücksichtigend) die Stromverteilung. Weiters könnten zumindest vorübergehend Quersubventionen der Endverbraucher, die den selbst erzeugten Strom produzieren, auftreten. Auf mittlere und lange Sicht betrachtet könnten sich auch positive Effekte durch die verminderte, durch das Netz transportierte Strommenge ergeben. Diese Vorteile könnten zu einem Aufschub oder zu geringeren Investitionen in die Vergrößerung des Stromnetzes führen.

Aus diesem Grund ist es notwendig, auf die möglichen Veränderungen in der Tarifstruktur zu achten, die eine dezentralisierte Stromerzeugung mit sich bringt.

2.5.2 Umsetzung von EU-Richtlinien in Österreich

Im Folgenden wird die konkrete Umsetzung von EU-Richtlinien in Österreich und die erwarteten Auswirkungen auf die Markteinführung von Brennstoffzellensystemen behandelt.

2.5.2.1 Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

Seit 1998 werden in einigen österreichischen Bundesländern Ausweise über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energieausweise) ausgegeben, bei denen der Heizenergiebedarf (für dessen Ermittlung mehrheitlich die Gebäudehülle relevant ist) die zentrale Rolle spielt. Die Verordnungen in den neun Bundesländern variieren stark. Deshalb ist die Durchführung der Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) wichtig für eine österreichweite Harmonisierung. Dazu bedarf es einer einheitlichen Berechnungsmethode und die Berücksichtigung weiterer Elemente wie zum Beispiel Heizung, Kühlung und Klimaanlage.

Die Bauordnung wird in Österreich vom jeweiligen Bundesland bestimmt. Das Österreichische Institut für Bautechnik (OIB, www.oib.or.at) hatte es 2006 übernommen, die Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in den Bundesländern durchzuführen und den Harmonisierungsprozess zu leiten. Dazu wurde eine Arbeitsgruppe, bestehend aus Repräsentanten aus den neun Bundesländern, gebildet. Die OIB-Richtlinien dienen den Ländern nun als Basis für die Harmonisierung der Bauordnung.

Die Bundesländer sind übereingekommen, die folgenden vier Indikatoren zu verwenden, um die Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes zu beschreiben.

Die Indikatoren sind in der OIB-Richtlinie 6 (betreffend Energieeinsparung und Wärmeschutz, sowohl bei Wohn- als auch bei Nicht-Wohngebäuden) definiert:

- a. Heizenergiebedarf (HWB)
- b. Energieleistungsfaktor (f_{GEE})
- c. Primärenergiebedarf (PEB)
- d. CO₂-Emissionen

Auf diesen vier Indikatoren aufbauend wurde ein nationaler Plan zur Erhöhung der Anzahl von Niedrigstenergiegebäuden entworfen. Kurz gesagt ist die österreichische Art Niedrigstenergiegebäude zu definieren, vier verschiedene Indikatoren heranzuziehen, die im Gesamten ein sehr energieeffizientes Gebäude beschreiben. Berücksichtigt wird hierbei eine gut isolierte Gebäudehülle (HWB), die Energieeffizienz (f_{GEE}), ressourcenschonende Technik (PEB) und Klimaschutz (CO₂-Emissionen).

Hinsichtlich der Durchführung der Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) können folgende Auswirkungen auf die Marktetablierung von Brennstoffzellen-Systemen abgeleitet werden:

- a. Der Heizenergiebedarf (der sich allein an der Gebäudehülle orientierte) war das zentrale Element für die Definition der Anforderungen vor der Einführung der EPBD. Seit der Einführung der EPBD hat die Bedeutung der Energieeffizienz von Heizsystemen mehr und mehr Gewicht bekommen. Das führt dazu, dass nun verstärkt auch hocheffiziente Heizsysteme wie zum Beispiel Kraft-Wärme-Kopplungssysteme (inkl. Brennstoffzellen) Verwendung finden.
- b. Nach Artikel 4 (EPBD) sollen die Mitgliedsstaaten sicherstellen, dass die Mindestanforderungen an die Energieeffizienz für Gebäude und Gebäudeteile so angelegt sind, dass ein optimales Kostenniveau erzielt wird. In Österreich werden jedoch noch kaum auf Brennstoffzellen basierende Mikro-KWK-Systeme verwendet, weder in Wohn- noch in Nichtwohngebäuden. Das bedeutet, dass die hohen Investitionskosten und das Fehlen von Subventionsmöglichkeiten als erschwerend für eine Markteinführung im Sinne der EPBD anzusehen sind.

Abgesehen von dieser unattraktiven finanziellen Komponente ist es in Österreich derzeit auch noch nicht möglich, einen Energieausweis für Gebäude, die ein Mikro-KWK-System aufweisen, zu erhalten. Mit der Einführung der EPBD wird für Baubewilligungen und für den Verkauf oder Vermietung von Gebäuden die Ausstellung von Energieausweisen verlangt. Das bringt eine regulative Barriere für Investoren mit sich, die in ein auf Brennstoffzellen basierendes Mikro-KWK-System investieren wollen.

2.5.2.2 Richtlinie zur Energieeffizienz

Nach dem jährlichen Österreichischen Fortschrittsbericht zum Thema Energieeffizienz wird die Einführung der Energieeffizienzrichtlinie wie folgt zusammengefasst:

Die Umsetzung der EU-Richtlinie zur Energieeffizienz ist im Energieeffizienzgesetz festgelegt. Das wesentliche Ziel des Bundesgesetzes für Energieeffizienz ist die Einführung der Energieeffizienzrichtlinie und die damit verbundenen Energieeffizienzmaßnahmen. Das Bundesgesetz für Energieeffizienz wurde am 9. Juli 2014 vom Nationalrat mit der erforderlichen Mehrheit verabschiedet. Nach der Prüfung durch den Bundesrat wurde es am 11. August 2014 im Bundesgesetzblatt veröffentlicht. Indirekt unterstützt das Gesetz auch die

Energieversorgung durch die Herabsenkung der Energieimporte, die Erhöhung der Anteile an erneuerbarer Energie im Energiemix und es ermöglicht die Reduktion von Emissionen. Durch das Bundesgesetz für Energieeffizienz und der damit verbundenen effizienteren Energieverwendung soll das Verhältnis zwischen Energieverbrauch und -leistung verbessert und das Bewusstsein gestärkt werden, dass Energieeffizienz wichtig ist. Durch das Bundesgesetz für Energieeffizienz ist geregelt, dass der Gesamtenergieverbrauch im Jahr 2020 1.050 PJ nicht übersteigen darf. Das bedeutet ungefähr eine Stabilisierung des Gesamtenergieverbrauchs auf das Niveau im Jahr 2005. Weiters ist ein kumulatives Energieeffizienzziel von 310 PJ vorgesehen. Um diese Ziele zu erreichen, werden die Lieferanten in die Pflicht genommen (kumulativ 159 PJ) und es gibt sogenannte strategische Energiemaßnahmen (kumulativ 151 PJ). Diese Maßnahmen beinhalten ökologische inländische Subventionen, das Renovieren von Gebäuden zur Steigerung deren Energieeffizienz etc.

Energiespar-Verpflichtung für Energielieferanten

Energielieferanten, die mehr als 25 GWh an österreichische Endabnehmer liefern, müssen nachweisen, dass sie Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt haben, die 0,6 % der Gesamtenergie entsprechen, die sie im Jahr davor an die eigenen oder Endkunden von anderen verkauft haben. Maßnahmen zählen dann als Energieeffizienzmaßnahmen, wenn sie das Input/Output-Verhältnis verbessern und nachweislich dem Lieferanten zugerechnet werden können. Wenn zum Beispiel ein Energielieferant im Jahr 2014 50 GWh an österreichische Endverbraucher geliefert hat, ist er verpflichtet, im Jahr 2015 Energieeffizienzmaßnahmen in der Höhe von 0,3 GWh zu erbringen. 40 % dieser Maßnahmen müssen in den Haushaltsbereich fließen. Die nationale Monitoringstelle überprüft die Erfüllung dieser Verpflichtung.

Verpflichtung zum Energieaudit

Das Bundesgesetz für Energieeffizienz verpflichtet große (energieverbrauchende) Unternehmen ein Energiemanagementsystem zu implementieren oder alle vier Jahre ein Energieaudit durchzuführen.

Energieeinsparung des Bundes

Der Bund hat sich in §16 des Energieeffizienzgesetzes verpflichtet im Zeitraum zwischen dem 1. Jänner 2014 und dem 31. Dezember 2020 Effizienzmaßnahmen an der gesamten beheizten oder gekühlten Gebäudefläche in Österreich, die sich in seinem Eigentum befindet und von ihm genutzt wird, im Umfang von 48,2 GWh durchzuführen. Dies entspricht einer jährlichen Sanierungsquote von 3%. Das Einsparziel soll insbesondere durch folgende Maßnahmen erreicht werden: Energieeinsparcontracting, Energiemanagementmaßnahmen, Sanierungsmaßnahmen. Dadurch sollen die effizientesten Lösungen auf kostengünstigste Weise möglich werden.

Über die eben genannte Verpflichtung hinaus ist der Bund gemeinsam mit der BIG Bundesimmobiliengesellschaft m.b.H. verpflichtet, im Zeitraum zwischen dem 1. Jänner 2014 und dem 31. Dezember 2020 Effizienzmaßnahmen an der gesamten beheizten oder gekühlten

Gebäudefläche, die sich im Eigentum der BIG Bundesimmobiliengesellschaft m.b.H. befindet und von einem Bundesorgan genutzt wird, im Umfang von 125 GWh durchzuführen. Die Bundesregierung erbringt somit gemeinsam mit der Bundesimmobiliengesellschaft einen vorbildlichen Beitrag, Österreichs Gesamtenergieverbrauch im Bereich der öffentlichen Gebäude zu verbessern.

Eine wichtige Säule der Energieeffizienzrichtlinie ist die Förderung von Heizung und Kühlung (Artikel 14). Die Mitgliedsstaaten sind deshalb aufgefordert, eine umfassende Potentialeinschätzung über die Anwendung von Kraft-Wärme-Kopplung mit hohem Wirkungsgrad und effiziente Fernwärme und -kälte abzugeben. Nach dem Nationalen Aktionsplan zur Energieeffizienz 2014 wird momentan an der umfassenden Bewertung des Potenzials von hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung gearbeitet.

Gemäß Artikel 14 sollen die Mitgliedsstaaten Strategien entwickeln, um die Bereitschaft zu erhöhen, sich stärker mit dem Potential der effizienten Heizungs- und Kühlungssysteme – vor allem das der hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungssysteme – auseinanderzusetzen. Deswegen sind im Österreichischen Gesetz für Kraft-Wärme-Kopplung Investitionszuschüsse für neue Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen festgelegt und auch Fördermittel für bestehende Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, die Energie an die Fernwärme liefern. Die erwähnten Investitionszuschüsse (siehe Tabelle 2-19) gelten für Kraft-Wärme-Kopplungssysteme mit einer elektrischen Leistung von über 100 kW. Bis 2020 wird ein Budget über 12 Millionen Euro zur Verfügung gestellt.

Tabelle 2-19: Investitionszuschüsse für Kraft-Wärme-Kopplungssysteme (OEMAG, 2015)

Elektrische Leistung [KW]	Zuschüsse [€/KW]
100 – 1.000	250
1.000 – 5.000	200
5.000 – 20.000	175
20.000 – 100.000	150
>100.000	125

Zusätzlich zu den Investitionszuschüssen des Gesetzes für Kraft-Wärme-Kopplung gibt es ein Förderungsprogramm für Umweltschutz, das hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die mit Erdgas oder Flüssiggas arbeiten, fördert. Das Programm betrifft Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit einer elektrischen Leistung von maximal 100 kW. Hier sind einige der Anforderungen genannt, die erfüllt werden müssen, um die Investitionszuschüsse zu erhalten:

- a. Die erzeugte Energie muss zu mindestens 80 % im Unternehmen selbst genutzt werden.
- b. Förderfähig sind nur bereits bestehende Gebäude. Neubauten können nicht subventioniert werden.
- c. Nur Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ohne Zugang zum Fernwärmenetz können die Zuschüsse erhalten.

d. Die Höhe der Investitionszuschüsse ist begrenzt auf max. EUR 675/kW_{el}.

Der Artikel 15 bezieht sich auf die Umwandlung, Übertragung und Verteilung von Energie. Die Mitgliedsstaaten sollen in diesem Zusammenhang dafür sorgen, dass die Energieübertragung und -verteilung von hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen garantiert ist und dass sie einen Netzzugang haben. Weiters sollte sichergestellt werden, dass bei der Stromverteilung denjenigen Priorität gewährt wird, die Strom mit Kraft-Wärme-Kopplung erzeugen. In Österreich wird die Umwandlung, Übertragung und Verteilung von Energie durch das Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz (EIWOG) reguliert. Entsprechend EIWOG ist die Umwandlung und Verteilung von Elektrizität aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen garantiert. Bei unzureichenden Kapazitäten für die Zusammenschaltung der Stromnetze ist der Elektrizität von hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen der Vorzug zu geben. Im Artikel 24 der Energieeffizienzrichtlinie werden die Mitgliedstaaten aufgefordert, der Kommission jedes Jahr Statistiken über die nationale Erzeugung von Strom und Wärme mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zu übermitteln. Die Ergebnisse, die in den jährlichen Österreichischen Fortschrittsberichten (gemäß 2012/27/EU) publiziert werden, sind in Tabelle 2-20 dargestellt.

Tabelle 2-20: Statistische Indikatoren der Strom- und Wärmeerzeugung in Österreich

	2011	2012	2013	2014
Stromerzeugung in Wärmekraftwerken [TJ]	44.445	41.363	67.826	57.443
Stromerzeugung in KWK-Anlagen [TJ]	18.451	38.328	36.341	30.605
Wärmeerzeugung in Heizwerken [TJ]	29.825	30.966	87.797	79.842
Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen inkl. industr. Abwärme [TJ]	49.631	51.900	51.288	43.961

Der durchschnittliche Anteil der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen aus thermischer Stromerzeugung liegt in Österreich bei 37 % (2011-2014), der Anteil der Wärmeerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen bei 46 %.

Neben der Energieeffizienzrichtlinie wurden in Österreich weitere Fördermechanismen entwickelt, um Betreibern von Kraft-Wärme-Kopplungssystemen und Brennstoffzellensystemen noch mehr Unterstützung zu bieten (z.B. Investitionszuschüsse, siehe Tabelle 2-19). Die Markteinführung von Brennstoffzellen-Systemen kann von diesen Mechanismen profitieren.

2.5.2.3 Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RESD)

Die Auswirkungen der Richtlinie zu erneuerbarer Energie hängen von den jeweiligen nationalen Aktionsplänen für erneuerbare Energieträger ab. Der Österreichische Nationale Aktionsplan für Erneuerbare Energie 2010 zeigt Methoden zur Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energie auf 34 % des Bruttoenergieverbrauchs. Aus dem Österreichischen Nationalen Aktionsplan für Erneuerbare Energie werden vor allem folgende als maßgeblich erachtet für die Markteinführung von Brennstoffzellen-Systemen:

- a. Erweiterungsmodelle für Wasserkraftanlagen und Wind, die die größten Erweiterungsmodelle für erneuerbare Energie in den nächsten zehn Jahren darstellen, haben zu entsprechenden Vorbereitungsarbeiten bei den Übertragungsnetzbetreibern geführt. Wenn es zu einem Stromüberangebot kommt, ist sichergestellt, dass die Stromkonsumenten bevorzugt mit Strom aus erneuerbaren Energien oder KWK beliefert werden.
- b. Im Allgemeinen ist die ausschließliche Verwendung der Unterstützungsmaßnahmen für Einspeisetarife und Investitionszuschüsse vorgesehen. Ausnahmen sind zum Beispiel komplementäre Anreize im Bereich der Wärmeerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.
- c. Das Österreichische Ökostromgesetz behandelt Einspeisetarife von erneuerbaren Quellen. Für Elektrizität aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist ein Aufpreis vorgesehen. Die folgende Tabelle 2-21 zeigt die Einspeisetarife für mit Biogas betriebenen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen:

Tabelle 2-21: Einspeisetarife für mit Biogas betriebene KWKs gemäß Ökostromgesetz 2012

Kapazität [kW _{el}]	Einspeisetarif [ct./kWh]	KWK Aufpreis [ct./kWh]
<250	18,67	2,0
250 – 500	16,15	2,0
500 – 750	12,97	2,0
>750	12,51	2,0

Es kann davon ausgegangen werden, dass die oben beschriebenen Unterstützungsmaßnahmen die Markteinführung von mit Brennstoffzellen betriebenen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen positiv beeinflusst.

2.5.2.4 Auswirkungen der Einführung der EU-Richtlinien in Österreich

Im Folgenden werden die zu erwartenden Auswirkungen auf die Markteinführung von Brennstoffzellensystemen zusammengefasst, die die Einführung diverser EU-Richtlinien in Österreich mit sich bringt.

Durch die Einführung der Richtlinie für Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) in Österreich können folgende Auswirkungen auf die Markteinführung von Brennstoffzellen erwartet werden:

- a. Der Raumheizverbrauch (der sich nur auf die Gebäudehülle bezieht) war vorher der zentrale Baustein für die Anforderungsdefinition. Durch die Einführung der EPBD wurde Effizienz immer mehr Teil der Anforderungen. Dadurch erhöht sich der Anreiz, zu hocheffizienten Heizsystemen wie Kraft-Wärme-Kopplungssystemen (inkl. Brennstoffzellen) zu greifen.
- b. Gemäß Artikel 4 der EPBD sollen die Mitgliedsstaaten sicherstellen, dass die Mindestanforderungen an Energieeffizienz für Gebäude und Gebäudeteile so angelegt sind, dass ein optimales Kostenniveau erzielt werden kann. Hier wird festgehalten, dass in Österreich noch kaum auf Brennstoffzellen basierende Mikro-KWK-Systeme verwendet werden, weder in Wohn- noch in Nichtwohngebäuden. Hohe Investitionskosten und das Fehlen von Subventionsmöglichkeiten sind mögliche Punkte, die gegen eine Markteinführung im Sinne der EPBD sprechen.
- c. Abgesehen von dieser unattraktiven finanziellen Komponente ist es derzeit in Österreich noch nicht möglich, einen Energieausweis für Gebäude, die ein Mikro-KWK-System aufweisen, zu erhalten. Die Einführung der EPBD verlangt auch die Ausstellung von Energieausweisen
 - i bei Baubewilligungen,
 - ii für den Verkauf oder
 - iii bei Vermietung von Gebäuden

Das bedeutet eine regulative Barriere für Investoren, die in ein auf Brennstoffzellen basierendes Mikro-KWK-System investieren wollen.

Die Energieeffizienzrichtlinie leitet die Mitgliedsstaaten an Gesetze zu entwickeln, die den Anreiz verstärken sollen, sich mit dem Potenzial effizienter Heiz- und Kühlsysteme zu beschäftigen – vor allem das der hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungssysteme. Deswegen sind im Österreichischen KWK-Gesetz Investitionszuschüsse für neue Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen festgelegt und auch Fördermittel für bestehende KWK-Anlagen, die Energie an die Fernwärme liefern.

Im Hinblick auf die Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RES-D) hat Österreich einen nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energie entwickelt. Dazu können folgende Maßnahmen bezogen auf die Markteinführung von Brennstoffzellensystemen hervorgehoben werden:

- a. Ausbauprogramme v.a. für Wasserkraftanlagen und Wind haben zu entsprechenden Vorbereitungsarbeiten bei den Übertragungsnetzbetreibern geführt. Bei einem Stromüberangebot ist sichergestellt, dass elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen bzw. KWK bevorzugt ins Netz eingespeist wird.

- b. Im Allgemeinen sind ausschließlich Einspeisetarife und Investitionszuschüsse vorgesehen. Ausnahmen sind zum Beispiel komplementäre Anreize im Bereich der Wärmeerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.
- c. Das Österreichische Ökostromgesetz behandelt Einspeisetarife von erneuerbaren Quellen. Für Elektrizität aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist ein höherer Tarif vorgesehen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die oben erwähnten Fördermechanismen die Markteinführung von auf Brennstoffzellen basierenden Kraft-Wärme-Kopplungssystemen antreiben.

2.5.3 Österreichische Bundes- und Ländergesetze, Richtlinien und Normen

2.5.3.1 Elektrizitätswirtschafts-Organisationsgesetz

Gemäß EIWOG handelt es sich bei Brennstoffzellen um eine KWK-Technologie. Damit ist klargestellt, dass Regelungen, die sich auf Kraft-Wärme-Kopplung beziehen, Brennstoffzellen jedenfalls miteinschließen.

KWK-Technologien im Sinne des § 4 Z 3 EIWOG

- a) Gasturbine mit Wärmerückgewinnung (kombinierter Prozess)
- b) Gegendruckdampfturbine
- c) Entnahme-Kondensationsdampfturbine
- d) Gasturbine mit Wärmerückgewinnung
- e) Verbrennungsmotor
- f) Mikroturbinen
- g) Stirling-Motoren
- h) Brennstoffzellen
- i) Dampfmotoren
- j) Rankine-Kreislauf mit organischem Fluidum
- k) Jede andere Technologie oder Kombination von Technologien, für die die Begriffsbestimmung des § 7 Abs. 1 Z 36 gilt.

2.5.3.2 Energieeffizienzgesetz

Anhang I

Die Maßnahmen in den im Folgenden angeführten Maßnahmenfeldern gelten nach Maßgabe der Bestimmungen der Richtlinien gemäß § 27 in dem Umfang als Energieeffizienzmaßnahme

gemäß § 5 Abs. 1 Z 7, als sie nachweisliche, mess- oder schätzbare Verringerungen des Verbrauchs von Endenergie nach sich ziehen:

Wohn- und Tertiärsektor

- sonstige Ausrüstungen und Geräte (zB Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, neue effiziente Geräte, bedarfsorientierte Steuerung für eine optimierte Energieverwendung, Minimierung der Energieverluste im Bereitschaftsmodus, Einbau von Kondensatoren zur Begrenzung der Blindleistung, verlustarme Transformatoren, primärseitige Schaltung, etc.);

Industriesektor

- Einsatz hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung

2.5.3.3 OIB 6-Richtlinie

Hocheffiziente alternative Energiesysteme sind jedenfalls

- Kraft-Wärme-Kopplungen

2.5.3.4 Bauordnungen

Wiener Bauordnung:

§118 (3) Bei Neu-, Zu- und Umbauten sowie bei Änderungen und Instandsetzungen von mindestens 25 vH der Oberfläche der Gebäudehülle müssen hocheffiziente alternative Systeme eingesetzt werden, sofern dies technisch, ökologisch und wirtschaftlich realisierbar ist. Hocheffiziente alternative Systeme sind jedenfalls

1. Kraft-Wärme-Kopplung

NÖ Bauordnung: Keine Erwähnung

OÖ Bauordnung: Keine Erwähnung

Sbg. Bautechnikgesetz:

Energieeinsparung und Wärmeschutz

§ 4a

(3) Bei der Errichtung neuer Bauten und größeren Renovierungen bestehender Bauten müssen hocheffiziente alternative Systeme geprüft und eingesetzt werden, wenn solche verfügbar sind und ihr Einsatz technisch, ökologisch und wirtschaftlich zweckmäßig ist. Solche Systeme sind insbesondere

2. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Tiroler Bauordnung:

§2 Begriffsbestimmungen

(27) Hocheffiziente alternative Systeme sind insbesondere:

dezentrale Energieversorgungssysteme auf der Grundlage von Energie aus erneuerbaren Quellen;

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen;

Fern- oder Nahwärme-Systeme oder Fern- oder Nahkälte-Systeme, insbesondere, wenn diese ganz oder teilweise auf Energie aus erneuerbaren Quellen oder auf Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen beruhen

Vorarlberger Baugesetz: Keine Erwähnung

Steiermärkisches Baugesetz:

§ 80 Allgemeine Anforderungen

Bei der Errichtung neuer Bauwerke (Neubauten) muss die technische, ökologische und wirtschaftliche Realisierbarkeit des Einsatzes von hocheffizienten alternativen Systemen wie den nachstehend aufgeführten, sofern verfügbar, in Betracht gezogen und berücksichtigt werden. Alternative Systeme sind zum Beispiel

2. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Kärntner Baugesetz: Keine Erwähnung

Burgenländische Bauordnung: Keine Erwähnung

2.5.3.5 Feuerungsanlagenverordnung

In der Feuerungsanlagenverordnung gibt es keine Regelungen speziell für KWK oder Brennstoffzellen. Feuerungsanlagen werden hier nur nach dem Aggregatzustand des Brennstoffes differenziert.

2.5.3.6 Normen

ÖVE/ÖNORM EN 62282-3-300: 2013 04 01

Brennstoffzellentechnologien - Teil 3-300: Stationäre-Brennstoffzellen-Energiesysteme - Installation (IEC 62282-3-300:2012) (deutsche Fassung)

Zusammenfassung:

Diese ÖVE/ÖNORM enthält Mindest-Sicherheitsanforderungen für die Errichtung von stationären Brennstoffzellen-Energiesystemen innerhalb und außerhalb geschlossener Räume nach IEC 62282-3-100 und gilt für die Errichtung der nachstehend aufgeführten Systeme: - vorgesehen für direkten Netzanschluss oder über einen schnell zugänglichen, manuell zu bedienenden Übertragungsschalter; - vorgesehen für ein eigenständiges Energieverteilungssystem; - vorgesehen für die Abgabe von Wechsel- oder Gleichstrom; - mit oder ohne die Fähigkeit der Wärmerückgewinnung. Diese Norm ist auf die durch den Errichtungsprozess hervorgerufenen Bedingungen beschränkt, die zu Gefährdungen von Personen und zu Schäden an der Anlage und externen, nicht zu dem Brennstoffzellen-Energiesystem gehörenden Einrichtungen führen können. Diese Norm deckt nicht die Sicherheitsanforderungen für stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme ab, die in der Norm IEC 62282-3-100 behandelt werden.

Brennstoffzellentechnologien - Teil 3-100: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme - Sicherheit (IEC 62282-3-100:2012) (deutsche Fassung)

Zusammenfassung:

„Diese ÖVE/ÖNORM gilt für stationäre, fabrikgefertigte komplette Brennstoffzellen-Energiesysteme oder für Brennstoffzellen-Energiesysteme, die vor Ort aus fabrikgefertigten integrierten Baugruppen zusammengefügt werden. Diese Brennstoffzellen-Energiesysteme erzeugen Strom durch elektrochemische Reaktionen. Diese Norm gilt für Systeme, - die dafür vorgesehen sind, direkt oder mittels eines Schalters an das elektrische Netz oder an ein elektrisches Inselnetz angeschlossen zu werden; - die Wechselstrom (AC) oder Gleichstrom (DC) abgeben; - mit und ohne Wärmerückgewinnung; - zum Betrieb mit folgenden zugeführten Brennstoffen.“

Auszugsweise werden einige wichtige Punkte der Norm überblicksmäßig dargestellt. Für eine genauere Analyse wird der Leser auf die Norm verwiesen.

Es wird zwischen großen (über 10 kW Netto-Ausgangsleistung) und kleinen Brennstoffzellen-Energiesystemen unterschieden. Wesentlich für den Haushaltsbereich sind damit kleine Systeme, bei industriellen, kaskadierten Anwendungen sind große Systeme anzunehmen. Für große Systeme sind die Sicherheitsvorschriften naturgemäß strenger gesetzt.

Das Abgas kleiner Systeme darf etwa direkt in den Aufstellraum geleitet werden, wenn dieser Raum nicht in ein Wohngebäude integriert ist und über eine ausreichende Belüftung verfügt, die den CO-Gehalt unter 50 ppm und den O₂-Gehalt über 18% hält. Analoges gilt für Spül- und Belüftungsvorgänge.

Als Gefährdungsarten durch Brennstoffzellen-Energiesysteme sind mechanische, elektrische und thermische Gefährdungen sowie Gefährdungen durch Brand und Explosion, Fehlfunktionen, Materialien und Substanzen, Entsorgung sowie umgebungsbedingte Gefährdungen genannt.

Beim Aufstellort sind Punkte zu berücksichtigen wie z.B. Absicherung gegen Umstürzen, gegen Wettereinflüsse und gegen fremde Personen. Gebäudeseitig ist v.a. der Abgasaus- bzw. -eintritt. Sie müssen aber zur Wartung, aber auch in Notfällen zugänglich sein.

Ein Warnsystem für Gasaustritt entfällt bei Einsatz von odoriertem Gas, was bei in jedem Erdgasnetz ohnehin der Fall ist.

2.6 Wirtschaftlichkeit einer SOFC-Brennstoffzellenanlage für Stromerzeugung und Warmwasserbereitung

Im Folgenden wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für eine SOFC-Brennstoffzellenanlage in einem Mehrfamilienhaus mit 135 Wohneinheiten für teilweise Abdeckung des Haushaltsstrombedarfs und des Warmwasserwärmebedarfs durchgeführt.

Als Vergleichsheizsystem (hinsichtlich Betriebskosten) wird eine Gas-Brennwert-Zentralheizungsanlage zu Grunde gelegt. Da diese auch im Fall einer Installation des SOFC-Brennstoffzellenheizgerätes notwendig ist, fallen deren Investitions- und Instandhaltungskosten in jedem Fall und auch unverändert an (eine Redimensionierung ist bei den Leistungsverhältnissen nicht zu berücksichtigen) und sind daher für den Vergleich nicht relevant.

Die Mehrkosten durch die Investition in ein SOFC-Brennstoffzellenheizgerät samt Wartung/Instandhaltung und Reparaturen (Komponententausch) müssen daher mit den über den Betrachtungszeitraum unterschiedlich hohen notwendigen Bezügen aus dem Gas- und Stromnetz gegengerechnet werden.

Ökonomisch günstig für die SOFC-Brennstoffzelle ist jene Betriebsführung, bei der die aufgrund der niedrigen Einspeisetarife wirtschaftlich ungünstige Einspeisung ins Stromnetz möglichst vermieden wird und auch die Zahl der Volllaststunden maximiert wird. Dazu wird jene Bandlast ermittelt, die im MFH zu jeder Zeit benötigt wird. Durch die regelmäßige Belastung der Brennstoffzelle wird weiters deren Effizienz (v.a. in der Langzeitperspektive) und Lebensdauer erhöht.

Darüber hinaus wird der el. Wirkungsgrad optimiert angenommen, weil sich Haushaltskunden damit wesentlich mehr Energiekosten einsparen können. Die angenommenen 60% el. Wirkungsgrad liegen etwas höher als die meisten derzeit am Markt befindlichen Produkte. Dennoch zeigen die Untersuchungen, dass solche Werte – zumindest bei Neuanlagen – möglich sind. 30% Abwärmeeffizienz führen zu einer realistischen Gesamteffizienz von 90%. Im Laufe der Zeit kommt es zu einer el. Wirkungsgrad-Verminderung und einer Erhöhung des Abwärmeanteils durch Alterungsprozesse im Brennstoffzellen-Stack.

In ErP LOT 2 (Warmwasserbereiter) werden Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung gar nicht explizit erwähnt und würden somit unter die allgemeinen Grenzwerte fallen, die nie über 64 % hinausgehen. In LOT 1 (Heizgeräte und Kombigeräte) gibt es separate Grenzwerte für KWK von bis zu 100%, wobei Strom stets mit dem Faktor 2,5 bewertet wird. In jedem Fall würde daher bereits eine Anlage mit 40% elektrischer Effizienz die Mindestanforderungen schaffen, ganz ohne Abwärmenutzung. Eine Anlage mit 60% elektrischer und 30% thermischer Effizienz kommt somit auf eine Gesamtenergieeffizienz laut ErP von $60 \cdot 2,5 + 30 = 180$ und erreicht damit die höchste Label-Klasse A+++ (ab 150).

Rechtliche Grundlage für das gemeinschaftliche Betreiben einer hauszentralen SOFC-Brennstoffzellenanlage ist die EIWOG-Novelle 2017. Bisher war es nicht zulässig eine gemeinschaftliche hauszentrale Stromerzeugungsanlage zu betreiben ohne entsprechende Lizenz als Stromlieferant. Dies wurde nun geändert: Gemäß §16a EIWOG gilt u.a. nun Folgendes:

(1) Die Ausführungsgesetze haben einen Rechtsanspruch der Netzzugangsberechtigten gemäß § 15 gegenüber den Netzbetreibern vorzusehen, gemeinschaftliche Erzeugungsanlagen unter den Voraussetzungen von Abs. 2 bis Abs. 7 zu betreiben. Die freie Lieferantenwahl der Endverbraucher darf dadurch nicht eingeschränkt werden.

(2) Der Anschluss von gemeinschaftlichen Erzeugungsanlagen ist nur an gemeinschaftliche Leitungsanlagen, über die auch die teilnehmenden Berechtigten angeschlossen sind (Hauptleitungen), im Nahebereich der Anlagen der teilnehmenden Berechtigten (Verbrauchsanlage) zulässig. Der direkte Anschluss der gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage an Anlagen im Eigentum des Netzbetreibers oder die Durchleitung von eigenerzeugter Energie durch Anlagen des Netzbetreibers an teilnehmende Berechtigte ist unzulässig.

Der Netzbetreiber hat

1. die Einspeisung und den Bezug der gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage mit einem Lastprofilzähler oder unterhalb der Grenzen des § 17 Abs. 2 mit einem intelligenten Messgerät gemäß § 7 Abs. 1 Z 31 zu messen;
2. den Bezug der Kundenanlagen der teilnehmenden Berechtigten mit einem Lastprofilzähler oder unterhalb der Grenzen des § 17 Abs. 2 mit einem intelligenten Messgerät gemäß § 7 Abs. 1 Z 31 zu messen;
3. die gemessenen Viertelstundenwerte der Erzeugungsanlage und der Anlagen der teilnehmenden Berechtigten seiner Rechnungslegung an die teilnehmenden Berechtigten zugrunde zu legen sowie nach Maßgabe der Marktregeln den Lieferanten zur Verfügung zu stellen.

Sofern also ein gemeinsamer Netzanschluss vorhanden ist und die Stromzähler bereits auf Smart Meter umgestellt sind, ist eine hauszentrale KWK-Anlage (bzw. SOFC-Brennstoffzellenanlage) mit gemeinschaftlicher Stromnutzung zulässig.

Die Novelle ist bereits beschlossen, jedoch noch nicht in Kraft. Damit ist im Laufe des heuriges Jahres 2017 zu rechnen.

Das Strom-Lastprofil eines Gebäudes mit 135 Wohneinheiten zeigt eine Grundlast von 15 kW (siehe Abbildung 2-4 im Abschnitt 2.1.1), die zu jeder Zeit abgenommen wird.

Man erkennt, dass die Bandlast bei 135 Wohneinheiten mit 15 kW deutlich (überproportional) höher ist als bei 9 Wohneinheiten (vgl. Abbildung 2-3), etwa um den Faktor 50 bei einem Verbrauchsverhältnis von 1:15. Dies bedeutet, dass die gemeinsame Versorgung einer großen Gruppe an Wohneinheiten bei wünschenswerter Maximierung der Volllaststunden besser funktioniert.

Die elektrische Bandlast von 15 kW reduziert den jährlichen Stromverbrauch um etwa 131.400 kWh, die korrespondierende thermische Bandlast kann zur Gänze in die Warmwasserbereitung fließen und beträgt etwa 65.700 kWh/a. Somit wird eine unwirtschaftliche Einspeisung elektrischer Energie ins Stromnetz vermieden und die entstehende Wärme kann mit einem Tagesspeicher das ganze Jahr über sinnvoll genutzt werden.

Die durchschnittlichen Stromkosten für Haushalte liegen im Juli 2017 (inkl. aller Steuern und Abgaben) bei 20,10 ct./kWh, für Gas bei 6,74 ct./kWh (Quelle: Eurostat). Für eine Referenz-Gaskesselanlage für den Warmwasserbedarf wird eine brennwertbezogene Effizienz von 85% angenommen (liegt etwas unter dem Jahresnutzungsgrad, da v.a. im Sommer die Effizienz sinkt).

Da das Verhältnis zwischen Anlagezinssatz und Preissteigerungen mit großen Unsicherheiten behaftet ist, wird auf eine Abzinsung verzichtet.

Somit ergibt sich folgende Abschätzung des Einsparpotenziales (vgl. Tabelle 2-22):

Tabelle 2-22. Abschätzung des Einsparpotenziales

	SOFC-Brennstoffzelle	Referenz Gaskessel
Wärmeenergie kWh/a	65.700,00	
elektr. Energie kWh/a	131.400,00	
Gasbezug Netz kWh/a	219.000,00	77.294,12
Strombezug Netz kWh/a	0,00	131.400,00
Kosten Gas + Strom €/a	14.760,60	31.621,02
Mögliches Einsparpotenzial SOFC €/a	16.860,42	
kumuliert in 18 Jahren €	303.487,62	

Das mögliche Einsparpotenzial resultiert aus den höheren Stromkosten gegenüber Gas. Man erkennt, dass die Summe aus Strom- und Gasbezug aus dem Netz in beiden Fällen praktisch gleich hoch ist. In Deutschland ist dieser Preisunterschied nochmals viel deutlicher, sodass dort für Brennstoffzellen günstigere Verhältnisse vorliegen.

Die Lebensdauer von Gaskesseln wird je nach Quelle mit 15 bis 20 Jahren angegeben, hier wurden 18 Jahre als Betrachtungszeitraum gewählt, wobei der Stack einer SOFC derzeit nicht diese Lebensdauer erreicht. (Dasselbe gilt für einzelne Komponenten eines Gas-Brennwertkessels genauso, jedoch sind diese nicht so kostspielig und treten zudem auch im Referenzfall mit ausschließlich Gas-Brennwertbeheizung auf.) Weiters ist die Einbindung in das Gesamtsystem, sowohl hydraulisch, als auch elektrisch, zu berücksichtigen.

In weiterer Folge muss jedoch auch die Degradation mitberücksichtigt werden.. SOFC-Brennstoffzellen erreichen am Beginn zwar sehr hohe Effizienzwerte, lassen jedoch im Laufe der Betriebsdauer des Stacks deutlich nach – der elektrische Wirkungsgrad sinkt um einige Promille pro 1.000 Betriebsstunden, bevor der Stack nach einigen 10.000 Betriebsstunden ausgetauscht werden muss. Dazu gibt es allerdings stark voneinander abweichende Literaturangaben, die aber durch die ständige Weiterentwicklung der Technologie möglicherweise zu hoch liegen, natürlich v.a. hinsichtlich der älteren Quellen. Die Abwärmemenge steigt zwar durch Degradation im etwa selben Ausmaß, die Kosteneinsparungen für Haushalte werden durch diese Verschiebung und die im Vergleich zu den Gaspreisen (für Wärmeerzeugung) höheren Strompreise dennoch negativ beeinflusst. Eine regelmäßige Belastung der Brennstoffzelle ohne Hoch- und Herunterfahren (wie hier angenommen) hilft zwar die Degradation zu senken und die Lebensdauer zu erhöhen, aber die negativen Effekte sind auch damit nicht zu vermeiden.

Durch die Ersparnis an Energiebezugskosten können – je nach Degradation – Systemmehrkosten von € 200.000.- bis max. 300.000.- gerechtfertigt werden. Dies scheint deutlich unter den Anschaffungskosten der bereits derzeit am Markt befindlichen Produkte zu sein, wenngleich es in dieser Leistungskategorie kaum bis keine verfügbaren SOFC-Produkte gibt. Jedoch müssen hierin auch die erhöhten Systemwartungskosten Deckung finden (die konventionelle Gasheizanlage bleibt ja in beiden Fällen gleich, es kommt also zu keiner

Ersparnis bei der Wartung, sondern ausschließlich zu einem Zusatzaufwand durch die Brennstoffzelle) ebenso wie die erhöhten Kosten durch Komponententausch.

Angesichts der genannten Reihe von Unsicherheiten aufgrund fehlender Langzeiterfahrung und nicht am Markt befindlicher Produkte ist eine sichere Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer solchen Systemkonfiguration nicht zu treffen.

3 Schlussfolgerungen

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.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen in der EU und in Österreich enthalten meist keine für Brennstoffzellen spezifischen Regelungen, sie fallen unter KWK. In Zukunft wird es notwendig sein durch unterstützende Rechtsrahmen, aber auch Förderungen, die SOFC-Brennstoffzellentechnologie voranzubringen.

Der Kostenvergleich zeigt, dass bei optimalen Effizienzwerten eine SOFC-Brennstoffzellenanlage für größere Gebäude mit hoher Grundlast wirtschaftlich sein kann. Derzeit stehen dem aber noch teils mangelnde Produktverfügbarkeit und -haltbarkeit entgegen.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die SOFC-Technologie kann einen wesentlichen Beitrag zum effizienteren Einsatz von fossilen Brennstoffen und zum Ausbau regenerativer Energiesysteme leisten. Für die breite Marktdurchdringung sind jedoch weiterführende Komponentenentwicklungen erforderlich. Neben der Verringerung der Degradationsraten sind materialtechnologische Verbesserungen in Bezug auf die ohmschen und elektrochemischen Verluste im Stack notwendig. Die damit verbundene Reduktion des ASR-Wertes hat dabei einen Mehrfachnutzen. Zum einen wird die effektiv nutzbare Zellenspannung erhöht und zum anderen wird die Dissipationsenergie vermindert. Dadurch sinkt der Temperaturgradient im Stack und die zur Kühlung notwendige Kathodenluftmenge kann reduziert werden. Erfolgt darüber hinaus eine gezielt geregelte endotherme Reaktion im Eintrittsbereich des Anodenraums mittels interner CH_4 -Reformierung, so kann die erforderliche Kathodenluftmenge zusätzlich verringert und in weiterer Folge das effektiv nutzbare Temperaturniveau der Abwärme erhöht werden. Zukünftige Entwicklungen sollten daher materialtechnologische Verbesserungen zur Reduktion des ASR-Wertes und zur Umsetzung der internen CH_4 -Reformierung berücksichtigen.

Um Lastschwankungen auszugleichen und damit optimale Betriebsbedingungen für SOFC-Systeme zu ermöglichen, sind eine Integration von thermischen und elektrischen Kurzzeitspeichern und ggf. eine gebäudeübergreifende elektrische Vernetzung sinnvoll. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung von selbstlernenden Lademanagementsystemen zur Berücksichtigung des nutzerspezifischen Verhaltens in die weiterführenden Forschungsarbeiten einzubeziehen.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Häufigkeitsverteilung des Strom-Wärme-Verhältnisses für ein Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten und 78 Bewohnern und einer Mittelungszeit der Lastprofile von 24 Stunden.....	17
Abbildung 2-2: Häufigkeitsverteilung des Strom-Wärme-Verhältnisses für ein Mehrfamilienhaus mit 40 Wohneinheiten und 78 Bewohnern und einer Mittelungszeit der Lastprofile von einer Stunde.....	17
Abbildung 2-3: Mittels synPRO generiertes elektrisches Lastprofil eines Wohngebäudes mit 9 Wohneinheiten.....	18
Abbildung 2-4: Mittels synPRO generiertes elektrisches Lastprofil von 15 Wohngebäuden mit insgesamt 135 Wohneinheiten.....	19
Abbildung 2-5: Aufteilung des Wärmebedarfs auf diverse Temperaturbereiche bzw. Anwendungszwecke (Pehnt et al, 2010).....	19
Abbildung 2-6: In Österreich hinsichtlich des Energieverbrauchs relevante Branchen, Quelle: Statistik Austria.....	21
Abbildung 2-7: Stoff- und Energieströme eines SOFC-Systems nach Heddrich (2012).....	22
Abbildung 2-8: SOFC-System mit CPOX-Reformer.....	24
Abbildung 2-9: SOFC-System mit oxidativer Dampfreformierung und Anodenabgasrezirkulation (strichliert dargestellt).....	26
Abbildung 2-10: SOFC-System mit Dampfreformierung.....	27
Abbildung 2-11: SOFC-System mit Anodenabgasrückführung.....	28
Abbildung 2-12: SOFC-System mit serieller Stack-Verschaltung.....	29
Abbildung 2-13: Elektrische Spannung einer Einzelzelle im Vergleich zu zwei in Reihe geschalteten Zellen (modifizierte Darstellung nach Jahn (2014)).....	29
Abbildung 2-14: Gibbs-Energie in Abhängigkeit der Reaktionslaufzahl nach Atkins und de Paula (2006).....	32
Abbildung 2-15: Bildungsrate von festem Kohlenstoff bei 600°C und $n_{CH_4} = 1 \text{ mol/s}$	38
Abbildung 2-16: Bildungsrate von festem Kohlenstoff bei 750°C und $n_{CH_4} = 1 \text{ mol/s}$	39
Abbildung 2-17: Bildungsrate von festem Kohlenstoff bei 900°C und $n_{CH_4} = 1 \text{ mol/s}$	39
Abbildung 2-18: Funktionsschema einer Festoxid-Brennstoffzelle mit Wasserstoff.....	40
Abbildung 2-19: Reduktion von Sauerstoff an der Kathode.....	41
Abbildung 2-20: Stoff- und Energiebilanz der SOFC-Zelle.....	45
Abbildung 2-21: Stoff- und Energiebilanz eines diskreten Elements der SOFC-Zelle.....	47
Abbildung 2-22: Schaltbild des analysierten SOFC-Systems.....	50
Abbildung 2-23: Elektrischer Wirkungsgrad von SOFC-Systemen mit unterschiedlichen Brennstoffaufbereitungsstrategien.....	51
Abbildung 2-24: Links: Analysierter Abhitzekessel zur Sattdampfproduktion. Rechts: Q-T-Diagramm mit dem Abgastemperaturverlauf (rot) und dem wasserseitigen Temperaturverlauf (blau).....	54

Abbildung 2-25: Label für Heizgerät mit Kraft-Wärme-Kopplung.....	58
---	----

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der untersuchten Gebäudevarianten.....	16
Tabelle 2-2: Auflistung der Vor- und Nachteile der CPOX-Anlagenverschaltung	25
Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile der oxidativen Dampfreformierung.....	26
Tabelle 2-4: Vor- und Nachteile der Dampfreformierung.....	27
Tabelle 2-5: Vor- und Nachteile der Anodenabgas-Rückführung	28
Tabelle 2-6: Vor- und Nachteile der seriellen Stack-Verschaltung	30
Tabelle 2-7: Aussagen über das Reaktionsgleichgewicht.....	36
Tabelle 2-8: Nernstspannungen unterschiedlicher Brennstoffe.....	44
Tabelle 2-9: Abweichungen des White-Box-Modells gegenüber der gemessenen Stack- Leistung.....	46
Tabelle 2-10: Abweichungen des 1D Modells gegenüber der gemessenen Stack-Leistung.	48
Tabelle 2-11: Abweichungen des 3D-Modells gegenüber der gemessenen Stack-Leistung.	49
Tabelle 2-12: Zusammenfassung der Abweichungen der einzelnen Stack-Modelle.....	49
Tabelle 2-13: Berechnete Kennzahlen des SOFC-Systems mit adiabater POX-Reformierung ($T_2 = 750^\circ\text{C}$).....	53
Tabelle 2-14: Berechnete Kennzahlen des SOFC-Systems mit Anoden-Off-Gas-Rezirkulation (AOGR) und interner Reformierung ($T_2 = 750^\circ\text{C}$).....	54
Tabelle 2-15: Berechnete Abgastemperaturen und Dampfmassenströme ($T_2 = 750^\circ\text{C}$).....	55
Tabelle 2-16: Saisonale Energieeffizienzklassen für Raumheizung und Energieeffizienz η_s .	59
Tabelle 2-17: Gegenüberstellung Etikettierung	60
Tabelle 2-18: Ökodesign-Mindestanforderungen für Raumheizgeräte mit Kraft-Wärme- Kopplung.....	62
Tabelle 2-19: Investitionszuschüsse für Kraft-Wärme-Kopplungssysteme (OEMAG, 2015)..	70
Tabelle 2-20: Statistische Indikatoren der Strom- und Wärmeerzeugung in Österreich	71
Tabelle 2-21: Einspeisetarife für mit Biogas betriebene KWKs gemäß Ökostromgesetz 2012	72
Tabelle 2-22. Abschätzung des Einsparpotenziales	80

5.3 Literaturverzeichnis

- Amiri A., Vijay P., Tade M.O., Ahmed K., Ingram G.D., Pareek V., Utikar R.(2015): “Planar SOFC system modelling and simulation including a 3D stack module”, Centre for Process Systems Computations, Department of Chemical Engineering, Curtin University, Ceramic Fuel Cells Ltd.
- Atkins P., de Paula J. (2006): “Atkins’Physical Chemistry””, University of Oxford, 8.Edition W.H.Freeman and Company

- Bove R., Ubertini S. (2008): "Modeling Solid Oxide Fuel Cell-Methods, Procedures and Techniques", Springer Verlag, Volume 1
- Braun R.J. (2002): "Optimal Design and Operation of Solid Oxide Fuel Cell Systems for Small-scale Stationary Applications", Dissertation University of Wisconsin-Madison
- Chase M.W. (1998): „NIST-JANAF Thermochemical Tables“, Fourth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, ISBN 1-56396-831-3
- Danilov V.A., Tade M.O. (2009): "A new technique of estimating anodic and cathodic charge transfer coefficients from SOFC polarization curves", Department of Chemical Engineering Cutin University, Department of Chemical Technology Kazan University
- Fan L., Van Biert L., Thattai A.T., Verkooijen A.H.M., Aravind P.V. (2015): „Study of Methane Steam Reforming kinetics in operating Solid Oxide Fuel Cells: Influence of current density“, Delft University of Technology Netherlands
- Fischer D., Härtl A., Wille-Hausmann B. (2015): „Model for electric load profiles with high time resolution for German households“. Energy and Buildings
- Fischer D., Wolf T., Scherer J., Wille-Hausmann 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
- Iwanschitz B.. (2012): „Degradation von Ni-Cermet-Anoden in keramischen Hochtemperaturbrennstoffzellen“, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
- Jahn M. (2013): „Verfahrenstechnische Entwicklung von Festoxidbrennstoffzellensystemen“, Habilitationsschrift der Technischen Universität Dresden
- Klein S., Nellis G. (2012): „Heat Transfer“, Cambridge University Press
- Kupecki J., Milewski J., Szczesniak A., Bernat R., Motylinski K. (2015): „Dynamic numerical analysis of cross-, co-, and counter-current flow configuration of a 1 kW-class solid oxide fuel cell stack“, Thermal Process Department Warsaw- Institute of Heat Engineering Warsaw
- Kupecki J., Skrzypkiewicz M., Wierzbicki M., Stepien M. (2015): „Experimental and numerical analysis of a serial connection of two SOFC stacks in a micro-CHP system fed by biogas“, Institute of Power Engineering Warsaw , Poland
- Megel S., Girdauskaite E., Sauchuk V., Kusnezoff M., Michaelis A. (2010): „Area specific resistance of oxide scales grown on ferritic alloys for solid oxide fuel cell interconnects“, Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems Dresden, Germany
- Milewski J., Swirski K., Santarelli M., Leone P. (2011): „Advanced Methods of Solid Oxide Fuel Cell Modeling“, Springer Verlag, Green Energy and Technology
- Pehnt M., Bödeker J., Arens M., Jochem E., Idrissova F. (2010): „Die Nutzung industrieller Abwärme-technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung“, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg-Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung-IREES GmbH
- Razbani O., Assadi M. Andersson M. (2013): "Three dimensional CFD modeling and experimental validation of an electrolyte supported solid oxide fuel cell fed with methane-

free biogas”, Department of Petroleum Engineering Stavanger Norway – Department of Energy Sciences Lund Sweden

Schmidt A., Braun R. (2012): „Dynamic Modeling of Solid Oxide Fuel Cell Systems for commercial building applications“, Colorado School of Mines, European SOFC Forum

Schwister K., Leven V.. (2014): „Verfahrenstechnik für Ingenieure, Lehr- und Übungsbuch“, Fachbuchverlag Leipzig 2. aktualisierte Auflage

Van Biert L. (2014): „Direct Internal Methane Steam Reforming in Operation Solid Oxide Fuel Cells, A kinetic modelling approach“, Delft University of Technology, Challenge the future

- DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 811/2013 DER KOMMISSION vom 18. Februar 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten, Kombiheizgeräten, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen – Labelling Regulation
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013R0811&from=DE> (abgerufen am 9. Februar 2017)
- VERORDNUNG (EU) Nr. 813/2013 DER KOMMISSION vom 2. August 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013R0813&from=DE> (abgerufen am 9. Februar 2017)
- RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=DE> (abgerufen am 14. Februar 2017)
- RICHTLINIE 2012/27/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:DE:PDF> (abgerufen am 14. Februar 2017)
- RICHTLINIE 2009/28/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0028&from=DE> (abgerufen am 28. Februar 2017)
- RICHTLINIE 2009/72/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Juli 2009 über gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Aufhebung der Richtlinie 2003/54/EG

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0055:0093:de:PDF>
(abgerufen am 28. Februar 2017)

- RICHTLINIE 2009/73/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Juli 2009 über gemeinsame Vorschriften für den Erdgasbinnenmarkt und zur Aufhebung der Richtlinie 2003/55/EG (abgerufen am 7. Dezember 2016)
- OEMAG: Investitionszuschüsse für Kraft-Wärme-Kopplungsanlage gemäß KWK Gesetz (Inkrafttreten per 01.02.2015), 2015
- Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB 6-Richtlinie: Energieeinsparung und Wärmeschutz https://www.oib.or.at/sites/default/files/richtlinie_6_26.03.15.pdf (abgerufen am 30. November 2016)
- Österreichische Gesetze, Richtlinien und Ordnungen (außer OIB 6): <https://www.ris.bka.gv.at/> (abgerufen am 15.-16. November 2016)



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)