

# HyWindBalance

## Ergebnisse des Oldenburger Wind-Wasserstoff-Projekts

Klaus Stolzenburg, Jörg Linnemann, Robert Steinberger-Wilckens  
*Ingenieurbüro PLANET GbR, Donnerschweer Str. 89/91, 26123 Oldenburg, k.stolzenburg@planet-energie.de*

Luis Vera Tudela, Hans-Peter Waldl  
*Overspeed GmbH & Co. KG, Marie-Curie-Str. 1, 26129 Oldenburg, h.p.waldl@overspeed.de*

Matthias Lange  
*energy & meteo systems GmbH, Marie-Curie-Str. 1, 26129 Oldenburg, matthias.lange@energymeteo.de*

Heike Kröger, Sebastian Styrnol, Ulrike Ziebell  
*Projekt Ökovest GmbH, Alexanderstr. 416c, 26127 Oldenburg, h.kroeger@oekovest-gmbh.de*

Detlev Heinemann, Hans-Gerhard Holtorf, Mauricio Rojas la Rotta  
*Universität Oldenburg, Institut für Physik, Abteilung Energie- und Halbleiterforschung, 26111 Oldenburg, hans.holtorf@uni-oldenburg.de*

Andreas Ballhausen, Ewald Heyen  
*EWE Aktiengesellschaft, Tirpitzstr. 39, 26122 Oldenburg, ewald.heyen@ewe.de*

**Schlüsselwörter:** Energiespeicherung, Windenergie, Wasserstoff, Regelenergie, Elektrolyseur, Brennstoffzelle, Simulationen, Wirtschaftlichkeit

**Zusammenfassung:** Mit zunehmendem Anteil von Windenergie an der Elektrizitätsversorgung stellen sich Fragen der Einbindung dieser Energiequelle, zum Beispiel in Bezug auf die Schwankungen, mit denen Windleistung zur Verfügung steht. Um solche Herausforderungen anzugehen, kombiniert das Forschungs- und Entwicklungsprojekt HyWindBalance Windparks mit dem Speichermedium Wasserstoff. Die wesentlichen Elemente eines Wind-Wasserstoff-Systems sind Elektrolyseure, Wasserstoffspeicher, Brennstoffzellen und eine intelligente Regeleinheit, die den Betrieb des Gesamtsystems unter anderem auf der Basis von Prognosen der Produktion von Windstrom und der Last optimiert. Mit einer solchen Anlage kann zum Beispiel auch Regelenergie bereitgestellt werden. Der Artikel konzentriert sich auf Erfahrungen mit einer Forschungsanlage, auf die Ergebnisse von Simulationen großer Systeme und auf Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit.

### 1. Einführung

Die elektrische Leistung, die von Windparks erzeugt wird, hängt von den natürlichen Schwankungen der Windgeschwindigkeit ab. Während die kurzzeitigen Fluktuationen (einschließlich der Turbulenz) zufällig sind, zeigen die mittelfristigen und räumlichen Schwankungen eine gewisse Korrelation. Wenn große Windenergiesysteme (also zahlreiche Windparks) betrachtet werden, die zwangsläufig über eine beträchtliche Fläche verteilt sind, führt die Korrelation zum Herausmitteln der hochfrequenten (kurzzeitigen) Schwankungen [1]. Somit ist die im Wind enthaltene Energie zu einem großen Teil vorhersagbar. Dies hat zur Entwicklung von Werkzeugen zur Prognose von Windenergie geführt [2].

Die wachsenden Anteile von Windenergie im elektrischen Versorgungssystem führen zu einer Reihe von Herausforderungen:

- Bewirtschaftung des Windenergiepotentials derart, dass aus den natürlichen Ressourcen ein maximaler Nutzen zu ziehen ist,
- Ausbau der Netzkapazität, indem zusätzliche Leitungstrassen die in dieser Hinsicht bisher eher schwach entwickelten Küstenregionen mit den Zentren des Stromverbrauchs verbinden, sowie
- Bereitstellung zusätzlicher Regelenenergie, um die Schwankungen der Windstromproduktion auszugleichen.

Es ist zu erwarten, dass aus dem Betrieb großer Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee ein erhöhter Bedarf an Regelenenergie resultiert. Kritiker behaupten, dies führe zu einem zusätzlichen Einsatz fossiler Brennstoffe in konventionellen Kraftwerken bei geringeren Wirkungsgraden. Daraus wiederum folgten zusätzliche Emissionen, was im Gegensatz zum Ziel einer umweltfreundlichen Bereitstellung von elektrischer Energie aus Wind stehe [3].

### **1.1 Das HyWindBalance-Konzept**

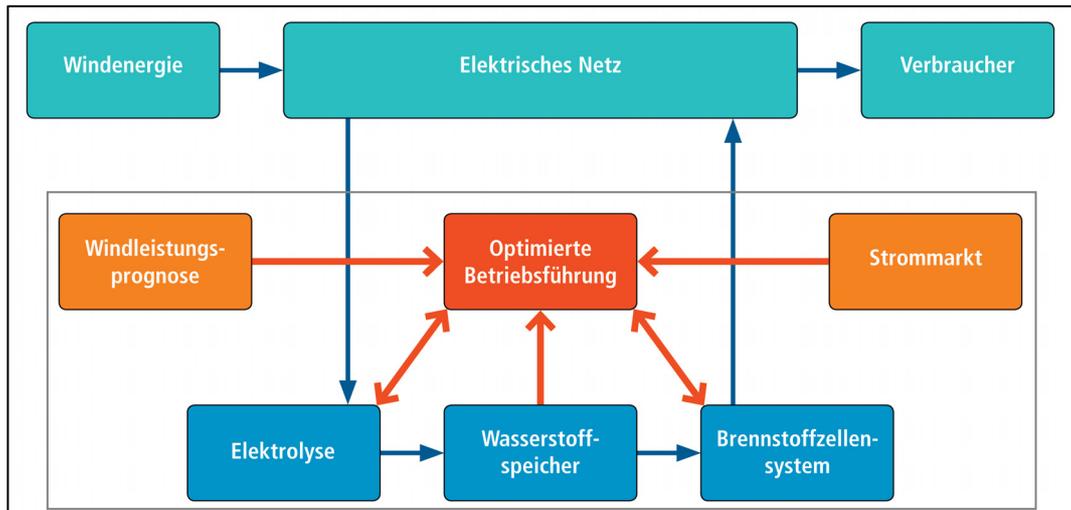
Die elektrischen Netze müssen an die Randbedingungen bei einer hohen Durchdringung mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen angepasst werden. Eine genauere Analyse zeigt, dass viele Vorhersage-Werkzeuge zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch schon heute verfügbar sind. So sind Wettervorhersagen seit Jahrzehnten Bestandteil des Netzmanagements, ebenso wie wissensbasierte Ansätze zur Prognose des Strombedarfs bzw. zum Ausgleich kurzfristiger, statistischer Schwankungen der Last. Somit verringert sich das Problem der Einbindung schwankender erneuerbarer Energiequellen darauf, diese neuen Anforderungen in die Regelung des Netzes optimal zu integrieren.

Das HyWindBalance-Konzept geht diese Herausforderung an, indem elektrische Energie aus Wind chemisch in Form von Wasserstoff gespeichert wird. Das Konzept verbindet Produktion und Lagerung von Wasserstoff sowie seine Rückverstromung mit einer „intelligenten“ Steuerung, die Routinen zur Prognose sowohl der Windleistung als auch der Last sowie (optional) die Verwendung von Preisdaten vom Spotmarkt für elektrischen Strom umfasst. Abbildung 1 bietet einen Überblick der Komponenten des Systems und ihrer Wechselwirkung. Ziel ist es, ein Wind-Wasserstoff-System zu entwickeln, das als „virtuelles Kraftwerk“ für die Windenergie eine Reihe Optionen bietet:

- Planmäßige Erzeugung, um Windenergie „kontrollierbar“ zu machen,
- Vermeidung zusätzlichen Bedarfs an Regelenenergie (Sekundär-Reserve) aus konventionellen Kraftwerken, und
- Vermarktung von Windstrom als Regelenenergie oder Spitzenleistung auf dem Spotmarkt.

Mittelfristig wird es auch möglich sein, Wasserstoff aus Windenergie auf anderen Märkten zu verkaufen, z.B. als Kraftstoff für Straßenfahrzeuge.

Unternehmen und Institutionen mit unterschiedlichen Ausrichtungen arbeiten in HyWindBalance zusammen: von der Grundlagen- und angewandten Forschung über Ingenieurbüros und Consultings aus den Bereichen Windenergie, Energiewirtschaft, Wasserstofftechnik und Informationssysteme bis hin zu einem Finanzdienstleister und einem Energieversorger [4].



**Abbildung 1:** Schema des HyWindBalance-Konzepts. Blaue Pfeile bezeichnen Energieflüsse, rote Pfeile stehen für Informationsflüsse.

Die Pläne für große Offshore-Windparks vor der deutschen Küste, die in den nächsten 10 bis 20 Jahren umgesetzt werden sollen, sind der Katalysator für das Projekt. Das HyWindBalance-Konzept kann jedoch auch an andere Bedingungen angepasst werden, zum Beispiel zur Versorgung von Inseln mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energiequellen.

Die Entwicklung und Erprobung kommerzieller Anlagen bis zum Gigawatt-Bereich wird eine Folge von Skalierungsschritten umfassen und etwa eine Dekade dauern. Dieser Artikel stellt die bisher durchgeführten Arbeiten vor.

Zu den Aufgaben der aktuellen F&E-Phase gehören:

- das Sammeln von Erfahrungen mit dem Betrieb einer Forschungsanlage,
- die Entwicklung von Betriebsstrategien unter verschiedenen meteorologischen, technischen und wirtschaftlichen Bedingungen,
- die Programmierung eines Simulationswerkzeugs, das das Verhalten der Komponenten und der Einheit zur Betriebsführung abbilden kann,
- die Bewertung der Machbarkeit großer Wind-Wasserstoff-Systeme, und
- die Entwicklung eines Moduls für die universitäre Ausbildung zu den Themen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie, Energiespeicherung, Regelenergie usw.

Der Artikel konzentriert sich auf die Forschungsanlage, auf die Ergebnisse von Simulationen großer Systeme sowie auf Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit.

## 2. Die Forschungsanlage

Die Forschungsanlage dient dazu, die Leistungsfähigkeit eines Wind-Wasserstoff-Systems und seiner Komponenten unter realistischen Betriebsbedingungen zu testen. Sie wurde im Energielabor der Universität Oldenburg errichtet, wo seit über 25 Jahren Forschung und Lehre zu den erneuerbaren Energiequellen stattfinden [5]. Die Anlage besteht aus:

- einem alkalischen Elektrolyseur, der bis zu 1 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff bei 30 bar erzeugen kann bei etwa 6 kW (wechselstromseitig) installierter Leistung (Hersteller: Accagen),
- einer PEM-Brennstoffzelle mit einer elektrischen Nennleistung von 1,2 kW (Hersteller: Ballard),
- einer steuerbaren elektronischen Last (bis zu 1 kW Gleichstrom) für die Brennstoffzelle; siehe Abbildung 2,
- einem Wasserstoffspeicher bestehend aus 2 Bündeln zu je 12 Flaschen mit jeweils 50 Litern geometrischem Volumen und 200 bar Nenndruck,
- einer Steuer- und Regeleinheit,

sowie Nebenaggregaten wie Wasseraufbereitung, Stickstoffversorgung etc.

Es wurden lediglich kommerziell erhältliche Komponenten ausgewählt (also keine Prototypen), um ein realistisches Bild des „state of the art“ zu gewinnen und um die üblichen Gewährleistungen zu erhalten.

Das System ist nicht an eine Windenergieanlage gekoppelt, sondern bekommt das Signal für die Eingangsleistung von der Steuer- und Regeleinheit. Das Gleiche gilt für das Lastsignal, das die elektronische Last bzw. die Brennstoffzelle steuert. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass dieselben Zeitreihen der Eingangsleistung und der Last wiederholt auf das System einwirken können, wobei die Betriebsparameter variiert werden. Die Zeitreihen werden, zum Beispiel, aus gemessenen Windleistungs- und Lastdaten gewonnen, indem diese entsprechend auf die Größe der Forschungsanlage skaliert werden.

Es wird kein Kompressor verwendet, um die Flaschenbündel zu füllen. Somit ist der maximale Speicherdruck 30 bar, was einer Wasserstoffmenge von rund 36 Nm<sup>3</sup> und damit 1,5 Volllast-Tagen des Elektrolyseurs bzw. der Brennstoffzelle entspricht. Dies ist für die Versuchsreihen mit diesem System ausreichend. Grund für den Verzicht auf einen Kompressor waren geringere Investitionskosten und die Vermeidung von Problemen wie Ausfallzeiten oder Verunreinigung des Wasserstoffs, wie sie in anderen Projekten aufgetreten sind [6].

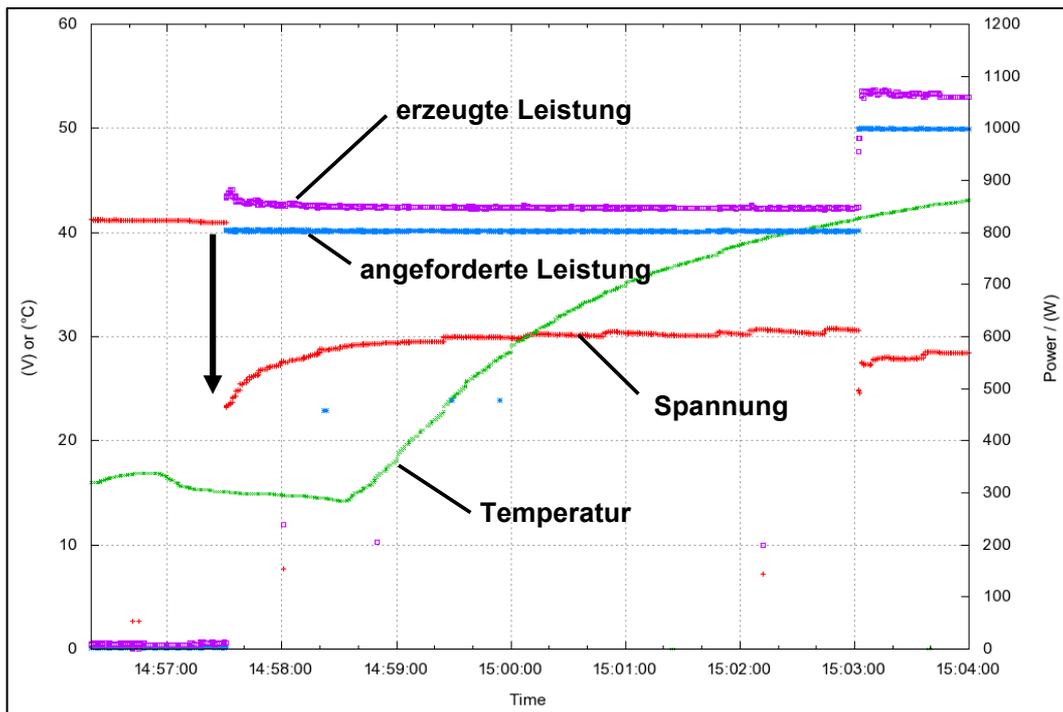
Eine entscheidende Fähigkeit, die ein Wind-Wasserstoff-System besitzen muss, ist es, unmittelbar Änderungen der Eingangsleistung, die in Wasserstoff umgewandelt werden soll, bzw. der geforderten Ausgangsleistung, die von der Brennstoffzelle bereitzustellen ist, zu folgen. Dementsprechend wurden Brennstoffzelle und Elektrolyseur bezüglich dieser Anforderung getestet.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Antwortverhalten der Brennstoffzelle bei einem plötzlichen starken Anstieg der Leistung, die von der elektronischen Last angefordert wird, wenn sich der Stack etwa auf Umgebungstemperatur befindet. Die wichtige Beobachtung ist, dass die Spannung auf rund 23 V einbricht. Bei 21 V hätte die Steuerung der Brennstoffzelle einen Lastabwurf veranlasst. Es dauert mehr als zwei Minuten, bis die Spannung wieder ein tolerierbares Niveau über 30 V erreicht.

Solche Spannungseinbrüche können sich negativ auf die Lebensdauer der Zellmembranen auswirken. Da plötzliche Lastsprünge beim Betrieb eines Wind-Wasserstoff-Systems häufig zu erwarten sind, ist das Verhalten der Brennstoffzelle kritisch.



**Abbildung 2:** Alkalischer Elektrolyseur mit max. 1 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoffproduktion (links), PEM-Brennstoffzelle mit 1,2 kW elektrischer Nennleistung (oben rechts) und elektronische Last (unten rechts).



**Abbildung 3:** Sprungantwort der Brennstoffzelle. Um etwa 14:57:30 Uhr steigt die angeforderte Leistung plötzlich von 0 auf 800 W und die Brennstoffzelle reagiert entsprechend mit erzeugter Leistung. Die Spannung sinkt jedoch stark ab (durch den Pfeil verdeutlicht). Ursache für den Spannungseinbruch ist die Veränderung des Arbeitspunkts im Blick auf Brennstoffzufuhr, Feuchte der Membran und Temperatur.

Die Brennstoffzelle folgt der Leistungsanforderung mit einer Verzögerung von etwa 3 Sekunden (in Abbildung 3 nicht erkennbar). Auch der Elektrolyseur „hinkt“ schnellen Lastwechseln hinterher:

Wenn die Steuerung plötzlich eine deutlich höhere Produktionsrate vorgibt, dauert es einige Sekunden, bis die Eingangsleistung tatsächlich ansteigt.

Ein weiterer wichtiger Parameter für ein System zur Energiespeicherung ist seine Effizienz. Typische Wirkungsgrade für alkalische Druckelektrolyseure liegen heute bei etwa 67% (bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff) und für PEM-Brennstoffzellen bei etwa 45% (elektrischer Wirkungsgrad). Ohne Berücksichtigung von Nebenaggregaten folgt ein Wirkungsgrad von etwa 30% für die Schleife Elektrizität-zu-Wasserstoff-zu-Elektrizität. In Zukunft scheinen mehr als 40% erreichbar. Das aktuelle Forschungssystem zeigt einen Gesamtwirkungsgrad von etwa nur 20% (alle Nebenaggregate einbezogen). Die Optimierung der Effizienz ist kein Schwerpunkt der jetzigen F&E-Phase.

### **3. Untersuchung großer Systeme**

Um die Leistungsfähigkeit großer Systeme zu beurteilen, wurden mehrere von Fallstudien durchgeführt. Dazu gehören:

- Bereitstellung von „grüner“ Ausgleichsenergie,
- Teilnahme am Spotmarkt für elektrischen Strom,
- Kappung von Spitzen auf der Erzeugungs- und/oder auf der Lastseite, und
- Bereitstellung von Leistung gemäß einem selbstdefinierten Fahrplan.

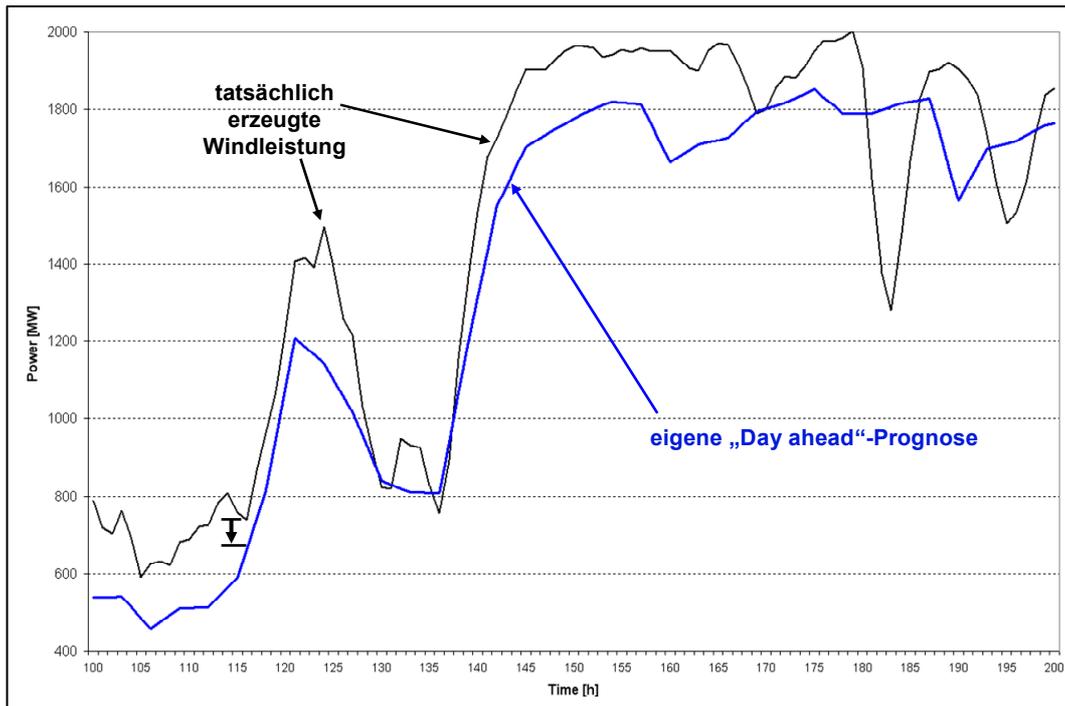
Die letzte Option wird im Folgenden diskutiert.

Derzeit wird grüner Strom zahlreichen Ländern Europas mit einem festen Satz pro Kilowattstunde über einen Zeitraum von, zum Beispiel, 20 Jahren ab Inbetriebnahme der Anlage vergütet. Ein erster Schritt hin zu einem mehr marktorientierten Ansatz kann in einer (teilweisen) Kopplung der Vergütung an die Strompreise auf dem Spotmarkt bestehen.

Alternativ dazu könnte das Einhalten einer Prognose honoriert werden, die 24 bis 48 Stunden im Voraus erstellt wird. Ein solcher Ansatz wird derzeit in Spanien auf freiwilliger Basis erprobt: Die tatsächliche Bereitstellung von Windleistung wird gegen eine „Day ahead“-Vorhersage bewertet, die vom Betreiber selbst abgegeben wurde.

Das für HyWindBalance verwendete Prognosewerkzeug ist ein sogenanntes physikalisches System, das auf der meteorologischen Beschreibung der Atmosphäre beruht [2]. Mit Hilfe dieses Modells wird die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe berechnet und in die Leistungskennlinien der Windenergieanlagen eingesetzt. Das System kann Vorhersagen für einzelne Windparks oder für alle Parks einer ganzen Region bis zu fünf Tage im Voraus liefern.

Abbildung 4 vergleicht eine „Day ahead“-Prognose für alle Windparks im Nordwesten Deutschlands (2.300 MW installierte Leistung) mit der stündlich tatsächlich erzeugten Windleistung über einen Zeitraum von 100 Stunden im Jahr 2005. Dabei ist zu beachten, dass die hier gezeigte Prognose gegenüber dem, was damals vorhergesagt wurde, systematisch abgesenkt wurde: Von den Stundenwerten wurde jeweils ein Betrag von 57,5 MW abgezogen, was 2,5% der installierten Windleistung entspricht. Dieser „Vorwegabzug“ steht für die Energie, die zur Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse benötigt wird. Das Ausmaß dieses Abzugs wird durch den Pfeil bei Stunde 115 deutlich gemacht. Er zeigt, dass die ursprünglich Prognose (ohne Abzug) und die tatsächliche Erzeugung zu diesem Zeitpunkt gut übereingestimmt hätten.



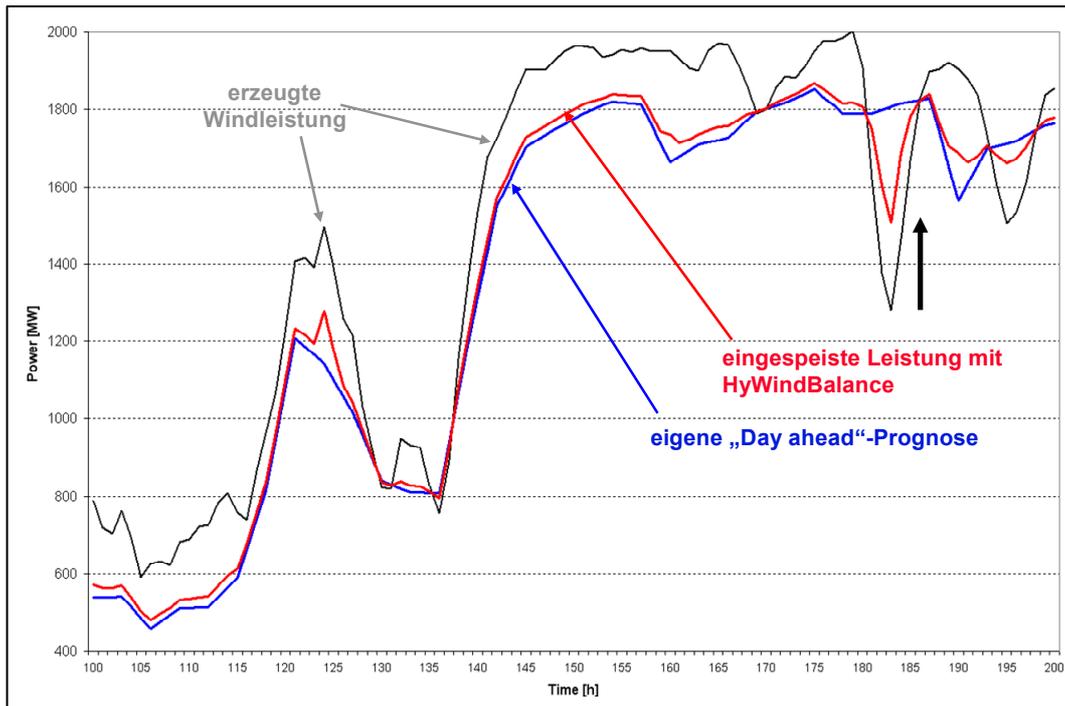
**Abbildung 4:** Vergleich zwischen einer (eigenen) „Day ahead“-Vorhersage der Windleistung und der tatsächlichen Erzeugung über 100 Stunden im Jahr 2005 für alle Windparks im Nordwesten Deutschlands. Die hier gezeigte Prognose wurde gegenüber der Original-Zeitreihe um konstante 57,5 MW abgesenkt, um Energie zur Produktion von Wasserstoff zur Verfügung zu haben.

Der Verlauf beider Kurven in Abbildung 4 ist zunächst ähnlich, wobei die Leistungswerte zu den meisten Zeitpunkten aber nicht übereinstimmen. (Dies wäre nicht auch der Fall, wenn die Prognose nicht abgesenkt worden wäre.) Ab etwa Stunde 180 unterscheiden sich die Zeitreihen jedoch deutlich. Der Grund dafür ist, dass die Windgeschwindigkeit so stark anstieg, dass viele Windenergieanlagen aus Sicherheitsgründen abschalten mussten und die Erzeugung entsprechend einbrach. Dies wurde von der Prognose so nicht vorausgesehen.

Abbildung 5 zeigt das gleiche Zeitfenster mit einer weiteren Kurve. Das Gesamtsystem „Windparks plus HyWindBalance“ hält die Prognose deutlich besser ein als die Windparks allein. Die HyWindBalance-Anlage umfasst dabei 230 MW Elektrolyse sowie Brennstoffzellen mit der gleichen elektrischen Nennleistung. Die Anlage kann also 10% der installierten Windleistung aufnehmen bzw. abgeben. Wenn die erzeugte Windleistung über der Prognose liegt, wird Wasserstoff erzeugt. Wenn die Windleistung die Prognose nicht erreicht, dann wird Wasserstoff rückverstromt.

Abbildung 5 macht deutlich, dass die „eingespeiste Leistung mit HyWindBalance“ die Prognose gut trifft, solange der Unterschied zwischen Windleistung und Prognose kleiner als 230 MW bleibt. Bei größeren Abweichungen erreicht das System natürlich seine Grenzen, zum Beispiel um die Stunde 183. Der starke Leistungseinbruch in diesem Zeitbereich wird um 230 MW verringert (siehe den Pfeil in Abbildung 5). Um ihn komplett auszugleichen, wäre ein doppelt so großes Brennstoffzellen-System nötig.

Eine Verdopplung der Brennstoffzellen-Leistung ist jedoch nicht vorteilhaft, wie die folgende Analyse für einen größeren Zeitraum zeigt.



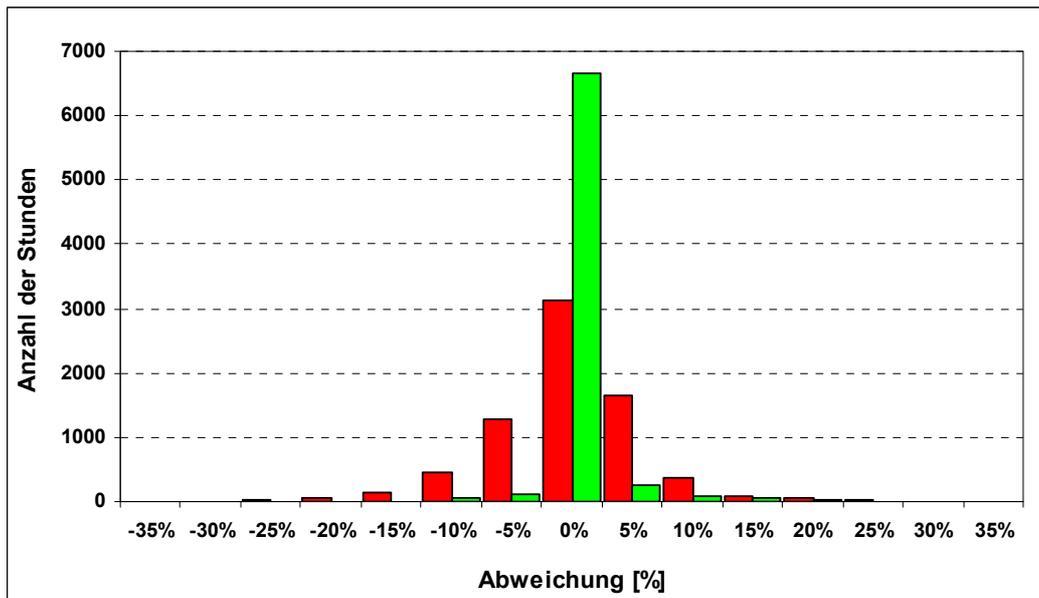
**Abbildung 5:** Mit dem HyWindBalance-System liegt die eingespeiste Leistung deutlich näher an der Prognose. Wegen der begrenzten Größe der Systemkomponenten können extreme Unterschiede zwischen der erzeugten Windleistung und der Vorhersage jedoch nicht vollständig ausgeglichen werden (siehe z.B. um die Stunde 183).

In Abbildung 6 ist die Verteilung der relativen Abweichungen von der “Day ahead“-Prognose für den Nordwesten Deutschlands im Zeitraum Januar bis Oktober 2005 dargestellt. Dabei stehen die roten Balken für Abweichungen der tatsächlichen Windleistung von der Original-Prognose (ohne 57,5 MW Abzug). Die grünen Balken zeigen die Abweichungen der eingespeisten Leistung von der eigenen Prognose (mit Abzug) unter Einsatz eines „HyWindBalance-Systems“.

Ohne Energiespeicherung mittels Wasserstoff stimmen Prognose und tatsächliche Erzeugung in 43% aller 7.296 Stunden überein. Abweichungen bis zu  $\pm 35\%$  der installierten Leistung treten auf. Mit HyWindBalance wird eine Übereinstimmung zu mehr als 91% der Stunden erreicht. Die Abweichungen liegen dann im Bereich zwischen  $-25\%$  und  $+30\%$  der installierten Leistung.

Negative Abweichungen von der Prognose sind die wesentliche Herausforderung, da sie nicht durch Abregeln von Windenergieanlagen vermieden werden können, wie es bei positiven Abweichungen möglich, wenn auch nicht wünschenswert ist. Ohne Wasserstoff-Energiespeicherung, wird die Prognose während 1.978 Stunden nicht erreicht (etwa 27% aller Stunden). Mit HyWindBalance kann die Anzahl dieser Stunden auf etwa 200 Stunden reduziert werden, also um rund einen Faktor 10.

Bei einer Verdoppelung der Größe des Brennstoffzellensystems auf 460 MW kann die Anzahl der Stunden mit negativer Abweichung erneut um einen Faktor 10 auf nur noch 20 Stunden gesenkt werden. Es erscheint aber nicht sinnvoll, 230 MW zusätzlich zu installieren, die dann nur rund 200 Stunden im Jahr genutzt werden.



**Abbildung 6:** Verteilung der relativen Abweichungen der tatsächlich erzeugten bzw. eingespeisten Leistung von der „Day ahead“-Vorhersage ohne (rote Balken) und mit (grüne Balken) einem HyWindBalance-System über einen Zeitraum von 7.296 Stunden (Januar – Oktober 2005). Im Fall „ohne HyWind-Balance“ werden die Abweichungen von der Original-Prognose (d.h. ohne 57,5 MW-Abzug) bestimmt.

#### 4. Wirtschaftliche Überlegungen

Die Arbeiten an den wirtschaftlichen Berechnungen sind noch nicht abgeschlossen. Es ist allerdings wichtig, die Bedeutung des Wasserstoff-Speichers in dieser Hinsicht hier zu erwähnen. Tabelle 1 macht deutlich, dass die Kosten für diese Komponente als Teil eines Wind-Wasserstoff-Systems einen erheblichen Anteil der Investition ausmachen, wenn der Speicher den Betrieb der Brennstoffzellen über mehrere Tage sicherstellen soll<sup>1</sup>. Vorteile, die sich aus einem größeren Speicher mit Blick auf die Einnahmen ergeben (Vergütung bereitgestellter Leitung etc.) müssen also sorgfältig gegen den Nachteil der höheren Investition abgewogen werden.

Die angemessene Speichergröße hängt ab von der wesentlichen Aufgabe, die das Wind-Wasserstoff-System erfüllen soll (z.B. Bereitstellung von Regelenergie, Einhalten eines selbstdefinierten Fahrplans, etc.). Für die Simulationen, die im vorangehenden Abschnitt diskutiert werden, wurde der Einfachheit halber zunächst ein unendlich großer Speicher angenommen, um den technischen Bedarf (in Gestalt der maximalen Füllmenge) zu ermitteln. Im nächsten Schritt ist die Speichergröße zu optimieren, indem das Modell um „wirtschaftliche“ Routinen ergänzt wird.

#### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Betrieb der Forschungsanlage hat gezeigt, dass die wesentlichen Komponenten Verbesserungspotentiale besitzen, insbesondere im Blick auf ihr Antwortverhalten bei schnellen, starken Lastwechseln und in Bezug auf ihre Effizienz. Die Wechselwirkungen zwischen Anforderungen im „harten“ Alltagsbetrieb einerseits und ihren Auswirkungen auf die Lebensdauer einzelner Komponenten andererseits müssen weiter untersucht und optimiert werden.

<sup>1</sup> Man kann annehmen, dass die Investitionskosten der einzelnen Komponenten eines Wind-Wasserstoff-Systems mehr oder weniger linear mit ihrer Größe (Leistung) ansteigen, so dass sich für große Anlagen ähnliche Kostenanteile wie in Tabelle 1 ergeben.

**Tabelle 1:** Aufschlüsselung der Investitionskosten für ein Wind-Wasserstoff-System mit einem Elektrolyseur zur Produktion von 55 Nm<sup>3</sup>/h und einer Brennstoffzelle mit 200 kW elektrischer Nennleistung. Die Kapazität des Speichers ist in Volllasttagen der Brennstoffzelle ausgedrückt.

	Anteil an der Gesamt-Investition			
	Elektrolyseur	Brennstoffzelle	Speicher	Andere
System mit Speicher für 2 Tage	21%	39%	18%	22%
System mit Speicher für 5 Tage	16%	31%	35%	18%

Im Vergleich zum Forschungssystem muss mittel- bis langfristig eine Verdoppelung des Wirkungsgrades der Schleife Elektrizität-zu-Wasserstoff-zu-Elektrizität erreicht werden.

Aus den Simulationen großer Systeme folgt, dass die Fehler von Windleistungsprognosen mit einem System wie HyWindBalance erheblich korrigiert werden können. Neben den technischen Grenzen sind dabei insbesondere wirtschaftliche Randbedingungen zu beachten.

Die Wandlung und Speicherung von Energie ist immer teurer als ihre direkte Nutzung. Trotzdem kann die Gewährleistung der Netzstabilität Energiespeicher notwendig machen. Wenn Speicher eingesetzt werden müssen, dann sind zunächst die Vor- und Nachteile der verfügbaren Speichertechnologien gegeneinander abzuwägen in Bezug auf Leistungsfähigkeit, Kosten, Effizienz, Umsetzbarkeit unter den örtlichen Bedingungen usw.

Im Licht der Diskussion um die Folgen der Klimaveränderung sollten Energiespeicher nicht nur in Bezug auf die gegenwärtigen Energiekosten bewertet werden. Ihre Umweltverträglichkeit spielt eine ebenso große Rolle. Wasserstoff als Energiespeicher ist eine wichtige Option, um mit den Schwankungen der Windleistung effizient und ökologisch vorteilhaft umzugehen. Weitere Arbeiten werden zeigen, unter welchen Bedingungen Wind-Wasserstoff-Systeme wirtschaftlich zu betreiben sind.

## 6. Danksagungen

Die hier vorgestellten Aktivitäten wurden mit Mitteln des Niedersächsischen Umweltministeriums, aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung sowie von der EWE AG unterstützt.

## 7. Referenzen

- [1] H.G. Beyer, J. Luther, R. Steinberger-Willms: Fluctuations in the combined power output from geographically distributed grid coupled wind Energy conversion systems - An analysis in the frequency domain. Wind Engineering, 14 (1990), 179-192.
- [2] M. Lange, U. Focken: Physical approach to short-term wind power prediction. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2005, ISBN 3-540-25662-8.
- [3] W. Leonhard, K. Müller: Ausgleich von Windenergieschwankungen mit fossil befeuerten Kraftwerken – wo sind die Grenzen? EW 101(2002), 30-37.
- [4] [www.hywindbalance.de](http://www.hywindbalance.de)
- [5] [www.ppre.de](http://www.ppre.de)
- [6] K. Stolzenburg, V. Tsatsami, H. Grubel: Lessons learned from infrastructure operation in the CUTE project, Int. Journal of Hydrogen Energy (2008), in Druck.