

## Schlussbericht zu Nr. 3.2

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruhr-Universität Bochum Fakultät für Maschinenbau Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE), (Prof. Wagner)	<b>Förderkennzeichen:</b> 03SF0312F
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Dezentrale regenerative Energieversorgung: Innovative Modellierung und Optimierung: Zeitliche Entkopplung zwischen Angebot an erneuerbaren Energien und Nachfrage	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2005 bis 30.09.2008	

### 1. Kurze Darstellung zu

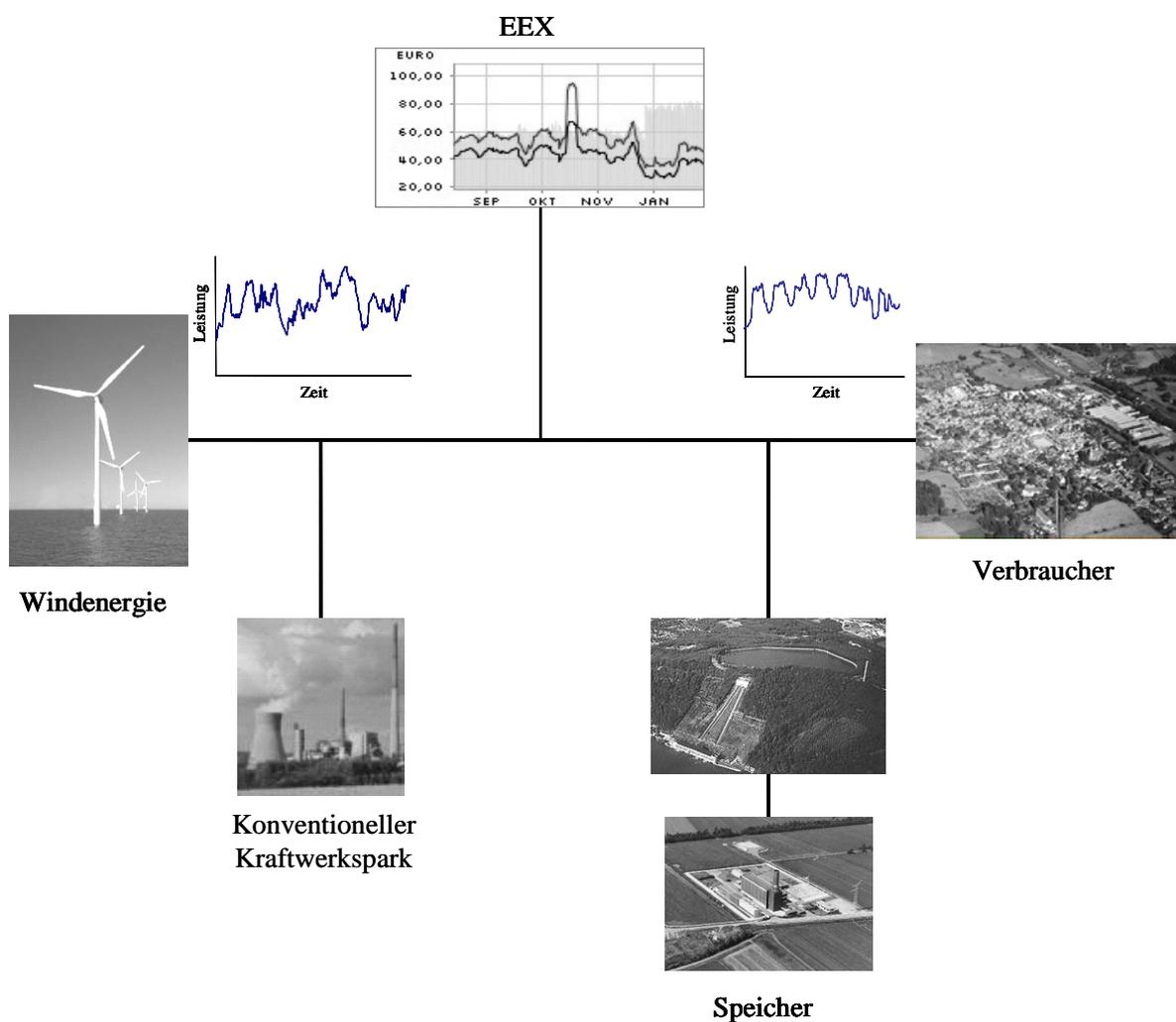
- a. **Aufgabenstellung,**
- b. **Vorraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde,**
- c. **Planung und Ablauf des Vorhabens,**
- d. **Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde,**
- e. **Zusammenarbeit mit anderen Stellen.**

Gesamtziel des Vorhabens war die Vertiefung des Verständnisses energiewissenschaftlicher sowie mathematischer Grundlagen und darauf aufbauend die Entwicklung systemanalytischer Lösungen mit neuen mathematischen Ansätzen, welche zur Erweiterung der Einsatz- und Nutzungsmöglichkeiten erneuerbarer Energien beitragen. Dazu wurde ein Verbund aus energiewissenschaftlichen und mathematischen Arbeitsgruppen gebildet. Die Arbeitsgruppe unter der Leitung des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft (nachfolgend als „AG Wagner“ bezeichnet) war dabei fachlich unter dem „Teilbereich C: Zeitliche Entkopplung zwischen Angebot an Erneuerbaren Energien und Nachfrage“, eingebunden. Aufgabe hier war die Untersuchung von Speichertechnologien zur Verbesserung der Integration von Windenergie in Stromversorgungssysteme.

Der Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) der Ruhr-Universität Bochum verfügt über Fachkompetenz auf dem Gebiet der Energiewirtschaft und der Technikbewertung. Insbesondere ist die Windenergie eines der zentralen Themenfelder der bisherigen Forschung. Verschiedene Speichersysteme inklusive der Wasserstoffspeicherung in der Energiewirtschaft wurden ebenfalls in mehreren Studien behandelt. Des Weiteren wurden

anhand eines Simulationsmodells zentrale und dezentrale Energiesysteme untersucht. Auf diese Erfahrungen konnten im Verlauf der Forschungsarbeiten, besonders bei der Modellierung der Energiesysteme, zurückgegriffen werden.

Innerhalb der AG Wagner wurden zunächst einzelne Systemkomponenten (Kraftwerke, Speicher etc.) und deren technische Randbedingungen recherchiert und definiert. Hinzu kommt die Zusammentragung von zeitabhängigen Parametern wie Nachfrageganglinien, Einspeiseganglinien von Windenergie sowie EEX-Preisverläufen. Parallel dazu wurde ein Energieversorgungssystem (s.Abb.1) in der Optimierungsumgebung GAMS erstellt, im ersten Schritt ist dieses deterministisch und linear ausgeführt.



**Abb.1: Schema des fundamentalen Modells**

Ausgehend von diesem Modell sind Kooperationen mit mathematischen Lehrstühlen eingegangen worden, welche zum einen schwerpunktmäßig die *stochastische Modellierung* und zum anderen die *nichtlineare Modellierung* untersuchen. Weiterhin ist ein zweites, vom Aufbau her dem ersten verwandtes Modell erstellt worden, welches die rein *regenerative*

*Versorgung mit Windenergie und Biomasse* untersucht und dabei den Fokus auf die Zwischenspeicherung von Biogas sowie dessen Verstromung legt. Mit Hilfe der mathematisch verbesserten Optimierungsmodelle wurden verschiedene Versorgungsszenarien untersucht, um einzelne Aspekte der Speichernutzung (Kosten, Speicherbedarf, Kraftwerksfahrpläne, Biomasseeinsatz) gezielt herausarbeiten zu können. Zielfunktion war dabei die Minimierung der Kosten.

Darüber hinaus wurden am LEE auch simulationsbasierte Szenarien mit hoher zeitlicher und technischer Auflösung gefahren, um spezifische Einflüsse insbesondere der Hochleistungsspeicher mit geringem Energiespeichervermögen besser abbilden und analysieren zu können.

Im Verlauf der Arbeiten sind sowohl neue ingenieurwissenschaftlich-technische Aspekte implementiert worden, als auch die zur Verfügung stehenden Lösungsalgorithmen problem-spezifisch wesentlich erweitert und verbessert worden. Dazu fand ein regelmäßiger fachlicher Austausch mit den Arbeitsgruppen an

- der Universität Duisburg-Essen, EWL (Prof. Weber),
- der Humboldt Universität Berlin, Institut für Mathematik (Prof. Römisch),
- der Technischen Universität Darmstadt, FB Mathematik (Prof. Martin),  
und
- dem Fraunhofer IUSE (UMSICHT, Oberhausen)

statt.

## **2. Eingehende Darstellung**

- a. des erzielten Ergebnisses,**
- b. des voraussichtlichen Nutzens insb. Verwertbarkeit nach Verwertungsplan**
- c. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet an anderen Stellen**
- d. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6**

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Projektarbeiten zusammengefasst. Momentan befindet sich eine Buchveröffentlichung im Verlagssatz, welche die einzelnen Projektthemen und deren Ergebnisse detailliert beschreibt. Auf die entsprechenden Kapitel wird jeweils im folgenden Text verwiesen.

### *Stochastische Modellierung*

Bezüglich der stochastischen Modellierung wurde in mehreren Etappen verfahren. Zunächst wurde eine Operationsberechnung über ein Jahr in stündlicher Auflösung durchgeführt. In dieser Berechnung wurden nur die Betriebskosten für Kraftwerke und Speicher berücksichtigt. Wesentliche Ergebnisse sind neben dem Zielfunktionswert die Fahrweisen der Speicher und Kraftwerke (Beispiele s. Abb. 2 und Abb.3).

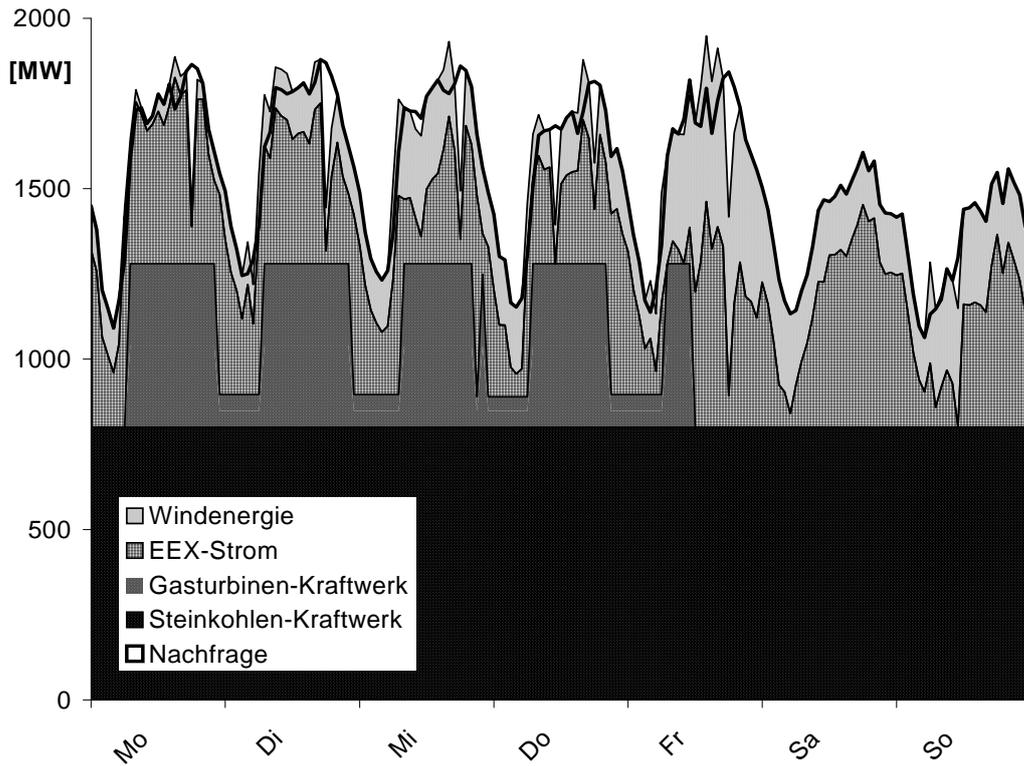


Abb. 2: Einsatzplan der Kraftwerke und Speicher einer beliebig gewählten Woche

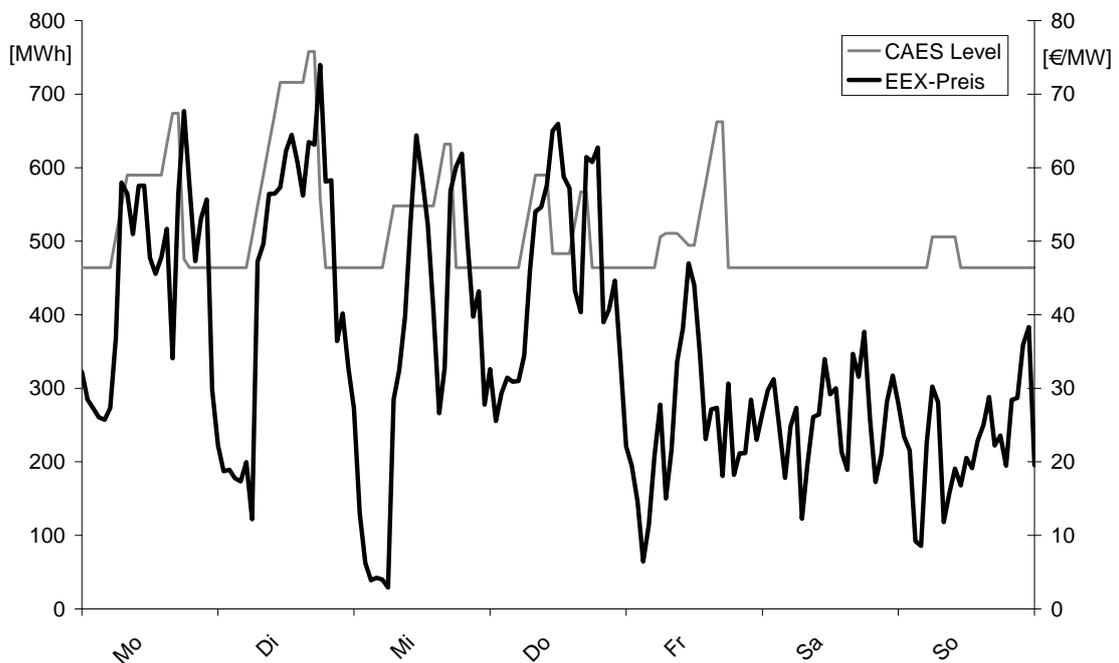
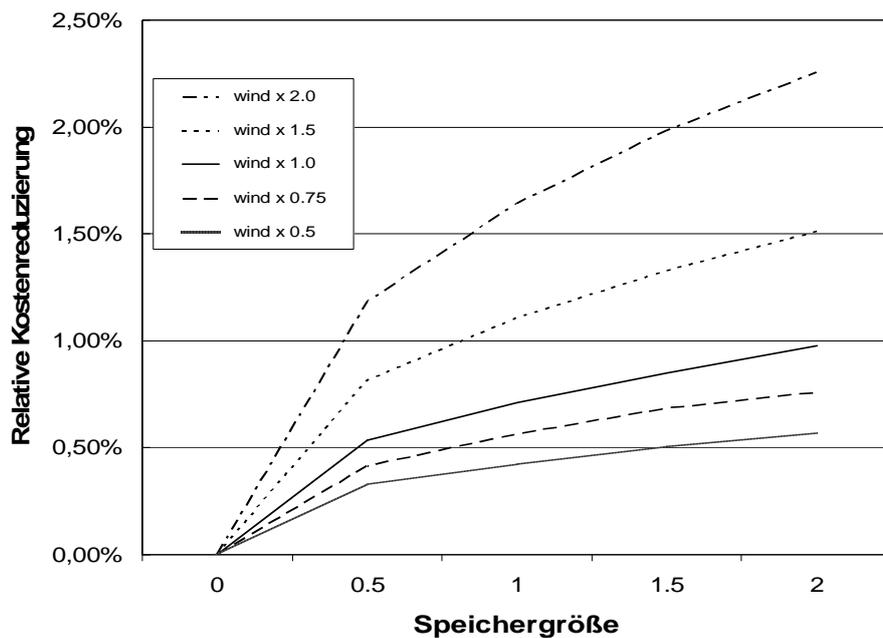


Abb. 3: Speicherfüllstand des Druckluftspeichers (CAES) in Zusammenhang mit den EEX-Preisen

Die Auswertung der Rechnungen mit einem Betrachtungszeitraum von mehreren Wochen zeigen, dass sich der optimale Einsatz der Speicher an den Marktpreisen orientiert und nicht primär den Teillastbetrieb konventioneller Kraftwerke vermeidet. Hierbei begünstigt ein steigender Windenergieanteil die relative Kostenreduktion der Stromerzeugung. Weiterhin

zeigt ein Vergleich der Zielfunktionswerte der deterministischen und der stochastischen Variante des Modells, dass durch die vollständige Information im deterministischen Modell die Zielfunktionswerte (Kosten) unterschätzt werden. Folglich ist eine stochastische Modellierung für eine realitätsnahe Betrachtungsweise besser geeignet.

Über eine Gitterstruktur, die verschiedene Speichergrößen und Windenergiemengen koppelt, wurde ermittelt, ob eine optimale Speichergröße in Bezug auf die eingespeiste Windenergie existiert. Aus Abb. 4 ist erkennbar, dass auch bei steigendem Windenergieanteil bei der Stromversorgung die Kostenreduzierung bei zunehmender Speichergröße konvergiert.

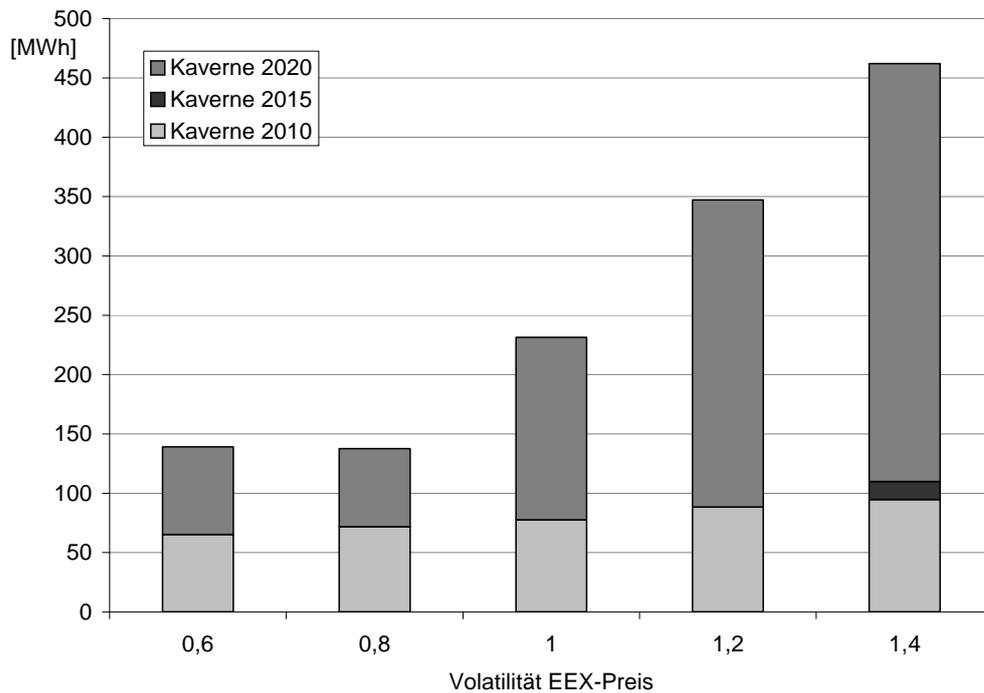


**Abb. 4: Reduzierung der minimal erwarteten Kosten basierend auf der installierten Speicherkapazität für verschiedene installierte Windenergiekapazitäten**

In einem weiteren Schritt wurden die Speichertechnologien als Investitionsmöglichkeiten für Energiesysteme der Zukunft unter Einbezug des Stromhandels *analysiert*. Die zeitlichen Restriktionen bleiben weitgehend bestehen. Als erster Zeithorizont sind die Jahre 2010 bis 2020 untersucht worden, wobei jedes fünfte Jahr als Stützjahr definiert ist, in welchem neue Informationen in das Modell einfließen. Jedes Stützjahr wiederum wird durch vier typische Monate repräsentiert. Für dieses Ausbaumodell mussten zunächst die beiden Zeitreihen (Wind, EEX) passend zu den einzelnen Stützjahren simuliert werden, woraus dann die einzelnen Szenariobäume erstellt wurden. Anschließend wurden alle weiteren Parameter, wie z.B. Änderung der Brennstoffpreise und der Stromnachfrage auf die Stützjahre angepasst.

Es zeigt sich, dass ein steigender Windenergieanteil für die Investition in Speicher von Vorteil ist, jedoch Variationen hinsichtlich der Volatilität der Strompreise den größeren Einfluss ausüben. Dazu wurde die Schwankung der Preise um den Jahresmittelwert um Faktoren zwischen 0.6 bis 1.4 gegenüber den Schwankungen bei den ursprünglichen Preissimulationen

variiert und jeweils der optimale Zubau und Betrieb berechnet. Die Resultate sind in Abb. 5 dargestellt.



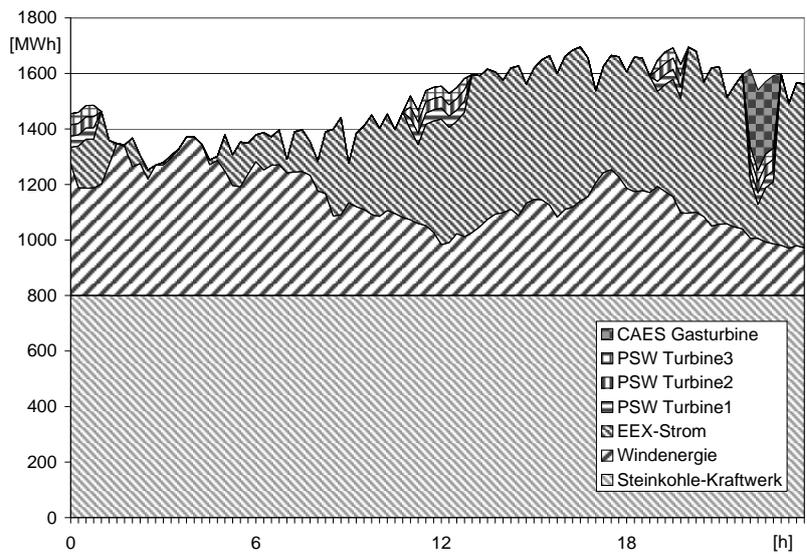
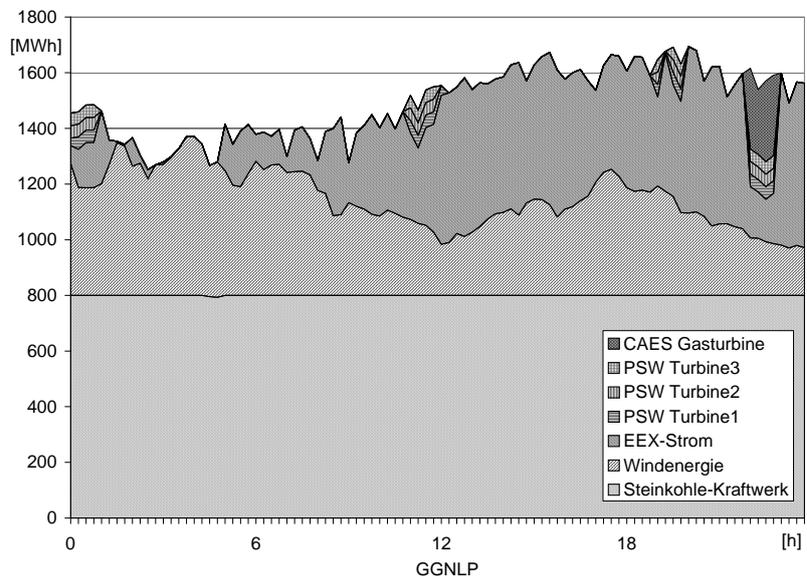
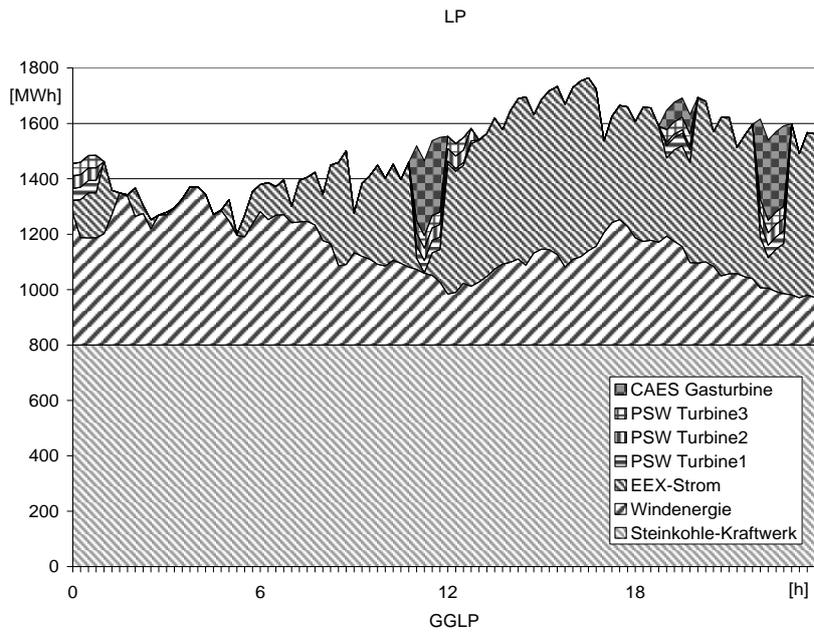
**Abb. 5 : Abhängigkeit des Speicherzubaues von der Volatilität der EEX-Preise**

Das beschriebene Modell stellt mit seinen Variationen eine gute Grundlage für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Speichertechnologien dar. Da dieses Modell sehr fundamental aufgebaut ist, konnten wesentliche Zusammenhänge sowie sensitive Größen ermittelt werden. [Buch Kapitel 7]

### *Nichtlineare Modellierung*

Bei der Beschreibung der Betriebsparameter von Kraftwerken und Speichern treten nichtlineare Zusammenhänge auf, wie z.B. bei der Leistungskennlinie eines Kraftwerks, bei der der Wirkungsgrad von der aktuellen Leistung abhängt. Die Anzahl der Nichtlinearitäten in derartigen Systemmodellen steigt in der Regel mit der Höhe der zeitlichen Auflösung. Bei dem hier entwickelten Modell handelt es sich um ein gemischt ganzzahliges nichtlineares Problem in fünfzehnminütiger Auflösung, dessen Nichtlinearitäten anhand einer geeigneten Linearisierungsmethode approximiert wurden. Zu dessen Lösung wurde ein angepasstes „Branch-and-Cut“-Verfahren verwendet, indem unter anderem eine primale Heuristik auf Basis eines Rolling-Horizon-Ansatzes integriert wurde. Durch die Integration dieser Heuristik in den „Branch-and-Cut“-Löser wurde die Betrachtung größerer Planungszeiträume ermöglicht und damit die Voraussetzung für aussagekräftige Berechnungen geschaffen. Dennoch sind weiterhin zwei Probleme zu lösen: die Erweiterung von 96 Zeitschritten (entspricht 1 Tag) auf 672 Zeitschritte (entspricht einer Woche) zielt in die richtige Richtung. Dennoch sollte eine Betrachtung großer Speichersysteme (wie Druckluftspeicher CAES,

Pumpspeicher PSW) zumindest ein Jahr umfassen, welches bei der Verwendung von Typzeiträumen wenigstens über einen Zeitraum von zwölf Wochen berechnet werden sollte. Eine Optimierung über die daraus folgenden 8.064 Zeitschritte ist aber aufgrund der langen Berechnungszeiträume bisher nicht praktisch umsetzbar. Weiterhin wurde das Modell mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden erstellt, d.h. dass schrittweise zunächst ein komplett lineares Modell, ein gemischt ganzzahliges Modell (Ganzzahligkeiten nur in Form von Binärvariablen) und ein gemischt ganzzahliges nichtlineares Modell erstellt und diese miteinander verglichen wurden. Die Ergebnisse dieses Vergleichs (s. Abb. 6) zeigen, dass keine Über- oder Unterschätzung des Zielfunktionswertes wie beim Vergleich stochastisches/deterministisches Modell festgestellt werden kann. Somit kann an dieser Stelle keine eindeutige Aussage getroffen werden, ob die Berücksichtigung der Nichtlinearitäten einen Mehrwert gegenüber einer linearen Modellierung aufweist. Die Speicherfahrweise differiert zwar auf Grund binärer Restriktionen je nach Detaillierungsgrad der Modellierung, jedoch weisen, wie gesagt, die Zielfunktionswerte keine wesentlichen Unterschiede auf. Folglich ergibt sich für die nichtlineare Optimierung für ein derartiges Systemmodell kaum Anwendung, interessant wird es erst für eine detaillierte Speichereinsatzplanung und für stärker marktbasierter bzw. zeitabhängiger Modelle. [Buch Kapitel 8]



**Abb. 6: Einsatzplan der Kraftwerke und Speicher einer beliebig gewählten Woche in den einzelnen Detaillierungsgraden**

### *Regeneratives Modell mit Windenergie und Biomasse*

Um eine Biogasspeicheranlage optimal zu bewirtschaften, muss diese vorausschauend bezüglich des zeitabhängigen ökonomischen Wertes der Stromeinspeisung gefahren werden. Dieser Wert kann sich, wie im vorliegenden Beitrag untersucht, beispielsweise aus dem Spotmarktpreis oder dem Windangebot ergeben. Um die Unsicherheit dieser zeitlich variablen Werte in der Betriebsplanung zu berücksichtigen, ist der Einsatz stochastischer Optimierungsverfahren empfehlenswert. Zur realitätsnahen Betrachtung ist das bereits verwandte Modell modifiziert worden. Zunächst ist die Nachfrageregion wesentlich verkleinert worden. Weiterhin sind keine konventionellen Kraftwerke im System, sondern nur noch eine Biogasanlage mit entsprechendem Fermenterspeicher und ein Biomassekraftwerk auf Holzhack-schnitzelbasis (beides je 5 MW). Es wird zudem davon ausgegangen, dass im System ein Onshore-Windpark mit 20 MW Gesamtleistung (entspricht dem Nachfragemaximum) integriert ist. Der Zugang zur EEX bleibt bestehen.

Da die Lösungsmethodik zur Erstellung geeigneter Szenariobäume bereits durchgeführt ist und sich die Problematik mit diesem Modell nicht wesentlich ändert, wurde zur Erweiterung der methodischen Aspekte eine andere Art der stochastischen Modellierung gewählt. Ein Planungshorizont von zwei Tagen in stündlicher Diskretisierung wurde mit dem 1. Januar beginnend rollierend jeweils einen Tag nach vorne geschoben, bis schließlich jeder Tag des Jahres berechnet worden ist. Zur Berücksichtigung stochastischer Einflüsse, die durch Unkenntnis über die Windenergieeinspeisung sowie die Entwicklung der EEX-Preise entstehen, wurde das Modell als 2-stufiges stochastisches Programm formuliert. Die erste Stufe stellt die deterministische Berechnung des optimalen Anlagenbetriebs am ersten Tag auf Basis der optimierten Zweitstufenentscheidung dar. Die zweite Stufe bestimmt den optimalen Anlagenbetrieb, wobei Szenarien für die Stochastik des Windes und der Preise berücksichtigt werden. Da das Modell zeitkoppelnde Restriktionen beinhaltet, müssen die Endwerte dieser zeitkoppelnden Variablen an das Optimierungsmodell des nächsten Tages übergeben werden. Hierbei handelt es sich um die Endzustände des Biogasspeichers des jeweils ersten berechneten Tages. Somit ist sicher gestellt, dass die Bewertung des Speicherinhalts zum Ende des Planungshorizonts keine Auswirkung auf die Fahrweise des Speichers hat. Im Basisfall wurde von einem BHKW mit 5 MW und einem Gasspeicher mit einer Kapazität von 26,3 MWh<sub>Hu</sub> (zweistündige Speicherbarkeit bezogen auf die Fermenter-Gasleistung) ausgegangen.

Die Ergebnisse der Berechnungen der einzelnen Kombinationen (s Abb.7) zeigt, dass es auch hier eine optimale Gasspeicher-/Motor-Kombination gibt, die in diesem Fall bei einem Fermenterspeicher der sechsfachen Größe zum Referenzfall (entspricht 156 MWh, 12 Stunden sind speicherbar) in Kombination mit einem BHKW der Größe 10 MW liegt. Die Investitionskosten sind hierbei bereits berücksichtigt. [Buch Kapitel 9]

Speichergröße [Fak.]	Motorgroße [MW]				
	5	7,5	10	12,5	15
1	0	-2180	-79115	-241949	-339403
2	16658	90916	43630	-103423	-190051
3	33316	144203	130432	-1697	-77418
4	49975	169256	188130	70492	4795
5	66633	164717	214302	114464	56725
6	83291	151952	216468	128477	77697
7	99949	137776	211342	128902	83286
8	116607	122541	203025	124542	82543

Abb. 7: Gesamtersparnis der einzelnen Kombinationen im Vergleich zum Referenzfall

### *Simulationsmodell*

Die Untersuchungen im Bereich der Hochleistungsspeicher (insbesondere Batterie- und Schwungradspeicher) wurden auf Basis eines Simulationsmodells durchgeführt, da diese insbesondere im Kurzzeitbereich eingesetzt werden. Die notwendige zeitliche Auflösung von deutlich unter 15 Minuten machte eine andere Herangehensweise als bei den Hochenergiespeichern notwendig. Es zeigte sich, dass die untersuchten Hochleistungsspeicher sehr gut zur Netzstützung im Sekunden- und Minutenbereich geeignet sind, was insbesondere bei der schwankenden Einspeisung von Windenergieanlagen relevant ist. Die Wirtschaftlichkeit ist dabei ebenso wie die erreichbare Lebensdauer unerwartet gut, wobei hier allerdings einschränkend hinzugefügt werden muss, dass die zur Verfügung stehende Datenbasis insbesondere im Bereich der Langzeit-Betriebserfahrungen noch sehr gering ist. Eine Sensitivitätsanalyse hat allerdings ergeben, dass die Lebensdauer beim Batteriespeicher innerhalb der erwarteten Bandbreite keinen signifikanten Einfluss auf die Lebenszykluskosten beim Speichereinsatz hat. Die grundsätzliche Eignung von großen Bleibatterien zur Stützung von Inselnetzen ist technisch durch die Anlage im ehemaligen Westberlin belegt. Somit kann trotz der fehlenden Langzeiterfahrung davon ausgegangen werden, dass ein wirtschaftlicher Betrieb im Kurzzeitbereich (zum Beispiel zur Primärregelung) möglich sein könnte. [Buch Kapitel 6]

### *Interdisziplinäre Kooperation*

Weiterhin hat der intensive Austausch unter den einzelnen wissenschaftlichen Fachrichtungen zu einem deutlichen interdisziplinären Erkenntnisgewinn geführt. Auf Seiten der Ingenieure resultiert dies in der Erlangung der Fähigkeit, Optimierungsmodelle nach ökonomischen Marktkriterien zu erstellen, um diese dann schrittweise um technische Restriktionen erweitern zu können. Durch diese Fähigkeit können nun eigene Szenarien erstellt und berechnet werden. Darüber hinaus wurde das grundlegende Verständnis für die Möglichkeiten mathematisch optimierter Lösungsalgorithmen geschaffen, so dass die Modelle bereits in der Entwicklungsphase darauf hin ausgerichtet werden können, um die Rechenzeiten zu minimieren.

### *Direkte Anwendung und zukünftige Verwertung der Ergebnisse*

Aufgrund des eher als Grundlagenforschung ausgelegten Vorhabens ist eine direkte wirtschaftliche Anwendung, wie bereits im Antrag beschrieben, nicht zu erwarten. Allerdings können die neu entwickelten Optimierungsmodelle im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben Anwendung finden. Durch die stattgefundene Optimierung können zukünftig neue Szenarien nicht nur wesentlich realistischer, sondern auch schneller berechnet werden. Darüber hinaus haben sich die beteiligten Arbeitsgruppen zusätzliche, fachübergreifende Kompetenzen angeeignet, so dass komplexere Forschungsvorhaben realisiert werden können.

### *Veröffentlichungen*

Schon während der Projektlaufzeit wurden Ergebnisse des Verbundvorhabens publiziert. Im Folgenden werden alle relevanten Veröffentlichungen aufgelistet, an denen der Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft beteiligt ist.

A. Epe, W. Römisch, S. Vigerske, H.-J. Wagner, C. Weber, O. Woll

#### **Stochastische Optimierung mit rekombinierenden Szenariobäumen - Analyse dezentraler Energieversorgung mit Windenergie und Speichern**

Optimierung in der Energiewirtschaft, VDI-Berichte 2018, S.3-13,  
VDI-Verlag 2007, Düsseldorf,  
ISBN 978-3-18-092018-4

H.-J. Wagner, A. Epe

#### **Energy from Wind – Perspectives and Research Needs**

VGB PowerTech, 9/2008, S. 49-53,  
VGB PowerTech Service GmbH, Essen  
ISSN 1435-3199

A. Epe, C. Küchler, W. Römisch, S. Vigerske, H.-J. Wagner, C. Weber, O. Woll

#### **Stochastic Programming with Recombining Scenario Trees - Optimization of Dispersed Energy Supply**

Optimization in the Energy Industry (J. Kallrath, P. Pardalos eds.),  
Springer-Verlag 2009  
ISBN: 978-3-540-88964-9

I. Erlich, T. Große Böckmann, H.-J. Wagner

#### **Regelleistungsbereitstellung durch Kurzzeitspeicher**

Innovative Modellierung und Optimierung von Energiesystemen (R. Schultz, H.-J. Wagner)  
LIT-Verlag, Münster 2008

A. Epe, M. Lucht, H.-J. Wagner, C. Weber, O. Woll

**Einsatz stochastischer Optimierungsmodelle zur Dimensionierung und zur Planung der Fahrweise lokaler Biogas-Speicher**

Innovative Modellierung und Optimierung von Energiesystemen (R. Schultz, H.-J. Wagner)  
LIT-Verlag, Münster 2008

A. Epe, D. Mahlke, A. Martin, H.-J. Wagner, C. Weber, O. Woll, A. Zelmer

**Betriebsoptimierung zur ökonomischen Bewertung von Speichern unter Berücksichtigung regenerativer Energieeinspeisung**

Innovative Modellierung und Optimierung von Energiesystemen (R. Schultz, H.-J. Wagner)  
LIT-Verlag, Münster 2008

A. Epe, C. Kuchler, W. Römisch, S. Vigerske, H.-J. Wagner, C. Weber, O. Woll

**Ökonomische Bewertung von elektrischen Energiespeichern - Ausbau und Betrieb im Kontext wachsender Windenergieerzeugung**

Innovative Modellierung und Optimierung von Energiesystemen (R. Schultz, H.-J. Wagner)  
LIT-Verlag, Münster 2008

Die Veröffentlichung des bereits oben angesprochenen Buches ist in Vorbereitung, welches Beiträge aller Arbeitsgruppen enthält und die Ergebnisse des Verbundprojektes zusammenfasst. Weiterhin sind auf Basis der während der Projektlaufzeit gewonnenen Erkenntnisse eine Vielzahl von studentischen Arbeiten verfasst worden, welche einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung der Studenten beigetragen haben.

### **3. Erfolgskontrollbericht (Anlage)**

- a. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen**
- b. Das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse, gesammelte wesentliche Erfahrungen**
- c. Fortschreibung des Verwertungsplans mit Angaben zu folgenden Punkten:**
  - 1. Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen**
  - 2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**
  - 3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**
  - 4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur Erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse**
- d. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**
- e. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**
- f. Einhaltung der Zeit- und Ausgabenplanung**

#### *Beitrag zu den förderpolitischen Zielen, erreichte Ergebnisse und Erfahrungen*

Die während der Projektlaufzeit gewonnenen Erkenntnisse können einen deutlichen Beitrag zur Optimierung der zukünftigen Kapazitäts- und Einsatzplanung des Kraftwerksparks liefern. Aufgrund der zunehmenden Einspeisung nicht steuerbarer (fluktuierender) Stromerzeuger auf Basis von Wind- und Solarenergie kommt gerade der Einsatzplanung der regelbaren Erzeuger eine verstärkte Bedeutung zu, da letztere die Schwankungen in der Erzeugung ausgleichen müssen. Bei mangelnder Planung müssen diese Kraftwerke häufig im Teillastbetrieb fahren, was zusätzliche Emissionen verursacht und somit einen Teil der Brennstoffeinsparung der regenerativen Erzeugung wieder kompensiert. Die während des Forschungsvorhabens entwickelten Modelle können mittelfristig helfen, den Teillastbetrieb zu optimieren und somit neben unnötigen Kosten auch Emissionen zu vermeiden.

#### *Fortschreibung des Verwertungsplans*

Es sind mehrere Promotionen in Vorbereitung, welche sich mit aus dem Projekt erwachsenen Fragestellungen beschäftigen. Weiterhin können die gewonnen Erkenntnisse und die entwickelten Modelle in Anschlussprojekte Eingang finden.

### *Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben*

Ein im Bereich des Simulationsmodells zunächst verfolgter Ansatz hatte zum Ziel, das Verhalten der Kraftwerke und Speicher in sehr hoher zeitlicher Auflösung, möglichst minütlich, abzubilden. Hintergrund ist, dass viele technisch bedingte Einflüsse auf die Stromproduktion und Regelfähigkeit erst in dieser hohen Auflösung zum Tragen kommen. Recherchen bei Kraftwerksbetreibern haben aber ergeben, dass das Verhalten von Großanlagen zur Stromerzeugung zum einen sehr individuell und zum andern in vielen Bereichen noch unbekannt ist. So kann zum Beispiel der Einfluss einer ständig wechselnden Leistungsabgabe von großen Wärmekraftwerken auf die Lebensdauer der Anlagenkomponenten nicht qualitativ beschrieben werden, da die Anlagen bisher nicht so gefahren wurden. Deshalb wurde im weiteren Verlauf der Untersuchungen wieder zu einer vereinfachten Abbildung der Kraftwerke zurückgekehrt. Zukünftig sollten hier umfangreiche Daten zum Betriebs- und Lebensdauerverhalten ermittelt werden, um eine realistische Modellierung ermöglichen zu können.

Weiterhin wurden Szenarien untersucht, welche mit Hilfe eines massiven Speichereinsatzes große Teile der Elektrizitätserzeugung von fluktuierenden Erzeugern (insbesondere Windenergie) in ein gewünschtes Lastprofil (z. B. Grundlastband) umformen. Die sich ergebenden hohen Energieverluste und Anlagenkosten haben deutlich gezeigt, dass der hierfür notwendige hohe Anteil an Energie-Zwischenspeicherung mit so hohen Kosten verbunden ist, dass eine Umsetzung dieses Ansatzes zukünftig wenig wahrscheinlich ist.

### *Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer*

Da es sich um Grundlagenforschung handelt, existiert außerhalb der Forschung keine relevante Nutzergruppe, welche Interesse an Schulungen oder Präsentationen haben könnte.

### *Einhaltung der Zeit- und Ausgabenplanung*

Aufgrund eines personalbedingten verspäteten inhaltlichen Beginns der Arbeiten ergab sich eine Verschiebung des Projektendes um einige Monate. Diese Verschiebung wurde in Form einer kostenneutralen Verlängerung frühzeitig beantragt und genehmigt. Somit kann der Zeitplan als eingehalten angesehen werden.

Die Ausgabenplanung wurde ebenfalls eingehalten. Dies wird mit dem Verwendungsnachweis (VNZA) beim Zuwendungsempfänger nachgewiesen.