

Entwicklung, Aufbau und dynamischer Betrieb eines PEM-Druckelektrolyseurs der Megawattklasse

Abschlussbericht Förderkennzeichen 0325589B

Dr. Frank Allebrod

Norbert Bülow

Dr. Joachim Herrmann

Dr. Lars Jürgensen

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

I. Kurze Darstellung.....	3
1 Aufgabenstellung.....	4
2 Voraussetzungen	6
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	10
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II. Eingehende Darstellung.....	12
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	13
Ziele	13
Teilziele und Teilergebnisse.....	13
Projektphase 1b: Die Entwicklung des Elektrolyseurs mit dem Stack aus Projektphase 1a als zentraler Einheit und Bau eines Prototyps.....	19
Projektphase 4: Testbetrieb	22
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	24
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	25
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	26
5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	27
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.	28

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Primäres Ziel des Teilvorhabens ist die Entwicklung eines PEM-Elektrolysestacks mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1MW. Der Stack wird als Druckelektrolyseur ausgelegt. Der produzierte Wasserstoff soll mit einem Druck von mindestens 30 bar produziert werden können. Darüber hinaus muss der Stack auch mit fluktuierenden Stromquellen, wie Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung, betrieben werden können. Der Stack soll für die Massenfertigung geeignet sein. Dazu werden sowohl die Materialien als auch die Fertigungsprozesse so gewählt, dass eine kostengünstige Produktion größerer Stückzahlen möglich ist.

Zum Betrieb des Elektrolysestacks ist ein Elektrolyseur mit folgenden Anlagenteilen notwendig: Wasseraufbereitung, Stromversorgung und Gaskonditionierung. Die Anlagenteile müssen von einer gemeinsamen Steuerung überwacht und geregelt werden. Zum sicheren Betrieb ist darüber hinaus die Entwicklung und Umsetzung eines geeigneten Sicherheitskonzepts notwendig. Dieses Teilvorhaben umfasst die Bestimmung der Anforderungen an die Komponenten, sowie der Einflussgrößen des Prozesses und des Sicherheitskonzeptes. Weiterhin wird die Inbetriebnahme der Anlage thematisiert.

Der Elektrolysestack und der Elektrolyseur werden in einem ausgedehnten Testbetrieb unter realen dynamischen Bedingungen erprobt. Diese Erprobung sowie die Auswertung der daraus gewonnenen Daten sind ebenfalls Bestandteil dieses Teilvorhabens.

Das Teilvorhaben umfasst folgende primäre Ziele aus der Gesamtvorhabensbeschreibung GVB.

- I. a) Die Entwicklung eines PEM-Druckelektrolysestacks unter Berücksichtigung der Tauglichkeit zur Massenfertigung bezüglich Material- und Fertigungsprozessauswahl.. Der Stack soll schnell auf wechselnde Lastverhältnisse reagieren können, wasserstoffseitig bei Drücken bis zu mindestens 30 bar arbeiten, hohen Wirkungsgrad und hohe Standfestigkeit besitzen und eine elektrische Leistung von 1 Megawatt aufnehmen und umwandeln können.

I. b) Die Entwicklung eines Druckelektrolyseurs mit obig beschriebenen PEM-Druckelektrolyseestacks als zentrale Einheit. Hier sollen insbesondere die Systemkomponenten Sicherheitskonzept, Stromversorgung, Wasserkonditionierung, Steuerung bzw. Regelung und Wasserstofftrocknung exakt auf die Anforderungen des Elektrolyseestacks konzipiert und umgesetzt werden.

Gesamtziel der Punkte I. a) und I. b) ist die Entwicklung eines funktionsfähigen Elektrolyseurs und die Fertigung eines Prototyps mit oben beschriebenen Eigenschaften. Nachfolger des Prototyps des Elektrolyseurs sollen sowohl technisch, rechtlich, als auch wirtschaftlich für eine möglichst große Anzahl an Anwendungsfällen nutzbar sein.

2 Voraussetzungen

Nach Einschätzung von beispielsweise (M. Sterner, 2010) ist der Bedarf an Speicherkapazität durch den anstehenden Umbau des Stromnetzes für die Integration erneuerbarer Energien enorm und übersteigt die Kapazität und das Potential der derzeit für die Speicherung hauptsächlich verwendeten Pumpspeicherkraftwerke um Größenordnungen.

Für den nötigen Ausbau der Speicherkapazitäten stehen mehrere technische Konzepte zur Verfügung. Vielversprechend für die Speicherung von großen bis sehr großen Energiemengen sind die Technologien der Wasserstoffspeicherung sowie der Methanisierung von Kohlendioxid und Wasserstoff und deren Speicherung in den bestehenden Erdgasspeichern. Für beide Technologien bildet die Wasserstoffproduktion via Elektrolyse eine entscheidende Grundlage.

Sowohl Wasserstoff als auch aus Wasserstoff synthetisiertes Methan eignen sich hervorragend als Endenergieträger für weitere Anwendungsgebiete. Beispielsweise als Brennstoff im Mobilitätssektor. Nach (M. Sterner, 2010) scheint „die Wasserstofftechnologie ... durch die vielfältigen Anwendungen eine attraktive Speicherlösung für die Zukunft darzustellen“.

Im heutigen Entwicklungsstand liegen die spezifischen Investitionskosten für die Technologie der Elektrolyse bei ca. 1.000 €/kW. Diese hohen Kosten führen vornehmlich zu einem gehemmten Eindringen der Technologie in den Markt.

Stand der Technik sind zum einen alkalische Elektrolyseure mit Stacks im MW Bereich, zum anderen PEM-Elektrolyseure im kW Bereich. Anlagen der kW-Klasse werden dabei vornehmlich für dezentrale Inselösungen und für Notstromeinrichtungen verwendet. Im Netzbetrieb sind zur Speicherung von Energie Anlagen im Größenbereich der versorgenden Kraftwerke notwendig. Typische Kraftwerksgrößen von Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Windkraftanlagen liegen im MW Bereich.

Kommerziell verfügbare Elektrolyseure im Leistungsbereich von 1 MW nutzen ca. 30%ige Kalilauge als Elektrolyt. Die Stacks dieser alkalischen Elektrolyseure haben geringere Stromdichten als PEM-Elektrolyseure und benötigen zum Erreichen von Leistungen im Bereich 1 MW somit größere Stacks. Die Masse dieser Stacks stellt zusammen mit der Kalilauge eine große Wärmekapazität dar. Durch diese Wärmesenke sind die alkalischen Elektrolyseure in ihrer Flexibilität eingeschränkt und weisen ein verhältnismäßig schlechtes Kaltstartverhalten auf. Die als Elektrolyt fungierende Kalilauge wird bei alkalischen Elektrolyseuren umgewälzt und sich einstellende Konzentrationsunterschiede zwischen Anode und Kathode werden durch einen Laugenstrom ausgeglichen. In der Lauge befinden sich gelöst Teile der Produktgase (Wasserstoff und Sauerstoff). Beim Herunterfahren und im Standby-Betrieb kommt es durch diese gelösten Gase an den Katalysatoren zu Degradationsvorgängen (Alterungserscheinungen), die ein schnelleres Absinken des Wirkungsgrades bzw. einen Leistungsverlust zur Folge haben. Die Degradation kann durch eine Inertisierung mit Stickstoff oder eine angelegte Schutzspannung unterbunden werden. Die Inertisierung mit Stickstoff benötigt einen längeren Zeitraum, so dass ein flexibler Betrieb nicht gegeben ist. Eine angelegte Schutzspannung verbraucht zusätzliche Energie, die bei der Kopplung mit regenerativen Quellen nicht immer zur Verfügung steht. Darüber hinaus verringert sich der Gesamtwirkungsgrad. Kommerziell verfügbare alkalische Elektrolyseure können nur in einem Lastbereich von 20 bis 100% betrieben werden.

PEM-Elektrolyseure haben die o.g. Nachteile bei der Kopplung mit regenerativen Stromquellen nicht und können in einem Lastbereich von 0 bis 100 % betrieben werden. PEM-Elektrolyseure in den für die Speicherung von flexibel anfallendem regenerativem Strom notwendigen Leistungsklassen von 1 MW sind derzeit nicht kommerziell verfügbar.

Im Unternehmen H-TEC wurde in den letzten Jahren das PEM-Druckelektrolysesystem EL30 im Leistungsbereich bis 20 kW entwickelt und steht in Marktreife zur Verfügung. Diesbezüglich wurde ein Verfahren erarbeitet, mit dem es möglich ist den Einsatz von kostenintensiven Materialien zu minimieren. Ebenso wurde das Stack-Design so konzipiert, dass die eingesetzten Komponenten massenfertigungstauglich sind. Dadurch sind deutliche Reduktionspotentiale für die Komponentenherstellung zu erwarten. Die Verfahren sind

patentiert. Die Einsatzgebiete des EL30 liegen in dezentralen Inselsystemen und Notstromversorgungen kleiner bis mittlerer Größenordnung.

Die Systeme EL30 lassen sich zu Einheiten größerer Leistung gruppieren. Um Leistungsanforderungen heutiger Photovoltaik-Freiflächen-Kraftwerke bzw. Windkraftanlagen zu erreichen, wäre jedoch eine unverhältnismäßig große Anzahl solcher Systeme notwendig.

Das Unternehmen H-TEC hat sich während der Entwicklungsphase des EL30 ein tiefes, grundlegendes Verständnis im Bereich der PEM-Elektrolyse angeeignet. Dieses Know-how soll nun bei der Erstellung von Anlagen der Megawattklasse den Entwicklungssprung zur Marktreife gewährleisten.

Ein beträchtlicher Teil der nötigen Entwicklungen für das Elektrolysesystem bzw. für das zu entwickelnde Kombikraftwerk aus Elektrolyseur, Biogas-BHKW und Erneuerbare-Energie-Erzeugungsanlage liegt in der Peripherie um den Elektrolysestack. Diese Peripherie stellt nicht den heutigen Stand der Technik dar, da der Elektrolysestack besonders hohe Anforderungen an sämtliche Schnittstellen mit seiner Umwelt hat.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben ist Bestandteil eines Gesamtvorhabens. Um die Übersichtlichkeit der Beschreibungen zu erhöhen wurde im Teilprojekt auf die gleiche Bezeichnung und Nummerierung wie im Gesamtvorhaben zurückgegriffen. Diesbezüglich ergibt sich im Teilvorhaben keine durchgängige Nummerierung.

Die Entwicklungsarbeiten des Gesamtvorhabens unterteilen sich in vier Projektphasen. In diesem Teilvorhaben werden zwei dieser Phasen koordiniert. Die Phasen des Gesamtvorhabens, die nicht Bestandteil dieses Teilvorhabens sind, werden andeutungsweise wiedergegeben:

- 1a. Die Entwicklung des PEM-Elektrolyse-Stacks (1 MW) und Bau eines Prototyps.
- 1b. Die Entwicklung des Elektrolyseurs mit dem Stack aus Projektphase 1a als zentraler Einheit und Bau eines Prototyps.
2. Konzeption des Betriebs eines Kombikraftwerks mit dem Elektrolyseur aus Projektphase 1 und einem bestehenden Biogas-BHKW als zentrale Einheiten.
3. Entwicklung eines Kombikraftwerks nach Vorgaben aus Projektphase 2 und Bau eines Prototyps am Standort Reußenköge.
4. Testbetrieb für sämtliche Komponenten und Konzepte aus den Projektphasen 1, 2 und 3.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Vorhaben stellt in seiner Zusammensetzung weder technisch noch von der Betriebsweise den Stand von Wissenschaft und Technik dar. Für alle Teile des Vorhabens sind tiefgreifende Entwicklungsarbeiten notwendig. Die Entwicklungen sind mit Risiken verbunden. Diese sind Risiken der technischen, der rechtlichen und der wirtschaftlichen Entwicklung.

Technisch stellt insbesondere die Entwicklung der Elektrolysezelle und des Elektrolysestacks ein Risiko dar. Bislang wurden keine Elektrolysezellen in der für das Vorhaben nötigen Größenordnung entwickelt. Die Entwicklung des Elektrolyseurs EL30 im Leistungssegment 20 kW durch das Unternehmen H-TEC zeigt die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Verfahrens. Für einen Übergang in Leistungsklassen des Kraftwerksmaßstabs von 1 MW ist die Entwicklung des Anlagenkonzepts für diese Kapazitätsstufe und der Bau eines Prototyps nötig. Es könnten sich physikalische bzw. materialbedingte Hindernisse ergeben die in der bisherigen Vorhabeneinschätzung unberücksichtigt blieben.

Daneben könnten sich rechtliche Rahmenbedingungen ergeben, die einen Betrieb des geplanten Kombikraftwerks unwirtschaftlich oder gar unmöglich machen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen wurden in Vorbereitung auf das Vorhaben recherchiert. Allerdings konnten aufgrund der Neuartigkeit des Vorhabens weder eine eigene Recherche noch die Recherche bei einschlägigen Verbänden eine Einschätzung der Rechtslage erbringen.

Ein entscheidender Schritt für den Erfolg des Vorhabens ist die Entwicklung von Konzepten für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen. Gelingt es nicht, mittelfristig die Wirtschaftlichkeit der Anlagenkonzepte zu erreichen, erscheint eine spätere Vermarktung der entwickelten Systeme als eher unwahrscheinlich.

Insbesondere der für die Schlüsseltechnologie Elektrolyse notwendige technische Aufwand und Bedarf an Spezialmaterialien und Spezialkomponenten ist sehr groß. Daneben ist in den Unternehmen ein hoher Personaleinsatz für die Bearbeitung des Vorhabens veranschlagt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Über die drei Projektpartner hinaus fand keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen im Rahmen des Förderprojektes statt.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

In der TVB wurden die folgenden Ziele und Teilziele beschrieben. Die Ergebnisse werden fortlaufend beschrieben.

Ziele

I. a) Die Entwicklung eines PEM-Druckelektrolysestacks unter Berücksichtigung der Tauglichkeit zur Massenfertigung bezüglich Material- und Fertigungsprozessauswahl. Der Stack soll schnell auf wechselnde Lastverhältnisse reagieren können, wasserstoffseitig bei Drücken bis zu mindestens 30 bar arbeiten, hohen Wirkungsgrad und hohe Standfestigkeit besitzen und eine elektrische Leistung von 1 MW aufnehmen und umwandeln können.

I. b) Die Entwicklung eines Druckelektrolyseurs mit obig beschriebenen PEM-Druckelektrolysestacks als zentrale Einheit. Hier sollen insbesondere die Systemkomponenten Sicherheitskonzept, Stromversorgung, Wasserkonditionierung, Steuerung bzw. Regelung und Wasserstofftrocknung exakt auf die Anforderungen des Elektrolysestacks konzipiert und umgesetzt werden.

Teilziele und Teilergebnisse

1.a.1 Entwicklung und Konstruktion Stack

Ziel (AP 1a.1):

In diesem Arbeitspaket werden die grundlegenden Geometrien für die einzelnen Bauteile des Elektrolysestacks ausgelegt, entwickelt und mit einem 3D-CAD Programm konstruiert. Im Wesentlichen sind das die Endplatten mit Zugankern, die Membranelektrodeneinheit (MEA) mit Gasdiffusionsschicht (GDL), Medien- und elektrische Anschlüsse und die Bipolarplatte

(BPP) mit Dichtung. Ein weiteres Ziel ist die Auswahl und Parametrierung von Fertigungsverfahren für die Bauteile in Zusammenarbeit mit den Zulieferern.

Aufgabenbeschreibung (AP 1a.1):

Es wird ein grundlegendes Konzept für einen PEM-Elektrolyse Stack im MW-Bereich erarbeitet. Auf dieser Grundlage werden erste 3D-Modelle der einzelnen Bauteile erstellt.

Es werden mit diesen Geometrien Simulationen zur Festigkeit, Dichtigkeit und zum Transport der Medien durchgeführt, um die auftretenden Schwankungen im dynamischen Betrieb aufzufangen. Schwachstellen der Konstruktion werden so identifiziert. Die 3D-Konstruktion wird mit den Ergebnissen dieser Simulationen angepasst. Mit den geänderten Geometrien werden zur Überprüfung erneut Simulationen durchgeführt. Darüber hinaus wird auch das reale Verhalten der Bauteile in Testreihen überprüft. Mit den Ergebnissen der zweiten Simulation und der Bauteiltests wird die 3D-Konstruktion angepasst.

Mit den Herstellern einiger Bauteile werden gemeinsam geeignete Fertigungsverfahren ausgewählt und ggfs. an die speziellen Anforderungen angepasst. Dazu sind Vorversuche mit den später im Stack verwendeten Materialien nötig, um deren genaues Verhalten im Herstellungsprozess zu ermitteln.

Teilergebnis aus (AP 1a.1):

Im AP 1a.1 wurde ein PEM-Elektrolysestack mit einer aktiven Fläche von 450 cm^2 konstruiert. Hierbei wurde vor allem auf eine Geometrie Wert gelegt die es ermöglicht, die Komponenten mit einem möglichst geringen Verschnitt zu produzieren. Neben der dadurch gewonnenen Rohmaterial- war auch eine deutliche Reduzierung der Kosten angestrebt.

Der konstruierte Stack wurde auf einen Betriebsdruck von 30 bar ausgelegt. Dadurch wird es möglich den produzierten Wasserstoff ohne weitere Kompression zwischen zu speichern. Die benötigte Presskraft wird von außen liegenden Zugankern aufrechterhalten. Materialfließen wird durch Tellerfedern entgegengewirkt.

Die Endplatten des Stacks sind so konstruiert, dass der Stack sowohl parallel als auch in Serie betrieben werden kann. Dadurch können beliebig viele Stacks zu einer beliebig großen

Leistung zusammen geschaltet werden. Außerdem führen kleinere Defekte nicht direkt zum Totalausfall einer Anlage, bei entsprechender Anlagenauslegung kann ein Stack aus einem Stackarray gezielt außer Betrieb genommen werden, ohne dass die Anlage lange stillstehen muss.

1a.2 Versuche zur Lebensdauer unter Überlastbedingungen

Ziel (AP 1a.2)

Ziel des Arbeitspakets ist es, die Anzahl der in Arbeitspaket 1a.1 konstruierten Zellen zu ermitteln, die für den stabilen Betrieb unter realen, dynamischen Bedingungen nötig sind, um eine Leistungsaufnahme im MW-Bereich zu gewährleisten. Darüber hinaus wird ermittelt, wie sich Überlastbedingungen auf den Elektrolysestack auswirken und inwieweit solche Bedingungen im Betrieb zugelassen werden können.

Aufgabenbeschreibung (AP 1a.2):

Es wird eine Testumgebung aufgebaut. Um frühzeitig mit den Versuchen beginnen zu können, werden für die Teststände modifizierte Elektrolyseure der EL30 Baureihe verwendet. Es werden unterschiedliche Betriebsparameter zugrunde gelegt. Mit dem Verständnis, welche Betriebsbedingungen die Zellen in welchem Maße schädigen, können die Bedingungen für den fluktuierenden Betrieb des 1MW Stacks im Kombikraftwerk festgelegt werden. Es ist damit zu rechnen, dass Ergebnisse zum Teil erst nach erheblicher Laufzeit – ggfs. mehrere tausend Stunden - erzielt werden.

Teilergebnis aus (AP 1a.2):

Es wurde eine umfangreiche Messreihe mit Stacks der S30 Baureihe durchgeführt. Hierbei konnte untersucht werden, wie der Einfluss der Presskraft, der Stromdichte, des

Betriebsdrucks und der Temperatur auf die Lebensdauer des Stacks ist. Aus diesen Ergebnissen wurden wichtige Erkenntnisse zur Dimensionierung des Teststandes sowie dem zu entwickelnden Elektrolyseur abgeleitet. Die genauen Ergebnisse der Messungen finden sich unten in den wissenschaftlich – technischen Ergebnissen.

1a.3 Finale Konstruktion

Ziel (AP 1a.3):

In diesem Arbeitspaket wird die finale Konstruktion des 1 MW Stacks, wie er im weiteren Verlauf des Projektes im Testbetrieb eingesetzt werden soll, festgelegt.

Aufgabenbeschreibung (AP 1a.3):

Mit den Ergebnissen der Arbeitspakete 1a.1 und 1a.2 wird der Aufbau des Stacks festgelegt und als 3D-Konstruktion erstellt. Dazu wird die Anzahl der nötigen Zellen für den Betrieb eines Stacks mit einer Leistungsaufnahme von 1 MW aus Arbeitspaket 1a.2., sowie die zugrunde liegende Konstruktion der Bauteile aus Arbeitspaket 1a.1 zusammengeführt. Notwendige Anpassungen an die in 1a.2 ermittelten optimalen Betriebsbedingungen werden durchgeführt.

Teilergebnis aus (AP 1a.3):

Die ursprünglich im AP 1a.1 entwickelten Komponenten wurden im Verlaufe des Projektes weiter optimiert und zu einem voll funktionstüchtigen Stack verbessert. Neben konstruktiven Details wie einem optimierten Kurzschlusschutz wurden auch fertigungstechnische Herausforderung beim Gummieren den BPP gelöst. Hier war es nötig einen größeren Querschnitt der Gummikanäle vorzusehen um den Ausschuss und damit die Prozesskosten zu minimieren.

Mit dem verbesserten Kurzschlusschutz ist es nun auch möglich, Membranen zu verwenden, die während der Montage Temperatur- oder Luftfeuchtebedingt ihre Dimensionen bis zu einem bestimmten Grad verändern.

Weiterhin wurden sogenannte Zwischenplatten entwickelt die dem Stack zusätzliche Stabilität verleihen. Darauf aufbauend sollen in Zukunft deutlich längere (d.h. eine höhere Anzahl an Zellen) Stacks gebaut werden, die eine höhere Gesamtspannung und damit auch geringere spezifische Netzteilkosten im Elektrolyseur nach sich ziehen.

1a.4 Fertigung MW-Stack

Ziel (AP 1a.4):

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Fertigung des für den weiteren Verlauf des Projektes benötigten 1 MW-Stacks.

Aufgabenbeschreibung (AP 1a.4):

Erfahrungsgemäß bedarf die Anpassung der Fertigungsmethoden der Zulieferer an die in Arbeitspaket 1a.1 ermittelten Technologien und Parameter mehrerer „Fertigungs-Durchläufe“. Zur Überprüfung der Toleranzen und Parameter bei der Fertigung und zum Gewinn von ersten Erfahrungen in der Montage von Stacks in der neuen Größenordnung werden zuerst sog. Shortstacks (Stacks mit fünf Zellen) montiert. Nach erfolgreichen Versuchen und ggfs. Anpassungen werden zur Überprüfung der Medienströmung im realen dynamischen Betrieb zwei Stacks mit jeweils 50 Zellen erstellt. Darauf aufbauend wird mit einem Stack mit 200 Zellen das Wärmemanagement überprüft. Nach erfolgreichen Tests wird der Prototyp des 1 MW Stacks für den Testbetrieb produziert und die Integration in die Elektrolyseanlage vorbereitet.

Teilergebnis aus (AP 1a.4):

Es wurden verschiedene Stacks von 5 bis zu 60 Zellen aufgebaut. Ein 60-Zeller ist beispielhaft in Abbildung 1 abgebildet. Dabei wurde die Reihenschaltung erfolgreich verbaut und im Betrieb getestet. Die Stacks lassen sich so zu jeder beliebigen Leistung zusammenschalten.

Bei der Fertigung der Stacks wird in der Kleinserie noch auf manuelle Montage zurückgegriffen. Alle Bauteile lassen sich aber mit Führungshilfen stapeln, Befestigungsschritte während der Montage sind nicht nötig. Damit lassen sich in der Serienfertigung sogenannte „pick and place“ Roboter einsetzen um auch hohe Bestellzahlen bedienen zu können.

Eine besondere Herausforderung beim Stackbau ist die starke Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Membran. Dazu war es notwendig, eine Klimakammer zu errichten, in der sowohl Temperatur als auch Feuchte während der Montage konstant gehalten werden. Zusätzlich wurde konstruktiv eine höhere Toleranz gegen sich verändernde Membrandimensionen in den Stackkomponenten vorgesehen.

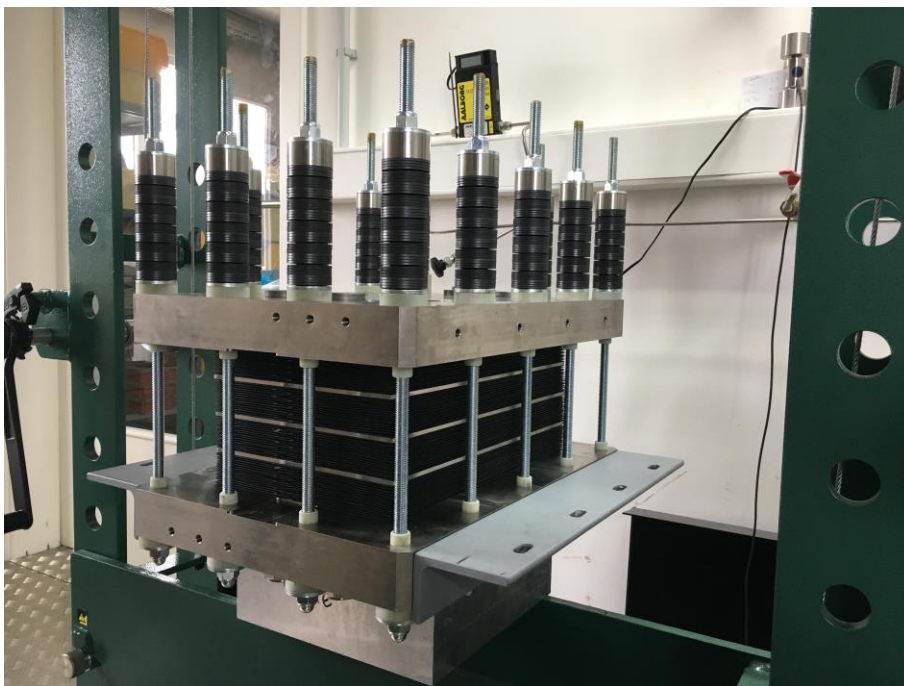


Abbildung 1: S450 (ELS450) Stack mit 60 Zellen

Projektphase 1b: Die Entwicklung des Elektrolyseurs mit dem Stack aus Projektphase 1a als zentraler Einheit und Bau eines Prototyps

1.b.1 Konzeptentwicklung

Ziel (AP 1.b.1.):

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Festlegung der Parameter der für die Elektrolyseanlage notwendigen Komponenten. Zu berücksichtigen ist, dass sich einige Parameter im Laufe des Projektes durch neue Erkenntnisse verändern können. In diesem Arbeitspaket sollen aber mindestens die Bereiche, in denen sich die Parameter bewegen können, festgelegt werden.

Aufgabenbeschreibung (AP 1.b.1.):

Aus dem Betrieb eines Elektrolyseurs mit einer Leistungsaufnahme von 1 MW ergeben sich Anforderungen an die anderen Komponenten der Elektrolyseanlage.

Für die Wasseraufbereitung werden die zu erwartenden Mengen berechnet und die notwendige Reinheit des aufbereiteten Wassers wird festgelegt. Zusammen mit der Wasserqualität am Betriebsort (Wasseranalyse Reußenköge) ergeben sich daraus die Anforderungen an die Wasseraufbereitung für die Elektrolyseanlage.

Im Elektrolysesystem wird ein Großteil des Prozesswassers für eine direkte Kühlung des Stacks verwendet. Dieses Wasser zirkuliert durch den Stack sowie weitere Anlagenteile. Daraus ergeben sich Anforderungen an das Material dieser Anlagenteile, insbesondere an Wärmetauscher, die die Abwärme aus dem primären Kreislauf abführen.

Der Elektrolysestack wird mit Gleichstrom betrieben. Für die Auslegung des Netzteils wird die genaue Zellenzahl aus dem Arbeitspaket 1a.2 benötigt. Eine erste Abschätzung kann aus den bei H-TEC vorhandenen Erfahrungswerten getroffen werden.

Die Gaskonditionierung muss an die zu erwartenden Gasmengen, Feuchtegehalte und Temperaturen beim Betrieb eines 1 MW Elektrolyseurs angepasst werden. Erfahrungswerte dazu werden an die Leistung von 1 MW angepasst.

Für die Konzeptionierung der Steuerung werden die notwendigen Schnittstellen festgelegt. Gemeinsam mit dem Verbundpartner North-TEC werden die Signale bzw. Protokolle für die Schnittstellen ermittelt. Regelparameter und die dazugehörigen Unter- bzw. Obergrenzen werden festgelegt.

Teilergebnis aus (AP 1b.1):

Im Rahmen des Förderprojektes wurden zwei Testanlagen für Elektrolysestacks der Megawattklasse gebaut. Am Standort Buttenwiesen können Leistungen von 140 kW, in Reußenköge von bis zu 400 kW elektrisch in Wasserstoff gewandelt werden. Alle notwendigen Komponenten wie Durchflusssensoren, Sicherheitstechnik, Pumpen, Wasseraufbereitung und dergleichen wurden verbaut und ausführlich getestet.

Die Testanlage am Standort Reußenköge ist das Referenzobjekt für den daraus abgeleitet ME 100/350 Elektrolyseur, den H-TEC SYSTEMS in sein Produktportfolio aufgenommen hat.

1.b.3 Sicherheitskonzept

Ziel (AP 1.b.3.):

Ziel ist die Erarbeitung eines Konzepts für den sicheren Betrieb des Elektrolysestacks; sowie der gesamten Elektrolyseanlage am Aufstellungsort.

Aufgabenbeschreibung (AP 1.b.3.):

Bisherige Sicherheitskonzepte beruhen entweder auf einer Durchlüftung, die gewährleistet, dass sich keine zündfähigen Gemische bilden; oder auf der Überwachung der Atmosphäre am Aufstellungsort durch entsprechende Sensoren. Beim Betrieb von Elektrolyseuren im

Leistungsbereich von 1 MW wären immense Luftmengen notwendig, um bei einer maximalen Leckage (der gesamte gerade produzierte Wasserstoff) eine ausreichende Verdünnung sicher zu stellen. Ein solches Sicherheitskonzept auf Grundlage von Lüftung scheidet damit für den Leistungsbereich 1 MW aus. Sicherheitsgerichtete Sensoren für brennbare Gase, speziell die für Wasserstoff, unterliegen einer besonderen Sorgfaltspflicht. Regelmäßige Überprüfungen und Kalibrierungen sind unbedingt notwendig. In diesem Projekt soll ein neues, innovatives Konzept geprüft und ggfs. verwirklicht werden. Dazu werden die wasserstoffführenden Anlagenteile in einem Unterdruckbehälter gekapselt betrieben. Der Unterdruck verhindert zum einen das Austreten von Wasserstoff aus diesem Behälter, solche Konzepte sind bekannt und werden vielfach angewendet. Bei diesem neuen Konzept wird der Druck soweit verringert, dass sich im Fehlerfall einer Zündung nur ein minimaler Überdruck zur Atmosphäre einstellt. Sicherheitsgerichtete Differenzdrucksensoren sind zum einen Stand der Technik und zum anderen wesentlich wartungsärmer als Sensoren für brennbare Gase. Außerdem ist die elektrische Leistung zur Aufrechterhaltung des Unterdrucks wesentlich kleiner als es die notwendige Durchlüftung wäre. Die grundlegende Idee zu diesem neuen Sicherheitskonzept befindet sich in der Anmeldung zum Patent (Aktenzeichen EP 12186581.0).

Teilergebnis aus (AP 1b.3):

Das angestrebte Sicherheitskonzept mittels Unterdruck hat sich in der genaueren Betrachtung im Rahmen des Förderprojektes als nicht umsetzbar erwiesen. Stattdessen wurde auf ein klassisches, sichereres und erprobtes System zurückgegriffen, welches auf eine kontinuierliche Durchlüftung der Sicherheitsrelevanten Bereiche sorgt. Außerdem ist eine Vielzahl von Sensoren verbaut die alle relevanten Prozessparameter und die Wasserstoffkonzentration im Stackraum, als auch im Betriebsraum überwachen.

Ob zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal auf die zuerst angestrebte Lösung zurückgegriffen wird ist nicht abschließend geklärt. Eine Erprobung im kleineren Maßstab erscheint aber sinnvoll.

1.b.4 Inbetriebnahme

Ziel (AP 1.b.4.):

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Inbetriebnahme des MW-Stacks aus Arbeitspaket 1a.4 in der Elektrolyseanlage.

Aufgabenbeschreibung (AP 1.b.4.):

Der Stack aus Arbeitspaket 1a.4 wird in die Elektrolyseanlage aus Arbeitspaket 1b.2 eingebaut. Gemeinsam mit den anderen Komponenten der Testfeldumgebung wird die gesamte Anlage in Betrieb genommen und die einzelnen Komponenten auf den gemeinsamen Betrieb abgestimmt.

Ergebnisse (AP 1.b.4.):

Die Inbetriebnahme des Stacks erfolgte im Januar 2017 (5 Zeller). Im Folgenden wurden noch insgesamt 6 Stacks gebaut und getestet. Im Testbetrieb wurden u.a. die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Stacks untersucht. Untersuchungen der Lebensdauer der Stacks dauern auch nach Projektende noch an.

Projektphase 4: Testbetrieb

AP 4.1 Testbetrieb Elektrolyseur

Ziel (AP 4.1):

Ziel des Testbetriebs des Elektrolyseurs ist es, die Auswirkungen des Betriebs unter realen dynamischen Bedingungen, insbesondere wechselnden Umgebungsbedingungen

(Jahreszeiten), zu ermitteln. Werden dabei Möglichkeiten zur Optimierung gefunden soll überprüft werden, ob eine Realisierung möglich ist und diese ggfs. im Testbetrieb durchgeführt werden kann.

Aufgabenbeschreibung (AP 4.1):

Während des laufenden Betriebs werden alle relevanten Messdaten erfasst. Diese Daten werden periodisch ausgewertet und zu einer Übersicht über den gesamten Zeitraum des Testbetriebs zusammengefasst. Einmal pro Monat wird eine längere Datenerfassung mit Aufnahme von Kennlinien und Lastwechseln durchgeführt um auch die Parameter außerhalb des normalen Betriebs zu erfassen.

Ergebnisse (AP 1.b.4.):

Durch die Verlängerung der Projektlaufzeit konnte sowohl der Teststand in Buttenwiesen als auch der in Reußenköge unter sommer- und winterlichen Bedingungen getestet werden. Dabei ist aufgefallen, dass gerade im Hochsommer ein intensives Wärmemanagement notwendig ist. Eine besondere Herausforderung ist hierbei die Geräuschemissionen gering zu halten, was durch entsprechend dimensionierte Schalldämpfer gelöst wurde.

Die Verlässlichkeit der Teststände war insgesamt sehr zufriedenstellend, sodass wertvolle Daten für die Weiterentwicklung unserer Anlagen und Stacks gesammelt werden konnten.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 1: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

	Gesamtvorkalkulation	Gesamtnachkalkulation
813 Material	697.398,00	600.129,78
823 FE-Fremdleistungen	201.000	182.306,05
837 Personalkosten	1.219.262,00	978.168,85
838 Reisekosten	13.800,00	40.790,57
847 AfA	208.460,00	42.821,50
850 sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	243.326,00	240.813,07
855 Summe unmittelbare Vorhabenskosten	2.583.246,00	2.085.029,82
881 gesamte Selbstkosten des Vorhabens	2.583.246,00	2.085.029,82

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Nach wie vor stellen P2G-Verfahren die hoffnungsvollste Alternative dar, wenn es darum geht, große Mengen Strom über lange Zeit zu speichern. Darüber hinaus ist ein derzeitiger Durchbruch beim Aufbau einer H₂-Tankstelleninfrastruktur zu beobachten. Derzeit wird auch der Bau von Elektrolyseuren für geplante Tankstellen gefördert. Beim Betrieb dieser Elektrolyseure kommen genau jene Ergebnisse zum Tragen, die in diesem Projekt erlangt wurden.

Nach wie vor ist die rechtliche Bewertung von P2G-Projekten schwierig, sowohl auf europäischer, wie auch auf nationaler Ebene. Das größte Hemmnis für die Breite Markteinführung ist die Einordnung als Letztverbraucher. Daher spielt die Kenntnis von juristischen Details eine entscheidende Rolle bei der Erstellung von Betriebskonzepten.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der PEM-Elektrolyseur ME 100/350 der SERIES-ME von H-TEC SYSTEMS wandelt erneuerbaren Strom in Wasserstoff mit einem Wirkungsgrad von ca. 75 Prozent hocheffizient um. Das erneuerbare Gas lässt sich in Tanks oder im Gasnetz über Wochen und Monate speichern und vielseitig nutzen, sei es für den Antrieb von Brennstoffzellen-Fahrzeugen oder für die Wasserstoffversorgung von beispielsweise Raffinerien. Neben dem hohen Wirkungsgrad zeichnen sich die Elektrolyse-Stacks zudem durch ihre kompakte und modulare Bauweise und Skalierbarkeit bis in die Megawattklasse aus.

Der PEM-Elektrolyseur ME 100/350 reagiert besonders schnell auf z. B. witterungsbedingte Schwankungen des Ökostrom-Angebots oder einen sich ändernden Wasserstoffbedarf. Binnen Sekunden wechselt er von einem Standby-Modus in den Volllastbetrieb. Bei hohem Wind- und Sonnenaufkommen lassen sich so bis zu 5,4 MWh elektrische Energie pro Tag in Wasserstoff umwandeln. Für die Betreiber von Windparks oder anderen Erzeugungsanlagen, deren Förderzeitraum nach EEG in den kommenden Jahren ausläuft, bietet die Erzeugung und Vermarktung von grünem Wasserstoff mittels PEM-Elektrolysetechnik von H-TEC SYSTEMS zukünftig attraktive Möglichkeiten des Weiterbetriebs ihrer Anlagen.

Durch seine geringe Größe und hohe Lastflexibilität eignet sich der Elektrolyseur ME 100/350 von H-TEC zudem optimal für den dezentralen Einsatz direkt an Wasserstofftankstellen, direkt gespeist aus Photovoltaik und Windkraft. Pro Tag erzeugt die Anlage rund 100 Kilogramm Wasserstoff, womit 20 Brennstoffzellen-Pkw betankt werden und jeweils 550 Kilometer zurücklegen können. Für die Nutzung durch Wasserstofftankstellen produzieren die PEM-Elektrolyse-Stacks den Wasserstoff mit bis zu 30 bar Wasserstoffdruck und mit einem sehr hohen Reinheitsgrad von bis zu 99,999% mit nachgeschalteter Trocknung. Damit eignet er sich für die Verwendung als Treibstoff.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Elektrolyse zur Produktion von Wasserstoff ist in den letzten Jahren immer präsenter. Die bereits ausgereifte alkalische Elektrolyse wird immer mehr durch die PEM Elektrolyse ergänzt. Auf Messen und Kongressen werden Anlagen im MW Bereich vorgestellt. Dabei sind die Kosten in den letzten Jahren deutlich gesunken. Auch in der Politik wächst die Einsicht, dass eine Energiewende ohne einen Energiespeicher nicht zu realisieren ist. Dabei ist Wasserstoff z.Zt. gerade im Bereich der Langzeitspeicherung die einzige technisch und ökonomisch sinnvolle Möglichkeit.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Vielzahl wissenschaftlicher Vorträge auf Fachkonferenzen und -messen gehalten und so interessierten Stellen zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Veröffentlichungen nach Nr. 11 NKBF

Name	Titel	Vortragstitel	Ort	Veranstaltung	Datum
Allebrod, Frank Dr.		PEM Electrolysis - improving transformation costs through intelligent stack-design	Hannover	Hannover Messe 2016	22.10.2015
Allebrod, Frank Dr.		Elevator Pitch Electrolyser	Hannover	Hannover Messe 2016	30.11.2016
Allebrod, Frank Dr.		PEM Electrolysis Systems and Stacks for Renewable Energy Storage and Sector Coupling	Kopenhagen	International Conference on Electrolysis 2017	15.04.2015
Allebrod, Frank Dr.		Elevator Pitch Electrolyser	Hannover	Hannover Messe 2018	15.07.2015

