15. Symposium Energieinnovation, 14. bis 16. Februar 2018, Technische Universität Graz, www.EnInnov.TUGraz.at
ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Analyse des Betriebsverhaltens einer Power-to-Gas Anlage mit modularer Hochdruck-PEM-Elektrolyse

Markus SARTORY, Markus JUSTL, Alexander TRATTNER, Manfred KLELL

HyCentA Research GmbH, Inffeldgasse 15, A-8010 Graz, +43 316 873 9501,
office@hycenta.at, www.hycenta.at

Kurzfassung: Im österreichischen Pilotprojekt „wind2hydrogen“ wurde eine modulare Hochdruck-PEM-Elektrolyseanlage zur Herstellung von Wasserstoff geplant, behördlich genehmigt, aufgebaut und betrieben. Die Power-to-Gas Pilotanlage mit einer Anschlussleistung von 100 kW wurde am Standort einer bestehenden Erdgasverteilerstation, in unmittelbarer Nähe eines Windparks, realisiert. Wasserstoff wird mittels Hochdruckelektrolyse bei 163 bar erzeugt und ohne mechanische Verdichtung in Druckgas-Versandbehälter abgefüllt oder in das Erdgasnetz eingespeist. Im Rahmen des mehrjährigen Pilotbetriebs wurde die Anlage nach Durchführung von stationären und dynamischen Charakterisierungstests mit unterschiedlichen Lastprofilen betrieben. Der Eignungsnachweis für die Kopplung mit regenerativer Stromerzeugung wurde erbracht.

Keywords: Power-to-Gas, Hochdruck-Elektrolyse, PEM Elektrolyse, Wasserstoffproduktion

1 Einleitung

Zur Erreichung der Pariser Klimaziele [12] ist rasches Handeln und ein Paradigmenwechsel im aktuellen Energiesystem gefordert. Bis 2050 müssen die globalen Treibhausgas-Emissionen um mindestens 80 % (Basis 1990) reduziert werden, um die durchschnittliche Erderwärmung auf 2 °C zu beschränken [14,22]. Maßnahmen zur Ausschöpfung von Energieeinsparungspotentialen, eine Steigerung der Effizienz des Energiesystems sowie ein umfassender Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung sind dazu unerlässlich [2]. Mit zunehmendem Anteil regenerativer Stromproduktion, die durchwegs fluktuierenden Charakter aufweist, werden zur Anpassung von Stromerzeugungs- und Lastprofilen geeignete Speichertechnologien sowie Regelleistungen zur Stabilisierung der Stromverteilernetze notwendig. Nach heutigem Stand der Technik kommen zur Langzeitspeicherung großer Energiemengen neben Pumpspeicherkraftwerken nur chemische Energieträger wie Wasserstoff und synthetisches Methan, erzeugt aus Wasserstoff und CO_2, in Frage. Wasserstoff als kohlenstofffreier Energieträger und Energiespeicher ist der Schlüssel zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern [2,17].

Das zukünftige Energiesystem wird die heute noch getrennten Sektoren Mobilität, Haushalte und Industrie zu einem effizienten Gesamtsystem verbinden [11]. Die dafür erforderlichen Energieinfrastrukturen müssen aufeinander abgestimmt werden und Kohlenstoffkreisläufe sowie Rohstoffkreisläufe müssen geschlossen werden. Ein Wandel hin zu stromgeführter Energiewirtschaft mit erneuerbaren Energieströmen als dominierende Primärenergiequelle wird stattfinden [2,11]. Bei Stromerzeugung überwiegend aus erneuerbaren Quellen wird es erhebliche Fluktuationen in der Stromproduktion geben. Stromüberschüsse werden dabei wesentlich größer (z. B. in Deutschland 2050 um das 25-fache) als die Stromdefizite sein. Diese Energie muss sinnvoll genutzt werden, wofür geeignete Speichertechnologien, wie die Power-to-Gas Technologie, erforderlich werden.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

2 Grundlagen der Hochdruckelektrolyse

Der niederländische Chemiker A. P. v. Troostwijk und der deutsch-niederländische Mediziner und Chemiker J. R. Deiman demonstrierten im Jahre 1789 erstmals, dass Wasser mittels Elektrizität in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten werden kann. Der Begriff „Elektrolyse“ wurde später von M. Faraday eingeführt. Die Idee der Elektrolyse unter Druck ist erstmals mit Ende des 19. Jahrhunderts dokumentiert und wurde von D. Latchinoff (Russland) angedacht. Latchinoff machte den Vorschlag im Wasserzersetzungsgefäß gleichzeitig die Kompression der Gase auf bis zu 120 bar durchzuführen. Die erste industrialisierte Version von Druckelektrolyse (>5 bar bis etwa 30 bar) wurde 1948 von E. Zdansky für Lonza (Schweiz) gebaut. Elektrolyseure mit moderatem Druckniveau bis zu 80 bar wurden folgend von unterschiedlichen Herstellern entwickelt und gebaut [6,8,10,20]. Hochdruckelektrolyse mit Produktgasdrücken >100 bar wurde in den letzten Jahren vorwiegend anhand von Laboraufbauten untersucht, siehe [19]. 2015 wurde mit der wind2hydrogen-Pilotanlage in Österreich die weltweit erste PEM-Hochdruck Power-to-Gas Anlage in der 100 kW-Klasse mit direkter chemischer Verdichtung auf bis zu 163 bar in Betrieb genommen. 2016 präsentierte Honda einen PEM-Hochdruck Elektrolyseur mit chemischer Verdichtung auf 700 bar. [3,5,7,9,15,23]

Eine Elektrolysezelle, wie in Abbildung 1 links schematisch dargestellt, besteht im Wesentlichen aus den Elektroden, dem Elektrolyten und einer ionenleitenden Membran. Über die Elektroden erfolgt die Zufuhr der elektrischen Energie in Form von Gleichstrom. Der Elektrolyt dient als Ionenleiter und ist damit zur Realisierung eines geschlossenen Stromkreises erforderlich. Die Membran dient zur Trennung der sich entwickelnden Produktgasströme für Sauerstoff und Wasserstoff. [2]

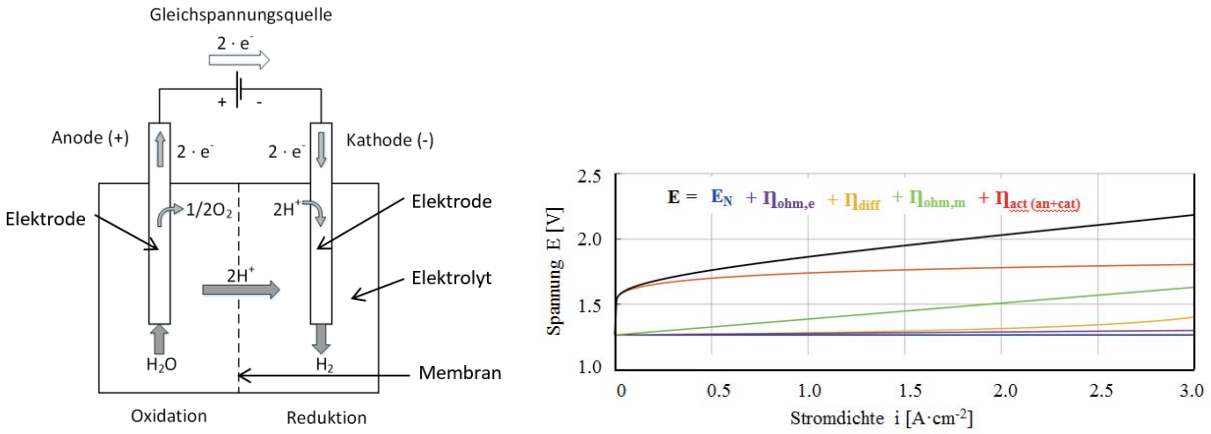


Abbildung 1: Links: Schema einer Elektrolysezelle für die Wasserelektrolyse [2];
Rechts: Typische Strom-Spannungskennlinie einer Elektrolysezelle [2,19]

Für die elektrolytische Zerlegung von Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff, muss unter Standardbedingungen ($T_0 = 298{,}15\ \mathrm{K}$ und $p_0 = 1\ \mathrm{bar}$) die Reaktionsenthalpie $\Delta_\mathrm{R} H_\mathrm{m}^0$ zugeführt werden. Die elektrolytische Wasserspaltung ist ein nicht spontan ablaufender (endergoner) und endothermer Prozess.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

$$\mathrm{H_2O(l)} \rightarrow \mathrm{H_2(g)} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2\,(g)}, \qquad \Delta_\mathrm{R} H_\mathrm{m}^0 = 285{,}83\ \left[\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}}\right] \tag{2-1}$$

Aus der molaren, freien (Gibbs-) Reaktionsenthalpie $\Delta_\mathrm{R} G_\mathrm{m} := \Delta_\mathrm{R} H_\mathrm{m} - T\Delta_\mathrm{R} S_\mathrm{m}$, der Anzahl der im Rahmen der elektrolytischen Spaltung ausgetauschten Elektronen z_el und der Faradaykonstante *F* lässt sich die theoretisch erforderliche Zellspannung (Nernstspannung) berechnen, die für die reversible, isotherm und isobar ablaufende Reaktion erforderlich ist, um den Zersetzungsprozess zu bewirken [2]:

$$E_\mathrm{N} = -\frac{\Delta_\mathrm{R} G_\mathrm{m}}{z_\mathrm{el} \cdot F} \tag{2-2}$$

Die freie Reaktionsenthalpie $\Delta_R G_\mathrm{m}$ ändert sich mit Druck und Temperatur. Für Standardbedingungen errechnet sich die Standardzellspannung E^0 mit der freien Standardreaktionsenthalpie von $\Delta_\mathrm{R} G_\mathrm{m}^0 = 237{,}13\ [\mathrm{kJ/mol}]$ zu $E^0 = -1{,}23\ [\mathrm{V}]$. Die Nernstspannung als Funktion von Druck und Temperatur kann basierend auf der Aktivität der Reaktanten a angeschrieben werden zu:

$$E_\mathrm{N}(p,T) = \frac{\Delta_\mathrm{R} G_\mathrm{m}(T,p_0)}{z_\mathrm{el} \cdot F} + \frac{R_\mathbf{m} \cdot T}{z_\mathrm{el} \cdot F} \cdot ln \frac{a(\mathrm{H_2}) \cdot \sqrt{a(\mathrm{O_2})}}{a(\mathrm{H_2O})} \tag{2-3}$$

Die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Nernstspannung ist für den Druckbereich 1 bar bis 700 bar in Abbildung 9 dargestellt. Die erforderliche Zellspannung nimmt mit zunehmender Temperatur ab, ihre Druckabhängigkeit zeigt einen exponentiellen Verlauf und nimmt von 1 bis 100 bar stark zu. Zu erkennen ist, dass im Bereich von 100 bis 700 bar die Spannungserhöhung deutlich geringer ausfällt.

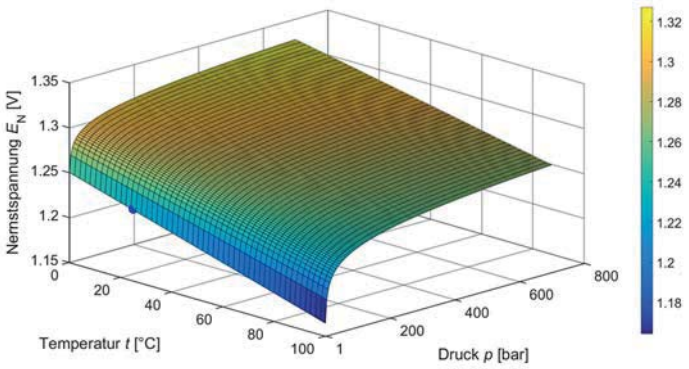


Abbildung 2: Verlauf der Nernstspannung über den Druckbereich von 1 bis 700 bar (ideales Gasverhalten) [19]

Der anoden- und kathodenseitige Druckaufbau bei Druckelektrolyse ist über unterschiedliche Pfade möglich und kann durch Rückhalten der produzierten Gase bis zum Erreichen des gewünschten Produktgasdrucks bzw. durch hydraulische Verdichtung des zugeführten Wassers erfolgen, siehe [2,9,18,19]. Im Gegensatz zur asymmetrischen Druckelektrolyse, herrscht bei symmetrischer Druckelektrolyse auf der Anoden- und Kathodenseite gleicher Druck [19].

Wird einer Elektrolysezelle eine Spannung $E > E_\mathrm{N}$ aufgeprägt, beginnt elektrischer Strom zu fließen und die elektrolytische Reaktion wird in Gang gesetzt. Ausgehend von der Nernstspannung erhöht sich die erforderliche Zersetzungsspannung mit steigendem

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Stromfluss aufgrund zahlreicher Verluste in Folge irreversibler Prozesse. Die Mehrspannungen werden als Überspannungen $\Delta E = \sum \eta_{\mathrm{i}}$ bezeichnet. Die erforderliche Zersetzungsspannung liegt um den Betrag ΔE über der Nernstspannung E_{N}:

$$E = E_{\mathrm{N}} + \Delta E = E_{\mathrm{N}} + \eta_{\mathrm{act}} + \eta_{ohm,\mathrm{e}} + \eta_{\mathrm{ohm,m}} + \eta_{\mathrm{diff}} \qquad (2\text{-}4)$$

Es wird zwischen Aktivierungsüberspannungen η_{act}, den Ohm'schen Spannungsverlusten $\eta_{\mathrm{ohm,e}}$, der elektrischen Widerstandsüberspannung der Membran $\eta_{\mathrm{ohm,m}}$ und den Diffusionsüberspannungen η_{diff} differenziert, siehe [2,13,19]. Den Zusammenhang zwischen Stromfluss und erforderlicher Zersetzungsspannung zeigt die Strom-Spannungskennlinie, wie in Abbildung 1 rechts schematisch dargestellt.

Wesentlich für die Wirkungsgradnachteile bei Druckelektrolyse im Vergleich zur atmosphärischen Elektrolyse ist neben der Erhöhung der Nernstspannung insbesondere der Wasserstoffverlust zufolge Gasquerdiffusion über die Membranen. Wasserstoff wird aufgrund von Konzentrationsunterschieden von der Kathodenseite zur Anodenseite transportiert und Sauerstoff von der Anodenseite zur Kathodenseite. Die Verunreinigungen auf beiden Seiten sind abhängig von den vorherrschenden Druckverhältnissen, der Temperatur und den Materialeigenschaften der trennenden Membran. Zusätzlich sind sicherheitstechnische Aspekte zufolge Wasserstoffakkumulation auf der Anodenseite zu beachten. Die Analyse der Gesamtwirkungsgrade unterschiedlicher Verdichtungsprozesse zeigt, dass bei geeigneter Gestaltung des Hochdruckelektrolyseprozesses und optimierten Membraneigenschaften die chemische Verdichtung deutliche Vorteile gegenüber konventioneller mechanischer Verdichtung bis hin zu Produktgasdrücken von 1000 bar aufweist. [19,21]

3 Modulare Pilotanlage

Die im Projekt wind2hydrogen entwickelte modulare Hochdruck-PEM-Elektrolyseanlage mit einer elektrischen Anschlussleistung von 100 kW und einer Wasserstoffproduktionsrate von 14,4 Nm³/h ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Anlage wurde in Containerbauweise errichtet und besteht aus dem Container der Warte mit der zentralen Steuerung, dem Elektrolysecontainer und dem Gaskonditioniercontainer zur Einspeisung des Wasserstoffs in das Erdgasnetz. [18,19]

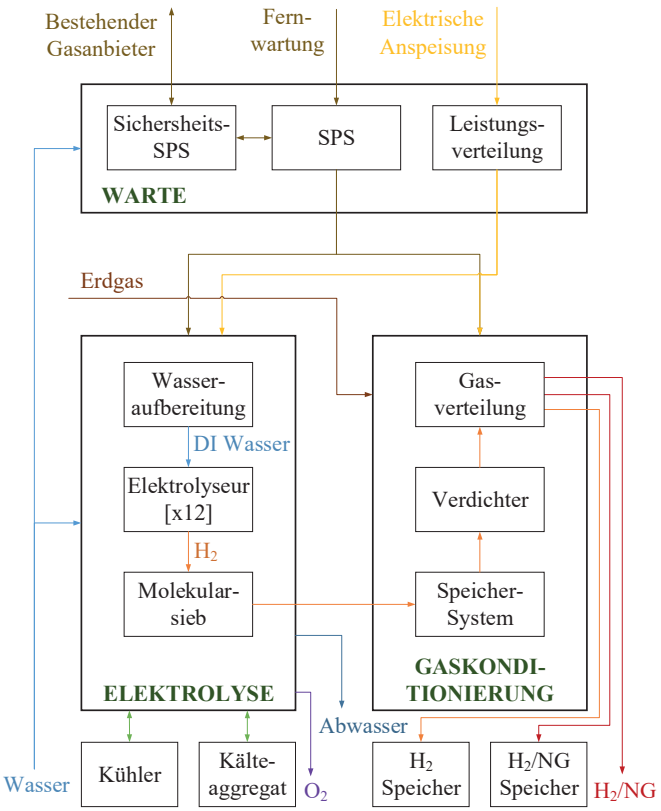
Abbildung 3: wind2hydrogen – Hochdruck-PEM-Elektrolyseanlage

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

3.1 Anlagenbeschreibung

Um die Komplexität in der Entwicklung von Elektrolyseanlagen zu minimieren, wurde für die beschriebene Anlage ein modularer Aufbau gewählt. Wie im Blockschaltbild in Abbildung 4 dargestellt, wurde die Anlage in drei Hauptmodule mit zugehörigen Submodulen unterteilt.

In der Warte befinden sich alle für die übergeordnete Anlagensteuerung benötigten Systeme. Die Anlage wird unbemannt und über ein Fernsteuerungssystem betrieben. Sicherheitsrelevante Steueraufgaben werden von einer separaten sicherheitsgerichteten Steuereinheit übernommen. Zusätzlich erfolgt über die Warte die elektrische Leistungsverteilung zu den restlichen Anlagenbereichen.



Temperaturbereich	-20 bis +40 °C
Elektrischer Anschluss Gesamtanlage	bis 250 kW 400 VAC 50 Hz
Maximale H_2-Produktionsrate	14,4 Nm³/h (1,28 kg/h)
Wasserstoffdruck	163 bar
Reinheit von H_2	99,999 % (5.0)
Taupunkt H_2	-50 bis -70 °C
Lastbereich	3 bis 100 %
Einspeisedruck ins Erdgasnetz	bis 80 bar
Mischungsverhältnis (Wasserstoff/Erdgas)	bis zu 100 vol% H_2

Abbildung 4: Blockschaltbild der Gesamtanlage und ausgewählte technische Daten

Im Elektrolysecontainer befinden sich alle für die Produktion des Wasserstoffs notwendigen Subsysteme und zwölf separate Elektrolysemodule. Die Elektrolysemodule sind separat ansteuerbar. Im Vergleich zum eingeschränkten Lastbereich (40 bis 100 %) einer vergleichbaren Hochdruckelektrolyseanlage in Ein-Stack-Ausführung ermöglicht die modulare Bauweise den flexiblen Betrieb innerhalb eines weiten Lastbereiches von 3 bis 100 % der Nennlast (Volllast). In der Wasseraufbereitungsanlage wird Frischwasser zu deionisiertem Wasser (DI-Wasser) aufgereinigt und für die Elektrolysemodule vorgehalten. In zwölf separaten Elektrolysemodulen wird DI-Wasser mittels elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Die bei der Elektrolyse entstehende Wärme wird über das Prozesskühlsystem am Dach des Containers an die Umgebung abgegeben. Das mit Wasserdampf gesättigte Produktgas Wasserstoff wird in zwei Schritten getrocknet, um die geforderte Reinheit von 5.0 zu erreichen. Im ersten Schritt wird Wasserstoff – in einer separaten Leitung auch Sauerstoff – im Elektrolysemodul auf 3 °C gekühlt um einen Großteil des Wassergehaltes abzuscheiden und dem internen DI-Wasserkreislauf rückzuführen. Die

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

dafür nötige Kühlleistung wird durch einen Kaltwassersatz bereitgestellt. Im zweiten Trocknungsschritt wird Wasserstoff durch ein Molekularsieb auf einen Taupunkt von bis zu -70 °C aufgereinigt. Sauerstoff wird über eine Abblaseleitung an die Umgebung abgegeben.

Im Gaskonditioniercontainer befinden sich alle Submodule (Speicher, Kompressor, Gasverteilung) die zur Abfüllung des Wasserstoffs in Versandbehälter sowie zur Einspeisung in das Erdgasnetz benötigt werden. Wasserstoff wird vorgemischt mit Erdgas in einem definierten Mischungsverhältnis in das Erdgasnetz eingespeist.

3.2 Behördliche Genehmigung und Sicherheitskonzept

Die Genehmigung der Errichtung und des Betriebs der Pilotanlage erfolgten nach dem niederösterreichischen Gassicherheitsgesetz und dem ArbeitnehmerInnenschutzgesetz. Die Baubewilligung wurde nach der niederösterreichischen Bauordnung erteilt. In mehreren Workshops wurden mithilfe von SWIFT (Structured What If Technique) und HAZOP (Hazard and Operability Study) Studien die Gefahren- und Risiken beurteilt sowie entsprechende Maßnahmen für die Risikominimierung definiert. Die dabei festgestellten Sicherheitsaspekte wurden festgehalten und umgesetzt. In den Räumen mit gasführenden Rohrleitungen sorgen mindestens zwei Gaswarnsensoren für eine ständige Überwachung der Wasserstoff-konzentration. Bei einer Konzentration von 10 % der unteren Explosionsgrenze (10 % UEG) aktivieren die Gassensoren ein EX-ausgeführtes Lüftungssystem, das die vorhandene Wasserstoffkonzentration sofort mit Frischluft verdünnt und in die Atmosphäre absaugt. Bei Erreichen von 20 % UEG werden alle nicht EX-ausgeführten Systeme innerhalb dieser Räume stromlos geschaltet und in einen sicheren Zustand versetzt. 20 % UEG entspricht ein Fünftel der Wasserstoffkonzentration, die mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch bildet.

3.3 Simulationsmodell der Pilotanlage

Um detaillierte Analysen unterschiedlicher Betriebsweisen mit unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen und verschiedenen Prozessparametern durchführen zu können, wurden Simulationsmodelle für das PEM-Hochdruckelektrolysemodul und für die gesamte Elektrolyseanlage inklusive aller erforderlichen peripheren Systeme erstellt. Die physikalischen Effekte in der Elektrolysezelle, wie die Aktivierungs-, Diffusions-, und Widerstandsverluste sowie die Gasquerdiffusion über die Membran wurden berücksichtigt und durch parametrierbare mathematische Modelle beschrieben. Eine schematische Darstellung des in MATLAB Simulink implementierten Simulationsmodells der Gesamtanlage mit den wichtigsten Ein- und Ausgangsgrößen zeigt Abbildung 5. Die Validierung des Modells erfolgte anhand von Messungen am 163 bar Modul im Labor sowie durch ausgewählte Versuchsläufe mit der realen Gesamtanlage in Auersthal.

Mithilfe des Modells können in Simulationsstudien diverse Prozessbedingungen, wie Produktgasdruck (atmosphärisch bis zu 700 bar), Betriebsstrategie oder Lastprofile (variables Stromangebot aus Windkraft oder Photovoltaik) variiert werden. Die Auswirkungen auf Effizienz, Wasserstoffproduktion, Abwärme, Wasserbedarf, Anzahl an Start-Stopp-Zyklen, Degradation und auch Wasserstoffgestehungskosten können untersucht werden. Optimierungspotenziale hinsichtlich der Anlagenkonfiguration und der Betriebsstrategien können abgeschätzt werden.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

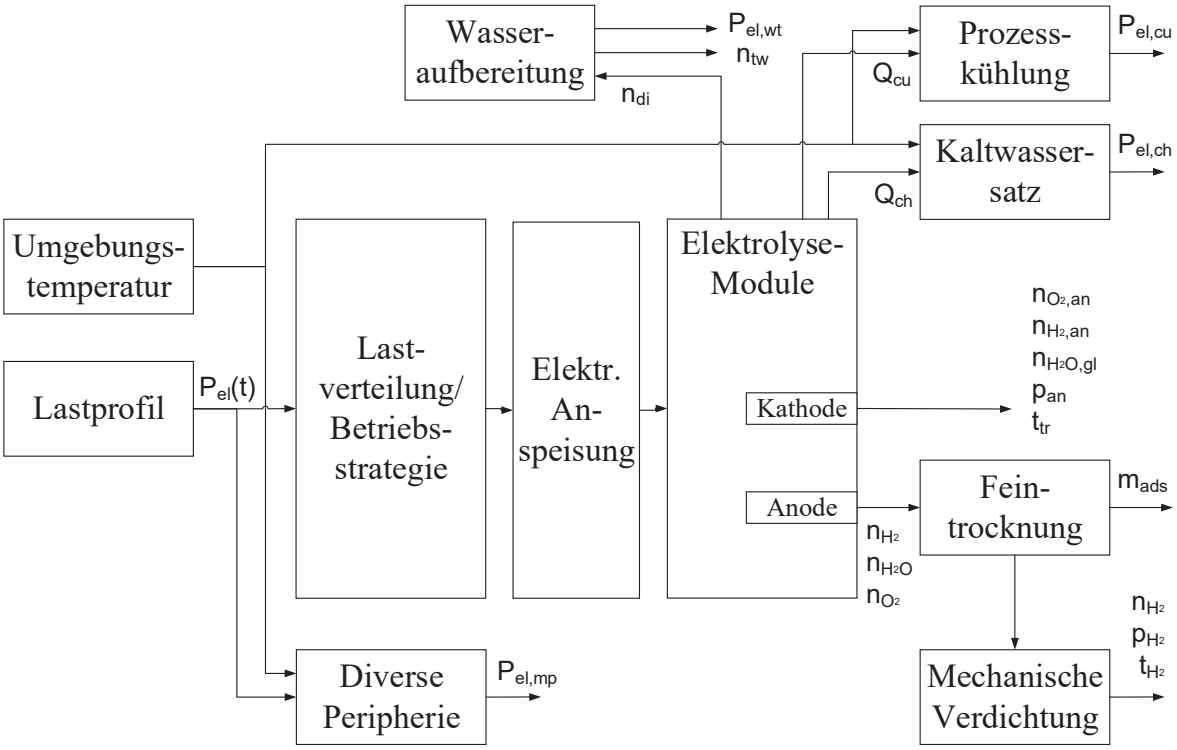


Abbildung 5: Schema des Simulationsmodells für die wind2hydrogen – Gesamtanlage

4 Versuchsprogramm

Die Pilotanlage wurde nach Inbetriebnahme in stationären Lastpunkten vermessen, das dynamische Verhalten wurde mithilfe von definierten Sprungversuchen charakterisiert. Im anschließenden Forschungsbetrieb wurde das Betriebsverhalten der Anlage anhand realer Lastprofile mit unterschiedlichen Charakteristiken untersucht.

4.1 Charakterisierung in stationären Lastpunkten

Der Elektrolyseur wurde innerhalb des möglichen Lastbereichs in definierten Teillastpunkten betrieben. Jeder Messpunkt wurde nach ausreichender Einschwingzeit bei einer Betriebstemperatur von 50 °C vermessen. Durch den modularen Aufbau des Elektrolyseurs ist es möglich die elektrische Lastvorgabe P_{Mo} im Teillastbereich variabel auf einzelne Elektrolysemodule $P_{\mathrm{Mo,i}}$ aufzuteilen. Um die Potentiale der Freiheitsgrade bei der Modulverschaltung im Hinblick auf den spezifischen Energieverbrauch zu identifizieren, wurden folgende drei Betriebsstrategien untersucht:

Gleichmäßige Lastverteilung: Die Lastverteilung erfolgt gleichmäßig auf alle Elektrolysemodule. Um Start-Stopp-Zyklen zu minimieren, werden Einschaltvorgänge bzw. Ausschaltvorgänge erst durchgeführt, wenn der aktuelle Lastpunkt nicht durch die aktuelle Anzahl aktiver Module dargestellt werden kann. Bei steigender Gesamtlast P_{Mo} wird nur die minimal erforderliche Anzahl an Modulen eingeschaltet (Gleichlast ↑). Die Individuallast $P_{\mathrm{Mo,i}}$ der einzelnen Module wird so lange erhöht, bis jedes Modul bei maximaler Last betrieben wird. Anschließend wird ein neues Modul eingeschaltet. Bei sinkender Gesamtlast (Gleichlast ↓) wird die individuelle Modulleistung so weit reduziert, bis die minimale Modullast erreicht ist.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Maximale Last: In jedem Lastpunkt wird die größtmögliche Anzahl an Elektrolysemodulen bei maximaler Last betrieben. Die verbleibende Last wird durch Zuschaltung eines weiteren Moduls aufgebracht:

Minimale Last: In jedem Lastpunkt wird die größtmögliche Anzahl an Modulen bei minimaler Modullast betrieben. Die restliche Last wird auf eine möglichst kleine Anzahl an Modulen aufgeteilt.

Alle Messpunkte mit einer Übersicht der Anzahl von aktiven Modulen im jeweiligen Lastpunkt sind für die drei unterschiedlichen Betriebsstrategien in Tabelle 1 zusammengestellt. Der Lastbereich eines Moduls wird über den eingestellten Stackstrom $I_{\mathrm{Stack,i}}$ geregelt und kann zwischen 70 A und 160 A variiert werden.

Tabelle 1: Anzahl der aktiven Module $\mathrm{N}_{\mathrm{Mo,akt}}$ für unterschiedliche Betriebsstrategien

	Gleichmäßige Lastverteilung		**Maximale Modullast**		**Minimale Modullast**		
			$I_{\mathrm{Stack,i}}$	$I_{\mathrm{Stack,i}}$	$I_{\mathrm{Stack,i}}$	$I_{\mathrm{Stack,i}}$	$I_{\mathrm{Stack,i}}$
Lastpunkte [kW]	Steigende Last	Sinkende Last	$70\ \mathrm{A}$	$< 70\ \mathrm{A}$	$70\ \mathrm{A}$	$70 < I_{\mathrm{Stack,i}} < 160\ \mathrm{A}$	$160\ \mathrm{A}$
3,4	1	1	0	1	1	0	0
10	2	2	1	1	2	0	0
20	3	5	2	1	5	1	0
30	4	8	3	1	8	1	0
40	5	10	4	1	12	0	0
50	6	11	5	2	9	1	2
60	8	12	6	2	7	1	4
70	9	12	8	1	5	0	6
80	10	12	9	1	3	1	8
90	11	12	10	1	1	1	10
100	12	12	12	0	0	0	12

4.2 Charakterisierung des dynamischen Verhaltens

Das dynamische Verhalten der Elektrolyseanlage hinsichtlich der elektrischen Leistungsaufnahme ist wesentlich für die Eignung der Anlage bei der Kopplung mit fluktuierenden Stromquellen oder für Betriebsweisen, die zur Stabilisierung des Stromverteilernetzes dienen. Totzeiten des Systems beim Anfahren, Aufwärmen, Wechsel vom ausgeschalteten Zustand (AUS) in den STANDBY-Zustand und in den Normalbetrieb sowie die Geschwindigkeit der elektrischen Leistungsaufnahme bei transienten Lastvorgaben sind zu unterscheiden. Zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens wurden die Sprungantworten des Elektrolyseurs unter definierten Randbedingungen vermessen.

In Tabelle 2 sind die durchgeführten Sprungversuche und die dabei variierten Randbedingungen zusammengefasst. Neben der Größe und der Richtung (steigende, fallende Flanke) der Lastsprünge für die elektrische Leistungsvorgabe $P_{\mathrm{Mo,Soll}}$, wurde der Einfluss der Temperatur der Elektrolysestacks $T_{\mathrm{Stack,Start}}$ als auch der Einfluss unterschiedlicher Betriebsmodi AUS und STANDBY untersucht.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Tabelle 2: Übersicht der variierten Parameter für die Vermessung der Sprungantworten

Sprungrichtung	Parameter	Wert	Einheit
Steigende Flanke	Startwerte Leistung $P_{\mathrm{Mo,Soll}}$	0, 4, 25, 50, 75	kW_{el}
	Endwerte Leistung $P_{\mathrm{Mo,Soll}}$	4, 25, 50, 75, 100	kW_{el}
	$T_{\mathrm{Stack,Start}}$	<25, >25	°C
	Betriebsmodus	AUS, STANDBY	[-]
Fallende Flanke	Startwerte Leistung $P_{\mathrm{Mo,Soll}}$	100, 75, 50, 25, 4	kW_{el}
	Endwerte Leistung $P_{\mathrm{Mo,Soll}}$	75, 50, 25, 4	kW_{el}
	$T_{\mathrm{Stack,Start}}$	50	°C
	Betriebsmodus	AUS, STANDBY	[-]

4.3 Versuche mit realen Lastprofilen

Für den Betrieb einer dezentralen Wasserstoffinfrastruktur mit modularer Elektrolysetechnologie ist eine Vielzahl an unterschiedlichen Betriebsweisen möglich, die durch das aktuelle Energieangebot, die aktuellen Energiepreise sowie den lokalen Bedarf an Wasserstoff und Strom bestimmt werden.

4.3.1 Nennlastbetrieb

Der Betrieb bei Nennlast erfolgt bei Volllast ganzjährig, täglich und 24 Stunden pro Tag. Es wird die maximal mögliche Anlagenauslastung erreicht. Stillstandzeiten sind nur für Wartungszwecke bzw. bei Störungen vorgesehen. Die Energieversorgung erfolgt aus dem öffentlichen Stromnetz. Strom aus einem Mix erneuerbarer Quellen wird über Zertifikate zugekauft.

4.3.2 Strompreisgeführter Betrieb

Die elektrische Energie wird aus dem öffentlichen Netz bezogen und zu optimalen Einkaufspreisen über Strombörsen zugekauft. Der Elektrolyseur wird nur dann betrieben, wenn der Strompreis einen festgelegten Grenzwert unterschreitet. Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Strompreisverlauf eines Monats. Der Elektrolyseur wird bei Nennlast betrieben (grün markiert), wenn der Strompreis unter den rot markierten Grenzwert fällt.

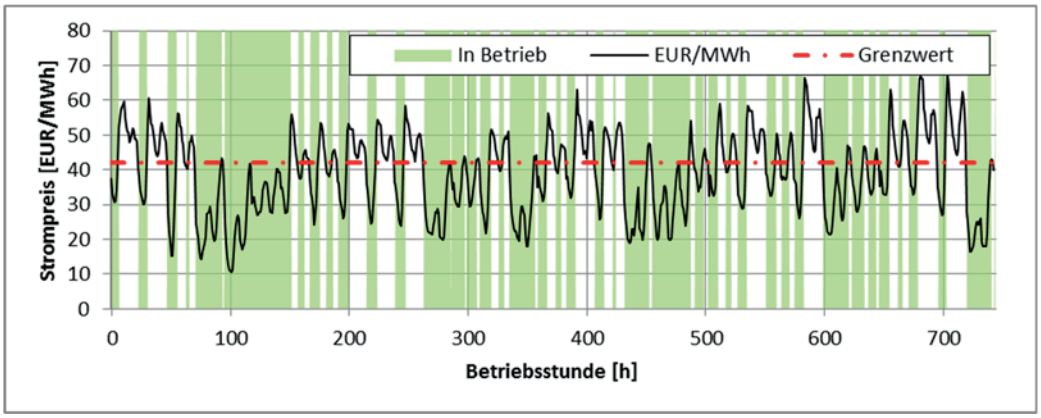


Abbildung 6: Betriebsweise mit Strompreis als Führungsgröße; die grün markierten Bereiche stellen die Betriebszeiten des Elektrolysesystems dar; Strompreisverlauf aus [4]

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

4.3.3 Betrieb mit fluktuierender Stromversorgung

Die Elektrolyse ist direkt mit der lokalen fluktuierenden Stromerzeugung verbunden. Folgende Unterscheiden werden getroffen:

a. Betrieb des Elektrolyseurs als Primärlast

Bei ausreichender Stromproduktionsleistung der Erzeugungsanlage wird vorerst nur die Elektrolyseanlage versorgt. Die Priorität liegt bei der Produktion von Wasserstoff. Überschüssiger Strom, der aufgrund der Anschlussleistung der Elektrolyseanlage nicht verwertet werden kann, wird direkt in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

b. Betrieb des Elektrolyseurs nur bei Überproduktion

Die Stromproduktionsleistung wird prioritär an das öffentliche Netz abgegeben. Übersteigt die Stromproduktionsleistung die mögliche Einspeiseleistung in das öffentliche Stromnetz, wird die Elektrolyseanlage aktiviert, um die Differenzleistung für die Wasserstoffproduktion zu nutzen. Eine Abregelung der Stromproduktionsanlage wird verhindert.

4.3.4 Betriebsweisen zur Stabilisierung des Stromverteilnetzes

Bei einem Ungleichgewicht von erzeugter und verbrauchter Wirkleistungen ändert sich die Frequenz der zur Energieübertragung genutzten Wechselspannung im Verteilernetz. Sofern im öffentlichen Stromnetz ein Energieüberschuss vorherrscht, wird negative Regelenergie benötigt. Erforderliche Regelleistungsreserven werden am Regelenergiemarkt beschafft, periodisch ausgeschrieben und gehandelt [1,16,24]. Erfolgt mit dem Elektrolyseur die Teilnahme am Regelenergiemarkt, sind folgende Betriebsweisen möglich:

a. Betrieb als Primärregelreserve

Dieser Typ von Regelreserve kann derzeit nur symmetrisch um einen definierten Arbeitspunkt angeboten werden, siehe Abbildung 7. Die angeforderte Regelleistung muss innerhalb einer Reaktionszeit von ≤30 s eingestellt werden.

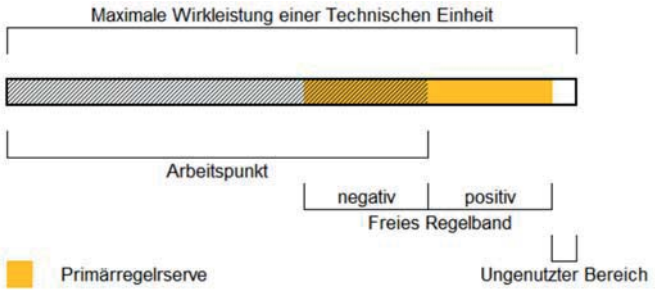


Abbildung 7: Regelband für Primärreserve um den definierten Arbeitspunkt der Elektrolyse [1]

b. Betrieb als Sekundärregelreserve

Regelleistung kann in diesem Fall wahlweise nur positiv, nur negativ oder in beide Richtungen angeboten werden. Die Reaktionszeit bis zum Erreichen der angeforderten Regelleistung muss ≤5 min sein. Da der Betrieb im Überlastbereich von Elektrolyseanlagen zeitlich beschränkt ist, kann dieser Bereich für Sekundärreserven nicht genutzt werden. Die möglichen Betriebsweisen bei Tertiärregelreserven sind vergleichbar mit jenen der Sekundärreserve. Die Pilotanlage wurde mit charakteristischen Lastprofilen der genannten Betriebsweisen untersucht. Die Unterschiede in den Lastprofilen liegen in der Häufigkeit von Lastwechsel, der Anforderung an die Dynamik der Lastwechsel, in der Größe von Lastsprüngen, der Versuchsdauer und der Betriebsdauer des Elektrolyseurs.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

5 Ergebnisse des Versuchsbetriebs

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb zusammengefasst.

5.1 Stationäre Lastpunkte und Optimierung der Betriebsstrategie

Abbildung 8 zeigt die aus Messungen bestimmten Wirkungsgradverläufe $\eta_{\mathrm{Mo},H_\mathrm{o}}$ der Elektrolysemodule für die unterschiedlichen Verschaltungsstrategien. Der Wirkungsgrad wird aus dem Verhältnis von Nutzen (Energieinhalt des erzeugten Wasserstoffs $\dot{m}_{\mathrm{H_2}}\,H_\mathrm{o}$) zu Aufwand (elektrischer Energiebedarf P_Mo) bestimmt:

$$\eta_{\mathrm{Mo},H_\mathrm{o}} := \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{H_2}}\,H_\mathrm{o}}{P_\mathrm{Mo}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{H_2}}\,H_\mathrm{o}}{\sum P_{\mathrm{Mo,i}}} \tag{5-1}$$

Der Massenstrom des produzierten Wasserstoffs $\dot{m}_{\mathrm{H_2}}$ und die elektrische Leistungsaufnahme P_{Mo} der zwölf Elektrolysemodule wurden messtechnisch erfasst. Die Verläufe für die Betriebsstrategie „Gleichlast ↑“ und „maximale Last“ weisen geringe Unterschiede im Wirkungsgrad auf. Ebenso sind die Verläufe für „Gleichlast ↓“ und „minimale Last“ hinsichtlich des Wirkungsgradverlaufs ähnlich.

Der maximale Wirkungsgrad von 60,3 % wird bei 30 kW mit der Verschaltung „Minimale Last“ erreicht. Im minimalen Teillastpunkt des Elektrolyseurs wird ein Wirkungsgrad von 55 % erreicht. Der Wirkungsgrad bei Volllast beträgt 55 %. Verschaltungsstrategien mit einer hohen Anzahl an aktiven Modulen („Gleichlast ↓“ und „Minimale Last“) und niedriger individueller Last, weisen im mittleren Lastbereich gegenüber den Strategien mit einer hohen Anzahl von aktiven Modulen bei hoher Modullast deutliche Wirkungsgradvorteile von bis zu $\Delta\eta_{Mo,H_o} \cong 12\,\%$ auf.

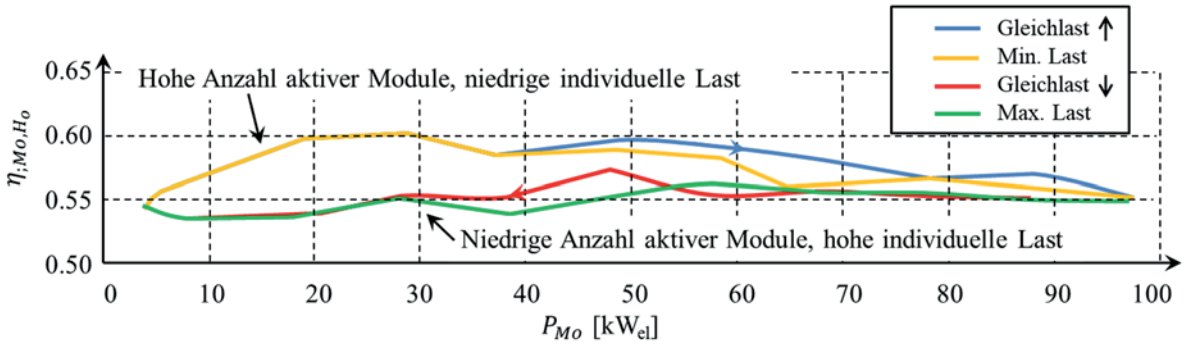


Abbildung 8: Gemessener Wirkungsgradverlauf der Elektrolyse über der elektrischen Last für unterschiedliche Verschaltungsstrategien

Im minimalen Teillastpunkt und bei Volllast gibt es keine Freiheitsgrade bei der Verschaltungsstrategie. Der minimale Teillastpunkt des Elektrolyseurs ist bei allen Verschaltungsszenarien durch den minimalen Teillastpunkt eines Moduls festgelegt. Alle anderen Module sind inaktiv. Im Vollastpunkt werden in allen Verschaltungsstrategien sämtliche Module bei Volllast betrieben.

Bei alleiniger Betrachtung der Wirkungsgradverläufe stellt die Verschaltungstrategie „Minimale Last“ das Optimum dar. Bei realen Lastprofilen mit volatilen Lastverläufen wird mit dieser Betriebsstrategie aber eine vergleichsweise höhere Anzahl an Start-Stopp-Zyklen

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

erreicht. Das führt zu erhöhter Degradation der Elektrolysestacks, damit zu einer geringeren Lebensdauer und zu erhöhtem Wartungsaufwand (Austausch der Stacks) sowie zu erhöhten Wartungskosten.

Als optimale Betriebsstrategie in Bezug auf Wirkungsgrad und Lebensdauer wurde die gleichmäßige Lastverteilung festgelegt. Module werden bei Lastgradienten erst ein- bzw. ausgeschaltet, wenn die Lastanforderung durch die Anzahl an aktiven Modulen nicht mehr dargestellt werden kann. Dabei kann auf die individuelle Anzahl der absolvierten Start-Stopp-Zyklen und Betriebsstunden Rücksicht genommen werden.

5.2 Dynamische Charakterisierung

Die Sprungantworten wurden basierend auf der T_{90}-Zeit bei steigender Lastflanke bzw. T_{10}-Zeit bei sinkender Lastflanke bewertet. Daneben wurde der bleibende Regelfehler e_∞ zwischen elektrischer Soll-Leistung $P_{\mathrm{Mo,Soll}}$ und elektrischer Ist-Leistung P_{Mo} sowie die Ausregelzeit t_s bis zum Erreichen einer definierten Schranke ε des Regelfehlers e ermittelt.

Bei Lastsprüngen auf Soll-Leistungen >0 kW wurde die Schranke zur Ermittlung der Ausregelzeit t_s mit $\varepsilon = \pm 3\,\%$ des Sollwertes festgelegt. Bei Lastsprüngen auf 0 kW wurde der Toleranzbereich mit 0 kW bis 0,001 kW festgelegt.

Abbildung 9 zeigt die Leistungsaufnahme der Elektrolyseanlage $P_{\mathrm{Mo}}(t)$ bei Beaufschlagung des Elektrolyseurs mit einem Lastsprung von 0 kW auf 100 kW für verschiedene Startbedingungen.

Die Sprungantworten P1b, P1a, P3a zeigen die Verläufe der Startprozeduren beginnend vom AUS-Modus. Nach einer Totzeit von 15 s für die Initialisierungsphase, ist ein erster Leistungsanstieg zu verzeichnen. Die Aktivierung von modulinternen BoP-Systemen erfolgt. Nach insgesamt 85 s erfolgt ein weiterer Leistungsanstieg. Bei Kaltstarts (P1b, P1, P2) erfolgt die Leistungserhöhung nur bis auf 50 % der Nennleistung. Bei einem Warmstart (P3a, P4) wird die Ist-Leistung bis zum Erreichen der Soll-Vorgabe erhöht. Als Kaltstart wird ein Start bei Stack-Temperaturen $T_{\mathrm{Stack,Start}} < T_{\mathrm{Stack,Warm}}$ definiert. Die Dauer des Warmfahrprozederes hängt von der Starttemperatur der Elektrolysestacks ab. Je niedriger die Temperatur der Stacks, desto länger benötigt der Aufwärmprozess. Bei einer Starttemperatur von $T_{\mathrm{Stack,Start}} = 10{,}6\,°\mathrm{C}$ (P1b) entspricht die Aufwärmzeit 275 s (4:35 min), bei bei einer Starttemperatur von $T_{\mathrm{Stack,Start}} = 20\,°\mathrm{C}$ (P1a) reduziert sich diese auf 170 s (2:50 min). Die sprunghaften Verläufe in den weiteren Leistungsverläufen bei den Sprungantworten mit Kaltstarts sind darauf zurückzuführen, dass unterschiedliche Module die Temperaturschranke unterschiedlich schnell erreichen und daher erst zu verschiedenen Zeitpunkten den Vollastpunkt erreichen. Die im AUS-Modus vorhandenen Totzeiten können durch Verweilen der Anlage während Stillstandzeiten im STANDBY-Modus gänzlich vermieden werden. Eine T_{90}-Zeit von 18 s und zugehörige Ausregelzeit t_s von 19 s kann durch Start aus dem STANDBY-Modus und Stack-Temperaturen $T_{\mathrm{Stack,Start}} > T_{\mathrm{Stack,Warm}}$ erreicht werden.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

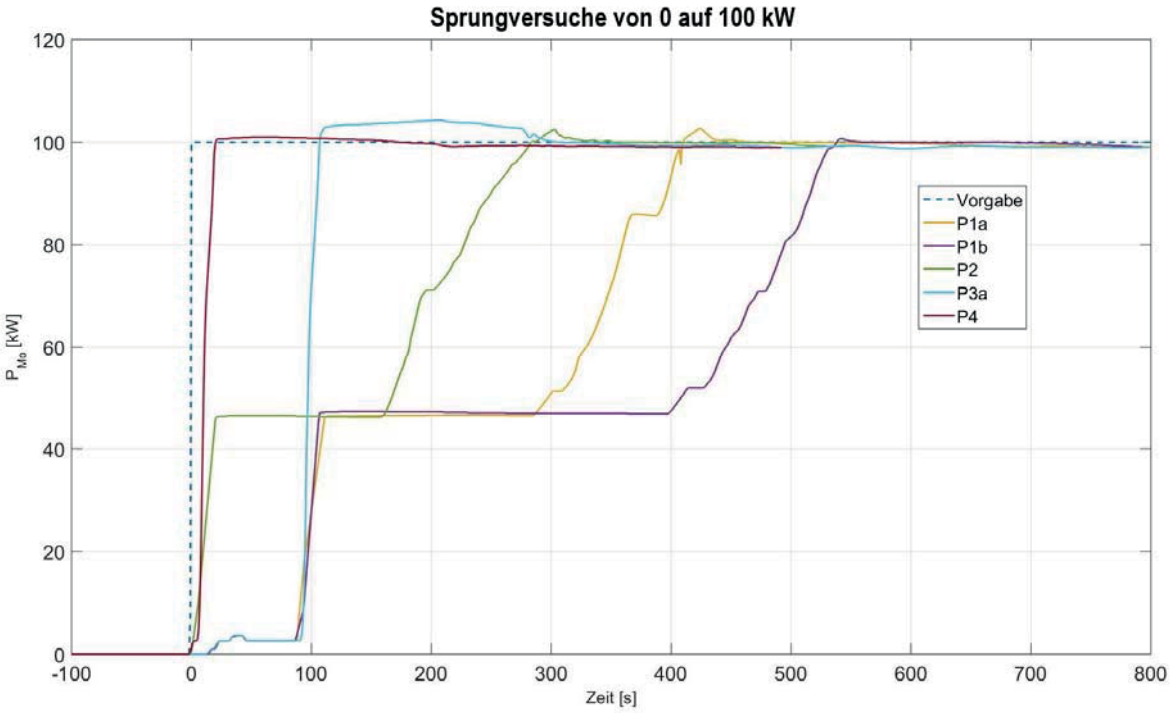


Abbildung 9: Sprungantworten mit unterschiedlichen Startbedingungen bei Lastsprung von 0 kW auf 100 kW

In Tabelle 3 sind ausgewählte Ergebnisse und Randbedingen für die Sprungantworten mit steigender Lastflanke zusammengefasst.

Tabelle 3: Ergebnisse Sprungantworten steigende Lastflanke von 0 kW auf 100 kW

	Betriebs-modus	Kalt-/Warm-start	$T_{\mathrm{Stack,Start}}$ in [°C]	T_{90} [s]	Ausregelzeit t_s in [s]	Bleibende Regelabweichung [kW]
P1b	AUS	Kaltstart	10,6	517	528	0,613
P1a	AUS	Kaltstart	20	397	409	0,509
P3a	AUS	Warmstart	24,3	105	259	0,652
P2	STANDBY	Kaltstart	18	250	374	0,056
P4	STANDBY	Warmstart	33,1	18	19	0,324

Abbildung 10 zeigt die Sprungantworten bei sinkender Lastflanke von 100 kW auf 0 kW (links) und von 50 kW auf 0 kW (rechts) jeweils aus dem betriebswarmen Zustand. Die T_{10}-Zeiten sind im Bereich <7 s und die Ausregelzeiten t_s bei <8 s.

Die Dynamik des Elektrolyseurs ist sowohl für steigende als auch für fallende Lastflanken ausreichend, um die geforderte Reaktionszeit für Primärregelleistung (≤30 s) ohne weitere Optimierungsmaßnahmen einzuhalten.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

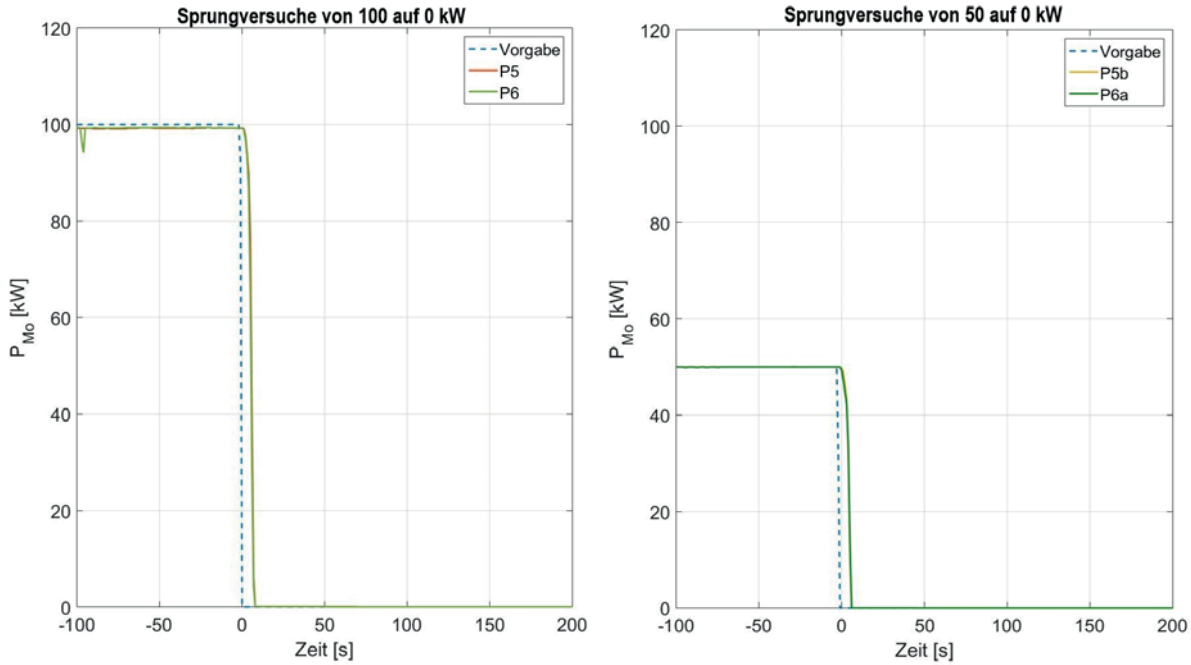


Abbildung 10: Sprungantworten mit unterschiedlichen Startbedingungen bei Lastsprung von 100 kW auf 0 kW (links) und 50 kW auf 0 kW (rechts)

In Tabelle 4 sind die Zahlenwerte für die wichtigsten Ergebnisse der Sprungantworten mit fallender Lastflanke zusammengefasst.

Tabelle 4: Sprungantworten bei fallender Lastflanke von 100 kW auf 0 kW und von 50 kW auf 0 kW

	Betriebs-modus	$T_{\mathrm{Stack,Start}}$ in [°C]	T_{10} in [s]	Ausregelzeit t_{s} in [s]	Bleibende Regelabweichung [kW]
P5b(re)	AUS	49,1	6	6	-0,006
P6a(re)	STANDBY	46,7	6	6	-0,001
P5(li)	AUS	49,7	7	8	-0,003
P6(li)	STANDBY	50,3	7	8	-0,006

5.3 Betrieb mit realen Lastprofilen

In Abbildung 11 sind die Lastkollektive ausgewählter Profile dargestellt, mit denen die Nutzung von Überschussstrom (Lastprofil „3b“), der Betrieb zur Netzstabilisierung als negative Sekundärregelleistung (Lastprofil „1b“) und der Betrieb bei direkter Nutzung von elektrischer Energie aus Windenergieanlagen (Lastprofile „1c“) repräsentiert wird. Es ist zu erkennen, dass sich die Lastprofile in der Versuchszeit t_{Mess}, Auslastung χ und dem Teillastanteil deutlich unterscheiden. Die Auslastung der Elektrolysemodule χ wird definiert als der Anteil des Energiebedarfs der Elektrolysemodule W_{Mo} am theoretisch maximal möglichen Energiebedarf $W_{\mathrm{Mo,Max}}$ innerhalb des gesamten Versuchszeitraums t_{Mess} des jeweiligen Lastprofils. Eine Auslastung von $\chi = 100\,\%$ entspricht dem Betrieb bei Volllast über den gesamten Versuchszeitraum t_{Mess}. Eine Auslastung $\chi = 50\,\%$ kann einerseits den 50 % Betrieb bei Volllast über die Hälfte des betrachteten Zeitraums oder andererseits den Betrieb mit 50 % der Volllast (Teillast) über dem gesamten Versuchszeitraum entsprechen.

Die in Abbildung 11 dargestellten Profile 3b und 1b beinhalten keine Teillastpunkte und wechseln zwischen Volllast und ausgeschaltetem Zustand. Das Profil 1c beinhaltet aufgrund

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

der direkten Kopplung mit einer volatilen Stromquelle wesentliche Betriebszeiten im Teillastbereich.

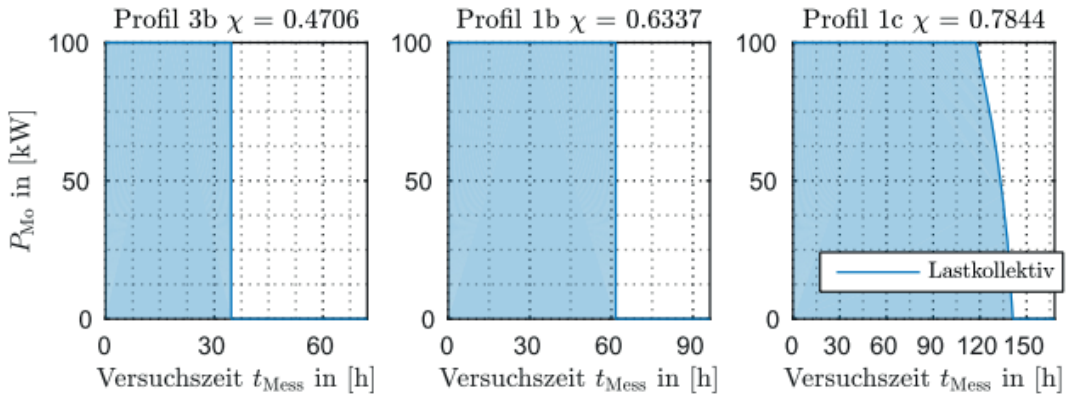


Abbildung 11: Lastkollektiv ausgewählter realer Lastprofile mit Auslastung χ aufgetragen über der Versuchsdauer $\mathbf{t_{Mess}}$.

In Tabelle 5 sind die Messergebnisse aus dem Versuchsbetrieb und die Berechnungsergebnisse aus den parallel durchgeführten Simulationen für die ausgewählten Lastprofile zusammengefasst. Die Start-Stopp-Zyklen sind durch die kumulierte Anzahl der Starts aller Elektrolysemodule n_{start} repräsentiert. In der Simulation wurden Spülverluste, wie sie bei realen Start-Stopp-Zyklen auftreten sowie dynamische Effekte bei Lastwechsel, nicht berücksichtigt. Deshalb ergeben sich bei volatilen Lastprofilen (1c) größere Abweichungen zwischen Messung und Simulation hinsichtlich der Wasserstoffproduktionsmenge $m_{\mathrm{H_2}}$. Der Wirkungsgrad η_{Ges} entspricht dem Wirkungsgrad der gesamten wind2hydrogen-Anlage.

Tabelle 5: Versuchsergebnisse und Simulationsergebnisse für die ausgewählten Lastprofile 3b, 1b, 1c; Betriebstemperatur der Elektrolysestacks: 50 °C

	3b	1b	1c
	Messung		
χ [-]	0,6337	0,4706	0.7844
t_{Betrieb}[h]	34,02	60,98	140
n_{start} [-]	113	349	787
W_{Ges} [kWh]	5 266	3 243	11 670
$m_{\mathrm{H_2}}$ [kg]	66,53	37,35	150,8
η_{Ges} [%]	49,58	45,21	50,74
	Simulation		
W_{Ges} [kWh]	5 262	3 245	12 170
$\varepsilon_{\mathrm{rel},W_{\mathrm{Ges}}}$ [%]	-0.07601	0.06675	4,262
$m_{\mathrm{H_2}}$ [kg]	69,6	40,37	157,5
$\varepsilon_{\mathrm{rel},m_{\mathrm{H_2}}}$ [%]	4,628	8,075	4,419
η_{Ges} [%]	51,92	48,82	50,82
$\varepsilon_{\mathrm{rel},\eta_{\mathrm{Ges}}}$ [%]	4,708	8,003	0,1508

Das quasistationäre Simulationsmodell liefert für dynamische Lastprofile Ergebnisse mit zufriedenstellender Genauigkeit zur Abschätzung wichtiger Systemparameter, wie Effizienz, Wasserstoffproduktionsrate sowie Start-Stopp-Zyklen. Die Auswirkungen mit alternativen Lastprofilen, Änderungen in der Anlagenkonfiguration oder in der Betriebsstrategie können dadurch einfach mithilfe von Simulationsstudien abgeschätzt werden.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der wind2hydrogen-Pilotanlagen wurde eine modulare Hochdruck-PEM-Elektrolyseanlage zur Herstellung von Wasserstoff geplant, behördlich genehmigt, aufgebaut und erfolgreich mit realen Lastprofilen betrieben. In zwölf Elektrolysemodulen mit einer Gesamtwasserstoffproduktionskapazität von 14,4 Nm³/h erfolgt die chemische Verdichtung auf bis zu 163 bar.

Der Elektrolyseur wurde in der ersten Phase des Versuchsbetriebs stationär bei Nennlast betrieben. Anschließend wurden grundlegende Charakterisierungstests in stationären Teillast-Betriebspunkten innerhalb des möglichen Lastbereiches unter Variation der Betriebsstrategie durchgeführt. Im Vergleich zum eingeschränkten Lastbereich (40 bis 100 %) einer vergleichbaren Hochdruckelektrolyseanlage in Ein-Stack-Ausführung ermöglicht die modulare Bauweise den flexiblen Betrieb innerhalb eines weiten Lastbereiches von 3 bis 100 % der Nennlast. Durch Optimierung der Modulverschaltung kann eine Wirkungsgradverbesserung im Teillastbereich von bis zu 12 % erwirkt werden. Der maximale Wirkungsgrad der Elektrolysemodule beträgt 60,3 % bei 30 % der Nennlast und 55 % bei Nennlast.

Das dynamische Verhalten der Elektrolyseanlage wurde durch Aufschalten von Sprungfunktionen und Ermittlung der Sprungantworten analysiert. Die geforderte Reaktionszeit von höchstens 30 Sekunden für die Teilnahme und Qualifizierung am Regelenergiemarkt als Primärregelleistung wurde ohne weitere Optimierungsmaßnahmen eingehalten.

In der letzten Phase des Pilotprojekts wurde der dynamische Stromlastbetrieb mit unterschiedlichen realen Betriebsweisen untersucht. Mithilfe des Simulationsmodells können alle relevanten Ausgangsgrößen mit ausreichender Genauigkeit für beliebige Lastprofile und variablen Anlagenkonfigurationen berechnet werden

Im Gesamtverlauf des mehrjährigen Pilotbetriebs wurden in mehr als 40.350 Modul-Betriebsstunden 4610 kg Wasserstoff produziert und 7400 Start/Stopp-Zyklen durchlaufen, wodurch die Dauerhaltbarkeit und Robustheit der Anlage demonstriert werden konnten.

Die Erkenntnisse aus dem Pilotbetrieb wurden bei der Entwicklung des Konzeptes für die nächste Technologiegeneration des Elektrolysemoduls mit 350 bar Ausgangsdruck berücksichtigt. Die modulare Bauweise ermöglicht eine einfache Skalierung der Anlagengröße durch Kombination einheitlicher Systembausteine für einen Wasserstoffbedarf von 4,5 kg/Tag mit 16 kW elektrischer Anschlussleistung bis hin zu 108 kg/Tag und 450 kW [18]. Anwendungen von Heimbetankungsanlagen über kleine gewerbliche Tankstellen bis hin zu größeren industriellen Anwendungen und Power-to-Gas Anlagen können mit diesem Konzept bedient werden. Eine vorerst für geringen Wasserstoffbedarf konzipierte Anlage kann durch modulare Erweiterung einfach und kosteneffizient an steigenden Bedarf angepasst werden. Eine hohe Anlagenauslastung wird somit über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

7 Danksagung

Das Projekt wind2hydrogen wurde in Zusammenarbeit von OMV Gas & Power GmbH, Energieinstitut an der JKU Linz, HyCentA Research GmbH, Fronius International GmbH und EVN AG durchgeführt und im Rahmen der FTI-Initiative e!MISSION vom Klima- und Energiefonds gefördert.

8 Formelzeichen und Abkürzungen

$\Delta_\mathrm{R} G_\mathrm{m}$	molare freie Reaktionsenthalpie
$\Delta_\mathrm{R} H_\mathrm{m}^0$	molare Reaktionsenthalpie bei Standardbedingungen
$\Delta_\mathrm{R} G_\mathrm{m}^0$	molare freie Reaktionsenthalpie bei Standardbedingungen
a	Aktivität
e	Regelfehler (Differenz aus Soll- und Ist-Wert)
e_∞	Bleibende Regelabweichung zwischen Soll- und Ist-Wert
E	Zellspannung
E^0	Standardzellspannung
E_N	Nernstspannung
F	Faradaykonstante
$I_\mathrm{Stack,i}$	Eingeprägter Stack-Strom für das Elektrolysemodul i in [A]
m_{H_2}	Masse Wasserstoff [kg]
n_start	Anzahl von Starts
R_m	molare Gaskonstante
P_Mo	Elektrische (Ist-)Leistung für die Gesamtheit der Elektrolysemodule in [kW]
$P_\mathrm{Mo,i}$	Elektrische Leistung für das Elektrolysemodul i in [kW]
$P_\mathrm{Mo,Soll}$	Leistungsvorgabe (Soll-Leistung) für die Gesamtheit der Elektrolysemodule in [kW]
T^0	Standardtemperatur
T_Stack	Temperatur des Stacks im Elektrolysemodul
$T_\mathrm{Stack,Start}$	Temperatur des Stacks im Elektrolysemodul zu Beginn des Sprungversuchs
t_Betrieb	Betriebszeit des Elektrolyseurs
t_s	Ausregelzeit bis zum Erreichen einer definierten Schranke des Regelfehlers ε
p^0	Standarddruck
W_Ges	Elektrischer Energieverbrauch der Gesamtanlage [kWh]
z_el	Anzahl der Elektronen
$\eta_{\mathrm{Mo},H_\mathrm{o}}$	Wirkungsgrad der Elektrolysemodule bezogen auf den Brennwert
$\Delta\eta_{\mathrm{Mo},H_\mathrm{o}}$	Differenz des Wirkungsrades der Elektrolysemodule bezogen auf den Brennwert
η_Ges	Wirkungsgrad der Gesamtanlage
ε	Schranke des Regelfehlers e
$\varepsilon_\mathrm{rel,i}$	Relativer Fehler der Simulationsergebnisse für die berechnete Größe i
χ	Auslastung

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

DE	Deutschland
DI-Wasser	Deionisiertes Wasser
EE	Erneuerbare Energie
EX	Kennzeichnung für explosionsgeschütze Ausführung von Betriebsmitteln
HAZOP	Hazard and Operability Study
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
SWIFT	Structured What If Technique
UEG	Untere Explosionsgrenze

9 Literatur

[1] APG. APG - Netz - Leitungsnetz. [September 21, 2017]; Available from: https://www.apg.at/de/netz/anlagen/leitungsnetz.

[2] Klell M., Eichlseder H., Trattner A., Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Springer Verlag, Buch 4. Auflage, April 2018 (in Vorbereitung)

[3] Engelhardt V. Die Elektrolyse des Wassers: Ihre Durchführung und Anwendung. Halle a. S.: Verlag von Wilhelm Knapp; 1902.

[4] EXAA Energy Exchange Austria. EXAA Energy Exchange Austria. [October 13, 2017]; Available from: http://www.exaa.at/de.

[5] Gago S, Burggraf F, Wang L, Biermann K, Hosseini S, Gazdzicki P et al. Zukunftspotenziale der Elektrolyse; Available from: http://www.dlr.de/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess_2015/pdfs2015/ESS-Symposium/ESS2015_Friedrich_DLR_Zukunftspotentiale-der-Elektrolyse.pdf.

[6] Giner. Giner Inc. [February 03, 2018]; Available from: http://www.ginerinc.com/.

[7] Guillet N, Millet P. Alkaline Water Electrolysis. In: Godula-Jopek A, editor. Hydrogen production: By electrolysis. Weinheim, Germany: Wiley-VCH; 2015, p. 117–166.

[8] Industrie Haute Technologie. iht: Clean Hydrogen Solutions. [February 03, 2018]; Available from: http://www.iht.ch.

[9] Ishikawa H, Kawasaki N, Haryu E, Daimon H. Development of 70 MPa Differential-pressure Water Electrolysis Stack. Honda R&D Technical Review 2016(Vol. 28; No. 1):86–93.

[10] ITM Power. ITM Power: Energy Storage | Clean Fuel. [February 03, 2018]; Available from: http://www.itm-power.com/.

[11] Marzi T. Power-to-X: Sind Strom und CO2 die Rohstoffe der Zukunft? Wels; 2017.

[12] Moosman L, Neier H, Mandl N, Radunsky K. Implementing the Paris Agreement - New Challenges in view of the COP 23 Climate change Conference: Study for the ENVI Comittee; Available from: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/607353/IPOL_STU(2017)607353_EN.pdf.

[13] Ojong ET, Kwan JTH, Nouri-Khorasani A, Bonakdarpour A, Wilkinson DP, Smolinka T. Development of an experimentally validated semi-empirical fully-coupled performance model of a PEM electrolysis cell with a 3-D structured porous transport layer. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42(41):25831–47.

[14] Pachauri RK, Mayer L, IPCC-Koordinierungsstelle D (eds.). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Ausschusses für Klimaänderungen: Synthesis report. Deutsche Übersetzungdurch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn 2015. Genf, Schweiz: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2015.

[15] Paidar M, FATEEV V, Bouzek K. Membrane electrolysis—History, current status and perspective. Electrochimica Acta 2016;209:737–56.

[16] Plaßmann W, Schulz D (eds.). Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. 7th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2016.

[17] Salman P, Wallnöfer-Ogris E, Sartory M, Trattner A, Klell M, Müller H et al. Hydrogen-Powered Fuel Cell Range Extender Vehicle – Long Driving Range with Zero-Emissions. In: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; 2017.

[18] Sartory M, Justl M, Salman P, Trattner A, Klell M, Wahlmüller E. Modular Concept of a Cost-Effective and Efficient On-Site Hydrogen Production Solution. In: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; 2017.

[19] Sartory M, Wallnöfer-Ogris E, Salman P, Fellinger T, Justl M, Trattner A et al. Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42(52):30493–508.

[20] Siemens. SILYZER - Hydrogen Solutions - Siemens. [February 03, 2018]; Available from: http://www.industry.siemens.com/topics/global/de/pem-elektrolyseur/silyzer/seiten/silyzer.aspx.

[21] Suermann M, Kiupel T, Schmidt TJ, Büchi FN. Electrochemical Hydrogen Compression: Efficient Pressurization Concept Derived from an Energetic Evaluation. J. Electrochem. Soc. 2017;164(12):F1187-F1195.

[22] UNEP. The Emission Gap Report 2016: A UNEP Synthesis Report 2016.

[23] Vogt UF, Schlupp M, Burnat D, Züttel A. Novel Developments in Alkaline Water Electrolysis. 8th International Symposium Hydrogen & Energy, 16.-21. February 2014. [November 22, 2017]; Available from: http://www.elygrid.com/wp-content/uploads/2015/09/HE8-Zhaoquing-China-022014-Empa-Vg-ex.pdf.

[24] Zapf M (ed.). Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem: Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2017.