

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS

Advanced Hydrogen Solutions

Fraunhofer  
ISE

Greenery®



uni  
per

## Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery®

Fraunhofer  
ISE



uni  
per

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und  
Energiespeicherung

Ansprechpartner:

Philipp Lettenmeier, Tel.: 0711/ 6862 343 , philipp.lettenmeier@dlr.de

Tom Smolinka, Tel.: 0761/ 4588-5164 , tom.smolinka@ise.fraunhofer.de

Bernd Pitschak, Tel.: 02043 / 944-130, bpitschak@HYDROGENICS.com

Armin Bayer, Tel.: 06181 / 59-4607, armin.bayer@greenerity.com

René Schoof, Tel.: 0201 / 94614-565, rene.schoof@uniper.energy

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Fraunhofer  
ISE

Greenery

DLR

uni  
per

## Inhalt

I.	Kurzdarstellung .....	3
I.1	Aufgabenstellung .....	3
I.1.1	Wissenschaftliche und technische Ergebnisse des Vorhabens .....	3
I.2	Voraussetzungen.....	4
I.2.1.1	Anwendungspotential der Elektrolyse in der Energiebranche und in der Wasserstoffinfrastruktur.....	5
I.2.1.2	Neuer Markt für Wasserstoffanwendungen.....	6
I.2.2	Preiswerter, regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung.....	6
I.2.3	Volkswirtschaftlicher Nutzen: Unterstützung der Energie und Klimaziele der Bundesregierung und der EU.....	6
I.3	Planung und Ablauf.....	8
I.3.1	Uniper.....	8
I.3.2	Fraunhofer ISE.....	9
I.3.3	Greenery .....	10
I.3.4	DLR .....	11
I.3.5	Hydrogenics.....	11
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	12
II.	Eingehende Darstellung .....	14
II.1	Projektergebnisse .....	14
II.1.1	Uniper.....	14
II.1.1.1	Beschreibung der Arbeitspakete.....	15
II.1.1.2	Weitere Nutzung des Prototypen .....	26
II.1.2	Fraunhofer ISE.....	28
II.1.2.1	Beschreibung der Arbeitspakete.....	28
II.1.3	Greenery .....	81
II.1.3.1	Beschreibung der Arbeitspakete.....	81
II.1.4	DLR .....	105
II.1.4.1	Beschreibung der Arbeitspakete.....	105
II.1.4.2	Literaturverzeichnis DLR .....	133
II.1.5	Hydrogenics.....	134
II.1.5.1	Beschreibung der Arbeitspakete.....	134
II.2	Voraussichtlicher Nutzen / Ausblick .....	155
II.3	Allgemeiner Fortschritt bei PEM Elektrolysen in der Projektlaufzeit (Siemens etc.) .....	155
II.4	Veröffentlichungen der Projektergebnisse.....	157
III.	Tabellenverzeichnis.....	159
IV.	Abbildungsverzeichnis .....	160
V.	Anhang .....	164

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Fraunhofer  
ISE

Greenery<sup>®</sup>



uni  
per

## I. Kurzdarstellung

### I.1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Projekts war, erstmalig einen PEM Wasserelektrolyseur in der 1 MW Leistungsklasse zu entwickeln, als Alpha-Version zu bauen und in einer relevanten Anwendung im Realeinsatz zu erproben. Die entwickelte PEM Elektrolyseanlage soll die Vorteile der PEM-Technik, wie sehr gutes dynamisches Betriebsverhalten und große volumetrische Stackdichte, in einer bisher nicht realisierten Leistungsklasse zur Verfügung stellen und durch das Upscaling der Einheitengröße Kostenvorteile ermöglichen. Die Entwicklung des PEM Elektrolyseurs sollte dabei hauptsächlich den Anforderungen eines Einsatzes im Mobilitätssektor (wirtschaftliche Erzeugung von grünem Wasserstoff als Treibstoff) sowie der hochflexiblen Integration erneuerbarer Energien im Energie und Wärmesektor genügen.

#### I.1.1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse des Vorhabens

Die folgende Tabelle 1 vergleicht die zu Beginn des Projekts definierten Arbeitsziele mit der realen Spezifikation der entwickelten PEM Elektrolyseur-Pilotanlage am Ende des Projekts.

Es wird deutlich, dass sämtliche Ziele vollumfänglich erreicht oder sogar leicht übertroffen wurden. Der entwickelte Elektrolyseur ist damit zurzeit weltweit die kompakteste PEM Bauform. Auch der erzielte brennwertbezogene Systemwirkungsgrad von 72% (unter Berücksichtigung systembedingter Wasserstoffverluste) bei angelegter Nennlast von 1 MW entspricht den hohen Erwartungen, die zu Projektbeginn in die neue Technologie gesetzt wurden.

Bei der Entwicklung der Elektrolyse wurde eine Stack Lebensdauer von 50.000 Stunden angestrebt. Eine wichtige Einflussgröße auf die Lebensdauer ist die Betriebsführung des Elektrolyseurs. Die Lebensdauer des Stacks ist Gegenstand der Untersuchungen verschiedener Arbeitspakete der Partner DLR, Fraunhofer ISE und Greenery. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Vorhersagen zur Lebensdauererwartung erstellt aber auch Möglichkeiten einer schonenden Betriebsführung aufgezeigt.

Obwohl die Anlage den in sie gesetzten Anforderungen genügt, ist ein wirtschaftlicher Einsatz unter den aktuell geltenden rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen nicht darstellbar. Die im Projekt entwickelte, hocheffiziente und kompakte Technologie kann bei Anpassung der Rahmenbedingungen zum Schlüsselement für eine künftige emissionsfreie Wasserstoffmobilität werden. Darüber hinaus bietet die Technologie im energiewirtschaftlichen Bereich sehr großes Potential als Schlüsseltechnologie zur Integration erneuerbarer Energien in verschiedensten Sektoren (Wärme, Industrie, Strom etc.).

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

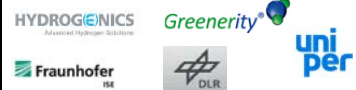


Tabelle 1: Vergleich der ursprünglichen Projektziele mit den realen Werten der Pilotanlage

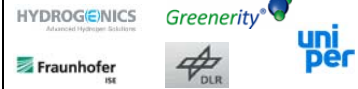
Parameter	Spezifikation/Wert	Spezifikation/Wert
	Antrag	Ausgeführt
<b>Aktive Fläche der Membran</b>	1.250 cm <sup>2</sup>	> 1.500 cm <sup>2</sup>
<b>Anzahl Zelle</b>	255	212
<b>Stack Volumen</b>	0,25 m <sup>3</sup>	0,38 m <sup>3</sup>
<b>Wasserstoffproduktionsrate bei Nennlast</b>	k. A.	229 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Elektrische Leistung bei Nennlast</b>	1 MW	1 MW
<b>Wasserstoffproduktionsrate bei Überlast</b>	k. A.	290 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Elektrische Leistung bei Überlast</b>	1,5 MW	1,5 MW
<b>Auslegungsdruck (DP)</b>	k. A.	40 barü
<b>Maximaler Betriebsdruck (MOP)</b>	10-30 barü	30 barü
<b>Betriebstemperatur</b>	50-80°C	50 – 80°C
<b>Wasserstoffreinheit</b>	>99,99 %	>99,99 %
<b>Systemantwort (min Last – 1 MW)</b>	< 1 s	< 30 s
<b>Energieverbrauch</b>	3,8 – 4,86 kWh/Nm <sup>3</sup>	4,0 – 5,2 kWh/Nm <sup>3</sup>

## I.2 Voraussetzungen

Im Rahmen des geplanten Auf- und Ausbaus der Wasserstoffinfrastruktur für die steigende Zahl von Brennstoffzellen-Fahrzeugen, ist es entscheidend, effiziente Wasserstofferzeugungssysteme zur Verfügung zu haben. Die PEM Elektrolyse kombiniert kompakte Baumaße mit hohen Wirkungsgraden und eignet sich somit in besonderem Maße für die Vor-Ort Wasserstofferzeugung. Aufgrund ihrer modular skalierbaren Leistungsgröße können neben

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



kompakten, auf Wasserstofftankstellen zugeschnittene Systeme, in einfacher Art und Weise größere Systeme im Bereich einiger Megawatt für die zentrale Wasserstoffherzeugung aufgebaut werden.

Der gewählte Anwendungsfall für die Felderprobung ist eine On-Site H<sub>2</sub>-Produktion, wobei die Mengen Wasserstoff im vorhandenen Erdgasnetz abgesetzt werden. Zukünftig soll an solchen Standorten wahlweise H<sub>2</sub> in die Erdgasinfrastruktur eingespeist und/oder durch Tankstellen bzw. Gewerbe und Industrie verbraucht werden. Gerade diese Kombination verschiedener Anwendungsfälle zeigt einen signifikanten Bedarf an Elektrolyseuren auf und belegt immenses Kostensenkungspotential der Technologie und des dargebotenen H<sub>2</sub>. Der Einsatz von regenerativem Strom leistet dabei Beiträge zur Integration der Erneuerbaren in das Stromnetz zu Starkwind- und Schwachlastzeiten, zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und zum Aufbau der „Zero Emission Mobility“. Darüber hinaus unterstützt das Projekt die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung. Das Projekt passt daher zu den Zielvorgaben, die das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ formuliert hat.

## 1.2.1.1 Anwendungspotential der Elektrolyse in der Energiebranche und in der Wasserstoffinfrastruktur

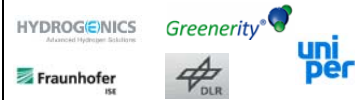
Wie viel Energie lässt sich über die Brücke zwischen Strom und Gasnetz speichern? On-Shore Windparks liefern aktuell eine Gesamtenergie von 66 TWh Strom p.a. Das entspricht bei einer installierten Leistung von 33 GW etwa 2.000 Volllaststunden im Jahr. Wird dieser Strom über Elektrolyse in den Energieträger Wasserstoff gewandelt, kann man bei Berücksichtigung der Wirkungsgradverluste etwa 15 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff herstellen. Eingespeist in die Gasinfrastruktur ergäbe dies etwa einen volumetrischen Anteil von 15% des transportierten Erdgases. Auch wenn nur ein Bruchteil des regenerativ erzeugten Stroms gespeichert werden muss, zeigt das Beispiel das gigantische Speicherpotential der vorhandenen Erdgasinfrastruktur. Eine DVGW-Forschungsinitiative (Deutscher Verein des Gas Wasser Faches) arbeitet darauf hin, die Speicherung größerer Mengen Wasserstoff im Erdgasnetz technisch zu ermöglichen. Trotz noch offener Fragen zu einzelnen Gasanwendungen und Komponenten der Erdgasinfrastruktur erscheint die Zielgröße von bis zu 15% volumetrischem Anteil Wasserstoff im Erdgas plausibel. Das heißt, das Deutsche Erdgasnetz ist ein gigantischer bereits vorhandener Stromspeicher mit der technischen Charakteristik eines Langzeitspeichers (vgl. Abbildung 5). Es ist keine andere technische Lösung für Energiespeicherung mit Ausbaupotential bereits heute schon vorhanden, die ähnliche Größenordnungen an elektrischer Energie speichern und transportieren kann.

Durch den Aufbau des im Rahmen des Projekts entwickelten 1 MW-Elektrolyseurs, den Anschluss an das Erdgasnetz und die Einleitung des produzierten Wasserstoffs soll die grundsätzliche Machbarkeit des oben beschriebenen Modells zur Speicherung regenerativer Energie über Wasserstoff im Erdgasnetz gezeigt werden. Zudem werden belastbare Daten zu Kosten der Speicherung und Rückverstromung von fluktuierenden erneuerbaren Energien ermittelt.

Neben diesen Erfahrungen wird außerdem der Einsatz des skalierbaren MW-Elektrolyseurs in der in den kommenden Jahren aufzubauenden Wasserstoffinfrastruktur vorbereitet. Auch wenn dies im Rahmen dieses Projekts noch nicht der Schwerpunkt ist, so ist das zu entwickelnde System eine ideale technische Plattform für eine kostengünstige Herstellung von Wasserstoff für automobiler Anwendungen.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



### 1.2.1.2 Neuer Markt für Wasserstoffanwendungen

Der europäische Wasserstoffmarkt nimmt jährlich gut 6 Mio. t H<sub>2</sub> auf. Davon entfallen ca. 40% auf Deutschland. Hauptabnehmer sind chemische Industrie, Elektronik, Hüttenwerke, Glas- und Nahrungsmittelindustrie. Die von der Industrie und verschiedenen politischen sowie institutionellen Organisationen getragene Studie zur Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-In Hybridfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen für die zukünftige Mobilität, die 2010 von McKinsey veröffentlicht wurde, prognostiziert die Notwendigkeit der H<sub>2</sub>-Mobilität zur Erreichung des Zero Emission Transport Sektors 2050 (100% regenerative Energien). Dies erfordert hocheffiziente Elektrolysetechnologien für den dezentralen Einsatz (z.B. zur Versorgung von Tankstellen). Neben dem Marktpotential der H<sub>2</sub>-Mobilität stellt die Energiespeicherung zur Integration regenerativer Energien ein mindestens ebenso großes Potential dar. Beide neue Märkte versprechen Synergien zur signifikanten Senkung der Kosten der PEM-Elektrolyseure. Die Szenarien zur Senkung der Kosten um 60% innerhalb von 10 Jahren werden im Rahmen des Projektes beschrieben.

### 1.2.2 Preiswerter, regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

Aus heutiger Sicht lässt sich bis 2025 der Austausch von etwa 10% der Erdgasdarbietung durch Wasserstoff vorstellen. Die technische Machbarkeit wurde z.B. in der NATURALHY-Studie nahe gelegt ([www.naturalhy.net](http://www.naturalhy.net)). Unter der Annahme, dass die Hälfte der Elektrolyseure halbjährlich und die andere Hälfte aus Netzgründen nur vierteljährlich eingesetzt werden wird, sind mindestens 30 GW installierte elektrische Elektrolyseleistung im Energiespeichermarkt erforderlich. Dies entspricht mindestens 30.000 Exemplaren der in diesem Projekt angestrebten PEM-Elektrolyseeinheiten der MW-Klasse. Die erforderliche Anzahl an Baueinheiten lässt erhebliche Kostensenkungspotential für Elektrolyseure und damit des Wasserstoffpreises erwarten.

Es ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der errichteten Elektrolyseure nicht nur Wasserstoff in die Erdgasinfrastruktur einspeist. Vor Ort werden auch Mengen für Wasserstoff-Tankstellen und/oder Industrie bzw. Gewerbe angeboten. Davon profitieren ebenfalls Anwendungen im Umfeld der H<sub>2</sub>-Mobilität. Die Verbindung der Märkte für Wasserstoff-Mobilität und Energiespeicherung schafft zusätzlich Synergien, die sich letztendlich in signifikanten Kostensenkungspotentialen für Technologie und Wasserstoffdarbietung niederschlagen.

### 1.2.3 Volkswirtschaftlicher Nutzen: Unterstützung der Energie und Klimaziele der Bundesregierung und der EU

In der Studie Energieziele 2050 des Umweltbundesamtes ([www.umweltdaten.de](http://www.umweltdaten.de)) vom Juli 2010 werden Strom-/Energiespeicher als erforderliche Technologie beschrieben, um die klimapolitischen Ziele der Bundesrepublik Deutschland, 100% Strom aus erneuerbaren Quellen 2050, zu erreichen. Der Elektrolyse-Technologie wird eine hohe Bedeutung zugeordnet. Neben der energetischen Nutzung von überschüssigem Strom wird auch ein bedeutender Beitrag zum sicheren Netzbetrieb gesehen. Mit Hilfe der PEM-Elektrolyse kann der Gesamtwirkungsgrad

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE



uni  
per

deutlich weiter gesteigert werden. Das beantragte Projekt kann somit einen bedeutenden Beitrag zu den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung leisten.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenerty

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

## I.3 Planung und Ablauf

Abbildung 1 zeigt die Gesamtprojektstruktur und den damit verbundenen zeitlichen Ablauf. Verschiedene Faktoren führten dazu, dass das Projekt erst mit einem Verzug von etwa 12 Monaten verglichen mit der ursprünglichen Planung abgeschlossen werden konnte (ursprüngliche Projektlaufzeit 01.11.2012-31.10.2015). Durch kostenneutrale mit dem Projektträger abgestimmte Verlängerungen, wurde sichergestellt dass alle Arbeitspakete entsprechend der ursprünglichen Planung abgearbeitet werden konnten. Somit wurde das Projekt durch die 5 beteiligten Partner erfolgreich abgeschlossen.

Phase	Arbeitspaket	Partner	2012				2013				2014				2015				2016			
			Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4			
1	Next Generation MEA Entwicklung (Aufbau Teststände, Entwicklung, Testmethoden, MEA Charakterisierung)	Greenerty, Fraunhofer ISE, Hydrogenics	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
2	Stack Scale-Up Design und Entwicklung inkl. Optimierung und Lebensdaueranalysen	Hydrogenics, Fraunhofer ISE, DLR, Greenerty	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
3	System Design (Auslegung, Validierung, Detail Engineering, Systemanalyse, Degradationsanalyse, Betriebsstrategie)	Hydrogenics, Greenerty, Uniper, Fraunhofer ISE, DLR			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
4	Konstruktion und Funktionsprüfung bei Hydrogenics (inkl. Systemanalyse und Modellierung)	Hydrogenics, Uniper, Fraunhofer ISE, DLR					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
5	Vorbereitung der Inbetriebnahme (Genehmigungen, Anschlüsse, Engineering etc.)	Uniper, Hydrogenics																				
6	Inbetriebnahme und Betrieb des Prototyps (1500 h, inkl. Begleitung Feldtest und Validierung der Modelle)	Uniper, Hydrogenics, Fraunhofer ISE, DLR																				

Abbildung 1: Gesamtprojektstruktur

### I.3.1 Uniper

Die Abbildung 2 zeigt die Teilprojektplanung durch die Uniper Energy Storage (UST) unter Einbeziehung der spezifischen Arbeitspakete. Im Gegensatz zur ursprünglichen Planung kam es zu einer Verzögerung bei der Auslieferung und Inbetriebnahme der Anlage. Diese erfolgte nicht, wie ursprünglich angenommen, im Q1 des 3. Projektjahres sondern erst zu Beginn von Q3. Um diese Verzögerung auszugleichen, wurde wie oben beschrieben eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate beantragt und durch den Projektträger bewilligt. Im Rahmen dieser Verlängerung konnten sämtliche Arbeiten durch die UST bis Ende Q2 2016 (30.06.2016) abgeschlossen werden.



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

Arbeitspakete Uniper		2012				2013				2014				2015				2016			
		Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4			
AP 0	Kooperationsvertrag und Geheimhaltungsvereinb. Verwertungsplan / Nutzungsentschädigungen	■	■																		
AP 1	Konzeptionierung der Energiespeichertösung Definition Randparameter (Planungsmemorandum)	■	■																		
AP 2	Entwicklung des Lastenheftes (funktionelle und technische Anforderungen für Energiespeicherung / Spezifikation für Anbindung an Energieinfrastrukturen etc.)		■	■	■	■	■														
AP 3	Klärung regulatorische Machbarkeit / Anforderungen (z.B. Netzzugangsverordnungen, Metrologie / Eichrecht, Sachverständigenabnahmen, Genehmigungen etc.)		■	■	■	■	■														
AP 4	Standortwahl und Alternativen Geschäftsmodellvarianten			■	■	■	■	■													
AP 5	Betriebsplan (Betriebsführung, Überwachung, Wartung)									■	■										
AP 6	Stromliefer- und Gasabnahmeverträge, Vereinbarungen zu den Betriebsführungsdienstleistungen, Netzanschlussbegehren					■	■	■	■	■	■	■									
AP 7	Detail- und Behördenengineering, Ausschreibungsunterlagen				■	■	■	■													
AP 8	Ausschreibung und Vergaben (Ausführungsplanung, Integration in Netze, Hoch- und Tiefbau, Montagen, Aufstellung, IBN, Dokumentation, Lieferzeiten, Bauleitung SiGeKo)					■	■	■	■	■	■										
AP 9	Errichtung und Inbetriebnahme, Abnahmen, Anbohrung Pipeline									■	■	■	■	■	■	■					
AP 10	Betrieb													■	■	■	■	■			
AP 11	Analyse Feldtest und Betriebserfahrung, Bewertung Wirtschaftlichkeit und Geschäftsmodelle, Erstellung Abschlussbericht und Empfehlungen																■	■			

Abbildung 2: Projektplan Uniper Energy Storage

## 1.3.2 Fraunhofer ISE

Im Laufe des Projekts kam es am Fraunhofer ISE aus verschiedenen Gründen zu Verzögerungen. Im Arbeitspaket AP 1.1 verzögerte sich die Fertigstellung der Infrastruktur im neuen Institutsteil, so dass die Testumgebungen nicht gemäß Zeitplan fertiggestellt und in Betrieb genommen werden konnten. Ferner ergaben sich durch die Messprotokollentwicklung neue Anforderungen an die Testumgebungen, so dass diese komplett überarbeitet bzw. neu aufgebaut werden mussten. Dies hatte auch Auswirkungen auf die Arbeitspakete AP 1.3 und AP 1.4. und teilw. AP 2.2. und AP 3.1. Im Arbeitspaket AP 2.1 ergab sich eine Unterbrechung, da die notwendigen Kosteninformationen erst zu Projektende bereitgestellt werden konnten. Die Verzögerungen in AP 3 ergaben sich im Wesentlichen durch Verzögerungen bei der Fertigstellung beim Aufbau der Teststands-Hardware (AP 3.1), sowie die verspätete Auslieferung und Inbetriebnahme der Feldtestanlage in Hamburg Reitbrook.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

Arbeitspakete Fraunhofer ISE		12	2013				2014				2015				2016		
		Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3
1.1	Laborzelle, Testeinrichtung																
1.2	Entwicklung Messprozeduren																
1.3	MEA-Charakterisierung Teil 1 (Laborzellen)																
1.4	MEA-Charakterisierung Teil 2 (Zellen in Zielgröße)																
2.1	Konzeption kostenoptimierter Stack																
2.2a)	Fluiddynamische Zelloptimierung																
2.2b)	Simulationsgestütztes Zell- und Stackdesign																
2.2c)	Materialscreening Stack																
2.2d)	Beschichtungsstrategien																
2.3	Charakterisierung Shortstack (short- und long-																
3.1	Dynamik Betriebsverhalten PEM-																
3.2	Systemtechnische Analyse Feldtestanlage																
3.3	Methode zustandsoptimierte Instandhaltung																
3.4	Begleitung Feldtest zur Validierung																

Abbildung 3: Projektplan Fraunhofer ISE – blau: ursprünglich beantragt und grün: verlängerte Bearbeitung

## 1.3.3 Greenerity

In Abbildung 4 ist die Teilprojektplanung der Greenerity GmbH dargestellt. Die Planung ist in 9 verschiedene Arbeitspakete und 14 Entwicklungsziele (Meilensteinen) unterteilt.

Im Laufe des Projekts sind leider Verzögerungen bei den Projektpartnern und Greenerity aufgetreten. Die Verschiebung der Zeitplanung bei den Projektpartnern, z.B. die verspätete Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage in Hamburg –Reitbrook, begleitenden Laborversuchen und Analysen zum Alterungsverhalten der MEA, hatten auch Einfluss auf die Greenerity Arbeiten.

Bei Greenerity sind Verzögerungen in den AP's 1.4-1.9 aufgetreten. Aus diesem Grunde wurde in Abstimmung mit dem Projektträger und den Projektpartnern eine kostenneutrale Verlängerung bis 30.09.2016 beantragt. Durch die Weiterführung der Arbeiten, konnten vorhandene Ergebnisse verifiziert und Verzögerungen bei den Entwicklungen kompensiert werden.

Arbeitspakete Greenerity		2012	2013				2014				2015				2016			
		Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 1.1	Definition der Anforderungen und Ziele, Festlegung der MEA Spezifikation		M 1															
AP 1.2	Anpassung des MEA Designs Vergrößerung des MEA Formates			M 2														
AP 1.3	Optimierung der Elektrolyse MEA in Bezug auf Leistung							M 3										
AP 1.4	Implementierung eines Elektrolyse Teststandes, Durchführung von Leistungs- und Lebensdaueranalysen				M 4													
AP 1.5	Musterfertigung und Übertragung der MEA in die Produktion				M 5			M 6	M 6									
AP 1.6	Verbesserung der Lebensdauer (Extrapolation auf 50.000 Stunden)		M 7					M 8	M 9								M 10	M 10
AP 1.7	Verbesserung der Stack-Effizienz durch den Einsatz dünner Membranen							M 11									M 12	M 12
AP 1.8	MEA Randkonzeptentwicklung für den Einsatz dünner Membranen								M 13									M 13
AP 1.9	Optimierung der Edelmetallbeladung bezüglich Leistung und Lebensdauer																	M 14

Abbildung 4: Meilensteinplanung der Greenerity Arbeitspakete

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

## I.3.4 DLR

AP 1 konnte wie geplant in Absprache der Partner durchgeführt werden. Die Arbeiten in AP 2 mussten auf Grund verzögerter Lieferung, Genehmigung und Inbetriebnahme stark nach hinten verschoben werden. Der Aufbau und die Inbetriebnahme des 50 KW Teststands sind noch nicht abgeschlossen und laufen seitens des Herstellers weiterhin. Die Simulationsarbeiten aus AP 3 mussten auf Grund der Komplexität über die geplante Zeit hinaus verlängert bearbeitet werden und die Erstellung eines Überwachungs- Tools, welches daraus resultiert, entsprechend nach hinten verschoben werden.

Titel der DLR Arbeitspakete	2013				2014				2015				2016			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 1: Definition der Ziele, Betriebsweisen, Manöver Start-Stopp-Prozeduren			M1													
AP 2: Experimentelle Untersuchung der Degradation							M2									
AP 3: Erstellung eines empirischen, betriebszustandsorientierten Degradationsmodells								M3								
AP 4: Erstellung eines Überwachungstools zur Lebensdauervorhersage des Elektrolyseurs													M4			M4

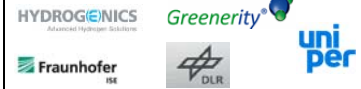
Abbildung 5: Projektplan DLR: "Normal Blau" ursprünglicher Zeitplan, davon hellblau nicht durchgeführt. Dunkelblau verschobene/zusätzliche Bearbeitung

## I.3.5 Hydrogenics

Die Projekt- und Teilprojektplanung der Hydrogenics ist in Abbildung 6 dargestellt. Im Gegensatz zur ursprünglichen Planung kam es zu einer Verzögerung bei der Auslieferung und Inbetriebnahme der Anlage. Diese erfolgte nicht wie ursprünglich angenommen im Q1 des 3. Projektjahres sondern erst zu Beginn von Q3. Um diese Verzögerung auszugleichen, wurde eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate beantragt und durch den Projektträger bewilligt. Im Rahmen dieser Verlängerung konnten sämtliche Arbeiten durch die Hydrogenics bis Ende Q2 2016 (30.06.2016) abgeschlossen werden

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

## Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System – Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Titel der Hydrogenics Arbeitspakete	2012			2013						2014						2015						2016											
	No	De	Ja	Fe	M	Ap	M	Ju	Ju	Au	Se	Ok	No	De	Ja	Fe	M	Ap	M	Ju	Ju	Au	Se	Ok	No	De	Ja	Fe	Ma	Ap	Ma	Ju	
AP1: Definition der Anforderungen und Ziele, Vergrößerung der aktiven Stackfläche, Entwicklung und Stackdesign, Scale up von MEA und Bipolarplatte; Geometrie und Größenoptimierung.																																	
AP2: Bau und Test von Kurz-Stacks mit vergrößerter aktiver Fläche (Aktive Fläche > 1250 cm <sup>2</sup> , rechteckig).																																	
AP3: Fertigung und funktionale Tests 1MW PEM Stack. Definition der Betriebsparameter.																																	
AP4: Megawatt System Design Verfahrenstechnik. Verfahrenstechnische Auslegung Gesamtsystem begleitend zur Stackentwicklung. Bau und Test von verfahrenstechnischen Subsystemen.																																	
AP5: Abschließende Auslegung und Auswahl aller verfahrenstechnischen Komponenten. Detailliertes Anlagendesign.																																	
AP6: Fertigung und In-house Inbetriebnahme des 1MW Gesamtsystems.																																	
AP7: Lieferung, Inbetriebnahme und Betriebsbegleitung des 1MW Gesamtsystems.																																	

**Meilensteine, geplant und realisiert**

- M1: Juli 2013 Design MEA, Bipolarplatte, Endplatte, Stromkollektoren, Support Strukturen für 30 bar und 1250 cm<sup>2</sup> abgeschlossen
- M2: Nov 2013 Bau und funktionale Überprüfung Shortstack (Dichtheit, Sicherheit, H<sub>2</sub> Produktion) abgeschlossen, Design aus AP1 durch Tests validiert
- M3: April 2014 1 MW PEM WE Stack gebaut, getestet und geliefert
- M4: Oktober 2013 Basic Engineering Verfahrenstechnik abgeschlossen und kritische Komponenten/Subsysteme in Versuchen überprüft
- M5: Februar 2014 Detailed Engineering abgeschlossen Langläufer bestellt
- M6: August 2014 1 MW PEM Elektrolyseur fertiggestellt
- M7: Oktober 2014 1 MW PEM Elektrolyseur in Betrieb gesetzt, bereit für Auslieferung
- M8: November 2014 Vor-Ort Inbetriebnahme abschließen, Start regulärer Betrieb
- M9: Oktober 2015 Projektende

Abbildung 6: Aktualisierter Zeitplan Hydrogenics

### I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Nutzen und Bedeutung der PEM-Elektrolysetechnik lassen sich durch folgende Stichpunkte charakterisieren:

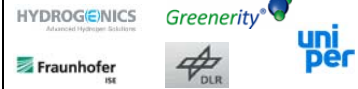
- Wasserstoff ist ein flexibler Sekundärenergieträger für erneuerbare Energien, der sich intersektoral in verschiedenen Anwendungen nutzen lässt.
- Die PEM-Elektrolyse wird zukünftig nicht nur in kleinen Leistungsklassen eine wichtige Rolle spielen, sondern kann auch im energiewirtschaftlichen Kontext (Größenordnung MW) ihre Vorteile ausspielen. Sie eignet sich sowohl für den Einsatz an Wasserstofftankstellen als auch für den Aufbau größerer, kompakter Systeme zum Ausgleich und zur Speicherung fluktuierender, erneuerbarer Energien in der stationären Energieversorgung (Netzstabilisierung).
- Ferner kann die PEM-Elektrolyse, wie auch alkalische Elektrolyse-Systeme, für die Bereitstellung von Sekunden- und Minutenreserve zur Stabilisierung des Stromnetzes genutzt werden.

Dabei zeichnet sich die PEM Elektrolyse durch folgende Charakteristika aus:

- Einfaches Systemlayout und hohe Leistungsdichten resultieren in einem geringen Platzbedarf
- Skalierbarkeit der Zellflächen für Zellstapel in der MW-Klasse

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



- Günstigere Gesamtbetriebskosten für Infrastrukturanwendungen durch
  - geringere Investitionskosten der späteren Serienprodukte durch einen kompakteren und einfacheren Aufbau
  - reduzierte Wartungskosten durch vereinfachte Anlagentechnik und potenziell längere Wartungsintervalle
- Wirkungsgradsteigerung von 70% (alkalisch) auf bis zu 85% (PEM-Technologie), abhängig vom Betriebszustand. Die wesentlichen Betriebskosten einer Elektrolyseanlage sind ihre Stromkosten. Ein höherer Wirkungsgrad des Stacks geht direkt linear in die Wasserstoffherstellungskosten ein. Da die Elektrolyseure in der Regel kontinuierlich arbeiten (>8.000 h/a), werden hier entsprechende Kosteneinsparungen erwartet. Für netzdienlich eingesetzte Elektrolyseure würden sich kürzere Betriebszeiten ergeben. Hier gibt es dann aber zusätzliche Einnahmen aus dem Regelenergieeinsatz.
- Optimierte Betriebsführung. Aufgrund des deutlich größeren Arbeitsbereiches der PEM Elektrolyse ergibt sich eine größere Bandbreite für Betriebspunkte und somit eine bessere Möglichkeit die Anlage in dem jeweils besten Betriebspunkt zu fahren.
- Zurzeit werden viele sektorübergreifende Anwendungen für Wasserstoff diskutiert (Power to X). Auch für diese Anwendungen ist die kompakte PEM Analyse hervorragend einsetzbar.

Die Projektpartner zielen primär auf die Weiterentwicklung und Erprobung der neuen Technologie und die Festlegung von wirtschaftlichen Randbedingungen für die Identifikation für zukünftige Geschäftsmodellen ab, die die Speicherung und Integration erneuerbarer Energien als Dienstleistung ermöglichen. Dies erweitert die Anwendung der PEM-WE erheblich, da sie nicht nur auf den Betreiber der WEA oder den H<sub>2</sub>-Tankstellenbetreiber abzielt. Mit unabhängigen Dritten, die solche (Speicher)-Dienstleistungen anbieten kann daher gerechnet werden, sowie ein Stromspeichermarkt entsteht. Dies schließt aber die lokale Nutzung der PEM-WE direkt an der WEA oder Tankstelle nicht aus.

Bisher favorisierte Geschäftsmodelle sind:

- Nutzung von überschüssigem Windstrom zur Energiespeicherung
- Vermarktung des regenerativ erzeugten Wasserstoffs in Wasserstoffmärkten wie „Zero Emission Mobility“
- Handel- und Transport von aus regenerativem Strom erzeugter Gase (z.B. Hythane)
- Absenkung des CO<sub>2</sub>-Footprints von Erdgasanwendungen („Grüneres“ Erdgas)

Alle Geschäftsoptionen werden durch zwei Kostentreiber bestimmt: zum einen die Investitionen zur Errichtung der Elektrolyse und zum anderen die Strombezugskosten. Im Rahmen der Validierung soll daher das Kostensenkungspotential beim Invest prognostiziert und Strombezugsmodele optimiert werden. Des Weiteren werden Vermarktungspotentiale aufgezeigt und Geschäftsmodelle danach bewertet.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Fraunhofer  
ISE

Greenery



uni  
per

## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Projektergebnisse

#### II.1.1 Uniper

Im Rahmen des Projekts „Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System“ war die Firma Uniper Energy Storage für die erfolgreiche Einbindung der Anlage am Standort Reitbrook verantwortlich. Dazu wurde die Einspeisung von „grünem“ Wasserstoff in das Erdgasnetz der Stadt Hamburg durch ein offizielles Anschluss-Begehren vorbereitet. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der 1,5 MW PEM Elektrolyse und allen erforderlichen Nebenanlagen wurde ca. 100.000 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff in das lokale Gasversorgungsnetz der HanseWerk eingespeist.

Auch für die erfolgreiche Implementierung der benötigten Mess- und Regeltechnik zur Erfassung und Abrechnung des erzeugten Wasserstoffs und die erforderlichen Abstimmungen mit der Eichbehörde war Uniper verantwortlich. Der während des Anlagenbetriebs produzierte Wasserstoff wurde als „Biogas“ vermarktet.

Um die neuartige Anlage zu charakterisieren und die numerischen Simulationsmodelle der Partner zu verifizieren wurde ein umfangreiches mit den Partnern abgestimmtes Messprogramm durchgeführt. Dieses erlaubt die exakte Beschreibung der Elektrolyse im kompletten Lastbereich und zeigt, dass auch dauerhaft ein Überlastbetrieb bis 1,5 MW bei geringen Wirkungsgradverlusten möglich ist

Es ergaben sich beim Betrieb und den durchgeführten Test bisher noch keine Hinweise auf eine Degradation des Elektrolysestacks.

Die gesammelten Betriebserfahrungen bei Wartung und Instandhaltung der Anlage erlaubten zusammen mit dem für die Elektrolyseherstellung zuständigen Partner Hydrogenics weitergehende Optimierungen des Elektrolyse-Package Designs durch diverse Anpassungen an Nebenanlagen, wie z.B. Druckhaltearmaturen, Kühler, Trocknungen, und Versorgung mit deionisiertem Wasser.

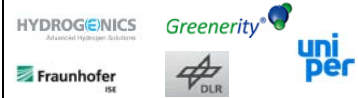
Die Anlage zog von Anfang an ein großes öffentliches Interesse auf sich. Viele Besuchergruppen (ca. 85 Besuchergruppen in den Jahren 2015/2016) aus In- und Ausland, Politik und Wirtschaft haben die Anlage besichtigt, um sich über die Speichertechnologie Power to Gas zu informieren.

Leider gibt es bis heute noch kein tragfähiges Geschäftsmodell, das den Weiterbetrieb der Anlage ermöglichen würde. Die eingesetzten Stromkosten überschreiten (vor allem durch EEG Zuschläge) die zurzeit möglichen Einnahmen durch „grünen“ Wasserstoff deutlich. Auch bei Realisierung von zusätzlichen Einnahmen aus Stromnetzdienstleistungen (Regelenergiemarkt) konnte kein ausreichend robustes Geschäftsmodell identifiziert werden.

Eine künftige Einordnung dieser Technologie als Systemintegrator und Flexibilitätsoption und nicht als „Letztverbraucher“ von Strom würde direkt tragfähige Geschäftsmodelle in verschiedenen Sektoren ermöglichen.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## II.1.1.1 Beschreibung der Arbeitspakete

Der folgende Abschnitt beschreibt die verschiedenen, durch die UST verantworteten, Arbeitspakete und fasst die erzielten Resultate zusammen:

### AP 0 Kooperationsvertrag und Geheimhaltungsvereinbarung

Zu Beginn des Projekts haben die Partner eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen. Diese beschreibt die Interessen, gegenseitigen Rechte und eine Geheimhaltungsvereinbarung zum Schutz offenbarer Geschäftsinterna der Partner. Die Projekterfahrungen werden allen Partnern zur Verfügung gestellt und sind von jedem Partner unabhängig vom Konsortium vermarktbar. Dieses Dokument wurde federführend durch Uniper erstellt und im Januar 2013 durch alle Partner unterschrieben.

### AP 1 Konzeptionierung der Energiespeicherlösung

Für den Einsatz der PEM-Elektrolyse am Erdgasnetz wurden Randparameter festgelegt. Diese berücksichtigen die Netzzugangsbedingungen, die technischen Betriebssicherheitsauflagen der Gasnetzbetreiber und die sicherheitstechnisch notwendigen Abschalt-Matrizen, basierend auf Durchfluss, Gaszusammensetzung und Gasbeschaffenheit.

Des Weiteren wurden in Abstimmung mit den Partnern Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Beteiligten festgelegt. Hierzu gehören auch die Definition der Eigentums-, Betreiber- und Errichter-/Baugrenzen. Darüber hinaus wurden die zuständigen Behörden identifiziert und kontaktiert.

Ergebnis des AP 1 war eine vollständige Konzeptentwicklung des Feldversuchs in Rahmen eines Planungsmemorandums, welches mit dem Lastenheft zur PEM-Entwicklung abgestimmt wurde (AP 2).

### AP 2 Entwicklung des Lastenheftes

Das Lastenheft definiert die funktionellen und technischen Anforderungen für die Errichtung einer PEM-Elektrolyse, die zur Energiespeicherung im Erdgasnetz verwendet werden soll. Es spezifiziert die Anbindungen an die Energieinfrastrukturen und war Teil des Gesamtprojektierungsberichtes mit Zeitplan und Kostenberechnung. Das Dokument wurde im Juli 2013 fertig gestellt.

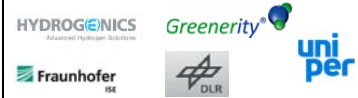
### AP 3 Klärung regulatorische Machbarkeit und Anforderungen

Die Pilotanlage wurde nach dem Energiewirtschaftsgesetz und BImSchG errichtet und auch betrieben. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für die neuartige Anlage waren die folgenden Punkte mit den zuständigen Behörden zu klären/abzustimmen:

- Ablauf und Aufwand der Netzkopplungen nach Netzzugangsverordnung
- Erfordernisse der Metrologie und des Eichrechts
- Möglichkeit der thermischen Gasabrechnung für wasserstoffreiche Gase nach gängigen Standards für Erdgasanwendungen
- Verpflichtungen zu Sachverständigenabnahmen für Inbetriebnahme und Betrieb
- Überwachungsbedürftigkeit der Anlage – Definition der Auflagen für Errichtung und Betrieb (z.B. Wasserschutz, FFH, Emission-/Störfallverordnung, anzuwendende technische Regelwerke)
- Gasanbindung nach TRFL oder DVGW-Regelwerk

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



- Definition der explosionsgefährdeten Zonen und Bestimmung der Berechnungsverfahren
- Gefährdungsanalyse nach AD 2000 Merkblatt
- SIL-Klassifizierung der automatisierten Sicherheitskreise

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens wurde neben dem Bezirksamt Bergedorf auch das BGV Hamburg, das LSBG Hamburg und die Eichdirektion Nord eingebunden. Die Baugenehmigung wurde durch das Bezirksamt Bergedorf im Q1 2014 erteilt (der Bauantrag wurde am 19.09.2013 eingereicht). Die eichrechtliche Anzeige der Wasserstoffeinspeisung erfolgte am 19.11.2014.

## AP 4 Standortwahl und Alternativen

Zur Minimierung des Errichtungs- und Betriebsaufwands wurde ein Pilotanlagen Standort gesucht, der aufgrund seiner Lage nur kurze Anbindungsleitungen auf der Strom- bzw. Gas-Seite erfordert. Des Weiteren musste der geplante Einspeisebetrieb mit den Fahrplänen der betroffenen Netzabschnitte abgestimmt werden. Ziel war, eine ganzjährige Wasserstoffeinspeisung zu ermöglichen, auch in Monaten mit geringem Erdgasabsatz und damit geringen Durchflussmengen im Leitungssystem. Es musste sichergestellt werden, dass in dem betroffenen Netzabschnitt keine Kunden lokalisiert sind, die auf sehr konstante Lieferbedingungen (wie z.B. Energieinhalt bzw. Gasbeschaffenheit) angewiesen sind. Darüber hinaus wurde ein Regionalgasnetz mit einem Designdruck kleiner 25 barg als Einspeiseleitung gesucht, um bei dem Pilotvorhaben zusätzliche Investitionen für Verdichter zu vermeiden. Im September 2013 wurde der Standort Reitbrook als optimaler Uniper Standort für das Pilotprojekt festgelegt.

## AP 5 Betriebsplan

Der für den Betrieb der Pilotanlage erforderliche Betriebsplan enthält das Betriebsführungskonzept inkl. erforderlichem Personalaufwand, Benennung des betrieblichen Anlagenverantwortlichen, die Vorgehensweise zur Überwachung der Anlage, für Inspektionen, Funktionskontrollen, Wartung und Instandsetzungsabläufe.

Hier werden die Wiederholungsprüfungen und auch vorbeugende bzw. zustandsorientierte Instandhaltungsintervalle definiert. Des Weiteren legt je nach Gefährdungsanalyse der Betriebsplan die Vorgehensweise zur Alarmierung und Not-Aus im Ereignisfall fest. Die Einbindung in die zentrale Meldestelle des betroffenen Netzbetreibers war ebenfalls Bestandteil des Betriebsplans.

Betreiber für den Standort Reitbrook war die Uniper Energy Storage GmbH. Die direkte Steuerung der Anlage erfolgte über das Uniper Energy Storage Dispatching in Essen. Lokale Wartungsarbeiten und Funktionsprüfungen wurden durch Personal von HanseWerk durchgeführt, das über einen Dienstleistungsvertrag beauftragt wurde. Im Normalbetrieb wurde die Anlage vollständig ferngesteuert und war nicht ständig mit lokalem Personal besetzt.



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

## AP 6 Stromliefer- und Gasabnahmeverträge, Dienstleistungsverträge

Neben dem Errichtungsaufwand ist der Preis der regenerativen Energie (Windstrom) die entscheidende Größe zur Wirtschaftlichkeit des Pilotvorhabens. Um möglichst günstige Strompreise zu erzielen wurden die folgenden Punkte untersucht und bewertet:

- Leistungs- und Transportentgelte
- Phelix Basisbandbezug
- Off-Peak Bezug
- Möglichkeiten der Spot- und Terminmärkte
- Darstellung von Sekunden- bzw. Minutenreserve
- Direktvermarktung (nach EEG)
- Optimierung der Stromkosten im Rahmen eines Flottenmanagements zur Kraftwerkseinsatzplanung

Um diese Optionen optimal nutzen zu können wurden Systemdienstleistungsverträge mit verschiedenen Anbietern verhandelt und abgeschlossen. Auch wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets das Netzanschlussbegehren (für die Stromversorgung) an Stromnetz Hamburg gestellt.

## AP 7 Detail- und Behördenengineering

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde auf Basis des Lastenhefts ein vollständiges Detail- und Behördenengineering für die Errichtung der Pilotanlage am Standort Hamburg-Reitbrook durchgeführt.

Hierbei wurden Materiallisten, Beschreibungen und Spezifikationen der Anlagenkomponenten erstellt:

- Verfahrenstechnische Anlagenteile (Elektrolyse, Behälter, Wärmetauscher etc.)
- Sicherheits- und Überwachungstechnik
- Automation
- SCADA
- Energietechnik (Transformatoren, Umrichter etc.)

Des Weiteren wurde der Standort vermessen und die erforderlichen Pläne für die Bauausführung ausgearbeitet:

- Leitungsführung
- Erschließung
- Entwässerung
- Zuwegung
- Baupläne
- Geländeinfrastruktur
- Ex-Zonen
- Fluchtwege
- Beleuchtung
- Aufstellung

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS

Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE



uni  
per

Für die verfahrenstechnische Auslegung der Anlage wurden, in enger Zusammenarbeit mit Hydrogenics, R&I-Schemata und Inbetriebnahme-Prozeduren erarbeitet.

Für die Ausschreibungsunterlagen der Nebengewerke wurden Spezifikationen erstellt. Diese umfassten Anforderungen an die Arbeitssicherheit (SiGEKO/SiGe-Plan), Einkaufsbedingungen, Dokumentationsregeln und anzuwendende technische Regeln. Die Engineering-Arbeiten wurden im November 2013 abgeschlossen.

## AP 8 Ausschreibung und Vergaben

Vor der eigentlichen Bauausführung wurden verschiedene Leistungspakete erstellt und angefragt. Die wesentlichen Pakete waren:

- Ausführungsplanung
- Hoch- und Tiefbau
- Rohrleitungsbau
- Elektroinstallation
- Automatisierungstechnik
- Bauleitung
- Arbeitssicherheit
- Sachverständigenleistungen

Die eingehenden Angebote wurden ausgewertet und final verhandelt. Auf dieser Basis wurden Vergabeempfehlungen erstellt. Die Firma Bohlen&Doyen wurde für die Rohrleitungstechnik, die Firma Elpro für Automatisierungstechnik und Elektroinstallation und die Firma Gräbner für Hoch- und Tiefbau ausgewählt.

## AP 9 Errichtung und Inbetriebnahme

Das Arbeitspaket 9 beinhaltet die Errichtung der Anlage sowie aller dazu benötigten Netzanschlüsse (Gas, Wasser und Strom) und die eigentliche Inbetriebnahme der Pilotanlage.

Die von Uniper zu errichtenden Anlagenkomponenten bestehen aus

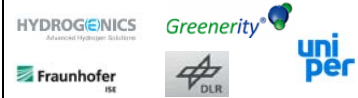
- Stromversorgung des Elektrolyseurs (Trafoanlage),
- Wasserversorgung (mit Druckerhöhungsanlage),
- Wasserstoff-Mess- und Einspeiseanlage
- Elektro- und Automationstechnik der Gesamtanlage
- Daten- und Kommunikationstechnik.

Diese Komponenten wurden durch den von Hydrogenics zu liefernden Elektrolyse-Container zur Gesamtanlage ergänzt.

Im Juni/Juli 2014 wurden vorbereitende Tiefbauarbeiten ausgeführt und die Fundamente für die unterschiedlichen Gebäude und den Elektrolysecontainer gelegt. Daraufhin wurden im Q3 2014 die Trafoanlage mit 2 Transformatoren (je einer für die Versorgung des Stacks und einer für die Versorgung der Peripherie) in dem vorgesehenen Gebäude installiert, testweise in Betrieb gesetzt

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



und abgenommen. Parallel dazu wurde die Automationstechnik mit Leitrechner und Datentechnik im Werk vorgeprüft und vor Ort installiert.

Auch die Komponenten der Einspeiseanlage sowie die Gasmesstechnik (Volumen- und Gasbeschaffenheitsmessung) wurden in diesem Zeitraum eingebaut.

An der Einspeisestelle wurden die Anbinde-Leitungen zu den beiden aufnehmenden Erdgasleitungen verlegt, die zugehörigen Armaturen am Anbohr-Punkt eingebaut, und somit die Verbindungen zu den Erdgasleitungen hergestellt. Die Wasserleitung zum Standort wurde beantragt und nach Genehmigung verlegt. Zur Sicherstellung des notwendigen Vordrucks für den Elektrolyseur wurde am Standort eine Druckerhöhungsanlage installiert.

Die Kabelschächte, welche die einzelnen Gebäude für Trafoanlage, Elektro- und Automationstechnik und für die Gastechik untereinander und mit dem Elektrolysecontainer verbinden, wurden erstellt und die zugehörigen Gas-, Wasser-, Strom- und Datenleitungen verlegt.

Im Q4 2014 war die Pilot-Anlage für die Installation des Elektrolyseurs vorbereitet. Die eigentliche Anlieferung des Elektrolyse-Containers erfolgte im Mai 2015 durch Hydrogenics. Die sicherheitstechnische Abnahme der Gesamtanlage wurde vorbereitet, indem die dazu benötigten Dokumentationen der Wasserstoffmess- und Einspeiseanlage, der Trafoanlage und der Elektro- und Automationstechnik zusammengestellt und die Berechnung der Ex-Zonen durchgeführt wurde. Die mechanische Fertigstellung der Gesamtanlage war im Juni 2015 abgeschlossen. Nach der vollständigen Inbetriebnahme startete der geplante Probetrieb im Juli 2015.

### Inbetriebnahme

Wesentlicher Bestandteil der Inbetriebnahme der Pilotanlage war die Durchführung eines umfangreichen Leistungstests der neuartigen Anlage. Die folgenden Diagramme geben einen Überblick zu den erzielten Ergebnissen.

Der erste umfangreiche Test war der 1 MW Leistungstest. Dieser wurde über einen Zeitraum von 24 h durchgeführt. Wie im folgenden Diagramm (Abbildung 7) zu erkennen ist, startete der Test am 31.05.2015 um 09:00 und endete am 01.06.2015 um 09:00. Bei einer konstanten Sollleistungsvorgabe von 1.000 kW wurde die Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs (ausschließlich Elektrolyse Stacks), der kompletten Anlage (inkl. Nebenanlagen wie Trocknung, Wasseraufbereitung Gleichrichter etc.) und die Wasserstoffproduktion aufgezeichnet.

Zu dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme waren Leistungsvorgabe und Leistungsaufnahme der Stacks noch nicht ausreichend abgestimmt, was die Abweichung zwischen Vorgabe (rot) und Aufnahme (dunkelblau) um ca. 6 % erklärt. Davon abgesehen, lief die Elektrolyse sehr konstant und produzierte kontinuierlich 205-215 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff. Die Stromaufnahme der Nebenanlagen lag bei ca. 20 - 30 kW.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

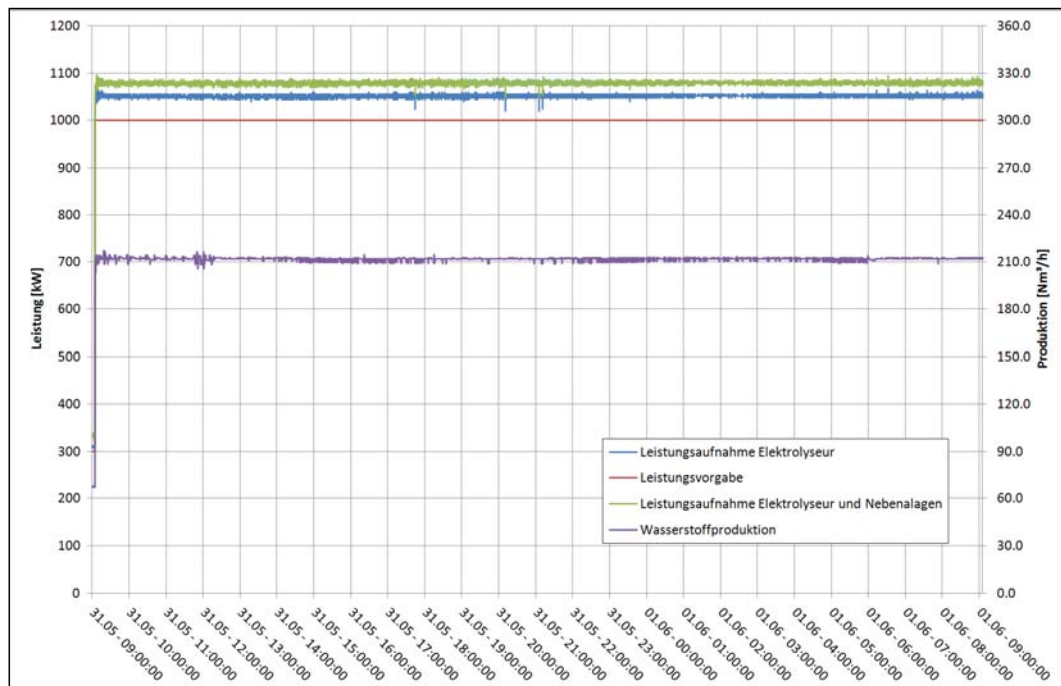


Abbildung 7: 1 MW Leistungsfahrt

Abbildung 8 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus dem gerade vorgestellten Diagramm um das Schwankungsverhalten der Leistungsaufnahmekurven näher zu betrachten. Die kleinteiligen „Wellen“ entstehen vor allem durch kurzfristige Temperaturschwankungen des Stacks im Rahmen der Regelung. Die wenigen deutlichen Peaks sind auf Spannungsschwankungen am Eingang des Gleichrichters zurückzuführen.

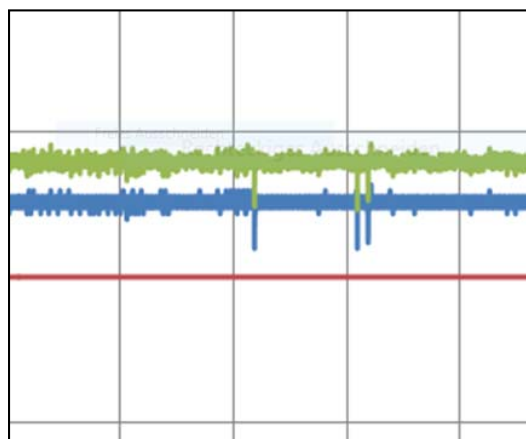


Abbildung 8: Ausschnitt aus der 1 MW Leistungsfahrt

Im Anschluss an die 1 MW Leistungsfahrt wurde eine weitere Leistungsfahrt bei der maximalen Stackleistungsaufnahme von 1,5 MW durchgeführt. Die Ergebnisse dieser zweiten Leistungsfahrt sind in der folgenden Abbildung 9 zusammengefasst. Hier wurden Stackleistungsaufnahme und

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

Leistungsvorgabe bereits synchronisiert, d.h. die Kurven liegen nahezu perfekt übereinander. Auch in diesem Betriebszustand benötigen die Nebenanlagen eine Leistung von 20-30 kW. Dieser Test wurde nicht über 24 h gefahren sondern lediglich über 6 h. Im betrachteten Zeitraum lief die Anlage extrem stabil und produzierte ca. 290 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff pro Stunde.

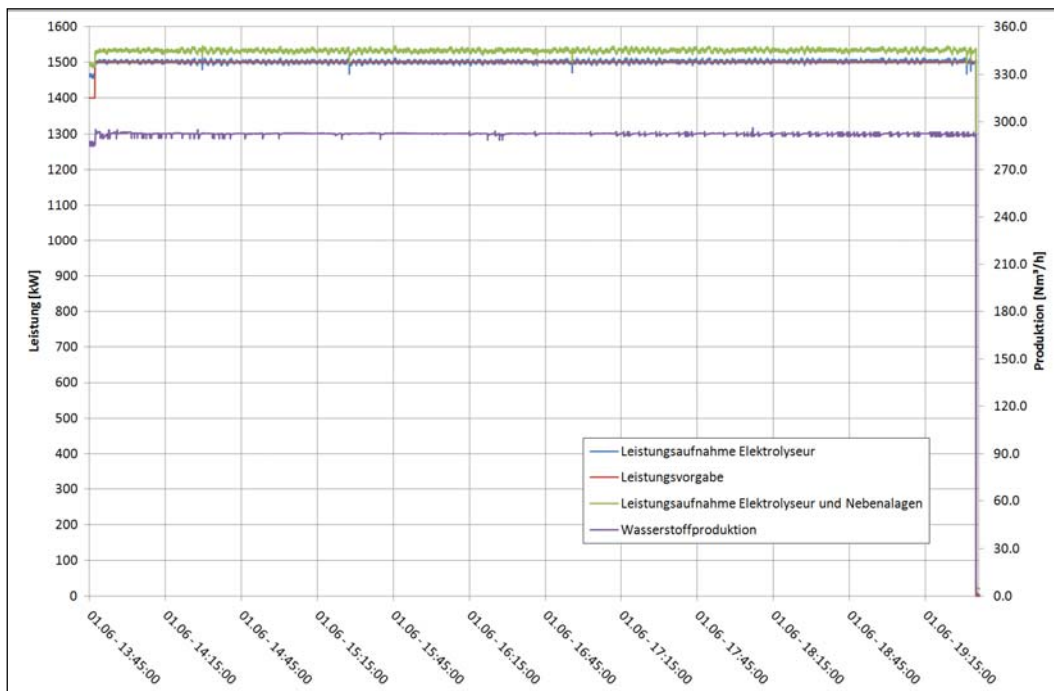


Abbildung 9: 1,5 MW Leistungsfahrt

Um das Regelverhalten und die Flexibilität der Pilotanlage zu untersuchen, wurden mehrere Testreihen mit Sprungantworten durchgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft einige der in diesen Testreihen erzielten Ergebnisse.

Abbildung 10 zeigt einen Sprung von 150 kW auf 500 kW. Die Anlage benötigt ca. 15 s um einen stationären Betrieb bei 500 kW Leistungsaufnahme zu erreichen. Die Wasserstoffproduktion (lila) reagiert baubedingt deutlich träger als die elektrischen Messungen. Bei 500 kW Stromaufnahme werden ca. 100 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff produziert.

Abbildung 11 zeigt einen Sprung von 150 kW auf 1000 kW. In diesem Fall benötigt die Anlage ca. 30 s um einen stationären Betrieb bei 1000 kW Leistungsaufnahme zu erreichen. Bei 1000 kW Stromaufnahme werden ca. 200 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff produziert.

Abbildung 12 zeigt einen Sprung von 150 kW auf die Maximalleistung von 1500 kW. In diesem Fall benötigt die Anlage ca. 43 s, um einen stationären Betrieb bei 1500 kW Leistungsaufnahme zu erreichen. Bei 1500 kW Stromaufnahme werden ca. 290 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff produziert.

Die hier nachgewiesenen, sehr schnellen Reaktionszeiten der PEM Technologie ermöglichen damit den Einsatz auch im anspruchsvollen Markt der Regelernergiebereitstellung.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

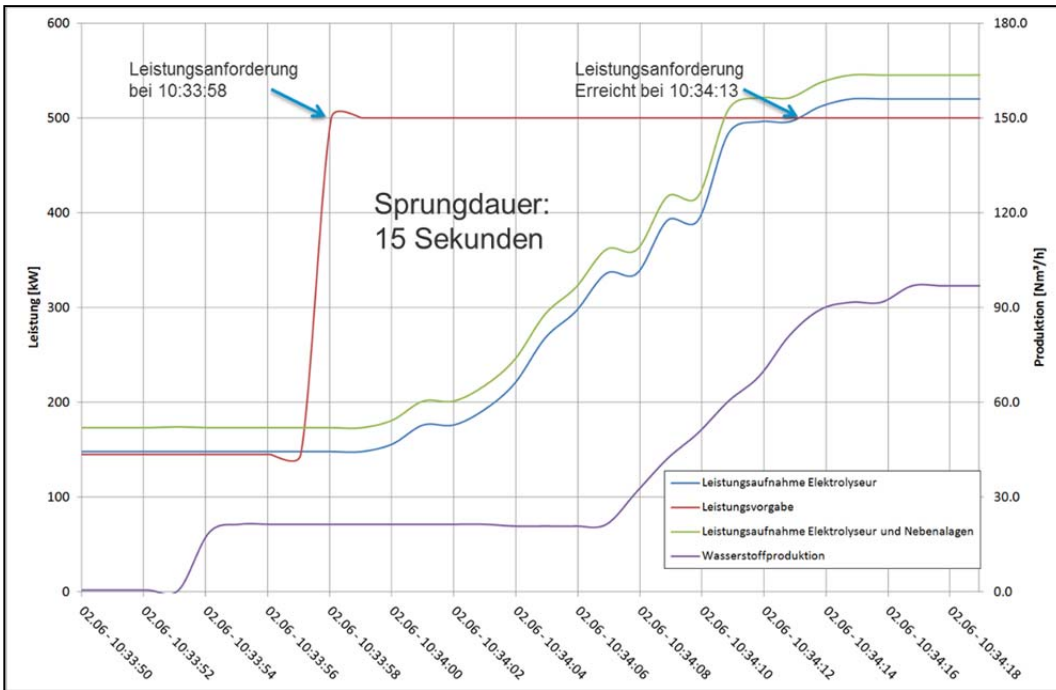


Abbildung 10: Sprungantwort – Standby auf 500 kW

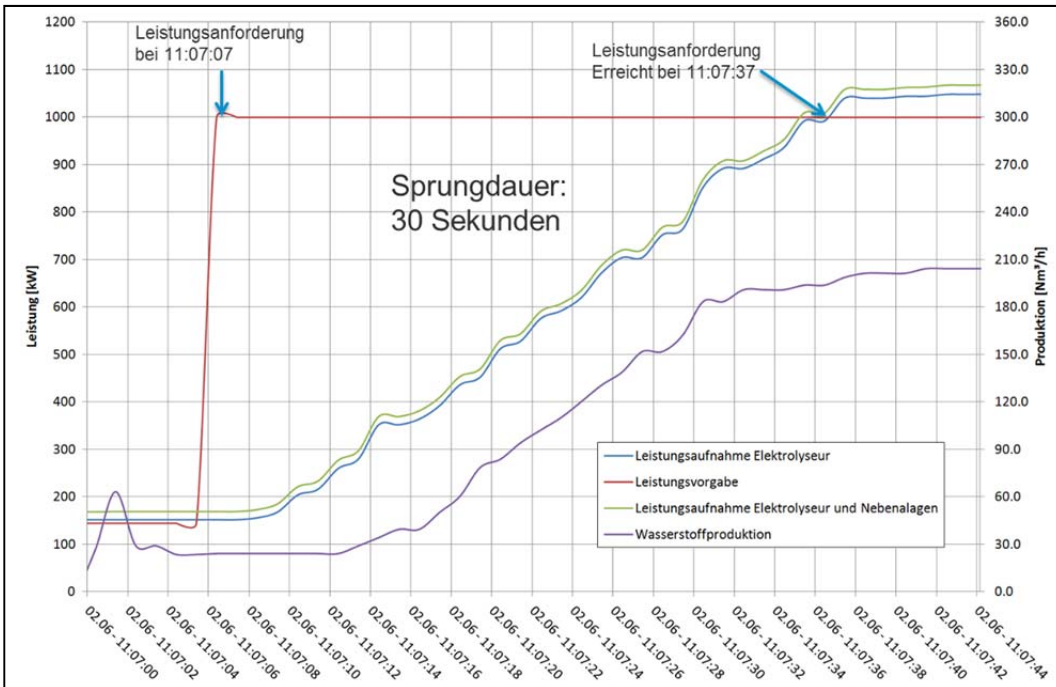


Abbildung 11: Sprungantwort – Standby auf 1.000 kW

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

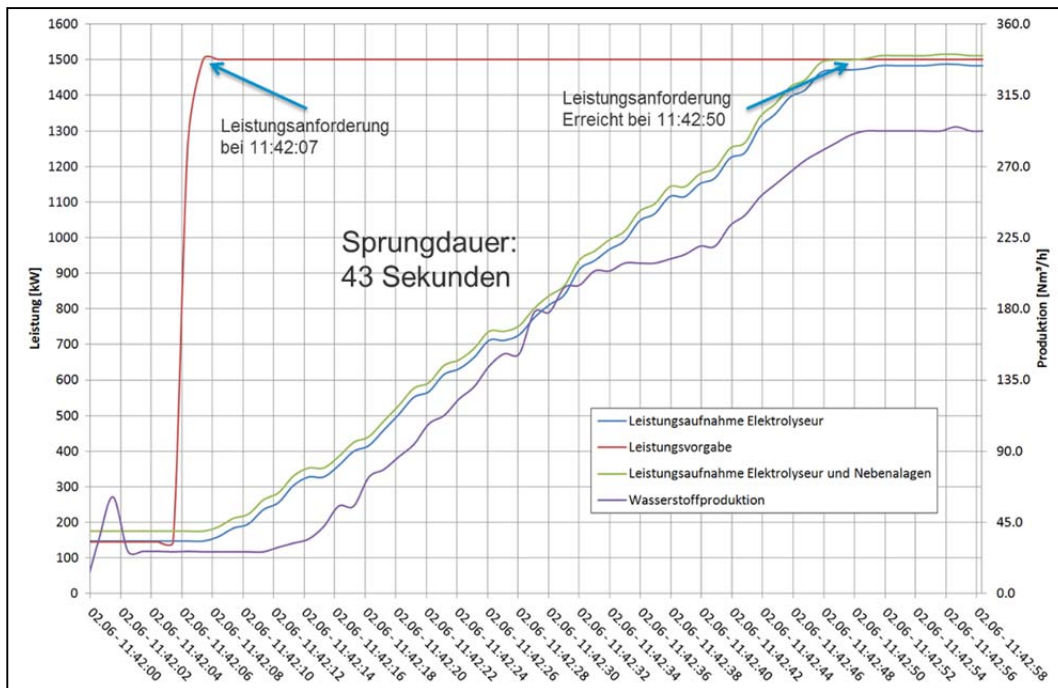


Abbildung 12: Sprungantwort – Standby auf 1.500 kW

Um die Genauigkeit der Regelung zu untersuchen und die erzielten Wirkungsgrade bei verschiedenen Leistungsaufnahmen zu ermitteln, wurde zusätzlich ein Treppenprofil abgefahren (Abbildung 13). Hierzu wurde die Anlage bei 250 kW Leistungsaufnahme stationär gefahren und dann die Leistung schrittweise erhöht. Die einzelnen Schritte lagen zwischen 150 und 200 kW Leistungssteigerung. Nach jeder einzelnen Steigerung wurde die Anlage ca. 30 min beim gewünschten Leistungsniveau gehalten, um einen stationären Betrieb sicherzustellen. Der Gesamttest lief über einen Zeitraum von ca. 5 h.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

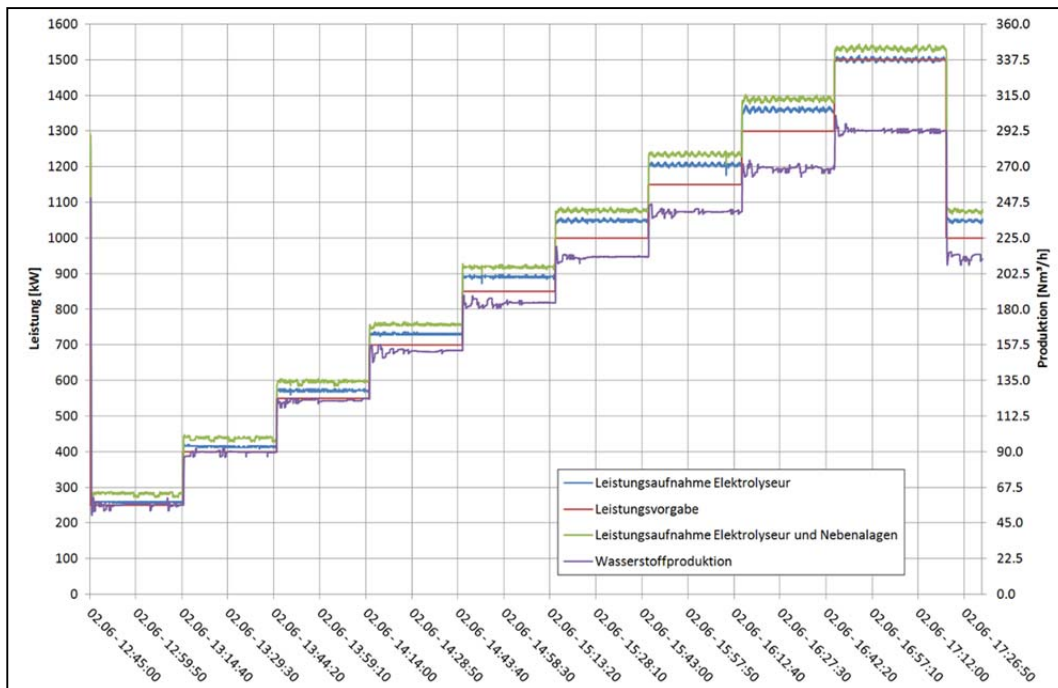


Abbildung 13: Treppenfahrt – Leistungssprünge von 150 kW

Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage unter Berücksichtigung aller Nebenanlagen nimmt, wie erwartet, mit größer werdender Leistungsaufnahme ab und bewegt sich in einem Bereich von 77-69 %. Die höchsten Wirkungsgrade von etwa 77 % werden bei einer Leistungsaufnahme von 400 kW erzielt. Bei kleineren Aufnahmen führt die nahezu konstante Leistungsaufnahme der Nebenanlagen zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrads. Auch im Treppenprofil ist zu erkennen, dass Leistungsvorgabe und Aufnahmen noch synchronisiert werden müssen. Bei fast allen Stufen sind hier deutliche Abweichungen zu erkennen.

## AP 10 Betrieb

Der eigentliche Betrieb der Anlage startete nach der erfolgreichen Inbetriebnahme im Juli 2015. Hier wurde die Anlage genutzt, um weitere Testprogramme, in Abstimmung mit den beteiligten Instituten (DLR, Fraunhofer ISE), durchzuführen und strompreisoptimiert Wasserstoff zu erzeugen. Insgesamt lief die Anlage ca. 600 h im normalen Betrieb und produzierte dabei mehr als 100.000 Nm<sup>3</sup> „grünen“ Wasserstoff. Die Anlage wurde nach DVGW Regelwerk (analog zu Erdgasanlagen) errichtet und betrieben.

Im Rahmen des normalen Betriebs wurden auch verschiedene Optimierungen an den Nebenanlagen durchgeführt, um das Regelungsverhalten und die Verfügbarkeit der Anlage weiter zu verbessern:

- Austausch der Druckhaltearmaturen
- Anpassung des Gleichrichterregelungsverhaltens
- Optimierung des Regelungsverhaltens der Wärmeabführung



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

- Einführung einer Ausschleuse-Möglichkeit von Schlechtwasser aus dem Elektrolysekreislauf  
Diese wurde notwendig, da das Auslösen von Anionen aus Stack und Anlagenverrohrung bei der neuen Anlage zu einer ungewollten und unerwarteten Erhöhung der Leitfähigkeit führte. Nach einer Einfahrzeit kommt dieser Prozess zum Erliegen
- Installation eines Schalldämpfers im Wasserstoffausbläser um Geräusentwicklung bei Außerbetriebnahme zu verringern

## AP 11 Analyse Feldtest und Betriebserfahrung

Im Rahmen des Feldtests und des Betriebs der Anlage wurden durch Uniper verschiedenste Vermarktungsszenarien für die neue PEM Technologie untersucht. Die hohe Effizienz und kompakte Bauform der PEM Elektrolyse ermöglicht eine Vielzahl von denkbaren zentralen und dezentralen Anwendungen mit einem hohen Potential zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen.

Die folgende Abbildung 14 gibt einen Überblick über die verschiedenen Nutzungspfade:

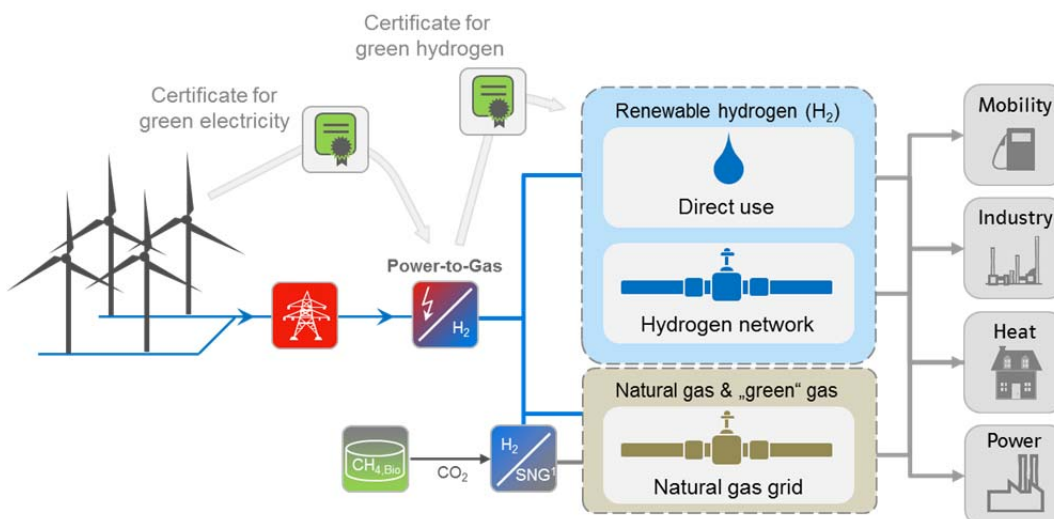


Abbildung 14: Mögliche Nutzungspfade für die PEM Elektrolyse als zentraler Baustein der Power to Gas Technologie

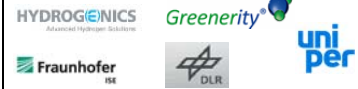
Mögliche Kunden für „grünen“ Wasserstoff könnten Betriebe aus verschiedensten Industriezweigen, wie der Öl-, Stahl-, Düngemittel- und Chemie-Industrie, aus dem Mobilitäts- und Transport-Sektor oder aus dem Wärmemarkt sein.

Der aus erneuerbarer Energie hergestellte „grüne Wasserstoff“ kann genutzt werden um

- Treibhausgasemissionen in Chemie- oder Raffinerieprozessen zu senken. Diese Emissionen können im Vergleich zum Einsatz von konventionell hergestelltem Wasserstoff, um mehr als 91% reduziert werden.
- Transportkosten, -risiken und -emissionen bei lokaler Installation zu vermeiden.
- Erneuerbare Energien in verschiedensten Industriesektoren nutzbar zu machen

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Es ist möglich durch die hohe Flexibilität der Anlagen die angeschlossenen Stromnetze durch das Angebot von Regelenergieleistung zu unterstützen und zu stabilisieren. Erneuerbarer Strom, der durch Einschränkungen im Transportnetz nicht sinnvoll verwertet werden kann, kann als „grüner“ Wasserstoff zwischengespeichert und so nutzbar gemacht werden.

Der als Nebenprodukt produzierte Sauerstoff kann bei günstigen Standortbedingungen genutzt und vermarktet werden.

Im Vergleich zur herkömmlichen (landwirtschaftlichen) Produktion von Biogas oder Biokraftstoffen benötigen die kompakten Power to Gas Anlagen deutlich weniger Fläche und können dazu beitragen, dass deutlich mehr biogene Kraftstoffe eingesetzt und die Emissionen im Mobilitäts- und Transportsektor entscheidend gesenkt werden.

Um die großen Potentiale der PtG Technologie erschließen zu können, sind verschiedene Anpassungen in den geltenden Regelwerken und Gesetzen notwendig. Noch ist die PtG Technologie durch Behörden und Gesetzgebung nicht als Energiespeicherlösung anerkannt. Damit ergibt sich für den Betreiber das Problem, dass er als Strom-Letztverbraucher angesehen wird und verpflichtet ist den vollen Strompreis, inklusiver sämtlicher Steuern und Umlagen, zu bezahlen. Der somit erzielbare Wasserstoffpreis liegt deutlich über dem Preis von „grauem“ Wasserstoff, der in Dampfreformern hergestellt wird. Dieser Umstand verhindert zurzeit die stoffliche Nutzung des Wasserstoffs durch interessierte Anwender.

Bei einer energetischen Nutzung muss der „grüne“ Wasserstoff mit den fossilen Energieträgern Erdgas und Öl konkurrieren. Diese sind zurzeit deutlich preiswerter.

Es ist anzumerken, dass es bis heute noch kein einheitliches Zertifizierungssystem für „grünen“ Wasserstoff gibt. Das Projekt „CertifHy“ arbeitet an einem Zertifizierungsmodell analog dem existierenden Modell für grünen Strom. Die Anrechenbarkeit von „grünem“ Wasserstoff als Biokraftstoff der zweiten Generation (advanced biofuel) ist nach den geltenden Regularien und Gesetzen noch nicht möglich. Hierzu sind vor Allem die „Fuel Quality Directive (FQD)“ und die „Renewable Energy Directive (RED)“ auf europäischer und nationaler Ebene anzupassen. Im Rahmen der letzten Revision wurde die FQD bereits in einem ersten Schritt modifiziert, um aus erneuerbaren Energien erzeugten Wasserstoff, als Biokraftstoff zu berücksichtigen. Es sind allerdings noch weitere Anpassungen notwendig, um den wirtschaftlichen Einsatz der entwickelten Technologie in diesem Sektor zu ermöglichen.

Leider sind damit im Moment schon auf Basis der laufenden, Strompreis dominierten Betriebskosten keine tragbaren Geschäftsmodelle zu erzielen. Die Errichtungskosten sind in diesem Fall eher von sekundärer Bedeutung.

Zurzeit gibt es kein wirtschaftliches Vermarktungsszenario für die bestehende Anlage. Diese wurde daher nach erfolgreichem Abschluss des Projekts in den ruhenden Betrieb überführt.

### II.1.1.2 Weitere Nutzung des Prototypen

UST beabsichtigt den Prototypen auch über das Projektende hinaus weiter zu betreiben, sucht aber im Moment noch nach Modellen, die einen wirtschaftlichen Weiterbetrieb oder einen weiteren entscheidenden Erkenntnisgewinn ermöglichen. Es werden verschiedene Möglichkeiten

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

untersucht, die auch zu einer Re-Lokalisierung der modularen, kompakten Anlage an einen anderen Standort führen könnten.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

## II.1.2 Fraunhofer ISE

### II.1.2.1 Beschreibung der Arbeitspakete

#### AP 1: Membran-Elektroden-Einheit

In diesem Arbeitspaket sind alle Arbeiten des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesystem ISE auf dem Gebiet der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) zusammengefasst.

#### AP 1.1: Laborzelle, Testeinrichtung

Innerhalb des Arbeitspaketes wurden im AP 1.1 zwei Teststände zur Charakterisierung von MEAs aufgebaut. Einer der beiden Teststände ist in Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15: Teststand für Einzelzellen am Fraunhofer ISE für Kurz- und Langzeitcharakterisierung

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

Beide Teststände haben folgende Hauptmerkmale:

- Druckbereich: 0 – 50 bar
- Temperaturbereich: 20 – 80 °C (ausgeglichenen und Differenzdruckbetrieb)
- Leistungselektronik: 0 – 200 A / 0 – 15 V
- Interne Wasseraufbereitung
- Beidseitig Wasserzirkulation möglich
- LabView Ansteuerung
- Unbeaufsichtigter Dauerbetrieb möglich

Zur Überprüfung der Funktionsweise des Teststands wurden Kennlinien mit einer KompEISys 1 MEA vermessen. Die Ergebnisse der Druck- (links) und Temperaturkennlinien (rechts) sind in Abbildung 16 zu sehen. Die Druckkennlinien wurden bei einem ausgeglichenen Druckbetrieb gemessen. Der Vergleich mit vorherigen Messergebnissen, die an einem vorhandenen Teststand erzielt worden sind, zeigt leicht geringere Spannungswerte. Insbesondere bei den Druckkennlinien, ist dies auch auf die Modifikationen an der verwendeten Testzelle zurückzuführen. Die Reproduzierbarkeit ist gegeben.

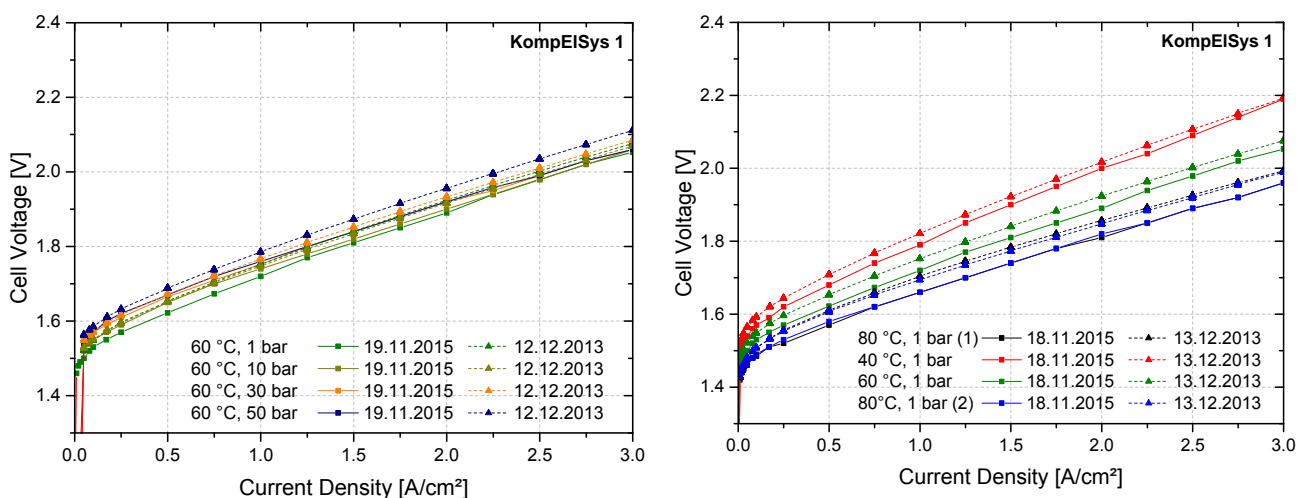


Abbildung 16: Druckkennlinien (links) und Temperaturkennlinien (rechts) gemessen am neu aufgebauten Teststand und verglichen mit alten Messdaten.

Für beide Teststände wurden zwei vorhandene Elektrolyse-Testzellen weiterentwickelt. Es wurden unter anderem die Endplatten, die bisher aus Aluminium gefertigt wurden durch Edelstahl ersetzt. Dadurch wurde verhindert, dass sich die Zelle unter steigendem Druck aufbläht und der Widerstand ansteigt. Die Elektrolysezellen wurden mehrfach gefertigt, damit beide Teststände parallel betrieben werden können. Eine der zwei Testzellen ist im Abschnitt für AP 2.2 näher beschrieben.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

## AP 1.2: Laborzelle, Testeinrichtung

Für die Kurzzeitcharakterisierung der Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) wurde eine Standardmessprozedur zusammen mit dem Partner Greenery entwickelt. Die Prozedur ist wie folgt aufgebaut:

- Einlaufprozedur (Aufheizen auf 80°C und Wechsel der Stromstärke alle 30 min zwischen 1 und 2 A/cm<sup>2</sup>)
- Aufnahmen von U/i-Kennlinien bis maximal U = 2,3 V in Abhängigkeit von der Temperatur (in der Reihenfolge: 80, 60, 40, 80°C)
- Aufnahmen von U/i-Kennlinien bis maximal U = 2,3 V in Abhängigkeit vom Druck (in der Reihenfolge 0, 10, 30 und 50 barg bei T = 60°C)

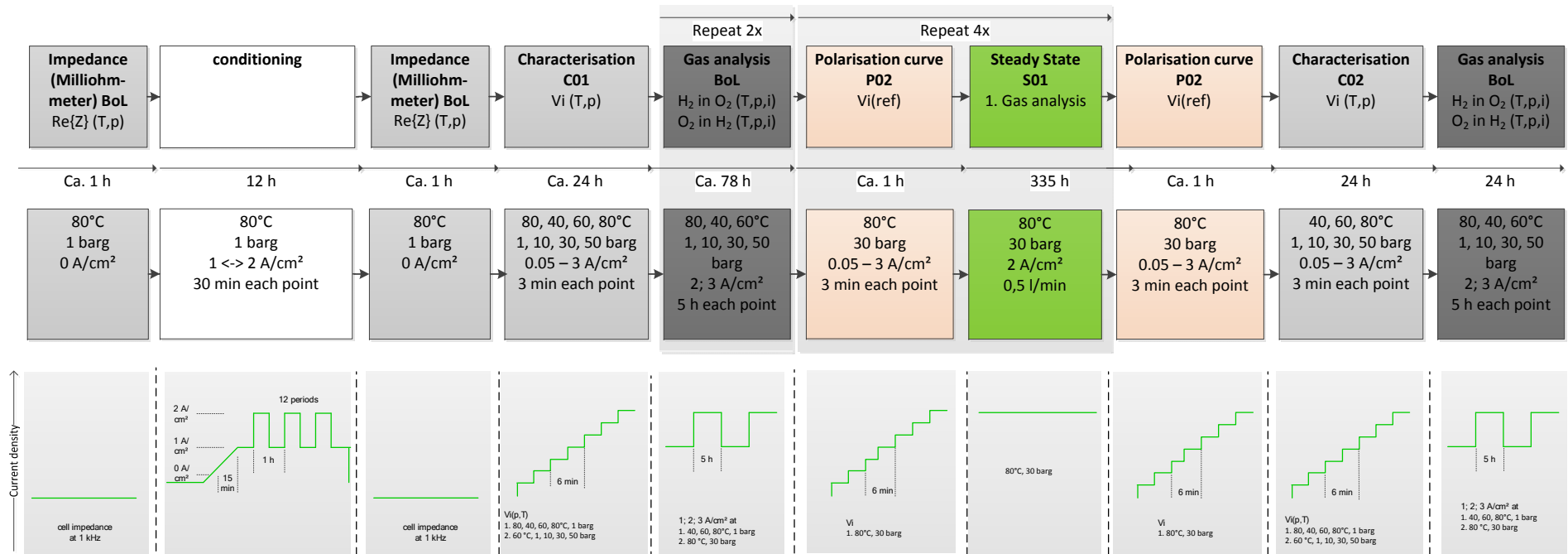
Des Weiteren wurde eine Langzeitcharakterisierungsprozedur festgelegt. Diese ist schematisch in Abbildung 17 dargestellt. Die Prozedur setzt sich aus mehreren Blöcken zusammen. Die ersten Blöcke entsprechen der Kurzzeitcharakterisierung. Danach folgt noch ein Block zur Gasanalyse. Erst im Anschluss werden die sich wiederholende Blöcke unter einen ausgewählten Betriebspunkt umgesetzt. Nach den wiederholenden Blöcken steht wieder ein ausführlicherer Charakterisierungsblock an. Diese Messprozedur konnte leider aufgrund von Verzögerungen im Labor- und Teststandsaufbau nicht mehr vollständig umgesetzt werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## Measurement procedure KompPEMSys 21.06.2016



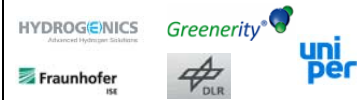
### Current densities polarisation curves

- 0.01; 0.02; 0.03; 0.05; 0.08; 0.1; 0.175; 0.25 A/cm²
- Since 0.25 in 0.25 A/cm² steps
- U<sub>i(ref)</sub> after restart after testbench errors

Abbildung 17: Schematischer Ablauf einer Dauermessung

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## AP 1.3: MEA-Charakterisierung Teil 1: Laborgröße

Mit dieser Messprozedur wurden verschiedene MEAs des Projektpartners Greenerity am ISE vermessen. Eine Katalysatorbeladungsreduktion war eines der Ziele des Projektpartners. In einer Untersuchung wurde die Kathodenbeladung um ca. 50% reduziert und die MEA am ISE vermessen. Dafür wurde eine vorhandene Testzelle verwendet. Als poröse Transportschicht wurde auf beiden Seiten ein Ti-Pulversinter eingesetzt. Die temperaturabhängigen Kennlinien sind in Abbildung 18 dargestellt.

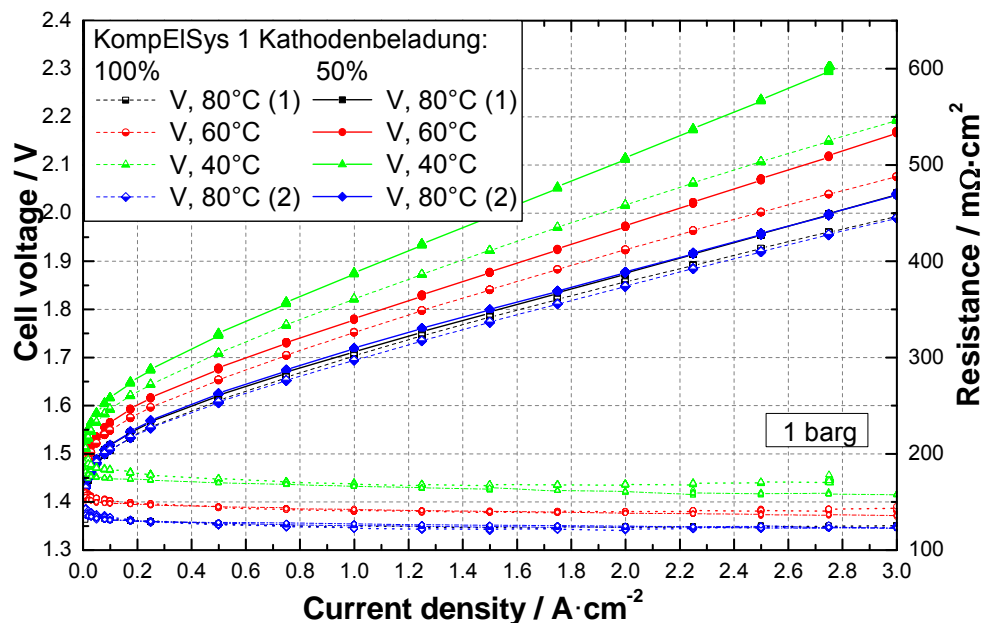


Abbildung 18: Stationäre U/i-Kennlinien in Abhängigkeit von der Temperatur. Vergleich unterschiedlicher Beladungen auf der Kathodenseite.

Es ist deutlich zu sehen, dass sich durch die Reduzierung der Beladung die Zellspannung, insbesondere für niedrige Temperaturen, deutlich erhöht. Laut Greenerity stehen diese Ergebnisse im Widerspruch zu beim Projektpartner erzielten Ergebnissen, die keine erhöhten Spannungen bei reduzierter Kathodenbeladung sehen. Bei Projektpartner Greenerity wird auf der Kathodenseite allerdings ein GDL zur Kontaktierung der Elektrode verwendet. Ursache hierfür könnte dadurch eine bessere Kontaktierung von inaktiven Bereichen der Elektrode sein. Für die endgültige Klärung sind weitere Versuche nötig.

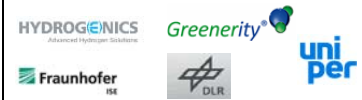
## AP 2 Zelle und Zellstapel

Das Arbeitspaket fokussiert sich auf die grundlegenden Aspekte der Entwicklung eines konstruktions- und kostenoptimierten Zellstapels für die PEM-Elektrolyse. Insbesondere wurde hier das Zell- und Stackdesign hinsichtlich seiner Kostenstruktur analysiert (AP 2.1), die porösen Transportschichten (englisch porous transport layer, PTL) genauer untersucht (AP 2.2) und Beschichtungsstrategien für Bipolarplatten in PEM-Elektrolyseuren behandelt (ebenfalls AP 2.2).



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## AP 2.1 Konzeption kostenoptimierter Stack

Schwerpunkt dieses APs war die konzeptionelle Betrachtung eines kostenoptimierten Stackdesigns auf Basis eines am Fraunhofer ISE entwickelten Kostenmodells. Aufbauend auf einer Literaturrecherche wurden die größten Optimierungspotenziale im Stackdesign bewertet und Maßnahmen zur Kostensenkung mit Hilfe des Modells untersucht. Die Betrachtungen fokussieren sich vor allem auf den Einfluss der gewählten Zellflächen und der Stromdichte sowie auf den ökonomischen Einfluss von Beschichtungen in Elektrolysezellen.

Um diese Fragestellungen untersuchen zu können wurden zu Projektbeginn vereinfacht drei typische Einsatzbereiche für die PEM-Elektrolyse betrachtet und anhand der geforderten H<sub>2</sub>-Produktionsrate geeignete Leistungsklassen für PEM-Elektrolysestacks abgeleitet:

- Industrielle vor-Ort Wasserstofferzeugung mit H<sub>2</sub>-Erzeugungskapazität von 5 - 50 Nm<sup>3</sup>/h
- Wasserstoff in der Mobilität mit einer H<sub>2</sub>-Erzeugungskapazität von 50 - 200 Nm<sup>3</sup>/h
- Energiespeicherung für erneuerbare Energien mit einer H<sub>2</sub>-Erzeugungsrate von 100 - 2.000 Nm<sup>3</sup>/h

Dabei muss beachtet werden, dass in den unterschiedlichen Anwendungen auch mehrere Stacks pro Elektrolysesystem zusammengeschaltet werden können, um auf die gewünschte Erzeugungskapazität zu kommen. Um die Kostenanalyse nicht zu komplex zu betrachten, wurden Stacks mit unterschiedlicher Zellfläche aber identischen Zelldesign und Betriebspunkt untersucht:

- Der nominale Betriebspunkt im Basisszenario (Baseline) wurde mit einer Zellspannung von 1,8 V und einer Stromdichte von 2,0 A/cm<sup>2</sup> spezifiziert
- Der faradaysche Wirkungsgrad ist bei 80°C Betriebstemperatur und 30 bar Betriebsdruck mit 98 % als typisch erreichbarer Wirkungsgrad festgelegt
- Gemäß den oben skizzierten Anwendungsfällen werden Stacks mit einer Produktionsrate und geometrischer Zellfläche von ca. 25 Nm<sup>3</sup>/h (300 cm<sup>2</sup>), 50 Nm<sup>3</sup>/h (600 cm<sup>2</sup>) und 100 Nm<sup>3</sup>/h (1.200 cm<sup>2</sup>) betrachtet; alle Stacks bestehen demzufolge aus ca. 100 Zellen

Aus heutiger Sicht würde eine Betrachtung auch größerer Zellflächen Sinn machen, jedoch war die dynamische Entwicklung in der PEM-Elektrolyse so vor drei Jahren noch nicht absehbar. Das Stack-Design wurde in konventioneller Filterpressenanordnung ausgeführt. Für alle Stacks wurde eine quaderförmige Zellfläche angenommen. Um die oben formulierten Fragestellungen beantworten zu können, wurde angenommen, dass in den Zellen keine klassischen Flowfields in der Bipolarplatte eingearbeitet sind. Stattdessen erfolgt die Medien-Zu- und -Abfuhr über mehrschichtige poröse Transportschichten (PTL = porous transport layer), vgl. mit Abbildung 19.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

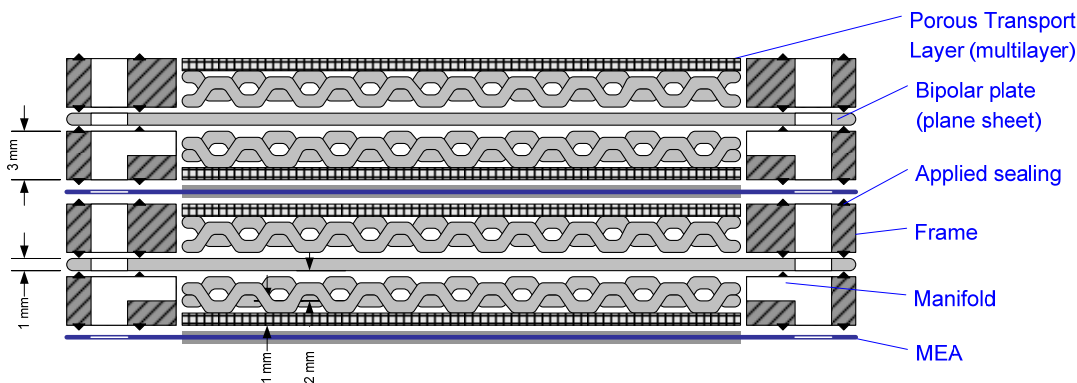
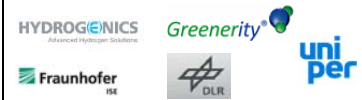


Abbildung 19: Schematischer Zellaufbau der betrachteten Stack-Konzepte. Im oberen Teil erfolgt der Medien

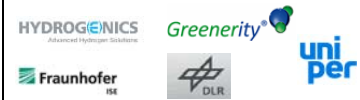
Die angenommenen Materialien für die einzelnen Zellkomponenten sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Folgende Überlegungen liegen der Materialauswahl und Dimensionierung zugrunde:

- Stromverteiler und Bipolarplatten (BPP) bestehen aus korrosionsbeständigem Titan Grade 2, die einzelnen Dicken variieren gemäß der Zellgröße;
- Die gestanzten Bipolarplatten ohne Flow-Field-Strukturen erfahren eine Nachbehandlung durch den Hersteller;
- Um die Ausbildung störender Oxidschichten zu unterbinden, wird eine Beschichtung auf der Anodenseite der BPP betrachtet, als Platzhalter für die Kostenanalyse wird Tantal angenommen;
- Der poröse Stromverteiler auf der Anode besteht aus Titanstrecknetzen (bottom layer) und gesintertem Titan-Fasermaterial in einer Mehrschichtanordnung mit einem Porengradient in Richtung Membran;
- Kostengünstiges Kohlenstoff- (composite) Material, wie es auch bekannt ist von PEM Brennstoffzellen, wird als PTL auf der Wasserstoffseite betrachtet;
- PFSA basiertes Nafion 117 von Chemours wird als Referenzmembran für die Kostenanalyse verwendet;
- Vergleichsweise hohe Katalysatorbeladungen werden angenommen, um damit der geforderten hohen Lebensdauer der Elektroden gerecht zu werden;
- Die Zellrahmen sind aus dem Kunststoff PPS GF40 mit applizierten Dichtungen im 2K-Spritzguss gefertigt, da dieses Material eine nachgewiesene Eignung für die Anwendung besitzt;
- Die Druck-/Endplatten, sind aus Edelstahl gefräst;
- Alle Montage- und Kleinteile, inkl. Fittings, sind aus Edelstahl gefertigt;
- Zusammenbau und Testprozedur beruht auf eigenen Erfahrungswerten.

Die Ermittlung belastbarer Herstellungskosten für die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) gestaltete sich erwartungsgemäß sehr schwierig, da diese Informationen sehr sensibel für jeden Hersteller sind. Alle verfügbaren Informationen wurden daher durch ein „Pooling“ und

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



unter Berücksichtigung von Zu- und Abschlägen gemäß der in Tabelle 2 betrachteten Materialauswahl anonymisiert. Für die Kosten der Rahmenherstellung musste mit gewissen Unsicherheiten von kleinen Bauteilen auf große Abmaße extrapoliert werden.

Tabelle 2: Betrachtete Materialauswahl für die Kostenanalyse

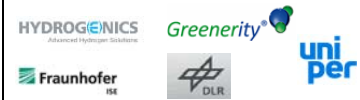
Komponente	Spezifikation
Bipolar-Platte	Titanium
Rahmen	PPS GF40
Anodenkatalysator und Beladung	IrO <sub>2</sub> (2 mg/cm <sup>2</sup> )
Kathodenkatalysator und Beladung	40 wt. % Pt on carbon (1 mg/cm <sup>2</sup> )
Membrane	Nafion 117
Anode PTL	Sintered Ti, expanded Ti mesh, Ti felt
Kathode PTL	Carbon paper (multilayer) with MPL
Schutzbeschichtung Anode BPP	1 µm Ta

Mit diesen Daten und der Festlegung von Stackdesign und -dimensionen lassen sich die erforderlichen Quantitäten an Zell- und Stackkomponenten festlegen (hier aus Platzgründen nicht detailliert dargestellt). Ein Produktionsvolumen von 100 Stacks wird für jede Größe angenommen. Aus heutiger Sicht ist dies ein verhältnismäßig großes Produktionsvolumen für die aktuelle Nachfrage des Marktes. Die Investitionskosten für einen Stack würden sehr wahrscheinlich beträchtlich höher liegen, wenn weniger Zellstapel produziert würden.

Das am Fraunhofer ISE entwickelte Kostenmodell für den Stack erlaubt eine Abschätzung der Investitionskosten. Dabei werden Art und Dimensionen der eingesetzten Materialien, sowie die benötigte Menge für ein vorgegebenes Produktionsvolumen berücksichtigt. Grundlage für das Kostenmodell sind zum einen die Stack-Spezifikationen und das daraus abgeleitete Zellkonzept und die berechneten Mengen, wie weiter oben vorgestellt. Ferner werden auf Basis von Richtpreisangeboten spezifische Kostenfunktionen für die einzelnen Komponenten ermittelt. Hierzu konnte auf einen existierenden Datensatz an Material- und Herstellungskosten zurückgegriffen werden, durch die in diesem Projekt berechneten Leistungsklassen mussten jedoch auch zusätzliche Anfragen an Hersteller und Zulieferer gestellt werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



In der Regel sinken die spezifischen Beschaffungskosten mit steigender Chargenmenge. Diese Preisdegression der spezifischen Investitionskosten  $IK_i$  einer Komponente  $i$  können mit einem mathematischen Potenzansatz beschrieben werden:

$$IK_i = a \cdot X^m$$

Mit  $IK_i$  = spezifische Investitionskosten [€/X] der Komponente  $i$   
 $a$  = Bauart- oder Verfahrensfaktor  
 $X$  = relevante Bezugsgröße der Komponente (Kapazität)  
 $m$  = Degressionskoeffizient

Die Parameter  $a$  und  $m$  werden durch eine Ausgleichsrechnung (i.d.R. Trendlinie gemäß der Methode der kleinsten Quadrate) bestimmt. Die absoluten Kosten einer Komponente  $i$  gemäß Stackdesign ergeben sich letztendlich durch Multiplikation der benötigten Menge pro Stack (wie beispielsweise Membranfläche) und der spezifischen Investitionskosten.

Die Investitionskosten folgender Komponenten wurden durch einen solchen Potenzansatz auf Basis von Richtpreisangeboten bestimmt: Membran-Elektroden-Einheit, Porous Transport Layer (PTL) für Anode sowie Kathode und Beschichtung der BPP (hier nur Anodenseite betrachtet). Des Weiteren erfolgte eine einfache Abschätzung der spezifischen Investitionskosten auf Basis verfügbarer Preisinformationen für folgende Komponenten: Halbzellrahmen mit Dichtungen (Frames/Sealings) und Bipolarplatten (BPP). Letztendlich dienten eigene Erfahrungen des Fraunhofer ISE für die Bestimmung der Kosten folgender Komponenten: Druckplatten (pressure plate), Balance of stack und Montage und Funktionstests (Assembly/Testing).

Tabelle 3: Ermittelte Gesamt- und spezifischen Kosten für die drei betrachteten Zellflächen

Zellfläche	[cm <sup>2</sup> ]	300	600	1.200
<b>Gesamtkosten</b>	<b>[€/stack]</b>	38.020	66.677	121.243
<b>Spez. Kosten</b>	<b>[€/kW]</b>	352	309	281
<b>Spez. Kosten</b>	<b>[€/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>]</b>	1.558	1.366	1.242
<b>Spez. Kosten</b>	<b>[€/cm<sup>2</sup>]</b>	1,27	1,11	1,01

Alle ermittelten Kosteninformationen der Einzelkomponenten resultieren in Gesamtkosten und davon abgeleitet in relativen Kosten wie in Tabelle 3 angegeben. Ferner lassen sich für die Einzelkomponenten relative Kosten bestimmen. Ein Vergleich für das Basisszenario ist in Abbildung 20 dargestellt. Um die Auswirkung durch die unterschiedlichen Zellflächen besser verstehen zu können, bezieht sich der relative Kostenanteil auf die spezifischen Kosten pro cm<sup>2</sup> Zellfläche.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

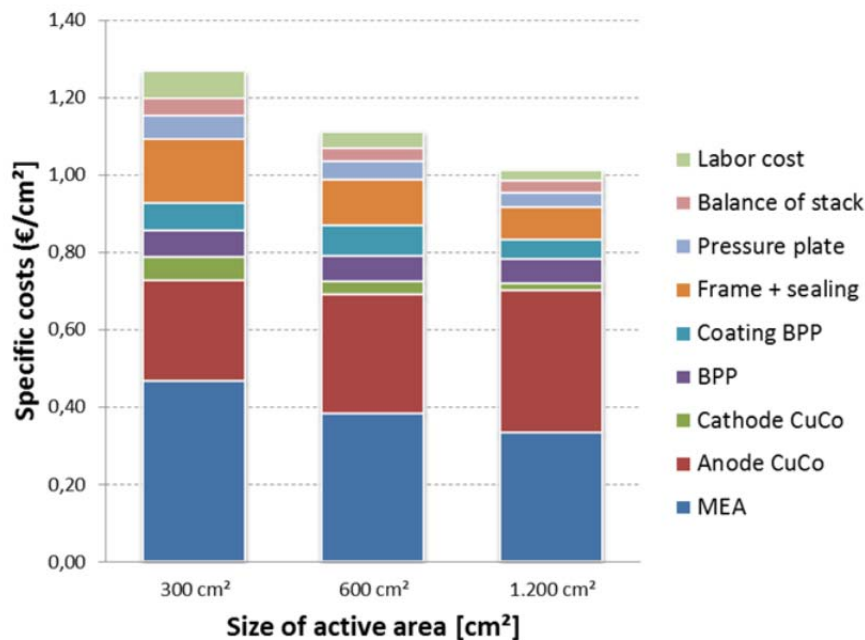


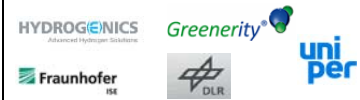
Abbildung 20: Relative Anteile der Zell- und Stack-Komponenten aller drei betrachteter Zellgrößen an den Gesamtkosten

Aus dieser Kostenanalyse sollen folgende Punkte hervorgehoben werden:

- Der relative Kostenanteil der MEA hängt nur gering von der betrachteten Zellfläche ab. Die Kostenreduktion durch ein günstigeres Flächenverhältnis der geom. Elektrodenfläche zur Gesamtfläche der Membran mit größerer Zellfläche kann für das ausgewählte Design vernachlässigt werden. Die Kosten für die MEA werden vor allem durch den Produktionsprozess beherrscht und nicht durch die Materialkosten für die Membran und Katalysatorsysteme bei diesen Volumina.
- Für kleinere Zellflächen hat die MEA den höchsten Kostenanteil, der Kostenanteil der Anoden-PTL steigt jedoch beträchtlich mit größerer Zellfläche. Dieser Effekt kann nicht allein durch geringere MEA-Kosten erklärt werden, sondern auch durch die zunehmende Dicke der porösen PTL, um ein adäquates Strömungsregime in der Halbzelle zu gewährleisten.
- Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus betrachtet, sind die mit der Kathoden-PTL verbundenen Kosten unerheblich. Die Entscheidung über Materialart und Dicke kann sich an der Performance und Haltbarkeit des Materials orientieren.
- Die Zellrahmen haben für dieses Design den dritthöchsten Kostenanteil am Zellstapel, aber die Kosten hängen stark von der gewählten Zellgröße ab und beinhalten eine gewisse Unsicherheit. Der Kostenanteil kann sogar noch höher sein, wenn der entworfene Spritzgussrahmen für einen Einsatz im Hochdruckbereich nicht geeignet ist.
- Gestanzte Ti-Bleche als BPPs haben nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten, was der ursprünglichen Designidee des Stack-Konzepts entspricht. Obwohl nur eine einzige

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Beschichtung in der Basis-Konfiguration betrachtet wurde, erreichen diese Kosten der Ti-Beschichtung eine gleiche Größenordnung. Eine technisch leistungsfähigere und damit aufwändigere Beschichtungsstrategie für die Titan-Komponenten könnte somit auch ökonomisch ein dominanter Kostenanteil werden.

Ausgehend von diesem Basisszenario wurden verschiedene Möglichkeiten zur Kostenreduzierung betrachtet. Dabei wurde stets nur das Zelldesign mit einer Fläche von 600 cm<sup>2</sup> betrachtet. Naturgemäß bietet vor allem die Membran-Elektroden-Einheit ein erhebliches Potenzial zur Kostensenkung. Da diese jedoch nicht Gegenstand der weiteren Arbeiten in AP 2 des Fraunhofer ISE war, wird hierauf nicht weiter eingegangen.

Eine weitere Möglichkeit zur Kostensenkung ergibt sich durch eine Optimierung der porösen Transportschicht auf der Anodenseite, da diese aus vergleichsweise teurem Material in einem sehr aufwändigen Prozess hergestellt wird. Bei gegebener Gesamtdicke des PTL sind nach einer Recherche zur heutigen Marktverfügbarkeit mehrere alternative PTL-Konfigurationen denkbar:

- A. Kombination aus einer dünnen Deckschicht aus gesinterten Ti-Partikeln (0,254 mm) und einer dickeren unteren Schicht aus gesintertem Ti-Fasermaterial.
- B. Verwendung einer einlagigen Schicht aus gesintertem Ti-Fasermaterial ohne zusätzliche obere Schicht.
- C. Einsatz von Titan-Streckmetall in einer mehrlagigen Konfiguration (thermisch gebonded) anstelle von gesinterten Ti-Materialien.

Richtpreisangebote von verschiedenen Lieferanten zeigen eine große Preisspanne für diese Materialien. Offensichtlich werden diese Preise nicht nur durch die Kosten für das Material selbst dominiert, sondern auch der notwendige Produktionsprozess und die Vor- und Nachbehandlung der Ti-Produkte haben erheblichen Einfluss auf den Preis. In der Tabelle 4 sind die kalkulierten Kosten (= Verkaufspreis der PTL-Herstellers) für die oben genannten Materialkombinationen exemplarisch zusammengefasst.

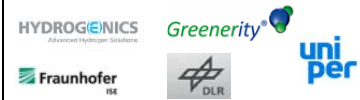
Tabelle 4: Kosten für den Anoden-PTL in unterschiedlichen Konfigurationen

Szenario		Basis	A	B	C
<b>Spez. Kosten obere Lage</b>	[€/m <sup>2</sup> ]	1.445	1.184	--	--
<b>Spez. Kosten untere Lage</b>	[€/m <sup>2</sup> ]	979,-	949,-	941,-	390,-
<b>Spez. Kosten Multilayer</b>	[€/m <sup>2</sup> ]	3.094,-	3.528,-	2.577,-	10.140,-
<b>Gesamtkosten pro PTL</b>	[€/pcs]	186,-	212,-	155,-	608,-

Wie eingangs beschrieben ist der Basisfall eine Kombination aus gesintertem Ti-Pulver (1,0 mm) als obere Schicht/Lage und gesintertem Ti-Fasermaterial als untere Schicht/Lage. Um die notwendige PTL-Gesamtdicke von 2,6 mm für die Halbzelle zu erreichen, wurden mehrere Lagen der unteren PTL-Schicht angenommen. Aus diesem Grund ergeben sich die spezifischen Kosten für den Multilayer nicht einfach aus der Summe der Kosten für die obere und untere PTL-Lage.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Wie aus Tabelle 4 ersichtlich, führen nicht alle alternativen Kombinationen zu geringeren Investitionskosten für den Zellstapel, obwohl die Ausgangsmaterialien geringere spezifische Kosten (auf die Fläche bezogen) aufweisen. Eine abschließende Aussage zur sinnvollsten Materialkombination für den Anoden-PTL kann daher nicht alleine ökonomisch getroffen werden, sondern muss auch das technische Leistungsverhalten des Anoden-PTLs berücksichtigen - vergleiche hierzu die Arbeiten in AP 2.2.

Neben der Möglichkeit durch ein verändertes Zelldesign oder verringertem Materialbedarf die Investitionskosten zu senken, besteht ferner die Möglichkeit, durch eine Verschiebung hin zu höheren Stromdichten (bei konstanter Zellspannung), bei gleichem Materialeinsatz, die spezifischen Investitionskosten für einen Stapel zu senken. Dieser Ansatz erfordert entweder eine effizientere Membran-Elektroden-Einheit mit verbesserten Katalysatorsystemen, eine leitfähigere Membran oder eine höhere Betriebstemperatur.

Abbildung 21 zeigt ein solches Szenario, in dem angenommen wird, dass durch technologische Fortschritte die Stromdichte um 10 % bzw. 20 % erhöht werden kann. Da dies bei konstanter Wasserstoffproduktionsrate eine verringerte Zellfläche bedeutet, geht dies annähernd linear in die Reduktion der auf die Fläche bezogenen Kosten ein.

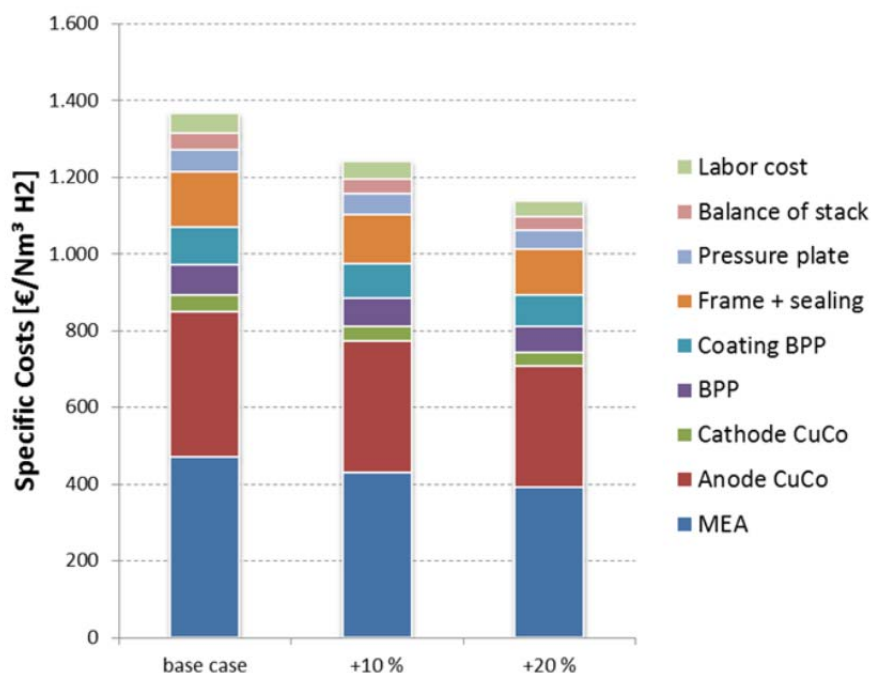
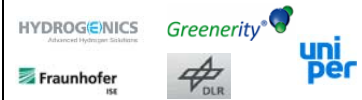


Abbildung 21: Spezifische Kosten der einzelnen Stackkomponenten unter der Annahme, dass der Betriebspunkt durch eine Erhöhung der Stromdichte um 10 % bzw. 20 % (bei konstanter Zellspannung) verschoben wird.

Als Fazit dieser Kostenanalyse konnte für die folgenden Arbeiten in AP 2 festgehalten werden, dass neben der MEA sowohl die porösen Stromverteiler (PTLs) als auch die Beschichtungen titanbasierter Komponenten einen erheblichen Einfluss auf die Kostenstruktur eines Zellstapels für

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



die PEM-Elektrolyse haben kann. Dies erfordert eine sorgfältige Auswahl und Bewertung dieser Komponenten, um unnötige Zusatzkosten vermeiden zu können.

### AP 2.2 Untersuchungen zu großskaligem Zelldesign der PEM-Elektrolyse

Dieses AP beschäftigte sich mit ausgewählten wissenschaftlichen Grundlagen für die Entwicklung und Verbesserung großflächiger Zellkonzepte für zukünftige Zell- und Stackgenerationen der PEM-Elektrolyse, namentlich

- 1.) PTL-Screening zur Untersuchung von Kostenreduzierungspotenzial wie in der Kostenanalyse aufgezeigt
- 2.) Alternative Materialien zur Kostenreduktion
- 3.) Beschichtungsstrategien für eine höhere Langlebigkeit

### Screening von Titan basierten gesinterten Strukturen als porous transport layers (PTL) in PEM-Elektrolysezellen

Für das Screening der PTLs wurde das Konzept einer am Institut vorhandenen Testzelle weiterentwickelt, gefertigt und in Betrieb genommen. Die Zelle erlaubt es, mit verschiedenen Einlegern unterschiedliche PTLs auf der Anoden- und Kathodenseite zu vermessen. Eine Außenansicht der Laborzelle und die Konstruktionszeichnung des Anoden-Kompartiments ist in Abbildung 22 abgebildet.

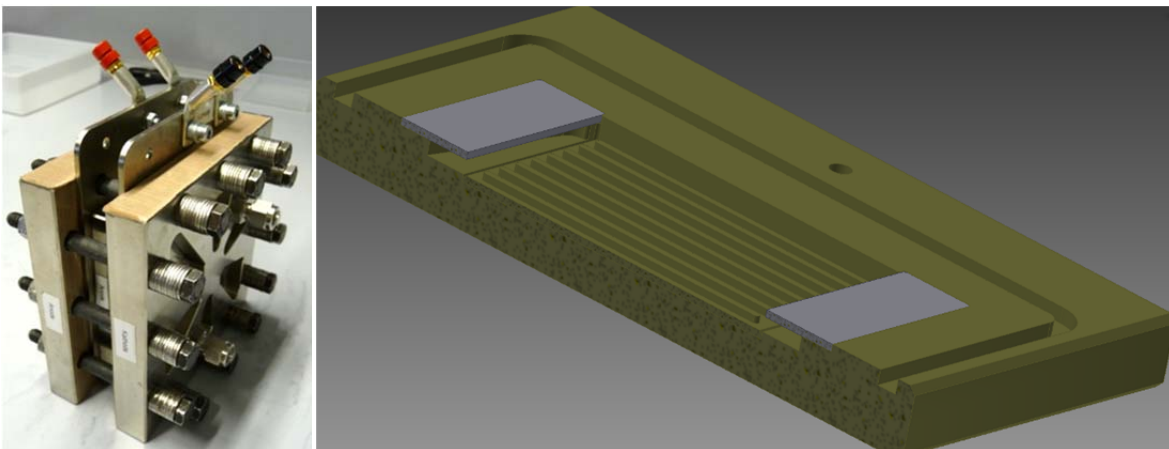


Abbildung 22: Außenansicht der Laborzelle für das PTL-Screening (links) und CAD-Zeichnung des Anoden-Kompartiments - hier abgebildet mit Flow-Kanal-Einleger (rechts).

Parallel dazu wurden am Markt verfügbare PTLs von Zulieferfirmen wie Mott, Bekaert und GKN recherchiert und besorgt. Das notwendige Testprotokoll wurde mit anderen Elektrolyseprojekten abgestimmt.



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

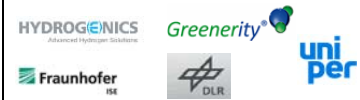


Tabelle 5: Materialparameter der getesteten PTL Materialien

Bezeichnung	Material	Dicke	Porosität
PTL 1	Ti Vlies mit Streckmetall	0,2 mm Vlies	50%
		0,8 mm Streckmetall	
PTL 2	Ti Vlies	1 mm	50%
PTL 3	Ti Pulversinter	1 mm	40%
PTL 4	Ti Pulversinter	1 mm	40%

Für das Screening der PTLs wurden insgesamt vier verschiedene Materialien von verschiedenen Herstellern als Anoden-PTL eingesetzt. Auf der Kathodenseite wurde immer ein PTL 3 mit Strömungsfeld eingesetzt.

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse für verschiedene Volumenströme (links) und Druckbereiche (rechts) dargestellt. Der Teststand wurde im ausgeglichenen Druckbetrieb betrieben. Bei den Messungen wurde ein Strömungsfeld auf der Anodenseite verwendet. Prinzipiell zeigt sich hier in allen Graphen bei der Verwendung des PTL 3 eine erhöhte Massentransportlimitierung. Die Änderung des Volumenstroms von 0,2 (links oben) auf 0,8 ml/min (links unten) zeigt keinerlei Auswirkung auf die Zellperformance aller Materialien. Bei der Änderung des Drucks von 1 (rechts oben) auf 30 bar (rechts unten) ist für die PTL 4 eine Erhöhung der Spannung zu verzeichnen, welche mit einer Erhöhung der Massentransportlimitierung einhergeht. Das umgekehrte Verhalten wurde jedoch erwartet. Eine schlüssige Erklärung hierfür kann noch nicht gegeben werden und ist nun Gegenstand in fortlaufenden Arbeiten. Für den PTL 3 führt die Druckerhöhung zu einer geringfügigen Reduktion der Massentransportlimitierung.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

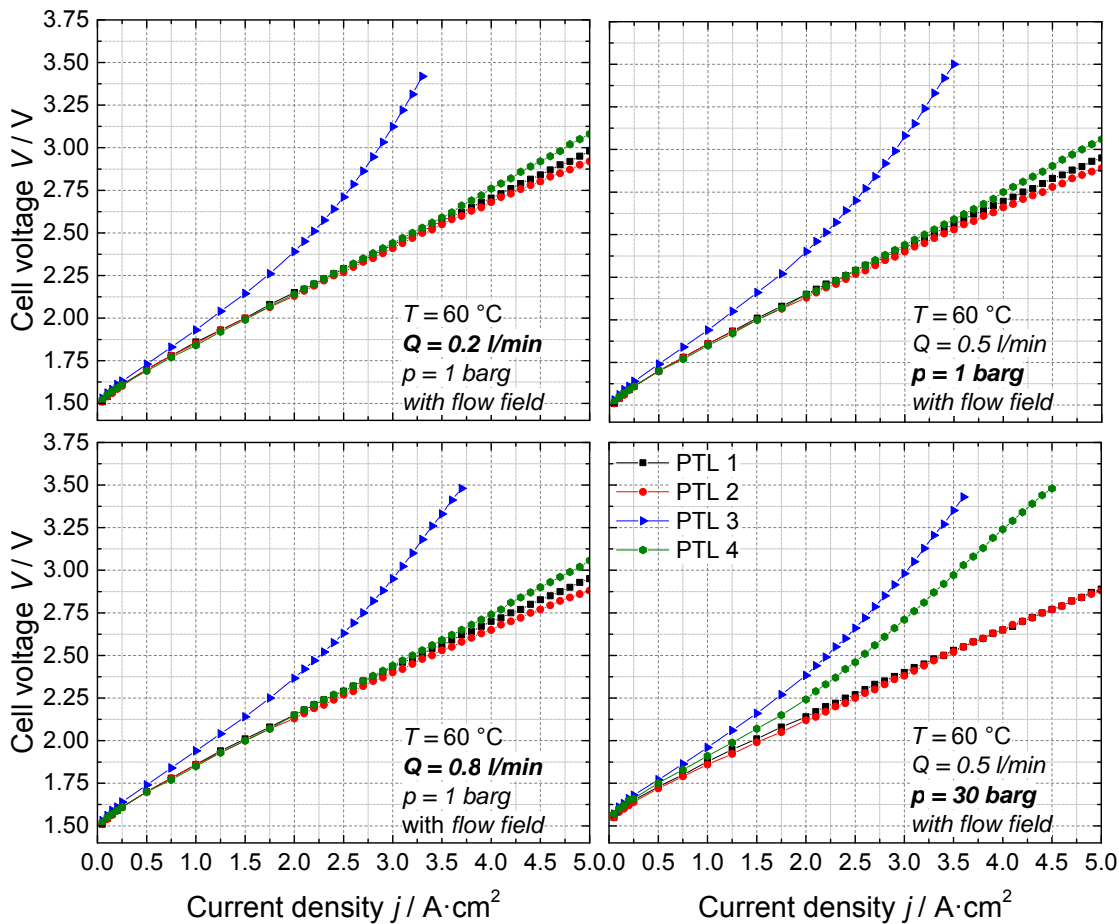


Abbildung 23: Polarisationskurven für verschiedene Volumenströme (links) und Druckbereiche (rechts) mit eingesetzten Strömungsfeldern.

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse vergleichbarer Messungen, diesmal jedoch ohne Strömungsfeld auf der Anodenseite, dargestellt. Prinzipiell zeigt sich hier insbesondere bei geringen Volumenströmen (links oben) bei allen Materialien bis auf die PTL 4 eine Massentransportlimitierung. Es ist jedoch im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen mit Strömungsfeld eine Verringerung dieser Limitierung durch die Erhöhung des Volumenstroms (links unten) zu sehen. Eine Erhöhung des Drucks von 1 (rechts oben) auf 30 bar (rechts unten) führt bei allen Materialien außer der PTL 4 zu einer Reduzierung der Massentransportlimitierung. Die Reduzierung der Massentransportlimitierung wurde erwartet.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

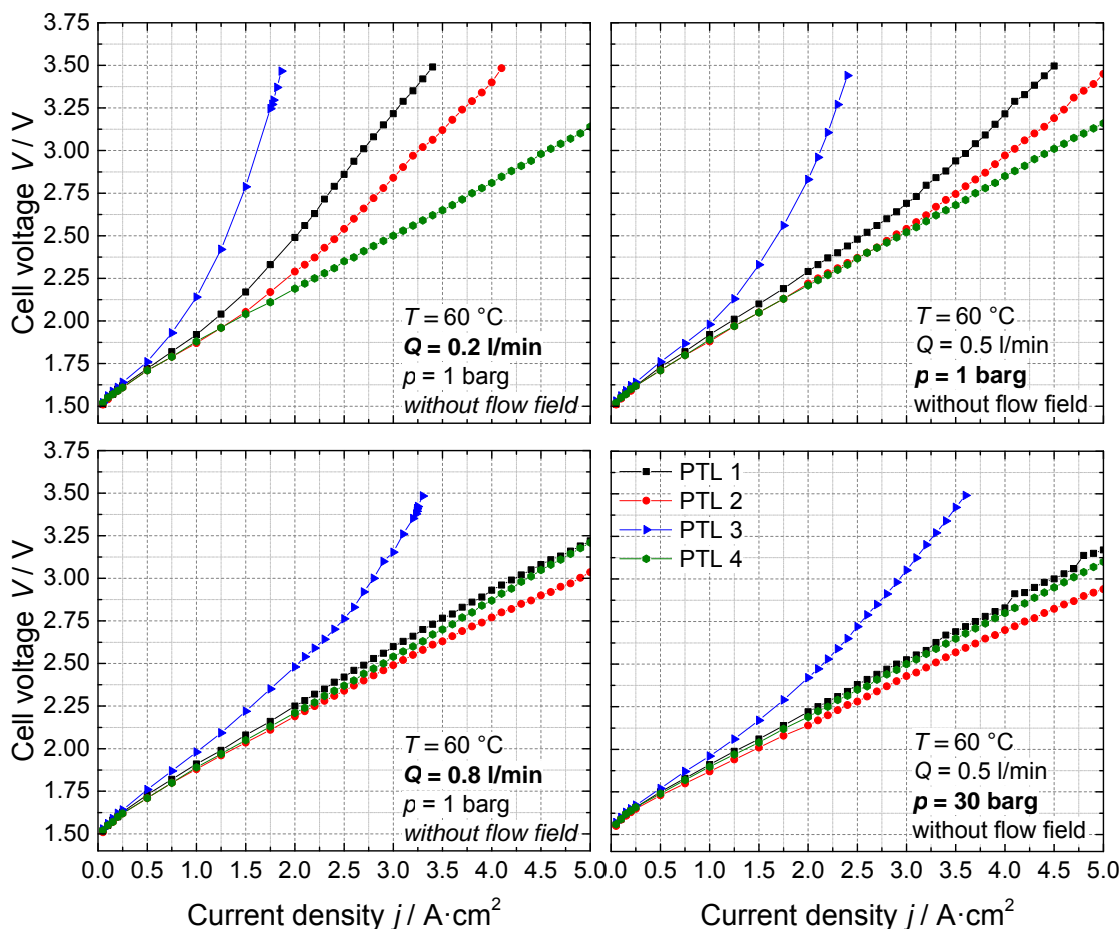


Abbildung 24: Polarisationskurven für verschiedene Volumenströme (links) und Druckbereiche (rechts) ohne eingesetzte Strömungsfelder.

Damit können folgende Schlüsse gezogen werden.

- Das Verhalten ist abhängig vom Einsatz eines Strömungsfeldes.
- Bei Verwendung eines Strömungsfeldes kann eine auftretende Massentransportlimitierung durch Erhöhung des Drucks verringert werden
- Bei Vermeidung eines Strömungsfeldes beeinflussen sowohl der Durchfluss als auch der Druck die Leistungsfähigkeit. Höhere Durchflüsse und Drücke reduzieren wie erwartet die Massentransportlimitierung.

Für die Analyse welche Materialparameter für das Verhalten entscheidend sind müssen weitere Ex-Situ Messungen wie beispielsweise Porometrie und Röntgentomographie durchgeführt werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

## Alternative Materialien zur Kostenreduktion

Edelstahl wurde als kostengünstiges Material für Bipolarplatten und Stromverteiler als Alternative zu Titan untersucht. Wenn auch das Polarisationsdiagramm von Edelstahl zunächst eine Passivierung zwischen 1.0 V und 1.4 V vs. SHE vermuten lässt, so zeigt eine genauere (und vor allem langwierigere) Betrachtung durch Chronoamperometrie, dass der Edelstahl bis 1V passiviert, bei 1.25 V eine Transpassivierung beginnt. Diese wird einer Oxidation mit folgender Auflösung der 3-wertigen Chromoxidschicht zugeschrieben.

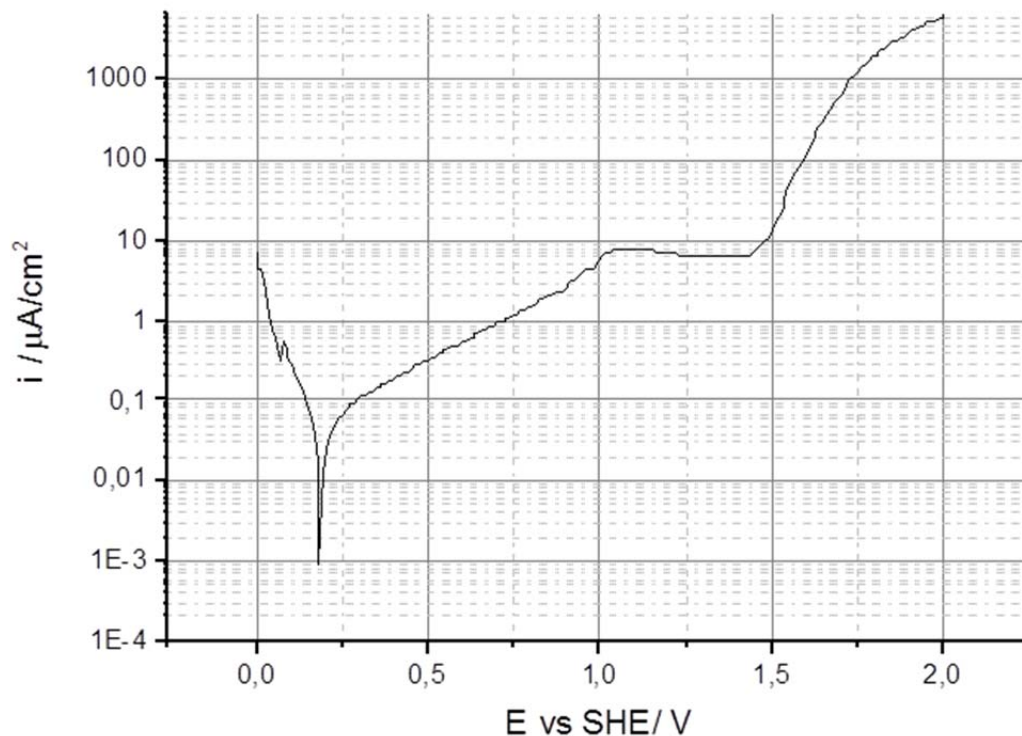


Abbildung 25: Polarisationsdiagramm von unbeschichtetem Edelstahl (316L bzw. 1.4404, Elektrolyt: pH=5, 5µM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1mV/s)

Für den Einsatz in einem Elektrolyseur ist dies verheerend. Eine Schutzschicht muss daher defektfrei sein. Findet sich ein Loch oder eine Pore in der Schicht, so beginnt hier bei Edelstahl die Korrosion, bei Titan passiviert dieser Bereich und wirkt sich nicht weiter negativ aus, nicht einmal durch einen merklichen Anstieg des Kontaktwiderstands (Abbildung 26).

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

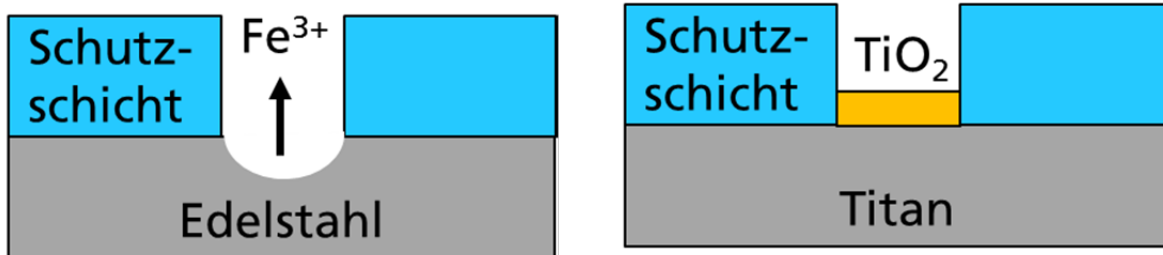
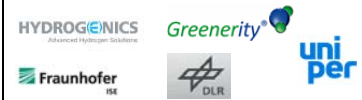


Abbildung 26: Prinzipielle Auswirkung von Defekten in einer Korrosionsschutzschicht auf Edelstahl und Titan

Entsprechend sind die Anforderungen an eine Schutzschicht auf Edelstahl viel höher als auf Titan. Es wurde ein potentieller Beschichtungsprozess herausgestellt, und das dabei favorisierte Material auf seine Eignung untersucht. Die bevorzugte Messmethode war dabei die Messung des Stroms bei konstanter Spannung (Chronoamperometrie) und die Messung des Kontaktwiderstands (interfacial contact resistance, ICR) vor und nach der Chronoamperometrie. Der Elektrolyt war Wasser, mit 0.5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> als Leitsalz, 5µM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH=5), die Referenzelektrode war eine Quecksilber-Sulfat-Elektrode, als Gegenelektrode wurde ein Platin-Blech verwendet. Die Messung fand bei Raumtemperatur statt. Es wurde eine Spannung von 2 V vs. SHE für 15 Stunden angelegt. Der Kontaktwiderstand wurde gegen ein Karbon-Vlies (Toray H120 TGP), wie es als GDL (Gas Diffusion Layer) in Brennstoffzellen eingesetzt wird, bei einem Strom von 1 A, einer Fläche von 1 cm<sup>2</sup> und einem Anpressdruck von 15 bar gemessen.

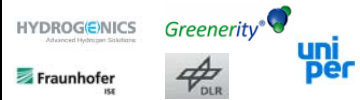
Zunächst wurden Titan, Tantal und Niob vermessen. Die Messapparaturen sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 gezeigt.

Alle drei untersuchten Metalle zeigen erwartungsgemäß eine Passivierung. Die doppelt-logarithmische Auftragung des Stroms gegen die Zeit zeigt in etwa einen Abfall des Stroms umgekehrt proportional zur Zeit (Abbildung, Abbildung 30, Abbildung 31). Dieses Verhalten ist typisch für das Passivieren sog. Ventilmetalle und wird sogar bei Edelstahl bei nicht zu hohen Spannungen gefunden. Der Kontaktwiderstand steigt entsprechend an, wobei Titan den höchsten Anstieg (auf 1600mOhm\*cm<sup>2</sup>) zeigt, Niob liegt an zweiter Stelle mit 760mOhm\*cm<sup>2</sup>, wohingegen Tantal einen vergleichsweise geringen Kontaktwiderstand zeigt (77mOhm\*cm<sup>2</sup>). Dies wäre für die Anwendung immer noch zu hoch. Man beachte jedoch, dass der Kontaktwiderstand stark von dem Referenzmaterial abhängt (hier: ein Karbon-Vlies von Toray). Verpresst man eine metallische Bipolarplatte gegen einen metallischen Stromverteiler (auch porous transport layer, PTL, genannt), dann fällt der Kontaktwiderstand durch ein Durchkratzen der Passivierungsschicht viel geringer aus („Corrosion Protective Coatings for Bipolar Plates and Current Collectors in PEM Electrolysers“, Andreas Georg, Thomas Lickert, Tom Smolinka, Xiaoling Zhang, Kevin Cooke, Second International Workshop on Durability and Degradation Issues in PEM Electrolysis Cells and its Components, February 16<sup>th</sup>, 2016).

Als Orientierung, was denn ein „guter“ Kontaktwiderstand ist, mögen die „DOE-targets“ des US-amerikanischen Department of Energy dienen, die für die Entwicklung von Korrosionsschutzschichten für Brennstoffzellen herausgegeben wurden und weitgehend als

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Zielgrößen anerkannt werden (s. fuel cell technical team roadmap, june 2013, U.S. DRIVE Partnership, [www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/fctt\\_roadmap\\_june2013.pdf](http://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/fctt_roadmap_june2013.pdf)).

Demnach sollte der Kontaktwiderstand unter  $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  liegen. Für Elektrolyseure gibt es keine solchen Vorgaben. Die Anforderungen an den Kontaktwiderstand sind in einem Elektrolyseur aber eher geringer. Wie beschrieben, hängt der Kontaktwiderstand stark vom Referenzmaterial ab, wobei das hier verwendete Karbon-Vlies für die Verhältnisse in einem Elektrolyseur einen zu hohen Wert wiedergeben sollte.

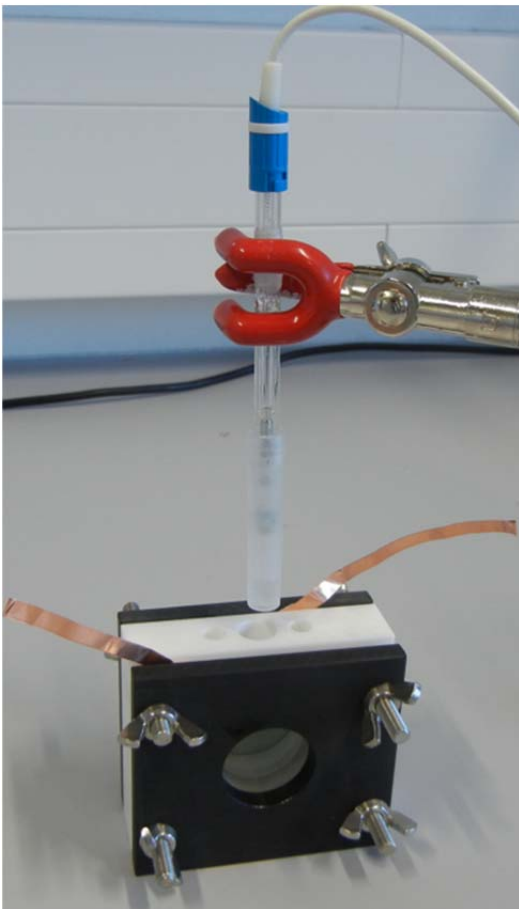


Abbildung 27: Messzellen für die elektrochemischen Messungen bei Raumtemperatur (links) und bei 80°C (rechts).

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

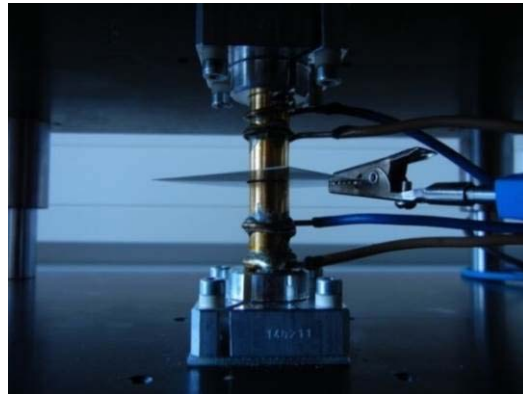


Abbildung 28: Messvorrichtung für die Bestimmung des Kontaktwiderstands (links: Gesamtansicht mit Gewicht und 4-Punkt-Spannungsmessgerät, rechts: Detail einer Bipolarplatte in Kontakt mit einem Karbonvlies zwischen zwei vergoldeten Zylindern).

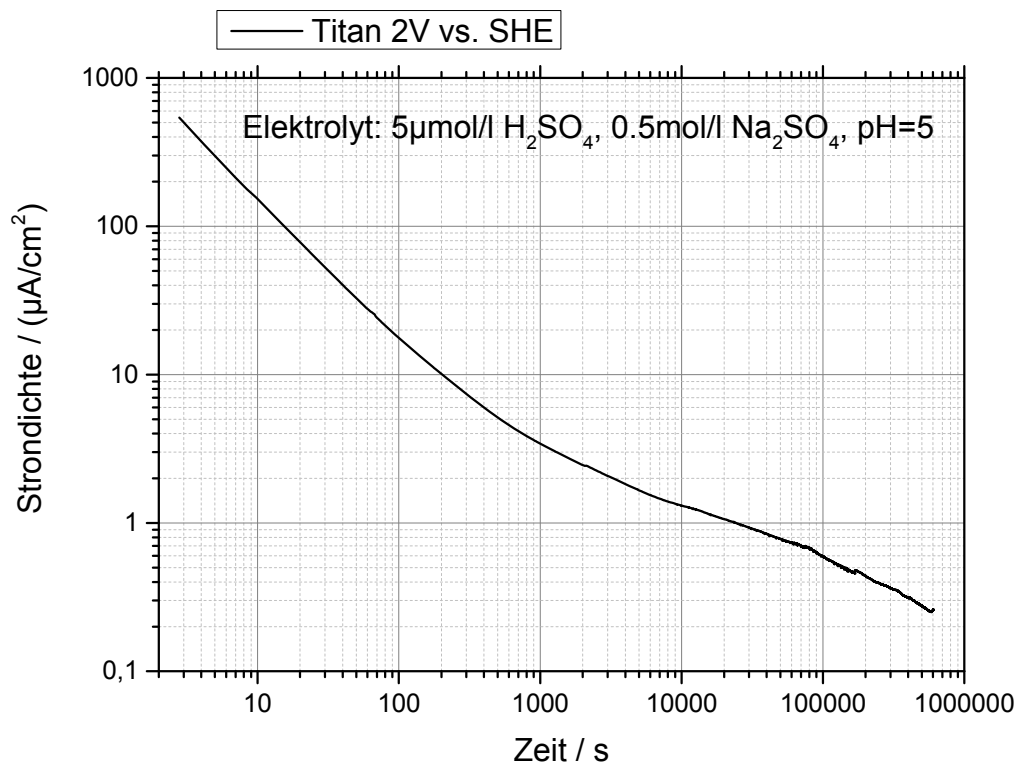


Abbildung 29: Chronoamperometrie an Titan. ICR vor Messung:  $41\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , nach Messung  $1600\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ .

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

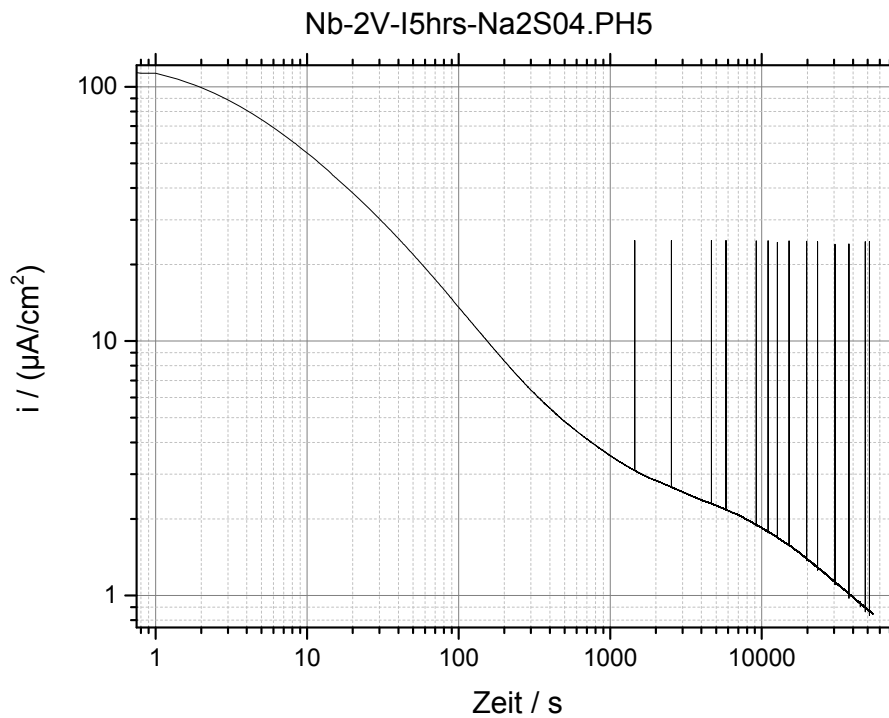


Abbildung 30: Chronoamperometrie an Niob. ICR vor Messung:  $51 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , nach Messung  $760 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ .

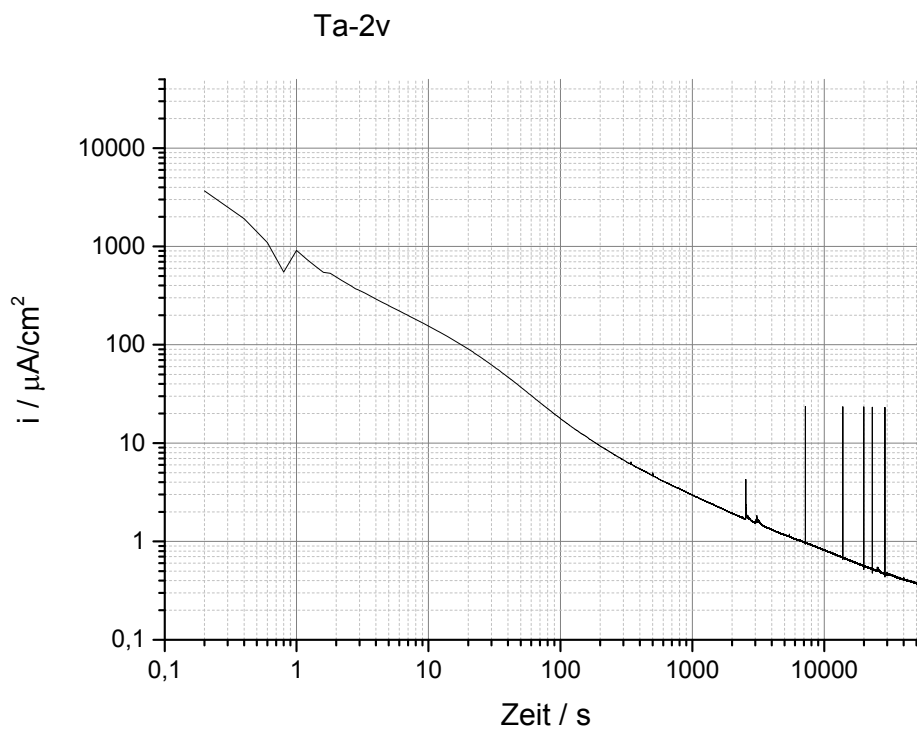
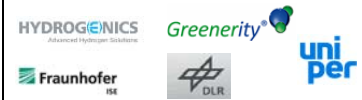


Abbildung 31: Chronoamperometrie an Tantal. ICR vor Messung:  $29 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , nach Messung  $77 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ .



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Schließlich wurde ein kostengünstiges Material gefunden, welches zwar wie Titan, Tantal und Niob eine Passivierung zeigt, wie aus dem Stromverlauf in der Chronocoulometrie ersichtlich ist, welches aber vor und nach dem Korrosionstest einen sehr geringen Kontaktwiderstand zeigt

### Beschichtungsstrategien für höhere Langlebigkeit

Die Anforderungen an die Beschichtung von Titan sind, wie geschildert, wesentlich geringer als die an die Beschichtung von Edelstahl, da hier Defekte sowohl durch Staubpartikel als auch durch Porositäten oder Risse in der Schicht toleriert werden können. So ist ein Sputterprozess, wie er z.B zur Beschichtung von Fensterglas oder auch Werkzeugen, wie Fräsern oder Bohrer, eingesetzt wird, gut geeignet.

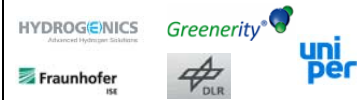
Für die Korrosionsschutzbeschichtung von Bipolarplatten für den Einsatz in Brennstoffzellen gibt es eine große Zahl an Fachartikeln. Sputtern ist hier ein bevorzugtes Beschichtungsverfahren. Bevorzugte Materialien sind Nitride und Karbide, insbesondere TiN, CrN und ZrN, Gold, Graphit, leitfähige Polymere (Polyanilin, Polypyrrol, und auch dotierte Oxide). Bei den im Vergleich zu einer Brennstoffzelle hohen Spannungen in einem Elektrolyseur oxidieren diese Materialien. Gold als dünne Schicht neigt zudem zu einer Agglomeration. Daher muss hier nach einer Alternative gesucht werden.



Abbildung 32: Vertikale Sputteranlage am Fraunhofer ISE

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Unterschiedliche Schichtsysteme wurden am Fraunhofer ISE durch einen Sputterprozess an einer vertikalen Sputteranlage hergestellt (Abbildung 32), die in der Lage Substratgrößen bis  $0.6\text{m} \times 1.1\text{m}$  zu beschichten, und ex-situ elektrochemisch auf eine Beständigkeit bei hohen Spannungen (2V vs. SHE) getestet. Dabei wurden Titan-Bleche (grade 1, geliefert von der Firma Borit, Belgien) als Substrate eingesetzt.

### Korrosionstests

Die Schichten wurden in den meisten Fällen in der in Abbildung 27, links gezeigten Messzelle bei Raumtemperatur einem Korrosionstest unterzogen. Vor und nach dem Korrosionstest wurde die Probe auf ihren Kontaktwiderstand wie zuvor beschrieben vermessen. Zum Teil wurden die Proben auch optisch in ihrem Reflexionsspektrum untersucht. Bei wachsenden Passivierungsschichten lassen Reflexionsmessungen Rückschlüsse auf die Schichtdicke zu. Der Korrosionstest an sich beginnt mit der Aufnahme eines Polarisationsdiagramms („linear sweep voltammetry“), mit konstanter Zuwachsrate in der Spannung (1mV/s), beginnend bei 0 V vs. SHE, endend bei 2 V vs. SHE. Der Elektrolyt war in der Regel Wasser mit 0.5M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  als Leitsalz und 0.5mM  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (mit  $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{SO}_4$  eingestellt auf  $\text{pH}=3$ ). Als Referenzelektrode wurde eine Quecksilbersulfatelektrode eingesetzt, als Gegenelektrode diente ein Platin-Blech. Diesem folgte eine chronoamperometrische Messung bei konstant 2 V vs. SHE für 24 Stunden.

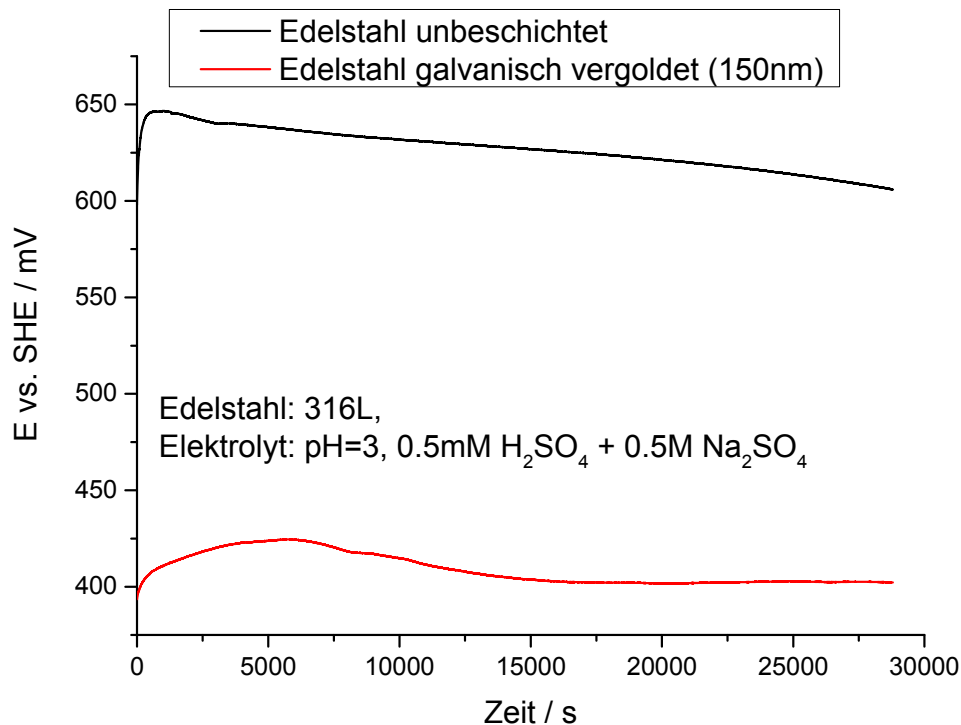


Abbildung 33: Messung der offenen Klemmspannung in Abhängigkeit der Zeit an einem Edeltahlblech mit und ohne einer galvanischen Goldschicht

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

In der Literatur zu Korrosionsschutzschichten auf Bipolarplatten für Brennstoffzellen werden auch offene Klemmspannungen gemessen und diskutiert. Dies stellt zunächst eine einfache Messmethode dar. Eine hohe Spannung ist tatsächlich ein Indikator für eine Korrosionsschutzwirkung, aber nicht eindeutig. Die offene Klemmspannung stellt sich ein aus einem Gleichgewicht aus einem kathodischen Strom, häufig der Bildung von Wasserstoff, und einem anodischen Strom, häufig der (zeitlich nicht konstanten) Passivierung des Schichtmaterials. Dies kann bei Schichten mit guter Korrosionsschutzwirkung zu einem hohen Spannungs-Wert führen, muss aber nicht. Abbildung 35 zeigt das Beispiel der Messung der offenen Klemmspannung eines Edelstahlblechs (316L) mit und ohne einer galvanischen Goldschicht. Man erwartet, dass die Goldschicht eine gute Korrosionsschutzwirkung darstellt und daher die Spannung erhöht. Man findet das Gegenteil. Daher wurde diese Messmethode hier nicht weiter eingesetzt.

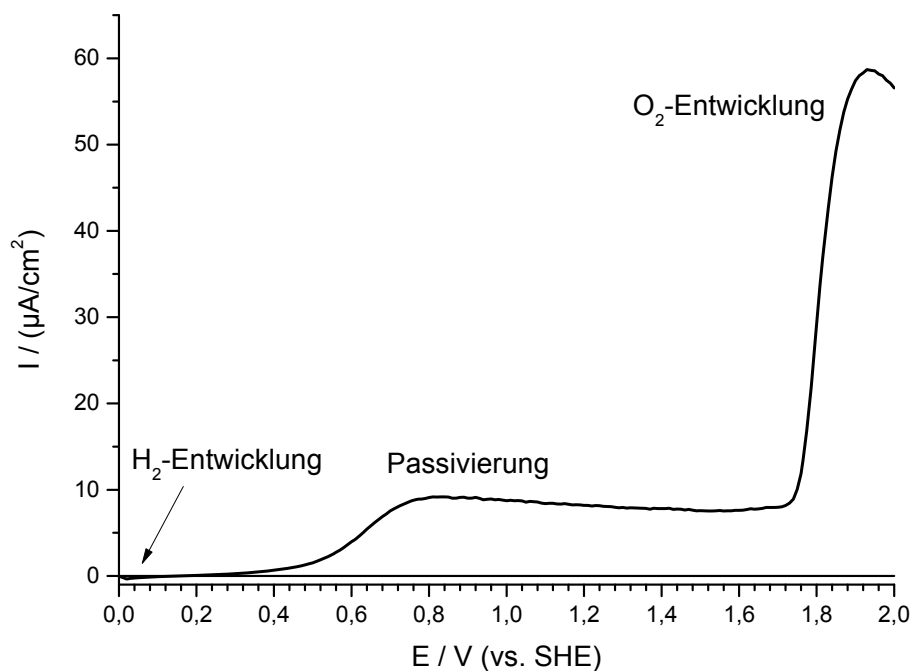
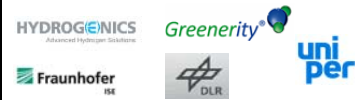


Abbildung 34: Polarisationsdiagramm an einem unbeschichteten Titan-Blech

Abbildung 34 zeigt ein Polarisationsdiagramm an einem Titan-Blech, gemessen bei 80°C (Aufbau Abbildung 27, rechts). Der Elektrolyt war 0.5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.5mM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, mit NaOH auf pH=3 eingestellt, Vorschubgeschwindigkeit 1.11 mV/s. Bei 0V findet man einen leicht kathodischen Strom durch H<sub>2</sub>-Bildung. Ab ca. 0.5 V findet eine Passivierung statt. Für eine konstante Zuwachsrate erwartet man nach dem sog. Hochfeldmodell für Ventilmetalle einen konstanten Passivierungsstrom. Dies findet man hier in etwa auch experimentell bis ca. 1.75 V, dann setzt die

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



O<sub>2</sub>-Entwicklung ein, die die Bildung der Oxidschicht beeinflusst. Aus den beobachteten Strömen kann man aber keinerlei Rückschlüsse über „Korrosionsströme“, d.h. eine Auflösung des Titans, schließen. Entsprechend ist auch eine Auswertung von Polarisationsdiagrammen durch Anpassen von Tafel-Geraden und der damit einhergehenden Bestimmung von „Korrosionsströmen“ hier nicht möglich.

### Vorbehandlung

Titan-Bleche, so wie auch Bleche aus Edelstahl, wie sie für Bipolarplatten in Brennstoffzellen eingesetzt werden, weisen bereits durch die der bei Lagerung an Luft gebildete Passivierungsschicht einen erhöhten Kontaktwiderstand auf. Daher ist es vor der Beschichtung von Edelstahl für den Einsatz in Brennstoffzellen üblich diese Passivierungsschicht (bei 316L eine dichte Chrom-reiche Oxidschicht gefolgt von einer Eisen-reichen weniger dichten Oxidschicht) zumindest zu reduzieren. Die dabei am meisten beschriebenen Verfahren sind mechanisches Schleifen und der Beschuss von Ionen in einem Plasma, in der Regel unmittelbar, d.h. ohne Vakuumbruch, vor einer Sputterbeschichtung.

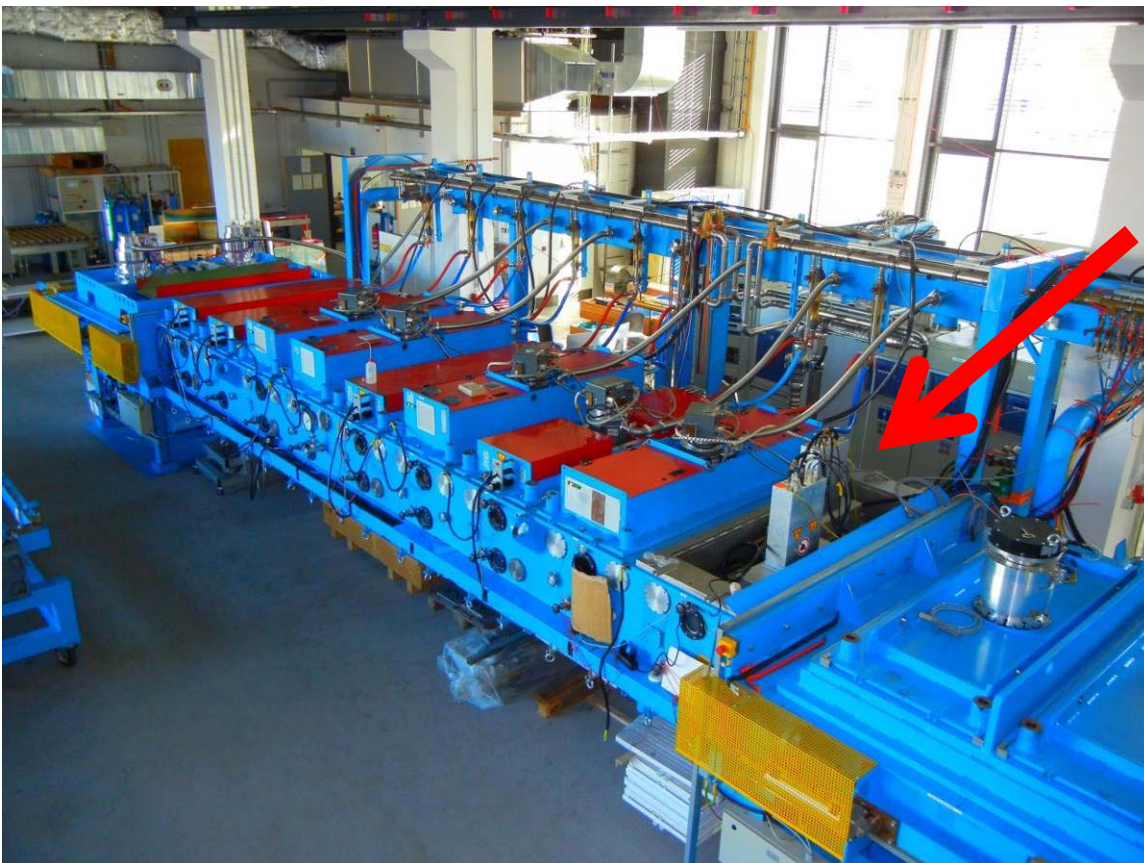


Abbildung 35: Horizontale Sputteranlage am Fraunhofer ISE. Der Pfeil weist auf die lineare Ionenquelle.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

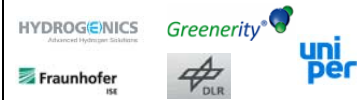


Abbildung 35 zeigt eine horizontale Sputteranlage am Fraunhofer ISE mit einer linearen Ionenquelle, mit der sich ein Ionenbeschuss in einem Inline-Prozess unmittelbar vor der Sputterbeschichtung an den Sputterquellen (rote Deckel in dem Foto) realisieren lassen kann. Versuche an dieser Ionenquelle ergaben jedoch keinen Rückgang des Kontaktwiderstands der Titan-Bleche, wenn man die Bleche nach Behandlung mit der Ionenquelle wieder der Luft aussetzt und dann misst. Dies kann prinzipiell bei anderen Prozessen mit Ionenbeschuss im Vakuum anders ausfallen, insbesondere bei einem Ionenbeschuss unter hohem bias-Strom.

Daher wurden für die ersten Beschichtungs-Versuchsreihen die Titan-Bleche mit einem Schleifpapier geschliffen und gereinigt. Dies reduziert den Kontaktwiderstand vor der Beschichtung.

Es stellte sich jedoch heraus, dass bei Beschichtung mit Edelmetallen, wie Gold, Silber und Kupfer, sich nach der Beschichtung ein geringer Kontaktwiderstand (immer gemessen an Luft) einstellt, der erheblich geringer ist als vor der Beschichtung. Bei Beschichtung mit einer Reihe von Ventilmetallen (passivieren an Luft) fällt der Kontaktwiderstand immerhin noch deutlich geringer aus als vor der Beschichtung. Ein Beispiel ist Titan. Beschichtet man die Titan-Bleche, die bereits mit einem Ventilmetall beschichtet wurden, mit einer Silber-Schicht (mit Vakuumbruch, d.h. die Ventilmetall-Schichten waren dazwischen an Luft), dann fällt der Kontaktwiderstand wieder sehr gering aus.

Ein Beispiel ist Titan: Der Kontaktwiderstand der Titan-Bleche betrug (nach nasschemischer Reinigung) etwa  $30 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , nach Beschichtung mit  $100 \text{ nm}$  Titan  $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , nach weiterer Beschichtung mit Silber  $1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ .

Daraus ergibt sich folgendes Bild: Bei beschichteten Bipolarplatten kann ein hoher Kontaktwiderstand sich ergeben durch einen hohen Widerstand der Schicht an sich („bulk-Widerstand“), oder durch einen hohen Widerstand an der Grenzfläche Substrat-Schicht oder an der Grenzfläche Schicht-Kontaktmedium (Kontaktmedium hier: graphitisches Karbon-Vlies). Bei den hier verwendeten Schichten ist der Bulk-Widerstand der Schicht immer vernachlässigbar. An der Grenzfläche Substrat-Schicht kann sich jedoch durch die von Anfang an vorhandene Passivierungsschicht auf dem Substrat eine Barriere für die elektrische Leitfähigkeit aufbauen. Entsprechend kann die Schicht durch Oxidation an Luft eine Passivierungsschicht aufbauen, die einen hohen Kontaktwiderstand erzeugt.

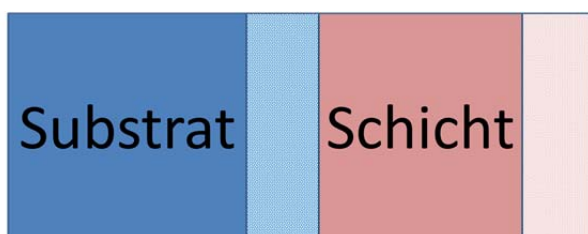
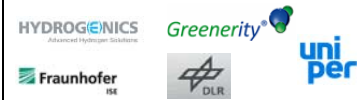


Abbildung 36: Schematische Darstellung einer Schicht auf einem Substrat mit Zwischenbereichen

Durch die dargestellten Experimente konnte gezeigt werden, dass die von Anfang an vorhandene Passivierungsschicht des Substrates durch die Beschichtung seinen negativen Einfluss auf den Kontaktwiderstand verliert. Man beachte, dass die Passivierungsschicht von Titan in

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



elektrochemischen Experimenten einen sehr hohen Widerstand zeigt. Die Stromwerte in Abbildung 29 z.B. entsprechen einem Widerstand von  $4\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  zu Beginn und  $10\text{ MOhm}\cdot\text{cm}^2$  zum Ende der Messung. Dies ist der bulk-Widerstand der Passivierungsschicht des Titans, wobei die elektrische Leitung durch Ionentransport getragen wird. Für Elektronen ist  $\text{TiO}_2$  unter diesen Bedingungen isolierend. Bei den Kontaktwiderstandsmessungen findet man wesentlich kleinere Werte. Dies wird durch ein Durchkratzen der Passivierungsschicht hervorgerufen.

Umso mehr fällt auf, dass der Widerstand zwischen Substrat und Schicht für alle hier betrachtete Schichten durch den Sputtervorgang stark herabgesetzt wird. Dies lässt sich durch eine Ionenimplantation bei dem Beschichtungsvorgang erklären.

Der dann noch gefundene Kontaktwiderstand (ohne zusätzliche Silberschicht) entsteht durch eine Passivierung der Sputterschicht an Luft.

Es konnte gezeigt werden, dass dieser Widerstand zwischen Substrat und Sputterschicht bei geeigneter Sputterschicht auch nach einem Korrosionstest sehr gering bleibt. Somit kann auf eine Vorbehandlung des Titan-Substrats, die die Passivierungsschicht reduzieren soll, verzichtet werden. Dies vereinfacht einen Produktionsprozess. Insbesondere für Titan sind chemische Beizprozesse heikel, da sie den Einsatz von Flusssäure erfordern. Dies mag verträglich sein mit Produktionsbedingungen, wie sie in einer galvanischen Beschichtung anzutreffen sind, kaum aber mit den Bedingungen im Umfeld einer Sputter-Beschichtung.

Auf eine nasschemische Reinigung kann dagegen nicht verzichtet werden.

### Favorisiertes Schichtmaterial

Unterschiedliche Schichten wurden auf Titan gesputtert und der Kontaktwiderstand vor und nach dem beschriebenen Korrosionstest gemessen. Tatsächlich wurde ein besonders geeignetes Material aufgefunden. Der Kontaktwiderstand des Titans war vor der Beschichtung  $28\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , unmittelbar nach der Beschichtung  $4\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  und nach dem Korrosionstest unverändert  $4\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ .

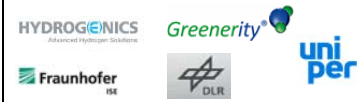
Anhand dieser Beschichtung wurde geprüft, ob ein mechanisches Schleifen des Titan-Blechs vor der Beschichtung die Schutzwirkung der Schicht verbessert. Dies wurde nicht gefunden. Vielmehr ergab sich die Tendenz, dass ein bloßes nasschemisches Reinigen bessere Ergebnisse liefert.

. Weitere Optimierungen an den Schichtsystemen ergaben einen Kontaktwiderstand vor und nach dem Korrosionstest von  $0,8\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , d.h. der Kontaktwiderstand änderte sich durch den Korrosionstest nicht.

Für dieses Schichtsystem wurde ein Patent angemeldet.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## AP 3 Systembetrachtung

Der Aufgaben-Bereich des Fraunhofer ISE zur Systembetrachtung enthielt die Erstellung von zwei Systemmodellen – einem Elektrolyse- und einem Power-to-Gas-Systemmodell, sowie die Erarbeitung einer zustandsorientierten Instandhaltung und eine Feldtestbegleitung / Validierung.

### AP 3.1: Elektrolyse-Systemmodell

Im Rahmen des Projektes wurde ein Elektrolyse-Systemmodell erstellt und in zwei Schritten validiert: Zuerst an einem dafür angepassten institutseigenen Teststand mit 2 kW Stackleistung und Peripherie geeignet für Versuche mit bis zu 20 kW Stacks und in einem zweiten Schritt an der Zielanlage.

Ziel war es mit dieser Methodik sowohl eine sehr beherrschbare und genau bekannte Versuchsumgebung für eine präzise Validierung zu nutzen, als auch eine Validierung an der kommerziellen Zielanlage durchzuführen, um Labor- und Skaleneffekte auszuschließen.

Dieses Modell bietet die Möglichkeit Elektrolyse-Systeme mit einer zeitlichen Auflösung weniger Sekunden zu betrachten und dadurch die Elektrolyse-Systementwicklung zu begleiten oder Alternative Systemaufbauten ohne Versuche zu testen.

### Beschreibung/Vorgehen des Systemmodells

Eine dabei beachtete Modellierungs-Grundlinie war es, für jeden einzelnen Apparat des modellierten Elektrolysesystems ein eigenes, abgeschlossenes Modell zu entwerfen und die einzelnen Modelle oder auch „Module“ anschließend zum Gesamtsystem zusammensetzen. Das dabei verfolgte Ziel ist, einzelne Modelle umstrukturieren zu können und auf Änderungen im Design reagieren können. Soll bspw. eine Elektrolyseanlage modelliert werden, welcher ein abweichendes Fließbild zu Grunde liegt, so kann durch eine angepasste Verschaltung vorhandener Module ohne großen Aufwand das neue System zusammengesetzt werden.

Innerhalb der einzelnen Module werden jeweils die (lokalen) Ausgangsgrößen berechnet. Dies sind typischerweise die den Apparat verlassenden Stoffströme, deren Austrittstemperaturen, Abwärmeströme von den Apparaten an die Umgebung und zum Betrieb benötigte elektrische Leistungen. Obgleich zunächst lediglich einzelne Apparate modelliert werden, muss dabei stets der Zweck des jeweiligen Apparats innerhalb der Elektrolyseanlage bedacht und dessen Schnittstellen bedient werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

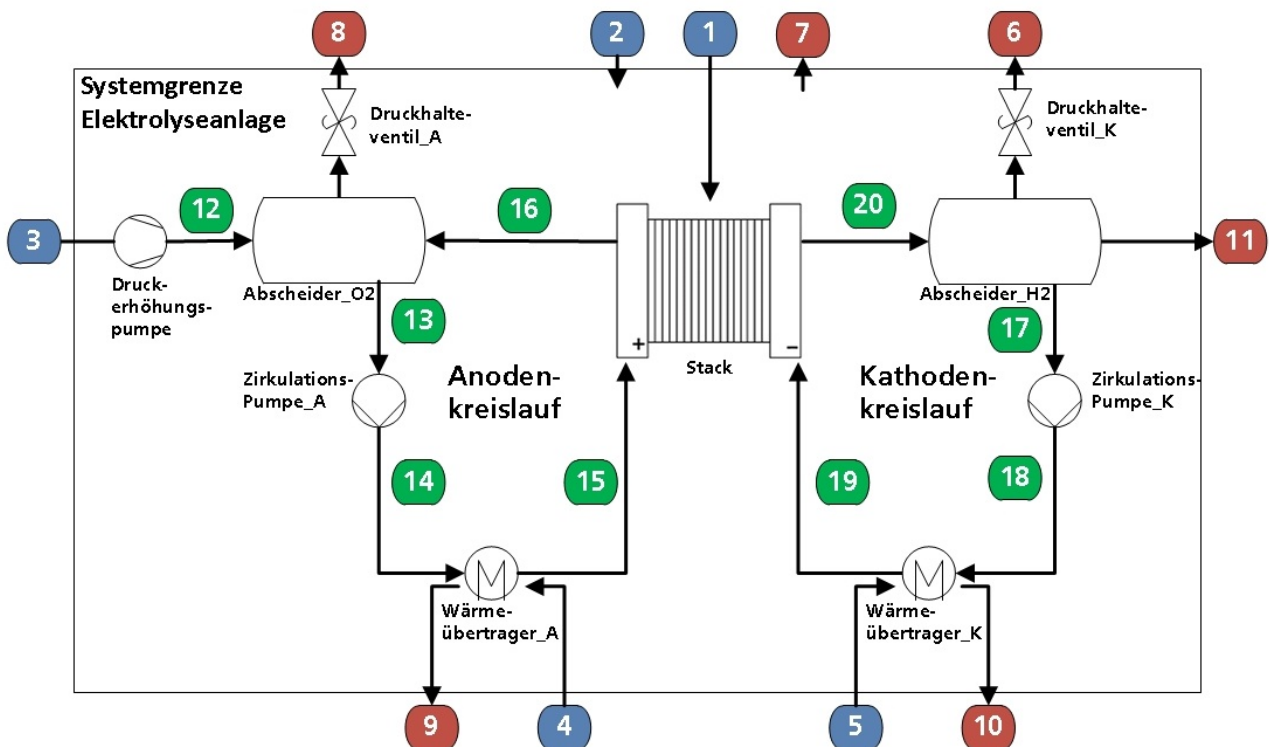


Abbildung 37: Modellierung Elektrolyse-System und Systemgrenzen, Jede dargestellte Komponente entspricht einem eigenen Modul

Das Modell der Elektrolyseanlage sollte möglichst schlicht sein, um der Stabilität der Simulation Rechnung tragen zu können. Zugleich soll es die reale Anlage so treffend wie möglich beschreiben. Entsprechend muss geprüft werden, welche realen Effekte für die Modellierung relevant und welche, wegen geringen Einflusses, gänzlich vernachlässigt oder oberflächlicher modelliert werden können.

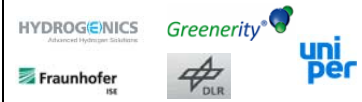
Hierfür wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Zwischen Gas- und Flüssigphase herrscht stets thermodynamisches Gleichgewicht in der Anlage. Die Austauschoberflächen zwischen den Phasen sind ausreichend groß und die Verweilzeiten insbesondere der Gasphase genügend lang.
- Die einzelnen Phasen sind ideal durchmischt, so dass homogene Stoffkonzentrationen vorliegen.
- Die Flüssigphase ist ideal-inkompressibel, d.h. ihre Dichte ist von Druck und Temperatur unabhängig.
- Die Gasphase wird unter den vorherrschenden Betriebsbedingungen (< 30 bar Druck) als ideal angesehen werden.



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



- Die Flüssigphase ist mit Wasserstoff und Sauerstoff gesättigt. Sorptionsströme, verursacht durch Temperatur- oder Druckschwankungen sind im Vergleich zu den erzeugten Gasströmen vernachlässigbar. Wegen geringer Lösungswärmen bei physikalischer Absorption spielt Sorption auch in den Energiebilanzen keine Rolle.
- Änderungen potentieller Energie der Stoffströme auf Grund von Änderungen der Lage innerhalb der Anlage werden vernachlässigt.
- Da die durch Druckverluste in den Rohrleitungen, Apparaten und Armaturen verursachte Erwärmung der Stoffströme im Vergleich zur Erwärmung durch Überspannungen im Stack sehr gering ist, wird sie vernachlässigt.
- Abwärmeströme über Rohrwände sind vernachlässigbar. Es überwiegen die Abwärmeströme über die Apparate.
- Als Bezugstemperaturen für die Werte der spezifischen Wärmekapazitäten sowie anderer Stoffwerte wurden über den beim jeweiligen Stoffstrom vorkommenden Temperaturbereich gemittelte Temperaturen gewählt. Auf die Hinterlegung einer Funktion zwischen den spezifischen Wärmekapazitäten und den vorliegenden Temperaturen wurde verzichtet, da der Einfluss gering ist.
- Als Bezugstemperatur  $T_o$  für Enthalpieströme wird  $0^\circ\text{C}$  gewählt.
- Im stationären Modell wird von konstantem Betriebsdruck ausgegangen.

Für die einzelnen Komponenten wurde dabei wo passend Kennfelder (Pumpe, Zellstapel) verwendet. Wo keine Kennfelder vorlagen oder passend sind, wurden die physikalischen Vorgänge vereinfacht modelliert.

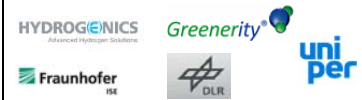
Der Umfang der Modellierung ist in Abbildung 37 dargestellt. Es wurde sich dabei auf das Kernsystem der Elektrolyse konzentriert. Anwendungsfallsspezifische Peripherie (Gasreinigung, Trocknung) wurde vernachlässigt. Da zum Anfang des Projektes noch nicht klar war, wie die genaue Struktur des Elektrolyseurs sein wird, wurde eine Zweikreis-Standard-Architektur gewählt und zur Validierung angepasst.

### Verifizierung

Dem Modell selbst liegen Stoffbilanzen zu Grunde. Durch die chemische Reaktion im Elektrolyseur ändert sich die Stoffmenge im System. Die Masse bleibt bei chemischen Reaktionen jedoch erhalten, so dass eine Massenbilanz um das Gesamtsystem aufgestellt werden kann bei der die Differenz zwischen Masseneingangsströmen und –ausgangsströmen stets null Gramm ergeben muss. Dies wurde als zusätzlicher Test ins Modell integriert. Weiterhin wurde eine thermische Energiebilanz um den Stack und seine beiden Wasserkreisläufe gelegt und diese nach dem gleichen Vorgehen auf Geschlossenheit überprüft. Zur genaueren Analyse wurde die

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Geschlossenheit von thermischen Energiebilanzen auch innerhalb der wichtigen Module wie Abscheider, Wärmeübertrager und Stack geprüft. Die Bilanzen wurden unter Berücksichtigung von Diskretisierungsfehlern als geschlossen betrachtet, sobald sich die errechneten Differenzen im Bereich  $10^{-9}$  W bzw.  $10^{-16}$  kg befinden.

Mit Hilfe dieser Methode konnten einige Implementierungsfehler gefunden werden. Wegen des modularen Aufbaus des Gesamtsystems muss auf eine korrekte Übergabe von Austauschgrößen an den Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen geachtet werden. Werden Stoffströme übergeben, so müssen diesen, innerhalb benachbarter Module, dieselben Stoffwerte, wie bspw. spezifische Wärmekapazitäten, zugeordnet werden. Werden ein und demselben Stoffstrom dagegen spezifische Wärmekapazitäten, die sich auf unterschiedliche Temperaturen beziehen, zugeordnet, so ist die Energiebilanz um das Gesamtsystem nicht geschlossen. Als Konsequenz wurde jedem Stoffstrom im System jeweils eine global definierte spezifische Wärmekapazität zugeordnet und die jeweils mittlere Temperatur als Bezugstemperatur gewählt.

### Validierung im Labor (2 kW bzw. 10 kW)

Für die angestrebte Validierung der Systemsimulation wurde eine Experimentalanlage im Labormaßstab mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, um möglichst viele Informationen über das System erhalten zu können. Für das Simulationsmodell bedeutete dies eine entsprechende Anpassung und Neuparametrierung auf das betrachtete Experimentalsystem, mithilfe entsprechender Herstellerdaten für die einzelnen Komponenten.

Für die Validierung wurden Experimente (vgl. Tabelle 6) durchgeführt, mit denen wichtige Aspekte im Verhalten der Experimentalanlage und des Simulationsmodells möglichst gut untersucht und miteinander verglichen werden konnten. Allerdings konnten nicht alle zu validierenden Aspekte auch mithilfe der verfügbaren Messtechnik untersucht werden. Einige Aspekte waren aufgrund der Überdimensionierung des Teststands im Vergleich zum Stack zu gering ausgeprägt (bspw. die Wärmeübertrager), andere Aspekte wie bspw. die Gasreinheit konnten nicht isoliert sondern nur systemweit betrachtet werden, was die Validierung der Dynamik erschwerte oder verhinderte.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Tabelle 6: Zusammenfassung der durchgeführten Experimente mit Zuordnung zur jeweiligen Komponente und kurzer Erläuterung zum zu validierenden Aspekt

Validierungsexperiment	Betroffene Komponente	Zu validierender Aspekt
<b>Temperatursprung</b>	Wärmeübertrager	Wärmekapazität (Speicherterm der Energiebilanz) / dynamisches Verhalten
	Elektrolysestack Abscheider	
<b>Konstante Temperatur</b>	Wärmeübertrager	Wärmeübertragung ( $k \cdot A$ ) Zwischen Kühlwasser- und Kreislaufwasserseite
	Elektrolysestack	Wärmeübertragung ( $k \cdot A$ ) Zwischen Außenwand und Umgebung
	Abscheider	
<b>Druckaufbau</b>	Elektrolysestack (indirekt) Abscheider Anode Abscheider Kathode (nicht durchführbar)	Produzierte Gasmenge und Volumina im Abscheider
<b>Gasqualität</b>	Elektrolysestack, Abscheider	Reinheit der produzierten Gase
<b>Druckverlust</b>	Zirkulationspumpe	Druckverlust in allen Anlagenteilen und Rohrleitungen
<b>Temperatur bei ansteigender Stackleistung</b>	Elektrolysestack	Temperaturverteilung im Elektrolysestack (zwischen Anode und Kathode), freiwerdende Reaktionswärme
<b>Dragstrom</b>	Elektrolysestack	Wasserstrom durch die Zellmembran beim Protonentransport zur Kathode
<b>Leistungsaufnahme der Zirkulations- und Speisewasserpumpe</b>	Zirkulationspumpe, Speisewasserpumpe (nicht durchführbar)	Leistungsaufnahme der Pumpe, Wellenwirkungsgrad

Zum Vergleich zwischen Simulation und Experiment wurden die Messwerten aus dem jeweils durchgeführten Experiment der Simulation als Eingangsgrößen für jede Komponente im Elektrolysesystem vorgegeben und die Ausgangsgrößen von Simulation und Experiment verglichen. Aus den damit gewonnen Erkenntnissen ergaben sich notwendige Anpassungen am Modell oder am Ablauf des Experiments im realen System, die dann umgesetzt wurden. So wurde bspw. das Stackmodell gründlich überarbeitet.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

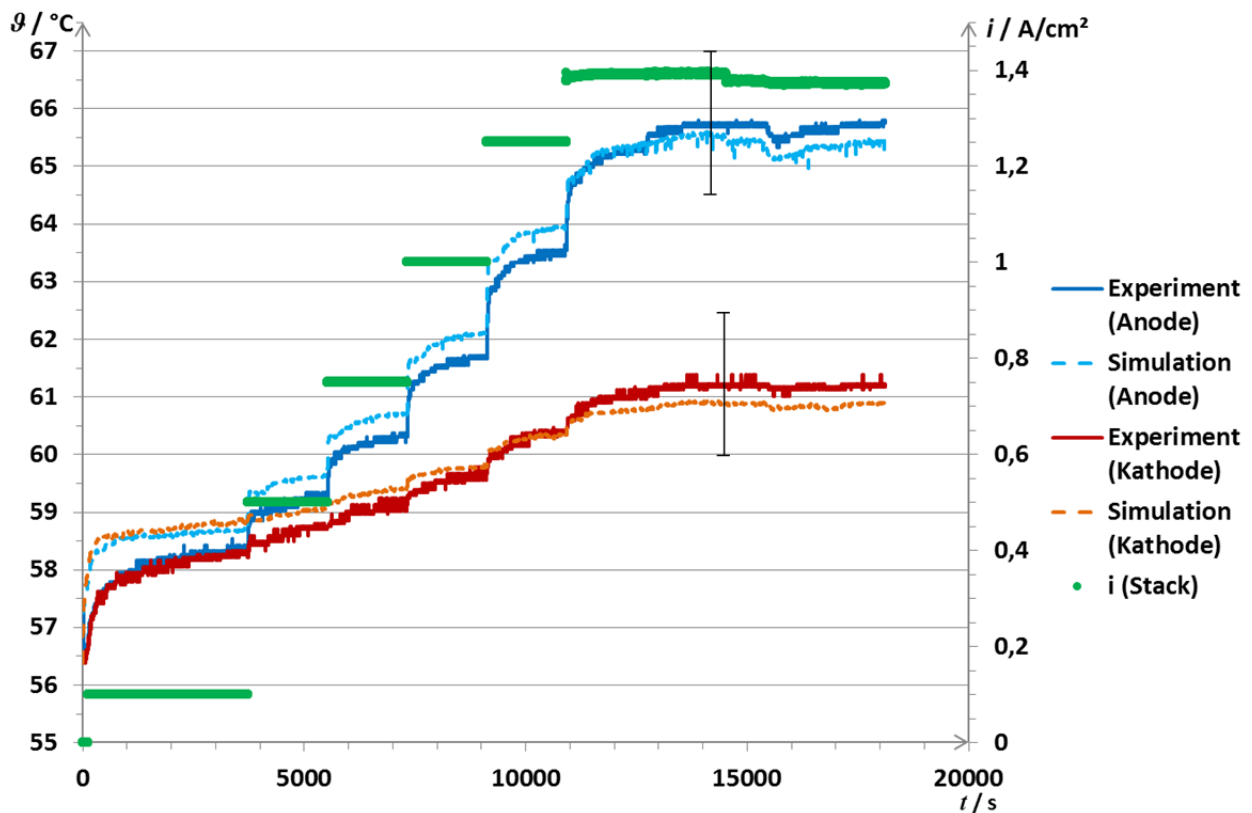


Abbildung 38: Ergebnis der Validierung des Stacks (thermisch) inklusive Messunsicherheit in Form von exemplarischen Fehlerbalken

Durch die abschließende Zusammenfassung der einzelnen Komponentenmodelle zu einem Gesamtmodell war dann zusätzlich ein teilweiser Vergleich der beiden Gesamtsysteme möglich. Das Ergebnis der Validierung zeigt eine teilweise Validierung. Einen Überblick über die durchgeführte Validierung sowie den Erfolg zeigt Tabelle 7. Die kritische Komponente Stack wurde erfolgreich validiert, genauso wie wesentliche Aspekte im Abscheider. Im Abscheider existiert weiterhin eine zeitliche Verzögerung zwischen Ein- und Ausgangstemperatur, die nur über eine orts aufgelöste Modellierung nachgebildet werden kann. Bevor dies umgesetzt wird, wird abgewartet, ob dies auch in der Realanlage der Fall ist, da dies ein Effekt der überdimensionierten Peripherie sein kann. Zirkulationspumpe und Wärmeübertrager konnten nicht validiert werden, da der Aufbau dafür nicht ausreichend war bzw. die Effekte in diesem konkreten Fall zu klein im Vergleich zum Messfehler waren – eine Limitierung des Teststandes.

Für diese offenen Punkte wird die Validierung an der Demonstrationsanlage fortgeführt mit dem Zielen einerseits einer Vergleichsvalidierung an Zielgröße, als auch zur Validierung der offenen Aspekte und Komponenten.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

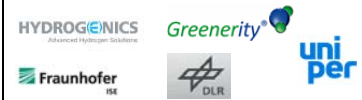


Tabelle 7: Überblick über erfolgte Validierung Elektroyse-Systemmodell am Teststand

Komponente	Zu validierender Aspekt	Validierung erfolgreich
<b>Elektrolyse-stack</b>	Wärmekapazität	Ja
	Wärmeübergang → Umgebung	
	Temperaturverteilung unter Last	
	Dragstrom	
	Membrandiffusion	Nein
<b>Abscheider</b>	Wärmekapazität	Nein
	Wärmeübergang → Umgebung	Ja
	Produzierte Gasmenge und Volumina im Abscheider (Druckaufbau)	Ja (70% Füllstand) Nein (30% Füllstand)
<b>Zirkulationspumpe</b>	Druckverlust	Nein
	Leistungsaufnahme der Pumpe	Nein (nicht durchführbar)
<b>Wärmeübertrager</b>	Wärmekapazität	Nein
	Wärmeübertragung Kühl- ↔ Kreislaufwasser	Nein

## Validierung an der Demonstrationsanlage (1 MW bis 1,5 MW)

Für die Validierung an der Demonstrationsanlage wurden Messwerte der Demoanlage ausgewertet (siehe „AP 3.4: Feldtestbegleitung/Validierung“ im aktuellen Kapitel).

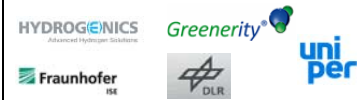
Analog zur Validierung am Teststand wurde das Systemmodell an die Realanlage angepasst und parametrisiert. Hierfür wurden Datenblätter, Literatur und Auslegungsrechnungen einzelner Komponenten verwendet. Erwartungsgemäß stand nicht dieselbe Informationsvielfalt und Genauigkeit zur Verfügung, da einige Parameter aufgrund Vertraulichkeit nicht verfügbar waren, einige schlicht nicht bekannt waren (bspw. Rohrlängen) oder auch Herstellerinformationen nicht die notwendige Detailtiefe hatten. Dies entspricht aber der normalen Unsicherheit des Modells und dem typischen Anwendungsfall bzw. der typischen Herangehensweise welche mitvalidiert werden sollte.

Für die Feldmessungen wurden diverse Versuche entworfen, um sowohl das Einzelverhalten der Komponenten, als auch das Verhalten der Gesamtanlage zu validieren. Aufgrund Limitationen in der Variierbarkeit der Parameter konnten nicht alle Experimente durchgeführt werden. Variiert werden konnten primär Stromstärke/Leistung und in sehr kleinem Umfang die Temperatur, da sonst die Betriebsstabilität nicht gewährleistet werden konnte.

Analog zur Teststandsvalidierung wurden die Eingangswerte der Modelle aus den Messdaten verwendet und die Ausgangswerte des Modells mit den Messdaten verglichen. Durch die wesentlich geringere Kenntnis der Elektrolyse-Anlage im Vergleich zum Teststand waren einige deutliche Abweichungen sichtbar, die nicht sofort einer Ursache zugeordnet werden konnten. Durch Sensitivitätsanalysen am Modell wurde in diesen Fällen untersucht, ob die Abweichung in falscher Parametrierung, bspw. durch falsche Annahmen oder Fehler in den Herstellerangaben

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



verursacht wurden und daraus ein Fazit gezogen. Tabelle 8 zeigt einen Überblick über das Fazit der Validierung, Einzelaspekte werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 8: Validität des Modells nach Validierung an Feldtestanlage

Komponente	Zu validierender Aspekt	Anpassung erfolgt	Validierung erfolgreich
Elektrolyse-stack	Wärmekapazität	Ja	Ja
	Wärmeübergang → Umgebung	Nein	
	Temperaturverteilung unter Last	Nein	
	Dragstrom	n/a	Aufgrund fehlender Daten nicht möglich
	Membrandiffusion	n/a	Aufgrund abweichendem MEA-Design nicht möglich
<b>Abscheider</b>	Wärmekapazität	Ja	Ja
	Wärmeübergang → Umgebung	Ja	Ja
Zirkulationspumpe	Druckverlust	Ja	Nur qualitativ, wegen Zwei-Phasenströmung
	Leistungsaufnahme der Pumpe	Ja	Nur qualitativ aufgrund fehlender Daten
<b>Wärmeübertrager</b>	Wärmekapazität	Ja	Nicht validiert. Getroffene Annahmen
	Wärmeübertragung Kühl- ↔ Kreislaufwasser	Ja	Kühlkreislaufregelung Demoanlage falsch.

Die Validierung des Zellstapels zeigte, dass bereits eine sehr gute Basis aus der ersten Validierung vorhanden war. Lediglich die Wärmekapazität des Zellstapels musste um die Flüssigkeit im Stack erweitert werden. Der Einfluss des Wassers war in der Teststandsvalidierung aufgrund der Verwendung eines 5-Zellers gegenüber anderen Effekten vernachlässigbar gewesen. Die thermische Validierung war nach Anpassung erfolgreich.

Eine Validierung der Diffusionsraten durch die MEA war nicht möglich, da die in der Demonstrationsanlage verwendete MEA Gasverunreinigungen durch Ihren Aufbau deutlich reduziert, was im Modell nicht nachgebildet wird, da hier basierend auf vorläufigen Spezifikationen am Projektanfang eine andere MEA angenommen wurde.

Eine Validierung des Wassertransports durch die Membran war nicht möglich. Dies ist generell nur indirekt über das Innenvolumen des Gas-Wasser-Separators und Messwerte des Levelsensors möglich. Weder Volumen noch Level-Sensor-Messdaten waren verfügbar.

Für den Abscheider wurde ein Delay-Block zur Kompensation von Verzögerungen integriert, welcher die Verzögerungen aufgrund Rohrstrecken zwischen den Komponenten kompensiert. Zudem wurde die Wärmekapazität angepasst und der komplette Abscheider unabhängig vom Füllstand integriert. Auch hier herrschten beim Teststand aufgrund der sehr unterschiedlichen Skalierung andere Bedingungen. Mit diesen Anpassungen ist der Abscheider valide.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

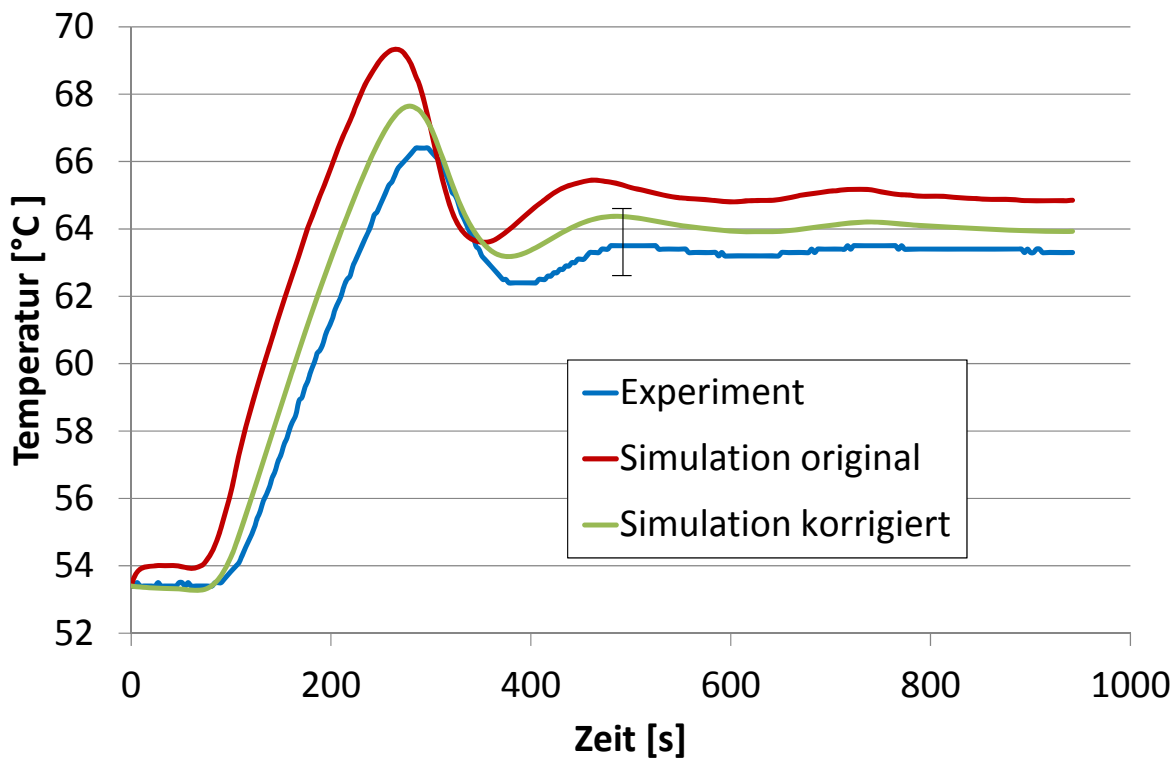


Abbildung 39: Auswirkung der Modellkorrekturen auf die Validität der Simulation. Der Fehlerbalken zeigt exemplarisch die maximale Abweichung für eine Validität.

Für den Wärmeübertrager wurden während der Validierung falsche Annahmen bezüglich der Kühlkreislaufregelung getroffen. Der Kühlwasserdurchfluss wird durch die Anlage nicht erfasst, daher war diese Fehlannahme während der Validierung nicht offensichtlich. Die Validierung war wegen der dadurch resultierenden falschen Kühlwasserdurchflüsse nicht erfolgreich. Die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalysen lassen aber unter Berücksichtigung der nun bekannten Regelkreise eine Validität mit entsprechender Nacharbeit erreichbar erscheinen. Dies muss projektnachgelagert noch adressiert werden.

Für die Pumpen wurde die in diesem Modul integrierte Druckverlustberechnung überarbeitet. Aufgrund Zweiphasen-Strömung ist aber trotzdem keine quantitative Validierung möglich. Eine qualitative Validität wurde erreicht (vgl. Abbildung 40).

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

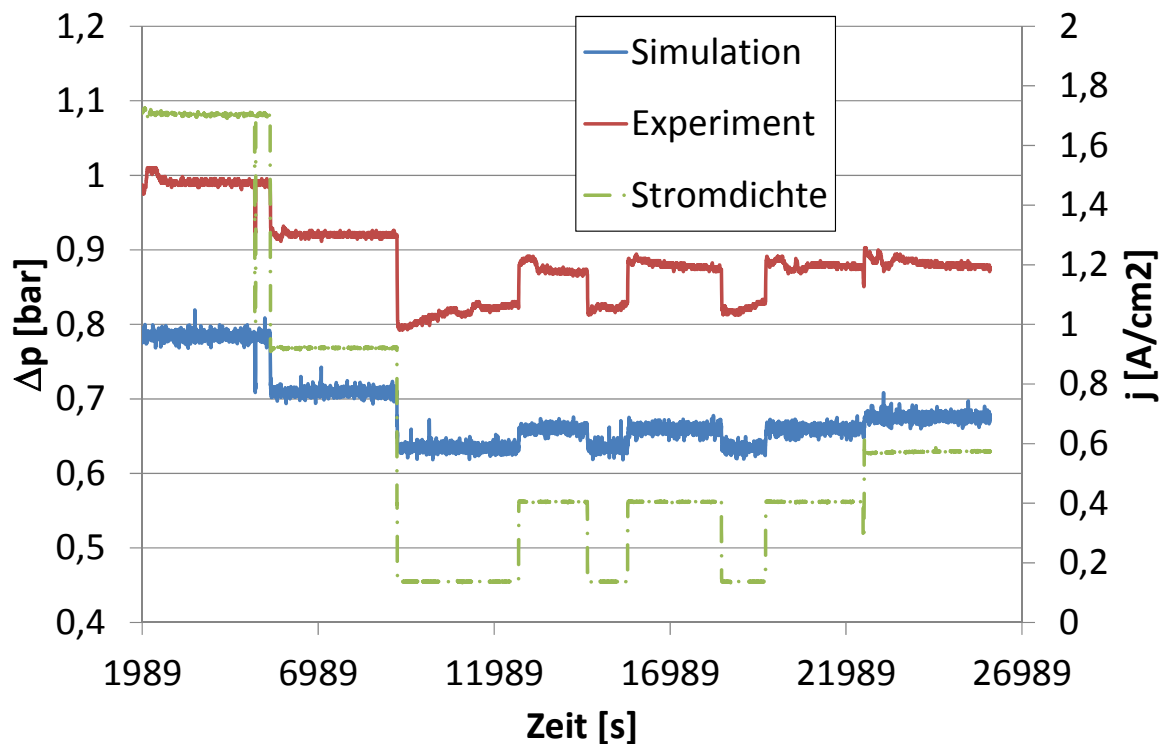


Abbildung 40: Validität Druckverlustberechnung Zellstapel

Die Leistungsberechnung der Peripherie (dominiert durch Kreislauf- und Frischwasserpumpe) wurde angepasst und an der Anlage validiert. Die Messwerte des Level-Sensors am Abscheider waren nicht freigegeben, daher existierte eine große Unsicherheit bezüglich des Zufluss an Frischwasser und damit der Frischwasserpumpe. Auch hier war nur eine qualitative Validierung möglich. Neben der Unsicherheit bezüglich Frischwasserpumpe war auch ein Offset bei Stillstand der Frischwasserpumpe sichtbar – die Anlage hatte einen höheren Grund-Verbrauch als angenommen. Vermutlich aufgrund zu niedriger angenommener Leistungen der Basisperipherie. Genauere Daten stehen an Demoanlage nicht zur Verfügung, weshalb an der Stelle nur eine qualitative Validität möglich war.

Zusätzlich zu den Einzelvalidierungen wurde auch eine Validierung des Gesamtmodells durchgeführt. Die Herausforderung hierbei war die Implementierung von Regelkreisen, die dem Fraunhofer ISE nicht im Detail bekannt waren – die tatsächlichen Effekte in der Anlage jedoch maßgeblich beeinflussen. Dies führte dazu, dass bspw. für das Gesamtsystem thermisch zwar eine quantitative Validierung erfolgt war, d.h. die Abweichungen sind innerhalb der Toleranz von 1,2°C, die Form der Kurven zeigt jedoch, dass die Regelung nicht vollständig nachgebildet wurde. Für den Anwendungsfall des Modells ist dies jedoch ausreichend. Aspekte, die aus Komponentenebene bereits nicht validierbar waren (bspw. Gasreinheit) waren im Gesamtmodell natürlich ebenso nicht validierbar.



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

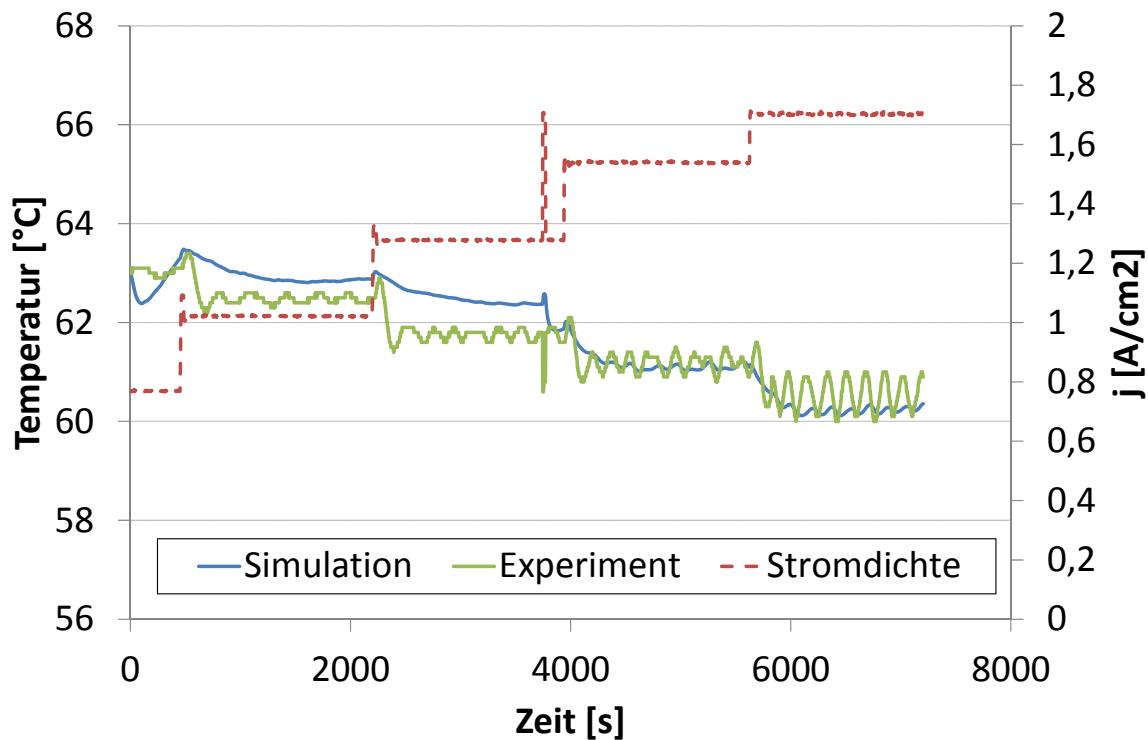


Abbildung 41: Validierung thermische Gesamtmodellierung

Als Fazit kann gesagt werden, dass das Werkzeug Elektrolyse-Systemmodell damit die für diesen Zweck mit sinnvollem Aufwand erreichbare Qualität erreicht hat. In Hinblick auf den Anwendungsfall (Vorhersagen über Elektrolyse-Systeme, die nur theoretisch bekannt sind) ist eine weitere Verfeinerung des Modells (mit Ausnahme des Wärmeübertragers) nicht zielführend oder angemessen.

Die zweistufige Validierung hat eine Verfeinerung des Modells erlaubt sowie ein Maß für die Genauigkeit des Modells gegeben. Damit hat sie ihren Zweck erfüllt – das Modell ist innerhalb der genannten Genauigkeitsgrenzen mit Ausnahme der Membrandiffusion des Stacks und des Wärmeübertragers, welche in den bisherigen Versuchsaufbauten nicht validiert werden konnten, größtenteils valide.

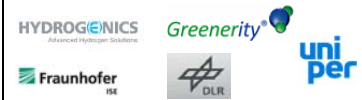
Für die Betrachtung einer konkreten Anlage zu der Messdaten bereits bei der Modellierung zur Verfügung stehen kann bspw. durch Regression auch eine volle Validität erreicht werden. Dieser Fokus auf genau eine Anlage ist jedoch nicht Ziel des Modells.

Seine Grenzen erreicht das Modell in der Nachbildung der Dynamik eines realen Gesamtsystems als Verbund aus Einzelkomponenten und Regelstrecken. Eine Modellierung dieser Regelstrecken ist prinzipiell möglich und ggf. ein hilfreiches Werkzeug, um gegenseitige Reglerbeeinflussungen zu analysieren und zu minimieren. Dies ist jedoch wesentlich sinnvoller mit einem auf die Regelstrecken und Dämpfungsgrößen abstrahierten und stark vereinfachten Modell umsetzbar.

Dies war und ist nicht Ziel des entwickelten Elektrolyse-Systemmodells, welches eine verfahrenstechnische Betrachtung zum Ziel hat.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## AP 3.2: Power-to-Gas-Systemmodell

Gemäß Antrag hätte das Power-to-Gas-Modell eine Erweiterung des Elektrolyse-Systemmodells sein sollen. Im Verlauf der Arbeiten hat sich dieses Vorgehen jedoch als nicht sinnvoll erwiesen. Da das Elektrolyse-Systemmodell im Vergleich zum Power-to-Gas-Modell eine andere Zielsetzung hat (Das Ziel des Power-to-Gas-Modells ist eine Betrachtung auf Jahresscheibe, das Ziel des Elektrolyse-Modells ist eine Betrachtung von Vorgängen auf 10-Sekunden-Basis), hätte diese Koppelung unnötige Komplexität in das Power-to-Gas-Modell eingeführt.

Daher wurde für das Power-to-Gas-Modell stattdessen ein Elektrolyse-Ersatzmodell mit stark vereinfachtem Umfang und zeitlicher Auflösung aus dem Elektrolyse-Systemmodell abgeleitet und an demselben verifiziert.

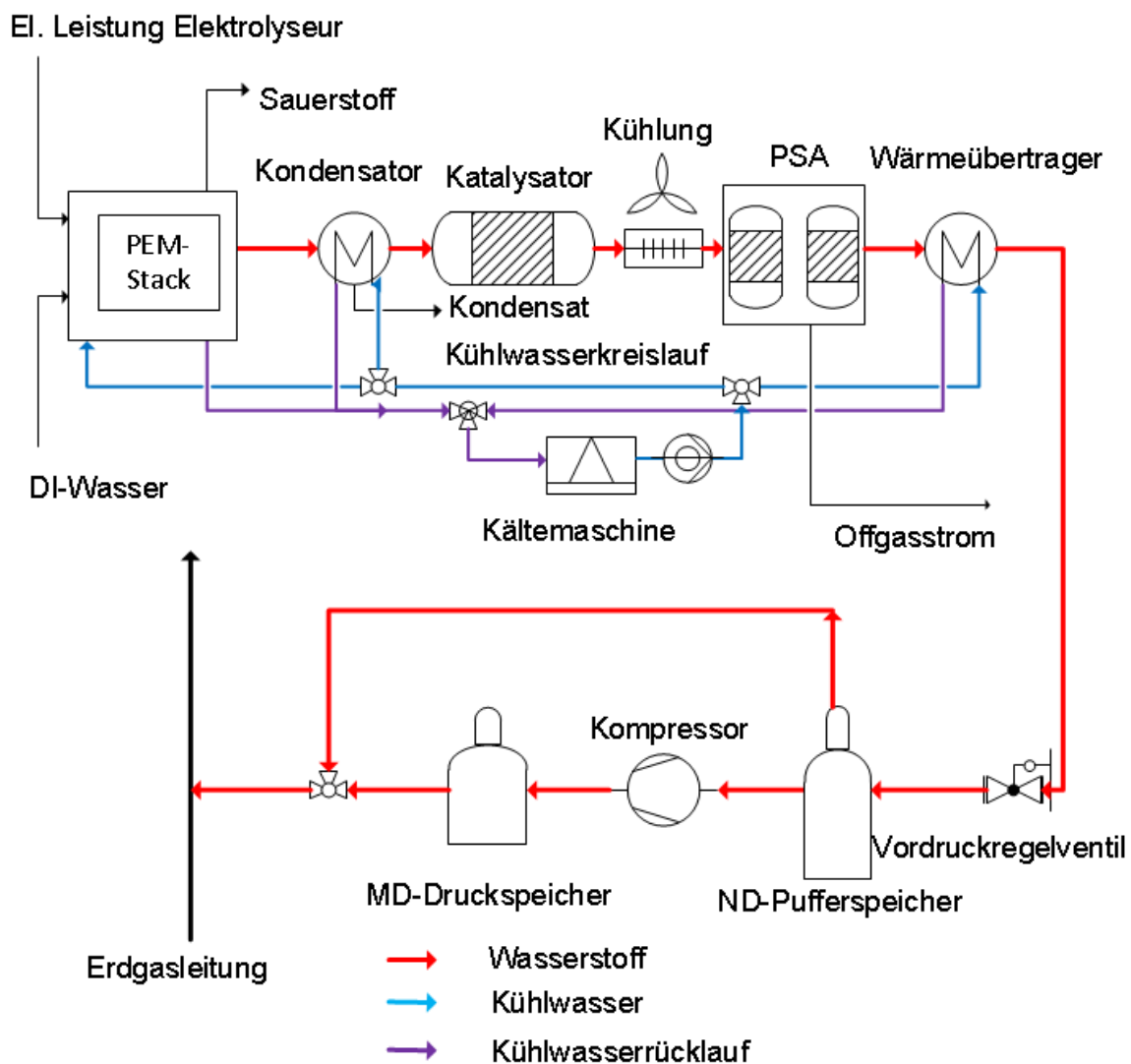
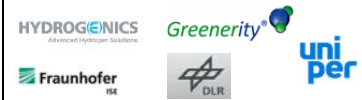


Abbildung 42: Umfang der modellierten Komponenten und eingesetzte Verschaltung

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Das Power-to-Gas-Modell basiert auf Massen- und Energiebilanzen, sowie – soweit verfügbar – Kennfeldern. Jede Komponente des Systems wurde als eigenständiges Modul modelliert und aufgebaut, so dass das Modell durch die Modularisierung leicht an die Ziel-Anlage angepasst werden kann. Dies war einerseits für eine zukünftige Nutzung wichtig, als auch für das Projekt notwendig, da bei Beginn der Arbeiten die genaue Architektur der Zielanlage noch nicht bekannt war.

Ein Test der realen Randbedingungen der Demoanlage war zum Abschluss der Simulationsarbeiten nicht möglich, da noch keine genaueren Daten über die Demonstrationsanlage oder deren Betrieb feststanden. Für den Test des Modells wurde daher ein fiktiver Fall gewählt und näher betrachtet: Eine konkrete Windanlage, welche Strom für die Gesamtanlage bereit stellt, das Elektrolyse-System inklusive Speicher und eine Einspeisung in eine Erdgasleitung.

Hierfür wurde der Elektrolyseur gemäß anfänglicher Projektspezifikation auf 1 MW elektrische Leistung parametrisiert. Jede weitere Komponente wurde an Hand der Ergebnisse des Elektrolyse-Systemmodells (Leistung, Wasserstoffvolumenstrom, etc.) ausgelegt und die resultierenden Spezifikationen für die erste Parametrierung des Power-to-Gas-Systemmodells benutzt.

Das Betriebsverhalten des Systems wurde durch eine Betriebsführung auf Logikebene definiert. Diese übernimmt die Steuerung der Einspeisung, der Kompression und des Elektrolyseurs. Einen Auszug der Betriebsführung zeigt Abbildung 43.

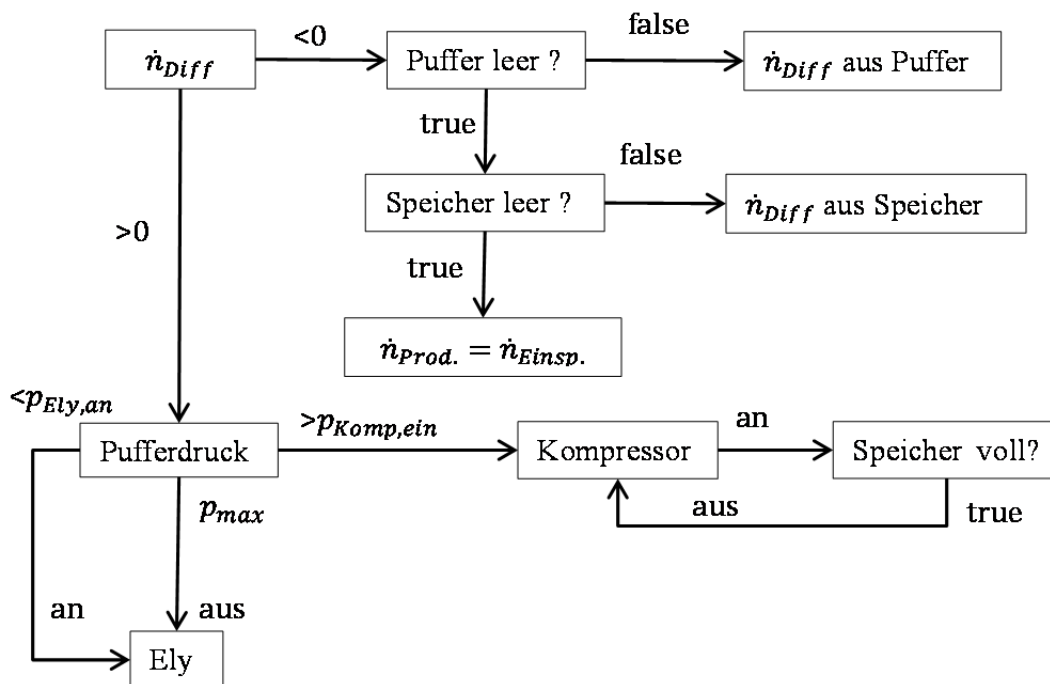
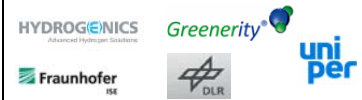


Abbildung 43: Betriebsführung Einspeisung – Speicherung

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Das resultierende Modell wurde mit synthetischen Profilen auf korrektes Verhalten geprüft als auch beispielhaft für die fiktive Fallstudie mit einer Kombination aus einem Windprofil und einem Durchflussprofil einer Gasleitung (Opengrid Europe, Marktübergang Ahlten) getestet. Um die Aufgabe für das Modell und die Betriebsführung möglichst anspruchsvoll zu gestalten, wurden Gasleitung und Windprofil auf die Anlage so skaliert, dass nicht jederzeit eine volle Einspeisung möglich ist und Verdichter und Puffer zum Einsatz kommen sollen.

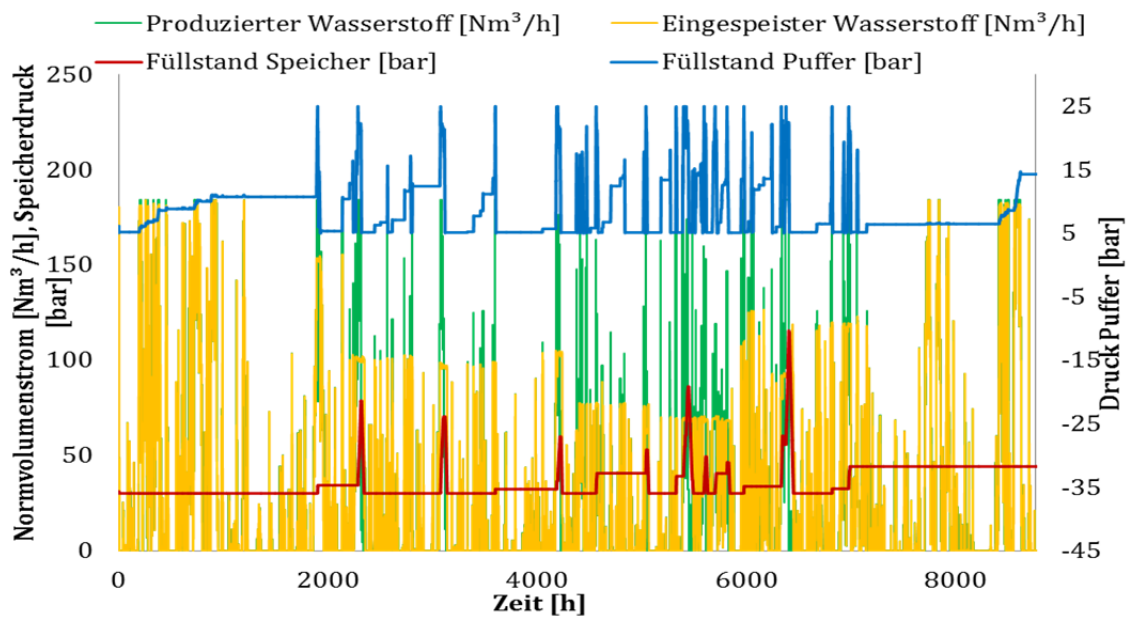


Abbildung 44: Produzierter und eingespeister Wasserstoff zusammen mit ND- und MD-Speicherdruck

Das Ergebnis der ersten Simulation ist in Abbildung 44 dargestellt. Zu sehen sind:

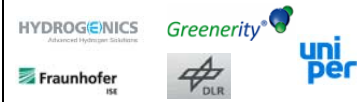
- Die Wasserstoffproduktion in grün. Diese folgt nahezu vollständig dem skalierten Windprofil. Es wurde jedoch beschlossen, den Elektrolyseur auf 70% der Leistung der Windkraftanlage auszulegen, daher wurde ein Teil der elektrischen Leistung bei Starkwindzeiten verworfen
- Die eingespeiste Menge Wasserstoff in Gelb
- Die Speicherinhalte von Pufferspeicher (blau) und Langzeitspeicher (rot).

In dieser Konfiguration ergab sich ein Jahres-Wirkungsgrad von ca. 49 %. Dieser Wirkungsgrad liegt deutlich unterhalb des Anlagenwirkungsgrads, da das Modell in der Vergangenheit mit wesentlich schlechteren Wirkungsgraden für die Gasreinigung, Trocknung und Gleichrichter gerechnet hatte. Zusätzlich existieren in dieser Simulation Phasen mit geringer oder auch ausgesetzter Produktion, welche wirkungsgradsenkend wirken.

Die Power-to-Gas-Anlage war in dem betrachteten Zeitraum nur zu ca. 16% ausgelastet, was aufgrund der Auslegung auf 70% der Nennleistung der Windkraftanlage nicht überraschend ist

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



(Eine Halbierung der Leistung würde die Auslastung deutlich erhöhen). Die Einspeisekapazität des Gasnetzes wurde in dieser Skalierung zu 24% genutzt. Der Speicher wird in diesem Szenario nicht wirklich in Anspruch genommen. Es wurden im Folgenden noch Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die o.g. Aspekte näher zu betrachten. Da es sich nur um einen rein akademische Fallstudie zum Test des Simulationsmodells handelte, wurde diese Fallstudie nicht weiter verfolgt.

## AP 3.3: Zustandsorientierte Instandhaltung

Die Aufgabe des Fraunhofer ISE in AP 3.3 war die Erstellung eines Konzeptes für die zustandsorientierten Instandhaltung und die Zuarbeit an Uniper zur Integration der zustandsorientierten Instandhaltung in den Betriebsplan. Zur Erfüllung des Ziels musste jedoch von der im Antrag beschriebenen Methodik abgewichen werden.

Die präventive Instandhaltung als das Standardverfahren basiert „auf Ausführung in festgelegten Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien zur Verminderung der Ausfallwahrscheinlichkeit oder der Wahrscheinlichkeit einer eingeschränkten Funktionserfüllung einer Einheit“. D.h. Wartungsschritte wie bspw. der Ersatz eines Pumpenlaufrades werden regelmäßig nach einer festen Zeitperiode durchgeführt.<sup>1</sup>

Die zustandsorientierte Instandhaltung enthält jedoch eine Kombination aus Zustandsüberwachung und/oder Konformitätsprüfung und/oder Prüfverfahren, Analysen und die daraus resultierenden Instandhaltungsmaßnahmen. D.h. die Zustände der Komponenten werden überwacht (Sensorik), überprüft (Inspektion) oder analysiert und erst daraus wird eine Instandhaltung abgeleitet – das oben genannte Pumpenlaufrad wird also erst ausgetauscht, wenn bei einer Inspektion eine Laufunruhe oder Geräusche einer Kavitation festgestellt werden.<sup>1</sup>

Im Gegensatz dazu geht die vorrausschauende Instandhaltung/vorrausagende darüber hinaus. Sie ist eine Instandhaltung, die nach einer Vorhersage, abgeleitet von wiederholter Analyse oder bekannten Eigenschaften und Bestimmung eingeleitet wird. Das heißt aufgrund einer Prognose wird eine zustandsorientierte Prüfung eingeleitet. Bezogen auf das Beispiel des Pumpenlaufrads wird aufgrund einer betriebsorientierten Prognose (bspw. die Anzahl der Betriebsstunden und des von der Pumpe erzeugten Differenzdruckes) erst eine Inspektion des Pumpenlaufrads gestartet.<sup>1</sup>

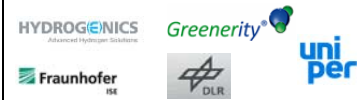
Im Förderantrag wurden die Nutzung des Lebensdauerprognosemodells zur Beschreibung der Alterung des Systems und die Erweiterung um die Prognose der Lebensdauer der verfahrenstechnischen Komponenten festgeschrieben. Dies entspricht jedoch einer vorausschauenden Instandhaltung. Nach Literaturrecherche und detaillierter Analyse der Methodik wurde jedoch im Dialog mit Uniper als Empfänger der Ergebnisse beschlossen, dass

---

<sup>1</sup> DIN EN 13306

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



diese Herangehensweise in Hinblick auf das Ziel einer zustandsorientierten Instandhaltung nicht passend bzw. zielführend ist. Stattdessen wurde entschieden, sich abweichend vom Antrag an der tatsächlichen Methodik für eine zustandsorientierte Instandhaltung zu orientieren.

Hierfür wurden in mehreren Workshops zusammen mit Uniper für die verfahrenstechnische bzw. Systemseite und zusammen mit DLR für den Stack alle Komponenten der Elektrolyse-Anlage konzeptionell in drei Schritten bezüglich der zustandsorientierten Instandhaltung untersucht:

## 1) *Prinzipielle Sinnhaftigkeit / Machbarkeit einer zustandsorientierten Instandhaltung.*

Für die Sinnhaftigkeit bzw. Machbarkeit wurden folgende Kriterien herangezogen

- Sicherheitsgerichtete Funktion: Eine sicherheitsgerichtete Funktion verhindert eine ausschließlich zustandsorientierte Herangehensweise, da hierdurch mindestens eine jährliche Prüfung notwendig wird
- Relevanz/Kostenimpact: Anhand der durchschnittlichen Lebensdauer der Komponente bzw. der kostentechnischen Relevanz, sowie allgemeinen Erfahrungen wurde hier die Relevanz bzw. der Impact einer zustandsorientierten Instandhaltung ermittelt. Die Bewertung erfolgt qualitativ anhand „sehr hoch, hoch, mittel und niedrig“ als Bewertungsspielraum. Eine genaue Schwelle wurde aktuell nicht festgelegt, da dies vom Einzelfall abhängt bzw. die entsprechende Erfahrung für Kosten zumindest dem Fraunhofer ISE nicht vorliegt. Eine Verwendung der zustandsorientierten Instandhaltung bei „sehr hoch“ ist jedoch sicherlich auch ohne genauere Betrachtung sinnvoll, eine Verwendung bei „niedrig“ jedoch vermutlich auch bei näherer Betrachtung nicht optimal.

## 2) *Abschätzen der typischen Ausfallursachen der jeweiligen Komponenten.*

Im zweiten Schritt wurden die typischen Ausfallursachen der jeweiligen Komponenten diskutiert. Hierbei wurde sich auf Erfahrungen der Uniper (lange Erfahrung im Betrieb gastechnischer Anlagen), des Fraunhofer ISE (Betreiber einer Wasserstoff-Tankstelle, Forschung im Bereich Degradation/Alterung Elektrolyse-Zellstapel) und DLR (Forschung im Bereich Degradation/Alterung Elektrolyse-Zellstapel) gestützt. Auch Erkenntnisse aus anderen Arbeitspaketen des Projektes sind eingeflossen.

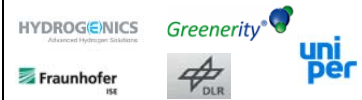
## 3) *Inspektions-/Überwachungsmethodiken, um den Zustand der Komponente zu bewerten*

Bezogen auf die möglichen Ausfallursachen wurden dann mögliche oder typische Symptome abgeleitet. Basierend auf diesen Symptomen wurden mögliche Methoden der Zustandsbestimmung diskutiert. Hierbei wurde kategorisiert, in welcher Art diese Zustandsbestimmung stattfindet:

- a. Online: Während des Betriebs der Anlage (bspw. durch Sensorik der Anlage)
- b. Offline: Durch Unterbrechung des normalen Betriebs bspw. durch spezielle Betriebspunkte (Weiterproduktion von Wasserstoff) oder Abfahren zum bspw. Drucktest (ohne Wasserstoff-Produktion)
- c. Offline mit Ausbau: Durch Abfahren und Ausbau der entsprechenden Komponente

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Für den Anwender der Ergebnisse bedeutet das, dass wenn eine Sinnhaftigkeit/Machbarkeit der zustandsorientierten Instandhaltung gegeben ist, nach Ablauf der typischen Lebensdauer (bzw. mit einem gewissen Sicherheitsabstand davor) regelmäßig der Zustand der jeweiligen Komponente geprüft wird. Dies kann einerseits durch Inspektionen oder durch Sensorik in der Anlage auch aus der Ferne geschehen. Hierfür kann sich Uniper als Empfänger der Ergebnisse auf die erstellte Tabelle mit sämtlichen Komponentenarten und den oben genannten Kriterien stützen.

Im konkreten Fall der Demonstrations-Anlage ist für die in der folgenden Tabelle genannten Komponenten eine zustandsorientierte Instandhaltung relevant und kann eine Kostenersparnis bringen. In einigen Komponenten ist dies durch den Wert der Komponente (bspw. Zellstapel), in einigen Komponenten aufgrund des Aufwands eines Tausches trotz geringer Materialkosten (bspw. Rohrbegleitheizung), in einigen Fällen auch aufgrund der Häufigkeit eines Tausches/Inspektion, welcher die Inspektionshäufigkeit der Anlage deutlich erhöhen würde (bspw. DI-Kartuschen), begründet.

Tabelle 9: Wichtige Komponenten für die zustandsorientierte Instandhaltung

Komponente	Relevanz zust. Instandhaltung
Zellstapel	sehr hoch
Durchflussmesser	sehr hoch
Wärmeübertrager	sehr hoch
Gleichrichter	sehr hoch
Magnetventile (Antrieb für pneumatische Ventile)	hoch (Anzahl)
Drucksensoren	hoch
Pneumatische Ventile	hoch
Vordruckregelarmatur	hoch
DI-Kartuschen	hoch
Pumpen (Osmose, Förderpumpe)	hoch
Membran Umkehrosmose	hoch
DI-Vorratsbehälter (Stahlbehälter)	hoch
Abwassersystem (Siphon)	hoch
elektrische Rohrheizung	hoch
Prozess-Gaschromatograph	hoch

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

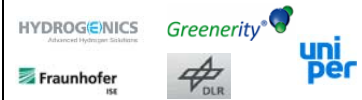


Tabelle 10: Auszug aus den Ergebnissen für die zustandsorientierte Instandhaltung

Komponente	Ausfallursache	Methode zust. Instandhaltung	Anlagenstatus	Person vor Ort	Aufwand
Vordruck-regelarmatur	Undichtigkeit (extern und intern)	Dichtigkeits- und Funktionsprüfung	Anlagenstillstand	ja	gering
	Federspannung lässt nach	Regelgeschwindigkeit überwachen mit reproduzierbaren Lastschwankungen	im Betrieb	nein	sehr gering
Druck-sensoren	Drift, fehlerhafter Messwert	Sinnhaftigkeitsprüfung (Vergleich bei Stillstand Anlage)	Anlagenstillstand	nein	sehr gering
		Überprüfung Messbereich (Z jährlich auf den Abschaltdruck, sonst min. alle 2,5 a)	Anlagenstillstand	vermutl. Ja	mittel
Level-sensoren	mech: "Schwimmkörper undicht", "Führungsschiene defekt oder verschmutzt"	Messbereich durchfahren und prüfen	Anlagenstillstand	vermutl. Ja	gering
	elektr: Kabelbruch, Auswerteeinheit defekt, Drift (Ultraschall)				

Damit konnte im Rahmen des Arbeitspakets ein Konzept für die zustandsorientierte Instandhaltung erarbeitet werden und für den Elektrolyseur in Reitbrook angewendet werden. Die Methodik weicht vom Antrag ab, entspricht aber der hier stärker zielführenden Herangehensweise. Die Ergebnisse wurden an Uniper übergeben.

## AP 3.4: Feldtestbegleitung/Validierung Simulationsmodell

Aufgabe des Fraunhofer ISE in AP 3.4 war die Begleitung der Feldtestphase. Aufgrund des Pilotcharakters der Anlage und der dadurch begründeten intensiven Inbetriebnahmephase verkürzte sich die Feldtestphase. Die Zeiten während der Inbetriebnahmephase sind hierbei für die Auswertung nur eingeschränkt nutzbar, da diverse Veränderungen an der Anlage durchgeführt wurden. Die Gesamt-Betriebsdauer der Pilotanlage lag bei ca. 600 h.

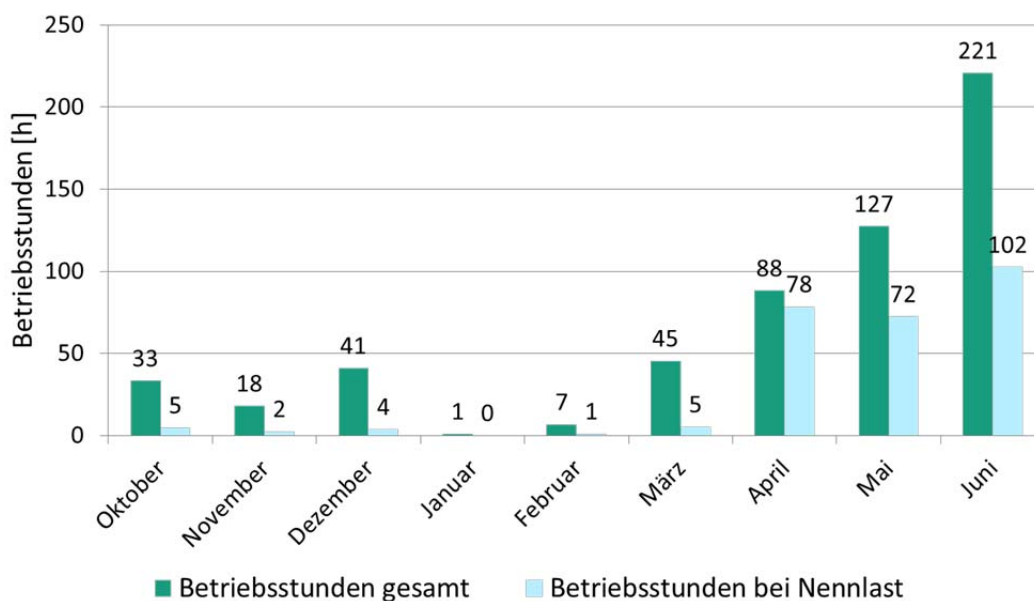
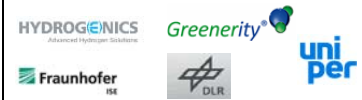


Abbildung 45: Übersicht über den Betrieb der Elektrolyse-Anlage



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Für die Begleitung des Feldtests standen sowohl zwei durchgeführte Feldtestwochen (Dezember 2015 und Juni 2016) zur Verfügung als auch Langzeitmessdaten der Anlage über den kompletten Zeitraum seit Lieferung. Die durchgeführten Messungen waren:

- Systemcharakterisierung mit einem im Projekt entwickelten Charakterisierungsprofil zur Systemanalyse und zur Validierung der Modelle
- Dynamische Pulse, d.h. starke Sprünge in der Sollleistung, um Nichtlinearität im Betrieb zu sowie ggf. eine Methodik Messung der Systemalterung zu untersuchen und um Daten über die Dynamik für die Validierung der Simulationsmodelle zu erhalten
- U-I-Kennlinie
- Variation von Druck und Temperatur

Einer Variation der Betriebsbedingungen ist durch den industriellen Charakter und die Größenordnung der Anlage nur in geringen Maßen möglich.

Tabelle 11: Übersicht über verfügbare Messdaten

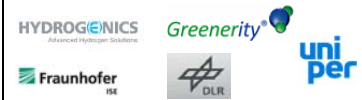
	Messwoche Dez 2015	Messwoche Jun 2016	Restlicher Demobetrieb
<b>Messwerterfassung</b>	Vor Ort	Messwerterfassung	Messwerterfassung
<b>Datenquelle</b>	Elektrolyse-SPS Leitsystem Langzeitmessdaten	Leitsystem Langzeitmessdaten	Langzeitmessdaten
<b>Datenrate</b>	1 Wert alle 2 Sekunden	1 Wert alle 2 Sekunden	1 Mittelwert pro Minute
<b>Regelbereich</b>	Eingeschränkt	Vollumfänglich	Überwiegend Eingeschränkt

Die Elektrolyse-Anlage verfügt über eine im Vergleich zu kleineren Serienanlagen umfangreiche Sensorik, deren Messwerte auch für die Partner zur Verfügung gestellt wurde. Bis auf wenige Sensoren, die aufgrund Vertraulichkeit durch Hydrogenics nicht freigegeben wurden, standen alle Messdaten den Partnern zur Verfügung. Damit waren bis auf eine Betrachtung von Leitfähigkeit und Trocknung detaillierte Auswertungen möglich.

Die erste Feldtestwoche wurde im Dezember 2015 durch das Fraunhofer ISE vor Ort an der Anlage durchgeführt und begleitet von Uniper und Hydrogenics. Mit der Begleitung durch beide Partner konnte sichergestellt werden, dass auch Variationen an Betriebsparametern durchgeführt werden konnten bzw. dass auch Anlagendaten direkt aus der Elektrolyse-SPS exportiert werden konnten. Da es jedoch sowohl Verzögerungen bei der Inbetriebnahme gegeben hatte, als auch noch verbleibende technische Schwierigkeiten gab, konnten nicht alle Messungen im gewünschten Umfang durchgeführt werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Durch die noch laufenden Inbetriebnahme lief die Druckregelung der Anlage lief noch nicht vollständig stabil – die Anlage wurde in dieser Phase im Bereich 30 – 100% Last gefahren und konnte starke Sprungeingänge noch nicht stabil durchführen.

Die zweite Feldtestwoche wurde nach Abschluss der Inbetriebnahme und der Uniper-eigenen Abnahme im Juni 2016 durchgeführt. Diese Messung wurde von Ferne über das Leitsystem mit Fahrplänen gemäß Vorgaben Fraunhofer ISE und DLR durchgeführt. Die Anlage war vollumfänglich im Betrieb und die Messreihen wurden wie geplant durchgeführt.

Die Langzeitmessdaten decken diese beiden Messwochen und die vollständige Inbetriebnahmephase ab. Bis auf die Messwochen und die Uniper-eigenen Messungen Ende Mai 2016 handelt es sich überwiegend um Funktionstests und Feintuning. Der Vergleich von Messungen der beiden Feldtestwochen zeigt, dass in diversen Reglern und Parametern Änderungen durchgeführt wurden.

Im Rahmen des Feldtestes wurde außerdem eine sehr umfangreiche Auswertung der erhobenen und verfügbaren Messdaten gemacht, um den Feldtest und die Anlage möglichst genau zu verstehen und zu bewerten. Diese Messdaten und die Kampagnen wurden für die Validierung verwendet. Im Folgenden sind die auszugsweise die Auswertungen der Anlage beschrieben, welche der Validierung dienen. Die Validierung als Ergebnis ist im Abschnitt AP 3.1 beschrieben, um eine schlüssigere Gesamt-Lesbarkeit zu gewährleisten.

Ausgewertet wurden:

- Der Zellstapel / Die Anlage (Drücke, Temperaturen, Wirkungsgrad)
- Gasreinheit der Anlage
- Systemverhalten der Anlage
- Schnell-U-I-Kennlinie

Auszugsweise werden im Folgenden Wirkungsgrad, Gasreinheit und ein Auszug der Dynamik beschrieben.

## Wirkungsgrad

Die Wirkungsgrade wurden wie folgt berechnet:

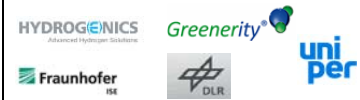
Faraday Wirkungsgrad Stack + Anlage

$$\varepsilon_{Faraday} = \frac{\dot{n}_{H_2} / N_{cells}}{I_{Stack} \cdot (z \cdot F)^{-1}}$$

Die für die Bestimmung des Faraday Wirkungsgrades benötigten Werte liegen alle als direkte Messwerte der Elektrolyseanlage vor mit Ausnahme des Molenstroms, welcher aus dem Normvolumenstrom des eichfähigen Wasserstoff-Mengenmessers berechnet wurde. Dies beinhaltet eine leichte Ungenauigkeit, da der Mengenmesser der Einspeiseanlage verwendet wurde – d.h. Wasserstoffverluste in der Anlage (Analytik, Trocknung, Undichtigkeiten) werden dem Zellstapel zugeordnet, lässt sich jedoch aufgrund nicht verfügbarer Messdaten nicht anders realisieren.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Spannungs-Wirkungsgrad Stack

$$\varepsilon_V^{HHV} = \frac{U_{th}^0}{U_{Stack,ges} / N_{cells}}$$

Die Berechnung des Spannungs-Wirkungsgrades bezieht sich auf den oberen Brennwert (HHV). Da die Einzelzellspannungen nicht vorliegen wurde hier vorliegende Gesamtspannung durch die Anzahl der Zellen geteilt – es handelt sich hier also um den gemittelten Spannungs-Wirkungsgrad des Zellstapels.

Stackwirkungsgrad

$$\varepsilon_{Stack}^{HHV} = \frac{\dot{n}_{H_2} \cdot \Delta H_R^0}{U_{Stack,ges} \cdot I_{Stack}}$$

Verwendet wurden wieder die Parameter für den oberen Brennwert (bzw. Higher Heating Value). Die Werte im Nenner wurden durch Sensorik in der Elektrolyse-Anlage nach dem Gleichrichter gemessen. Dies beinhaltet analog zum Faraday-Wirkungsgrad eine leichte Ungenauigkeit, da der Mengemesser der nachgelagerten Einspeiseanlage verwendet wurde – d.h. Wasserstoffverluste in der Anlage (Analytik, Trocknung, Undichtigkeiten) werden dem Zellstapel zugeordnet

Systemwirkungsgrad

$$\varepsilon_{System}^{HHV} = \frac{\dot{n}_{H_2} \cdot \Delta H_R^0}{P_{Trafo,Stack1} + P_{Trafo,Stack2} + P_{Trafo,Peripherie}}$$

Der Energieverbrauch für das gesamte Elektrolyse-System wird über die Leistungsmessung der drei Transformatoren, welche den Elektrolyse-Container versorgen gemessen und enthält neben der Leistung des Zellstapels inklusive Gleichrichter ( $P_{Trafo,Stack1}$ ,  $P_{Trafo,stack2}$ ) sämtliche Peripherie ( $P_{Trafo,Peripherie}$ ).

Die Messwerte wurden während der Messkampagnen aus dem Anlagen-Charakterisierungs-Profil (Juni 2016) und der U-I-Kennlinie (Dezember 2015) ermittelt. Hierfür wurden Werte während der instationären Übergangsphasen verworfen und ab einem stationären Betrieb von 3 Minuten die Werte gemittelt. Je nach Messpunkt entspricht dies ca. 20 - 50 Minuten stationärem Betrieb bei einer zweisekündlichen Datenerfassung.

In der folgenden Abbildung sind Faraday-Wirkungsgrad der Anlage, der Spannungswirkungsgrad, die Effizienz des Zellstapels/Stacks und die Effizienz des gesamten Systems dargestellt. Zusätzlich dargestellt ist die Standardabweichung der Messwertschwankung als Fehlerbalken, d.h. es wird nicht die volle Breite der Messwertschwankungen durch den Fehlerbalken repräsentiert, sondern nur ein Teil der Streuung gemäß Standardabweichung. Hohe Fehlerbalken bedeuten, dass die Messwerte sehr starken Schwankungen unterliegen.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

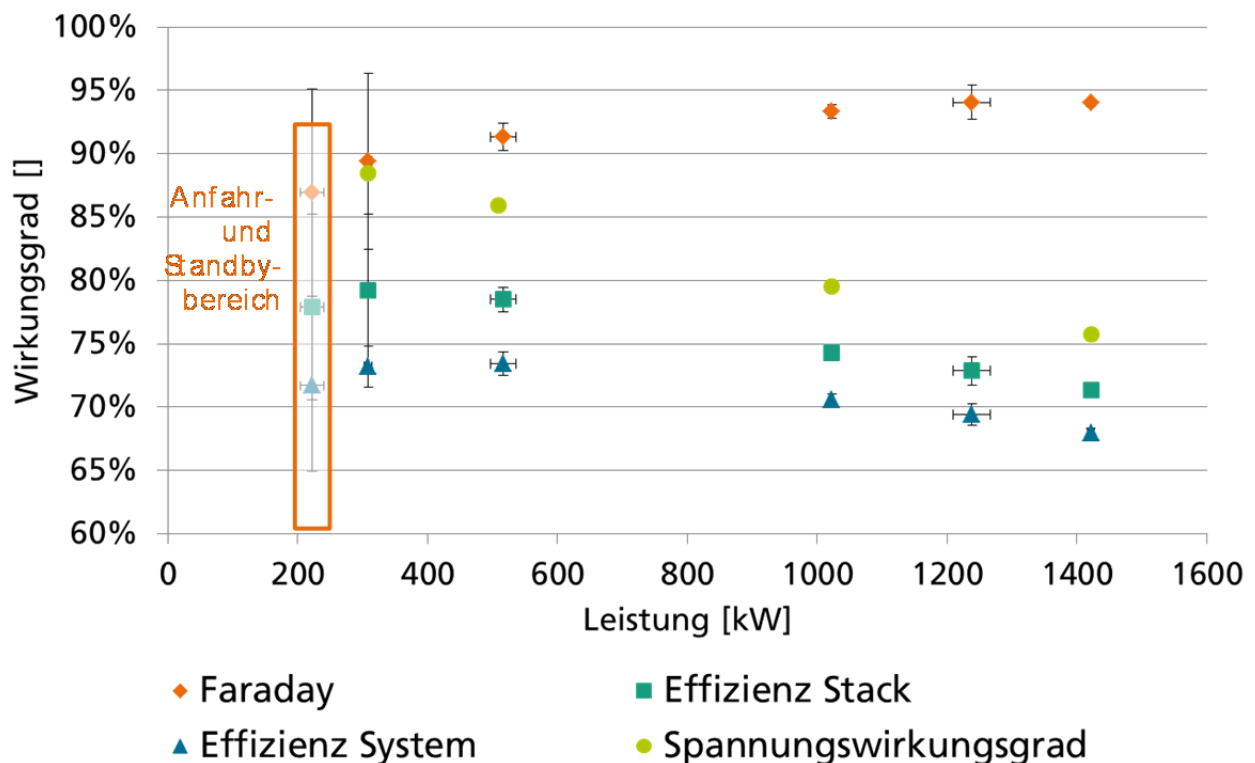


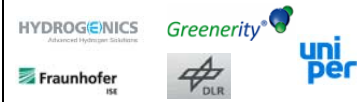
Abbildung 46: Wirkungsgrade der Elektrolyse-Anlage

Zu beobachten ist eine starke Schwankung der Messwerte bei 200 kW und 300 kW. Dies liegt bei 200 kW darin begründet, dass dort Standby und Anfahrvorgänge mit hineinfallen und dort noch Schwankungen im Wasserstoff-Durchfluss anfallen. Dieser Wert ist daher nur bedingt belastbar. Bei 300 kW liegt dies darin begründet, dass die Anlage innerhalb der Messzeit keinen stationären Betrieb in Hinblick auf die Systemtemperatur erreichen konnte (langsamer Anstieg Systemtemperatur), bzw. die Temperaturregelung hat noch keine stabile Systemtemperatur (starke Schwankungen) erzeugt, was durch den starken Einfluss der Temperatur auf den Wirkungsgrad für starke Messwert-Schwankungen sorgt.

Faraday und Stack-Wirkungsgrad beziehen sich auf die Wasserstoffmessung an der Einspeisung, d.h. Wasserstoff-Verluste im Elektrolysesystem und der Einspeiseanlage werden mitgemessen. Dies sollte aber bei den typischen Verlustströmen für die Analytik (ca. 1 – 2 l/min) bei bspw. 500 kW aber nur 0,12%-Punkte Wirkungsgradsenkung verursachen. Zudem ist noch eine Analytik in der Einspeiseanlage verbaut, die jedoch ähnliche Verlustströme aufweisen sollte, so dass der Einfluss der Analytik auf insgesamt ca. 1%-Punkt abgeschätzt wird. Verluste im Trockner fallen hierbei wahrscheinlich nicht zu Buche, da während der Messkampagne im Rahmen von stichprobenartigen Prüfungen im Leitsystem kein Regenerierungszyklus ersichtlich war (Messwerte jedoch nicht verfügbar) und außerhalb der Regeneration kein Wasserstoffverlust anfällt.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Da ein Regenerierungszyklus durchaus im Bereich von 10–20 h dauern kann, sind stichprobenartige Prüfungen auch ohne Messwerte ausreichend. Weitere Wasserstoff-Verluste/-leckagen in der Anlage könnten den Faraday-Wirkungsgrad weiter senken. Generell hat auch die Wahl der Membrandicke einen Einfluss auf den Faraday-Wirkungsgrad bspw. aufgrund von erhöhter Diffusion von Sauerstoff oder Wasserstoff (bei gleichzeitiger Erhöhung des Spannungswirkungsgrads).

Systemseitig ist ein sehr guter Teillastwirkungsgrad zu beobachten, was vermutlich an einer entsprechenden hochwertigen Komponentenauswahl bspw. für Gleichrichter und Trocknung liegt, welche auch bei geringer Last einen sehr guten Wirkungsgrad zeigen. Die Systemwirkungsgrade weichen um ca. 1 Prozent von den Messungen von Uniper ab. Dies kann mit Schwankungen im Leistungsbezug der Nebenaggregate oder leicht veränderten Regelparametern begründet werden.

Wichtig zu erwähnen ist, dass alle Wirkungsgrade auch im Kontext der geringen Betriebsdauer gesehen werden müssen. Nach einer Betriebszeit von knapp 600 h ist nur eine vorbehaltliche Aussage zu den Wirkungsgraden nach längeren Betriebszeiträumen möglich. Allgemein ist aus der Literatur bekannt, dass PEM-Elektrolyse-Stacks in den ersten Tausend Stunden ein Einlaufverhalten aufweisen können. Damit kann nach der vorliegenden Betriebszeit noch keine finale Aussage zum Wirkungsgrad getroffen werden.

### Gasreinheit

Die Gasmessung besteht anodenseitig aus einem Gassensor, welcher den  $H_2$  in  $O_2$  Gehalt überwacht. Auf Kathodenseite werden Sauerstoff und Feuchte im Wasserstoff über zwei Sensoren innerhalb des Elektrolysesystems überwacht. Zusätzlich befindet sich in der Einspeiseanlage eine weitere Analytik bestehend aus Taupunktmessung und Prozessgaschromatograph, welche wiederum Sauerstoff und Feuchte sowie zusätzlich Stickstoff überwachen. Die Aufgabe dieser zweiten Analytik ist es, die Reinheit bzw. Grenzwerte des eingespeisten Wasserstoffs in Hinblick auf das Erdgasnetz zu überwachen.

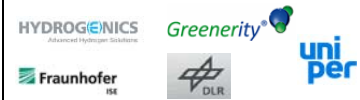
Bezüglich der Gasreinheit zeigt die Elektrolyse-Anlage Sauerstoffgehalte von bis zu 3 ppm Sauerstoff im Wasserstoff. Die damit erzielte Wasserstoffreinheit entspricht 99.9997% und stellt damit ein hoch reines Gas her (deutlich über der Zielsetzung von 4.0 Wasserstoff).

Auf der Anodenseite wurden bis zu 0,25 Vol.-% Wasserstoff im Sauerstoff gefunden. Diese im Vergleich zur Literatur niedrigen Werte liegen im Design der verwendeten MEA begründet.

Der Feuchtwert im Wasserstoff zeigte deutliche Unterschiede beim Vergleich der Messung vom Dezember 2015 mit den Messungen im Juni 2016. Eine Langzeitauswertung (siehe Abbildung 47) zeigt einen Abfall der Messwerte über die Betriebsdauer. Vermutlich wurden die Leitungen zu den Sensoren erst während der Laufzeit der Anlage durch den trockenen Wasserstoff trocken gespült. Vergleichbare Verläufe über ähnliche Zeiten konnten auch bereits an anderen Anlagen beobachtet werden.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Die von den zwei Sensoren gemessenen Werte für die Feuchte weichen voneinander ab – 25 ppm entsprechen einem deutlich höherem Taupunkt als  $-80^{\circ}\text{C}$ . Beide Werte sind aber sehr weit unterhalb der Grenzwerte für das Erdgasnetz, weshalb diese Messabweichung hier vermutlich nicht weiter adressiert wurde.

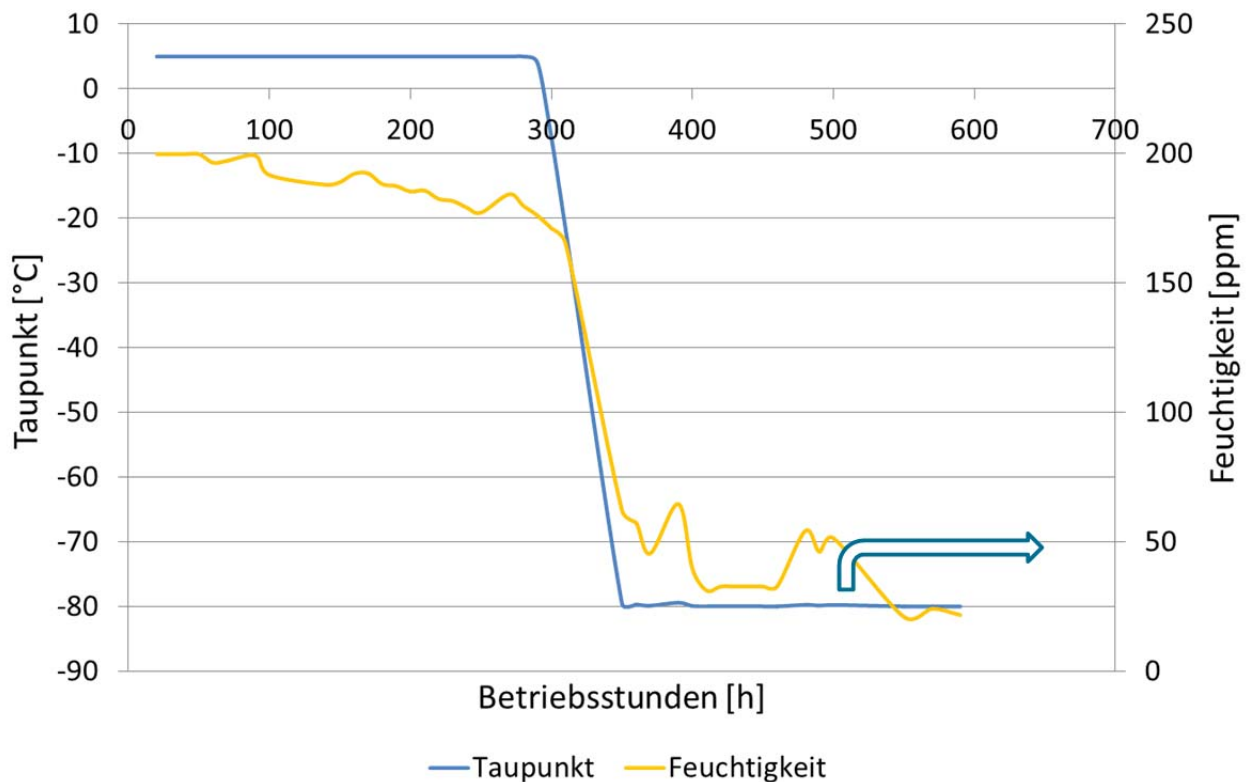


Abbildung 47: Feuchte Elektrolyse über die Laufzeit der Anlage

### Systemverhalten

Die Elektrolyse-Anlage hat in der gewählten Architektur und Sicherheitskonzept eine lange An- und Abfahrphase mit aufwendigen Spülprozessen. Der Standby-Betrieb ist als Übergangszustand konzipiert und benötigt vergleichsweise hohe elektrische Leistungen für die Druck- und Temperaturhaltung. Die Anlage ist damit den Dauerbetrieb konzipiert.

Für den Dauerbetrieb ist je nach Einsatzart trotzdem eine hohe Dynamik sinnvoll / notwendig. Eine Analyse der Reaktionszeit auf elektrischer Seite wurde durch Uniper bereits in Kapitel II.1.1.1 gezeigt. Im Folgenden wird daher die Reaktion der Systemregelung auf einen Lastwechsel gezeigt. Gezeigt werden die Reaktion der Temperatur und des Drucks ermittelt im Juni 2016 – also nach Abschluss der Finetuning-Phase.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

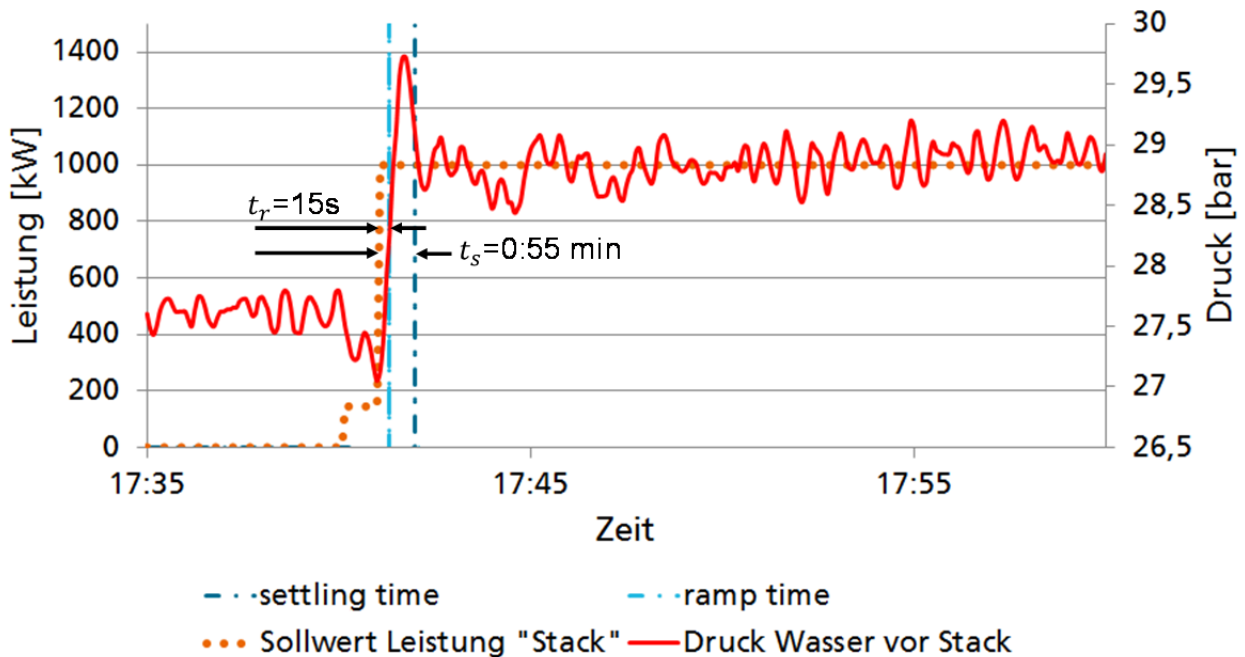


Abbildung 48: Einschwingzeit bei Lastwechsel: Druck

In Abbildung 48 ist die Systemantwort auf einen Sprung von Standby zu Volllast grafisch zu sehen. Ergänzt wird die grafische Auswertung durch zwei selbst-definierte Kenngrößen: „ramp time“ – also die Dauer bis zum Überschreiten des sich dann einpendelnden Druckniveaus und „settling time“ – also die Zeitdauer bis zum Einschwingen der Regelung. Der Druck wird gasseitig an der Kathode geregelt und der Anodendruck abhängig vom Kathodendruck nachgeregelt. Der dargestellte Druck entspricht dem Anodeneingang und wird daher aufgrund der Regelstrategie verzögert reagieren und aufgrund des signifikanten Druckverlusts am Stack eine verzögerte und deutlich sichtbare Sprungantwort zeigen.

Im Standby liegt der Druck bei knapp 28 bar. Nach Sprung steigt der Druck an und pendelt sich nach ca. 1 Minute bei 29 bar – aufgrund des höheren Gasdurchfluss entsteht auch über den Stack ein höherer Druckverlust – ein. Das Einpendeln geschieht zügig und ohne signifikante Nachschwingung.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

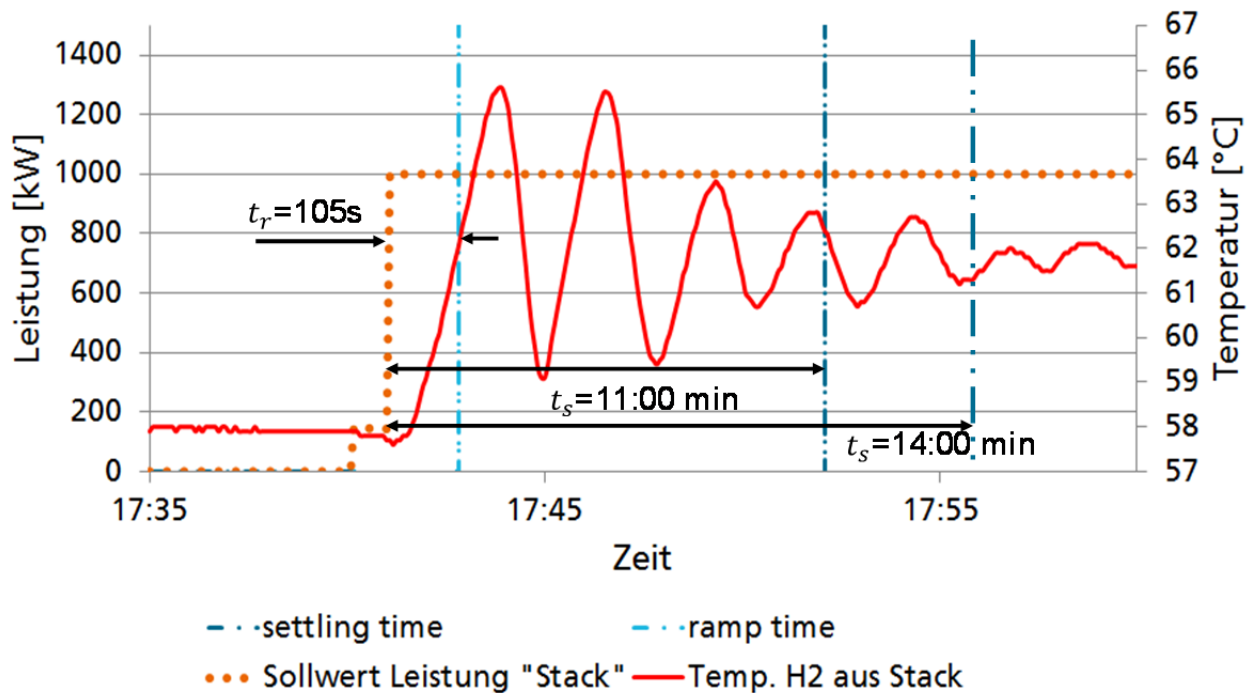


Abbildung 49: Einschwingzeit bei Lastwechsel: Temperatur

In Abbildung 49 ist der Temperaturverlauf bei Laständerung zu sehen. Die Temperaturregelung wird nach der Stack-Ausgangstemperatur auf Anodenseite geregelt und verändert die Stack-Eingangstemperatur anodenseitig. Gezeigt wird hier die Kathodenausgangstemperatur. Im Standby-Betrieb wird auf Kathodenseite eine Temperatur von ca. 58°C erreicht. Nach Sprung steigt die Temperatur an und pendelt sich nach ca. 14 Minuten auf einen Zielwert ein. Inwiefern ein erneuter Sprung/Lastwechsel (bspw. zu Überlast) innerhalb der ersten 11 Minuten zu einem Überschwingen mit erhöhten Temperaturen führen kann, müsste durch eine gezielte Messung gezeigt werden. Ein Überschwingen in der Größenordnung führt aber vermutlich auch auf der wärmeren Anodenseite nicht zu kritischen oder problematischen Betriebspunkten für den Stack.

## Fazit der Auswertungen

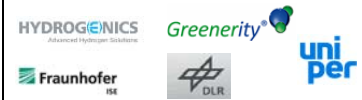
Als Fazit nach Auswertung des Feldtests kann gesagt werden, dass die Elektrolyse-Anlage im Vergleich zu anderen Anlagen einen sehr guten Anlagen-Wirkungsgrad zeigt. Es ist jedoch zu beachten, dass sich dieser Wirkungsgrad bei längeren Betriebszeiten noch verändern kann.

Die Anlagenarchitektur wurde für den Dauerbetrieb optimiert und hat somit einen sehr energieintensiven Standbybetrieb und relativ lange Anfahrt- und Abfahrzeiten. Dies war eine bewusste Design-Entscheidung von Hydrogenics und Uniper, da davon ausgegangen wurde, dass die Anlage im Betrieb ständig eine gewisse Grundlast erbringen sollte und damit der Standbybetrieb nur in Ausnahmefällen benötigt werden würde. Für andere Anwendungsfälle ist die Anlagenarchitektur prinzipiell anpassbar.



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## II.1.3 Greenerity

### II.1.3.1 Beschreibung der Arbeitspakete

#### AP 1.1: Definition der Anforderungen und Ziele, Festlegung der MEA Spezifikation

Dieses Arbeitspaket lieferte die Grundlage für die Entwicklung in den anderen Arbeitspaketen. Hier wurden sowohl Anforderungen und Ziele, die Betriebsparameter des Stapels bzw. der MEA (**M**embrane – **E**lectrode – **A**ssembly), als auch daraus abgeleitet die Ansprüche an die einzelnen Bauteile der Elektrolyse Anlage definiert. Dabei erfolgt sowohl die Festlegung der Zellgeometrie, die Anzahl der Zellen des Stapels, als auch die Vorauswahl geeigneter Materialien. Die Festlegung der MEA Spezifikation erfolgte in enger Abstimmung mit den Projektpartnern.

Die Detailabstimmung wurde in mehreren Workshops erarbeitet. Bei diesen Treffen, wurden die Themen Anlagensicherheit, Anlagenoptimierung, Betriebsweise der Anlage und Lebensdauerziele adressiert. Ziel dieser Arbeitstreffen war es, einen guten Kompromiss zwischen den Leistungs- und Lebensdauerzielen zu definieren.

Für die Festlegung der Anlagen und MEA Spezifikationen wurden folgende Aspekte bewertet:

Tabelle 12: Einflussfaktoren (Szenario 1-3) auf die zu erwartende Leistung und Lebensdauer der MEA

Einflussfaktoren für die Leistung / Lebensdauer der MEA	Szenario 1 = niedriges Risiko	Szenario 2 = mittleres Risiko	Szenario 3 = hohes Risiko
Dicke der Membran	150 – 200 µm (Standard)	100 – 140 µm	50 -90 µm
Edelmetallbeladung	hoch	mittel (Standard)	niedrig
Leistungsziel: Zellspannung [V] @ 2 A/cm <sup>2</sup>	2,0	< 2,0	< 1,8
Betriebstemperatur [°C] Stack Austrittstemperatur	40 - 50	50 - 80	70 – 80
System / Stack Druck [bar]	< 30 barg ausgeglichen	30 barg ausgeglichen	100 barg ausgeglichen 50 bar Druckdifferenz
Überlastfähigkeit der Anlage (Nennlast 2 A/cm <sup>2</sup> )	150 % für 30 Sek.	150 % für 6 Std.	150 % für 1. Tag 300 % für 6 Std.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

## Einfluss der Membrandicke:

Für moderne (state-of-the-art) PEM Elektrolyse Systeme werden Membranen mit einer Dicke von ca. 150 - 200  $\mu\text{m}$  (rote Kurve) verwendet. Durch den Einsatz von dünneren Membranen 100 - 140  $\mu\text{m}$  (blaue Kurve) und einer sehr dünnen Membranstärke von 50 - 90  $\mu\text{m}$ , (grüne Kurve) ist es möglich, die Leistung zu steigern und eine niedrigere Spannung [Volt] bei gleicher Stromstärke [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ] zu erzielen.

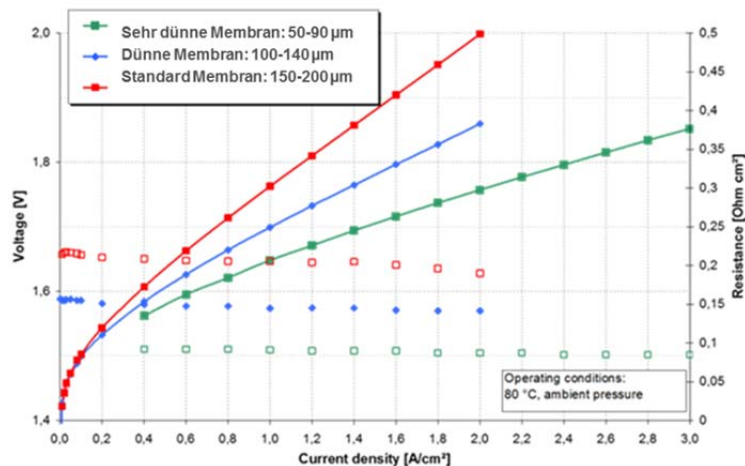


Abbildung 50: Einfluss der Membrandicke auf die Leistung der MEA

Durch die Verwendung von dünneren Membranen, lassen sich somit auch die Effizienz und der Stack Wirkungsgrad steigern. Im Gegenzug sinken aber die Lebensdauererwartungen durch den Einsatz von dünneren Membranen. Die mechanische Belastbarkeit wird geringer. Die Dicke der Membran hat unter anderem auch Einfluss auf den nicht gewünschten Gas-Durchgang (Crossover) durch die Membran. Der Wasserstoff Crossover durch die Membran steigt mit der Reduktion der Membrandicke kontinuierlich an.

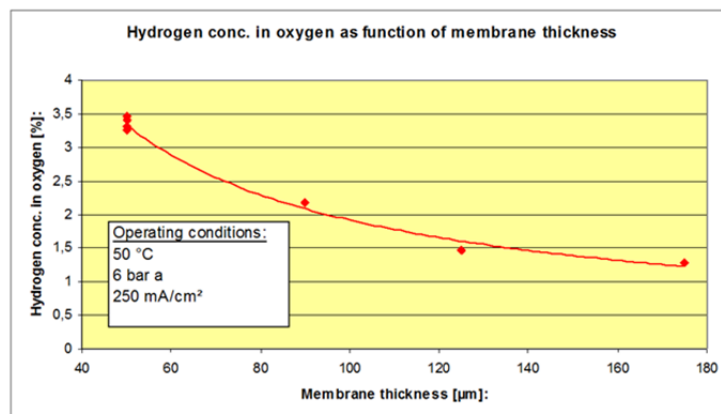


Abbildung 51: Wasserstoff Durchtritt durch die Membran in Abhängigkeit der Membrandicke

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

## Einfluss der Temperatur:

Die Betriebstemperatur des Stack hat einen großen Einfluss auf die Leistung der MEA. Mit steigender Temperatur verbessert sich die Leistung durch Reduktion der Spannung bei gleicher Stromstärke. Die erhöhte Betriebstemperatur verursacht aber leider eine stärkere Belastung aller Systemkomponenten des Elektrolyseurs und kann sich somit vermutlich auch negativ auf die Lebensdauer der MEA auswirken.

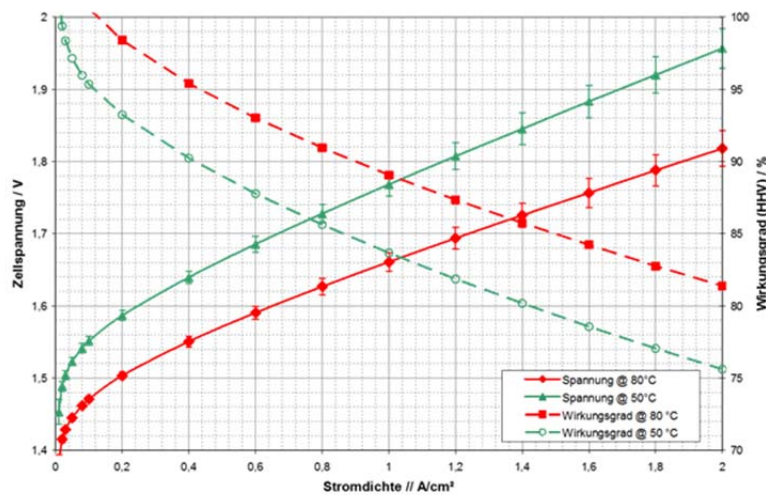


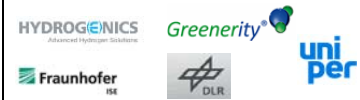
Abbildung 52: Einfluss der Temperatur auf die Leistung der MEA am Beispiel von 50°C (grüne Kurve) und 80°C (rote Kurve)

## Einfluss des Drucks:

Der Druck im System/Stack hat nur geringe Auswirkungen auf die Leistung der MEA. Wenn eine deutliche Erhöhung der Spannung (bei gleicher Stromstärke) mit steigendem Druck beobachtet wird, ist dieser Effekt meistens auf die Zellhardware zurückzuführen. Durch den höheren Druck kann sich der Stack „aufblähen“, was wiederum zu einer Verschlechterung der Kontaktierung aller Stackkomponenten und somit zur Reduzierung der Leistung führen kann. Ein hoher Wasserstoffdruck ist für den Betreiber der Elektrolyse Anlage von Vorteil. Wenn der Wasserstoff mit einem hohen Druck zur Verfügung gestellt werden kann, reduzieren sich die Kosten für eine nachgeschaltete Druckerhöhung mittels Kompressor. Wird der Wasserstoff als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge verwendet, ist ein Druck von 350 bar bzw. 700 bar notwendig. Für Power to Gas Anwendungen kann der Wasserstoff oftmals direkt, ohne weitere Druckerhöhung mittels Kompressor, in das Erdgasnetz eingespeist werden. Mit steigendem Druck, erhöht sich aber die mechanische Belastung der MEA und kann sich somit negativ auf die Lebensdauer auswirken.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## Einfluss der Edelmetall- Katalysatorbeladung und der Stromstärke:

Bei der Festlegung der Anlagen und MEA Spezifikation, wurden auch die Aspekte Edelmetallbeladung der MEA und Höhe der Stromstärke [A/cm<sup>2</sup>], mit der die Elektrolyseanlage (Nennlast und Überlast) betrieben wird, diskutiert und bewertet. Mit der Reduktion der MEA Edelmetallbeladung, können die MEA Kosten und somit auch die des Elektrolyseurs gesenkt werden. Auf der anderen Seite gibt es aktuell nur sehr wenige Erfahrungen, wie sich die Reduktion der Katalysatormenge auf die Lebensdauer der MEA und somit auf die Wirtschaftlichkeit der Elektrolyseanlage auswirken kann. In einem PEM Elektrolyse Stack steigt die erzeugte Wasserstoffmenge proportional mit der eingespeisten Stromstärke an. Je höher die Stromstärke in A/cm<sup>2</sup> ist, desto mehr Wasserstoff kann mit dem Stack pro Stunde produziert werden.

Ziel der Anlagen und MEA Spezifikation war es, einen wettbewerbsfähigen PEM Elektrolyseur mit einer Nennlast von 1 MW (Überlastbetrieb bis 1.5 MW) in einem Stack zu entwickeln. Hierbei sollen die neue PEM Technologie die Vorteile gegenüber der etablierten alkalischen Elektrolyse-Technologie aufzeigen, siehe Detailbeschreibung unter 1.4, wissenschaftlicher und technischer Stand. Auf der anderen Seite, soll der neue PEM Elektrolyseur auch die sehr hohen Lebensdauerziele der alkalischen Systeme erreichen und somit die Zuverlässigkeit der PEM Technologie demonstrieren.

Nach Abwägung der verschiedenen Einflussfaktoren, hat das Konsortium sich für das Szenario 2 = mittleres Risiko entschieden. Mit dieser Wahl, wurde ein aus heutiger Sicht sehr guter Kompromiss zwischen Leistungssteigerung und Lebensdauer getroffen.

Folgende MEA Spezifikationsmerkmale wurden definiert:

MW MEA Generation:	KompEISys 1
EM-Beladung:	Mittel (Standard)
MEA Format:	>1500 cm <sup>2</sup>
Membran:	Dünne Membran (Membrandicke = 100-140 µm)
Lebensdauerziel:	50.000 h +
Degradation:	< 5 µV/h (+ 250 mV) H <sub>2</sub> Output nimmt ab
Zellspannung:	< 2 V @ 2 A/cm <sup>2</sup> Lastpunkt
Stack Temperatur:	50 – 80°C Austrittstemperatur
Druck:	30 barg ausgeglichen
Gasqualität:	H <sub>2</sub> > 99,99%

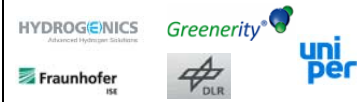
Erfüllung Meilenstein 1, März 2013.

## **AP 1.2: Anpassung des MEA Designs und Vergrößerung des MEA Formates**

Die Hauptherausforderung bei der Herstellung einer großen MEA, liegt im Umgang mit der schlechten Dimensionsstabilität der eingesetzten PFSA-Membranen. Mit zunehmender Feuchte dehnen sich diese Membranen um einige Prozent aus und schrumpfen bei nachlassender Feuchte auch wieder zusammen. Aus diesem Grunde, wurden umfangreiche Untersuchungen an dieser

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Membran bei unterschiedlichen Temperaturen und Feuchten durchgeführt, um Aufschluss über das Kontraktions- und Expansionsverhalten bei den verschiedenen Prozessschritten zu erhalten.

Die Dimension der Membran hängt sehr stark von der Temperatur und der relativen Feuchte der Umgebung ab. Alle Prozessschritte für die Herstellung der MEA und die spätere Montage in den Zellenstapel, sollten unter den gleichen klimatischen Bedingungen erfolgen, um die Einhaltung der Toleranzen zu gewährleisten. Das MEA Zielformat wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern auf >1500 cm<sup>2</sup> aktive Fläche festgelegt.

Der Fokus der Greenerity Arbeiten in diesem Arbeitspaket, lag in der Prüfung der Machbarkeit des neuen MEA Formates. Hierfür wurden die Materialverfügbarkeiten der einzelnen Rohstoffe in der benötigten Größe bzw. Menge überprüft.

Essenziell für die Reduktion der MEA Herstellungskosten, ist eine optimale Verwertung der zur Verfügung stehenden Rollenbreite der Membran. Die Länge und Breite des neuen MEA Designs, wurde zusammen mit Hydrogenics so ausgewählt, dass möglichst kein Verschnitt entsteht und somit die Membran bestmöglich ausgenutzt wird.

Parallel zur Optimierung der Materialausnutzung wurde auch die Eignung der MEA Fertigungsaggregate geprüft. Hierfür wurden alle MEA Herstellungsschritte, Pastenherstellung, Zuschnitt der Membran, Beschichtung der Elektroden in der benötigten Breite, Lamination der CCM (Catalyst-Coated-Membrane), Endschnitt der MEA, Verpackung etc. analysiert und die Machbarkeit des neuen MEA Formates beurteilt. Anschließend wurde ein Zeitplan für die notwendigen Optimierungsarbeiten und ggf. Neubeschaffung von Fertigungsaggregaten erstellt und mit dem Projekt- und Meilensteinplan abgeglichen.

Der Greenerity Meilenstein 2 (Aussage zur Machbarkeit des neuen MEA Formats) wurde mit dem Abschluss der Entwicklungsstudie erfüllt. Die Machbarkeit des neuen MEA Formats wurde von Greenerity Ende März 2013 bestätigt.

### AP 1.3: Optimierung der Elektrolyse MEA in Bezug auf Leistung

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden Methoden und Testprotokolle zur Kurzzeit- und Langzeitcharakterisierung entwickelt. Die Durchführung von in-situ und ex-situ Charakterisierungen an ausgewählten MEAs wurde abgestimmt und Zeitpläne für die Musterfertigung mit den Projektpartnern erarbeitet.

Der Fokus bei den Entwicklungsarbeiten lag auf der Leistungsübertragung der Greenerity MEA auf das neue Zielformat. Die Anpassungs-, Optimierungs- und Hochskalierungsarbeiten in AP 1.5 werden mittels elektrochemischer Messung überwacht und somit die Erreichung der spezifizierten Leistungsziele der MEA sichergestellt.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

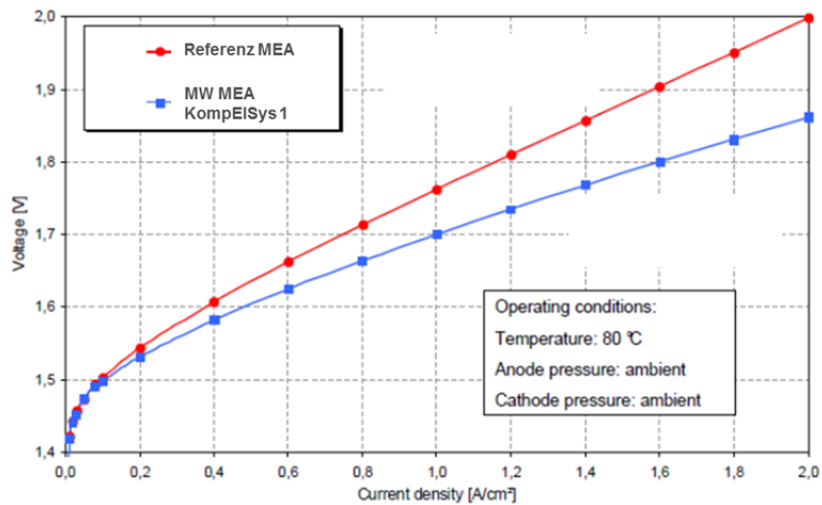
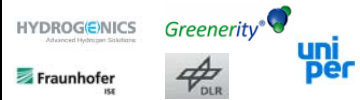


Abbildung 53: Leistungsanalyse bei 80 °C in einem 25 cm<sup>2</sup> Zelldesign. Leistungsvergleich der Greenerity Referenz MEA mit der neu entwickelten MW MEA Generation KompEISys 1

Die rote Kurve zeigt die Leistung der Greenerity Referenz MEA. Diese MEA wurde mit einer Standard Membrandicke von 150-200 µm hergestellt. Die blaue Kurve wurde mit der für das Projekt spezifizierten Membranstärke von 100-140 µm gemessen. Durch den Einsatz der dünneren Membran, wurde eine deutliche Leistungssteigerung erzielt.

Zur Überprüfung der neuen MEA Fertigungsverfahren wurden aus großen MEAs kleine 25 cm<sup>2</sup> Muster aus verschiedenen Bereichen von MEAs ausgeschnitten und die Leistung gemessen.

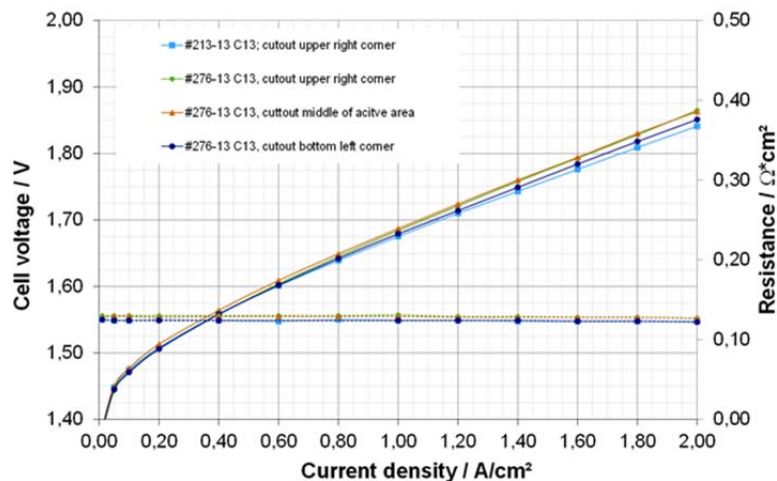
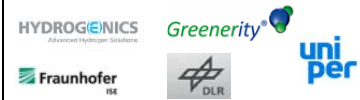


Abbildung 54: Leistungsanalyse von 25 cm<sup>2</sup> MEA Ausschnitten aus großen MEAs bei 80°C. MW MEA Generation KompEISys 1

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Ergebnis: Die Messwerte aller Proben liegen im Bereich der zu erwartenden Standardabweichung. Die Optimierung der Fertigungsprozesse für die Herstellung der KompEISys 1 MEA mit verbesserter Leistung, wurde erfolgreich umgesetzt. Erfüllung Meilenstein M3, April 2014. Weitere Details der Qualifizierung und Übertragung der Fertigungsprozesse, siehe AP 1.5.

## AP 1.4: Implementierung eines Elektrolyse Teststandes

Um Leistungsanalysen der neu entwickelten MEAs gemäß der Spezifikation durchführen zu können, wurde ein neuer Teststand konzipiert und aufgebaut. Inbetriebnahme des Teststands erfolgte im Juli 2013 (Meilenstein 4).

In dem Teststand wurden die im Projekt eingesetzten Rohstoffe, optimierten Fertigungsverfahren und Endprodukte elektrochemisch verifiziert. Der Großteil der Messungen wurde in einer von Greenerity entwickelten Einzelzelle mit einer aktiven Fläche von 25 cm<sup>2</sup> durchgeführt. Über den gesamten Projektverlauf, wurde der Aufbau dieser Zelle optimiert. Ziel war es, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Je nach verwendeter Zellenkonfiguration, sind somit leichte Abweichungen der Messwerte über die Projektlaufzeit aufgetreten.

Testung in Short-Stacks:

Um den Teststand effektiver nutzen und mehrere Messungen parallel durchführen zu können, wurde ein 10 Zeller Stack von einem externen Lieferanten Ende 2013 zugekauft.

Der Stack musste konstruktionsbedingt, im Gegensatz zu der in AP 1.1 festgelegten Spezifikation, mit 15 bar Differenzdruck betrieben werden. Die Änderung der Betriebsweise, hat jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Aussagekraft der Ergebnisse. Nach der erfolgreichen Integration in den neuen Teststand, wurden Kurzzeit-Leistungsanalysen mit dem 10-Zellen-Stack durchgeführt. Hierfür wurden jeweils 5 MEAs mit der Zielbeladung und 5 MEAs mit reduzierter Edelmenge in den Stack eingebaut.

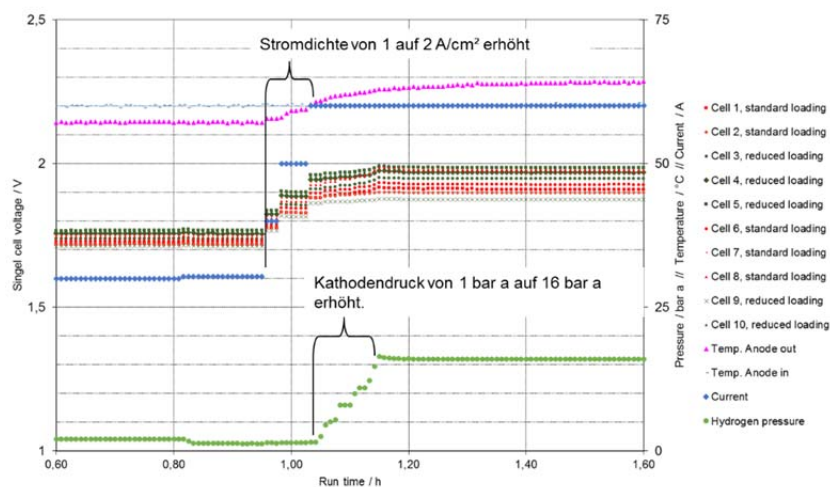


Abbildung 55: Leistungsanalyse im 10 Zellen Stack

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

Um die Eignung der neuen Hardware zu überprüfen, wurde der Kathodendruck von 1 bara auf 16 bara erhöht und die Stromstärke von 1 A/cm<sup>2</sup> auf 2 A/cm<sup>2</sup> gesteigert. Bei allen Betriebsbedingungen lagen die Leistungswerte (Spannungen) im erwarteten Bereich und sind mit den Ergebnissen in den 25 cm<sup>2</sup> Einzelzellen vergleichbar.

Nach der erfolgreichen Funktionsprüfung der neuen Hardware, wurde ein 1000 Stunden Lebensdauertest durchgeführt.

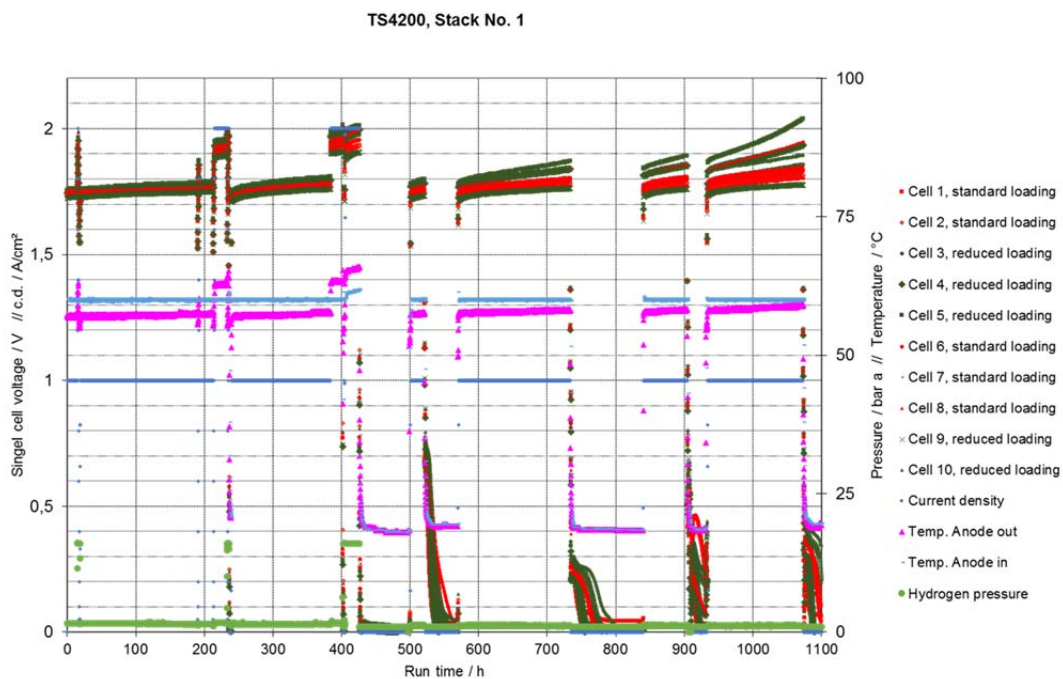


Abbildung 56: Lebensdaueranalyse der Greenery MEAs im 10 Zellen Stack

Die Nettolaufzeit der Analyse betrug ca. 800 Stunden. Die Ergebnisse des Dauertests liegen deutlich hinter den Erwartungen. Die gemessenen Degradationsraten von 65 – 350  $\mu\text{V}$  / Stunde sind viel zu hoch. Lebensdaueranalysen der von Greenery entwickelten MEA Generation in anderen Zellen ergaben eine Alterungsrate von  $< 5 \mu\text{V}$  / Stunde.

Die in diesem Versuch eingesetzte Hardware, ist nicht repräsentativ für die von Hydrogenics entwickelten Stacksysteme und hat somit auch keine Auswirkungen auf die Erreichung der Projektziele.

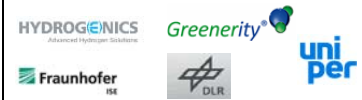
Mögliche Ursachen für die sehr hohen Degradationsraten:

- Verringerung der Kompression/Anpressung der Komponenten über den Versuchszeitraum. Durch die schlechtere Kontaktierung wird der elektrische Widerstand erhöht und die Leistung der MEA gemindert.
- Oxidation der in der Zellhardware eingesetzten Anodenkollektoren



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Die Lebensdaueranalyse der Greenerity MEAs in der 10 Zellen Hardware, wurde nach ca. 800 h Laufzeit abgebrochen. Zur Ursachenanalyse wurden in-situ die Widerstände der Zellen und die Gasreinheiten (Wasserstoffanteil im Sauerstoff und der Sauerstoffgehalt im Wasserstoff) gemessen. Die MEAs wurden anschließend ausgebaut und detaillierte ex-situ Analysen durchgeführt. Hierfür wurden Verfahren wie die Rasterelektronenmikroskopie zur Analyse der MEA Oberflächen und Querschnitte als auch Röntgenspektroskopie (EDX) eingesetzt um Aufschluss über die Elementverteilung der MEA zu erhalten.

Die Auswertungen der in-situ und ex-situ Untersuchungen, haben keine erkennbare Alterung der MEAs aufgezeigt. Der Leistungsverlust konnte somit klar der neuen Zellhardware zugeordnet werden.

Die Ergebnisse der Lebensdaueranalyse wurden dem Hersteller der Stackhardware präsentiert und mögliche Optimierungen diskutiert. Leider konnten keine kurz- und mittelfristig umsetzbaren Lösungen zur Stabilisierung der Zellspannungen erarbeitet werden. Aus diesem Grunde wurde der 10 Zellen Stack ab Februar 2014 nicht mehr für die Durchführung von Langzeit-Lebensdaueranalysen eingesetzt.

Die Anstrengungen eine geeignete Stackhardware zu identifizieren und zu beschaffen wurde noch einmal verstärkt. Im ersten Halbjahr 2015 konnte schließlich eine neue Hardware am Markt gefunden werden, welche die sehr hohen Anforderungen in Bezug auf Qualität, Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, Flexibilität und Kostenkriterien erfüllt. Diese Hardware wurde beschafft und in den Teststand der Greenerity integriert. Die Inbetriebnahme des neuen 10 Zellen-Stacks wurde im Juni 2016 gestartet. Hierfür wurden erste Leistungsanalysen durchgeführt und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse überprüft.

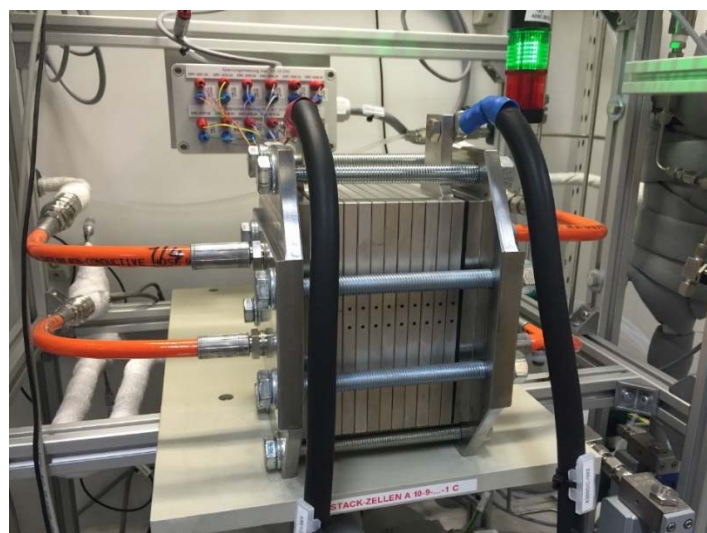


Abbildung 57: Neuer 10 Zellen Stack

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

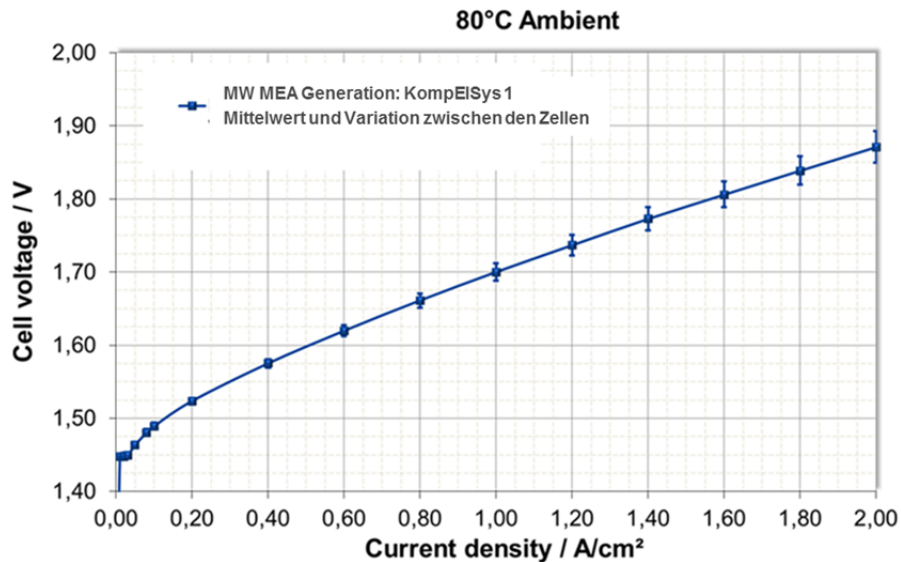


Abbildung 58: Inbetriebnahme und Leistungsanalyse des neuen 10 Zellen Stacks mit der neu entwickelten MW MEA Generation KompEISys 1

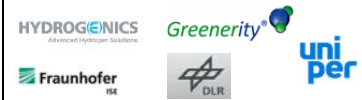
Die sehr guten Leistungswerte entsprechen den Erwartungen. Die Abweichungen der 10 Zellen zueinander, siehe Fehlerbalken, sind sehr klein und die neue Hardware kann somit die hohen Qualitätsanforderungen an die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sehr gut erfüllen. In den kommenden Wochen ist der Start einer 2000 Stunden Lebensdaueranalyse geplant. Hierfür werden 2 MEAs vom Typ KompEISys 1 als Referenz und 4 Varianten der neu entwickelten MEA Generation KompEISys 2 getestet. Die Varianten der KompEISys 2 wurden mit unterschiedlichen Katalysatorbeladungen gefertigt, um den Einfluss der Edelmetallmenge über die Laufzeit analysieren zu können. Die Durchführung dieser Leistungs- und Lebensdaueranalyse wird weit über die Projektlaufzeit hinaus erfolgen und die Ergebnisse werden in die Produktentwicklung neuer MEA Generationen einfließen.

## AP 1.5: Musterfertigung und Übertragung der MEA in die Produktion

Die in den anderen APs geleisteten Entwicklungsarbeiten an der Mikro- und Nano-Struktur der Katalysatorschichten, die Beschichtungs- und Laminationstechnologie sowie alle weiteren Fertigungsabläufe werden in den Produktionsmaßstab (MEA Scale-up) überführt. Im Scale-up wurden wichtige Fertigungsdaten (Einhaltung von Fertigungs- und Formattoleranzen, Ausschussraten etc.) der MEA gesammelt und für die Produktion von größeren Stückzahlen optimiert.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Der Entwicklungsfokus für die Projektjahre 2013 und 2014 lag auf der Erfüllung der Meilensteine M5 und M6:

- Lieferung von 30 - 50 MEAs im Zielformat ( $>1500 \text{ cm}^2$ ) für den Aufbau eines Short Stacks bei Hydrogenics (Meilenstein 5: Juli 2013)
- Lieferung von 250 - 300 MEAs im Zielformat ( $>1500 \text{ cm}^2$ ) für den Aufbau der 1 MW Anlage (Meilenstein 6: Juli 2014)

Die MEA Fertigungsprozesse wurden somit stufenweise optimiert, um den aufgestellten Zeit- und Meilensteinplan einhalten zu können. Im ersten Halbjahr 2013, wurde an folgenden Schwerpunkten gearbeitet:

- Optimierung der Pastenrheologie und Anpassung an die neue Beschichtungstechnologie, um Katalysatorelektroden in der benötigten Größe herstellen zu können
- Optimierung der Beschichtungsparameter mit dem Ziel eine homogenere Edelmetallbeladung und eine Verbesserung der Beschichtungsqualität zu erreichen
- Optimierung der MEA Fertigung, Lamination der Komponenten zu einer 3 Lagen MEA

Nach dem Abschluss der ersten Optimierungsphase, konnten MEA Muster im  $25 \text{ cm}^2$  und  $120 \text{ cm}^2$  Design gefertigt und im August 2013 an die Projektpartner geliefert werden. Der Meilenstein 5 wurde im September 2013 mit der Fertigung und Auslieferung der ersten 30 MEA im neuen  $>1500 \text{ cm}^2$  Zielformat erfüllt.

Fokus der zweiten Optimierungsstufe (ab Oktober 2013), lag auf der weitergehenden Etablierung der neuen Herstellungsprozesse und der MEA Fertigung für das 1 MW PEM Elektrolysesystem (M6). Um die Hydrogenics Qualitätsvorgaben und die MEA Fertigungstoleranzen von Greenerity in Einklang zu bringen, wurde eine umfangreiche und detaillierte vorläufige Produktspezifikation erstellt. In diesem Dokument, wurden alle relevanten Aspekte für die Einhaltung einer reproduzierbaren Produktqualität erfasst und somit die Auslieferung von MEAs mit einem sehr hohen Qualitätsstandard sichergestellt, auch wenn durch die extrem geringe Stückzahl tatsächlich nur eine Musterfertigung auf Entwicklungslevel erwartet werden konnte.

Zur Verbesserung des MEA Fertigungsprozesse, wurden mehrere Herstellungsschritte optimiert und die Wirksamkeit der Maßnahmen mit der Fertigung von Muster-MEAs nachgewiesen. Die Qualität der mit dem neuen Fertigungsverfahren hergestellten MEAs, konnte deutlich verbessert und der Prozess stabilisiert werden.

Im Januar 2014 wurde in Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern, ein neuer Zeitplan für die Produktion und Auslieferung der MEAs erstellen.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

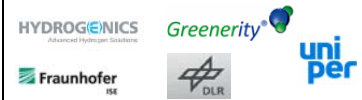


Tabelle 13: Planung der MEA Fertigung für das 1 MW PEM Elektrolyse System

	Januar 2014			Februar 2014			März 2014			April 2014						
	KW 3	KW 4	KW 5	KW 6	KW 7	KW 8	KW 9	KW 10	KW 11	KW 12	KW 13	KW 14	KW 15	KW 16	KW 17	KW 18
Herstellung der Anodenelektroden																
Optimierung der MEA Fertigungsprozesse																
Herstellung der Kathodenelektroden																
MEA-Fertigung																
Qualitätskontrolle																
Verpackung																
Versand																

Die MEA Produktion für den MW Stack wurde planmäßig gestartet. Die Qualität der eingesetzten Rohstoffe und die Einhaltung der vereinbarten MEA Spezifikation für die Zwischen- und Endprodukte wurden kontinuierlich über den gesamten Fertigungsprozess überwacht.

Aus der laufenden Produktion, wurden MEA Stichproben entnommen und die elektrochemische Leistung überprüft.

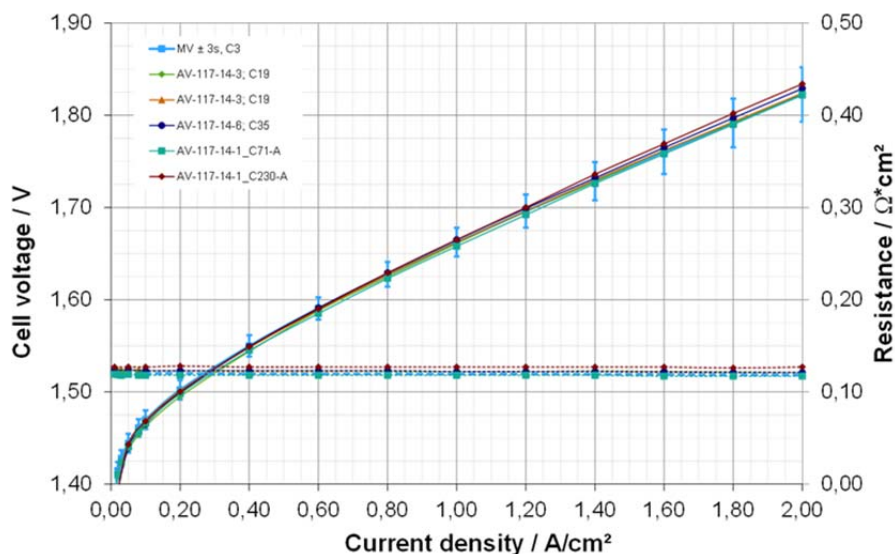


Abbildung 59: Elektrochemische Qualitätskontrolle der Endprodukte (MEAs)

Die Leistungswerte der KompEISys 1 MEAs aus dem neuen Fertigungsprozess, wurden mit dem Mittelwert (MV +/-3 s) aus über 20 Messungen von MEAs, welche mit dem „alten“ Standard Fertigungsverfahren hergestellt wurden, verglichen. Die Leistungen der MEAs sind über den gesamten Produktionsprozess sehr homogen und liegen innerhalb der spezifizierten Werte.

Im Rahmen der weiteren Qualitätskontrolle, wurden die Vorgaben für die Gasqualität geprüft und mit verschiedenen MEAs Messungen durchgeführt.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

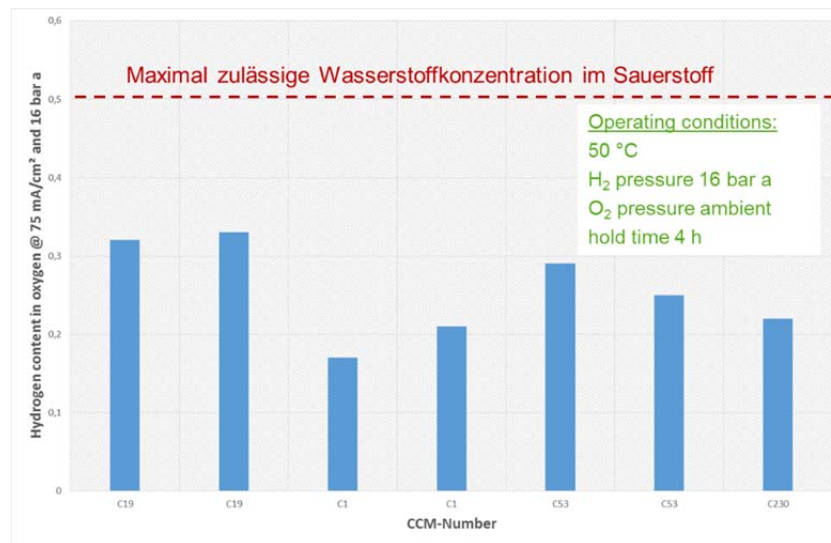


Abbildung 60: Analyse der Gasreinheit, Wasserstoffgehalt im Sauerstoff

Ergebnis: Alle Werte liegen unterhalb der maximal zulässigen Wasserstoffkonzentration im Sauerstoffgas.

Ende April 2014 wurden 281 MEAs vom Typ KompEISys 1 im neuen MEA Design an Hydrogenics ausgeliefert (Erfüllung Meilenstein M6). Der im Vergleich zur ursprünglichen Planung vorverlegte Meilenstein, konnte somit termingerecht eingehalten werden.

Die von Greenerity an Hydrogenics gelieferten MEAs, hatten eine sehr hohe Produktqualität. Der 1 MW Stack konnte von Hydrogenics in einem Zug aufgebaut werden. Alle Zellen waren auf Antrieb dicht und eine Austausch von Zellen nicht notwendig.

Ab Mai 2014 wurden die Arbeiten im AP 1.5 in zwei Bereiche unterteilt:

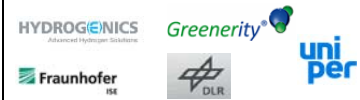
1. Verbesserung der Produktqualität und Stabilisierung der Fertigungsprozesse
2. Musterfertigung der in den AP 1.7 bis 1.9 neu entwickelten Forschungsprodukte und Prüfung der Übertragbarkeit in die Produktion.

## 1: Verbesserung der Produktqualität und Stabilisierung der Fertigungsprozesse

Ziel ist die Herstellungsschritte und Fertigungsabläufe für die neue MEA Generation KompEISys 1 zu stabilisieren, die Produktqualität zu verbessern, Ausschussraten zu reduzieren und somit mittelfristig die Herstellungskosten zu senken.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



An folgenden Schwerpunktthemen wurde gearbeitet:

- Optimierung der Katalysatorpasten Rezeptur und Vereinfachung der Herstellung
- Hochskalierung der Pasten Fertigung
- Hochskalierung und Optimierung der Katalysatorbeschichtung
- Optimierung der MEA Herstellung
  - MEA Laminationsprozess wurde verbessert
  - Ausschussraten wurden reduziert
  - Produktqualität wurde gesteigert

## Optimierung der Katalysatorpasten Rezeptur und Vereinfachung der Herstellung:

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit, wurden 4 Chargen der neu entwickelten Kathoden-Katalysatorpasten hergestellt und elektrochemisch getestet.

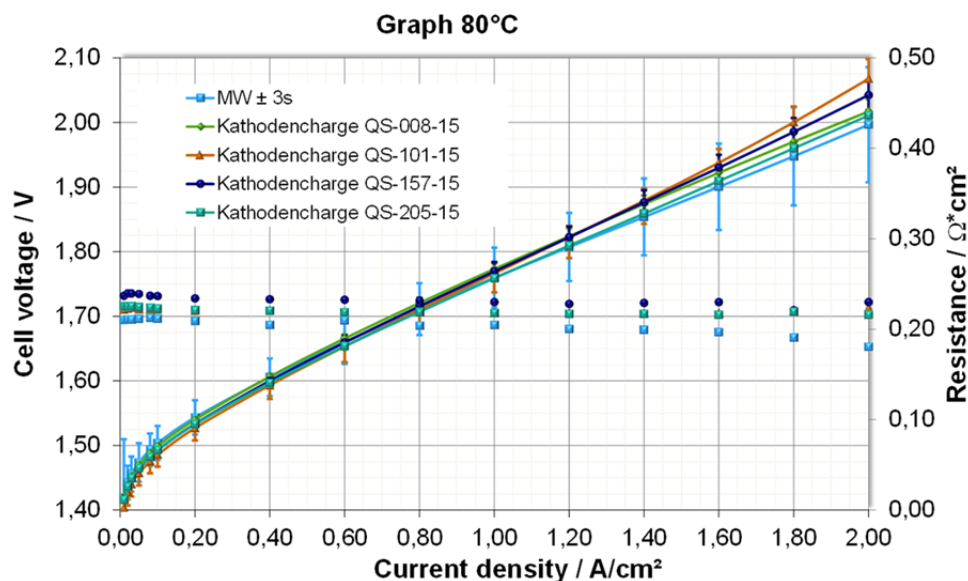


Abbildung 61: Überprüfung der Reproduzierbarkeit der neuen Kathoden-Katalysatorpaste

Mit der neuen Pastencharge 008-15 und 205-15 wurde eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielt. Bei den Pastenchargen 101-15 und 157-15 wurde jedoch eine Erhöhung der Spannungswerte bei Stromstärken größer  $1 \text{ A}/\text{cm}^2$  beobachtet. Es wurde eine umfangreiche Ursachenanalyse der gesamten Fertigungskette durchgeführt. Durch Optimierungen im Bereich der Pastenherstellung und Verarbeitung konnte der Spannungsanstieg verhindert und die Leistung zurück auf die Mittelwertkurve gebracht werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

Die Rezeptur der Anoden-Katalysatorpaste wurde ebenfalls optimiert und die Reproduzierbarkeit der Herstellung überprüft. Hierfür wurden mehrere Chargen hergestellt und elektrochemisch charakterisiert.

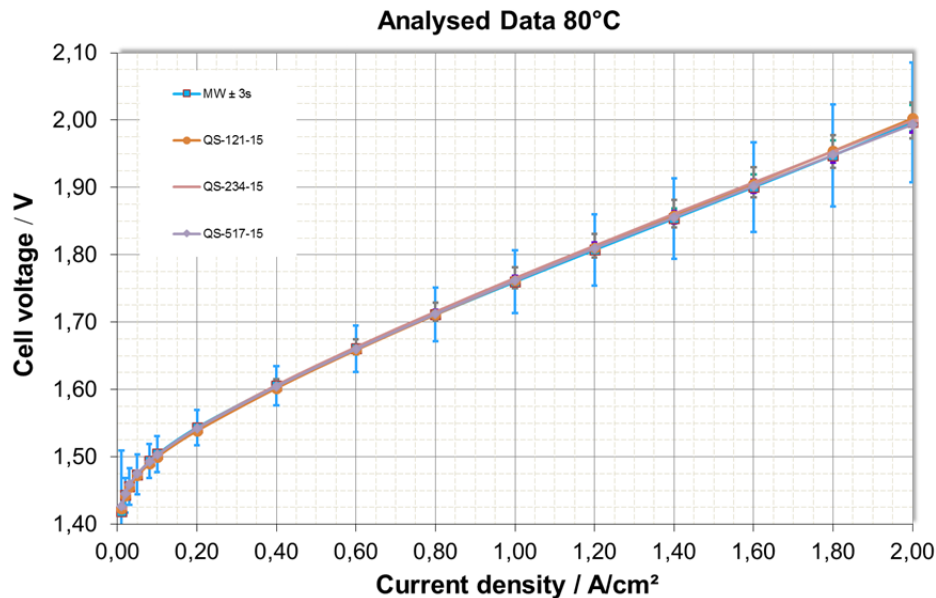


Abbildung 62: Leistungsanalyse der neuen Anoden-Katalysatorpaste

Die hergestellten Chargen 121-15, 234-15 und 517-15 zeigen die zu erwartende Leistung und dokumentieren damit die erfolgreiche Umstellung der Pastenrezeptur.

## Hochskalierung der Pasten Fertigung:

Die Anforderungen an die Herstellung von größeren Pastenmengen wurden erarbeitet und die Prozesse entsprechend optimiert. Bei der Übertragung auf größere Aggregate, wurde auf die Konstanzhaltung der physikalischen Eigenschaften der Katalysatorpasten geachtet. Nach Abschluss der Arbeiten ist Greenerity nun in der Lage, die optimierten Pasten in den für die Fertigung von großen MEA Stückzahlen benötigten Mengen herzustellen.

## Hochskalierung und Optimierung der Katalysatorbeschichtung:

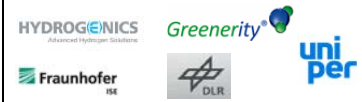
Die in größeren Aggregaten und nach den neuen Rezepturen hergestellten Pasten, wurden von einer Pilotanlage auf eine industrielle Beschichtungsanlage übertragen. Die Rheologien der Pasten wurden an die höheren Beschichtungsgeschwindigkeiten angepasst. Gleichzeitig wurden Optimierungen der Trocknungsprofile und der damit verbundenen Elektrodenschichtausbildung durchgeführt.

## Optimierung der MEA Herstellung:

Die MEA Fertigungsprozesse wurden verbessert, Ausschussraten reduziert und die Produktqualität der KompEISys 1 MEA Generation deutlich gesteigert.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



### 2: Musterfertigung der in den AP 1.7 bis 1.9 neu entwickelten Forschungsprodukte und Prüfung der Übertragbarkeit in die Produktion

Die im AP 1.7 bis 1.9 entwickelten Komponenten und Produkte werden in diesem Arbeitspaket gefertigt und bei Bedarf den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Ausgewählte Komponenten und Produkte werden in den Produktionsmaßstab (Scale-up) überführt.

Die Konzept MEA KompEISys 2 wurde bereits mehrfach als kleine MEA (25 cm<sup>2</sup>) hergestellt und elektrochemisch getestet (siehe AP 1.6 und AP 1.9). Bei dieser neuen MEA Generation, wurde die Edelmetallbeladung um > 50% reduziert. Diese Optimierung wurde ohne Leistungsverlust und ohne Reduktion der Lebensdauer (1000 Stunden Test) umgesetzt.

Ziel in den letzten 3-4 Projektmonaten war, das Format der MEA auf >1500 cm<sup>2</sup> zu vergrößern und die MEA Fertigung in den Produktionsmaßstab zu überführen. Hierzu wurden die Fertigungsabläufe an die neue MEA Generation angepasst.

Die MEA Generation KompEISys 2, musste hierfür alle Optimierungsschritte der KompEISys 1 MEA durchlaufen.

#### Hochskalierung der Pasten Fertigung

Die Anforderungen an die Herstellung von größeren Pastenmengen wurden erarbeitet und die Prozesse entsprechend optimiert. Die Pastenherstellung für die KompEISys 2 MEA wurde auf insgesamt 3 Aggregaten durchgeführt; Labormaßstab, Pilotmaßstab und Produktionsmaßstab.

#### Hochskalierung und Optimierung der Katalysatorbeschichtung

Die in größeren Aggregaten und nach den neuen Rezepturen hergestellten Pasten, wurden von der Pilotanlage auf eine industrielle Beschichtungsanlage übertragen.

Die Beschichtung der KompEISys 2 Elektroden wurde im Laufe der Hochskalierung auf 3 Aggregaten durchgeführt; Handmuster im Labormaßstab, Pilotmaßstab und Produktionsmaßstab.

#### MEA Herstellung:

Die Fertigung von ersten MEAs im Zielformat >1500 cm<sup>2</sup> konnte im letzten Projektmonat realisiert werden. Diese Muster wurden an den Projektpartner Hydrogenics geschickt. Dort werden die MEAs in den laufenden Short-Stack (siehe AP 1.6) integriert. Die Durchführung von Leistungs- und Lebensdaueranalysen wird über die Projektlaufzeit hinaus erfolgen und die Ergebnisse in die weitere Produktentwicklung einfließen.

#### AP 1.6: Verbesserung der Lebensdauer (Extrapolation auf 50.000 Stunden)

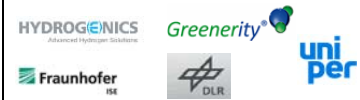
Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden Workshops zum Thema Lebensdauer abgehalten. In diesen Workshops wurden Testprotokolle erarbeitet und Überwachungskonzepte für den Betrieb des Elektrolyse Systems entwickelt. Für die Lebensdauerprognose und Extrapolation der Ergebnisse auf bis zu 50.000 Stunden wurden Testprotokolle für die Durchführung von Schnellalterungs-versuchen erarbeitet (Meilenstein 7).

Zur Unterstützung der Greenery Arbeiten wurden vom Fraunhofer ISE Schnellalterungsmethoden zur Bestimmung von Alterungsmechanismen in der MEA untersucht und Lebensdaueranalysen



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



durchgeführt. Ziel dieser Arbeiten war die Korrelation der Schnellalterungstests mit den Ergebnissen der Lebensdaueranalyse im realen Betrieb.

Hierfür wurde im ersten Schritt die Leistung der Greenery MW MEA KompEISys 1 in einem Temperaturbereich von 40°C bis 80°C und einem Druck von 1 bar bis 50 bar untersucht. Die gemessenen Werte erfüllen die mit Hydrogenics vereinbarten Leistungsanforderungen und decken sich mit den bei Greenery erzielten Ergebnissen.

Nach der erfolgreichen Leistungsanalyse wurde ein 900 Stunden Lebensdauertest mit den spezifizierten Betriebsbedingungen durchgeführt. Das Ergebnis der Analyse wurde leider durch einen technischen Defekt am Teststand stark beeinflusst. Eine belastbare Aussage über die Stabilität der MEA konnte somit leider nicht gemacht werden.

## Lebensdaueranalyse verschiedener MEA Generationen:

Bei Greenery wurden Lebensdaueranalysen in 25 cm<sup>2</sup> Einzelzellen mit drei verschiedenen MEA Varianten durchgeführt:

Referenz MEA : Standard Membrandicke und Standard Edelmetallbeladung

KompEISys 2: Standard Membrandicke und reduzierte Edelmetallbeladung

KompEISys 3: Reduzierte Membrandicke (50-90 µm) und Standard Edelmetallbeladung

Ziel dieser Analyse war, den Einfluss einer reduzierten Membrandicke und einer verringerten Edelmetallbeladung auf die Lebensdauer der MEA zu untersuchen.

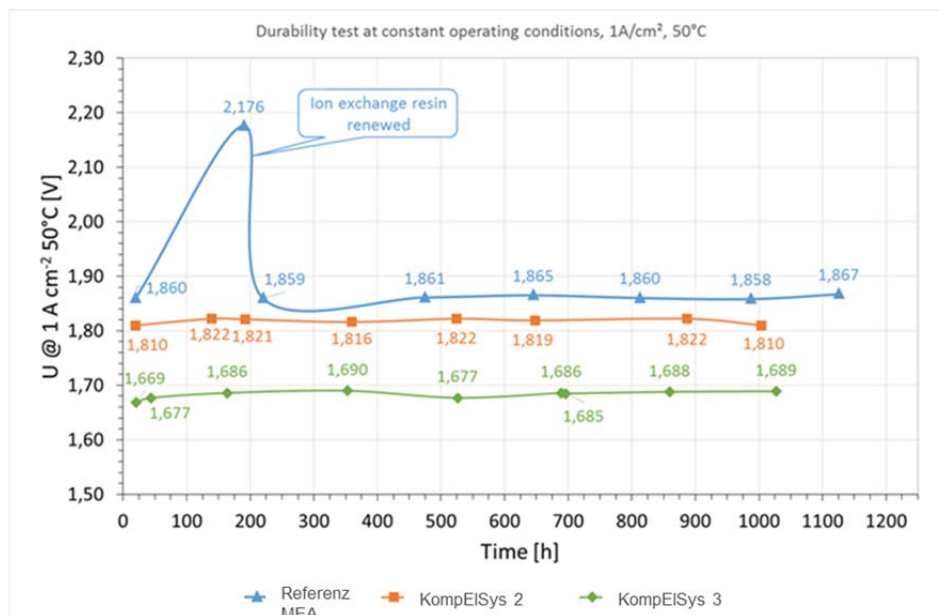
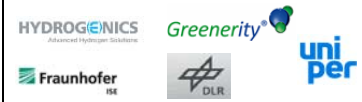


Abbildung 63: Lebensdaueranalyse der KompEISys 3 MEA mit einer 50-90 µm dicken Membran (grüne Linie) im Vergleich mit 2 MEA Varianten mit 150-200 µm dicken Membranen, Referenz MEA (blaue Linie) und der KompEISys 2 MEA (orange Linie) mit reduzierter Edelmetallbeladung

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Die MEAs wurden mit einer Temperatur von 50°C und einer Stromstärke von 1 A/cm<sup>2</sup> ca. 1000 Stunden im Dauertest betrieben. Bei allen MEAs sind keine Alterungserscheinungen nach dem Versuchslauf messbar.

Lebensdaueranalyse der Greenerity MW MEA KompElSys 1 im Zieldesign:

Im September 2013 wurden die ersten MEAs im Zieldesign an den Projektpartner Hydrogenics (siehe AP 1.5) ausgeliefert. Mit diesen MEAs, wurde ein Short-Stack aufgebaut. Das Design dieses Stacks, ist identisch mit dem Stack der 1 MW Anlage. Ziel dieses Vorversuches war, die Einhaltung der zu Projektbeginn vereinbarten vorläufigen Spezifikation für das PEM Elektrolyse System zu überprüfen. Diese Versuche wurden sehr früh im Projektverlauf durchgeführt, um ggf. bei Abweichungen und unerwarteten Schwierigkeiten die Möglichkeit zur Nachbesserung zu haben.

Die Leistung der MEAs entspricht der vorläufigen Spezifikation. Nach einer Laufzeit von ca. 3000 Stunden mit einer Stromstärke von 2 A/cm<sup>2</sup> sind noch keine Degradationseffekte messbar (Erfüllung Meilenstein 8).

Die Meilensteine 9 und 10, MEA Lebensdaueranalyse im realen Betrieb des 1 MW PEM Elektrolyseurs, konnten leider nicht erfüllt werden. Die Anlage in Reitbrook wurde nur ca. 600 Stunden im Rahmen des Projekts betrieben. Belastbare Aussagen über mögliche Degradationsmechanismen der Stackhardware oder der MEA, sind deshalb leider nicht möglich.

### AP 1.7: Verbesserung der Stack-Effizienz durch den Einsatz dünner Membranen

Durch die Konzentration der Ressourcen auf die Zielerreichung in den Arbeitspaketen AP 1.3 – AP 1.5 wurden die Arbeiten in den APs 1.7 – 1.9 erst im Mai 2014 gestartet.

Für die Auswahl von dünnen Membranen wurden folgende Eigenschaften definiert:

- Kommerzielle Verfügbarkeit, kein Einsatz von Forschungsmaterialien
- Verfügbarkeit der Membran in der benötigten Größe
- Membran muss für einen sicheren Produktionsprozess geeignet sein

Die folgende Abbildung 64 zeigt den Einfluss der Membrandicke auf die Systemeffizienz und die benötigte Energiemenge für die Erzeugung von 1 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff. Diese Parameter werden jedoch nicht nur durch die Membrandicke, sondern auch von vielen anderen Faktoren beeinflusst. Aktuell ist bei dem Einsatz von dünneren Membranen, mit einer Reduktion der Lebensdauer zu rechnen. Ziel in diesem Arbeitspaket ist es, den besten Kompromiss mit kommerziell verfügbaren Membranen zwischen verbesserter Effizienz (Leistung) und Lebensdauer zu finden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

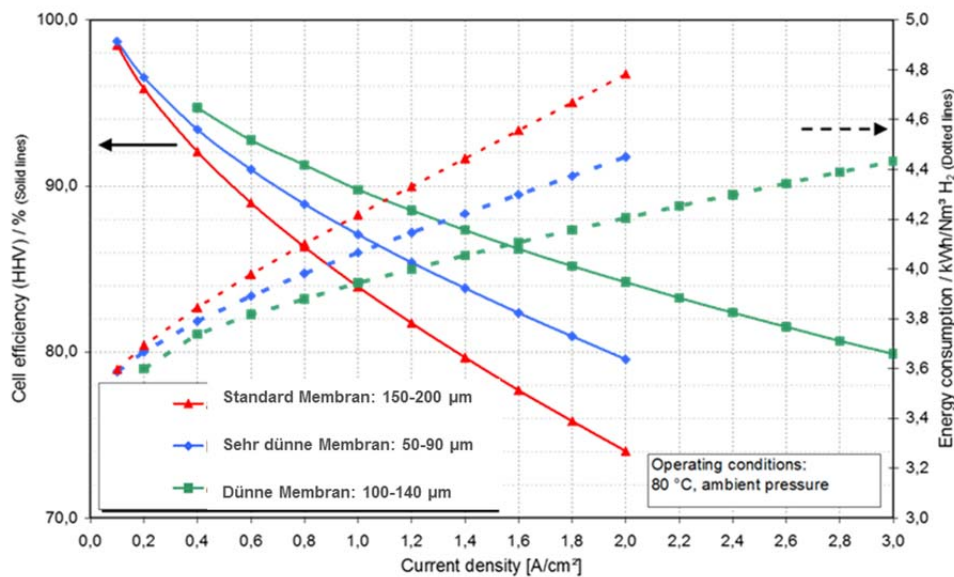


Abbildung 64: Einfluss der Membrandicke auf die System Effizienz und die benötigte Energiemenge für die Erzeugung von 1 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff

Auf dem Markt wurde nach Membranen gesucht, welche die oben aufgelisteten Kriterien erfüllen. Leider konnte in der ersten Projekthälfte, nur eine einzige kommerziell verfügbare Membran (Greenery interne Membranbezeichnung M-0413) mit einer Dicke von 50-90 µm ausgewählt werden. Alle anderen getesteten Membranen, sind entweder von schlechter Qualität oder werden nicht kommerziell angeboten.

Die Membranauswahl und die Grundlagenentwicklung der neuen KompEISys 2 MEA Generation (siehe auch AP 1.9) wurden in einem anderen Förderprojekt durchgeführt und finanziert. Gemäß dem Verwertungsplan, wurden die Grundlagenenergebnisse in diesem Projekt genutzt und darauf aufbauende Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Fokus der Arbeiten war die Skalierbarkeit auf eine MEA Format mit >1500 cm<sup>2</sup> zu prüfen und die Fertigungsprozesse zu optimieren. Weitere Schwerpunkte waren die Kombination der dünnen Membran mit dem Arbeitspaket AP 1.8 MEA Randkonzeptentwicklung für den Einsatz dünner Membranen und dem Arbeitspaket AP 1.9 Optimierung der Edelmetallbelastung bezüglich Leistung und Lebensdauer.

Das für die Greenery MW MEA KompEISys 1 entwickelte Katalysatorelektrodensystem, wurde auf die neue 50-90 µm dicke Membrantechnologie (M-0413) übertragen und Leistungsanalysen mit der neu entwickelten KompEISys 3 MEA durchgeführt.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

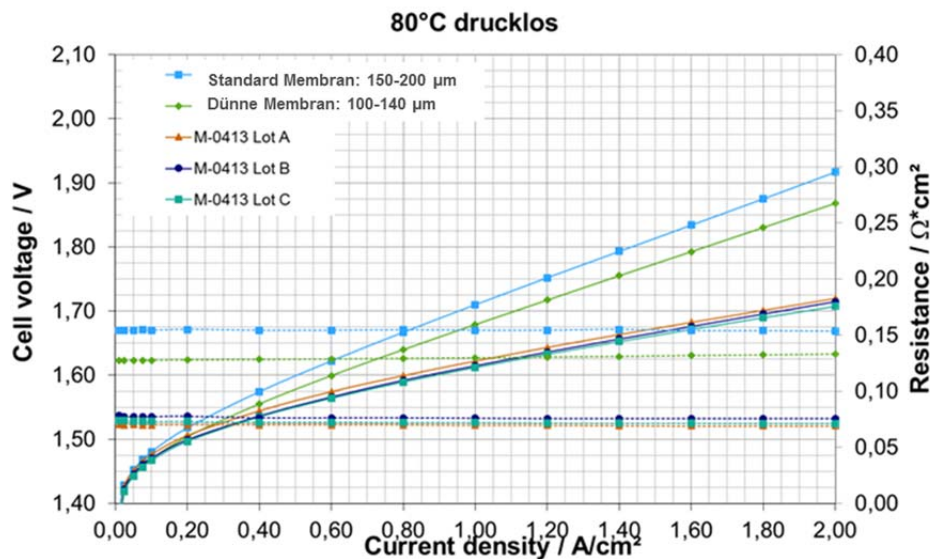
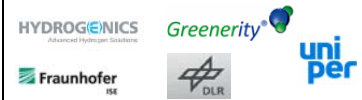


Abbildung 65: Leistungsvergleich einer 50-90 µm dicken Membran mit einer 100-140 µm und einer 150-200 µm dicken Membran. Alle MEAs haben die gleiche Katalysatorbeladung

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz der sehr dünnen Membran die benötigte Spannung signifikant reduziert und somit die Energieeffizienz des Systems gesteigert werden kann. Der Einsatz von dünneren Membranen, hat aber auch einige Nachteile. Die Permeation des Wasserstoffs (Crossover) durch die Membran steigt z.B. deutlich an.

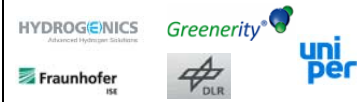
Tabelle 14: Einfluss der Membrandicke auf die Gasreinheit mit und ohne Mitigation

Membrandicke [µm]	H <sub>2</sub> in O <sub>2</sub> @ 50°C, 6 bar Kathode, 1 bar Anode, 250mA/cm <sup>2</sup> , ohne Mitigation	H <sub>2</sub> in O <sub>2</sub> @ 50°C, 16 bar Kathode, 1 bar Anode, 75mA/cm <sup>2</sup> , mit Mitigation	O <sub>2</sub> in H <sub>2</sub> @ 35°C, 3 bar Kathode, 1 bar Anode, 1,4A/cm <sup>2</sup>
150-200	1,33%	< 0,5%	< 10ppm
100-140	1,47%	< 0,5%	< 10ppm
50-90	2,50%	< 0,5%	< 10ppm

Die Ergebnisse in Spalte 2 wurden mit MEAs ohne Optimierung (Mitigation) der Wasserstoffpermeation generiert, damit der Einfluss der Membrandicke auf die Gasreinheit aufgezeigt werden konnte. Die MW MEA Generation KompEISys 1 enthält ein Abschwächungssystem zur Minderung des H<sub>2</sub> Crossover. Dieses System zur Verbesserung der Gasqualität wurde bereits vor dem Start dieses Projektes entwickelt. Durch diese Maßnahme kann die Produktspezifikation von ≤ 0,5% H<sub>2</sub> in O<sub>2</sub> erreicht werden. Das Greenerity System zur Reduzierung (Mitigation) der Wasserstoffpermeation konnte auch erfolgreich auf die sehr dünnen Membranen (50-90 µm) übertragen werden. Durch diese Optimierung konnte die Zielvorgabe auch mit der dünnen Membran eingehalten werden. Ein sehr niedriger Sauerstoffgehalt von

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



< 10 ppm im Wasserstoff konnte für die drei getesteten Membrandicken nachgewiesen werden. Somit kann ein hochreiner Wasserstoff direkt aus dem Stack ohne Nachreinigung sichergestellt werden. Für die im MW-Stack eingesetzten MEAs wurde dieses Ergebnis im Berichtsteil der Projektpartner Fraunhofer ISE bestätigt.

Mit der kommerziell verfügbaren 50-90 µm dicken Membran wurde ein 1000 Stunden Lebensdauertest absolviert (siehe AP 1.6). Nach dem Dauertest wurden ex-situ Analysen der MEA durchgeführt, um mögliche Degradationsmechanismen zu untersuchen. Von der MEA wurden Schliffe angefertigt und die Schnittkanten mittels Elektronenrastermikroskopie (REM) analysiert.

In der REM Aufnahme ist eine deutliche Reduktion der Membrandicken nach dem Dauerstabilitätstest zu erkennen. Die Weiterentwicklung mit der 50-90 µm Dicken Membran (M-0413), MEA Generation KompEISys 3, wurde eingestellt. Dieser Sachverhalt hatte leider auch einen großen Einfluss auf die Entwicklungsarbeiten in den APs 1.8 und 1.9.

Leider konnten erst in den letzten Projektmonaten zwei neue gewebeverstärkte Membranen auf dem Markt gefunden werden, welche die Auswahlkriterien erfüllen. Die verbesserte Dimensionsstabilität gegenüber Änderungen der Luftfeuchtigkeit konnte nachgewiesen werden. Erste Leistungsanalysen wurden bereits mit den neuen Rohstoffen durchgeführt. Der Einsatz von verstärkten Membranen ist eine gute Basis für die Entwicklung neuer MEA Generationen mit verbesserter Leistung und höher Lebensdauererwartung (Meilensteine 11 und 12).

### AP 1.8: MEA Randkonzeptentwicklung für den Einsatz dünner Membranen

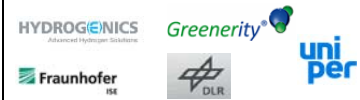
Die Erfahrung aus anderen PEM-Elektrolyse Systemen hat gezeigt, dass eine Ursache für den Ausfall von MEAs im Stack, das mechanische Versagen des Membranrands im Dichtungsbereich sein kann. Entsprechend wurde parallel mit der Hardware- und Dichtungsentwicklung die Notwendigkeit eines Randkonzepts geprüft und an dessen Realisierung gearbeitet. Das Randkonzept muss auf die Anforderungen der im Projekt neu entwickelten Bipolarplatten und Dichtungsgeometrie angepasst werden. Hierzu wurden z.B. die Randdicke und die Toleranzen zusammen mit Hydrogenics erarbeitet. Für die Materialauswahl des neuen MEA Randkonzeptes wurden Untersuchungen und Ergebnisse aus anderen Projekten (H<sub>2</sub>/Luft Brennstoffzellenanwendungen) ausgewertet und die Übertragbarkeit auf die aktuellen Anforderungen im Elektrolysebereich geprüft. Für die PEM Wasser Elektrolyse Anwendung werden deutlich höhere Anforderungen an die Stabilität des Randmaterials und der Klebeverbindung, im direkten Vergleich mit Brennstoffzellenanwendungen gestellt. Randmaterial und Fertigungsprozesse müssen an die hohen Druckerfordernungen (30 bis 80 bar) und an die Membraneigenschaften der Elektrolyse angepasst werden.

Folgende Faktoren beeinflussen die Randkonzeptentwicklung:

- Membranauswahl
- Anforderungen an die Dicke des MEA-Randes
- Abstimmung der max. Fertigungstoleranzen

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



- Sicherstellung der Formstabilität bei Herstellung, Transport, Lagerung und Einbau
- Scale-up und Optimierung der Greenerity Fertigungsprozesse

Für die Entwicklung des neuen Randkonzepts wurde eine Kunststoffolie ausgewählt. Das neue Randmaterial erfüllt alle Auswahlkriterien:

- Mechanische Stabilität
- Chemische Stabilität
- Prozessfähigkeit
- Verfügbarkeit (kommerziell und in benötigter Größe erhältlich)
- Preis

Für die MEA Randkonzeptentwicklung wurde ein neues Klebersystem ausgewählt und umfangreiche Versuche durchgeführt. Die Hydrolysestabilität des Klebers wurde durch Auslagerungsversuche geprüft und anschließend die Stabilität mittels Elementanalyse (IR) analysiert. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihen waren so vielversprechend, dass weitere Analysen durchgeführt wurden.

- Haftungsanalyse (Membran / Kleber, Kleber / Katalysatorschicht)
- Auswahl der notwendigen Klebermenge (Dicke)
- In-situ Prüfung der Dauerstabilität in 25 cm<sup>2</sup> Zellen
- MEA Architektur: Festlegung der notwendigen Überlappungsbereiche  
Schutzrand / Katalysatorschicht

Die Entwicklung des Randkonzeptes 1 musste jedoch leider Ende 2015 gestoppt werden. Bei der Durchführung von verlängerten Lebensdaueranalysen wurden Schwächen im Klebeverbund festgestellt. Diese Stabilitätsprobleme waren so schwerwiegend, dass eine komplette Neuentwicklung gestartet werden musste.

Aus diesem Grund wurde die Entwicklung des Randkonzeptes 2 gestartet. Hierfür wurden umfangreiche Vorversuche durchgeführt, um ein neues stabileres Klebersystem auf dem Markt zu finden. Der Aufbau des Randkonzeptes wurde ebenfalls weiter optimiert, damit ein leichteres Scale-up und die Integration in neue Fertigungsprozesse möglich werden.

Nach der Prüfung der mechanischen Stabilität wurden erste elektrochemische Analysen gestartet. Es wurden MEAs mit dem neuen Randkonzept 2 ausgestattet und elektrochemisch getestet.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

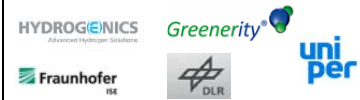


Tabelle 15 : Vergleich der gemessenen Gasreinheit mit und ohne Randkonzept 2

Systembeschreibung	H <sub>2</sub> in O <sub>2</sub> [%] 16 bara H <sub>2</sub> , 75 mA/cm <sup>2</sup> , 50°C
MW MEA KompEISys 1	≤ 0,5
Randkonzept 2 rev. A	0,3 bis 0,5
Randkonzept 2 rev. B	0,3 bis 0,6

Die erzielten Gasreinheiten der beiden Randkonzeptrevisionen sind vergleichbar mit dem Wert der Referenz MEA ohne Rand.

Die Entwicklung eines neuen Schutzrandkonzeptes für Elektrolyse MEAs konnte leider nicht abgeschlossen werden (Meilenstein 13).

## AP 1.9: Optimierung der Edelmetallbeladung bezüglich Leistung und Lebensdauer

Ziel der Entwicklung ist eine größtmögliche Reduktion der Edelmetallbeladung, ohne negativen Einfluss auf Leistung oder Lebensdauer zu erreichen. Hierzu wurden Beladungsvarianten der aktuell eingesetzten Katalysatoren hergestellt und die Leistung untersucht.

Das Entwicklungsziel der neuen KompEISys 2 MEA Generation war, die Edelmetallbeladung auf Anode und Kathode um ca. 50%, im direkten Vergleich mit den Referenz MEA und der neu entwickelten KompEISys 1 MEA Generationen, zu reduzieren.

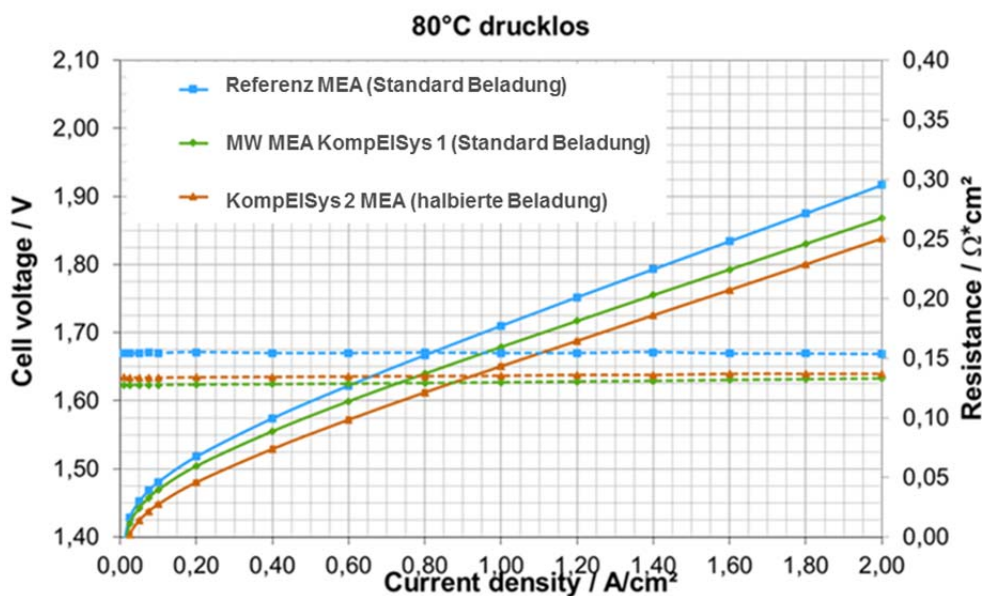
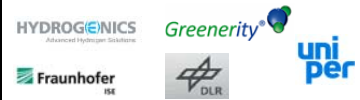


Abbildung 66: Leistungsvergleich der MW KompEISys 1 MEA (Standard Edelmetallbeladung) mit der neu entwickelten KompEISys 2 MEA mit halbiertem Edelmetallbeladung.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

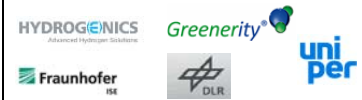


Die sehr vielversprechenden Ergebnisse aus den ersten Leistungsanalysen in 2014 konnten durch reproduzierte Messungen mit der dünneren Membran bestätigt werden. Die Edelmetallmenge konnte erfolgreich reduziert und gleichzeitig die Leistung der neuen KompEISys 2 MEA leicht gesteigert werden (Meilenstein 14).



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## II.1.4 DLR

### II.1.4.1 Beschreibung der Arbeitspakete

#### AP 1 Definition der Ziele, Betriebsweisen, Manöver, Start-Stopp-Prozeduren

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die genauen Ziele für die experimentellen Untersuchungen und die anschließende Auswertung festgelegt. Die Messungen im Labor aber auch in Reitbrook dienen zu allererst der Charakterisierung der Zellen, des Stacks und des Systems. Im zweiten Schritt werden Protokolle für spezifische Degradationsuntersuchungen entwickelt. Dabei sind für die elektrochemische Charakterisierung der Zellen und des Stacks konstante Betriebspunkte von Vorteil. Für das Systemverhalten ist eine Dynamische Betriebsweise für die Charakterisierung von Vorteil.

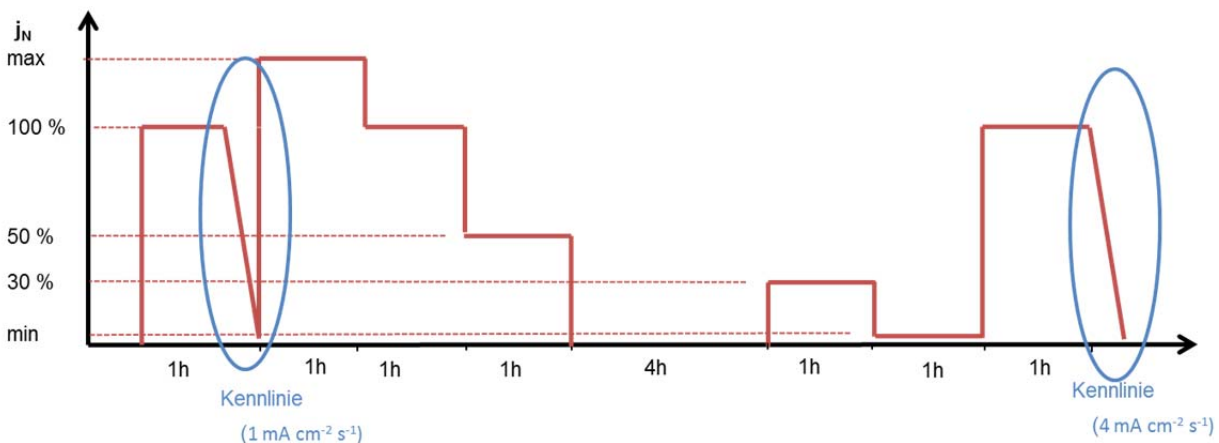
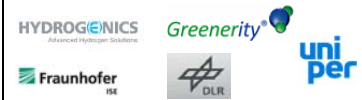


Abbildung 67: Systemprotokoll

Basierend auf diese Anforderungen wurde in enger Zusammenarbeit mit Fraunhofer ISE das Protokoll aus Abbildung 67 entwickelt. Es verbindet die System- mit der Stack-Charakterisierung. Es werden Start- und Stopp-Prozeduren, Rampen sowie kritische Teil- und Überlast-Betriebsweisen betrachtet. Konkret kann das Protokoll wie folgt beschrieben werden. Mit dem Start auf 100% Leistung werden Startvorgang und die Aufheizphase betrachtet. Die Dauer von einer Stunde reicht um das System vom Kaltstart ausgehend in nominale, konstante Betriebsbedingungen zu bringen. Durch diese Aufheizphase kann unter anderem die Temperaturabhängigkeit der Zellspannung untersucht werden. Dies hilft der Normalisierung von Messungen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und der verbesserten Analyse von Degradation. Der Sprung von Minimal- auf Maximallast charakterisiert das Verhalten bei Überlast und ein mögliches Überhitzen des Systems. Die Überlastfähigkeit ist stark systemabhängig und nicht zwingend bei jedem System vorhanden. Die thermische Trägheit kann durch einen Abkühlvorgang charakterisiert werden, der bei der Reduzierung auf 100% bzw. 50% entsteht. Auch Regelvorgänge der Kühlung, des Frischwassers, Pumpen und anderer Systemkomponenten können charakterisiert werden. Die 4 Stunden „Hot Standby“ dienen der Charakterisierung der Regelung bzw. des Standby-Verhaltens im Allgemeinen. Der Sprung auf 30% gibt Aufschluss, ob

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Effizienzverluste durch das Nicht-Erreichen von Normbedingung bei Teil- und Minimallast eingerechnet werden müssen oder ob das System überhaupt in der Lage ist, bei diesen Bedingungen betrieben zu werden. Der Sprung von Minimalleistung auf 100% dient der Charakterisierung der Dynamik soll aber auch mögliche Probleme mit der Gasreinheit aufzeigen, da bei geringen Stromdichten das  $H_2$  zu  $O_2$  Verhältnis an der Anode steigt. Danach wird der Ausschaltvorgang betrachtet. Die beiden Kennlinien werden sowohl zur Dynamikbetrachtung als auch zur Charakterisierung des Systems und des Stacks von hoher Stromdichte zur niedriger betrieben.

Sowohl das Protokoll als auch die Betriebsweise unterscheiden sich wie erwartet im Vergleich der Laboranlagen zur Pilotanlage in Reitbrook. Durch die geringere Leistungsdichte der Laboranlage dauert das Erreichen eines statischen bzw. eines geregelten Zustandes viel länger als im Falle der Pilotanlage, bei welcher wenige Minuten ausreichen.

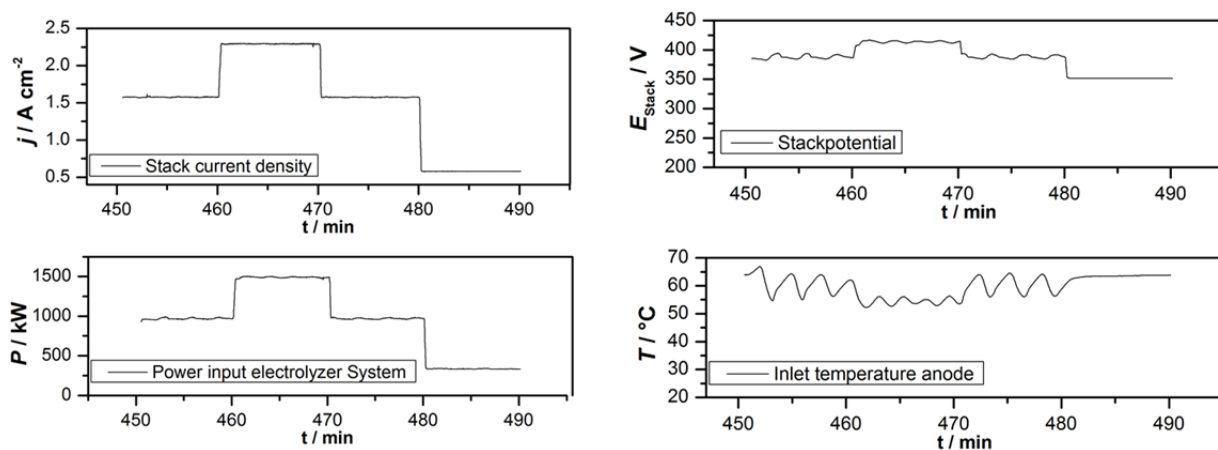


Abbildung 68: Teil eines Systemprotokolls der Reitbrooker Pilotanlage. a) Stromdichte, b) Stackspannung, c) Leistung und d) Temperatur.

Wie in Abbildung 68 dargestellt, benötigt die Reitbrooker Pilotanlage weniger als 10 min. um konstante Bedingungen zu erreichen. Zwar pendelt sich die Regelung mit fortlaufender Zeit auf eine geringere Amplitude ein, was vor allem in Abbildung d und der Stack Einlasstemperatur zu sehen ist, Aussagen über diese Betriebspunkte können trotzdem getroffen werden. Eine detaillierte Systemanalyse wird in den Arbeitstakten von Fraunhofer ISE bearbeitet.

Für die Alterungstests, die im Rahmen dieses Projektes durchgeführt werden sollen, wurde anhand einer statistischen Analyse von Windenergieprofilen ein generisches dynamisches Lastenprotokoll für einen beschleunigten Stresstest entworfen. Durch ein 31faches Durchlaufen des in Abbildung 69 dargestellten Zyklus bei beliebiger Permutation der Rampen kann der Windenergieeintrag eines kompletten Jahres in etwa 900 Stunden Testzeit simuliert werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

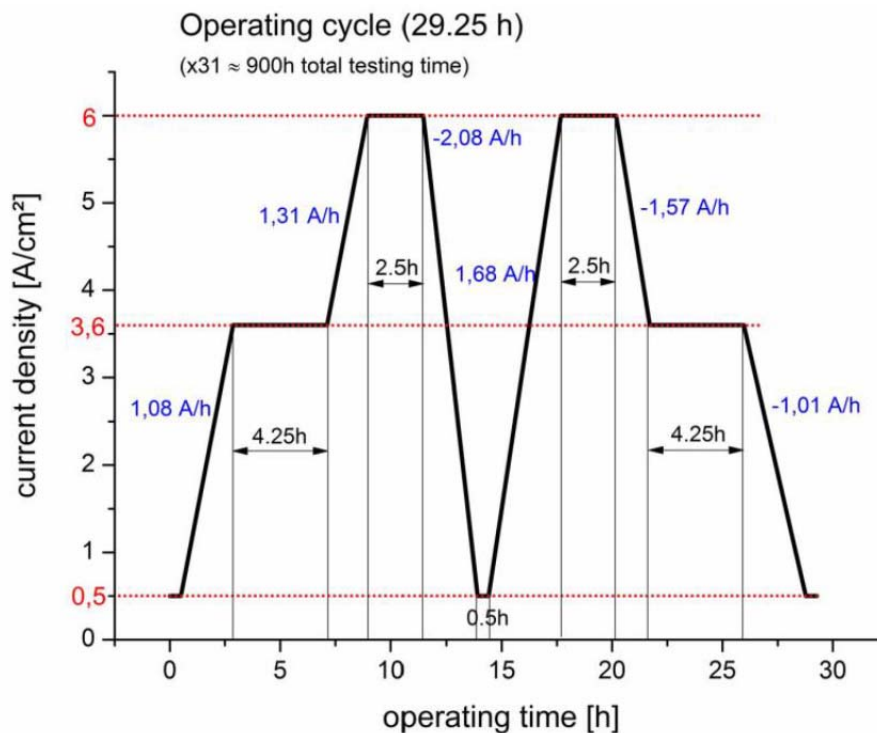


Abbildung 69: Generisches dynamisches Windlastprofil

Dieses Protokoll stellte sich allerdings im Laufe des Projekts als nicht praktikabel und zur systematischen Untersuchung von Degradation als nicht geeignet heraus. Die Dynamik, die Überlast und Teillast wurde demnach in einzelne Protokolle separiert, um den Einfluss der einzelnen Betriebsparameter auf Degradation besser zu unterscheiden. Allerdings wurde das Protokoll mit angepassten Stromdichten und mit Hilfe des Lebensdauervorhersagetools simuliert um erste Aussagen über die Degradation durch dieses Protokoll treffen zu können. Die Protokolle zur Degradationscharakterisierung werden in AP 2 näher beschrieben.

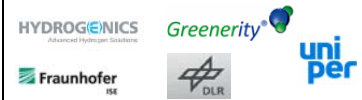
## AP 2 Degradationsmessungen

Im Rahmen des Projekts sollten beim DLR Untersuchungen zur Degradation eines PEM-Elektrolysestacks durchgeführt werden, die zu einem Degradationsmodell mit Lebensdauervorhersage führen. Zu diesem Zweck wurde ein Stack eingesetzt, der demjenigen in Reitbrook in Technologie und Konstruktion entsprach, jedoch mit reduzierter Zellzahl und reduzierter Zellfläche. Die Maximalleistung des Stacks und Systems beträgt 20 kW. Damit können besser als am 1 MW Elektrolyseur auch Betriebspunkte untersucht werden, die eine erhöhte Degradation bedingen. Die Erkenntnisse können durch die gleiche Konstruktion direkt in den Megawatt-Bereich übertragen werden.

Zur Durchführung zusätzlicher experimenteller Arbeiten in einer realen Systemumgebung für Zellflächen >1500 cm<sup>2</sup> hat sich das DLR zum Kauf eines 50 kW-PEM Elektrolysesystems der Firma Hydrogenics entschlossen, auch um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen aus der im Projekt entwickelten und installierten 1 MW PEM Anlage in Reitbrook zu gewährleisten.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Die ursprüngliche Planung sah vor, diese Anlage am DLR Standort Stuttgart aufzubauen und zu betreiben. Im Rahmen einer Kooperation mit dem lokalen Energieversorger NetzeBW bestand dann die Möglichkeit, die PEM-Elektrolyseanlage an einem erschlossenen Standort mit vorhandener Wasserstoffinfrastruktur zu installieren. Der Standort „Talstraße“ in Stuttgart bietet neben einer durch eine alkalische Elektrolyseanlage oder Lieferwasserstoff gespeisten Wasserstofftankstelle zudem die Möglichkeit der direkten Wasserstoffeinspeisung in das lokale Erdgasnetz des Versorgers. Diese Option wurde bisher nicht umgesetzt, ermöglicht aber Perspektiven für zukünftige Untersuchungen und Projekte.

Ein weiterer ganz entscheidender Mehrwert ist die Möglichkeit einer direkten Kopplung der Wasserstoffbereitstellung für den Automotive-Sektor mit einer Power-to-Gas Anwendung. Es besteht dadurch die einmalige Möglichkeit zwei der Schlüsselkonzepte der Energiewende parallel und im gegenseitigen Wechselspiel zu untersuchen. Erfahrungen und gewonnene Erkenntnisse z.B. bezüglich Kostenoptimierung und Effizienzsteigerung können nicht nur direkt in die Betriebsführung der 1 MW Schwesteranlage in Reitbrook fließen, sondern erlauben zudem die Schaffung eines einmaligen Modellstandorts für zukünftige Power-to-Gas Anwendungen in Deutschland. Diese Vorhaben verbunden mit der Installation der Elektrolyseanlage am neuen Standort „Talstraße“ bedingten jedoch auch eine Anpassung und Erweiterung des im KompEISys-Vorhaben beschriebenen Konzeptes. Die Anpassung des Elektrolyseurs an diese Umgebung wurde durch ein Projekt des Landes Baden-Württemberg cofinanziert.

Mit der Wahl des neuen Standortes ergaben sich neue sicherheitsrelevante, baurechtliche und betriebliche Vorgaben, die eine Verzögerung der Lieferung und Inbetriebsetzung bewirkte. Zurzeit (Ende November 2016) befindet sich die Anlage in der abschließenden Inbetriebnahme. An eine absehbare erfolgreiche TÜV-Abnahme schließt sich noch eine zweiwöchige Phase der Anlagensoptimierung seitens des Herstellers an. Danach steht die Anlage für Testbetrieb zur Verfügung.

Trotz Abschluss des Projekts KompEISys wird das DLR die im Projekt vorgesehenen Arbeiten weiter verfolgen. Auch weitere Projekte, die diesen Elektrolyseur nutzen, sind geplant und zum Teil bereits genehmigt, so dass eine Verwertung der Arbeiten im Rahmen des KompEISys-Projekts gesichert ist.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

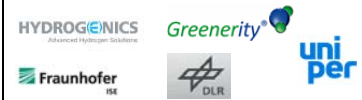


Abbildung 70: 50 kW Elektrolyse-Teststand in Stuttgart- Talstraße

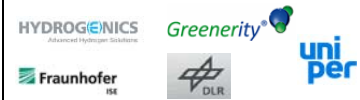
Die Degradationsuntersuchungen wurden im Teststand „Hylyzer“ durchgeführt. Die Zelltechnologie ist, wenn auch mit anderer Zellfläche, direkt mit der des 50 kW Teststands und der in Reitbrook verwandt und Ergebnisse können somit übertragen werden.

Im Laufe des Projekts und in Verbindung mit weiteren Projekten, die sich mit der Untersuchung von Degradation beschäftigen, wurden verschiedenste Protokolle mit unterschiedlichsten Zielen betrieben und untersucht. Im Projekt LastEISys beispielsweise lag der Fokus auf dynamische Betriebsweisen und der Degradation von MEAs. Das Projekt Wespe beschäftigt sich mit der analytischen physikalisch-chemischen Untersuchung von Degradation. Der Wissensgewinn dieser und weiterer Projekte fließt natürlich auch in dieses Projekt und in die Degradationsmodellierung. Ohne die analytische *post-mortem* -Analyse verschiedener weiterer Projekte ist eine realistische Parameteranalyse des Degradationsmodells nicht möglich. Umgekehrt hilft die Modellierung der elektrochemischen Degradationsmodellierung auch beim Verständnis der physikalisch-chemischen Degradationsuntersuchung. Zudem ist es bei der Degradationsuntersuchung wichtig, verschiedene Degradationsmechanismen bestmöglich zu separieren um den Einfluss spezifischer Betriebsparameter voneinander getrennt analysieren zu können.

Die bisherigen Degradationsuntersuchungen im 20 kW Stack – aber auch im Labormaßstab mit Einzelzellen – kommen zu dem Ergebnis, dass Schnellalterungseffekte (abhängig von den verwendeten Materialien) überhaupt nur durch eine Betriebsführung außerhalb der systemtechnisch erlaubten Betriebsbedingungen generiert und beobachtet werden können. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die Wasserqualität und die

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Zellspannung. Selbst hohe Stromdichten bis zu  $4 \text{ A/cm}^2$  im 20 kW Stack und bis zu  $6 \text{ A/cm}^2$  im 0.5 kW Einzelzellteststand führen im Rahmen einer vertretbaren Zeitskala nicht zwingend zu Degradation in Form von Effizienzverlust, wenn die Zellspannung unter der für die Oxidation von Titan nötigen Grenzspannung liegt.

Des Weiteren wurden erste Untersuchungen zum Einfluss der Wasserqualität auf die Leistung und Degradationsrate durchgeführt. Die Wasserqualität erscheint dabei als einer der wichtigsten Parameter für teils reversible aber auch irreversible Degradationseffekte, während eine Betriebsführung innerhalb der zulässigen Parametergrenzen<sup>[1]</sup> kommerzieller Systeme bislang nicht zu beobachtbaren Degradationseffekten führten.

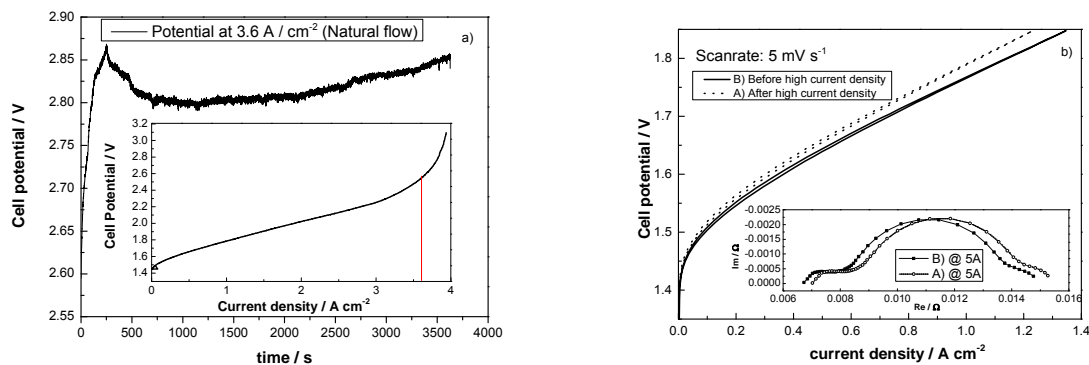


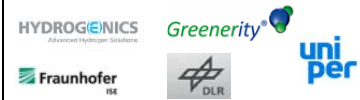
Abbildung 71: a) Spannungskennlinie bei  $3,6 \text{ A/cm}^2$  und natürlicher Strömung bei  $80^\circ\text{C}$ . Innen: UI Kennlinie der Zelle bei  $80^\circ\text{C}$ . b) UI Kennlinie vor und nach der HCD-Messung. Innen: Impedanzspektrum der Zelle vor und nach der HCD-Messung.

Abbildung 71a zeigt im Inneren die Kennlinie der vermessenen Zelle bis  $3 \text{ V}$ . Das Erreichen der Massentransportlimitierung führt zu einem sehr schnellen und unkontrollierbaren Anstieg der Spannung. Der Spannungsverlauf in Abbildung 71 bestätigt das. Das Überschreiten dieses kritischen Punktes kann zu Hotspots, Wassermangel und Spannungen jenseits der  $2,5 \text{ V}$  führen und somit sehr wahrscheinlich degradierende Prozesse hervorrufen. Abbildung 71 b) bestätigt diese Annahme in Form eines Spannungsanstieges der Kennlinie nach dem *high current density* (HCD) Test und der damit einhergehenden hohen Spannung. Ebenso kann eine Parallele Rechtsverschiebung des Impedanzspektrums beobachtet werden. Letzteres deutet auf ein Anwachsen des Ohm'schen Widerstandes hin. Es gilt allerdings zu beachten, dass bei der verwendeten Zelle keine Oberflächenmodifikation zur Verhinderung von Degradation und zur Reduzierung der Kontaktflächen verwendet wurde.

[1] Dazu gehören sowohl hochdynamische Betriebsweisen wie auch die Verdopplung der Normstromdichte.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Mit Hilfe der E92 Stack Technologie von Hydrogenics können im Labor Versuche gefahren werden, die eine direkte Übertragbarkeit durch die sehr verwandte Technologie mit der 1,5 MW Pilotanlage in Reitbrook, erlauben. Wie erwähnt kann beschleunigte Degradation durch den Betrieb außerhalb der Parametergrenzen beobachtet werden. Da dies mit der Anlage in Reitbrook aus Sicherheitsgründen nicht durchgeführt werden kann, wurde im 20 kW Stack mit der verwandten E92 Technologie ein 2000 h Langzeittest bei  $4 \text{ A cm}^{-2}$  betrieben.

Abbildung 72 stellt in a) den Verlauf der Stromdichte und der Stackspannung über die Zeit da, b) ist das Protokoll der Systemcharakterisierung, das vor und nach dem Langzeittest (AST) betrieben wurde. c) und d) zeigen die Kennlinien, die zu Zeit T1, T2, T3 und T4 zur Charakterisierung der Zellen betrieben wurden und e) die exemplarischen EIS Messungen, die als Hauptgrundlage der Degradationsanalyse und Modellierung verwendet wurden. Diese wurden bei allen Zellen bei  $0,25 \text{ A cm}^{-2}$  durchgeführt und bei ausgewählten Zellen bei verschiedenen Stromdichten, um Parameter wie Austauschstromdichte und Tafelsteigung zu analysieren.

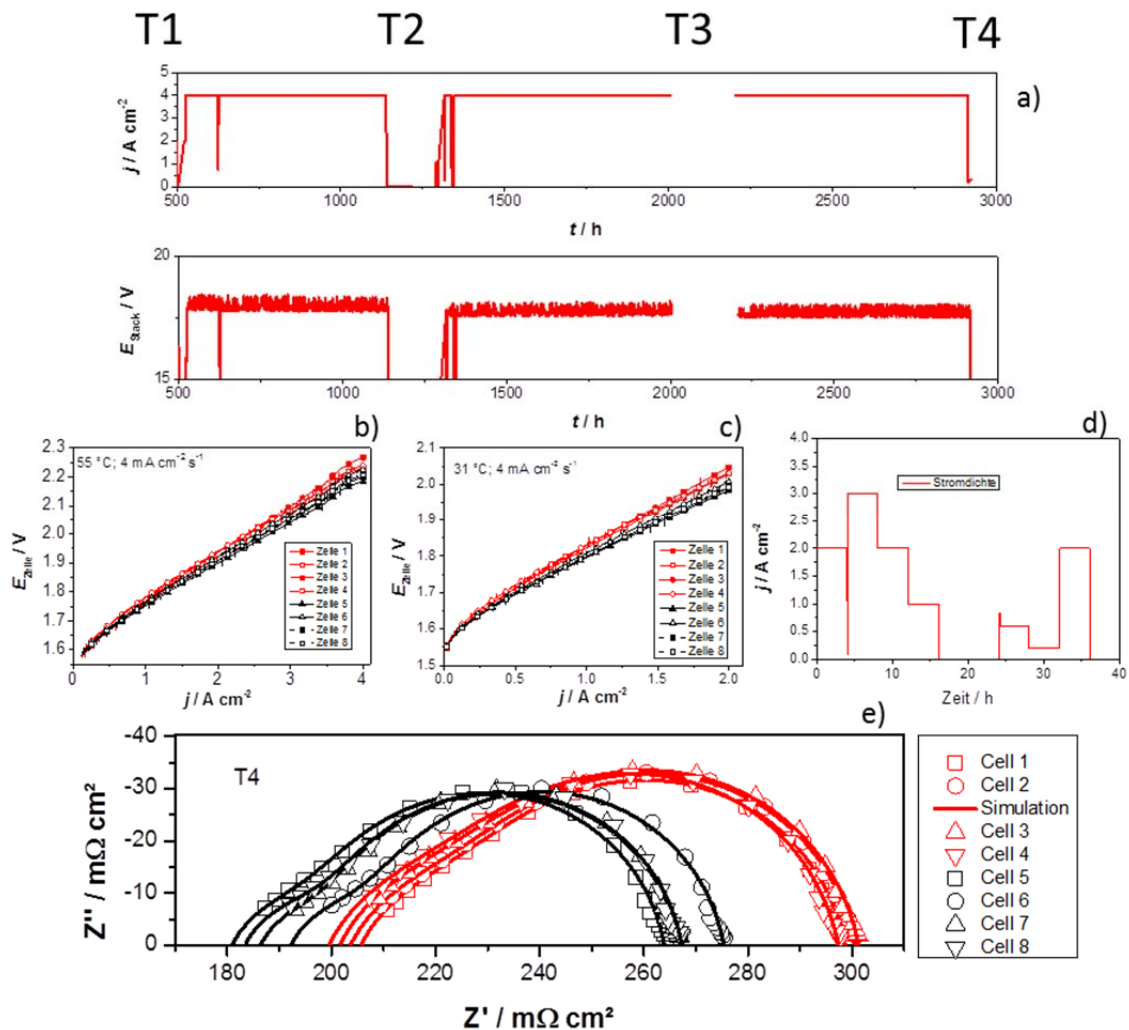
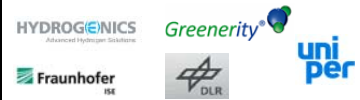


Abbildung 72: a)  $j$  und  $E$  des Langzeittests, b) und c) Kennlinie bis 2 bzw. 4  $\text{A cm}^{-2}$ , d) Systemprotokoll, e) EIS Messungen bei  $0,25 \text{ A cm}^{-2}$

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Der Stack wurde zusätzlich mit MEAs von Greenerity unterschiedlicher Katalysatorbeladungen betrieben, um eine mögliche Katalysatorreduktion zu untersuchen. Die EIS Messungen zeigen eindeutig, dass die Zellen mit reduzierter Beladung sowohl einen erhöhten ohmschen Widerstand wie aber auch einen signifikant erhöhten Elektrodenwiderstand ( $R_1$ , s. Abbildung 98) aufweisen. Die Degradationsanalyse stützt sich hauptsächlich auf die EIS Analysen in Verbindung mit den Kennlinien. Eine Einführung in das doch recht komplexe Thema der elektrochemischen Impedanzanalyse soll Abbildung 73 darstellen. Das exemplarische elektrische Ersatzschaltbild ist ein Beispiel, wie die elektrochemische Impedanz Spektroskopie (EIS) simuliert werden kann. Ein Ohm'scher Widerstand repräsentiert die Ionisch und elektrisch leitenden Widerstände. Zwei R/C Stromkreise simulieren sich kapazitiv verhaltende Prozesse wie sie in der Elektrode aber auch in der Aktivierungsüberspannung vorkommen. Abbildung 73 c) zeigt eine exemplarische Kennlinie mit den einzeln aufsummierten Überspannungen, die sich aus der Analyse der EIS ergeben.



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

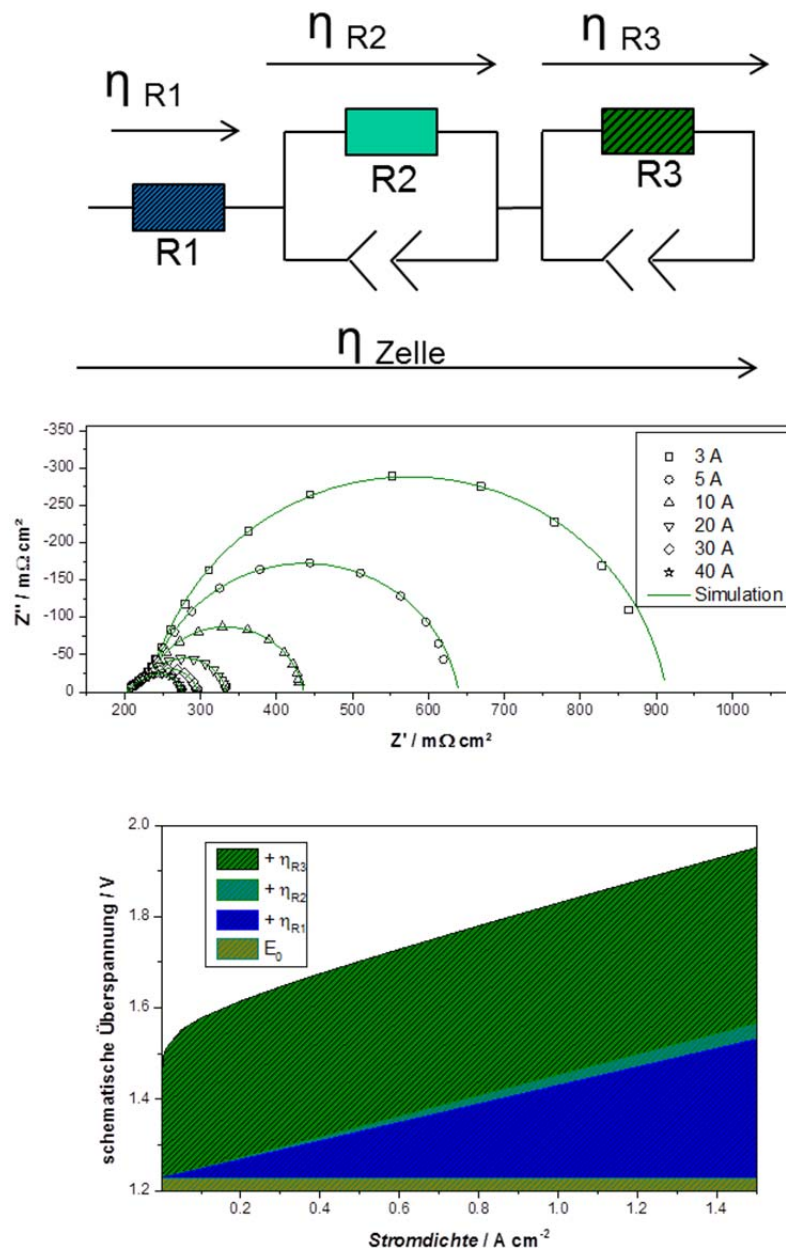
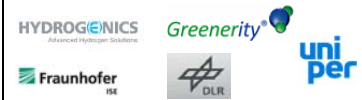


Abbildung 73: Schematische Darstellung eines a) Ersatzschaltbilds der elektrochemischen Impedanz Spektroskopie (b) und die aufsummierten Überspannungen in Form einer Kennlinie (c).

Die Analyse der einzelnen Zellen des Shortstack E92 von Hydrogenics über die Zeit zeigt Abbildung 74. Zellen 1-4 haben reduzierte anodenseitige Katalysatorbeladung, Zelle 5-8 sind Standard MEAs wie auch in der Pilotanlage in Reitbrook. Abbildung 74 a bestätigt die Erkenntnis aus Abbildung 72, dass die Standard MEAs eine bessere Performance aufzeigen als die mit reduzierter Katalysatorbeladung. Über die Analyse der einzelnen Teilimpedanzen/Widerstände können erste Schlussfolgerungen getroffen werden, warum das der Fall ist. So zeigt sich beim Aktivierungswiderstand ( $R_3$ ) kein signifikanter Unterschied. Der Katalysator an sich ist bei allen

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



MEAs derselbe und der Widerstand bei einer spezifischen Stromstärke gibt nur die Steigung an und Rückschlüsse auf die Austauschstromdichte können nicht durch eine Einzelmessung getroffen werden (Siehe Simulation). Aus diesem Grund wurden für jeden Typ MEA exemplarisch EIS Messungen bei verschiedenen Stromdichten durchgeführt um detailliertere Aussagen über die Aktivierungsimpedanz geben zu können. R2 in c) zeigt den Elektrodenwiderstand. Dieser ist auf Grund von Doppelschichtkapazitäten kapazitiv. Für die Standardbeladung zeigt sich ein deutlich geringerer Widerstand, ebenso wie beim ohmschen Widerstand. Der Vergleich der Widerstände zu den verschiedenen Zeiten T1, T2 und T4 gibt Hinweise auf Alterungseffekte.

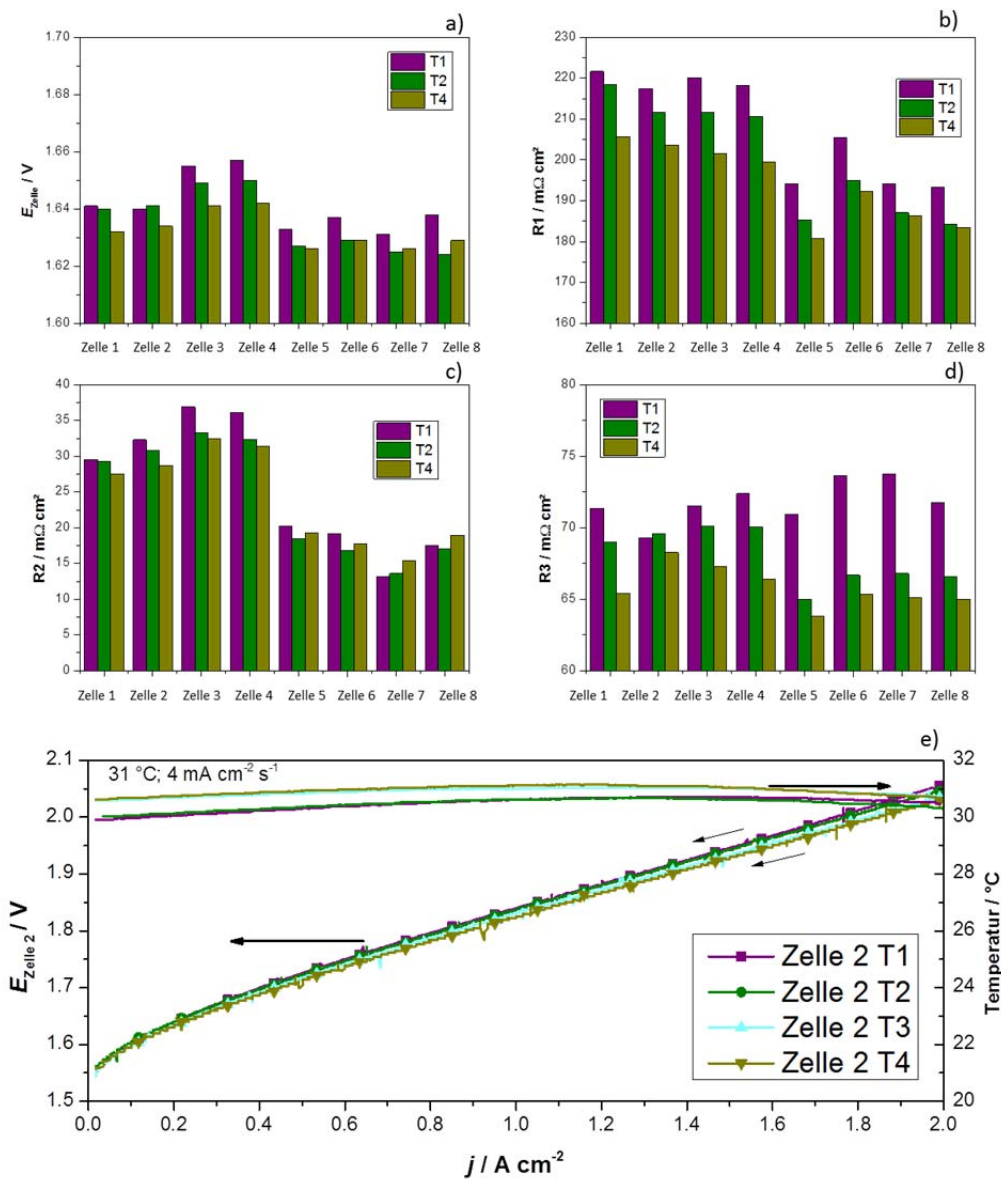


Abbildung 74: a) Zellspannung, b) ohmscher Widerstand, c) Elektrodenwiderstand und d) Aktivierungswiderstand der Zellen 1-8 über die Zeit T1, T2 und T4. e) Kennlinie der Zelle 2 über die Zeit T1, T2, T3 und T4.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

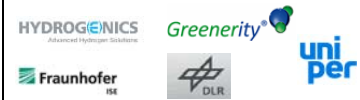


Abbildung 74e zeigt die Kennlinie zu den Zeiten T1-T4. Es ist ein klarer Trend zu niedrigeren Spannungen und somit zu besserer Effizienz zu erkennen. Eine Begründung können die über die Zeit sinkenden Widerstände R1-R3 geben. Es scheint also, dass sich vor allem der ohmsche und der Elektrodenwiderstand über die Zeit stark verbessern. Durch die lineare Multiplikation dieser beider Widerstände mit der Stromdichte steigt der Einfluss auf die Überspannung bei steigender Stromdichte (siehe Simulation). Post mortem Analysen aus dem Projekt Wespe zeigen, dass sich vor allem die elektrischen Eigenschaften der Elektrode über die Zeit verbessern. Membranverdünnung kann nicht festgestellt werden.<sup>1</sup> Allerdings deutet vieles auf eine verbesserte Protonenleitfähigkeit der Membran hin (siehe Simulation und Systemtest). XPS Analysen des Ionenaustauscher Harzes lässt die akkumulierten Ionen zu den Zeitpunkten T1-T4 quantifizieren. Die Tendenz zeigt eine steigende Ansammlung von F-Ionen, die auf eine Degradation von Ionomer hinweisen. Die „Fluor release rate“, also die Zeitspezifische Auftragung ist allerdings fallend, und zu Beginn der Messungen konnte mehr Fluor pro Stunde nachgewiesen werden als gegen Ende.

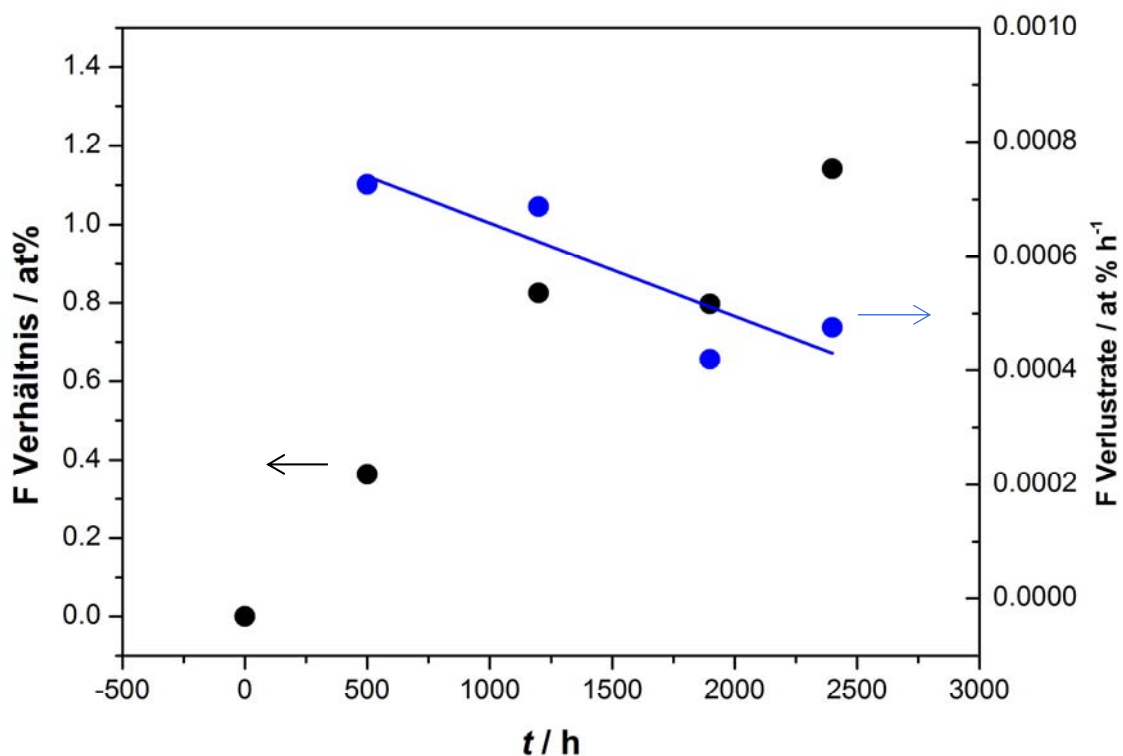
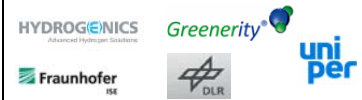


Abbildung 75: Links: Atomprozent F im Ionenaustausch Harz und rechts: die F release rate in at% / h

Zusammengefasst konnte bei streng kontrollierten Bedingungen keine sich negativ auswirkenden Alterungseffekte bei einer Betriebszeit von 2000 Stunden und doppelter Normstromdichte festgestellt werden. Tendenzen zu niedrigerer Spannung werden beobachtet und können den verbesserten ohmschen- und Elektroden- Widerständen zugeordnet werden. Dieses Verhalten ist

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



allerdings stark mit der Materialwahl und der Technologie verknüpft. Es kann auf die Pilotanlage in Reitbrook übertragen, allerdings nicht universal als gültig angesehen werden. Besonders PEM Technologien mit vielen Titanoberflächen sind stark von Passivierungsschichten beeinflusst und zeigen reversible und irreversible Degradation hin zu erhöhten Spannungen und sinkender Effizienz.<sup>2</sup>

## Fazit

Die Degradation des Elektrolysestacks wurde in einem 20 kW-System, welches mit vergleichbarer Stack- und Systemtechnologie wie der Elektrolyseur in Reitbrook ausgestattet war, sowie in Einzelzellen experimentell untersucht. Um in vertretbarer Zeit Alterungseffekte zu beobachten, muss der Elektrolyseur außerhalb der systemtechnisch erlaubten Betriebsbedingungen betrieben werden. Durch ergänzende physikalische und elektrochemische Untersuchungen konnten die verstärkt Degradation verursachenden Betriebspunkte identifiziert und die Mechanismen der Degradation untersucht werden.<sup>1</sup> Der Meilenstein in AP 2 wurde somit erreicht.

In der Pilotanlage wurde durch den Betreiber/Fraunhofer ISE bislang keinerlei Degradation beobachtet. Die wenigen Betriebsstunden lassen hier allerdings auch noch keine belastbare Aussage zu.

## **AP 3 Degradationsmodell**

### Beschreibung des Degradationsmodells

Das Degradationsmodell basiert auf die Degradationsmessungen aus dem Arbeitspaket 2 und vielen weiteren Erfahrungen, die in den letzten Jahren über Degradationsverhalten von PEM Elektrolyseuren gewonnen werden konnten. Im Folgenden werden die einzelnen Bausteine des Degradationsmodells vorgestellt. Dazu gehört das elektrochemische Modell zur Darstellung der elektrochemischen Vorgänge des Stacks, das Systemmodell mit den wichtigsten Komponenten der Elektrolyse und das Degradationsmodell selbst, das wiederum auf Basis der Erkenntnisse der Degradationsmessungen erstellt wurde und dessen Parameter direkten Einfluss auf das elektrochemische Elektrolysemodell haben.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

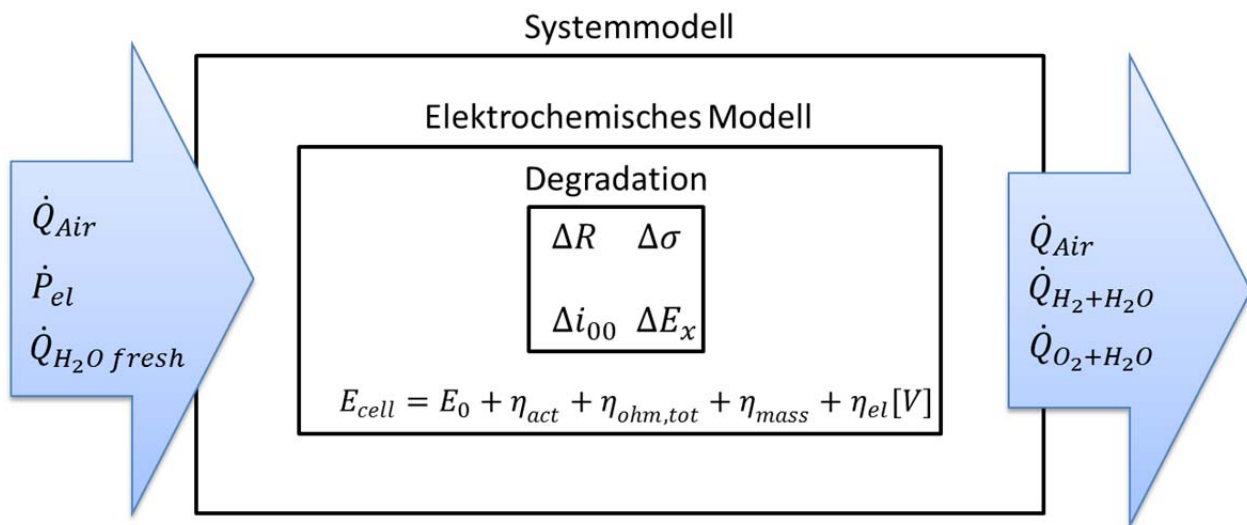


Abbildung 76: Schema Modellzusammensetzung

## Elektrochemisches Elektrolysemodell

Das Ziel des elektrochemischen Elektrolysemodells ist zusammengefasst, die Effizienz in Form der Zellspannung abhängig von allen äußeren Einflussparametern zu beschreiben. Das bedeutet auf Grundlage von thermodynamischen Gesetzen und elektrochemischen Grundlagen die Effizienz der verschiedenen Prozesse in der Elektrolysezelle zu beschreiben. Diese werden statisch beschrieben. Das bedeutet, dass ohne das umgebende Systemmodell die Parameter wie der Druck (p), Temperatur (T) und Strom (I) als Inputparameter gegeben werden müssen und die Effizienz in Form von Überspannungen berechnet wird.

Die Zellspannung errechnet sich wie folgt:

$$E_{cell} = E + \eta_{act,an} + |\eta_{act,cat}| + \eta_{ohm,m} + \eta_{ohm,e} + \eta_{mass} + \eta_{el} [V]$$

E: Thermodynamische Gleichgewichtsspannung, bzw. Nernstspannung [V];

$\eta_{act,an}$ : Aktivierungsüberspannung Anode [V];

$\eta_{act,cat}$ : Aktivierungsüberspannung Kathode [V];

$\eta_{ohm,m}$ : Ion'sche lineare Überspannung der Membran[V];

$\eta_{ohm,e}$ : Ohm'sche Überspannung der Interkonnectoren [V].

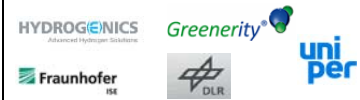
$\eta_{mass}$  : Massentransporteffekte [V].

$\eta_{el}$ : Ion'sche und elektrische Widerstände und Doppelschichtkapazitäten der Elektrode [V].

Da in diesem Projekt das Degradationsmodell ein semiempirisches sein soll, und der Fokus auf betriebszustandsorientierter Degradation liegt, die durch die Messungen validiert wird, werden

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

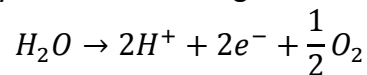
Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



die einzelnen Spannungen nur kurz beschrieben, da eine detaillierte theoretische Herleitung außerhalb der Zielsetzung des Projektes liegt. Die Massentransportüberspannung konnte durch EIS für diese Technologie nicht gemessen werden und wird daher für die Simulation nicht weiter beachtet.

### Nernstspannung

Die Gesamtreaktion in der Elektrolyse kann durch folgende Formel beschrieben werden.



Dadurch ergibt sich bei Standardbedingungen die thermodynamische Gleichgewichtsspannung von 1,23 V, also die Spannung, die theoretisch benötigt wird, um Wasser zu spalten.

$$E^0 = \frac{\Delta G^0}{nF} = 1,23V$$

Diese ist druck- und temperaturabhängig und kann durch die Nernstspannung wie folgt beschrieben werden:

$$E = E_a^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{(a_{H^+})^2 (a_{O_2})^{0.5}}{a_{H_2O}} [V]$$

### Aktivierungsüberspannung

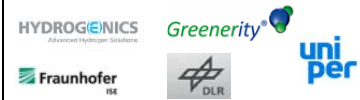
Für die Berechnung der Aktivierungsüberspannung wurde im tatsächlich verwendeten Modell die Überspannung der Anode und die Überspannung der Kathode zusammengefasst und mit Hilfe einer Formel beschrieben. Das lässt sich insofern gut rechtfertigen, als auf Grund der hohen Reaktionsgeschwindigkeit der Wasserstoffentwicklungsreaktion die Reaktion auch mit Hilfe der EIS Messungen nicht dargestellt werden kann und die Überspannung im Vergleich zur Sauerstoffentwicklungsreaktion vernachlässigbar ist. Die nachfolgenden Gleichungen beschreiben die Aktivierungsüberspannung durch die Butler-Volmer Gleichung bzw. die Tafel-Gleichung.

$$i = i_0 \exp\left(-\frac{\alpha F \eta}{RT}\right) \left[\frac{A}{cm^2}\right]$$
$$\eta_{Act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \frac{i}{i_0} [V]$$

Die entscheidenden Parameter sind  $\alpha$  und  $i_0$ .  $\alpha$  beschreibt den Übergangskoeffizienten und ist hauptsächlich (aber nicht nur) für die Steigung der Aktivierungsüberspannung verantwortlich und ist ein Materialkoeffizient. Dieser ändert sich, wenn anderes Katalysatormaterial verwendet wird oder wenn sich die Struktur des Katalysators oder auch der Elektrode während der Zeit durch Degradation verändert.  $i_0$  beschreibt eigentlich die intrinsische Aktivität des Katalysators, muss im Falle der Zellsimulation allerdings die intrinsische Aktivität der Elektrode beschreiben. Somit ist  $i_0$  ein Indikator für aktive Zentren der Elektrode, die je nach Degradationsgrad variieren können. Die Temperaturabhängigkeit wird wie folgt beschrieben:

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



$$i_0 = i_{00} \exp \left[ -\frac{E_{ai}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$$

## Ohm'sche Überspannung

Alle Ohm'schen Widerstände werden durch den Ersatzwiderstand  $R_{ohm,tot}$  beschrieben, der wiederum aus elektrischen Widerständen und ionischen Widerständen besteht. Die elektrischen Widerstände werden durch die einfache ohmsche Gleichung beschrieben

$$\eta_{ohm,e} = \sum R I = r_e i \text{ [V]}$$

Die ionische Überspannung der Membran durch:

$$\eta_{ohm,m} = R_m I = r_m i = \frac{\delta_m}{\sigma_m} i \text{ [V]}$$

Die Temperaturabhängigkeit wird beschrieben durch:

$$\sigma_m(T, \lambda) = \sigma_{00} \exp \left[ \frac{E_{as}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{cell}} \right) \right] \left[ \frac{S}{cm} \right]$$

$\sigma$  ist die Leitfähigkeit der Membran und  $\delta$  die Membrandicke.

Die Gesamte ohmsche Überspannung wird demnach wie folgt beschrieben.

$$\eta_{ohm,tot} = R_{eq} I = (R_m + R_e) I = (r_m + r_e) i = \eta_{ohm,m} + \eta_{ohm,e} \text{ [V]}$$

## Elektrodenüberspannung

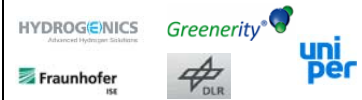
Die Elektrodenüberspannung entsteht in Verbindung mit Doppelschichtkapazitäten durch ionische und elektronische Widerstände. Bei EIS Messungen kann eine klare kapazitive Impedanz beobachtet werden. Diese Impedanz kann während der Messungen im hochfrequenten Bereich der Nyquistkurve erkannt werden. Die Ladegeschwindigkeit der Doppelschichtkapazität ist allerdings so hoch, dass sie in der Simulation auf Grund der Konstanz bei unterschiedlichen Stromdichten als Ohm'scher Widerstand behandelt wird (Siehe oben).

## Wasser und Gas Crossover

Das Elektrochemische Modell beinhaltet außer den Überspannungen auch ein detailliertes molekulares Wasser und Gas-Crossover Modell, welches die Diffusion von Wasserstoff zur Anodenseite und Sauerstoff zur Kathodenseite beinhaltet. Dies erlaubt eine detaillierte Betrachtung der Konzentrationen der Gase an den Elektroden und den Einfluss auf die Nernstspannung durch Partialdruckunterschiede abhängig von der Stromdichte. Ebenso wandern die Protonen durch zwei verschiedene Mechanismen durch die Membran. Der „Hopping“ Mechanismus lässt die Protonen durch den entgegengesetzten Elektronen- Tunneleffekt zur Kathode wandern. Protonen können allerdings auch hydriert durch die Membran wandern. Dies zieht einen gewissen Wasserverlust von der Anode zur Kathode mit sich und wird im Modell

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



ebenfalls beschrieben. Die Herleitung dieser Modelle ist allerdings außerhalb der Zielsetzung des Projektes.<sup>3</sup>

Abbildung 77 zeigt exemplarisch einige wichtige durch das Modell berechnete Parameter des elektrochemischen Elektrolysemodells. A) stellt die Temperaturabhängigkeit der Spannung dar. Die Modellierung trifft mit vertretbaren Abweichungen die Steigung und den Absolutwert der Messung. B) stellt eine gemessene Polarisationskurve und die dazugehörige Modellierung dar; C) die einzelnen ohmschen Überspannungen verglichen mit den ohmschen Anteilen gemessen durch EIS und d) die Modellierung der Aktivierungs-Überspannung verglichen mit den gemessenen EIS Daten der Aktivierungsimpedanz.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die elektrochemische Modellierung sehr gut mit den EIS Messungen und den einzelnen Teilwiderständen übereinstimmt. Die in AP 2 charakterisierten Stacks und vor allem die Charakterisierung mit Hilfe von EIS erlaubt nicht nur die Nachbildung der UI Kennlinie sondern auch die Separation und das Fitten einiger einzelner Teilwiderstände und somit einzelner Überspannungen. Die wichtigsten sind allerdings die ohmsche Überspannung, die Elektrodenüberspannung und die Aktivierungsüberspannung. Massentransporteinflüsse konnten bei den gemessenen Stromdichten nicht erkannt werden und wurden deshalb auch nicht in die Modellierung integriert.



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

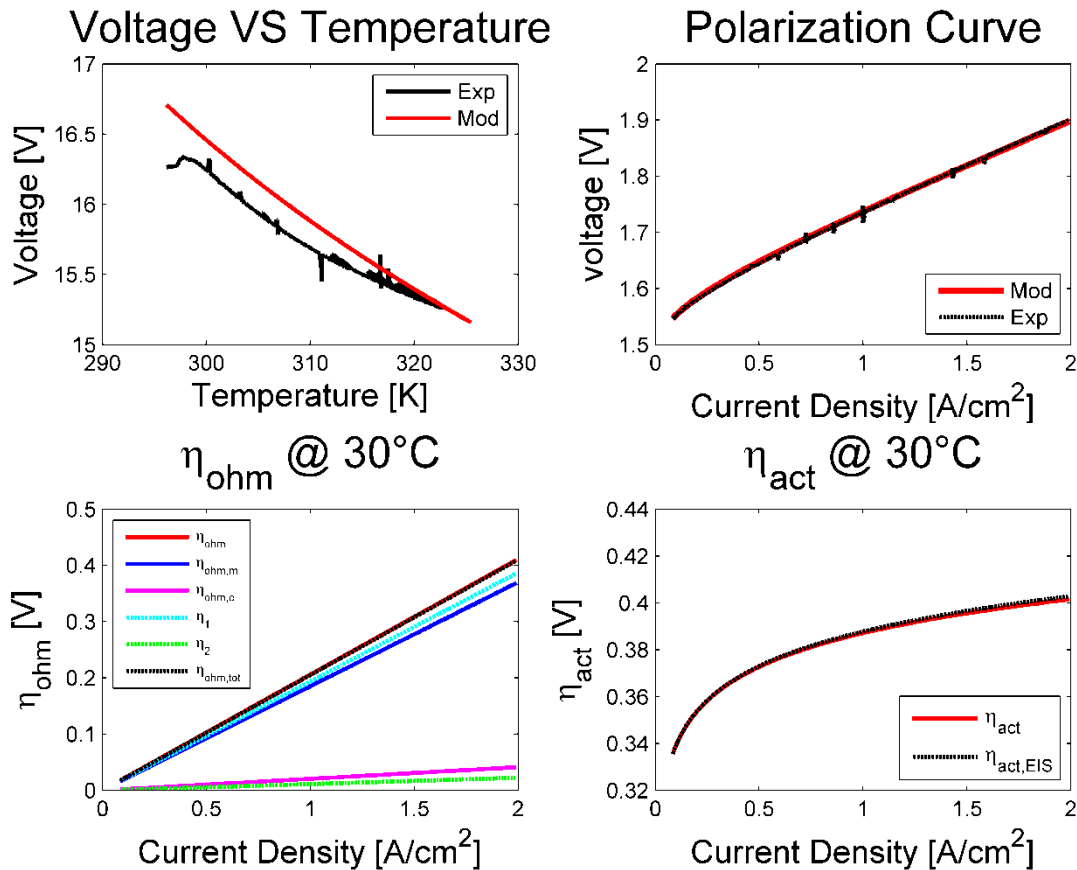


Abbildung 77: Beispielhafte Ergebnisse des elektrochemischen Modells: a) Spannung vs. Temperatur; b) Kennlinie modelliert und Experimentell; c) Ohm'sche Überspannung vs. Stromdichte; d) Aktivierungsüberspannung vs. Stromdichte

Die Parameter der simulierten Daten wurden nicht auf beste Übereinstimmung gefittet, sondern durch elektrochemische Impedanzspektroskopie analysiert. Dies begründet die partielle Abweichung einzelner Funktionen, die auch durch Messungenauigkeiten erklärt werden können.

## Systemmodell

Das elektrochemische Elektrolysemodell wird in das Systemmodell mit den wichtigsten Komponenten der Elektrolyse integriert. Dadurch kann ein dynamisches, zeitabhängiges Verhalten modelliert werden. Dies ist die Voraussetzung um Degradationsvorgänge abhängig von verschiedenen Betriebsparametern nachbilden zu können und dadurch Aussagen auf ein zukünftiges Verhalten treffen zu können.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

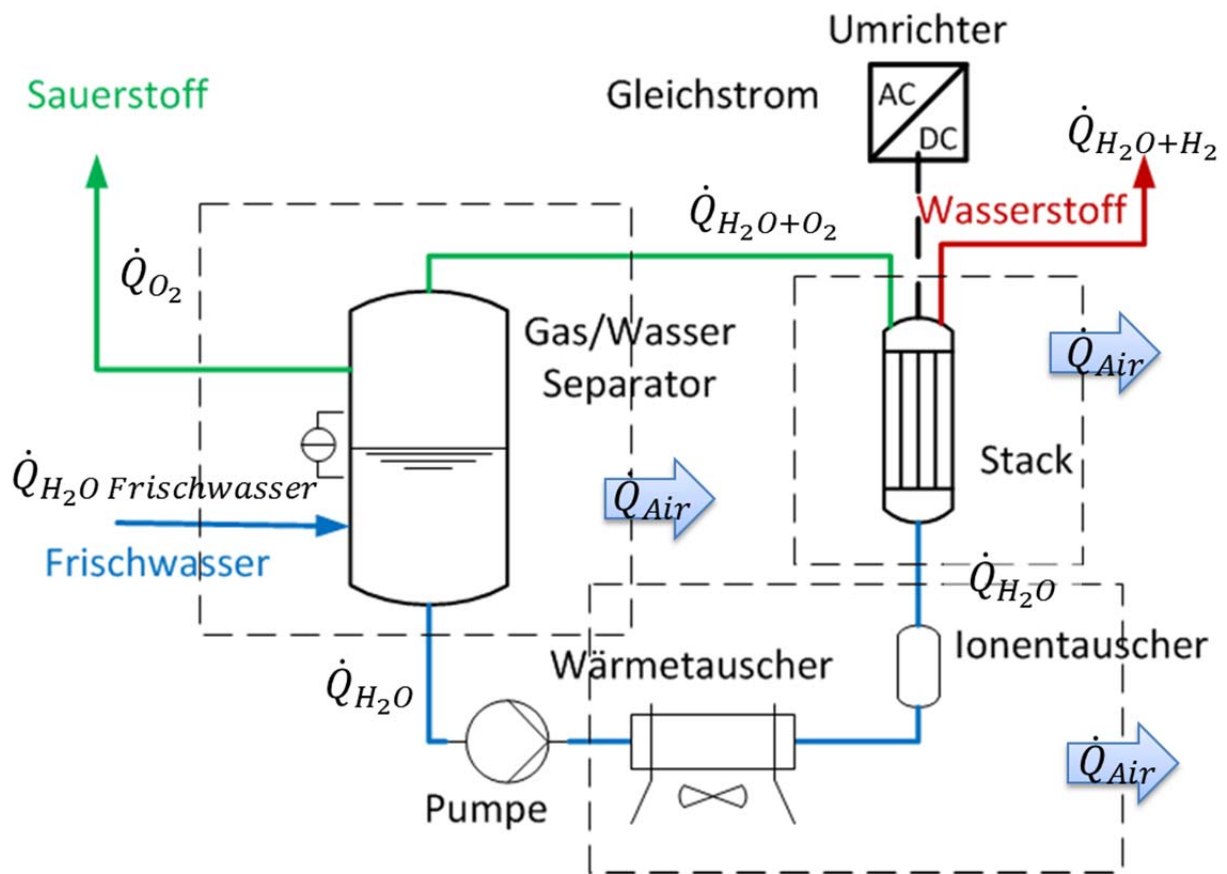


Abbildung 78: Schema Systemmodell und Wärmeströme

Das Thermische Verhalten ist Raum- und Zeitabhängig. Das System ändert die Betriebsbedingungen bis ein thermodynamisches Gleichgewicht erreicht wird. Um die Komplexität eines solchen Systems zu reduzieren und die Energie- und Massenbilanzen effizienter und schneller zu berechnen wurde die „lumped capacitance Methode“ gewählt.

## Energiebilanz

Die Energiebilanz wird beispielhaft in folgender Gleichung für den Stack dargestellt.

$$C_{el} \frac{dT_{el}}{dt} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} + \dot{m}_{H_2Oin} h_{H_2Oin} - \dot{m}_{H_2Oan} h_{H_2Oout} - \dot{m}_{H_2Ocat} h_{H_2Oout} - \dot{m}_{H_2} h_{H_2} - \dot{m}_{O_2} h_{O_2}$$

$\dot{Q}_{gen}$ : Wärmequelle auf Grund von Effizienzverlusten

$\dot{Q}_{loss}$ : Wärmeverluste durch die Oberfläche (Konvektion und Strahlung)

$\dot{m}_x h_x$ : Energiebilanz die Fluide in und aus dem Stack

Die Enthalpie wird für die Temperaturniveaus der Fluide empirisch berechnet. Durch die Integration des Elektrolysemodells in das Systemmodell ist es nun möglich wichtige Parameter wie die Spannung oder die Temperatur eines vorgegebenen Protokolls nachzubilden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

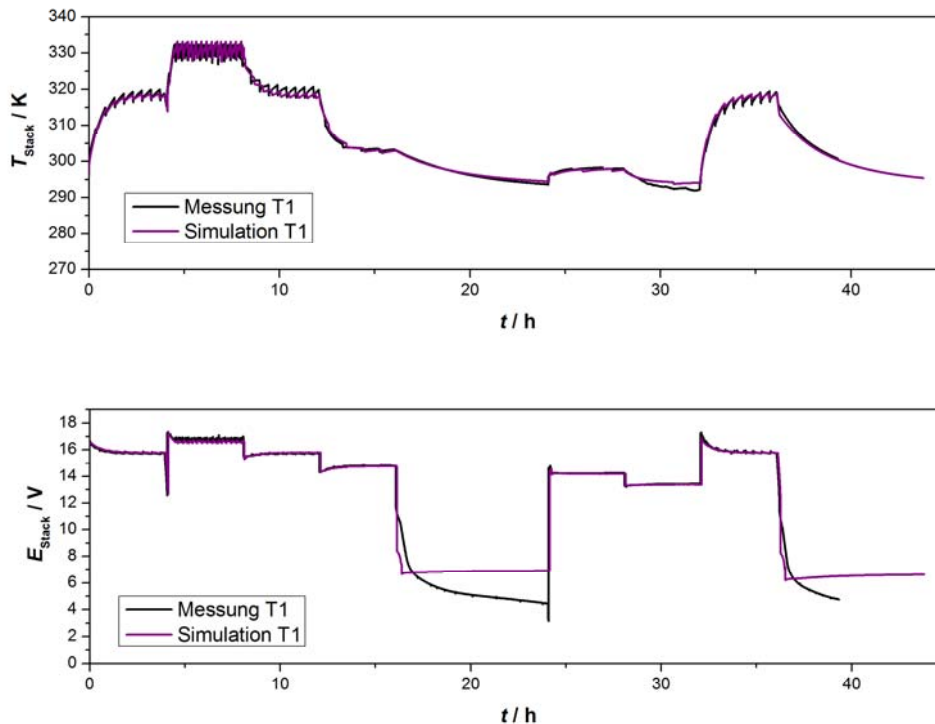


Abbildung 79: Systemprotokoll Modellierung vs. Messung; a) Stacktemperatur, b) Stackspannung

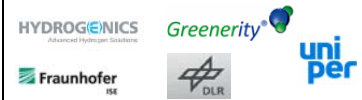
Abbildung 79 stellt die Messung und die Simulation des in AP 1 festgelegten Protokolls des Stacks E92 von Hydrogenics dar. Die verwendete MEA ist E 300 von Greenerity. Die Abweichung der Spannung während des Standby-Verhaltens ist numerisch bedingt, da der Strom niemals Null werden darf. Da sich auch bei minimalem Strom eine Spannung einstellt, weicht die gemessene Spannung von der Modellierung ab. Die Temperatur kann sehr gut nachgestellt werden, wobei darauf hingewiesen werden muss, dass Parameter wie Umgebungstemperatur, Enthalpie und Luftstrom des Wärmetauschers auf die Messung angepasst werden mussten, da die exakten Werte nicht zur Verfügung stehen. Natürlich wurden realistische Werte angenommen. Das Zickzack-Verhalten der Temperatur und dadurch auch der Spannung kann bei Stromdichten unter  $3 \text{ A cm}^{-2}$  durch die Frischwasserzufuhr und bei Stromdichten darüber auch durch die aktive Kühlung des Wärmetauschers erklärt werden. Die Steigung des Temperaturanstiegs sowie der thermodynamische Gleichgewichtszustand kann stromdichtenabhängig sehr gut getroffen werden.

## Degradationsmodell

Aus den Degradationsversuchen wissen wir, dass sich der ohmsche Widerstand der Zelle über die Zeit verbessert. Der größte Teil des ohmschen Widerstands ist der MEA und der ionischen

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Leitfähigkeit zuzuordnen. Diese steigt also mit der Zeit, aber auch abhängig von der Stromdichte und somit der Menge an transportierten Protonen. Die Gleichungen, die die Überspannung der Membran und die Leitfähigkeit der Membran beschreiben sind in Abbildung 80 a dargestellt. Der Term  $\Delta\sigma_{ref}$  stellt die Degradation dar und ist sowohl Zeit- als auch Stromstärkenabhängig. Der ohmsche Anteil der Zelle reduziert sich nach der Simulation bei  $2 \text{ A cm}^{-2}$  um ca.  $0,015 \mu\Omega \text{ h}^{-1}$  und bei  $4 \text{ A cm}^{-2}$  um ca.  $0,12 \mu\Omega \text{ h}^{-1}$ , also fast eine Größenordnung stärker bei Verdopplung der Stromdichte. Dies hat zunächst einen positiven Einfluss, kann sich aber auch negativ auswirken, wie sich beim Systemtest zeigt (siehe Abbildung 84).

Abbildung 80 b) zeigt die stromstärkenabhängige Funktion der Ionischen Leitfähigkeit, c) die gemessene ohmsche Leitfähigkeit der Zeitpunkte T1, T2 und T3 und d) das elektrische Ersatzschaltbild der Modellierung. T1, T2 und T3 sind in diesem Fall nicht die Zeiten aus dem AP 2 sondern aus einem Versuch mit Variation der Stromdichte, die in AP2 und dem betriebenen AST nicht variiert wurden. T1 ist der Widerstand vor der Messung, T2 nach 500 h bei  $2 \text{ A cm}^{-2}$  und T3 nach 250 h bei  $4 \text{ A cm}^{-2}$ .

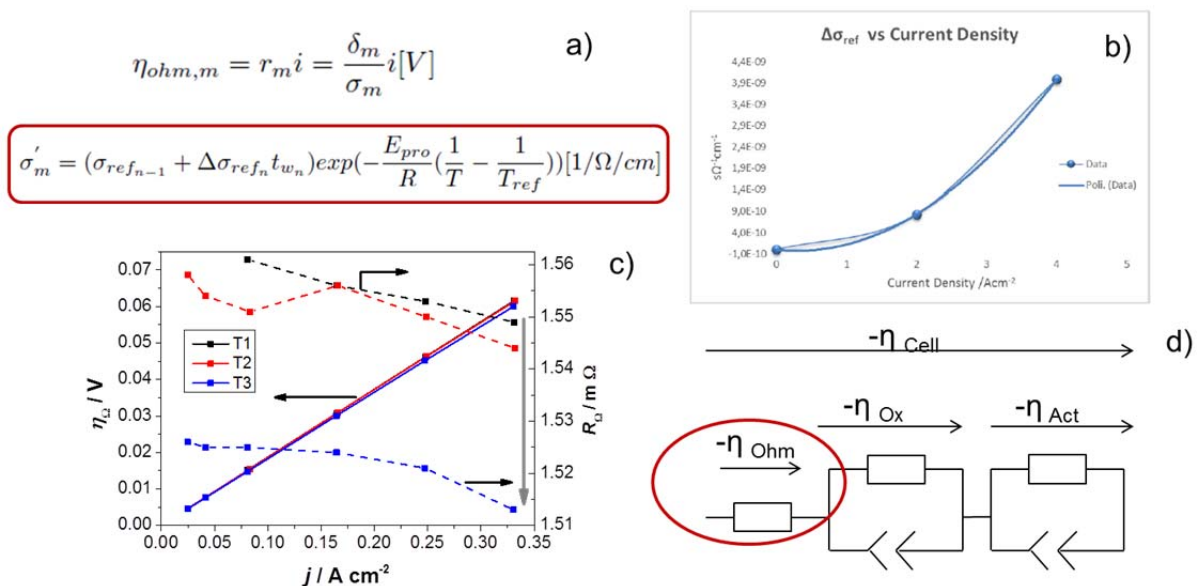


Abbildung 80: Betriebsmodusabhängige Änderung des Ohm'schen Widerstands.

Abbildung 81 zeigt die auf die Änderung der Leitfähigkeit folgende Änderung des ohmschen Widerstands in Abhängigkeit von der Zeit und der Stromdichte a) und die entsprechenden Zeit bzw. Stromabhängigen Funktionen in b und c und deren Messwerte aus denen die Funktionen generiert wurden. Der Ansatz ist ein eher konservativerer.

Mit diesen Parametern kann ein beliebiges Protokoll in das Modell geladen und die Änderung des ohmschen Widerstands abhängig von der Dauer und der Stromdichte berechnet werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

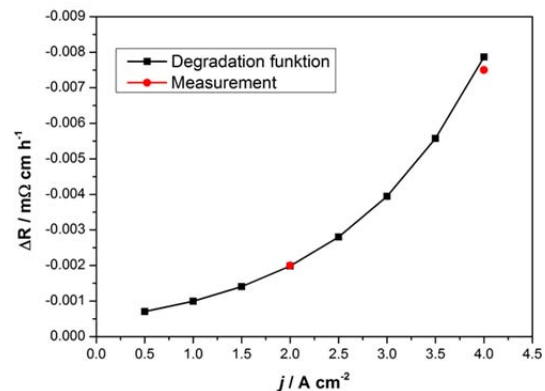
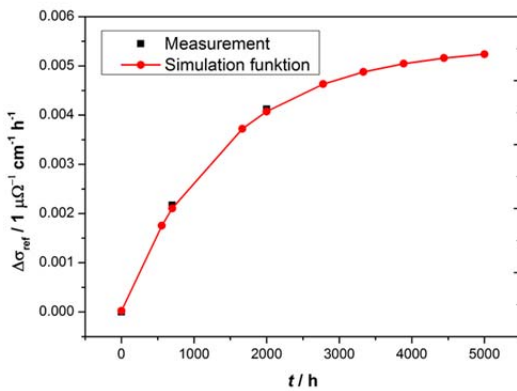
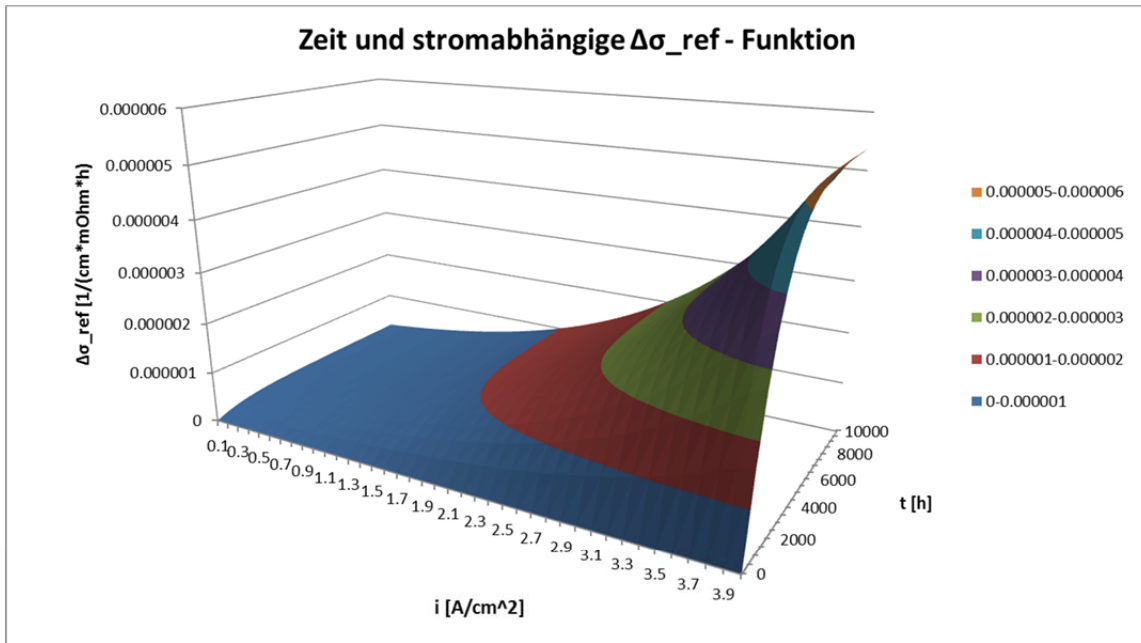


Abbildung 81: a) Kombination der Zeit und stromabhängigen Degradationsfunktionen aus b und c.

Exemplarisch für einen zeitabhängigen Degradationsparameter wird in Abbildung 82 die Änderung der elektrochemischen intrinsischen Aktivität durch die Austauschstromdichte beschrieben. a) zeigt exemplarisch die Formel der Degradationsmodellierung der Austauschstromdichte, b) die zeitabhängige Funktion der Austauschstromdichte, c) die gemessene Aktivitätsüberspannung und d) das elektrische Ersatzschaltbild der Modellierung.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

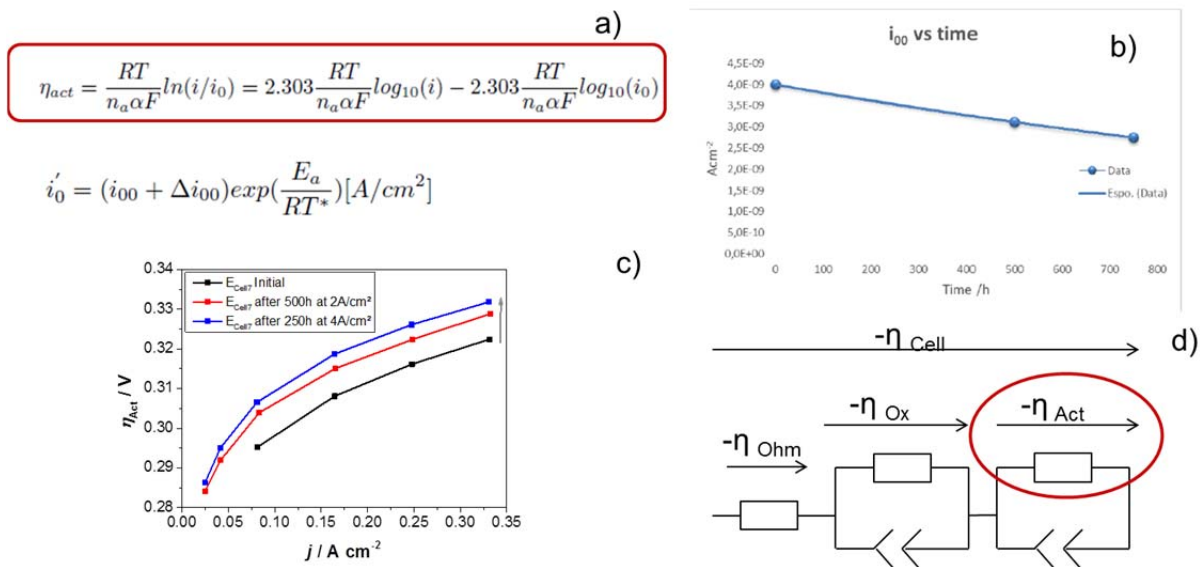


Abbildung 82: Zeitabhängige Änderung der Austauschstromdichte

Die Elektrodendegradation bzw. Degradation der intrinsischen Aktivität der Katalysatoren sind sehr stark materialabhängig. So konnten bei dem Degradationsprotokoll aus Abbildung 72 und Abbildung 74 kaum Änderungen des Aktivitätswiderstands beobachtet werden und wenn, dann in die entgegengesetzte Richtung hin zu niedrigeren Impedanzen. Änderungen hin zur besseren Effizienz konnte auch schon im ohmschen Anteil beobachtet werden und könnte auch in der Elektrode durch Optimierungsprozesse und Degradation von Ionomer erklärt werden. Dadurch würde sich eine optimierte Elektrodenstruktur durch Zugewinn von Katalysatorpartikeln ergeben, die im Ursprungszustand nicht elektrisch kontaktiert waren. Dies könnte vor allem bei dickeren Elektroden der Fall sein.<sup>1</sup> Zusätzlich spielt die Stabilität des Katalysators eine große Rolle. Metallische Katalysatoren sind zwar aktiver, lösen sich allerdings schneller auf als deren Oxide und tragen somit zu beschleunigter Degradation bei.

Die Erkenntnisse aus vielen tausend Stunden Messungen fließen in das Modell ein. Die Ausgangsparameter müssen für jeden einzelnen Stack durch Messungen validiert werden um eine spezifische Vorhersage der Degradation eines Stacks machen zu können.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

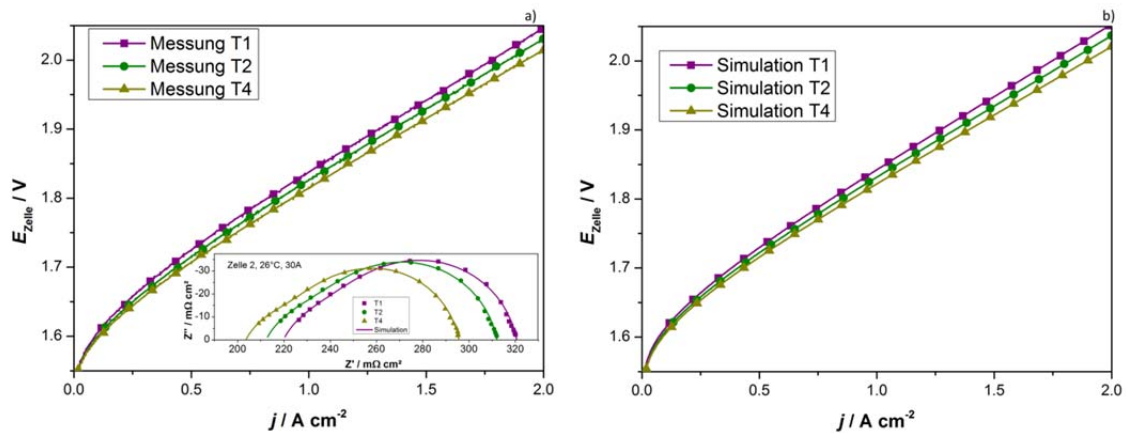


Abbildung 83: a) Kennlinie und EIS zu Beginn (T1) nach 650 h bei 4 A cm<sup>-2</sup> (T2) und nach 2000 h bei 4 A cm<sup>-2</sup> (T4) und b) die dazugehörigen Simulationen.

Abbildung 83a und b vergleicht die Messungen der Kennlinie mit den Simulationen. Die Ergebnisse der Simulation geben die Messungen sehr gut wieder und auch die Degradation im Absolutwert konnte mit Hilfe der gewählten Degradationsparameter für das ausgewählte AST (siehe Abbildung 72) gut getroffen werden. Die Systemmessung aus Abbildung 79 wurde nach den 2000 h AST wiederholt und in Abbildung 84 dargestellt. Es fällt auf, dass der Sprung nach ca. 32 h von minimaler Stromdichte zu nominaler Stromdichte nach dem AST nicht mehr möglich ist, da das System auf Grund von zu hohen Wasserstoffwerten im Sauerstoffbereich in Not-Aus fährt. Dies bestätigt die höhere Permeabilität durch die Membran, die nicht nur Protonen sondern auch Wasserstoff betrifft. Ebenfalls ist die Frequenz der Frischwasserzuläufe erhöht. Das wird durch eine höhere Permeabilität von Wasser hin zur Kathodenseite bedingt, wodurch mehr Frischwasser in das System gepumpt werden muss und bestätigt die erhöhte Durchlässigkeit für Stoffe der Membran nach dem AST.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

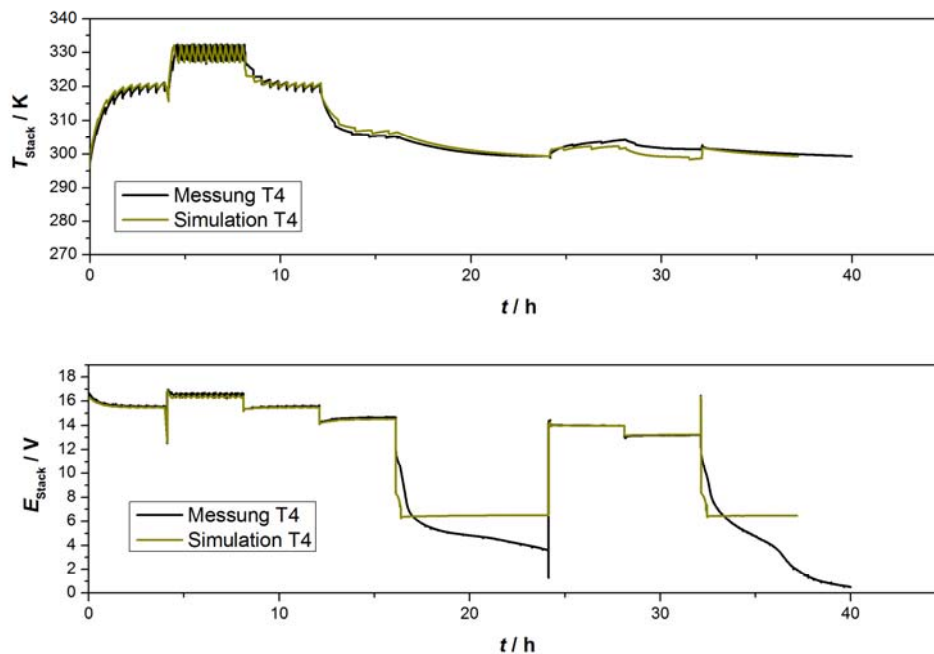


Abbildung 84: Systemprotokoll Modellierung vs. Messung nach 2000 h AST; a) Stacktemperatur, b) Stackspannung

## Fazit

Ein Simulationsmodell für Zelle/Stack sowie für das System und die Vorgänge der Degradation wurde erarbeitet. Seine Vorhersagen für das Verhalten einzelner Parameter zeigen gute Übereinstimmung mit den entsprechenden experimentell bestimmten Parametern, die durch den Betrieb eines beschleunigten Alterungstests (AST) gewonnen wurden. Da sich die Degradationsparameter allerdings weder gegenüber Strom noch der Zeit linear verhalten, ist die direkte Übersetzung auf andere Betriebsmodi schwierig und experimentell noch nicht bestätigt. Der Meilenstein in AP 3 wurde erreicht. Technische Maßnahmen bei der MEA-Fertigung, die die Mischgasbildung reduzieren, können diese möglichen Flexibilitätseinbußen reduzieren und wurden für den Pilotanlagen-Stack in Reitbrook bereits eingesetzt (siehe Ausführungen von Greenerity).

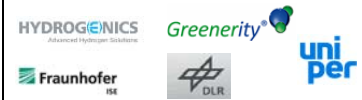
## **AP 4 Erstellung eines Überwachungstools zur Lebensdauervorhersage des Elektrolyseurs**

Auf Grundlage der experimentellen Degradationsuntersuchung aus AP 2 und der Simulationen aus AP 3 kann ein Tool erstellt werden, in das ein beliebiges Protokoll importiert werden kann. Dieses Protokoll simuliert die Einflüsse der Stromdichte und der Zeit auf die Degradation des Elektrolyseestacks. Wichtige Degradationsparameter sind neben Zeit und Stromdichte auch die Zellspannung und die Temperatur. Die beiden letzteren werden aus folgenden Gründen nicht näher betrachtet.



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



- Für Zelltechnologien ohne Titanoberflächen und der Verwendung von Antikorrosionsschutzschichten wird keine passivierende Oxidschichtbildung erwartet.<sup>4,5</sup>
- Temperatur wird durch das System geregelt. Temperaturänderungen aufgrund von Effizienzänderungen und daraus folgender geänderter Wärmeproduktion im Stack wird durch geeignete Systemsteuerung entgegengewirkt.
- Das Tool ist vorerst auf die Hydrogenics Technologie abgestimmt und nicht allgemein gültig.

Auf Grundlage der experimentellen Degradationsuntersuchung aus AP 2 und der Simulationen aus AP 3 kann ein Tool erstellt werden, in das ein beliebiges Protokoll importiert werden kann. Dieses Protokoll simuliert die Einflüsse der Stromdichte und der Zeit auf die Degradation des Elektrolysestacks. Wichtige Degradationsparameter sind neben Zeit und Stromdichte auch die Zellspannung und die Temperatur. Die beiden letzteren werden aus folgenden Gründen nicht näher betrachtet.

- Für Zelltechnologien ohne Titanoberflächen und der Verwendung von Antikorrosionsschutzschichten wird keine passivierende Oxidschichtbildung erwartet.<sup>3,4</sup>
- Temperatur wird durch das System geregelt. Temperaturänderungen aufgrund von Effizienzänderungen und daraus folgender geänderter Wärmeproduktion im Stack wird durch geeignete Systemsteuerung entgegengewirkt.
- Das Tool ist vorerst auf die Hydrogenics Technologie abgestimmt und nicht allgemein gültig.

Das Tool wurde auf Grundlage der E92 Technologie von Hydrogenics entwickelt. Abbildung 85 zeigt zwei Kennlinien, eine aufgenommen mit dem Hylyzer und der E92 Technologie und eine mit der Pilotanlage aus Reitbrook. Sie stimmen sehr gut überein. Unterschiede bei niedrigeren Stromdichten können durch die Temperaturunterschiede erklärt werden. Bei ca. 2,1 A cm<sup>-2</sup> stimmt sowohl die Temperatur als auch die Performance überein.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

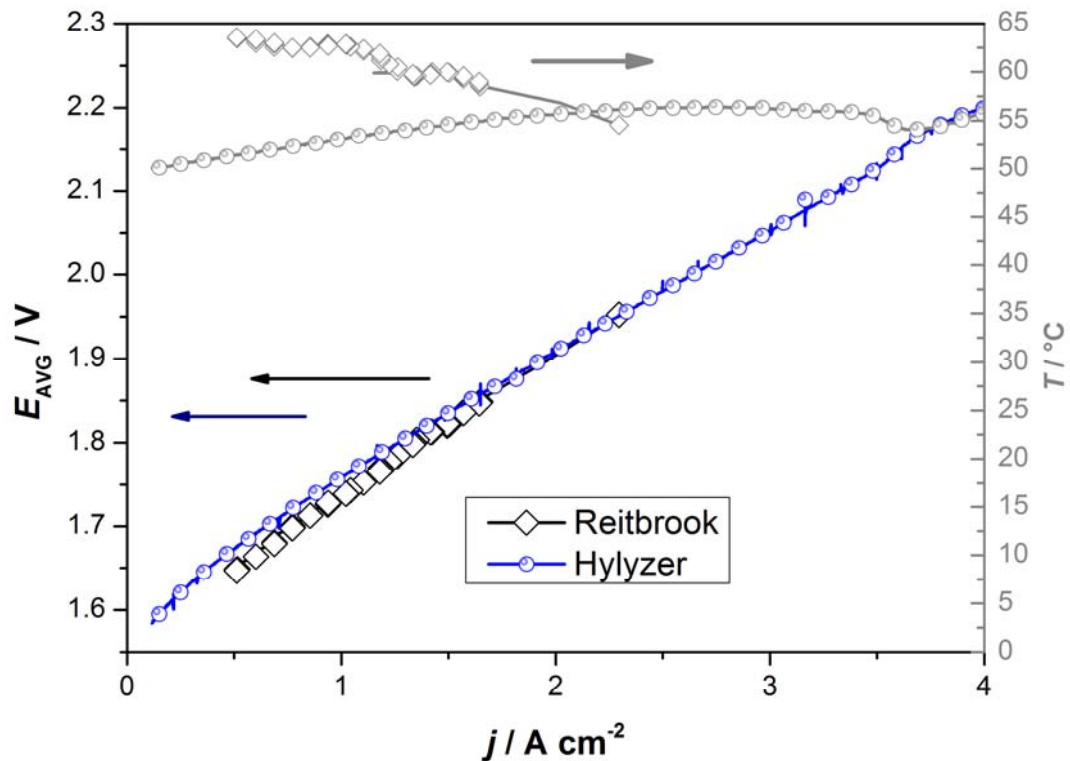


Abbildung 85: Kennlinie Hylyzer (E92) und Reitbrook

Da die Technologien stark miteinander verwandt sind und die MEA dieselbe Beladung und Membran hat, kann nicht nur zusammengefasst werden, dass das Upscaling erfolgreich war, sondern auch, dass das Tool vom Hylyzer auf Reitbrook übertragbar ist.

Im begrenzten Rahmen kann durch dieses Tool innerhalb von wenigen Tagen das zukünftige Verhalten des Elektrolyseurs nach mehreren tausend Stunden Betriebszeit simuliert werden. Diese Vorhersage beschränkt sich allerdings auf die Spannung und somit die Effizienz. Die Auswirkung auf Systemkomponenten konnte derzeit noch nicht implementiert werden. Im Rahmen dieser Projektlaufzeit war die Validierung allerdings auch nur begrenzt möglich und die Auswirkungen auf Betriebszeiten länger als 2000 h müssen durch die erwähnten Funktionen extrapoliert werden.

Abbildung 86 zeigt eine solche Vorhersage bei konstantem Betrieb von 4 A/cm<sup>2</sup> über 5.000 h. Da nach 2.000 h bei 4 A/cm<sup>2</sup> schon Probleme mit der Wasserstoffpermeabilität zu messen waren, ist es fraglich, ob ein 5.000 stündiger Test bei dieser hohen Stromdichte überhaupt durchzuführen ist (siehe Abbildung 84).

Da die gewählten Degradationsfunktionen nicht linear sind, schwächt sich die Degradation ab. Dies ist trotz der Validierung der Degradationsparameter ein konservativer Ansatz.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

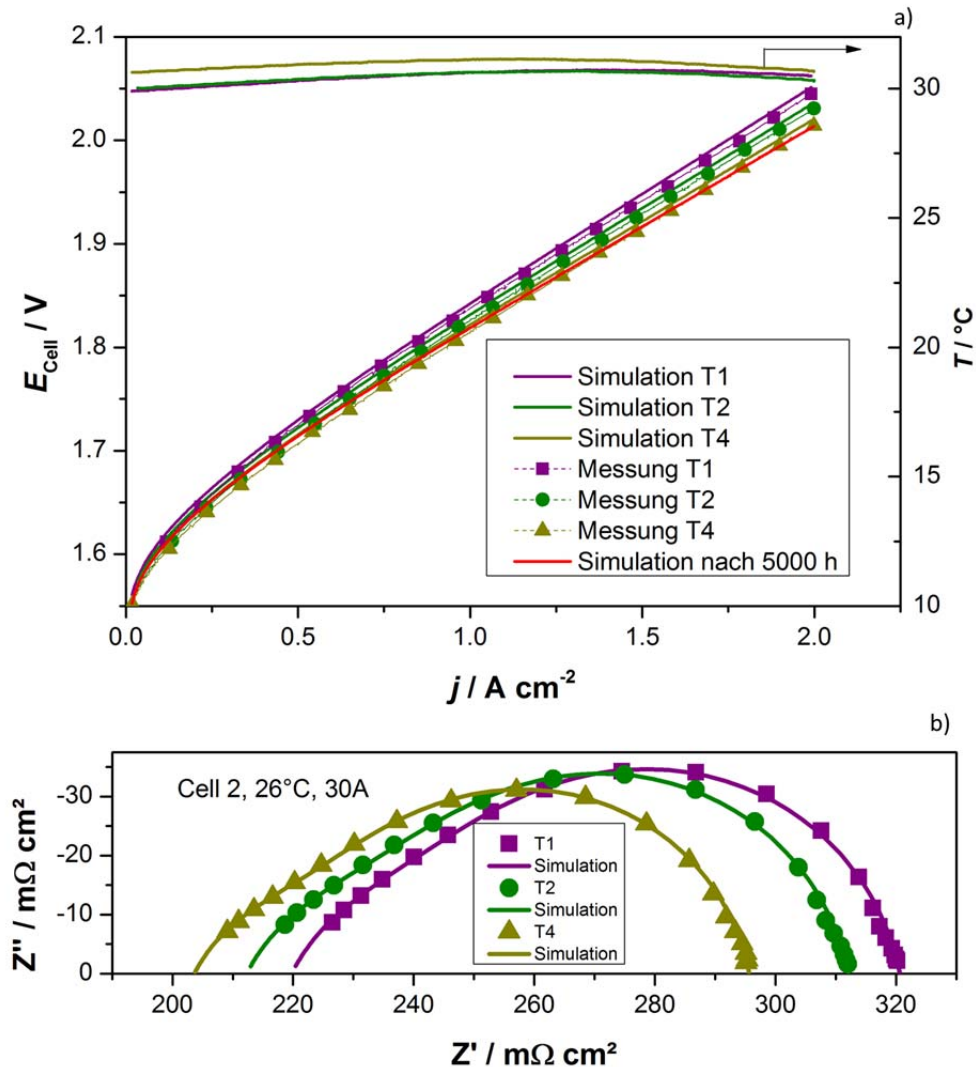


Abbildung 86: Kennlinien der Messung von T1 bis T4 und der Simulation bis 5000 h Vorhersage, b) EIS Messungen von T1, T2 und T3.

Abbildung 87 und 88 stellt die Vorhersage der Elektrolyseurperformance bei Input des in Abbildung 69 beschriebenen generischen und dynamischen Windlastprofils dar. Abbildung 87 stellt die Temperaturantwort und Abbildung 88 die Spannungsantwort dar. Im inneren der Plots wird der gesamte Verlauf nach 5000 Stunden dargestellt. Wie zu erwarten, ist der Effekt vor allem bei hohen Stromdichten bis  $4 \text{ A cm}^{-2}$  zu beobachten, da der Einfluss des Widerstands linear mit der Stromdichte steigt. Die 5000 h dynamisches Windlastprofil resultieren demnach in einer durchschnittlichen Spannungsreduktion von  $-4,7 \mu\text{V h}^{-1}$ , die entsprechend des Effizienzanstiegs, zu einer durchschnittlichen Temperaturreduktion von  $72 \mu\text{K h}^{-1}$  führt. Ob die Lastsprünge in Realität überhaupt durchführbar sind, muss validiert werden. Dies konnte im Laufe der Projektzeit noch nicht umgesetzt werden.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

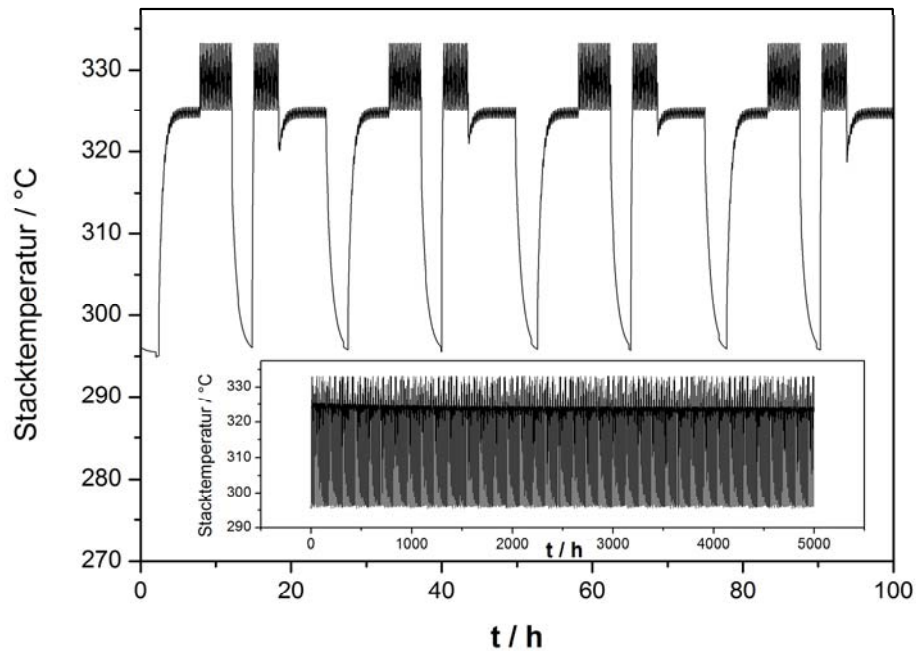


Abbildung 87: Temperaturantwort des generischen und dynamischen Windlastprofils der ersten 100 h und von 5000 h.

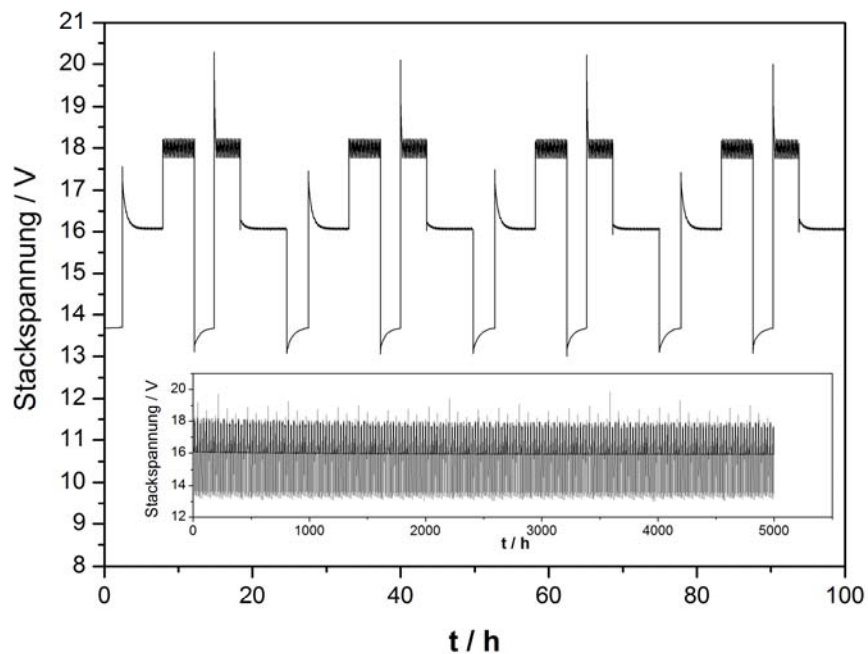


Abbildung 88: Spannungsantwort des generischen und dynamischen Windlastprofils der ersten 100 h und von 5000 h.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Das Tool erlaubt also eine parallele Überprüfung der Degradation durch die zeit- und Betriebsmodus-abhängige semiempirische Simulation, allerdings nur für das spezifische Stackdesign. Auch erste Vorhersagen über den Betrieb von 2000 h heraus sind möglich, wurden allerdings im Laufe der Projektlaufzeit noch nicht validiert.

Des Weiteren sind noch viele Fragen zur Degradation und somit auch zur Vorhersage der Degradation unbeantwortet.

- Wie Verhält sich die Degradation bei Änderung der Last über die Zeit
- Ändern sich die zeitabhängigen Degradationsparameter bei Änderung der Last
- Sind lastabhängige Zeitstempel notwendig

Derzeit konnten nur Elektrolyseurdesignspezifische Degradationsparameter validiert und simuliert werden. Um eine designunabhängige Vorhersage erstellen zu können, sind die Daten eines aus dem Projekt nicht ausreichend. Dies bedarf die Sammlung und Integration von Messdaten vieler Institute und Hersteller wie auch Anwendern und enorme Analyseanstrengungen.

## Fazit

Mit Hilfe von Elektrolyseurmodell und Betriebserfahrungen ist für die untersuchte Technologie eine Vorhersage über mögliche Degradation der Elektrolyseurspannung bzw. –Effizienz möglich. Da nur wenige experimentelle Langzeitergebnisse zur Verfügung standen, konnte dieses Tool zur Lebensdauervorhersage noch nicht endgültig validiert werden. Die im Projekt geplante Simulationsarbeit wurde somit umgesetzt und der Meilenstein erfüllt.

### II.1.4.2 Literaturverzeichnis DLR

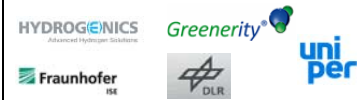
Die folgende Tabelle listet die im Kapitel II.1.4 zitierten Literaturstellen auf.

Tabelle 16: Literaturverzeichnis Kapitel II.1.4

Nr.	Autor	Titel	Veröffentlichungsort/Datum
1	Lettenmeier, P. et al.	Durable Membrane Electrode Assemblies for Proton Exchange Membrane Electrolyzer Systems Operating at High Current Densities	Electrochim. Acta 210, 502–511 (2016)
2	Rakousky, C. et al.	An analysis of degradation phenomena in polymer electrolyte membrane water electrolysis	J. Power Sources 326, 120–128 (2016)
3	Marangio, F., Santarelli, M. & Ca	Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production	Int. J. Hydrogen Energy 34, 1143–1158 (2009)
4	Lettenmeier, P. et al.	Coated Stainless Steel Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzers	J. Electrochem. Soc. 163, F3119–F3124 (2016)
5	Gago, A. S. et al.	Protective coatings on stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane (PEM) electrolyzers	J. Power Sources 307, 815–825 (2016)

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## II.1.5 Hydrogenics

### II.1.5.1 Beschreibung der Arbeitspakete

#### AP1 Definition der Anforderungen und Ziele

Ziel des AP 1 war neben der Definition der Anforderungen und Ziele an die 1 MW PEM Elektrolyse auch die technische Spezifikation der MEA, des Anlagenbetriebsdruckes, der Zellfläche, der Zellspannung, der Überlastfähigkeit und –dauer, der geforderten Wasserstoffqualität und der Regelbarkeit der Elektrolyseanlage.

Diese Anforderungen wurden von den Projektpartnern unter Einbeziehung der unterschiedlichen Sichtweisen (Betreiber, Anlagenbauer, Membranhersteller) in verschiedenen Projektgruppensitzungen diskutiert, verfeinert und im abschließenden Konsens festgelegt. Diese Spezifikation war die Basis für weiterführende Arbeiten in anderen Arbeitspaketen der jeweils beteiligten Projektpartner. Die gemeinsame Diskussion folgte dem Ansatz des technisch machbaren unter Berücksichtigung einer späteren stabil und effizient zu betreibenden PEM-Elektrolyse mit wirtschaftlich ausreichender Lebensdauer. Über Risikoanalysen wurden die beschriebenen Randbedingungen betrachtet, bewertet und final in eine Spezifikation überführt.

Die abgestimmte Spezifikation ist wie folgt:

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Tabelle 17: Spezifikation PEM Stack

Parameter	Spezifikation/Wert
Aktive Fläche	> 1500 cm <sup>2</sup>
Anzahl Zellen	212
Wasserstoffproduktionsrate	229 Nm <sup>3</sup> /h
Elektrische Leistung	1 MW
Auslegungsdruck (DP)	40 bar(ü)
Maximaler Betriebsdruck (MOP)	30 bar(ü)
Betriebstemperatur	50 – 80 °C
Wasserstoffreinheit	>99.99 %
Energieverbrauch	4.0 – 5.2 kWh/Nm <sup>3</sup>
Stackvolumen	0,38 m <sup>3</sup>
Gewicht	1.380 kg

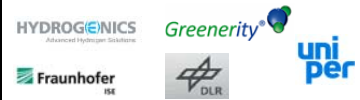
Die Arbeiten am Scale up der Bipolarplatte sowie zur Geometrie und Größenoptimierung wurden vorgenommen. Hydrogenics GmbH hat hier eng mit der Stackentwicklung der Muttergesellschaft kooperiert. Diese Kooperation stellte sicher, dass die Entwicklungsziele in eine Produktentwicklung überführt wurden. Aufbauend auf den Erfahrungen wurden mit computergestützten Simulationen zur Fluid- und Druckverteilung auch Stress- und Deformationsberechnungen durchgeführt. Neben dem Flowfield wurden die Medienverteilung durch das Flowfield über der MEA betrachtet und die äußeren Anschlüsse für Wasser und Produktgase bestimmt.

## AP 2 Bau und Test von Kurz-Stacks mit vergrößerter aktiver Fläche.

Dieser Schritt dient der Sicherstellung der Übertragbarkeit der festgelegten Spezifikation in ein Produkt. Dabei dient die Einschränkung auf einen Kurz-Stack der finanziellen Risikominimierung ohne die technische Aussagekraft zu schmälern. Ein Kurz-Stack hat die gleiche Geometrie und inneren Aufbau wie der letzte MW Stack. Lediglich die Anzahl der Zellen ist deutlich reduziert. Gleichwohl werden so viele Zellen in Reihe geschaltet, dass die elektrische und thermische Kompatibilität gegeben ist. So kann die praktische Überprüfung unter realen Randbedingungen durchgeführt werden. Mit positivem Abschluss dieser Tests ist gesichert, dass der 1 MW Stack

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



unter gleichen Betriebsrandbedingungen das gleiche Verhalten, wie der Kurz-Stack aufweisen wird. Die benötigten Produktionsschritte, Qualitätsanforderungen an Material und Fertigung werden erarbeitet, getestet und validiert.



Abbildung 89: Teststand zur Vermessung der Kurz-Stacks

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden zwei Kurz-Stacks aufgebaut und vermessen. Ein für diese Vermessungen benötigter Teststand wurde angepasst und in Betrieb genommen. Die Arbeiten wurden mit der Zertifizierung des 1 MW Stacks nach ATEX und PED abgeschlossen.



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Technology

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per



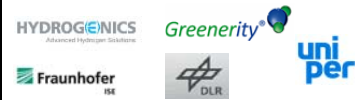
Abbildung 90: MEA in finaler Größe, sowohl für Kurz-Stack als auch für 1 MW Stack verbaut



Abbildung 91: Kurz-Stack eingebaut im Teststand

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Mit Abschluss der Arbeiten von AP 1 und AP 2 liegen die Erkenntnisse und Qualifizierungen für die Fertigung des 1 MW Stacks vor. In AP 3 wird der Stack gefertigt, zertifiziert, dokumentiert und Hydrogenics GmbH zur Integration gesendet.

### AP3 Bau und Test 1 MW PEM Stack

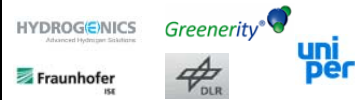
Dieses Arbeitspaket umfasst den Bau, Test und die Zertifizierung des 1 MW PEM Stacks.



Abbildung 92: 1 MW PEM Stack fertig assembliert

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## EC Certificate of Conformity

**In accordance with the requirements of the Pressure Equipment Directive 97/23/EC and the Pressure Equipment Regulations 1999, UK Statutory Instrument 1999 No. 2001 and 2002 No. 1267**

This is to certify that the Quality Management System of:

**Hydrogenics Corporation  
220 Admiral Boulevard,  
Mississauga, Ontario, L5T 2N6, Canada.**

has been assessed against the requirements of Annex III, Module D of the Pressure Equipment Directive 97/23/EC, and Schedule 4, Module D of the Pressure Equipment Regulations 1999 and conforms to the requirements for the products shown below:

### Design and Manufacture of PEM Electrolyser Cell Stacks

Approval is subject to the continued maintenance of the quality system in accordance with the requirements of the above Directive and Regulations, and continuing to comply with the EC Design and/or EC Type Examination Certificate(s) as listed on the attached schedule.

Authorisation is hereby given to use the LRV Notified Body Identification Number in accordance with the requirements of the specified Directive and Regulations in relation to the products as identified above.

Certificate No: 0038/ PED/ECD1420010/B  
Original Approval: 05 September 2014  
Current Certificate: 05 September 2014  
Certificate Expiry: 04 September 2017  
LRV Notified Body Number 0038

Gopal Nair on behalf of Lloyd's Register Verification

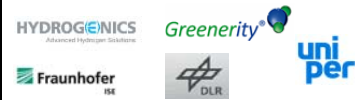
Lloyd's Register Verification Limited (Reg. no. 4929226) is a limited company registered in England and Wales. Registered office: 71 Fenchurch Street, London, EC3M 4BS, UK. A subsidiary of Lloyd's Register Group Limited.

Lloyd's Register Group Limited, its affiliates and subsidiaries and their respective officers, employees or agents are, individually and collectively, referred to in this clause as the "Lloyd's Register". Lloyd's Register assumes no responsibility and shall not be liable to any person for any loss, damage or expense caused by reliance on the information or advice in this document or howsoever provided, unless that person has signed a contract with the relevant Lloyd's Register entity for the provision of this information or advice and in that case any responsibility or liability is exclusively on the terms and conditions set out in that contract.

LRV/ECD/PEM/Verif\_2014/Rev.1

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## EC Certificate of Conformity Certificate 0038/PED/ECD1420010/B Schedule

In accordance with the requirements of the Pressure Equipment  
Directive 97/23/EC and the Pressure Equipment Regulations 1999,  
UK Statutory Instrument 1999 No. 2001 and 2002 No. 1267

**Hydrogenics Corporation**  
220 Admiral Boulevard,  
Mississauga, Ontario, L5T 2N6, Canada.

Products	Certificate Number	Issuing Notified Body
PEM 1500E Water Electrolysis Cell Stack	0038/PED/ECD1420010/A	Lloyd's Register Verification

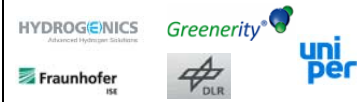
Schedule Issue: 01  
Date of Schedule Issue: 05 September 2014  
LRV Notified Body Number 0038

\_\_\_\_\_  
Gopal Nair on behalf of Lloyd's Register Verification

Abbildung 93: CE Zertifikat 1 MW PEM Stack

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Der 1 MW Stack wurde am 29. September 2014 an Hydrogenics GmbH gesendet. Vereinbarungsgemäß wurden die Arbeitspakete 1 bis 3 von der Hydrogenics Corporation durchgeführt.

### **AP4 Megawatt System Design Verfahrenstechnik**

Parallel zu den Arbeitspaketen 1 bis 3 wurde das Arbeitspaket 4: „Megawatt System Design Verfahrenstechnik“ gestartet. Gegenstand dieses Arbeitspaketes war die parallele Entwicklung und soweit möglich sicherheitstechnische Prüfung der verfahrenstechnischen und elektrischen Komponenten und Anlagen, die den 1 MW Stack in Betrieb setzten.

Hierbei handelt es sich um das erste Grobkonzept geeignet zur Identifizierung aller zum Betrieb benötigten Komponenten, einer ersten Sicherheitsbetrachtung zur gemeinsamen Analyse mit dem begleitenden externen Zertifizierer.

Die einzelnen Schritte, insbesondere Überlegungen zum Sicherheitskonzept wurden in enger Abstimmung mit dem späteren Betreiber Uniper Gas Storage durchgeführt, damit standortspezifische Vorgaben sowie die Schnittstellenkommunikation berücksichtigt werden konnten.

Im Fortschritt dieses Arbeitspaketes wurden ebenfalls Workshops zum optimalen Arbeitsdruck unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Randbedingungen wie Komponentenverfügbarkeit, nachgelagerte Druckanforderungen (Häufigkeit und Relevanz) und daraus abgeleitete Bauteilanforderungen durchgeführt. Die folgende Abbildung 94 zeigt in vereinfachter Form das Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagramm der PEM Elektrolyse.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Systems

Greenery<sup>®</sup>

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

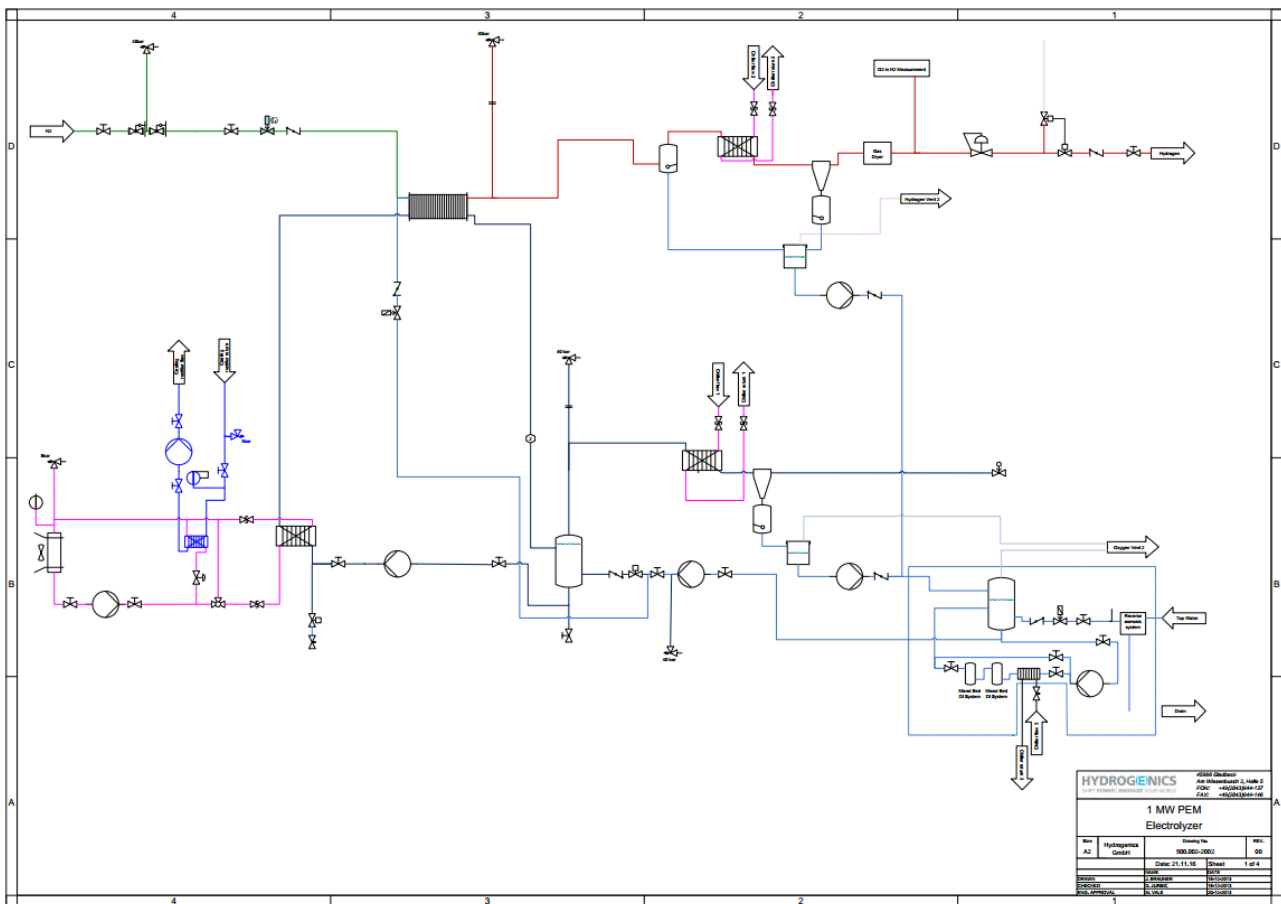


Abbildung 94: Vereinfachtes RI-Fließbild der PEM Elektrolyse

Die Anlage besteht aus den folgenden verfahrenstechnischen Haupt-Subsystemen:

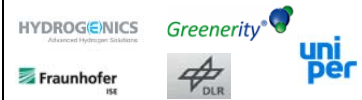
- DI-Wasseraufbereitung
- Primärer Stack-Kreislauf (DI-Wasserversorgung Anode)
- Gas-Wasserseparation (Anode und Kathode)
- Druckhaltung
- Gastrocknung
- Sekundärer Kühlwasserkreislauf mit Rückkühlung
- Ausblaseleitungen für Wasserstoff und Sauerstoff
- Kondenswasserkreislauf

Neben den verfahrenstechnischen Haupt-Systemen werden die folgenden Hilfssysteme benötigt:

- Prozesssteuerluft
- Warn- und Messeinrichtungen
- Stickstoffversorgung
- Kaltwassererzeugung

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Die wesentlichen elektrischen Subsysteme sind:

- Gleichrichter
- Prozess-SPS
- Sicherheits-SPS
- Hilfsantriebe und Spannungswandler für 24V

Die Festlegung der Arbeitspunkte erfolgt an Hand der Strom-Spannungskennlinie des Zellstapels. Diese Arbeitspunkte bilden die Vorgabe für die Auslegung der verfahrenstechnischen und elektrischen Subsysteme.

Der Arbeitspunkt der Elektrolyseanlage kann entlang der Betriebskennlinie (U-I) frei definiert werden. Da die MEA (Beladung, Größe etc.) unter wirtschaftlichen und betrieblichen Randbedingungen definiert wurde, wurde abschließend der Nominalarbeitspunkt des Zellstapels wie folgt festgelegt, siehe Tabelle 18. Diese Festlegung wurde unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und technischer Randbedingungen sowie dem gesetzten Projektziel definiert. Anlagenbetriebspunkte oberhalb der nominalen Leistung sind per Definition Überlasten. Neben der eigentlichen elektrischen Leistung der Überlast ist die Dauer der Überlast von entscheidender Bedeutung für das gesamte Anlagendesign. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen. Wird eine maximale Überlast von +50%, in diesem Fall also 1,5 MW Leistungsaufnahme durch den Stack, ohne zeitliche Vorgabe festgelegt, so ist in der Regel eine solche Leistungsaufnahme realisierbar bis einzelne Komponenten ihre betrieblichen Grenzwerte, wie Druck oder Temperatur erreichen und mit Erreichen dieser Grenzwerte die Anlage über Abschaltwerte in den Stand-by oder ggf. in den E-Stopp fahren. Diese Grenzwerte können je nach Komponente und Anlagendesign im Bereich von 30 s bis hin zu einigen Minuten erreicht werden. Wird die Überlastforderung mit einer definierten Haltedauer verknüpft, so muss die gesamte Anlage auf diesen Betriebspunkt ausgelegt werden. Strenggenommen stellt der nominale Betriebspunkt somit einen Betriebspunkt auf der Analgenkennlinie dar, die durch den „Überlast“-Betriebspunkt nach oben begrenzt ist. Im vorliegenden Fall wurde die 1 MW Anlage für den dauerhaften Betrieb bei 1,5 MW ausgelegt.

Die Sinnhaftigkeit dieser Auslegung ergibt sich aus der Tatsache, dass erneuerbare Energien, wie zum Beispiel Strom aus Windkraft zu Starkwindzeiten entsprechend dauerhaft höhere Leistung abgeben. Zur Erbringung netzdienlicher Leistungen ist es aber entscheidend genau zu diesen Zeiten ebendiese erhöhte Leistung auch dauerhaft aufnehmen zu können.

Für die Erbringung von netzdienlichen Leistungen müssen die Anlagen durch den Netzbetreiber qualifiziert werden. Im Rahmen dieser Qualifizierung ist auch die Reaktionszeit der Systemantwort (Elektrolyse) auf eine Sollwertänderung vorgegeben. Primärregelleistung muss innerhalb von 30 Sekunden und Sekundärregelleistung innerhalb von 5 Minuten im jeweils erforderlichen Umfang vollständig bereitgestellt werden. Entsprechend dieser Anforderungen wurde die Leistungsregelung der Elektrolyse ausgelegt. Mit Abschluss dieser Festlegung wurde das Anlagendesign in Arbeitspaket 5 final festgelegt und abgeschlossen. Tabelle 18 zeigt die finale Spezifikation

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Tabelle 18: Finale Spezifikation

Parameter	Spezifikation/Wert
Stack Volumen	0,38 m <sup>3</sup>
Wasserstoffproduktionsrate bei Nennlast	229 Nm <sup>3</sup> /h
Elektrische Leistung bei Nennlast	1 MW
Wasserstoffproduktionsrate bei Überlast	290 Nm <sup>3</sup> /h
Elektrische Leistung bei Überlast	1.5 MW
Auslegungsdruck (DP)	40 barü
Maximaler Betriebsdruck (MOP)	30 barü
Betriebstemperatur	50 – 80 °C
Wasserstoffreinheit	>99.99 %
Systemantwort (min Last – 1 MW)	< 30 s
Energieverbrauch	4.0 – 5.2 kWh/Nm <sup>3</sup>

Zusätzlich wurden in diesem Arbeitspaket Untersuchungen zu bestimmten verfahrenstechnischen Subsystemen durchgeführt, um Komponentenfehlverhalten in der Gesamtanlage möglichst auszuschließen.

## AP 5 Auslegung und Auswahl der übrigen verfahrenstechnischen Komponenten

Basierend auf den Vorarbeiten in AP 4 wurde parallel in AP 5 die abschließende Auslegung und Auswahl aller verfahrenstechnischer und elektrotechnischer Anlagenkomponenten durchgeführt. Die vollständige 3-dimensionale und 2-dimensionale Konstruktion wurde abgeschlossen.



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

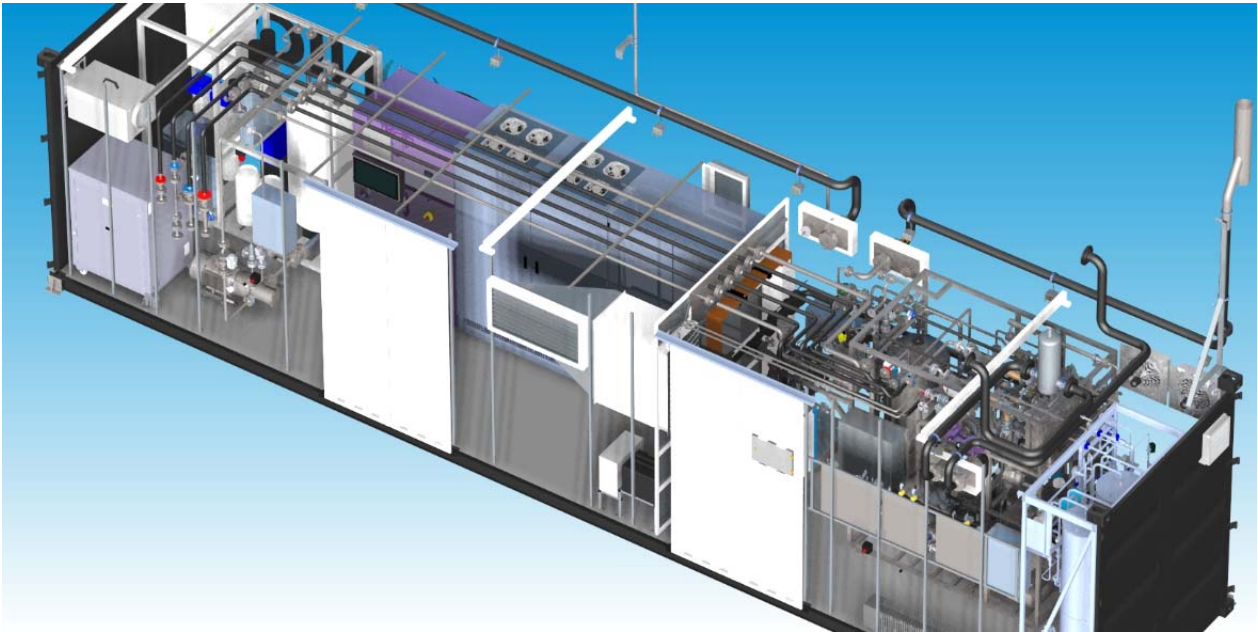
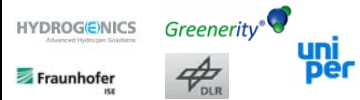


Abbildung 95: Finales CAD 3-D Modell

Mit dem vorhandenen Anlagendesign, der Sicherheitsanalyse, der Kenntnis der Sicherheitsregelkreise und der geplanten Anlagenfahrweise wurde das Lastenheft für die Anlagensteuerung erstellt. Die Anlagensteuerung ist in drei wesentlichen Funktionen unterteilt.

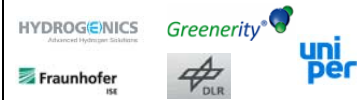
1. Anlagensteuerung nicht sicherheitsgerichteter Komponenten und Funktionen
2. Sicherheitsgerichtete Anlagen Funktionen/Steuerungen/Überwachungen
3. Bedienoberfläche

In enger Abstimmung mit einem namenhaften Systemhaus wurde die benötigte Hardware besprochen und ausgelegt. Die Hardware bestimmt die einzusetzende Software. Zur Vermeidung von möglichen Inkompatibilitäten wurde, wie bereits ausgeführt, Soft- und Hardware von einem Unternehmen bezogen.

In Abstimmung mit Uniper Gas Storage wurde sowohl die Datenschnittstelle als auch die Anlagenremotesteuerungsschnittstelle definiert. Das Elektrolysesystem ist für den unbemannten Anlagenbetrieb ausgelegt. Von einem räumlich getrennten Betriebsstand kann die PEM-Elektrolyse überwacht und gefahren werden. Dabei war es wichtig die Anlage so zu automatisieren, dass der Betreiber keine besonderen Kenntnisse über die Anlage selbst besitzen muss. Eine einfache Sollwertvorgabe in einem festen Format muss ausreichen.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Selbstverständlich muss die Anlage während der Inbetriebsetzung und zu Analyse und Servicezwecken auch rein manuell bedienbar sein. Die Anlagesicherheit ist in jedem Anlagenzustand entsprechend zu gewährleisten.

Beispielhaft zeigt die Abbildung 79 ein Bedienfenster der Steuerungssoftware. Je nach erteiltem Zugriffsrecht (Administrator, Service Mitarbeiter, Bediener) sind unterschiedliche manuelle Eingabemöglichkeiten definiert. Die sicherheitsgerichtete Anlagensteuerung ist in allen Fällen aktiv und überwacht und gewährleistet den sicheren Anlagenbetrieb. Arbeiten an der sicherheitsgerichteten Anlagensteuerung können nur vom Hersteller (Hydrogenics) durchgeführt werden und müssen lückenlos dokumentiert werden.

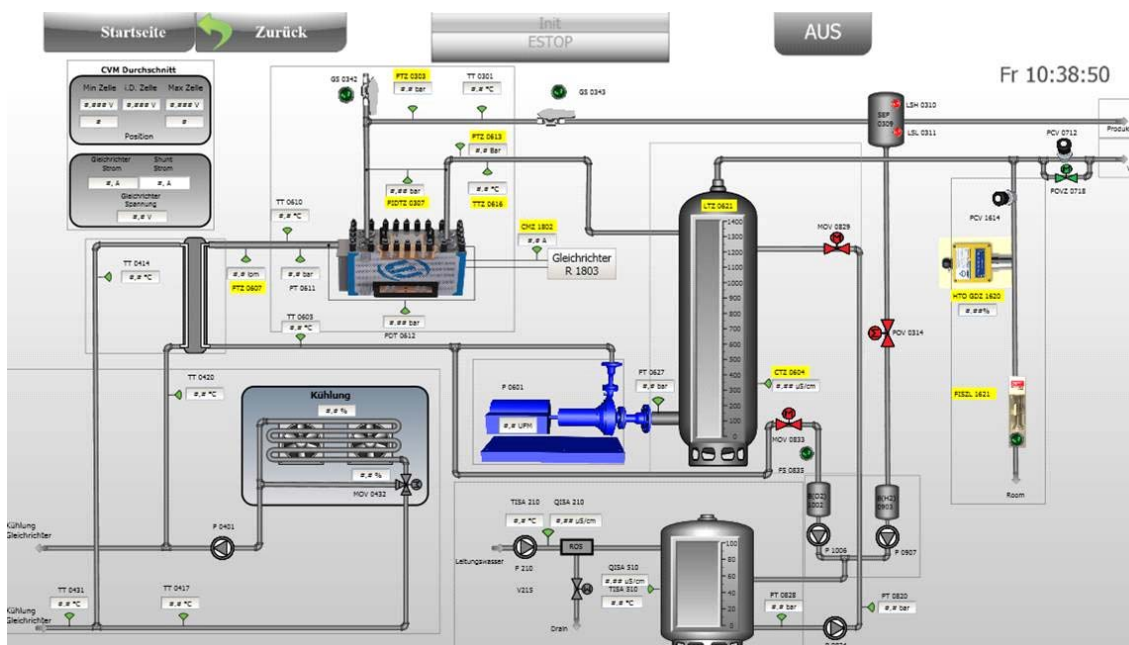


Abbildung 96: Beispielfenster aus der Bedienoberfläche

## AP6: Fertigung und In-house Inbetriebnahme des 1 MW Gesamtsystems

Überschneidend mit dem Abschluss von AP 5 wurde mit der Vorbereitung der Fertigung begonnen. Die folgenden Abbildungen 97 bis 104 geben einen Einblick in die Bauphase.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Solutions

Greenerty

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per



Abbildung 97: Blick in den Prozessraum auf Stromschienen



Abbildung 98: Blick in den Prozessraum mit Teilen des Primärwasserkreislaufes

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS

Advanced Hydrogen Solutions

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per



Abbildung 99: Blick in den Prozessraum auf die H<sub>2</sub> Trocknung



Abbildung 100: Blick auf die Anlagensteuerung und Wasseraufbereitungsanlage

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Systems

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per



Abbildung 101: Blick in den Prozessraum ohne PEM Stack

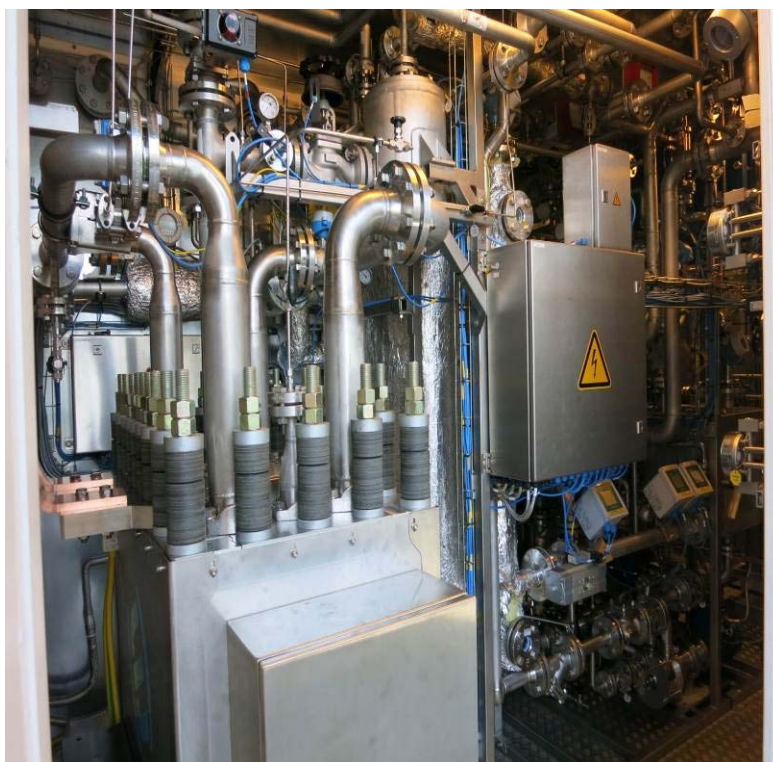


Abbildung 102: Blick in den Prozessraum mit 1 MW PEM Zellstapel

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Technology

Fraunhofer  
ISE

Greenery

DLR

uni  
per



Abbildung 103: Integrierter 1 MW PEM Zellstapel mit Medienanschlüssen

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

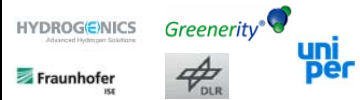


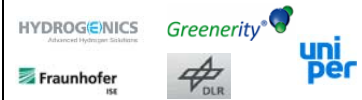
Abbildung 104: 40' Container mit Rückkühler vor der Inbetriebnahme

Mit Abschluss der Bauphase begann die in-house Inbetriebnahme. Diese gliederte sich in die folgenden Schritte.

1. Funktionskontrolle Gleichrichter
2. Abschließende Kontrolle des as-built Status mit dem RI-Fließbild sowie dem Elektroschaltplan
3. Kommunikationsprüfung (I/O check)
4. Prüfung der funktionalen Sicherheit
5. Inertisierung und Druckprüfung
6. Befüllung der wasserführenden Kreisläufe
7. Inbetriebnahme der Wasserkreisläufe
8. Einbau und Anschluss Zellstapel
9. Elektrische Prüfung Zellstapel
10. Kommunikationsprüfung Zellstapel
11. Inertisierung Zellstapel

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



12. Dichtigkeitsprüfung Zellstapel

13. Inbetriebnahme Zellstapel

Im Anschluss an die Inbetriebnahme schließt sich ein mehrtägiger Probetrieb an, der mit der Werksabnahme am 30.04.2015 abgeschlossen wurde.

Die Anlage wurde am 06.05.2015 nach Hamburg Reitbrook geliefert.



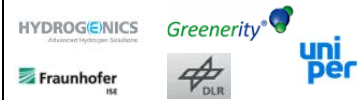
Abbildung 105: Transport der 1MW Elektrolyseanlage von Gladbeck nach Hamburg nach Werksabnahme

Nach der erfolgten Anlieferung, wurde die Elektrolyseanlage vor Ort installiert und mit der Vor-Ort-Inbetriebnahme begonnen.



## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



### AP 7: Lieferung, Inbetriebnahme und Betriebsbegleitung des 1 MW Gesamtsystems

Die Bilder 1.5.21 und 1.5.22 zeigen die Vor-Ort-Montage.



Abbildung 106: Vor-Ort Montage

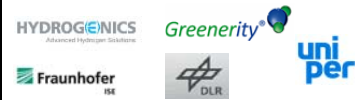


Abbildung 107: Vor-Ort-Montage abgeschlossen

Nach erfolgter Vor-Ort-Montage erfolgte die erneute Inbetriebsetzung.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



Dabei werden die folgenden Arbeitsschritte durchlaufen.

1. Kommunikationsprüfung (I/O check)
2. Prüfung der funktionalen Sicherheit
3. Inertisierung und Druckprüfung
4. Befüllung der wasserführenden Kreisläufe
5. Inbetriebnahme der Wasserkreisläufe
6. Einbau und Anschluss Zellstapel
7. Elektrische Prüfung Zellstapel
8. Kommunikationsprüfung Zellstapel
9. Inertisierung Zellstapel
10. Dichtigkeitsprüfung Zellstapel
11. Inbetriebnahme Zellstapel

Am 15.10.2015 fand die offizielle Inbetriebnahme der Power-to-Gas Anlage am Standort Hamburg-Reitbrook statt.

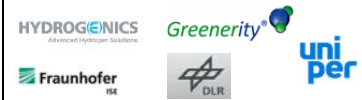


Abbildung 108: Offizielle Inbetriebnahme

Die Abnahme der Anlage erfolgte am 31. Mai 2016 mit der Leistungsfahrt, siehe auch Uniper Kapitel II.1 AP 9.

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



### II.2 Voraussichtlicher Nutzen / Ausblick

Die PEM-Technologie hat durch ihre kompakte Bauweise und effizienten Betriebsweise das Potential, die Wasserstoffgestehungskosten (als Summe aus CAPEX und OPEX) von zukünftigen Power-to-Gas-Anlagen signifikant zu verringern. Zurzeit fehlen allerdings unabhängig von der verwendeten Elektrolysetechnologie solide Geschäftsmodelle, die eine Realisierung solcher kommerziell getriebener Power-to-Gas-Installationen rechtfertigen.

Hauptproblem der mangelnden Wirtschaftlichkeit sind die durch das EEG geschaffenen Rahmenbedingungen, bei denen Power-to-Gas-Anlagen als Stromendverbraucher behandelt werden und damit die vollständige EEG-Umlage zu entrichten ist. Mit den daraus resultierenden Strombezugspreisen für die Elektrolyse lassen sich zurzeit keine wettbewerbstaughen Wasserstoffpreise erzielen. Erschwerend kommt hinzu, dass sich derzeit höhere Preise für „grünen“ Wasserstoff nicht am Markt realisieren lassen.

UST beabsichtigt den Prototypen auch über das Projektende hinaus weiter zu betreiben, sucht aber im Moment noch nach Modellen, die einen wirtschaftlichen Weiterbetrieb oder einen weiteren entscheidenden Erkenntnisgewinn ermöglichen. Es werden verschiedene Möglichkeiten untersucht, die auch zu einer Re-Lokalisierung der modularen, kompakten Anlage an einen anderen Standort führen könnten. Zurzeit wurde die Anlage in den ruhenden Betrieb überführt und produziert keinen weiteren Wasserstoff produzieren.

Sobald geänderte Rahmenbedingungen einen Weiterbetrieb ermöglichen wird eine Wiederinbetriebnahme angestrebt. Wiederinbetriebnahme könnte auch bedeuten, die Anlage an einen anderen, wirtschaftlich attraktiveren Standort zu versetzen (z.B. einer Industrieanlage) bei der ein Premiumpreis für grünen Wasserstoff erzielt werden könnte. Ein konkretes Projekt für ein solches Szenario liegt bislang zwar noch nicht vor, es laufen allerdings verschiedenste Planungen, das PEM-System schnellstmöglich wieder zu reaktivieren. Im speziellen der Wasserstoffmarkt für den Mobilitätssektor scheint hier vielversprechend (Wasserstofftankstellen, Insellösungen wie z.B. Werksmobilität etc.).

### II.3 Allgemeiner Fortschritt bei PEM Elektrolysen in der Projektlaufzeit (Siemens etc.)

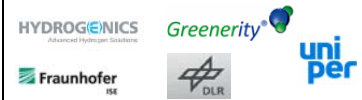
Parallel zur PEM Elektrolyse in Reitbrook wurden im Energiepark Mainz auch durch die Firma Siemens PEM Elektrolyse im industriellen Maßstab in Betrieb genommen (Siemens Silyzer 2000, 3 x 1.3 MW, peak power 2 MW pro Modul). Im Unterschied zur Reitbrooker Anlage ist diese in einem Gebäude untergebracht und hat eher einen stationären Charakter im Vergleich zur Containerbauweise von Hydrogenics. Die angegebene Überlastfähigkeit der Mainzer Anlage liegt mit 50% in derselben Größenordnung, kann aber nur für begrenzte Zeit betrieben werden.

- <http://www.energiepark-mainz.de/>

Das Institut für Raumfahrtantriebe des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) am Standort Lampoldshausen ist einer der größten Wasserstoffnutzer Europas. Gemeinsam mit der

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



ZEAG Energie AG startete das DLR mit der Umsetzung einer regenerativen Wasserstoffprozesskette. Hierbei wird der benötigte Wasserstoff in einem 1-MW-PEM-Elektrolyseur mit elektrischer Energie aus dem benachbarten Windpark Harthäuser Wald erzeugt und vor Ort in den Sektoren Raumfahrt, Energie und Mobilität eingesetzt. Das entsprechende Projekt H2ORIZON stellt damit eine Demonstrations- und Forschungsplattform zur Anwendung eines breiten Spektrums von Wasserstofftechnologien bereit und soll auch für die Nutzung durch Dritte zur Verfügung gestellt werden.

- [http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10259/369\\_read-18739/#/gallery/23788](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10259/369_read-18739/#/gallery/23788)

Im Laufe der Projektlaufzeit wurden auch Studien und Workshops bezüglich der Elektrolysetechnologien und der einhergehenden Speicherung/ Nutzung des Wasserstoffs und möglichen Optimierungspotentialen veröffentlicht:

- <https://www.sintef.no/contentassets/f8060684df6f459da532cb3aec6b8c02/d.1.1-cost-benefit-analysis-and-cost-and-performance-target-for-large-scale-pem-electrolyser-stack.pdf>
- <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb15/824812212.pdf>

Mehrere Elektrolyseprojekte werden derzeit durch die Initiative HYPOS unterstützt.

Das Augenmerk der derzeitigen Forschung und Entwicklung liegt getrieben durch die Fördergeber bei höheren TRLs und bei der Umsetzung von Demonstrationsanlagen. Der 1.5 MW Elektrolyseur in Reitbrook stellt eine solche Demonstrationsanlage in außergewöhnlicher Flexibilität und Effizienz dar. Um einen weiteren Betrieb zu gewährleisten muss allerdings ein rentables Geschäftsmodell gefunden werden. Neben der notwendigen Anpassung der Politischen Rahmenbedingungen muss sich die Aufmerksamkeit der Forschung und Entwicklung auf die Reduktion der Elektrolysekosten und der Erhöhung der Effizienz konzentrieren. Dies wird auch von Universitäten, Forschungsinstituten und Unternehmen durch Arbeiten in der Katalysator-, Korrosions- und Systemforschung umgesetzt.

Hydrogenics hat seit dem Projektstart 3 weitere PEM Elektrolyse Projekte begonnen.

- In der Provinz Ontario wird ein 2 MW PEM Elektrolyseur errichtet, der neben der Energiespeicherung im Erdgasnetz auch Regelleistung bereitstellen wird. Hierzu wurden Verträge mit dem Übertragungsnetzbetreiber geschlossen.
- Im schottischen Methil, Fife wird ein PEM Elektrolyseur in ein Energie Forschungszentrum installiert.
- Im Rahmen des von der FCHJU und der ForschEL geförderten Projektes HyBalance wird ein 1 MW PEM Elektrolyseur für den Standort Hobro geliefert. Der aus überschüssiger Windenergie erzeugte Wasserstoff wird gespeichert und über eine Pipeline einer industriellen Nutzung zugeführt oder mit Hochdruck Trailern an Wasserstofftankstellen in Dänemark geliefert.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## II.4 Veröffentlichungen der Projektergebnisse

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der, auf Basis der Projektergebnisse erstellten, Veröffentlichungen.

Tabelle 19: Aus KompEISys hervorgegangene Veröffentlichungen

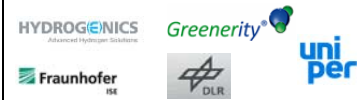
Nr.	Autor	Partner	Titel	Veröffentlichungsort/Datum
1	P. Lettenmeier, R. Wang, R. Abouatallah, S. Helmly, T. Morawietz, R. Hiesgen, S. Kolb, F. Burggraf, J. Kallo, A.S. Gago, K.A. Friedrich,	DLR	Durable Membrane Electrode Assemblies for Proton Exchange Membrane Electrolyzer Systems Operating at High Current Densities	Electrochim. Acta. 210 (2016) 502–511. doi:10.1016/j.electacta.2016.04.164
2	P. Lettenmeier, R. Wang, R. Abouatallah, F. Burggraf, A.S. Gago, K.A. Friedrich,	DLR	Coated Stainless Steel Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzers	J. Electrochem. Soc. 163 (2016) F3119–F3124. doi:10.1149/2.0141611jes
3	P. Lettenmeier, R. Wang, R. Abouatallah, F. Burggraf, A.S. Gago, K.A. Friedrich	DLR	Proton Exchange Membrane Electrolyzer Systems Operating Dynamically at High Current Densities	ECS Trans. 72 (2016) 11–21. doi:10.1149/07223.0011ecst
4	P. Lettenmeier, R. Wang, R. Abouatallah, B. Saruhan, O. Freitag, P. Gazdzicki, et al.	DLR	Low-Cost and Durable Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Electrolyzers	Sci. Rep. submitted (2016) <b>Submitted</b>
5	P. Lettenmeier, S. Hosseiny, L. Wang, A. S. Gago, K. A. Friedrich	DLR	Synthesis and Characterization of Highly Active Ir Nanoparticles for Oxygen Evolution Reaction in Acid Media	66th ISE annual meeting, Taipei, Taiwan, , 4-9 October. (2015)
6	P. Lettenmeier, R. Wang, R. Abouatallah, A. S. Gago, K. A. Friedrich	DLR	Durable MEAs for PEM electrolyzer systems operating at high current densities	66th ISE annual meeting, Taipei, Taiwan, 4-9 October. (2015)
7	P. Lettenmeier, R. Wang, R. Abouatallah, A.S. Gago, and K. A. Friedrich	DLR	Durable Membrane Electrode Assemblies (MEA) for Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer Systems Operating at High Current Densities	229th ECS Meeting, May 29-June 3, (2016)
8	A. S. Gago, P. Lettenmeier, L. Wang, S. Kolb, F. Burggraf, and K. A. Friedrich	DLR	Novel Components for PEM Electrolysis: Status and Challenges	229th ECS Meeting, May 29-June 3, (2016)
10	Georg, A.	Fraunhofer ISE	Korrosion von Bipolarplatten in PEM-Elektrolyseuren und Brennstoffzellen	Jahrbuch Oberflächentechnik Band 72, Eugen G. Leuze Verlag (2016)

Zudem wurde das Projekt auf unterschiedlichen Konferenzen einem breiten Publikum vorgestellt. Im Folgenden sind einige Präsentationen ohne Anspruch auf Vollständigkeit genannt.

- Alkalische Elektrolyse Workshop, Cottbus, Februar 25, 2014
- Chancen der Energiewende 2 Düsseldorf im Rahmen des Japantages, May 19, 2014
- Grundsteinlegung und Pressekonferenz Reitbrook, Mai 2014
- Wasserstofftag Lampoldshausen, Juli 2014
- IAE Annex 30 workshop, Herten Germany September 2014
- Expertengruppe Power to Gas, AWZ Herten, Januar. 2015
- IEA Annex 30 workshop, Herten April 2015
- G7 Workshop, Berlin, März 2015
- NIP Vollversammlung, Berlin, Juni 2015
- Gasfachliche Aussprachetagung (GAT), Düsseldorf, Oktober 2015
- European Utility Week, Wien, November 2015

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



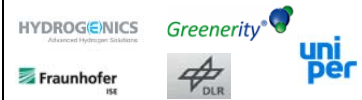
- EGATEC, Wien, November 2015
- Veranstaltung H2 Netzwerk NRW und HyCologne Großspeicher, Düsseldorf, Januar 2016
- OTTI Power to Gas Conference, Düsseldorf, März 2016
- H2Mobility Kongress des BMVI, Berlin, April 2016
- DENA Strategieplattform P2G Jahrestagung, Berlin, Juni 2016
- Expertengruppe P2G, Dortmund, September 2016
- Route der Innovationen, ChorForum Essen, November 2016

Insgesamt wurden in der Projektlaufzeit mehr als 80 Besuchergruppen aus Politik, Hochschulen und Wirtschaft mit insgesamt 1252 Besuchern über die Anlage geführt, die reges Interesse an dem Thema PEM Elektrolyse und Power to Gas gezeigt haben.

Im Rahmen des Projekts wurde auch die Website [www.windgas-hamburg.de](http://www.windgas-hamburg.de) erstellt um das Projekt einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Die auf Messen und Konferenzen von Uniper genutzten Flyer/Fact Sheets mit den wesentlichen Informationen zum Projekt KompEISys befinden sich im Anhang dieses Berichts.

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



## III. Tabellenverzeichnis

Tabelle	Titel	Seite
1	Vergleich der ursprünglichen Projektziele mit den realen Werten der Pilotanlage	4
2	Betrachtete Materialauswahl für die Kostenanalyse	35
3	Ermittelte Gesamt- und spezifischen Kosten für die drei betrachteten Zellflächen	36
4	Kosten für den Anoden-PTL in unterschiedlichen Konfigurationen	38
5	Materialparameter der getesteten PTL Materialien	41
6	Zusammenfassung der durchgeführten Experimente mit Zuordnung zur jeweiligen Komponente und kurzer Erläuterung zum zu validierenden Aspekt	59
7	Überblick über erfolgte Validierung Elektroyse-Systemmodell am Teststand	61
8	Validität des Modells nach Validierung an Feldtestanlage	62
9	Wichtige Komponenten für die zustandsorientierte Instandhaltung	71
10	Auszug aus den Ergebnissen für die zustandsorientierte Instandhaltung	72
11	Übersicht über verfügbare Messdaten	73
12	Einflussfaktoren (Szenario 1-3) auf die zu erwartende Leistung und Lebensdauer der MEA	81
13	Planung der MEA Fertigung für das 1 MW PEM Elektrolyse System	92
14	Einfluss der Membrandicke auf die Gasreinheit mit und ohne Mitigation	100
15	Vergleich der gemessenen Gasreinheit mit und ohne Randkonzept 2	103
16	Literaturverzeichnis Kapitel II.1.4	133
17	Spezifikation PEM Stack	135
18	Finale Spezifikation	144
19	Aus KompElSys hervorgegangene Veröffentlichungen	157

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung

HYDROGENICS  
Advanced Hydrogen Technology

Greenery

Fraunhofer  
ISE

DLR

uni  
per

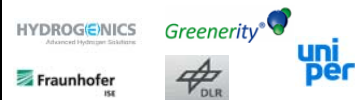
## IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Titel	Seite
1	Gesamtprojektstruktur	8
2	Projektplan Uniper Energy Storage	9
3	Projektplan Fraunhofer ISE – blau: ursprünglich beantragt und grün: verlängerte Bearbeitung	10
4	Meilensteinplanung der Greenery Arbeitspakete	10
5	Projektplan DLR: "Normal Blau" ursprünglicher Zeitplan, davon hellblau nicht durchgeführt. Dunkelblau verschobene/zusätzliche Bearbeitung	11
6	Aktualisierter Zeitplan Hydrogenics	12
7	1 MW Leistungsfahrt	20
8	Ausschnitt aus der 1 MW Leistungsfahrt	20
9	1,5 MW Leistungsfahrt	21
10	Sprungantwort – Standby auf 500 kW	22
11	Sprungantwort – Standby auf 1.000 kW	22
12	Sprungantwort – Standby auf 1.500 kW	23
13	Treppenfahrt – Leistungssprünge von 150 kW	24
14	Mögliche Nutzungspfade für die PEM Elektrolyse als zentraler Baustein der Power to Gas Technologie	26
15	Teststand für Einzelzellen am Fraunhofer ISE für Kurz- und Langzeitcharakterisierung	28
16	Druckkennlinien (links) und Temperaturkennlinien (rechts) gemessen am neu aufgebauten Teststand und verglichen mit alten Messdaten.	29
17	Schematischer Ablauf einer Dauermessung	31
18	Stationäre U/i-Kennlinien in Abhängigkeit von der Temperatur. Vergleich unterschiedlicher Beladungen auf der Kathodenseite.	32
19	Schematischer Zellaufbau der betrachteten Stack-Konzepte. Im oberen Teil erfolgt der Medien	34
20	Relative Anteile der Zell- und Stack-Komponenten aller drei betrachteter Zellgrößen an den Gesamtkosten	37
21	Spezifische Kosten der einzelnen Stackkomponenten unter der Annahme, dass der Betriebspunkt durch eine Erhöhung der Stromdichte um 10 % bzw. 20 % (bei konstanten Zellspannung) verschoben wird.	39
22	Außenansicht der Laborzelle für da PTL-Screening (links) und CAD-Zeichnung des Anoden-Kompartiments - hier abgebildet mit Flow-Kanal-Einleger (rechts).	40
23	Polarisationskurven für verschiedene Volumenströme (links) und Druckbereiche (rechts) mit eingesetzten Strömungsfeldern.	42
24	Polarisationskurven für verschiedene Volumenströme (links) und Druckbereiche (rechts) ohne eingesetzte Strömungsfelder.	43
25	Polarisationsdiagramm von unbeschichtetem Edelstahl (316L bzw. 1.4404, Elektrolyt: pH=5, 5µM H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0.5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1mV/s)	44
26	Prinzipielle Auswirkung von Defekten in einer Korrosionsschutzschicht auf Edelstahl und Titan	45



# Abschlussbericht gemäß AZK 6

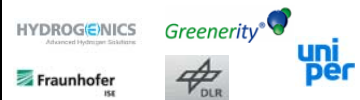
Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



27	Messzellen für die elektrochemischen Messungen bei Raumtemperatur (links) und bei 80°C (rechts).	46
28	Messvorrichtung für die Bestimmung des Kontaktwiderstands (links: Gesamtansicht mit Gewicht und 4-Punkt-Spannungsmessgerät, rechts: Detail einer Bipolarplatte in Kontakt mit einem Karbonvlies zwischen zwei vergoldeten Zylindern).	47
29	Chronoamperometrie an Titan. ICR vor Messung: 41 mOhm*cm <sup>2</sup> , nach Messung 1600 mOhm*cm <sup>2</sup> .	47
30	Abbildung 30: Chronoamperometrie an Niob. ICR vor Messung: 51 mOhm*cm <sup>2</sup> , nach Messung 760 mOhm*cm <sup>2</sup> .	48
31	Chronoamperometrie an Tantal. ICR vor Messung: 29 mOhm*cm <sup>2</sup> , nach Messung 77 mOhm*cm <sup>2</sup>	48
32	Vertikale Sputteranlage am Fraunhofer ISE	49
33	Messung der offenen Klemmspannung in Abhängigkeit der Zeit an einem Edelstahlblech mit und ohne einer galvanischen Goldschicht	50
34	Polarisationsdiagramm an einem unbeschichteten Titan-Blech	51
35	Horizontale Sputteranlage am Fraunhofer ISE. Der Pfeil weist auf die lineare Ionenquelle.	52
36	Schematische Darstellung einer Schicht auf einem Substrat mit Zwischenbereichen	53
37	Modellierung Elektrolyse-System und Systemgrenzen, Jede dargestellte Komponente entspricht einem eigenen Modul	56
38	Ergebnis der Validierung des Stacks (thermisch) inklusive Messunsicherheit in Form von exemplarischen Fehlerbalken	60
39	Auswirkung der Modellkorrekturen auf die Validität der Simulation. Der Fehlerbalken zeigt exemplarisch die maximale Abweichung für eine Validität.	63
40	Validität Druckverlustberechnung Zellstapel	64
41	Validierung thermische Gesamtmodellierung	65
42	Umfang der modellierten Komponenten und eingesetzte Verschaltung	66
43	Betriebsführung Einspeisung – Speicherung	67
44	Produzierter und eingespeicherter Wasserstoff zusammen mit ND- und MD-Speicherdruck	68
45	Übersicht über den Betrieb der Elektrolyse-Anlage	72
46	Wirkungsgrade der Elektrolyse-Anlage	76
47	Feuchte Elektrolyse über die Laufzeit der Anlage	78
48	Einschwingzeit bei Lastwechsel: Druck	79
49	Einschwingzeit bei Lastwechsel: Temperatur	80
50	Einfluss der Membrandicke auf die Leistung der MEA	82
51	Wasserstoff Durchtritt durch die Membran in Abhängigkeit der Membrandicke	82
52	Einfluss der Temperatur auf die Leistung der MEA am Beispiel von 50 °C (grüne Kurve) und 80 °C (rote Kurve)	83
53	Leistungsanalyse bei 80 °C in einem 25 cm <sup>2</sup> Zelldesign. Leistungsvergleich der Greenery Referenz MEA mit der neu entwickelten MW MEA Generation KompEISys 1	86
54	Leistungsanalyse von 25 cm <sup>2</sup> MEA Ausschnitten aus großen MEAs bei 80°C. MW MEA Generation KompEISys 1	86

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

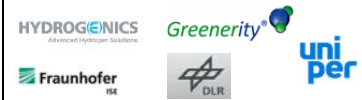
Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



55	Leistungsanalyse im 10 Zellen Stack	87
56	Lebensdaueranalyse der Greenery MEAs im 10 Zellen Stack	88
57	Neuer 10 Zellen Stack	89
58	Inbetriebnahme und Leistungsanalyse des neuen 10 Zellen Stacks mit der neu entwickelten MW MEA Generation KompEISys 1	90
59	Elektrochemische Qualitätskontrolle der Endprodukte (MEA)	92
60	Analyse der Gasreinheit, Wasserstoffgehalt im Sauerstoff	93
61	Überprüfung der Reproduzierbarkeit der neuen Kathoden-Katalysatorpaste	94
62	Leistungsvergleich verschiedener E400 Gen. 3 MEA Chargen (Zellenaufbau Konfiguration 3)	95
63	Lebensdaueranalyse der KompEISys 3 MEA mit einer 50-90 µm dicken Membran (grüne Linie) im Vergleich mit 2 MEA Varianten mit 150-200 µm dicken Membranen, Referenz MEA (blaue Linie) und der KompEISys 2 MEA (orange Linie) mit reduzierter Edelmetallbeladung	97
64	Einfluss der Membrandicke auf die System Effizienz und die benötigte Energiemenge für die Erzeugung von 1 Nm <sup>3</sup> Wasserstoff	99
65	Leistungsvergleich einer 50-90 µm dicken Membran mit einer 100-140 µm und einer 150-200 µm dicken Membran. Alle MEAs haben die gleiche Katalysatorbeladung	100
66	Leistungsvergleich der MW KompEISys 1 MEA (Standard Edelmetallbeladung) mit der neu entwickelten KompEISys 2 MEA mit halbiertes Edelmetallbeladung	103
67	Systemprotokoll	105
68	Teil eins des Systemprotokolls der Reitbrooker Pilotanlage. a) Stromdichte, b) Stackspannung, c) Leistung und d) Temperatur.	106
69	Generisches dynamisches Windlastprofil	107
70	50 kW Elektrolyse-Teststand in Stuttgart- Talstraße	109
71	a) Spannungskennlinie bei 3,6A/cm <sup>2</sup> und natürlicher Strömung bei 80°C. Innen: UI Kennlinie der Zelle bei 80°C. b) UI Kennlinie vor und nach der HCD-Messung. Innen: Impedanzspektrum der Zelle vor und nach der HCD- Messung.	110
72	a) j und E des Langzeittests, b) Systemprotokoll, c) und d) Kennlinie bis 2 bzw. 4 A cm <sup>-2</sup> , e) EIS Messungen bei 0,25 A cm <sup>-2</sup>	112
73	Schematische Darstellung eines a) Ersatzschaltbilds der elektrochemischen Impedanz Spektroskopie (b) und die aufsummierten Überspannungen in Form einer Kennlinie (c).	113
74	a) Zellspannung, b) ohmscher Widerstand, c) Elektrodenwiderstand und d) Aktivierungswiderstand der Zellen 1-8 über die Zeit T1, T2 und T4. e) Kennlinie der Zelle 2 über die Zeit T1, T2, T3 und T4.	115
75	Links: Atomprozent F im Ionenaustausch Harz und rechts: die F release rate in at% / h	116
76	Schema Modellzusammensetzung	117
77	Beispielhafte Ergebnisse des elektrochemischen Modells: a) Spannung vs. Temperatur; b) Kennlinie modelliert und Experimentell; c) Ohm'sche Überspannung vs. Stromdichte; d) Aktivierungsüberspannung vs. Stromdichte	121
78	Schema Systemmodell und Wärmeströme	122
79	Systemprotokoll Modellierung vs. Messung; a) Stacktemperatur, b) Stackspannung	123

# Abschlussbericht gemäß AZK 6

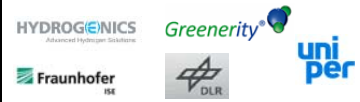
Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



80	Betriebsmodusabhängige Änderung des Ohm'schen Widerstands.	124
81	a) Kombination der Zeit und stromabhängigen Degradationsfunktionen aus b und c.	125
82	Zeitabhängige Änderung der Austauschstromdichte	126
83	a) Kennlinie und EIS zu Beginn (T1) nach 650 h bei 4 A cm <sup>-2</sup> (T2) und nach 2000 h bei 4 A cm <sup>-2</sup> (T4) und b) die dazugehörigen Simulationen.	127
84	Systemprotokoll Modellierung vs. Messung nach 2000 h AST; a) Stacktemperatur, b) Stackspannung	128
85	Kennlinie Hylyzer (E92) und Reitbrook	130
86	Kennlinien der Messung von T1 bis T4 und der Simulation bis 5000 h Vorhersage.	131
87	Temperaturantwort des generischen und dynamischen Windlastprofils der ersten 100h und von 5000h.	132
88	Spannungsantwort des generischen und dynamischen Windlastprofils der ersten 100h und von 5000h.	132
89	Teststand zur Vermessung der Kurz-Stacks	136
90	MEA in finaler Größe, sowohl für Kurz-Stack als auch für 1 MW Stack verbaut	137
91	Kurz-Stack (6 Zellen) eingebaut im Teststand	137
92	1 MW PEM Stack fertig assembliert	138
93	CE Zertifikat 1 MW PEM Stack	140
94	Vereinfachtes RI-Fließbild der PEM Elektrolyse	142
95	Finales CAD 3-D Modell	145
96	Beispielfenster aus der Bedienoberfläche	146
97	Blick in den Prozessraum auf Stromschienen	147
98	Blick in den Prozessraum mit Teilen des Primärwasserkreislaufes	147
99	Blick in den Prozessraum auf die H <sub>2</sub> Trocknung	148
100	Blick auf die Anlagensteuerung und Wasseraufbereitungsanlage	148
101	Blick in den Prozessraum ohne PEM Stack	149
102	Blick in den Prozessraum mit 1 MW PEM Zellstapel	149
103	Integrierter 1 MW PEM Zellstapel mit Medienanschlüssen	150
104	40' Container mit Rückkühler vor der Inbetriebnahme	151
105	Transport der 1MW Elektrolyseanlage von Gladbeck nach Hamburg nach Werksabnahme	152
106	Vor-Ort Montage	153
107	Vor-Ort-Montage abgeschlossen	153
108	Offizielle Inbetriebnahme	154

## Abschlussbericht gemäß AZK 6

Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserelektrolyse-System –  
Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung



### V. Anhang

Berichtsblatt mit Kurzfassung  
Document Control Sheet  
Uniper Fact Sheets

# Membrane electrolysis for Power to Gas plants

## Project details

<b>Title</b>	WindGas Hamburg
<b>Project Executing Unit</b>	Uniper Energy Storage GmbH
<b>Collaborative project</b>	With HanseWerk AG, Hydrogenics GmbH, Greenerity, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE and German Aerospace Center (DLR)
<b>Location</b>	Germany
<b>Planned timescale</b>	2012 - 2016

## Strategic impact

- More efficient electrolysis will support the expansion of Power to Gas as a storage for energy from renewables
- Opens up new business opportunities for hydrogen electrolysis and Power to Gas
- Develops PEM electrolysis at utility-scale that is new to Uniper and the energy industry

## Opportunity

Uniper is developing Power to Gas technology as an innovative way to store energy from renewable sources – in particular wind and solar – to balance long-term fluctuations in generation and to reduce CO<sub>2</sub> emissions by the industrial, heat and transport sector. The technology, which is being demonstrated in a separate project at Uniper’s pilot plant WindGas Falkenhagen, uses renewable electricity to produce hydrogen by electrolysis of water. The hydrogen is subsequently fed under pressure into the local natural gas grid.

The development of a more efficient electrolyser, using the Proton-Exchange-Membrane (PEM) method as opposed to conventional alkaline electrolysis, would offer distinct advantages for the Power to Gas approach. No PEM electrolyzer units in the 1.5MW input range are commercially available as yet.

Scaled-up PEM electrolysis would improve both the technical and economic conditions for the implementation of Power to Gas and give better prospects for its business model as a cost-effective, environment-friendly way to store renewable energy.

## Project aims

The project will comprise the development of the first prototype PEM electrolyzer operating in the 1.5MW range. Field trials of the system will then be conducted, the hydrogen produced being injected into the local natural gas grid.

In PEM electrolysis, a semi-permeable polymer-based membrane in the electrode generates hydrogen at high pressure, delivering lower energy losses and higher hydrogen purity compared with conventional systems which use a liquid alkaline electrolyte.

In October 2015 the WindGas Hamburg pilot plant was commissioned. It is located in Reitbrook near Hamburg (Germany) at a Uniper owned site. Partners in the project carry out separate tasks, with SolviCore developing the membrane electrode assembly, the basic component of the electrolyzer, and Hydrogenics constructing and packaging the complete electrolyzer unit. Uniper Energy Storage is responsible for the field trial and operation of the prototype as part of a hydrogen injection plant. Operation of the electrolyzer will be monitored over a period of one year. Scientific monitoring of the project is carried out by German Aerospace Center (DLR) and Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

With our partners we receive public sponsorship from the National Hydrogen and Fuel Cell Technology Innovation Program of the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI).



The WindGas Hamburg plant

## Use and benefits

At present PEM electrolyzer units are commercially available only in the power input range of up to 100kW. In comparison to alkaline electrolyzers, PEM units show faster load dynamics and have the capacity for temporary overload operation. Both these properties are advantages in Power to Gas application.

The realization of compact 1.5MW PEM electrolyzer units will be a next-generation technology that is new to Uniper and the energy industry as a whole. It will open up new prospects for efficient and economic Power to Gas solutions and new business opportunities for Uniper.

By participating in the project, we will demonstrate leadership in the Power to Gas concept and gain valuable experience in the assessment and operation of innovative electrolyzer technologies.

[ust.info@uniper.energy](mailto:ust.info@uniper.energy)

[www.windgas-hamburg.com](http://www.windgas-hamburg.com)

# Power to Gas

## Key summary

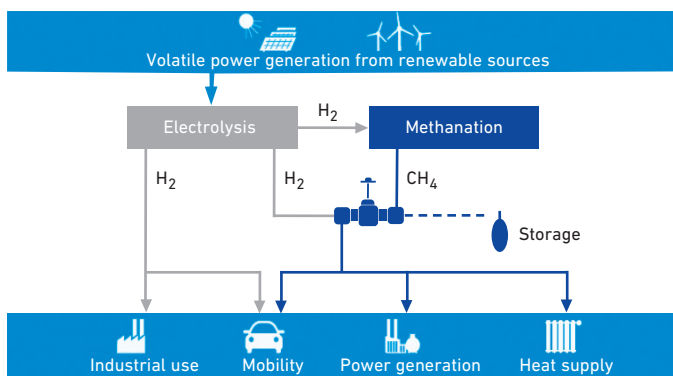
- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Technical advantages</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration of renewable sources into energy system and diverse market entries</li> <li>• Converting electricity into hydrogen, and in a subsequent step the hydrogen into methane, allows large quantities of energy to be stored even over longer periods</li> <li>• The natural gas infrastructure serves as a transmission and storage medium</li> </ul>                                 |
| <b>Positive impacts</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Renewable sources will be better exploited with Power to Gas and brought to different market sectors</li> <li>• Flexibility and ability to store the energy contributes to a more stable energy system</li> <li>• Gas production from renewable energies reduces CO<sub>2</sub> emissions</li> <li>• Large, flexible gas storage capacities are available for electricity storage</li> </ul> |

Uniper is developing innovative storage solutions for the future energy system to balance increasingly intermittent supply from renewables and demand. In the past there was no need for large electricity storage facilities because conventional power stations were able to supply electricity in line with demand. For natural gas it has always been different: with large quantities of the natural gas being imported from remote regions, and the need to balance seasonal (as well as daily) fluctuations in demand, there is a well-developed gas storage and transportation infrastructure.

The Power to Gas approach is building on the advantages of this well established infrastructure. It is a promising approach for storing electricity from renewable sources, converted into hydrogen or methane, during times of potential grid overload for subsequent use in line with demand. Considering its flexible applications and its storage abilities Power to Gas helps to stabilise the energy system. Moreover, the use of green electricity provides a gas product made from renewables, which contributes to CO<sub>2</sub> emission reduction.

## Conversion from electricity to gas

### Main applications



Modified after: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

Transformation of electricity from renewable energy to hydrogen via electrolysis of water. Green hydrogen can be used for heating, mobility, industry or power generation. An important transport option is to feed the hydrogen into the gas grid.

## Technology description

The Power to Gas technology is based on the principle of water electrolysis – the breaking down of water into its components hydrogen and oxygen using energy, in this case electricity from renewable energy. In a subsequent step - known as methanation - the hydrogen can be allowed to react with CO<sub>2</sub> to produce methane. A sustainable source of CO<sub>2</sub> could be biomethane plants.

Next to the conventional alkaline electrolysis, more efficient and compact Proton-Exchange-Membrane (PEM) electrolyzers are being developed to the required Megawatt scale.

In comparison to alkaline electrolyzers, PEM units show faster load dynamics and have the capacity for temporary overload operation. Both of these properties are advantages in Power to Gas applications.

## Technology benefits

Power to Gas offers a number of technical benefits. These include being able to store energy from wind and solar power, when the natural occurrence does not meet the demand. Storage systems provide the link between generation and demand, allowing energy to be distributed when needed. In this way, electricity can be used at anytime, anywhere.

Another advantage of converting electricity into hydrogen or methane is the ability to store large quantities of energy even over long periods of time.

The hydrogen can be fed into the natural gas pipeline system – subject to limitations including not exceeding the limits defined for the infrastructure and for gas appliances – and in this way be used as an energy source for gas-fired equipment.

For methane there are no such limits. Where the hydrogen is turned into methane by reaction with CO<sub>2</sub> as described above, it can be blended with natural gas at any concentration.

## Positive impact on energy infrastructure

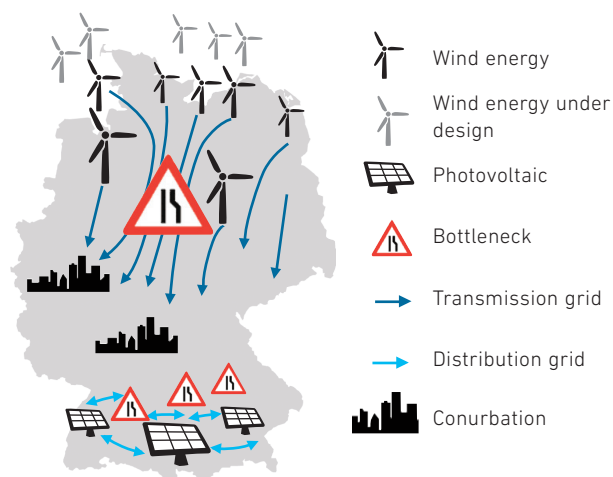
Nowadays the increasing share of fluctuating wind and solar energy push the electricity grid beyond its limits. This is why the economy is likely to derive the biggest benefit from renewables if these sources can be integrated into existing energy infrastructures.

Green hydrogen can be used for the generation of electricity in gas-fired power plants, in the heat energy market, as a motor fuel (hydrogen or natural gas mobility) and in industrial applications. Industrial users are, for example, refineries, fertilizer manufacturers or the chemical and steel industry.

The blended hydrogen or methane can be shipped to consumers using existing buried – and hence “invisible” – natural gas pipelines. Natural gas storage facilities allow the energy to be stored over long periods of time.

The ability to draw on the gas infrastructure will allow Power to Gas to ease the load on electricity grids, as more and more renewable capacity comes on stream. Whilst new transmission lines will still have to be built, Power to Gas offers significant room for optimization.

## Bottlenecks in Germany's electricity grid



Most of Germany's wind capacity is located in the north and north-east of the country while photovoltaic systems are mostly installed in the south. Electricity has to be transmitted over long distances. There are already bottlenecks in the grid. This situation could be eased by applying the Power to Gas concept to allow electricity from renewable sources to be stored and transmitted to consumers.

## Climate protection

Power to Gas allows renewable energies to be fully integrated into the existing energy system.

It is a means of using renewable energy even during times of surplus production. This means that the use of fossil fuels (e.g. coal, oil and gas) and thus greenhouse gas emissions will be reduced in the future, because combustion of hydrogen does not produce any CO<sub>2</sub> emissions. In this context, Power to Gas is an innovative and technically mature tool for the integration of renewable energy.

Uniper is involved in the development of Power to Gas and other storage technologies to be able to supply cleaner and better energy.

## Technology in action

Power to Gas pilot plant Windgas Falkenhagen (Germany): proven technology electrolysis (Alkaline electrolysis).

Power to Gas – PEM Electrolysis pilot plant Windgas Hamburg (Germany): next generation electrolysis (PEM electrolysis).

[ust.info@uniper.energy](mailto:ust.info@uniper.energy)



# Membranelektrolyseverfahren für Power to Gas-Anlagen

## Projektinformationen

<b>Titel</b>	WindGas Hamburg
<b>Ausführende Gesellschaft</b>	Uniper Energy Storage GmbH
<b>Gemeinschaftsprojekt</b>	Mit HanseWerk AG, Hydrogenics GmbH, Greenerity, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
<b>Projektland</b>	Deutschland
<b>Projektdauer</b>	2012 - 2016

## Strategischer Einfluss

- Effizientere Elektrolyseverfahren unterstützen die Verbreitung von Power to Gas-Speicherlösungen für Erneuerbare Energien
- Erschließung neuer Geschäftschancen im Bereich Wasserstoffelektrolyse und Power to Gas
- Entwicklung eines PEM-Elektrolyseurs im Anlagenmaßstab; Neuheit für Uniper und die Energiewirtschaft

## Chancen

Die Power to Gas-Technologie bietet Uniper ein innovatives Verfahren zur Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen, insbesondere Wind- und Solarkraft. Auf diese Weise werden Erzeugung und Verbrauch aufeinander abgestimmt und durch weitere Verfahren können zudem die CO<sub>2</sub> Emissionen im Industrie-, Wärme- und Mobilitätssektor gesenkt werden. In der Uniper-Pilotanlage WindGas Falkenhagen wird demonstriert, wie der Erneuerbare Strom zur Erzeugung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse genutzt wird. Anschließend wird der Wasserstoff ins lokale Erdgasnetz eingespeist.

Die Entwicklung eines effizienteren PEM-Elektrolyseurs (Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseur) anstelle eines konventionellen alkalischen Elektrolyseurs hätte deutliche Vorteile für den Power to Gas-Ansatz. Bisher gibt es keinen handelsüblichen PEM-Elektrolyseur für einen Eingangsleistungsbereich von 1,5 MW.

Ein verbessertes PEM-Elektrolyseverfahren würde sowohl die technischen als auch die wirtschaftlichen Bedingungen für die Umsetzung des Power to Gas-Konzeptes optimieren und leistungsfähige Perspektiven für das Power to Gas-Geschäftsmodell, als kosteneffizientes und umweltfreundliches Verfahren zur Speicherung Erneuerbarer Energie eröffnen.

## Projektziele

Das Projekt umfasst die Entwicklung eines ersten Prototypen eines PEM-Elektrolyseurs für den 1,5MW-Eingangsleistungsbereich. Anschließend wird das System einem Praxistest unterzogen. Der dabei erzeugte Wasserstoff wird ins lokale Erdgasnetz eingespeist.

Bei der PEM-Elektrolyse erzeugt eine halb-durchlässige Polymermembran in der Elektrode unter hohem Druck Wasserstoff. Im Vergleich zu herkömmlichen alkalischen Elektrolyseuren sind die Energieverluste geringer und der Wasserstoff ist reiner.

Bei der im Oktober 2015 Inbetrieb genommenen Wasserstoff-Einspeiseanlage WindGas Hamburg am Uniper-Standort Reitbrook in Hamburg haben die Projektpartner unterschiedliche Aufgaben. SolviCore hat die Membranelektrodenbaugruppe entwickelt, der Grundbestandteil des Elektrolyseurs, und Hydrogenics hat die Konstruktion und Konfektionierung des kompletten Elektrolyseurs übernommen. Uniper Energy Storage ist für den Praxisversuch und Betrieb des Prototypens zuständig. Für den Erprobungsbetrieb des Elektrolyseurs ist ein Zeitraum von einem Jahr angesetzt. Eine wissenschaftliche Begleitung des Projekts erfolgt durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme.

Uniper Energy Storage und ihre Partner erhalten für das Projekt eine öffentliche Förderung im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).



Speicheranlage Hamburg

## Nutzen und Vorteile

Die derzeit am Markt erhältlichen PEM-Elektrolyseure haben nur einen Eingangleistungsbereich bis 100 kW. PEM-Einheiten haben im Vergleich zu alkalischen Elektrolyseuren eine bessere Leistungsdynamik und erlauben eine vorübergehende Überlastfahrweise. Diese beiden Eigenschaften sind vorteilhaft für Power to Gas Anwendungen.

Die Realisierung eines kompakten 1,5 MW PEM-Elektrolyseurs ist eine Zukunftstechnologie, die sowohl für Uniper als auch die gesamte Energiebranche neu ist. Hierbei eröffnen sich Uniper neue Perspektiven für effiziente und wirtschaftliche Power to Gas-Lösungen sowie neue Geschäftschancen.

Mit der Teilnahme an diesem Projekt demonstriert Uniper ihre führende Rolle beim Power to Gas-Konzept und sammelt wertvolle Erfahrungen hinsichtlich Bewertung und Betrieb innovativer Elektrolyseur-Technologien.

[ust.info@uniper.energy](mailto:ust.info@uniper.energy)

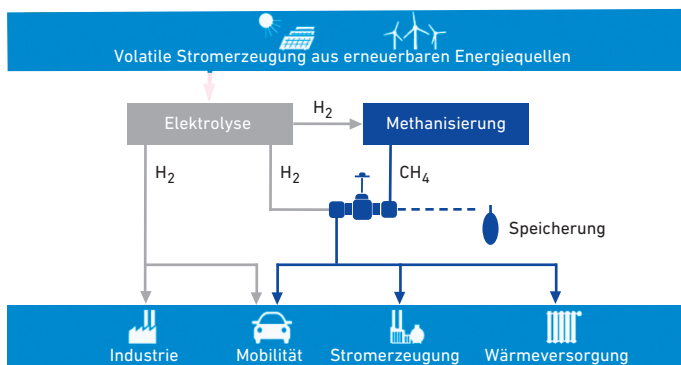
# Power to Gas

## Kurzzusammenfassung

<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration Erneuerbarer Energiequellen in das Energiesystem und Eintritt in verschiedene Märkte</li> <li>Die Umwandlung von Strom in Wasserstoff, und dessen Umwandlung in Methan ermöglicht es, große Energiemengen auch über längere Zeiträume zu speichern</li> <li>Die Erdgas-Infrastruktur dient als Transport- und Speichermedium</li> </ul>
<b>Positive Auswirkungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erneuerbare Energiequellen können mit Hilfe von Power to Gas besser genutzt und in unterschiedliche Marktsektoren gebracht werden</li> <li>Beitrag zur Stabilisierung des Energiesystems aufgrund der Flexibilität und Speicherbarkeit</li> <li>Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Gasproduktion aus Erneuerbaren Energien</li> <li>Große, flexible Gasspeicherkapazitäten stehen für die Stromspeicherung zur Verfügung</li> </ul>

## Umwandlung von Strom zu Gas

### Hauptanwendungen



Modifiziert nach: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

Umwandlung von Strom aus Erneuerbaren Energien zu Wasserstoff mittels Elektrolyse von Wasser. „Grüner“ Wasserstoff kann in den Bereichen Wärmeversorgung, Mobilität, Industrie oder Stromerzeugung eingesetzt werden. Eine wichtige Transportoption ist die Einspeisung in das Gasnetz.

Uniper entwickelt innovative Speicherlösungen für das künftige Energieversorgungssystem, mit welchen die zunehmend schwankende Versorgung aus Erneuerbaren Energien und die Nachfrage aufeinander abgestimmt werden können. In der Vergangenheit wurden derart große Stromspeicher nicht benötigt, da konventionelle Kraftwerke in der Lage waren, nachfragegerecht Strom bereitzustellen. Bei Erdgas wiederum ist der Sachverhalt von jeher ein anderer gewesen: Da ein Großteil des Erdgases aus entlegenen Gegenden importiert wird und permanent saisonale und tägliche Nachfrageschwankungen ausgeglichen werden müssen, ist eine gut entwickelte Infrastruktur für die Speicherung und den Transport von Gas vorhanden.

Der Power to Gas-Ansatz basiert auf dieser gut ausgebauten Infrastruktur. Es handelt sich um eine vielversprechende Methode, bei der Strom aus Erneuerbaren Energiequellen in Zeiten einer potentiellen Netzüberlastung in Wasserstoff oder Methan umgewandelt wird, um ihn je nach Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt nutzen zu können. So trägt Power to Gas durch die flexiblen Einsatzmöglichkeiten und die Speicherbarkeit zur Stabilität des Energiesystems bei. Zudem entsteht durch die Verwendung „grünen“ Stroms ein Gasprodukt aus Erneuerbaren Energien, was zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt.

## Beschreibung der Technologie

Das Power to Gas-Verfahren basiert auf dem Prinzip der Elektrolyse von Wasser. Hierbei wird Wasser mit Hilfe von Energie – in diesem Fall durch den Einsatz von Strom aus Erneuerbaren Energien – in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. In einem zweiten Schritt, der sog. Methanisierung, reagiert Wasserstoff mit CO<sub>2</sub>. Es entsteht Methan. Als nachhaltige Quelle für das CO<sub>2</sub> kann beispielsweise eine Bioerdgasanlage dienen.

Neben der konventionellen alkalischen Elektrolyse werden effizientere und kompaktere PEM-Elektrolyseure (Proton Exchange Membrane, Protonen-Austausch-Membran) für den erforderlichen Megawatt-Bereich entwickelt.

Verglichen mit den alkalischen Elektrolyseuren haben PEM-Elektrolyseure eine bessere Lastdynamik und können vorübergehend im Überlastbetrieb eingesetzt werden. Beide Eigenschaften sind für Power to Gas-Anwendungen von Vorteil.

## Technische Vorteile

Power to Gas geht mit verschiedenen technischen Vorteilen einher. Dazu gehört die Möglichkeit, die fluktuierende Stromerzeugung aus den von Wind und Sonne abhängigen Erneuerbaren Energien speichern zu können. Speichieranlagen dienen als Bindeglied zwischen Erzeugung und Nachfrage, die es ermöglichen, den Strom aus Erneuerbaren Energien bedarfsgerecht zu verteilen, das heißt Strom einer zeitlich und örtlich entkoppelten Verwendung zuzuführen.

Ein weiterer Vorteil der Umwandlung in Wasserstoff oder Methan ist die damit geschaffene Möglichkeit, große Energiemengen auch über lange Zeiträume zu speichern.

Unter Berücksichtigung der Auflagen, die für die Infrastruktur und Gasanwendungen gelten, kann der Wasserstoff anteilig in das Erdgasleitungsnetz eingespeist werden und, beispielsweise, in erdgasbefeuerten Anlagen als Brennstoff zur Verwendung kommen.

Was Methan angeht, gibt es in dieser Hinsicht keinerlei Beschränkungen. Wird aus dem Wasserstoff in der beschriebenen Reaktion mit CO<sub>2</sub> Methan gewonnen, so kann das Methan in beliebigem Anteil dem Erdgas beigemischt werden.

## Positive Auswirkungen auf die Energieinfrastruktur

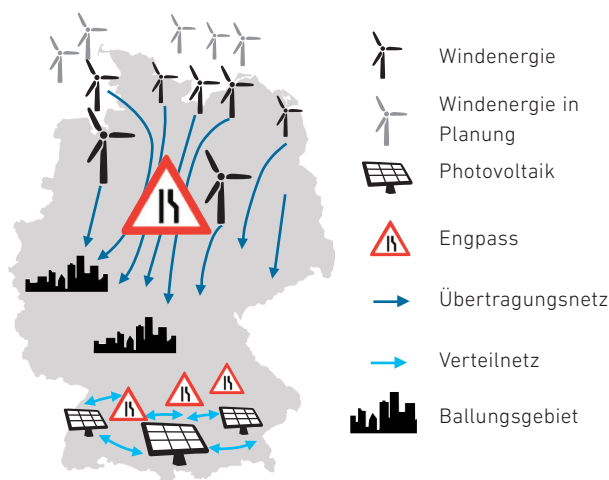
Schon heute bringt die zunehmende Einspeisung schwankender Wind- und Sonnenenergie das Stromnetz über die Grenzen seiner Kapazität. Daher wird der Einsatz von Erneuerbaren Energien dann den größten volkswirtschaftlichen Nutzen bringen, wenn deren Integration in vorhandene Energieinfrastrukturen gelingt.

„Grüner“ Wasserstoff kann zur Stromerzeugung in gasbefeuerten Kraftwerken, auf dem Wärmeenergiemarkt, als Kraftstoff (Wasserstoff- oder Erdgasmobilität) sowie in der Industrie eingesetzt werden. Zu den Industrieverbrauchern zählen beispielsweise Raffinerien, Düngemittelhersteller oder die Chemie- und Stahlindustrie. Zusätzlich können Dienstleistungen aus der Vermarktung der Flexibilität einer Power to Gas-Anlage im Strommarkt angeboten werden, um die schwankende Erzeugung auszugleichen, Regelenergie anzubieten sowie Netzengpässe und Überschussenergie zu minimieren.

Beim Transport des beigemischten Wasserstoffes oder des Methans zu den Verbrauchern können bestehende erdverlegte – und damit „unsichtbare“ – Gasleitungssysteme zum Einsatz kommen. Erdgasspeicher erlauben eine längerfristige Speicherung der Energie.

Durch die Möglichkeit zur Nutzung der Gasinfrastruktur kann Power to Gas dazu beitragen, die Stromnetze im Kontext des stetigen Ausbaus der Erneuerbaren Energie zu entlasten. Auch wenn dennoch neue Überlandleitungen errichtet werden müssen, bietet „Power to Gas“ signifikante Optimierungsmöglichkeiten.

## Engpässe im deutschen Stromnetz



Ein Großteil der deutschen Windenergiekapazitäten befindet sich im Norden oder Nordosten des Landes. Zugleich liegt der Fokus bei Photovoltaikanlagen in Süddeutschland. Strom muss über weite Strecken transportiert werden. Schon heute kommt es zu Engpässen im Netz, die durch die vermehrte Anwendung von Power to Gas entschärft werden können, da hierbei Strom aus Erneuerbaren Energiequellen gespeichert und zum Kunden transportiert werden kann.

## Klimaschutz

Mit Hilfe des Power to Gas-Verfahrens können Erneuerbare Energien vollständig in das bestehende Energiesystem integriert werden.

Auf diese Weise können Erneuerbare Energien selbst in Zeiten überschüssiger Erzeugung genutzt werden. So wird in Zukunft der Einsatz fossiler Brennstoffe (z.B. Kohle, Öl und Gas) und damit auch die Entstehung von Treibhausgasen zurück gehen, denn bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen keinerlei CO<sub>2</sub>-Emissionen. Power to Gas stellt in diesem Zusammenhang ein innovatives und technisch marktreifes Instrument zur Integration Erneuerbarer Energie dar.

Uniper engagiert sich bei der Entwicklung der Power to Gas- und anderer Speichertechnologien, um umweltfreundliche und bessere Energie zu liefern.

## Angewandte Technologien

Power to Gas – Demonstrationsanlage WindGas Falkenhagen (Deutschland): bewährte Elektrolysetechnologie (alkalische Elektrolyse)

Power to Gas – PEM-Demonstrationsanlage, WindGas Hamburg (Deutschland): Nachfolgeneration der Elektrolyse (PEM-Elektrolyse).

[ust.info@uniper.energy](mailto:ust.info@uniper.energy)

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel <b>Kompaktes 1 MW-PEM-Wasserstoffelektrolyse-System (KompEISys) – Regenerativer Wasserstoff für Mobilität und Energiespeicherung</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Bayer, Armin, Fallisch, Arne Föcker, Helge Georg, Andreas Haubner, Bastian Jursic, Daniel	Lettenmeier Phillip Pitschak, Bernd Schoof, René Smolinka, Tom Voglstätter, Christopher	5. Abschlussdatum des Vorhabens 28.10.2016 6. Veröffentlichungsdatum 16.12.2016 7. Form der Publikation Gemeinsamer Bericht der beteiligten Partner
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hydrogenics GmbH, Gladbeck Greenerity GmbH, Hanau Fraunhofer ISE Institut, Freiburg DLR, Stuttgart Uniper Energy Storage GmbH, Essen		9. Ber. Nr. Durchführende Institution - 10. Förderkennzeichen 03BI110A 11. Seitenzahl 164
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie Fasanenstr. 5, 10623 Berlin		13. Literaturangaben s. Anhang 14. Tabellen 19 15. Abbildungen 108
16. Zusätzliche Angaben -		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) PTJ/ Technische Bibliothek Hannover		
18. Kurzfassung Im Rahmen des Projektes KompEISys wurde ein kompakter PEM Elektrolyseurs im 1 MW Maßstab entwickelt und zur Wasserstoffproduktion unter realen Bedingungen verwendet. Dieses System ist geeignet erneuerbare Energien in Wasserstoff umzuwandeln und damit Wasserstoffmobilität im großen Maßstab zu ermöglichen. Die PEM Elektrolyse wurde im Rahmen des Projekts bis zur Marktreife optimiert. Verglichen mit konventionellen Alkalielektrolysen konnten deutliche Effizienzsteigerungen nachgewiesen werden. Der entwickelte Stack ist in der Lage bei einer Stromaufnahme von maximal 1,5 MW ca. 300 Nm <sup>3</sup> /h hochreinen Wasserstoff dauerhaft zu erzeugen. Die Anlage kann innerhalb weniger Minuten vom Standby zur maximalen Last gefahren werden. Ist sie bereits im Betrieb erlaubt das Laständerungsverhalten auch einen hochflexiblen Einsatz im Regelenergiemarkt – typischerweise werden weniger als 30 s benötigt um von einem stationären Betriebszustand in einen anderen zu gelangen. Insgesamt lief die Anlage mehr als 600 h und es wurden mehr als 100.000 Nm <sup>3</sup> Wasserstoff mit der neuartigen Technologie produziert. Das DLR und das Fraunhofer ISE arbeiteten im Projekt an der Entwicklung der nächsten Generation von PEM Elektrolyseuren. Die durchgeführten Untersuchungen umfassten systematische Charakterisierungen, Alterungs- und Komponentenuntersuchungen, Identifikation von weiteren Kostensenkungspotentialen, die Entwicklung von optimierten Wartungskonzepten und die Durchführung von System-Simulationen.		
19. Schlagwörter PEM, Elektrolyse, Wasserstoff, Mobilität, grüner Wasserstoff, regenerativ, kompakt, hocheffizient, MEA, Power to Gas, PtG		
20. Verlag -	21. Preis -	

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title <b>Compact 1 MW PEM water electrolysis system – renewable hydrogen for mobility and energy storage</b>		
4. author(s) Bayer, Armin, Fallisch, Arne Föcker, Helge Georg, Andreas Haubner, Bastian Jursic, Daniel	Lettenmeier Phillip Pitschak, Bernd Schoof, René Smolinka, Tom Voglstätter, Christopher	5. end of project 28.10.2016  6. publication date 16.12.2016  7. form of publication Common report of associated project partners
8. performing organization(s) Hydrogenics GmbH, Gladbeck Greenerity GmbH, Hanau Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg DLR, Stuttgart Uniper Energy Storage GmbH, Essen		9. originator's report no. -  10. reference no. 03B1110A  11. no. of pages 164
12. sponsoring agency (name, address) NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie Fasanenstr. 5, 10623 Berlin		13. no. of references See text  14. no. of tables 19  15. no. of figures 108
16. supplementary notes -		
17. presented at (title, place, date) PTJ/ Technische Bibliothek Hannover		
18. abstract Within this project a compact 1 MW PEM electrolysis system was developed and tested under realistic operating conditions. The developed system is tailor-made to convert renewable energy into hydrogen, which e.g. can be used as completely “green” fuel in the hydrogen mobility sector and therefore could be a main driver for hydrogen mobility. During the project the PEM electrolysis technology has been optimized to market readiness. Compared to conventional electrolysis plants significant efficiency increases were achieved The developed stack is capable to continuously produce 300 Nm <sup>3</sup> /h of pure hydrogen with a maximum power consumption of 1.5 MW. The plant is extremely fast and can be started from stand-by to full load in less than 1 minute. When already in operation, load changes are realized within seconds. This qualifies the introduced PEM electrolyzer for ancillary services to the electrical grid (e.g. primary control energy). So far the plant was operated for more than 600 h and produced more than 100.000 Nm <sup>3</sup> of hydrogen. The research partners DLR and Fraunhofer ISE performed various research activities for the next generation of electrolyser plants. These activities encompass characterisation, accelerated aging, component testing, cost-model analysis to identify cost reduction potential, condition-based maintenance and system simulation.		
19. keywords PEM, proton exchange membrane, membranes, electrolysis, hydrogen, renewable, compact, highly efficient, MEA, Power to Gas, PtG		
20. publisher -	21. price -	