

# Techno-Ökonomische Analyse der Hochtemperatur-Elektrolyse (SOEC)

**Christoph BIEGLER\*, Henrik GOMMEL, Arko STEINWENDER**

Fraunhofer Austria Research GmbH, Theresianumgasse 27, 1040 Wien, +43 1 504 69 06,  
office@fraunhofer.at, www.fraunhofer.at

**Kurzfassung:** Die Hochtemperaturelektrolyse auf Basis von Feststoff-Oxid-Zellen (SOEC) befindet sich in einer frühen Phase der Technologieentwicklung. Um bereits in dieser frühen Phase Aussagen über die zukünftige Konkurrenzfähigkeit dieser Technologie machen zu können, analysiert die vorliegende Studie die damit verbundenen Wettbewerbspotenziale unter Berücksichtigung verschiedener Rahmenbedingungen. Die Studie zeigt, dass sich die Hochtemperaturelektrolyse besonders in Kombination mit der Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen zu einem wirtschaftlichen System der Wasserstofferzeugung durch Umwandlung von überschüssiger erneuerbarer Energie entwickeln kann.

**Keywords:** Ökonomische Analyse, SOEC, Hochtemperatur-Elektrolyse, Wasserstoff

## 1 Einleitung/Projektvorstellung

Das Projekt „Hydrogen Production by Solid Oxid Electrolyser Cells“ (HydroCell) ist ein Forschungsprojekt des Programmes e!MISSION.at des Klima- und Energiefonds (KLIEN), gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). Das Ziel des Projektes, durchgeführt durch ein Konsortium bestehend aus AVL List GmbH, Plansee SE, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Montanuniversität Leoben und Fraunhofer Austria Research GmbH, ist die Entwicklung und Auslegung eines Hochtemperatur-Elektrolysesystems auf Basis von Feststoff-Oxid-Zellen (solid oxide electrolyser cells - SOEC).

Die Hochtemperaturelektrolyse verspricht signifikante Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren wie der PEM- (polymer electrolyte membrane) oder alkalischen Elektrolyse. Generell stellt die Wasser-Elektrolyse eine mögliche Schlüsseltechnologie für die zukünftige Energieversorgung auf Basis stochastisch stromproduzierender, regenerativer Kraftwerke (Wind, PV, Wasser) dar. Ausgehend von der Elektrolyse kann der produzierte Wasserstoff als solcher gespeichert oder in synthetische Kraftstoffe (Bio-Methan und weiters „Gas-to-Liquid Fuels“) umgewandelt und gespeichert oder ins Gas-Netz eingespeist werden.

Fraunhofer Austria hat die technische/technologische Entwicklung begleitet und eine Studie zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und der daraus entstehenden Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale der SOEC erstellt, die in diesem Beitrag vorgestellt wird.

### 1.1 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel der techno-ökonomischen Analyse ist es, das grundsätzliche Marktpotenzial der Wasserstofferzeugung durch Umwandlung von EE in SOE-Systemen zu erheben.

Eine besondere Herausforderung bei der vorliegenden Analyse, die in einer sehr frühen Phase der Technologieentwicklung durchgeführt wurde, ist die Verfügbarkeit technischer Basisinformationen, wie beispielsweise Leistungsmerkmale, Materialeinsatz oder Herstellverfahren. Daher wird diese techno-ökonomische Analyse aufbauend auf einem technischen Prototyp eines SOE-Systems (Proof-of-Concept) durchgeführt.

Die angestrebten Projektergebnisse sind somit die verbraucher- und erzeugerseitige Darstellung des Marktes für SOEC-Systeme sowie die quantifizierten Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale dieser Technologie.

## **1.2 Methodische Vorgehensweise**

Das Vorgehen gliedert sich in die Phasen „Identifikation potenzieller Nutzergruppen“, „Erarbeitung von Energieszenarien“, „Plankostenrechnung bei Skalierung des Proof-of-Concept“ und „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung“.

Im Abschnitt Identifikation potenzieller Nutzergruppen werden mögliche Einsatzgebiete der Umwandlung und Speicherung von EE im Energiesystem untersucht, um so die Anforderungen an SOE-Systeme zu identifizieren und in einem Lastenheft zu spezifizieren.

Die Erarbeitung von Energieszenarien dient der Betrachtung der zukünftigen Entwicklung von EE auf Basis unterschiedlicher Studienergebnisse, um den gesamten Umwandlungs- und Speicherbedarf für EE im Hinblick auf zu erwartende Überschussleistungen abzuleiten. Unter Berücksichtigung anderer Technologien zur Umwandlung und Speicherung elektrischer Energie lassen sich Szenarien zur Umwandlung und Speicherung von EE in Form von Wasserstoff und schließlich im Hinblick auf die notwendige Umwandlungsleistung für SOE-Systeme ableiten. Diese wiederum dienen der Bildung von Szenarien in Bezug auf Stückzahlen und Systemgrößen der SOE-Systeme über den zeitlichen Verlauf der Betrachtung.

Bei der Plankostenrechnung bei Skalierung des Proof-of-Concepts wird das im Zuge des Projektes HydroCell entwickelte prototypische System unter Berücksichtigung unterschiedlicher Entwicklungsstände der Systemkomponenten kostenseitig bewertet. Hierbei werden komponentenspezifisch stückzahlbezogene (Lern- und Skaleneffekte) sowie leistungsabhängige Kosteneffekte über den Betrachtungszeitraum zur Plankostenrechnung zugrunde gelegt. Im Zuge dieses Kapitels wird weiters eine Wertschöpfungsrechnung zur Abschätzung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale bei der Herstellung von SOE-Systemen durchgeführt.

Abschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinsichtlich der Wasserstoffgestehungskosten bei SOE-Systemen durchgeführt und über eine Sensitivitätsbetrachtung in Bezug auf Anlagenkosten (Investitionen), Anlagenauslastung, Strompreis und Wirkungsgrad bewertet.

## **1.3 Systemeingrenzung**

Die Einsatzmöglichkeiten für Elektrolyse-Systeme und im Speziellen für SOE-Systeme sind vielfältig. Um dennoch eine möglichst aussagekräftige Betrachtung durchführen zu können, wird in dieser Studie ausschließlich das SOE-System betrachtet, welches mit Strom aus

erneuerbaren Energiequellen (EE) gespeist wird und Wasserstoff bei Normbedingungen erzeugt. In der techno-ökonomischen Analyse werden somit weder die direkte Weiterverwendung vom erzeugten, hochreinen Wasserstoff, noch die Weiterverarbeitung (z.B. Speicherung, Methanisierung) betrachtet, sondern nur das in sich abgegrenzte SOE-System.

Eine weitere Systemeingrenzung bezieht sich auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums der betrachteten Technologie werden nur die Anschaffungskosten des Systems und damit keine weiteren laufenden Kosten (bspw. Wartung und Instandhaltung) berücksichtigt. Die Betriebskosten ergeben sich demnach aus den Abschreibungen der Anschaffungskosten und den Preisen der umzuwandelnden Überschussenergie aus erneuerbaren Energiequellen.

## **2 Identifikation potenzieller Nutzergruppen**

Hinsichtlich der Markt- und Anforderungsanalyse wurden zunächst mögliche Nutzergruppen von Elektrolysesystemen identifiziert und hinsichtlich der Anwendungsfelder der Wasserstoffelektrolyse in den jeweiligen Nutzergruppen analysiert. Das relativ breite Spektrum theoretisch möglicher Nutzergruppen (bspw. private Haushalte, Industrie, Energieversorger) und das damit einhergehende breite technische Anforderungsspektrum an SOE-Systeme wurde daraufhin auf diejenigen Nutzergruppen eingeschränkt, für die die Hochtemperaturelektrolyse aufgrund möglicher realisierbarer Geschäftsmodelle (Speicherung elektrischer Energie in Form von Wasserstoff, Erzeugung und Vertrieb von Wasserstoff als Industriegas) am ehesten in Frage kommen.

Da konkurrierende Energiespeichersysteme (bspw. Pumpspeicher, Druckspeicher etc.) bzw. –umwandlungssysteme (Power-2-Gas, bspw. PEM-Elektrolyse, alkalische Elektrolyse) und klassische Verfahren der Wasserstofferzeugung (Reformierung) der Hochtemperaturelektrolyse aus aktueller Sicht kostenseitig überlegen sind, müssen andere Vorteile der Hochtemperaturelektrolyse geltend gemacht werden. Diese bestehen aufgrund der hohen Betriebstemperatur im Wesentlichen im höheren elektrischen Wirkungsgrad im Gegensatz zu kommerziellen Elektrolysesystemen [1–3]. Aufgrund der raschen Anlauf- und Abschaltzeiten (bei einem Halten auf Betriebstemperatur) und der guten Eigenschaften der SOE-Systeme bei Laständerungen eignen sich diese Systeme besonders gut für die Speicherung von periodischen EE (z.B. Windkraft, Photovoltaik, etc.) [2], wegen der hohen Betriebstemperaturen günstiger Weise in Kombination mit Kraftwerks- oder Prozessabwärme [1,3–5]. Wesentlich für alle Betreiber stellt allerdings die Tatsache dar, dass in erster Linie die Lebenszykluskosten eines SOE-Systems bei gleichen technischen Eigenschaften gleich oder geringer als die der konkurrierenden, teilweise bereits am Markt verfügbaren Systeme sein müssen.

## **3 Erarbeitung von Energieszenarien**

Bei der Erarbeitung von Energieszenarien werden, aufbauend auf Studien zu den Auswirkungen der Energiewende hinsichtlich der zu erwartenden und zu speichernden bzw. umzuwandelnden Energiemengen aus volatilen, erneuerbaren Energiequellen,

unterschiedliche Szenarien herangezogen. Schwerpunktmäßig wird hierbei Deutschland betrachtet, da dieser Strommarkt als besonders betroffen von der Energiewende gilt. Diesem „Angebotsszenario“ wird ein „Nachfrageszenario“ entgegengestellt, dass die in energieintensiven industriellen Prozessen (Stahlerzeugung, Papiererzeugung etc.) vorhandenen ungenutzten Prozessabwärmern aufzeigt. Hierbei zeigt sich, dass ausreichend Prozessabwärme vorliegt, um die Überschussenergie volatiler Quellen mittels Hochtemperaturelektrolyse entsprechend umzuwandeln.

### **3.1 Erneuerbare Energie – umzuwandelnde Leistung**

Die volatile Erzeugung von Strom auf Basis von EE bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich, die beispielsweise durch die zeitliche und örtliche Verschiebung zwischen Stromerzeugung und -verbrauch begründet ist [6]. Speichern verschiedener Art wird dabei eine immer größere Rolle zur Flexibilisierung und Anpassung des Energiesystems zugesprochen, wobei eine Vielzahl von Faktoren den zukünftigen Speicherbedarf hinsichtlich Größe, Technologie, Bedarfsentwicklung, rechtlichen Vorschriften etc. bestimmen.

Die vorliegende Studie bezieht sich auf die vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik [7] durchgeführte Leitstudie für den Ausbau EE in Deutschland, um so ein mögliches Szenario für den Marktanlauf von SOE-Systemen hinsichtlich zeitlicher und kapazitiver Entwicklung ableiten zu können. Demnach wird eine installierte Stromleistung EE im Basisszenario von ca. 130 GW (2025) bzw. 150 GW (2030) prognostiziert. Nach Popp [8] ermittelt sich der resultierende Speicherbedarf als das 1,6-fache der installierten EE-Leistung und beträgt somit ca. 200 GW (2025) bzw. 240 GW (2030). Unter der in HydroCell getroffenen konservativen Annahme, dass rund fünf Prozent der zu speichernden Energiemenge durch verschiedene Elektrolysetechnologien und davon ca. 25 Prozent durch die Hochtemperaturelektrolyse in Wasserstoff umgewandelt wird, kann im Jahr 2030 eine durch SOE-Systeme benötigte Umwandlungsleistung von 2500 MW EE-Leistung erwartet werden. Diese Umwandlungsleistung kann durch eine jährliche Verdopplung der Produktionsmenge auf Zellebene erreicht werden (siehe Abschnitt 4.1).

### **3.2 Industrie- und Prozessabwärme**

Der industrielle Energiebedarf beläuft sich in Deutschland auf rund 30 Prozent des gesamten Endenergiebedarfs, wobei drei Viertel davon zur Bereitstellung von Wärme eingesetzt wird [9]. Ähnliche Werte ergeben sich für den österreichischen Industriesektor [6]. Die dabei entstehenden Potenziale zur Abwärmenutzung werden dabei nur selten ausgeschöpft [10]. Genau in diesem Bereich kann die Hochtemperatur-Elektrolyse wesentliche Vorteile geltend machen, die im Anlagenbetrieb mit einem erhöhten Eingangs-Temperaturniveau ( $T > 100^\circ\text{C}$ ) durch die Nutzung industrieller Abwärme signifikante Wirkungsgradsteigerungen im Hinblick auf die Wasserstoffproduktion verspricht.

Ziel dieses Abschnitts ist die Ableitung von Abwärmepotenzialen energieintensiver Industriezweige und die daraus resultierende Speicherleistung der Hochtemperatur-Elektrolyseanlagen. Die Berechnung erfolgt dabei auf Basis relevanter Studien [11,12]. Dabei wird eine Umrechnung auf den deutsch-österreichischen und den EU28-weiten Industriesektor über die Datenbanken der Statistik Austria [13] sowie dem statistischen Amt der Europäischen Union (Eurostat) [14] durchgeführt.

Tabelle 1 zeigt die kumulierten Abwärmeleistungen sowie das daraus berechnete mögliche Potenzial für Umwandlungsleistung der SOEC auf Basis der betrachteten Studien.

Vorhandene Abwärmeleistung in MW			daraus mögliche Umwandlungsleistung der SOEC in MW
Pehnt et al.	D+AT	11.116	54.424
	EU28	36.279	177.623
Broberg et al.	D+AT	1.752	8.578
	EU28	6.821	33.396

*Tabelle 1 - Vorhandene Abwärmemengen sowie theoretisches Speicherpotenzial durch die Abwärmenutzung*

Die Analyse zeigt dabei ein für die in 3.1 definierte Speicherleistung von 2500 Megawatt ausreichendes Potenzial an Prozessabwärme. Kritisch betrachtet werden muss der fehlende Informationsgehalt der Studien bezüglich der Form und Verfügbarkeit der Abwärme.

## 4 Plankostenrechnung bei Skalierung des Proof-of-Concept

Dieser Abschnitt widmet sich der Preisanalyse der Herstellkosten des SOE-Systems auf Basis einer Subkomponentenanalyse der Proof-of-Concept-Anlage. Ausgehend von den aktuellen Prototypenpreisen werden über Stückzahl- und Größeneffekte die Plankosten für mögliche SOE-Anlagengrößenklassen 200kW, 600kW und 2MW berechnet. Durch die Darstellung des zeitlichen Kostenverlaufs auf Komponenten- und Gesamtanlagen-Ebene lassen sich Rückschlüsse auf die zukünftige Konkurrenzfähigkeit des SOE-Systems ziehen.

### 4.1 Stückzahlentwicklung der Zellen-Produktion

Als Szenario der Stückzahlenentwicklung wird eine jährliche Verdoppelung der Ausbringungsmenge der Zellproduktion bei einem Ausgangswert von 10.000 Zellen im ersten Produktionsjahr (T1) zugrunde gelegt wird. Dieses Produktionswachstum wird bis zum Erreichen der in 3.1 definierten benötigten, über die SOE-Anlagen umzuwandelnde Überschussleistung angenommen. Die kumulierte Leistung der produzierten Zellen über den Zeitverlauf ist unter diesen Annahmen in Abbildung 1 dargestellt. Die erforderliche Umwandlungsleistung von 2500 Megawatt kann unter dem definierten Szenario der Stückzahlentwicklung zum Zeitpunkt T13 erreicht werden und korrespondiert mit dem angenommenen EE-Szenario (siehe Abschnitt 3.1).

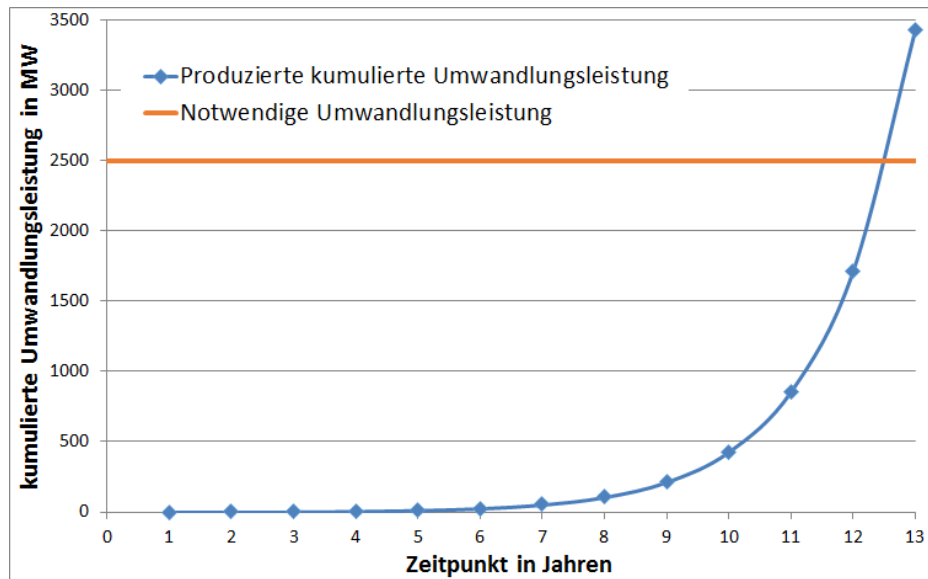


Abbildung 1 - Entwicklung der kumulierten Umwandlungsleistung im Zeitverlauf

Zur Berechnung der Anzahl an produzierten SOE-Anlagen wird eine prozentuale Verteilung des Anteils der Größenklassen an der Gesamtumwandlungsleistung vorgenommen:

- 200 kW-Anlage: 55 Prozent der der Umwandlungsleistung
- 600 kW-Anlage: 30 Prozent der Umwandlungsleistung
- 2 MW-Anlage: 15 Prozent der Umwandlungsleistung

Durch diese Annahmen kann das jährliche Produktionsvolumen auf Komponentenbasis definiert und die zeitliche Kostenentwicklung unter Berücksichtigung der Kostendegressionseffekte durch Stückzahleneffekte sowie Größeneffekte abgebildet werden, die im folgenden Kapitel besprochen werden.

## 4.2 Kosteneffekte

Bei der Kalkulation von Baureihen, die auf Ähnlichkeitsgesetzen beruhen, kann über einfache größenabhängige Gesetzmäßigkeiten auf Kalkulationsformeln zurückgegriffen werden, die eine erste Kostenabschätzung zur Kostendegression in Abhängigkeit der geometrischen Beziehungen ermöglichen (Wachstumsgesetze) [15]. Somit ergeben sich zwei Kostendegressionseffekte. Zum einen wird über die Lernkurven ein zeitliches Kosteneinsparungspotenzial, welches zu einer Kostensenkung der Gesamtanlagenkosten führt, abgebildet. Zum anderen berücksichtigen die Größeneffekte die leistungsbezogenen Einsparungspotenziale in Abhängigkeit der Anlagengröße.

### 4.2.1 Stückzahleneffekte – Lernrate

Das Konzept der Lernkurve bildet grundlegend die Kostendegression durch die zunehmende Produktionserfahrung ab, die durch die kumulierte Produktionsmenge bestimmt wird [16]. Die Lernkurve stellt dabei das Einsparungspotenzial bezogen auf die Basiskosten dar, die bei einer Verdoppelung der Ausbringungsmenge umgesetzt werden kann [17]. Allerdings stellt sich dieses Kosteneinsparungspotenzial nicht automatisch ein sondern muss durch gezielte Maßnahmen identifiziert und ausgeschöpft werden [18].

Die Stückkosten für das x-te Stück ( $k_x$ ) berechnen sich über die Stückkosten des ersten Stücks ( $k_1$ ), der kumulierten Produktionsmenge ( $x$ ) sowie der Kostenelastizität ( $\lambda$ ), die als Funktion der Lernrate darstellbar ist. Die Lernrate beschreibt dabei die Kostenreduktion bei einer Verdopplung der Produktionsmenge [18]. Die mathematische Formulierung ist in folgender Formel (1) angeführt [15,18].

$$k_x = k_1 x^{-\lambda} \quad (1)$$

Im hier vorliegenden Anwendungsfall wurden die Lernraten in Rücksprache mit den Konsortialpartnern auf Komponentenbasis bestimmt.

#### 4.2.2 Größeneffekte

Größeneffekte charakterisieren die Kostendegression, die durch das Scale-Up auf leistungsstärkere Anlagengrößen resultiert. Diese Kosteneffekte werden im vorliegenden Anwendungsfall anhand der bekannten Referenzkosten der 10kW-Proof-of-Concept-Anlage auf Komponentenebene nach den in Bronner [15] entsprechend aufgezeigten Verfahren abgebildet und auf die drei definierten SOE-Leistungsklassen angewandt.

#### 4.3 Leistungsbezogene Herstellkosten im zeitlichen Verlauf

Die leistungsbezogenen Herstellkosten der drei Anlagenvarianten sind im zeitlichen Verlauf in Abbildung 2 dargestellt. Der Kostenverlauf ergibt sich dabei aus den getroffenen Stückzahlenszenarien (4.1) und Kosteneffekten (4.2). Die zeitliche Kostendegression ist dabei den hinterlegten Lernraten auf Subkomponentenbasis (4.2.1) zuzuordnen. Die leistungsspezifischen Herstellkostenunterschiede zwischen den Anlagenvarianten betragen bis zu zwanzig Prozent (T13) und resultieren aus den Größeneffekten (4.2.2).

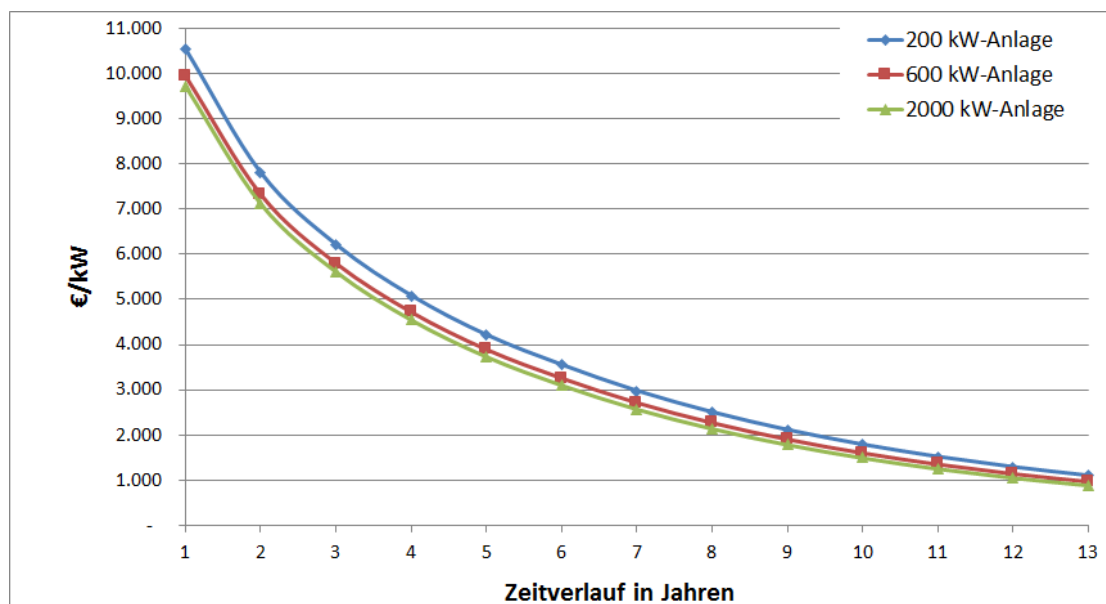


Abbildung 2 - zeitlicher Verlauf der leistungsbezogenen Herstellkosten

#### 4.4 Ableitung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenzialen

Zur Ableitung des Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenzials werden die einzelnen Komponenten der passenden Branche der NACE-Klassifizierung zugeordnet, um so den

Unterschieden in den Wertschöpfungsketten der einzelnen Komponenten gerecht zu werden [19]. Aus den jeweiligen Gesamtproduktionsvolumina und den dazugehörigen Herstellkosten lässt sich mit den hinterlegten Kennwerten der NACE-Klassen das branchenspezifische Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenzial auf Komponentenebene ableiten.

Die gesamte Beschäftigungsentwicklung ist im zeitlichen Verlauf in Abbildung 3 abgebildet. Die einzelnen Komponenten wurden auf Basis der Strukturstückliste als Stack-, Modul- bzw. Balance-of-Plant-(BoP)Komponenten zusammengefasst. Die Stack-Komponenten umfassen dabei u.a. die direkte Produktion der Zellen sowie der Interkonnektoren und weisen das größte Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenzial auf. Disruptive Veränderungen in den Herstellverfahren der Komponenten im Sinne von Technologiesprüngen sind hierbei nicht berücksichtigt und können zu deutlich unterschiedlicher Beschäftigungsentwicklung führen.

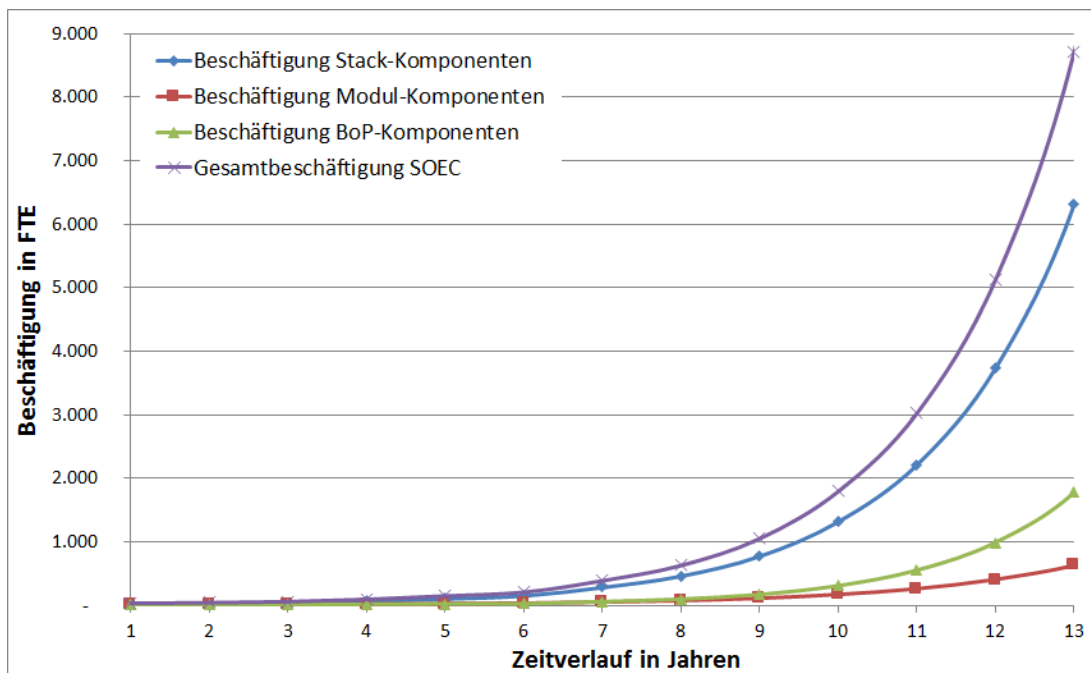


Abbildung 3 - Beschäftigungsentwicklung durch die SOEC-Produktion

## 5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wasserstoffgestehungskosten bilden die Kosten ab, die zur Herstellung eines Kilogramms Wasserstoff anfallen. Diese lassen sich über die in Kapitel 4 durchgeführte Analyse der Herstellkosten berechnen. Dabei werden die reinen Herstellkosten in die Kalkulation einbezogen. Kosten bezüglich des Betriebs und der Instandhaltung der Anlage bleiben in dieser Betrachtung unberücksichtigt. Diese relevante, leistungsspezifische Größe lässt Aussagen bezüglich der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Konkurrenzverfahren zu. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

- Strompreis im Einkauf: 6 Cent pro kWh
- Abschreibungsdauer: 10 Jahre
- Anlagenauslastung: 50 Prozent

Die Auswirkung einer Veränderung der variablen Faktoren wie Strompreis und Anlagenauslastung wird in Kapitel 5.3 im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachtet und



ermöglicht eine Betrachtung von unterschiedlichen Einsatzszenarien für potenzielle zukünftige Anwender.

### 5.1 Zeitliche Entwicklung der Wasserstoffgestehungskosten

Die zeitliche Entwicklung der Wasserstoffgestehungskosten zu den angeführten Annahmen zeigt Tabelle 2. So liegen im Zeitpunkt T10 die Kosten für ein Kilogramm Wasserstoff für alle Anlagenvarianten unter sechs Euro. Für die nachfolgenden Berechnungen in Kapitel 5.2 und 5.3 wird exemplarisch auf die Wasserstoffgestehungskosten der 600 kW-Anlage zu diesem Zeitpunkt referenziert.

Zeitpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Wasserstoffgestehungskosten in €/kg H2</b>													
200 kW-Anlage	13,77	11,31	9,88	8,86	8,08	7,49	6,97	6,55	6,19	5,90	5,66	5,45	5,28
600 kW-Anlage	13,23	10,87	9,51	8,54	7,79	7,22	6,73	6,34	6,01	5,74	5,51	5,32	5,17
2000 kW-Anlage	13,04	10,70	9,35	8,39	7,66	7,09	6,61	6,22	5,90	5,64	5,42	5,25	5,10

Tabelle 2 - Wasserstoffgestehungskosten der Anlagenvarianten im zeitlichen Verlauf

### 5.2 Gestehungskosten über die Stromkostenvariation

Da speziell die zukünftigen Stromkosten mit großen Unsicherheiten behaftet sind, werden in diesem Abschnitt Variationen des Strompreises und deren Auswirkung auf die erreichbaren Wasserstoffgestehungskosten dargestellt. Abbildung 4 zeigt verschiedene Isokostenkurven der Wasserstoffgestehung in Abhängigkeit von der Anlagenauslastung des SOE-Systems und möglicher Strompreise. Liegt der Strompreis in etwa bei sechs Cent pro kWh, sind Wasserstoffgestehungskosten von fünf Euro pro Kilogramm Wasserstoff nur mit einer 100-prozentigen Anlagenauslastung zu realisieren. Bei einem Preisniveau von vier Cent pro kWh Strom liegt die benötigte Anlagenauslastung hingegen nur bei knapp über 30 Prozent.

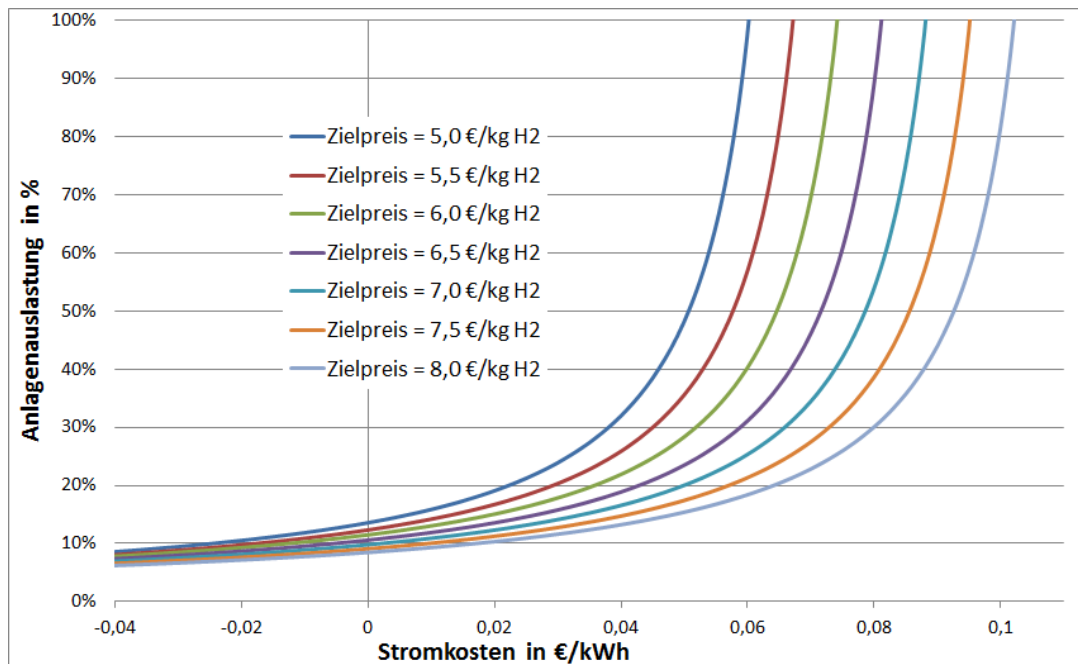


Abbildung 4 - Notwendige Anlagenauslastung in Abhängigkeit der Stromkosten für ausgewählte Zielpreise der Wasserstoffgestehungskosten

Da davon auszugehen ist, dass die umzuwandelnde und zu speichernde Überschussenergie aus EE zu günstigen Preisen gehandelt wird, kann die Hochtemperaturelektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff aus EE als konkurrenzfähig betrachtet werden.

### 5.3 Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss diverser Einflussparameter abzubilden, die aufgrund der vorliegenden Unsicherheiten Schwankungen und Abweichungen unterworfen sind, erfolgt in diesem Abschnitt eine Untersuchung der Sensitivität der getroffenen Annahmen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt dabei die Abhängigkeit der Wasserstoffgestehungskosten von den der Berechnung zugrundeliegenden Parametern auf [20,21]. Abbildung 5 zeigt die Sensitivitätsanalyse des Anwendungsfalles auf: Die Abszisse bildet dabei die prozentuale Abweichung der Eingangs-Parameter vom ursprünglichen Wert ab, während die Ordinate die daraus resultierenden prozentualen Abweichungen der ursprünglichen Wasserstoffgestehungskosten wiedergibt. Daraus lässt sich ablesen, dass der SOEC-Wirkungsgrad sowie die Stromkosten einen starken Einfluss aufweisen, während die Variation der Anlagenkosten sowie der Anlagenauslastung nur geringe Abweichungen bezüglich der Wasserstoffgestehungskosten verursacht.

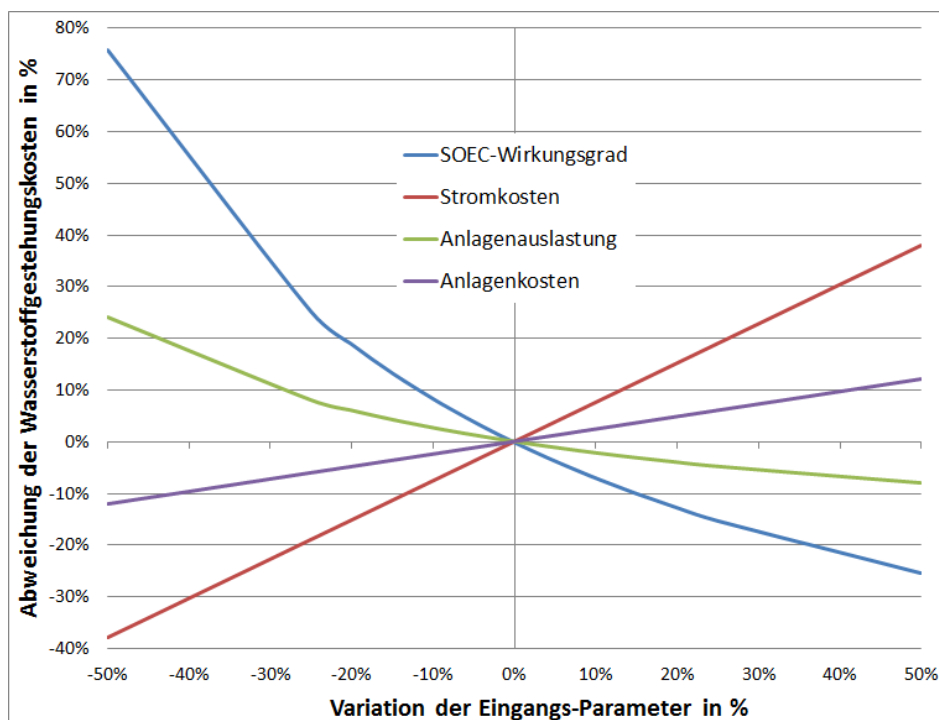


Abbildung 5 – Sensitivitätsanalyse

## 6 Resümee und kritische Betrachtung

Die vorliegende techno-ökonomische Studie untersucht in einer frühen Phase der Technologieentwicklung die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von SOE-Systemen zur Umwandlung EE in Wasserstoff. Die Hochtemperaturelektrolyse eignet sich vor allem bei einer Kopplung mit industriellen Prozessen, die eine hohe Menge ungenutzter Abwärme erzeugen. In diesem Anwendungsfall ist die Hochtemperaturelektrolyse im Vergleich zu anderen Elektrolyseverfahren bezogen auf die leistungsbezogenen Anlagenkosten konkurrenzfähig

[22,23]. Bei niedrigen Strompreisen, die durch die überschüssige EE temporär zu erwarten sind, kann die Erzeugung von Wasserstoff als Kuppelprodukt (als Produkt, welches simultan mit anderen Produkten hergestellt wird) energieintensiver Produktionsprozesse attraktiv werden, auch wenn das SOE-System durch die Volatilität der Überschussenergie nur gering ausgelastet sein kann.

Durch die hohen Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Entwicklung des Energiesystems und damit einhergehend die in Zukunft zu erwartenden Strompreise für Überschussenergien bzw. mögliche Alternativen zur Speicherung wie beispielsweise der Ausbau der Netzinfrastruktur, aber auch in Bezug auf die technologische Entwicklung der Hochtemperaturelektrolyse und alternativer Speichermöglichkeiten, sind auch die Ergebnisse dieser Studie mit hohen Unsicherheiten belastet. Diese Unsicherheiten werden zumindest ansatzweise in Form der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt: eine negative Abweichung des SOEC-Wirkungsgrad beeinflusst die Wasserstoffgestehungskosten und damit die Wirtschaftlichkeit dieser Technologie stark. Die Absicherung bzw. Verbesserung des Wirkungsgrades bei industriell eingesetzten Großanlagen muss daher Fokus der weiteren technologischen Entwicklung sein. Die Wirtschaftlichkeit von SOE-Systemen, aber auch von anderen Elektrolyseverfahren, hängt weiters stark von der Entwicklung der Strompreise von EE ab. Die Kuppelproduktion von Wasserstoff kann nur dann zu einem Geschäftsmodell werden, wenn Unternehmen, die diese Technologien einsetzen, eine gewisse Sicherheit in Bezug auf niedrige Strompreise für Überschussenergien haben.

## 7 References

- [1] P. Kim-Lohsoontorn, J. Bae, Electrochemical performance of solid oxide electrolysis cell electrodes under high-temperature coelectrolysis of steam and carbon dioxide, *Journal of Power Sources* 196 (17) (2011) 7161–7168.
- [2] J. Schefold, A. Brisse, M. Zahid, J.P. Ouweltjes, J.U. Nielsen, Long Term Testing of Short Stacks with Solid Oxide Cells for Water Electrolysis, in: 219th ECS Meeting, Montreal, QC, Canada, ECS, 2011, pp. 2915–2927.
- [3] C. Jin, C. Yang, F. Chen, Novel Micro-Tubular High Temperature Solid Oxide Electrolysis Cells, in: 219th ECS Meeting, Montreal, QC, Canada, ECS, 2011, pp. 2987–2995.
- [4] T. Kato, K. Sato, T. Honda, A. Negishi, Y. Tanaka, A. Momma, K. Kato, Y. Iimura, Development of Tubular Solid Oxide Electrolysis Stacks for Hydrogen Production, in: 219th ECS Meeting, Montreal, QC, Canada, ECS, 2011, pp. 2979–2985.
- [5] S. Kim, J. Yu, D. Seo, I. Han, S. Woo, Hydrogen Production by High Temperature Electrolysis Using Solid Oxide Electrolyzer Cells, in: 219th ECS Meeting, Montreal, QC, Canada, ECS, 2011, pp. 2957–2960.
- [6] Statistik Austria, Vorläufige Energiebilanz - Österreich 2014 in Terajoule, available at [http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_PDF\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=071936](http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=071936) (accessed on January 26, 2016).
- [7] Fraunhofer IWES, Roadmap Speicher: Speicherbedarf für erneuerbare Energien - Speicheralternativen - Speicheranreiz - Überwindung rechtlicher Hemmnisse. Kurzzusammenfassung, Kassel, 2014.

- [8] M. Popp, Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [9] S. Hirzel, B. Sonntag, C. Dr.-Ing. Rohde, Industrielle Abwärmenutzung: Kurzstudie, 76139 Karlsruhe, 2013, pp. 1–44.
- [10] M. Schröter, U. Weißfloch, D. Buschak, Energieeffizienz in der Produktion - Wunsch oder Wirklichkeit?: Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken. Modernisierung der Produktion, Karlsruhe, 2009.
- [11] S. Broberg, S. Backlund, M. Karlsson, P. Thollander, Industrial excess heat deliveries to Swedish district heating networks: Drop it like it's hot, Energy Policy 51 (2012) 332–339.
- [12] M. Dr. Pehnt, J. Bödeker, M. Arens, E. Prof. Dr. Jochem, F. Idrissova, Die Nutzung industrieller Abwärme: technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung, Heidelberg, Karlsruhe, 2010, pp. 1–49.
- [13] Statistik Austria, Energiebilanzen: Österreich - 1970 - 2013 (accessed on January 7, 2015).
- [14] eurostat, Energy balance sheets: 2013 data. 2015 edition, available at <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/6898731/KS-EN-15-001-EN-N.pdf/e5851c73-9259-462e-befc-6d037dc8216a> (accessed on January 25, 2016).
- [15] A. Bronner, Angebots- und Projektkalkulation: Leitfaden für Praktiker, 3rd ed., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, NY, 2008.
- [16] T.P. Wright, Factors Affecting the Cost of Airplanes, Journal of the Aeronautical Sciences 3 (4) (1936) 122–128.
- [17] J. Werhahn, Kosten von Brennstoffzellensystemen auf Massenbasis in Abhängigkeit von der Absatzmenge, Forschungszentrum Jülich, Zentralbibl, Jülich, 2009.
- [18] J.-P. Thommen, A.-K. Achleitner, Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht, 7th ed., Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [19] Statistik Austria, Leistungs- und Strukturstatistik 2013 - Hauptergebnisse, available at [http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_NATIVE\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=103060](http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=103060) (accessed on January 25, 2016).
- [20] T.A. Schütz, Sensitivitätsanalyse des Multiskalenmodells, in: T.A. Schütz (Ed.), Multiskalenmodellierung der Progression von Glioblastomen: Ein Ansatz unter der Berücksichtigung molekularer und zellulärer Prozesse, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, pp. 129–152.
- [21] K. Siebertz, D. van Bebber, T. Hochkirchen, Sensitivitätsanalyse, in: K. Siebertz, D.T. van Bebber, T. Hochkirchen (Eds.), Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DOE), 1st ed., Springer, Heidelberg, Dordrecht [u.a.], 2010, pp. 247–260.
- [22] P. Gerbert, P. Herhold, D. Heuskel, F. Klose, Trendstudie 2030+: Kompetenzinitiative Energie des BDI, 2013.
- [23] Energieinstitut der JKU - Auftraggeber BMWFJ, Power to Gas - eine Systemanalyse: Markt- und Technologiescouting und -analyse. Endbericht. 2014, Linz, 2014.