

Gebäude als intelligenter Netzknoten in der Versorgungsstruktur: Experimentelle Untersuchungen an einer Wasserstoffkette



Prof. Dr. rer. nat. Ekkehard Bogasch, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Versorgungstechnik, Institut für energieoptimierte Systeme-EOS



M. Sc. Dipl.-Ing. (FH) Lars Bauermann, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Versorgungstechnik, Institut für energieoptimierte Systeme-EOS

Durch die gezielte politische Förderung stieg seit dem Jahr 2000 der Anteil der auf regenerativen Ressourcen basierenden Energiequellen stetig an. Im vergangenen Jahr erreichte deren Anteil an der Brutto-Stromerzeugung in Deutschland rund 20%, wobei der größte Anteil auf die Windkraft zurückzuführen ist. Aber auch die solare elektrische Energienutzung verzeichnet durch die Förderung der vergangenen Jahre einen rapiden Anstieg. Im vergangenen Jahr erreichte sie ein Rekordniveau von über 18.000 GWh an photoelektrisch gewandelter Energie (11.683 GWh im Jahr 2010) [1]. Der zunehmende Anteil regenerativer Energiequellen geht naturbedingt mit einer steigenden volatilen Energieeinspeisung einher. Doch kann dies Probleme in

der Versorgungsnetzführung hervorrufen, die im ungünstigsten Fall ein Abregeln der regenerativen Energieeinspeiser erforderlich macht. Ab einer Anlagengröße von 100 kW sieht der Gesetzgeber ein „Einspeisemanagement“ vor, dass temporär die Einspeiseleistung von erneuerbaren Energiequellen oder auch KWK-Anlagen reduziert [2].

Durch den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien in allen Netzebenen wird sich dieses Problem verschärfen. Zusätzliche Netztrassen aus dem windstarken Norden in die südlichen Metropolregionen Deutschlands werden als eine Maßnahme zur Netzstabilisierung diskutiert. Eine weitere Möglichkeit zur Stützung der Netze ist der Ausbau von Speicherkapazitäten. Eine vom VDE durch-

geführte Studie [3] zeigt auf, dass durch die erhöhte Bereitstellung von regenerativer elektrischer Energie der Einsatz von Speichertechnologien notwendig wird. Es wird u. a. dargelegt, dass neben der großtechnischen Umsetzung von zusätzlichen Speicherkapazitäten auch eine verstärkte Anwendung von kleineren dezentralen Energiespeichern auf der Verteilnetzebene/Niederspannungsebene, also vor Ort bei den Endverbrauchern denkbar wäre. Die lokale Nutzung elektrischer Energie, insbesondere die Erzeugung, Speicherung und schließlich auch die Wandlung beim Endverbraucher, wird zukünftig an Bedeutung gewinnen.

In diesem Kontext wurde in den vergangenen drei Jahren an der Ostfalia Hochschule, Campus Wolfenbüttel, am Labor für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik das Forschungsvorhaben „Intelligente-Gebäude-Energiesysteme“ (IGES) durchgeführt, dass sich insbesondere auf der Verteilnetzebene mit den Themen der regenerativen Energienutzung und -speicherung in einem Gebäudeumfeld auseinandergesetzt hat. In dem Vorhaben wurde davon ausgegangen, ein Gebäude als intelligenten Netzknoten im Versorgungsnetz zu betrachten, der kontrolliert elektrische Energie aus dem öffentlichen Netz aufnimmt oder abgibt. Für die Koordination der einzelnen Erzeuger, Speicher und Verbraucher wurde ein Energiemanagementalgorithmus

entwickelt, dessen vorrangiges Ziel die lokale Nutzung der erzeugten regenerativen Energie ist [4]. Dieser Algorithmus wird gegenwärtig weiterentwickelt, sodass zukünftig auch der thermische Energiebedarf im Gebäude berücksichtigt wird und der beispielsweise von einem Mikro-BHKW oder einer Wärmepumpe gedeckt werden kann.

Die Fokussierung auf den Gebäudesektor ist damit motiviert, dass rund 25% des Netto-Stromverbrauchs in Deutschland diesem Bereich zuzuordnen sind [5]. Dieser beachtliche Anteil lässt darauf schließen, dass die Etablierung von intelligenten Versorgungsnetzstrukturen auf dieser Netzebene einen wesentlichen Beitrag für eine nachhaltige Energieversorgung leisten könnte. Der im Forschungsvorhaben vorgestellte Ansatz des intelligenten Netzknotens, lässt sich auf den aktuell diskutierten Plus-Energie-Gebäude Standard übertragen. Das Plus-Energie Niveau ist erreicht, wenn sowohl beim Primär- als auch beim Endenergiebedarf ein Energieüberschuss in der Jahresbilanz für das Gebäude ausgewiesen wurde [6]. Im Hinblick auf die Nutzung von elektrischer Energie muss dafür allerdings auch die Leistungsbilanz eines Gebäudes im Tages-, Stunden-, bis zum Sekundenintervall berücksichtigt werden. Nur durch ein entsprechendes Management kann ein Plus-Energie-Gebäude einen Mehrwert für das elektrische Versorgungs-

netz generieren und somit als netzfreundlich bezeichnet werden [7]. Speichertechnologien nehmen hierbei eine Schlüsselposition ein, die eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Bedarf ermöglichen. Es können dabei stationäre Speicher im Gebäude oder auch mobile Speicher, Elektrofahrzeuge, in Betracht gezogen werden. Für beide Typen gilt, dass sie Teil des Energiemanagements eines Gebäudes und/oder des übergeordneten Netzabschnittes werden müssen. Einzelne Gebäude können über Kommunikationstechnologien virtuell zusammengefasst und vom Netzbetreiber als aktiver Teilnehmer des Smart Grids angesprochen werden.

Speichersysteme

Heutzutage kommen für die stationäre elektrische Energiespeicherung im Bereich von mehreren kWh überwiegend preisgünstige konventionelle Bleisäure-Akkumulatoren zum Einsatz. Zukünftig wären auch die gegenwärtig noch relativ teuren Lithium-Akkumulatoren denkbar, die sich aber durch eine höhere gravimetrische Energiedichte von ca. 150...200 Wh/kg gegenüber 25...40 Wh/kg bei Bleibatterien auszeichnen [3]. Eine weitere Speichertechnologie, die zunehmender diskutiert wird und auch für kleinere Einsatzbereiche denkbar wäre, ist die sogenannte Redox-Flow-Batterie. Eine Redox-Flow-Batterie zählt, wie der klassische Bleisäure-Akkumulator, zu den elektrochemischen Energiespeichern, mit dem Vorteil, dass die Leistung unabhängig vom Energieinhalt skaliert werden kann. Die Leistung ist allein abhängig von der Größe des Energiewandlers, also von der aktiven Fläche der einzelnen Zellen und deren Anzahl. Die Energie wird in einem flüssigen Elektrolyt gespeichert, der dem Energiewandler über

ein Pumpensystem aus einem Tank zugeführt wird. Eine Anpassung der Energiemenge erfolgt lediglich über die Dimensionierung des Tankvolumens. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens (DESG-Dezentrale elektrische Speicher für Gebäude) wird am Labor für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik u.a. eine Vanadium-Redox-Flow-Batterie aufgebaut und im Zusammenspiel mit regenerativen Energieerzeugern für den Einsatz als dezentrale Speichereinheit im Gebäudebereich untersucht.

Im kürzlich abgeschlossenen IGES-Forschungsvorhaben wurde neben den klassischen Bleisäureakkumulatoren eine Wasserstoffkette als ein weiteres Speicherelement betrachtet, das aus einem Wasserelektrolyseur, einem Wasserstoffspeicher und einer Brennstoffzelle besteht. Wie beim Redox-Flow-System, handelt es sich dabei um einen elektrochemischen Speicher, der eine unabhängige Skalierung von Leistung (Elektroly-

seur und Brennstoffzelle) und Energie (Gasspeicher) erlaubt. Wasserstoff als Energieträger bietet den Vorteil einer hohen Nutzungsflexibilität. Er kann für stationäre Anwendungen, beispielsweise für Brennstoffzellen oder Verbrennungsheizgeräte sowie für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen genutzt werden. In vielen Ländern wurden Förderprogramme initiiert [8], um diese Technologie als einen wesentlichen Bestandteil der zukünftigen Energieversorgung zu etablieren. Wasserstoff hat das Potenzial, eine wichtige Rolle beim Speichern von großen Mengen an elektrischer Energie, beispielsweise aus Windparks, einzunehmen. Es ist dadurch möglich, die Variation der regenerativ erzeugten Leistung auszugleichen [3, 9]. Neben der großtechnischen Anwendung könnte die Wasserstofftechnologie auch in kleineren Energiesystemen netzgekoppelt oder autark in Gebäuden eingesetzt werden. Allerdings sind kleine dezentrale Systeme zur Wasserstoff-

erzeugung gegenwärtig noch weit von einer Wirtschaftlichkeit entfernt. Brennstoffzellen-Heizgeräte hingegen werden bereits für Wohngebäude in ersten größeren Feldtests eingesetzt [10]. Der für den Betrieb der Brennstoffzellen benötigte Wasserstoff wird über Erdgas reformiert, das aus dem Gasnetz entnommen wird. Im IGES-Projekt hingegen wird der Ansatz einer dezentralen Wasserstoffherzeugung durch einen von regenerativen Energieerzeugern gespeisten elektrolytischen Wasserstoffherzeuger – „Elektrolyseur“ – verfolgt.

Ostfalia Energiepark

Abbildung 1 zeigt den aktuellen Aufbau des regenerativen Energieparks an der Ostfalia Hochschule in Wolfenbüttel. Bei den Anlagen wurden bewusst Mikro-Energieerzeuger im Bereich einiger Kilowatt ausgewählt, wie sie im Wohngebäudebereich oder in kleineren Gewerbegebäuden eingesetzt werden können.

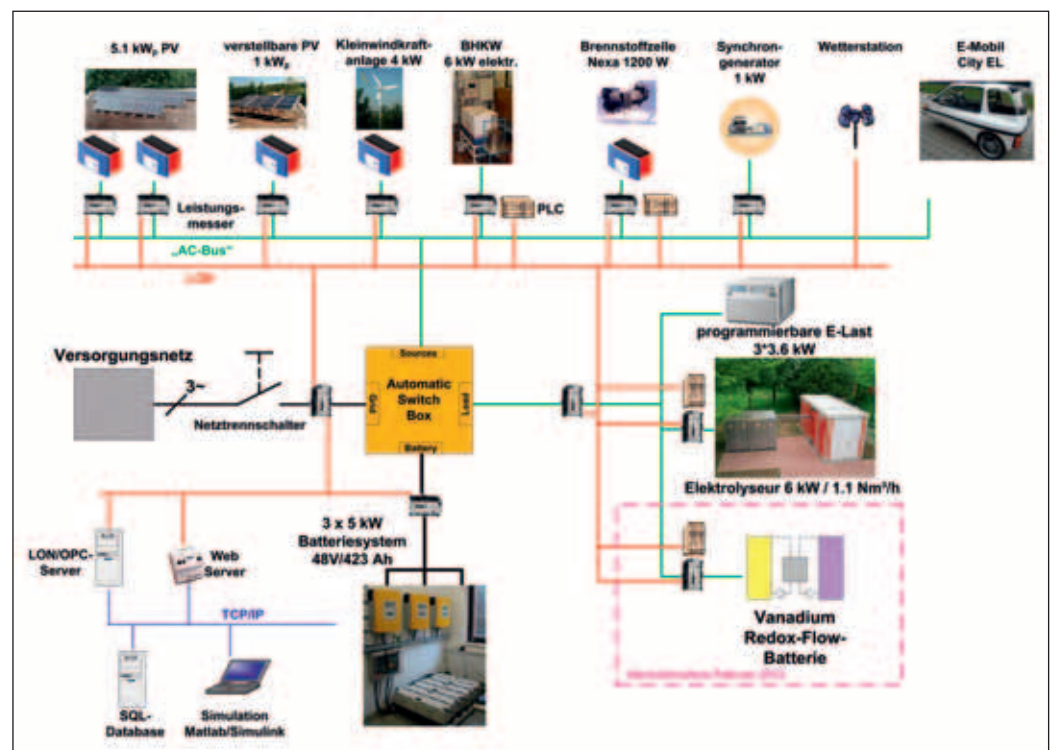


Abb. 1: Regenerativer Energiepark am Labor für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik.

Alle Komponenten sind über eine Umschaltbox (Automatic Switch Box) und einen Netz-koppelschalter mit dem Öffentlichen Versorgungsnetz verbunden. Durch Trennen des Schalters kann das Energiesystem in den Inselbetrieb überführt werden, in dem das Batteriesystem die Regelung von Spannung und Frequenz übernimmt. Hervorzuheben sei an dieser Stelle, die Modularität des Anlagenaufbaus. Jede Komponente kann einzeln auf die Umschaltbox geschaltet werden. Dadurch können verschiedene Anlagenkonstellationen untersucht werden. Für die Betrachtung von realistischen Lastszenarien werden drei programmierbare, elektronische Lastmodule eingesetzt, die ein Abfahren von gemessenen oder modellierten Lastprofilen mit einer hohen zeitlichen Auflösung ermöglichen.

Neben der energietechnischen wurde auch eine effiziente kommunikative Vernetzung der einzelnen Anlagen umgesetzt. Zum Einsatz kommt das aus der Gebäudetechnik stammende LON (Local-Operating-Network) Bussystem. Jeder Einspeiser und Verbraucher ist mit einem LON-fähigen Energiezähler ausgestattet, der mit einer sekundlichen Abtastrate die Messdaten an einen OPC-Server (OLE for Process Control) überträgt. Ein OPC-Client archiviert die Messdaten in einer SQL-Datenbank. Neben den energietechnischen Messdaten werden über Wetterstationen auch die Umweltbedingungen erfasst. Die kontrollierbaren Einspeiser (BHKW und Brennstoffzelle) und Speicher (Elektrolyseur und zukünftig die Redox-Flow-Batterie) sind darüber hinaus mit einer Steuerung (SPS) ausgestattet, deren Funktion das Ansteuern bzw. das Regeln der abgegebenen oder der aufzunehmenden Leistung ist.

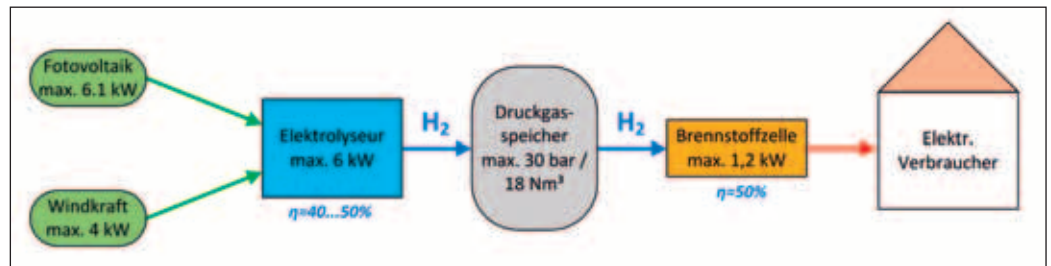


Abbildung 2: Regenerative Wasserstoffkette.

Wasserstoffkette

Eine wesentliche Zielsetzung des IGES-Forschungsvorhabens war die Betrachtung einer Wasserstoffkette als Speicherelement. Wie in Abbildung 2 dargestellt, wird der Elektrolyseur über die regenerativen elektrischen Energiequellen versorgt. Der erzeugte Wasserstoff wird in einem Druckbehälter gespeichert und kann in Bedarfszeiten über die Brennstoffzelle verstromt werden.

Der Gesamtwirkungsgrad des Wandlungsprozesses beträgt je nach Betriebspunkt zwischen 20% und 25% und sollte nur bei einem Überschuss an elektrischer Energie als Speicher herangezogen werden.

Das Prinzip einer alkalischen Elektrolysezelle ist in Abbildung 3 illustriert. Eine reale Anlage besteht aus einer Reihe solcher Zellen, die zu einem Zellenstapel, dem sogenannten „Stack“, zusammengesetzt sind. Als Elektrolyt wird eine Kaliumhydroxid-Lösung (25...35%) eingesetzt.

Durch das Anlegen einer Gleichspannung an die Elektroden fließt ein Strom durch den Elektrolyten und ein ionendurchlässiges Diaphragma. An der Kathode werden Elektronen aufgenommen und Wasser in gasförmigen Wasserstoff und Hydroxidionen zerlegt, die durch das Diaphragma zur Anode wandern. An der Anode werden die Hydroxidionen zu gasförmigem Sauerstoff oxidiert. Die chemischen Reaktionsglei-

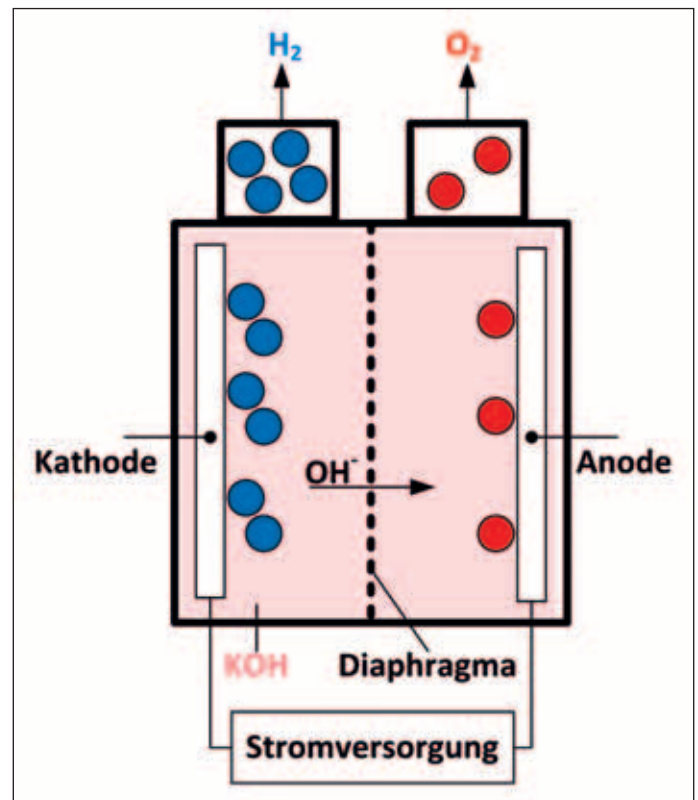
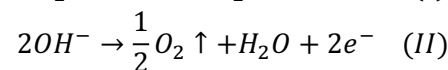
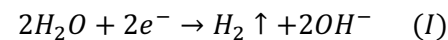


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau einer einzelnen Elektrolysezelle.

chungen an Kathode (I) und Anode (II) lassen sich folgendermaßen beschreiben [11]:



Der im IGES-Forschungsvorhaben eingesetzte alkalische Elektrolyser der Firma AccaGen besteht aus 50 Zellen mit einer aktiven Zellfläche von 105,68 cm². Vorteilhaft bei der Anlage ist das Druckniveau von 30 bar unter der die Elektrolyse stattfindet. Dadurch kann der Wasserstoff bis zu diesem Druck in einem Fla-

schenbündel (max. 18 Nm³) gespeichert werden. Des Weiteren kann über eine analoge Schnittstelle der Elektrolysestrom und damit die Produktionsrate des Elektrolyseurs im Bereich von 10%...100% variiert und an eine schwankende Einspeiseleistung angepasst werden. Abbildung 4 zeigt das vereinfachte Anlagenschema.

Als zentrales Element ist in Abbildung 4 der Elektrolyser dargestellt. Über die Stromversorgung wird Drehstromleistung aus dem Energiepark in Gleichspannung gewandelt und an die Elektroden des Elektrolyseurs gelegt. In dem Stack erfolgt die elektrolytische Zersetzung des Wassers und die entstehenden Gase strömen jeweils in einen Flüssigkeitsseparator. In diesen Behältern erfolgt die Trennung der Gase vom Elektrolyten. Der erzeugte Sauerstoff wird an die Umgebung abgeführt und nicht weiter verwendet. Der Wasserstoff wird hingegen einem Gasaufbereitungsprozess zugeführt, in dem eventuell vorhandener Restsauerstoff entfernt und das Gas getrocknet wird. Am Austritt der Anlage verfügt der Wasserstoff über eine Reinheit von 99,99% sowie einen Taupunkt von -50°C . Dieses Gas wird anschließend über eine Leitung in den Speicher oder auch direkt zur Brennstoffzelle geleitet. Das bei der Elektrolyse zersetzte demineralisierte Wasser wird verbrauchsabhängig über Pumpen dem Prozess zugeführt.

Die Automatisierung der Anlage erfolgt über eine SPS, die sämtliche Prozesswerte aufbereitet. Über eine Ethernet-Schnittstelle können diese Daten über Client-Programme abgerufen werden. Für eine bessere Bilanzierung wurde zusätzliche Messtechnik installiert, u.a. ein Massenstromsensor, der den realen bzw. den nutzbaren Volumenstrom erfasst. Dieser Sensor wird über eine zusätzliche SPS ausgelesen, die in das LON-Netz eingebunden ist. Als zentrale Datenerfassung wird ein LabVIEW-Programm benutzt, das über eine Ethernet-Verbindung auf beide Steuerungen zugreift.

Eine für die Rückverstromung des Wasserstoffs eingesetzte Nexa1200 Brennstoffzelle ist, wie in Abb. 1 darge-

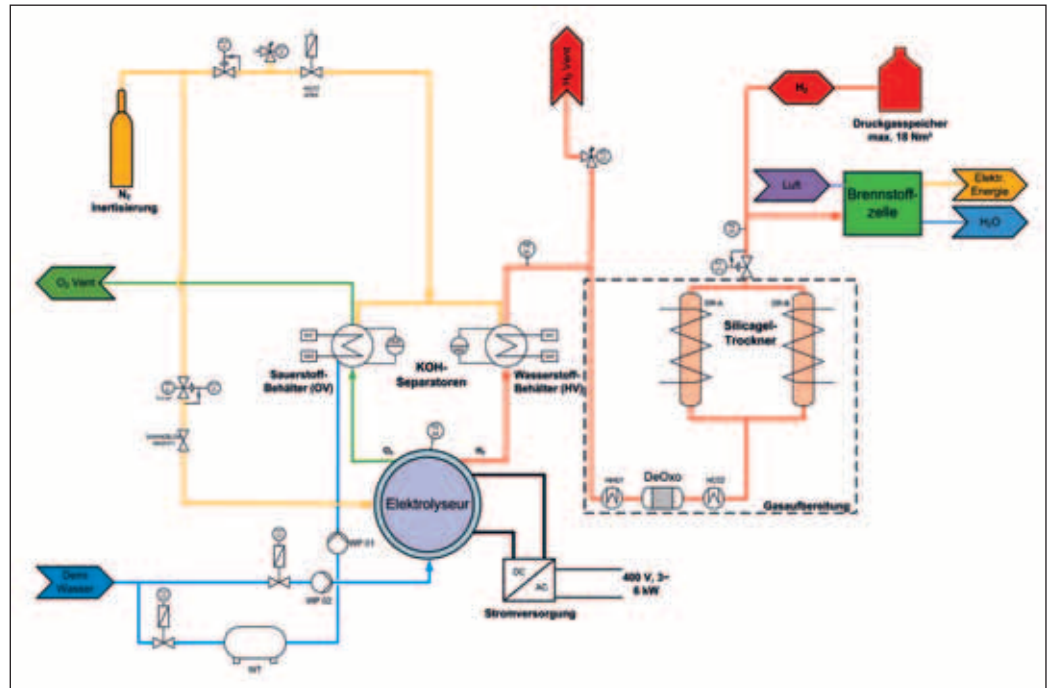


Abb. 4: Vereinfachtes Anlageschema des Elektrolyseurs.

stellt, über einen Wechselrichter an den Energiepark angeschlossen. Der Wechselrichter verfügt über eine Kommunikationsschnittstelle, sodass die Brennstoffzelle über das LON-Netz angesprochen werden kann. Die Leistungsabgabe der Brennstoffzelle kann im Bereich von $0 \dots 1.000\text{W}$ in Abhängigkeit des elektrischen Energiebedarfs vom Energiemanagement geregelt werden.

Experimentelle Untersuchungen

Bislang lag das Hauptaugenmerk der Untersuchungen auf dem Zusammenspiel der Komponenten der Wasserstoffkette, die im Folgenden anhand des statischen und dynamischen Betriebsverhaltens vorgestellt werden. Die Anlage kann in einem automatischen oder in einem manuellen Modus betrieben werden. Im Automatik-Mode arbeitet die Anlage abhängig vom Speicherdruck unterschritten, startet die Anlage und produziert solange Wasserstoff, bis der festgelegte maximale Speicher-

druck erreicht ist. In diesem Betriebsmodus kann über ein Bedienpanel an der Anlage die Produktionsrate verstellt werden. Im manuellen Modus ist die Anlage darüber hinaus über die analoge Schnittstelle im Produktionsbereich von $10 \dots 100\%$ regelbar. Unabhängig vom gewählten Betriebsmodus wird durch die interne Steuerung der Elektrolyseprozess geregelt. Darunter zählen

beispielsweise das Start-Verhalten, der Druckausgleich zwischen den beiden Elektrolytbehältern, die Zufuhr von Wasser oder die Stack-Temperatur. Abbildung 5 illustriert das Anfahrverhalten des Elektrolyseurs. Das Diagramm zeigt den Stack-Strom (rot) und den Systemdruck (grün) in den einzelnen Zuständen des Hochlaufprozesses.

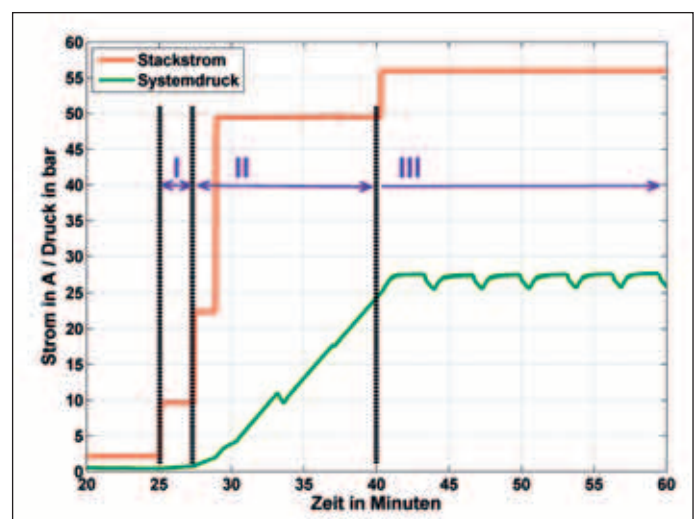


Abb. 5: Startverhalten der Elektrolyseanlage: I) Ventilations-, II) Druckaufbau- und III) Produktionszustand. Die Produktionsrate wurde auf 100% (56A) eingestellt.

Im Ruhezustand ist der Elektrolyseur mit Stickstoff inertisiert. Dieser wird beim Start mit einer geringen elektrischen Leistungszufuhr durch den dabei produzierten Wasserstoff aus der Anlage gespült (vgl. Abschnitt I in Abb.5). In Abschnitt II wird der Systemdruck aufgebaut, wobei zunächst der Stack-Strom auf 22,5 A eingestellt, der dann auf 49 A erhöht wird. Sobald ein Systemdruck von 25 bar erreicht wird, wechselt die Anlage in den Zustand „Produktion“, und der Strom wird auf die eingestellte Produktionsrate von 100% (56A) erhöht (vgl. Abschnitt III). Die Druckschwankungen in Abschnitt III werden verursacht durch einen Druckausgleich zwischen den beiden Gasseparatoren. Der erzeugte Sauerstoff wird nicht kontinuierlich sondern durch periodisches Öffnen eines Ablassventils abgeführt.

Abbildung 6 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf sowie die Temperaturentwicklung des Elektrolyseurs. Der zugeführte Strom wird von dem AC/DC-Wandler geregelt, die Klemmspannung stellt sich dabei entsprechend der Innenwiderstände ein.

Für die Erzeugung von einem Mol Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser wird eine Energie von 285,86 kJ (entspricht der Standardbildungsenthalpie von Wasser bzw. dem Brennwert von Wasserstoff unter Standardbedingungen, ΔH_{298}^0) benötigt. Davon müssen 237,2kJ in Form von elektrischer Energie und 48,6 kJ thermischer Energie zugeführt werden. Wird der thermische Energieanteil ebenfalls aus einer elektrischen Energiezufuhr gedeckt, folgt daraus eine elektrische Gesamtenergie-menge von 285,86 kJ. Über das Faraday'sche Gesetz kann daraus die theoretisch benötigte Spannung (thermoneutrale

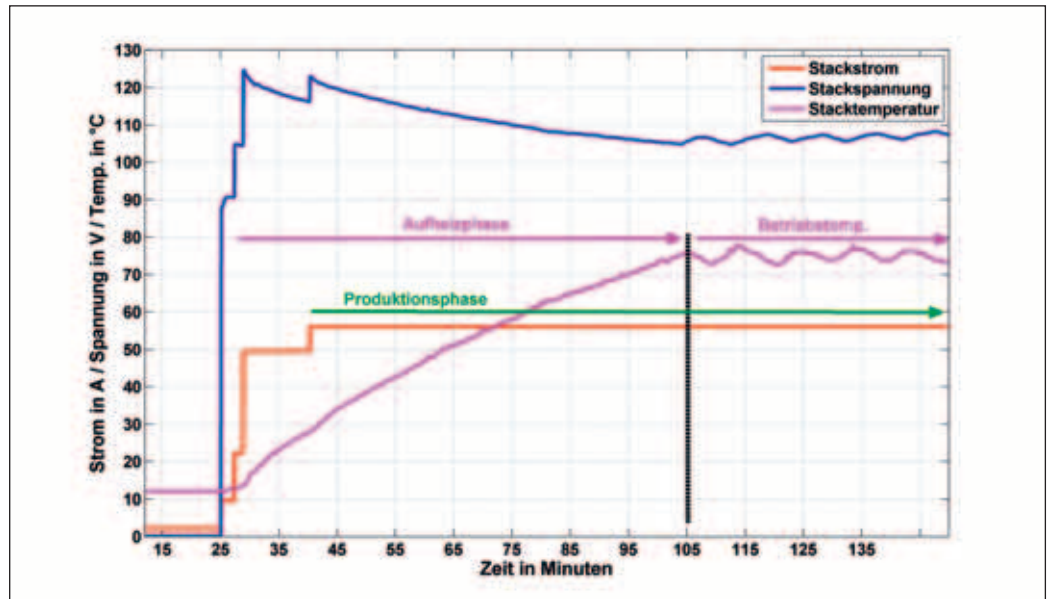


Abb. 6: Strom- und Spannungsverlauf sowie die Temperaturentwicklung während der Start- und Produktionsphase (Produktionsrate = 100%). Nach ca. 80 Minuten hat die Anlage eine mittlere Betriebstemperatur von 75 °C erreicht. Der Kühlkreislauf wird über einen Zweipunktregler angesprochen und hält dieses Temperaturniveau (ab Minute 105).

Spannung U_{th}) für die Elektrolyse von Wasser berechnet werden [12]:

$$U_{th} = \frac{\Delta H_{298}^0}{nF} = \frac{285,86 \frac{kJ}{mol}}{2 * \frac{96485 As}{mol}} = 1,48 V \quad (2)$$

Mit $n = 2$ (Anzahl der Elektronen die pro Wasserstoffmolekül benötigt werden) und $F = 96485 As/mol$ (Faradaykonstante)

Dies würde bei einem 50 Zellen-Stack eine theoretische Spannung von 74 V ergeben. Wie aus Abb. 6 ersichtlich, ist diese bei einem realen System deutlich größer. Zu Beginn der Messung beträgt die Stack-Spannung in der Produktionsphase 123 V, daraus folgt eine Zellspannung von 2,46 V. Es ist auch zu erkennen, dass sich ein Anstieg der Stack-Temperatur auf die notwendige Spannung auswirkt, die sich stetig reduziert. Dies ist durch die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit des Elektrolyten und der leitenden Materialien begründet. Nach ca. 85 Minuten hat die Anlage eine Betriebstemperatur von ca. 75 °C erreicht und

die Stack-Spannung beträgt im Mittel insgesamt 107V bzw. 2,14 V pro Elektrolysezelle. Aus dem Verhältnis der thermoneutralen Spannung zur realen Zellenspannung U_{Zelle} lässt sich der Spannungswirkungsgrad η_U des Elektrolyseurs berechnen [13]:

$$\eta_U = \frac{U_{th}}{U_{Zelle}} = \frac{1,48 V}{2,14 V} \approx 0,69 \text{ bzw. } 69 \% \quad (3)$$

Die erzeugte Wärmemenge \dot{Q} kann aus der Anzahl der Zellen (n), der Spannungsdifferenz zwischen U_{Zelle} und U_{th} sowie dem Stackstrom I_{Stack} berechnet werden:

$$\dot{Q} = n_{Zellen} \cdot (U_{Zelle} - U_{th}) \cdot I_{Stack} \quad (4)$$

$$\dot{Q} = 50 \cdot (2,14 V - 1,48 V) \cdot 56 A = 1,848 kW$$

Die freigesetzte Energiemenge wird in den thermischen Massen des Stacks und des Elektrolyten gespeichert bzw. teilweise über Wärmeleitung an die Umgebung abgegeben. Über einen Kühlkreislauf wird die Stack-Temperatur auf einer mittleren Temperatur von 75 °C gehalten. Im DESG-Forschungsvorhaben wird u.a. ein Konzept zur Abwärmenutzung für den Gebäudebereich entwickelt, welches die Gesamteffizienz des Prozesses steigern würde.

Abbildung 7 verdeutlicht den Einfluss der Temperatur auf die Leistung. Zu Beginn der Produktionsphase (Abschnitt III) wird noch eine Leistung von 6.898 W benötigt, bei Erreichen der Betriebstemperatur liegt diese im Mittel bei 5.900 W. Daraus folgt, dass im kalten Zustand ca. 17% mehr elektrische Leistung benötigt wird. Im Abschnitt IV befindet sich die Anlage im Zustand „Stand-by 2“ und kann jederzeit wieder in den Produktionszustand überführt werden. Des Weiteren ist in Abb. 7 zu erkennen, dass die Stack-Temperatur, bedingt durch die Wärmeleitung an die Umgebung, im Zustand „Stand-by 2“ schnell abfällt. Die Umgebungs- bzw. die Raumtemperatur betrug bei dem Versuch 10 °C. Diese schnelle Absenkung wirkt sich beim erneuten Einschalten des Elektrolyseurs negativ auf den Leistungsbedarf aus. Es ist daher sinnvoll, den Stack teilweise zu isolieren, damit die Temperatur besser gehalten werden kann. Hierzu sollen im DESG-Projekt gezielte Untersuchungen erfolgen.

Für eine bessere Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Anlage wurde für unterschiedliche Produktionsraten der Volumenstrom über einen gewissen Zeitraum erfasst und gemittelt.

Abbildung 8 zeigt die Kennlinien des gemittelten und des

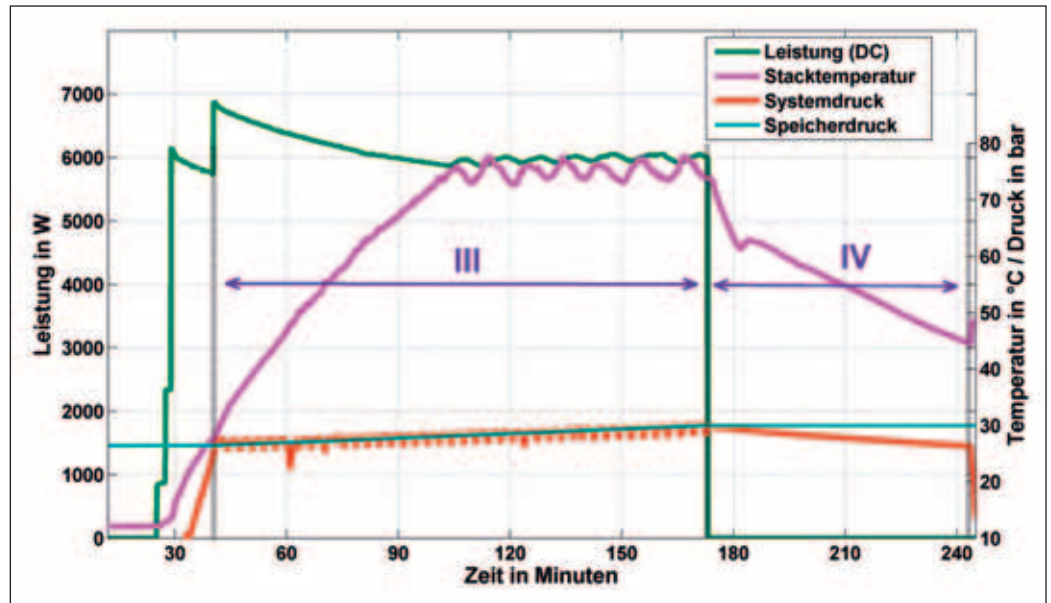


Abb. 7: Versuchsreihe mit einer Produktionsrate von 100% (56A). In Grün ist die Leistung dargestellt. Es ist deutlich die Temperaturabhängigkeit ersichtlich.

theoretisch möglichen Normvolumenstroms, der über das Faraday'sche Gesetz anhand der Stromstärke berechnet wurde.

Die deutlich erkennbare in etwa gleichbleibende Differenz zwischen dem theoretisch möglichen und dem gemessenen Volumenstrom basiert auf Verlusten, die bei der Elektrolyse entstehen, sowie auf einer konstanten Wasser-

stoffmenge, die für eine Gasanalyse (zur Bestimmung des Restsauerstoffanteils im Wasserstoff) und zur Regeneration der Silcagel-Trockner verwendet wird. Dieser Eigenbedarf ist in Abbildung 7 durch den Druckabfall in Abschnitt IV erkennbar. Für die energetische Bewertung eines Elektrolyseurs wird häufig das Verhältnis der Energiemenge des produzierten Wasserstoffs zur dafür benötigten elektrischen

Energie gebildet [15]. Für den AccaGen Elektrolyseur wird bei einer Produktionsrate von 100% beispielsweise ein energetischer Wirkungsgrad von ca. 52% bezogen auf den Brennwert ermittelt.

Im Zusammenspiel mit regenerativen Energieeinspeisern ist das dynamische Verhalten eines Elektrolyseurs von besonderem Interesse. Dabei sollte beachtet werden,

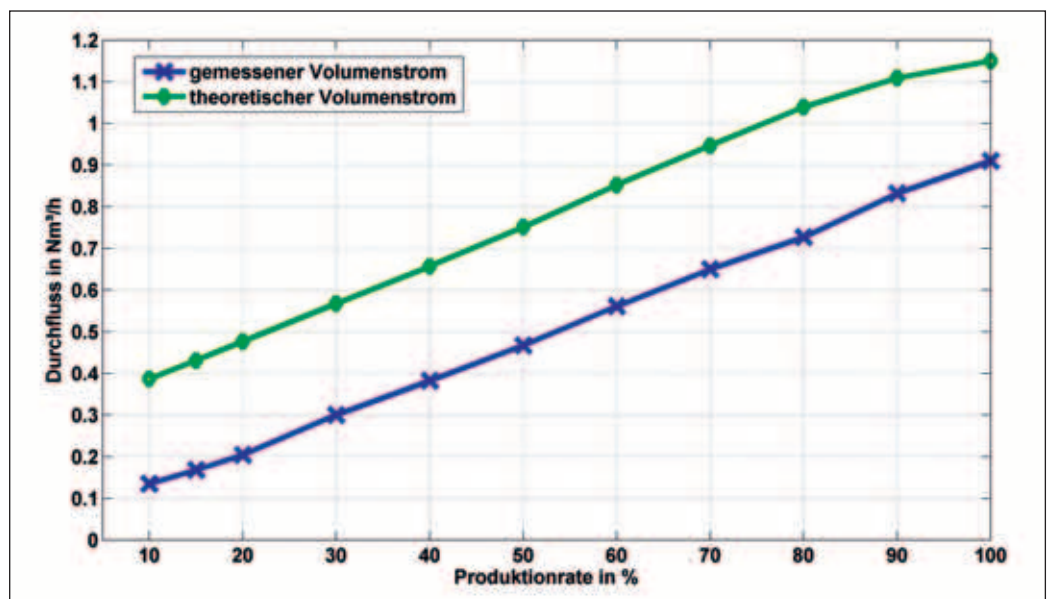


Abb. 8: Der theoretische und gemessene Volumenstrom für unterschiedliche Produktionsraten des AccaGen Elektrolyseurs.

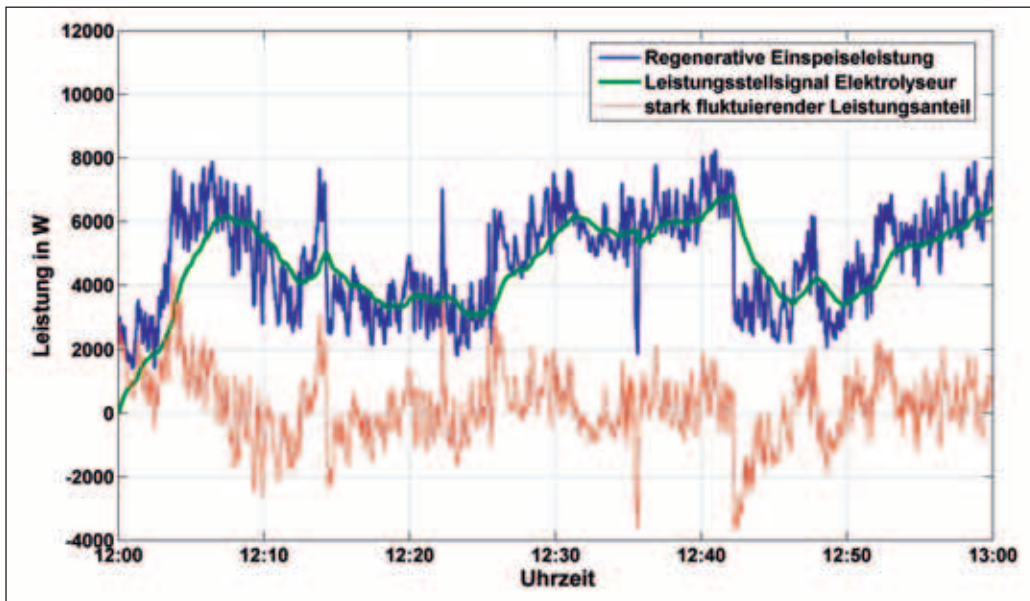


Abb. 9: Regenerative Einspeiseleistung (blau) des Energieparks am 12. Juni 2010 zwischen 12:00 Uhr und 13:00 Uhr. Die Leistung wird in einen niederfrequenten, das Stellsignal für den Elektrolyseur (grün), und einen hochfrequenten Leistungsanteil (rot) separiert.

dass sich eine stark fluktuierende zugeführte Leistung negativ auf die Betriebsweise eines Elektrolyseurs oder einer Brennstoffzelle auswirkt und somit zu Leistungseinbußen und einer verminderten Lebenszeit führen kann [14]. Es ist daher auch aus diesem Grund sinnvoll, eine Wasserstoffkette in Kombination mit einem Kurzzeitspeicher zu

betreiben, der schnelle Leistungsänderungen kompensiert.

Das im IGES-Forschungsvorhaben umgesetzte Energiemanagement zerlegt das Signal des Leistungsmesswertes mithilfe eines Tiefpass-Filters in zwei Anteile. Das gefilterte niederfrequente Messsignal stellt das Stellsignal für den Elektrolyseurs dar, die hoch-

frequente Komponente mit hohen Leistungsgradienten wird entweder vom Versorgungsnetz oder im Fall des Inselbetriebs vom Batteriesystem aufgenommen. Abbildung 9 zeigt den Leistungsverlauf der regenerativen Einspeiser des Energieparks mit einer sekundlichen Abtastrate sowie die gefilterten niederfrequenten Leistungsanteile

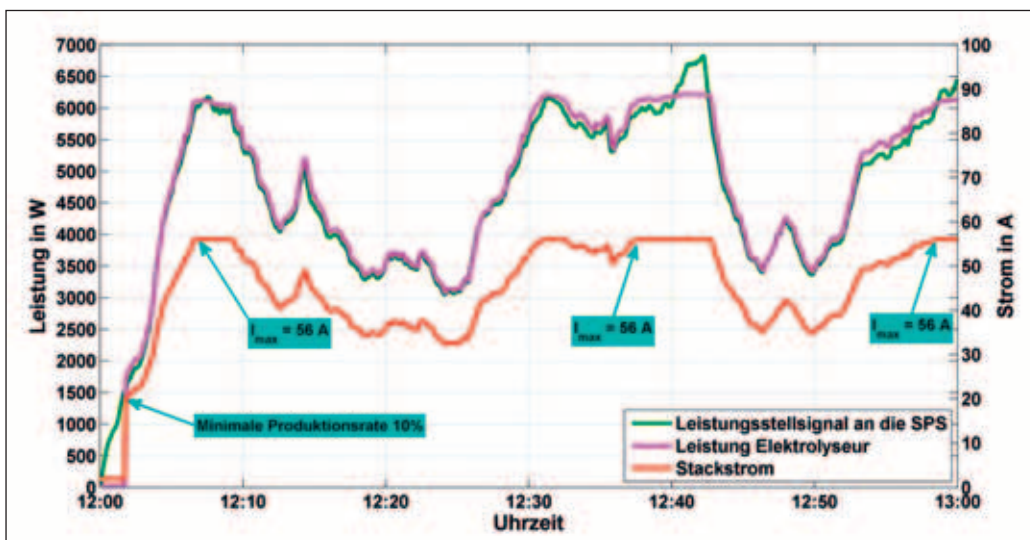


Abb. 10: Antwortverhalten des Elektrolyseurs auf das Leistungsstellsignal (grün). Die gemessene DC-Leistung (magenta) kann der Leistungsvorgabe sehr gut folgen. Sobald das Leistungsangebot ausreichend ist, wird der Strom vom AC/DC-Wandler geregelt (Sprung um ca. 12:02 Uhr) und wird auf max. 56 A begrenzt. Um 12:40 Uhr und 13:00 Uhr wird der Strom ebenfalls auf 56 A begrenzt. Die überschüssige elektrische Energie wurde an das Versorgungsnetz abgeführt.

an einem sonnigen und windigen Junitag zwischen 12:00 Uhr und 13:00 Uhr.

Das in Matlab/Simulink implementierte Energiemanagement kommuniziert mit einer Abtastrate von 1 Sekunde über eine OPC-LON-Schnittstelle mit der SPS, die das Stellsignal über die analoge Schnittstelle an die Steuerung des Elektrolyseurs überträgt. Abbildung 10 zeigt das Antwortverhalten des Elektrolyseurs für den in Abbildung 9 illustrierten Leistungsverlauf.

Es ist zu erkennen, dass der Elektrolyseur dem Stellsignal gut folgen kann. Es sind nur minimale Abweichungen erkennbar. Bei Erreichen des maximalen Stroms von 56 A wird die überschüssige Leistung an das Versorgungsnetz oder den Batteriespeicher abgegeben. Durch das Energiemanagement werden keine großen Leistungsgradienten auf die Anlage übertragen. Die maximale Stellsignaländerung im Produktionsmodus beträgt ± 75 W/s.

In einem weiteren Versuch wurde die regenerative Einspeiseleistung direkt als Stellsignal an die SPS übergeben. Das Reaktionsverhalten der Anlage auf das ungefilterte Signal ist in Abbildung 11 dargestellt.

Der Leistungsverlauf in Abbildung 11 ist deutlichen Fluktuationen unterworfen. Es wird ersichtlich, dass der Elektrolyseur diesem Leistungsangebot gut folgen kann. Eine Auswirkung auf die Betriebsweise konnte nicht festgestellt werden. Der größte messbare Leistungsgradient betrug für den in Abbildung 11 gezeigten Leistungsverlauf -1.575 W/s. Für eine bessere Darstellung des Antwortverhaltens ist in Abbildung 12 das Zeitfenster von 12:10 Uhr bis 12:12 Uhr illustriert.

Die Reaktionszeit des Elektrolyseurs beträgt nur wenige Sekunden und ist in der Lage, einem stark fluktuierenden Leistungsangebot zu folgen. Allerdings kann sich diese Betriebsweise negativ auf die Lebenserwartung der Anlage auswirken und sollte nicht über längere Zeiträume angewendet werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Dieser Artikel präsentiert experimentelle Untersuchungen an einer Wasserstoffkette, die im Rahmen eines Forschungsvorhabens durchgeführt wurden. Dabei liegt der Fokus auf dem Betriebsverhalten eines alkalischen Elektrolyseurs im Zusammenspiel mit stark fluktuierenden regenerativen Energieeinspeisern. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass sich durch ein Energiemanagement die Leistungsaufnahme eines kommerziellen Elektrolyseurs an das regenerative Energiedargebot gut anpassen lässt und dieser ein gutes Reaktionsverhalten aufweist. Es wird dabei sichergestellt, dass die Anlage nicht mit zu großen Leistungsgradienten belastet und somit kontinuierlicher und schonender betrieben wird. Diese Betriebsweise erfordert allerdings, insbesondere im Inselbetrieb, eine Kombination mit einem elektrischen Kurzzeitspeicher, der die hochfrequenten Leistungsanteile der regenerativen Einspeiser kompensiert. Im Netzparallelbetrieb wird dieser Anteil vom Versorgungsnetz aufgenommen.

Die Untersuchungen haben auch ein Optimierungspotenzial am Anlagenaufbau aufgezeigt, das eine bessere Effizienz bei einer intermittierenden Betriebsweise ermöglichen würde. Beispielsweise würde sich eine Isolierung des Stacks positiv auf den Gesamtwirkungsgrad auswirken, bei kurzzeitigen Betriebspau-

sen könnte die Temperatur besser gehalten werden und der Leistungsbedarf beim Wiederanfahren würde sich erheblich reduzieren.

Eine Zielsetzung des aktuellen DESG-Forschungsvorhabens ist u.a. eine Konzeptentwicklung zur Nutzung der thermischen Energie einer Wasserstoffkette, welche eine Steigerung der Gesamteffizienz ermöglichen würde. Darüber hinaus werden diesem Vorhaben unterschiedliche elektrische Speicher evaluiert, die im Gebäudesektor Anwendung finden könnten. Die Entwicklungen aus dem IGES-Projekt werden hierbei aufgegriffen und auf unterschiedliche Speichertechnologien übertragen. Die Gebäude werden durch die Kopplung von regenerativen Energiequellen, Energiespeichern und Informationstechnik zu einem intelligenten Netzknoten, der für Netzdienstleistungen in einem Smart Grid zur Verfügung steht.

Der Einsatz einer Wasserstoffkette erweist sich bisher als noch nicht wirtschaftlich gegenüber anderen Speichertechnologien. Allerdings bietet die Wasserstofftechnik zum einen das Potenzial, große Energiemengen zu speichern und zum anderen auch die Möglichkeit, als sauberer Energieträger für thermische oder mobile Anwendungen zur Verfügung zu stehen. ◀

Literatur

[1] Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2011), BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Stand 15.12.2011

[2] EEG-Erneuerbaren Energien Gesetz, <http://www.eeg-aktuell.de/wp-content/uploads/2010/07/EEG-konsolidierte-unverbindliche-Fassung.pdf>, Zugriff Januar 2012

[3] VDE-Studie: Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger; Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG); VDE-Verlag 2009

IKZ fürs iPad



Kostenloser Download



- ▶ Neu: Ab sofort ausgesuchte IKZ-Ausgaben im Apple Zeitungskiosk verfügbar
- ▶ Komfortable Lese- und Suchfunktionen
- ▶ Intuitive Bedienung
- ▶ Direktlinks zu Websites und Social Media



Besser informiert.

NEUAUFLAGE:

Offizielles Lieferanten-Verzeichnis 2012



- ⇒ **Mehr als 7.000 Hersteller und Lieferanten** aus sämtlichen Bereichen der Heizungs-, Klima-, Sanitär- und Umwelttechnik (alphabetisch und postalisch sortiert sowie gegliedert in 886 Warengruppen)
- ⇒ **Großhändler**
Mitglieder des DGH - Deutscher Großhandelsverband Haustechnik e.V.
- ⇒ **Mitglieder der BHKSt-Organisation**
industriell strukturierte anlagenerstellende Unternehmen

Bestellungen:

(Preis: 19,50 €, inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten)
TGC GmbH, Tel. 0228/2650-81; Fax. -82
www.shop.tgc-gmbh.de;
versand@tgc-gmbh.de



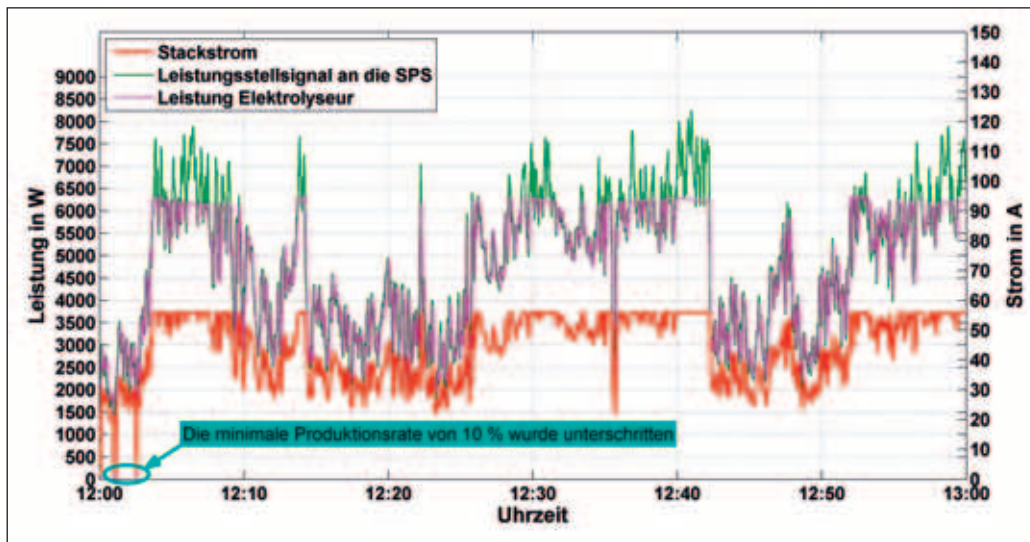


Abb. 11: Antwortverhalten des Elektrolyseurs auf das ungefilterte Leistungssignalsignal (grün). In der Zeit zwischen 12:00 Uhr und 12:10 Uhr wechselt die Anlage zweimal in den Stand-By 2 Zustand, da die minimale Leistung unterschritten wird. Der vom AC/DC-Wandler geregelte Strom wird bei 56 A begrenzt.

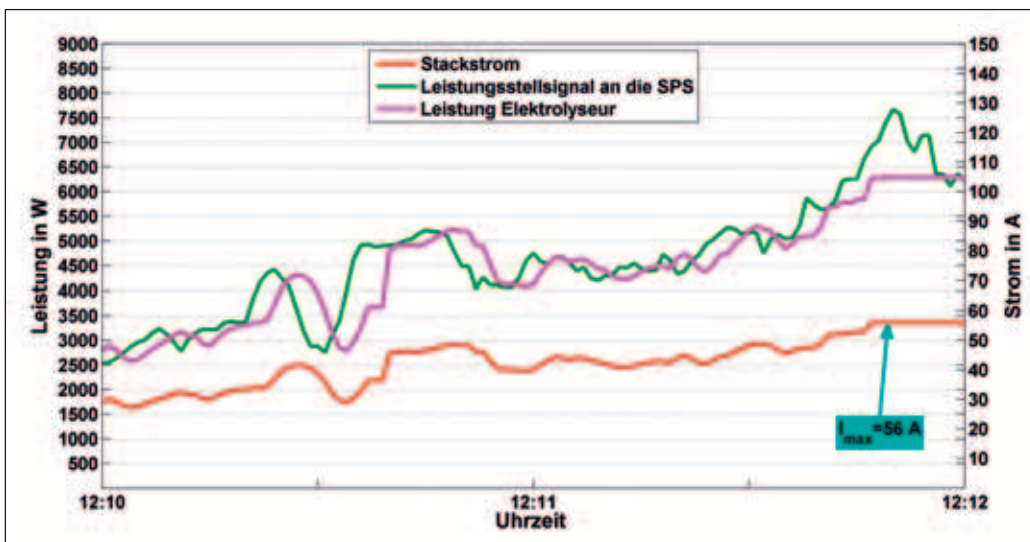


Abb. 12: Antwortverhalten des Elektrolyseurs im Zeitfenster 12:10 Uhr bis 12:12 Uhr. Die Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs (magenta) kann dem Stellsignal (grün) der SPS gut folgen. Die zeitliche Verzögerung beträgt wenige Sekunden, die teilweise auf Signallaufzeiten/Abstraten im Kommunikationsnetz zurückzuführen ist.

[4] Baumann L., Boggasch E., Monitoring and management of a renewable energy system with hydrogen using a building automation system, e-nova 2010 international conference "Sustainable Buildings", 12.11.2010 Pinkafeld, ISBN 978-3-9502452-0-2

[5] Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2010, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Februar 2011

[6] Wohnhäuser mit Plus-Energie Niveau – Definition und Berechnungsmethode, <http://www.forschungsinitiative.de/PDF/Anlage1-Definition-PEH.pdf>, Zugriff Januar 2012

[7] Milo A., et al., Optimal economic exploitation of hydrogen based grid-friendly zero energy buildings, *Renewable Energy* (2010), doi:10.1016/j.renene.2010.06.021

[8] Dincer I., et al., A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 35 (2009)

[9] Stolzenberg K., Hydrogen as a Means of Controlling and Integrating Wind Power into Electricity Grids – The HyWindBalance Project, Proceedings International Conference "Hydrogen on Islands", 22-25- October 2008

[10] <http://www.callux.net/>, Zugriff Januar 2012

[11] NOW-Studie: Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Kurzfassung des Abschlussberichtes, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 05.07.2011

[12] Harrison K.W., Remick R., Martin G.D., Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries, Preprint, 18th World Hydrogen Energy Conference, 16.-21. Mai 2010, Essen Germany

[13] Tesfahunegn S.G., Ulleberg Ø., Vie P.J.S., Undeland T.M., Optimal shifting of Photovoltaic and load fluctuations from fuel cell and electrolyzer to lead acid battery in a Photovoltaic/hydrogen standalone power system for improved performance and life time, *Journal of Power Sources* 196 (2011)

IKZ[®] HAUSTECHNIK



Es liegt was in der Luft!

Aus dem Inhalt: Innenraumhygiene • Wohnungslüftung • Dezentrale Lüftung
Schullüftung • Schwimmbäder • Software • Luftfilter • Messtechnik • Markt
Qualifizierung und Weiterbildung • Wartung und Inspektion

Das IKZ-HAUSTECHNIK Sonderheft zum Thema Raumlufthygiene. Geballtes Fachwissen auf 100 Seiten. Sichern Sie sich Ihr persönliches Exemplar (Einzelpreis € 10,- inkl. MwSt. inkl. Versand)!

Heftbestellungen unter Tel. 02931 8900-54 oder per E-Mail an: leserservice@strobels-verlag.de



STROBEL VERLAG GmbH & Co KG
Zur Feldmühle 9-11
59821 Arnsberg
Tel. 02931 8900 0
Fax 02931 8900 38
www.strobels-verlag.de

Besser informiert.