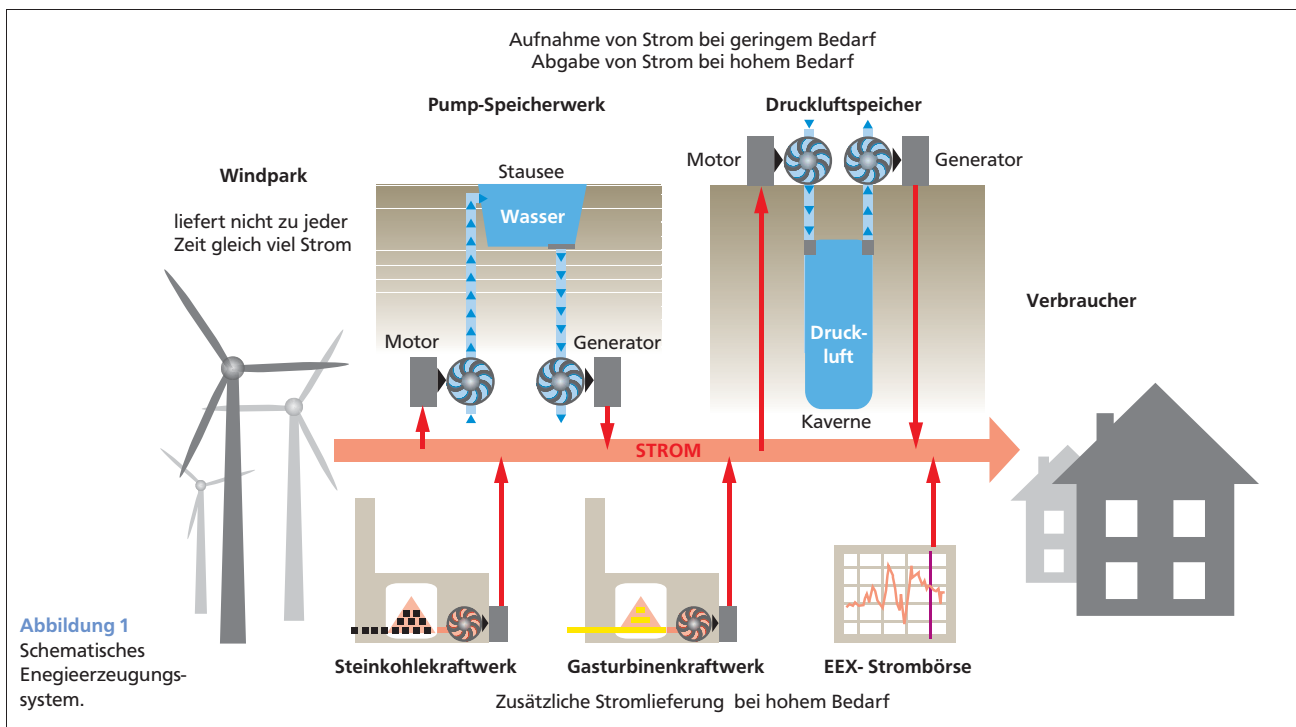


Stabile Systeme – Angebot und Nachfrage in einer Gesamtbetrachtung



Im Hinblick auf eine sichere und nachhaltige Energieversorgung nimmt der Einsatz von regenerativen Energien eine zentrale Position ein. Insbesondere die Windenergienutzung gewinnt in Deutschland immer mehr an Bedeutung und bildet mit einem Anteil von 6,6% am gesamten Bruttostromverbrauch im Jahre 2008 die wichtigste Säule in der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien. Jedoch stellt uns die verstärkte Nutzung von stark fluktuierenden Energiequellen wie Windenergie vor zusätzliche Aufgaben, da in einem von Unsicherheit geprägten Umfeld ein Ausgleich zwischen schwankendem Angebot und Nachfrage zu jeder Zeit sichergestellt sein muss.

► Reliable Systems Supply and Demand from a Comprehensive Perspective

Within the scope of a secure and sustainable energy generation, the power production from renewable energies plays an important role. In Germany, especially the use of wind energy gains in importance and constitutes with 6.6% of the gross electricity consumption in 2008 the backbone of electricity generation from renewable energies. However, the rising use of strongly fluctuating energy sources poses new challenges since in an uncertain environment volatile supply and demand have to be balanced at any time.

Alexander Martin / Debora Mahlke / Andrea Zelmmer • Eine der wesentlichen Anforderungen in einem Stromerzeugungssystem ist die Deckung der Stromnachfrage zu jedem Zeitpunkt. Durch die stark wachsende Stromerzeugung aus fluktuierenden Energiequellen in Deutschland steigt der Bedarf an Regelenergie um einen Ausgleich zwischen sich verändernder Verbraucherlast und schwankender Stromerzeugung sicherzustellen, siehe auch [3,5]. Um auf das Ungleichgewicht reagieren zu können werden zum Einen Regelenergiekraftwerke eingesetzt, die häufig bei vermindertem Wirkungsgrad im Teillastbereich arbeiten, was zu einem erhöhten Primärenergieverbrauch führt. Zum Anderen ist auch der Einsatz von flexibleren Kraftwerken wie beispielsweise Gasturbinenkraftwerken heute etabliert, welche in der Lage sind in wenigen Minuten ihre volle Leistung zu erreichen. Eine weitere Möglichkeit zum Ausgleich der Schwankungen bietet die Einbindung von Energiespeichern um eine Entkopplung von Angebot und Nachfrage zu erwirken und damit eine kostengünstige Stromproduktion zu erzielen. Durch die Zwischen-

speicherung von elektrischer Energie in sogenannten Stromspeichern kann beispielsweise in Zeiten von schwachem Windangebot Energie aus den Speichern zu Verfügung gestellt werden. In diesem Kontext betrachten wir die Frage, inwieweit der Einsatz von Energiespeichern einen Beitrag zu einer verbesserten Integration von Strom aus fluktuierenden Energiequellen in das Versorgungsnetz leisten kann.

Modellierung

Um die vorgestellten Ausgleichsoptionen nach ökonomischen Gesichtspunkten bewerten zu können, betrachten wir ein Energieerzeugungssystem, welches aus verschiedenen Kraftwerkstypen, einem Windpark und Energiespeichern besteht. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Strom von der EEX Börse zu beziehen. Innerhalb dieses System soll die Stromnachfrage einer Region bestimmter Größe gedeckt werden.

Zur Ermittlung einer kostenoptimalen Lastendeckung wird die beschriebene Fragestellung als mathematisches Optimierungsmodell formuliert, wobei eine möglichst realitätsnahe Beschreibung angestrebt wird. Das Modell bildet zum Einen die grundlegenden Zusammenhänge des Energieerzeugungssystems ab und berücksichtigt zum Anderen die wesentlichen technischen und ökonomischen Aspekte der Anlagen sowie deren Dynamik.

Insbesondere werden bei der Beschreibung der verschiedenen Technologien anhand von binären Schaltvariablen An/Aus-Entscheidungen abgebildet. Zusätzlich können auf diese Weise auch Mindestlauf- und Stillstandszeiten von thermischen Kraftwerken modelliert werden. Da bei diesen Technologien häufige An- und Abfahrprozesse und damit übermäßige thermische Belastungen zu vermeiden sind, werden diese Restriktionen in der Einsatzplanung berücksichtigt.

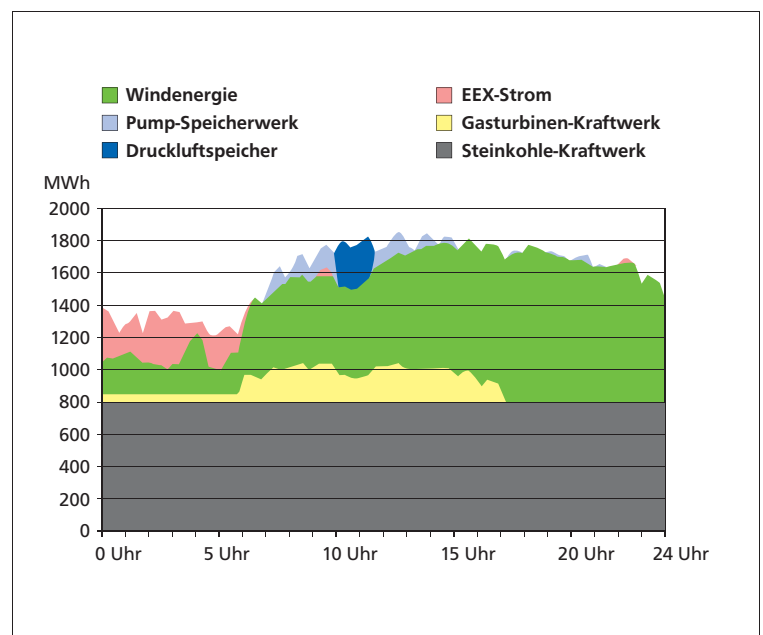
Des Weiteren weist jede Anlage eine charakteristische Kennlinie auf, welche das Teillastverhalten der Technologie beschreibt. Zumeist zeigt sich mit verminderter Leistung der Anlage eine Verschlechterung des Wirkungsgrads, wobei dieser Zusammenhang häufig nichtlinear ist. Ein verbreiteter Ansatz Nichtlinearitäten in diskrete Optimierungsmodelle zu integrieren ist deren Approximation durch stückweise lineare Funktionen.

Obwohl dieses Vorgehen zumeist die Integration von zusätzlichen Binärvariablen und Nebenbedingungen erfordert, lassen sich auf diesem Weg weit größere Probleme zur globalen Optimalität lösen als deren nichtlineare Formulierung.

Neben diesen Aspekten liegt der Kernpunkt des Modells in der Beschreibung der mit Unsicherheit belegten Parameter. In dem vorliegenden Modell betrifft dies sowohl die eingespeiste Windenergie als auch die Strompreise, da beide Größen unvorhersehbaren Schwankungen unterliegen. Auf Basis von statistischen Informationen lassen sich die zeitliche Entwicklung von verfügbarer Windenergie und Strompreisen als stochastischer multivariater Prozess beschreiben. Wird letzterer durch einen Prozess mit endlich vielen Werten approximiert, können die stochastischen Größen mittels eines Szenariobaumes dargestellt werden. Dabei spiegeln die einzelnen Szenarien mögliche Realisierungen des stochastischen Prozesses wieder, welche mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit belegt werden.

Das Ziel der Optimierung ist die kostenminimale Deckung eines vorgegebenen Lastprofils über einen gewissen Planungshorizont. Dabei setzen sich die Kosten aus den Betriebskosten der strom-

Abbildung 2
Optimaler Fahrplan der Anlagen für einen Wintertag.



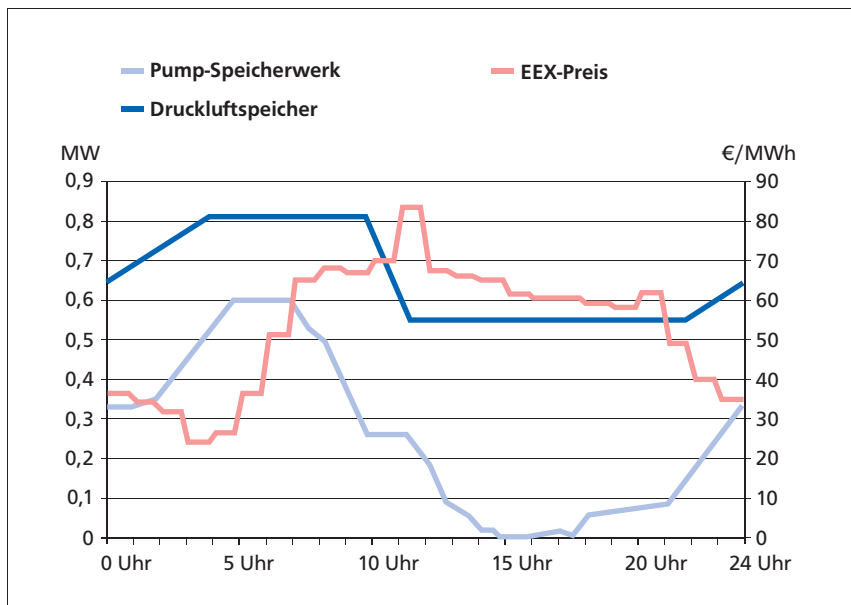


Abbildung 3
Optimaler Fahrplan
der Speicher für
einen Wintertag mit
EEX-Strompreisen.

erzeugenden Technologien und Energiespeichern und deren Anfahrkosten zusammen. Zusätzlich fallen auch Kosten aus dem Stromimport von der EEX Börse an.

Insgesamt führt dieser Ansatz zu einem mehrstufigen stochastischen gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblem. Die Lösung dieser Art von Problemen stellt in der gegenwärtigen Forschung noch immer eine große Herausforderung dar, da stochastische und kombinatorische Aspekte in einem Modell vereint werden. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in [2] zu finden.

Dekompositionsbasierter Lösungsansatz

Die mathematische Modellierung von Problemen mit größerem Planungshorizont führt schnell zu sehr komplexen Beschreibungen, da die Anzahl der

Szenarien des zugrundeliegenden Szenarioabemes zumeist stark mit der Länge des Planungshorizonts ansteigt. Die besonderen charakteristischen Strukturen des vorliegenden Problems ermöglichen jedoch die Entwicklung spezieller Lösungstechniken, welche auf der Zerlegung des Problems in viele Teilprobleme basieren und damit die Lösung größerer Problem instanzen ermöglichen. Insbesondere weist dieses Problem nur wenige zeitkoppelnde Nebenbedingungen auf. Unter Ausnutzung dieser speziellen Strukturen wurde daher ein Dekompositionsansatz entwickelt, welcher auf der Zerlegung des Szenarioabemes in mehrere Teilbäume basiert. Anhand der erhaltenen Teilbäume wird die originale Problemformulierung dekomponiert, was die Relaxierung ausgewählter zeitkoppelnder Nebenbedingungen erfordert. Durch die Integration in ein Branch-and-Bound Verfahren, können auf diesem Wege global optimale Lösungen des Problems bestimmt werden. Für eine ausführliche Beschreibung verweisen wir auf [4].

Fallstudie

Als Anwendungsfall für das vorgestellte Problem wird ein Energieerzeugungssystem betrachtet, welches die folgenden Technologien beinhaltet. Zur Deckung der Grundlast wird ein Steinkohlekraftwerk integriert und für die Spitzenlast ein Gasturbinenkraftwerk. Des Weiteren werden zwei Stromspeichertypen betrachtet, ein Druckluftspeicher (CAES) und ein Pumpspeicherwerk (PSW), wobei die Parameter aller Anlagen auf realen Daten basieren. Ergänzt wird dieses System durch einen Off-shore Windpark, wie in Abbildung 1 gezeigt. Insgesamt werden Planungshorizonte von bis zu einer Woche in 15-minütiger Auflösung betrachtet, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Literatur

[1] Epe, Alexa; Küchler, Christian; Römisch, Werner; Vigerske, Stefan; Wagner, Hermann-Josef; Weber, Christoph und Woll, Oliver (2009: Betriebsoptimierung zur ökonomischen Bewertung von Speichern; Innovative Modellierung und Optimierung von Energiesystemen, Band 26 Umwelt und Ressourcenökonomik, S. 135-152)

[2] Epe, Alexa; Mahlke, Debora; Martin, Alexander; Wagner, Hermann-Josef; Weber, Christoph; Woll, Oliver und Zelmer, Andrea (2009: Betriebsoptimierung zur ökonomischen Bewertung von Speichern; Innovative Modellierung und Optimierung von Energiesystemen, Band 26 Umwelt und Ressourcenökonomik, S. 153-177)

[3] Handschin, Edmund; Neise, Frederike; Neumann, Hendrik und Schultz, Rüdiger (2006: Optimal Operation of Dispersed Generation under Uncertainty using Mathematical Programming; International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 28, S. 618-626)

[4] Mahlke, Debora (2009: A Scenario Tree-Based Decomposition for Solving Multistage Stochastic Programs with Application in Energy Production; Vorgelegte Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt)

[5] Swider, Derk J.; Vogel, Philip; Weber, Christoph (2004: A Stochastic Model for the European Electricity Market and the Integration Costs for Wind Power; Technical Report, GreenNet Report on WP 6)

Beispielhaft ist in Abbildung 2 der optimale Einsatzplan der Kraftwerke und Speicher für einen ausgewählten Typtag im Winter dargestellt, wobei eine deterministische Vorgabe der Strompreise und der verfügbaren Windenergie angenommen wurde. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass die Kraftwerke wie erwartet eingesetzt werden, d.h. das Steinkohlekraftwerk zur Deckung der Grundlast und das Gasturbinenkraftwerk zu Deckung der Spitzenlast. Zusätzlich kommen in Zeiten der Spitzenlast auch die Stromspeicher zum Einsatz. Jedoch ist deren Einsatz stärker durch den aktuellen EEX Strompreis beeinflusst als dass sie dem Teillastverhalten der Kraftwerke folgen, dargestellt in Abbildung 2.

Insgesamt lässt sich erkennen, dass das vorgestellte Modell eine gute Grundlage für weitere Untersuchungen bildet, da es die fundamentalen Zusammenhänge des Systems realitätsnah abbildet und gleichzeitig einen hinreichend großen Planungshorizont zulässt. Hinsichtlich einer umfassenden Bewertung von Energiespeichern zur Entkopplung von Angebot und Nachfrage bei stark fluktuierender Energieeinspeisung gilt es jedoch weitere Aspekte wie beispielsweise Investitionskosten zu berücksichtigen, siehe [1]. Weiterhin ist wichtig verschiedene Fallstudien zu betrachten, was derzeit bei unseren Projektpartnern an der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt wird.



Alexander Martin ist seit 2000 Professor für Diskrete Optimierung am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet Diskrete Optimierung.



Debora Mahlke arbeitet seit 2005 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt und beschäftigt sich u.a. mit Optimierungsproblemen aus dem Bereich der Energiewirtschaft.



Andrea Zelmer ist seit 2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt und beschäftigt sich derzeit mit der Optimierung von gekoppelten Energienetzwerken.

Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt
Prof. Dr. Alexander Martin
Tel.: 06151/ 16-3394
E-Mail: martin@mathematik.tu-darmstadt.de
www.opt.tu-darmstadt.de

Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt
Debora Mahlke
Tel.: 06151/ 16-4482
E-Mail: mahlke@mathematik.tu-darmstadt.de
www.opt.tu-darmstadt.de

Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt
Andrea Zelmer
Tel.: 06151/ 16-4482
E-Mail: zelmer@mathematik.tu-darmstadt.de
www.opt.tu-darmstadt.de

ANZEIGE

INNOVATIVE
TECHNOLOGIE
WELTWEIT



NEUBERGER

MEMBRANPUMPEN- TECHNOLOGIE VOM FEINSTEN...

■ Ob für Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten – KNF Neuberger bietet ein breites Angebot an Pumpen und Systemen.

■ Für unverfälschtes Fördern, Dosieren, Komprimieren und Evakuieren.

■ Als OEM- oder tragbare Ausführungen.

■ Mit einem variablen Produktprofil für kundenspezifische Lösungen.

... für anspruchsvolle Anwendungen z.B. in den Bereichen:

- Medizintechnik
- Analysetechnik
- Verfahrenstechnik
- Lebensmitteltechnik
- Reptechnik
- Energietechnik
- Forschung



www.knf.de

KNF Neuberger GmbH ■ Alter Weg 3 ■ D 79112 Freiburg
Tel. 07664/5909-0 ■ Fax 07664/5909-99 ■ E-Mail info@knf.de

**BESUCHEN SIE UNS AUF DER COMPAMED 2009
HALLE 8a, STAND H 04**