



AKE2003H03b_Crotogino_CAES-GasturbinenKraftwerk.pdf

Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke / Geplanter Einsatz beim Ausgleich fluktuierender Windenergie-Produktion und aktuellem Strombedarf

Dipl.-Ing. Fritz Crotogino
Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH
Karl-Wiechert-Allee 3
D-30625 Hannover
Tel.: +49 511 94032 618, Fax: +49 511 94032 607
E-mail: Crotogino@hannover.oilfield.slb.com
www.kbbnet.de



1 Einleitung

Großtechnische Energie-Speicher in Form von Pumpspeicher-Kraftwerken dienen seit vielen Jahrzehnten erfolgreich der Aufnahme überschüssigen Nachtstroms und der Bereitstellung von Spitzenlast sowie kurzfristig verfügbarer Störungs-Reserve. Ein alternatives Verfahren stellen Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke – nachfolgend mit CAES¹-Kraftwerke bezeichnet – dar; seit über 20 bzw. 10 Jahren werden zwei Anlagen erfolgreich betrieben, die CAES-Kraftwerke in Huntorf und in McIntosh, USA.

Grundlegend geänderte Rahmenbedingungen haben neuerdings in den USA und auch in Europa das Interesse an der Installation weiterer, moderner CAES-Kraftwerke geweckt:

- Der rasante Zuwachs an installierter Windenergie-Leistung bei gleichzeitig stark fluktuierender Wetter- aber nicht Bedarfs-abhängiger Stromproduktion erfordert zukünftig neue technische Lösungen zur Vergleichmäßigung von Erzeugung und Bedarf.
- Im Zuge der Liberalisierung der Strommärkte und der Öffnung von Strombörsen nimmt der Anteil der frei gehandelten Strommengen kontinuierlich zu. Energiespeicher erlauben Strom in Zeiten geringer Nachfrage günstig einzukaufen, im

¹ CAES – Compressed Air Energy Storage



Speicher zu „parken“ und später bei entsprechender Nachfrage zu verkaufen. Gleichzeitig können hiermit extreme Preis-Spitzen (Beispiel Kalifornien) vermieden werden.

Vergleichbar zu der Situation auf dem Gasmarkt ist ein klarer Trend hin zu physischem in Ergänzung zu virtuellem Speicher ersichtlich.

Vornehmliches Ziel dieses Vortrags ist, das Interesse der Fachöffentlichkeit an dem bewährten Konzept der Speicherung elektrischer Energie in Druckluftspeichern als Alternative zu Pumpspeicher-Kraftwerken zu wecken und zwar in Hinblick auf die Diskussion möglicher Anwendungen bei der Integration großer, ungleichmäßig anfallender Windenergie-Leistung in das Netz und bei Strom-Handel.

2 Grundsätzlicher Bedarf an zusätzlichen Energiespeichern

Der Ausbau der Windenergie-Erzeugung nimmt stark zu; derzeit (2002) sind in Deutschland bereits über 10.000 MW installiert; bis 2010 sollen off-shore Windparks mit insgesamt 2.000 bis 3.000 MW erstellt werden, langfristig mit 25.000 bis 30.000 MW. Bereits heute deckt die Windenergie in einigen Netzbereichen die Netzlast zu Schwachlastzeiten.

Die stark fluktuierende, stochastische Erzeugung der resultierenden enormen Windenergie-Leistung führt zu einem erheblichen zusätzlichen Bedarf an Regelenergie, um jederzeit den exakten Ausgleich zwischen Strom-Erzeugung und -Verbrauch gewährleisten zu können. Die nachfolgende Graphik /ROHRIG 2002/ zeigt beispielhaft die erzeugte Windleistung während des Monats Juli 2001 für das Gebiet der E.ON Netz; der Verlauf ist gekennzeichnet durch

- relativ wenige aber hohe Spitzen (> 2.000 MW)
- längere mehrtägige Flauten
- große Gradienten für Zu- und Abnahme der Windleistung pro Zeiteinheit.

Nur wenn die Integration der erwarteten großen ungleichmäßigen Windenergie-Produktion in das Netz in absehbarer Zeit technisch und wirtschaftlich zufriedenstellend erfolgen kann, sind die ehrgeizigen Pläne zum Ausbau der Windenergie-Produktion in die Realität umzusetzen. Energiespeicher stellen bei der Bewältigung der Lösung der Aufgabe eine wichtige Option dar.

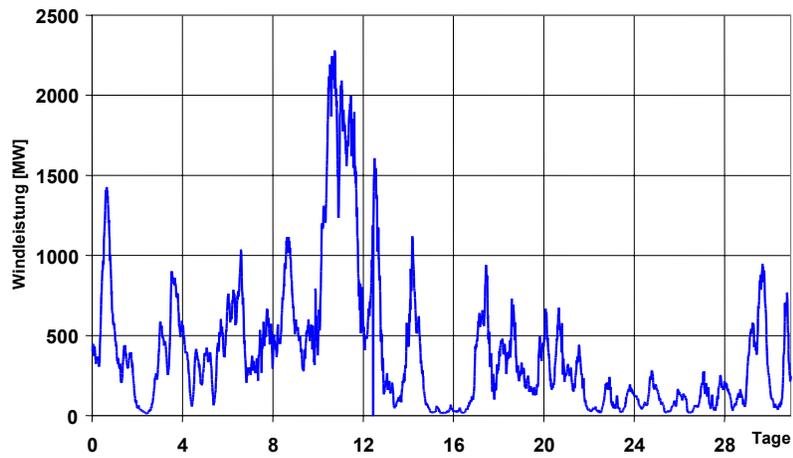


Abb. 1: Summenganglinie der Windleistung für das Gebiet der E.ON Netz im Juli 2001

Weiterer Bedarf an Speicherung elektrischer Energie ergibt sich aus einer völlig anderen Richtung: Im Zuge der Liberalisierung der Strommärkte wird elektrische Energie zunehmend an Strombörsen wie Nord Pool (Skandinavien), EEX Leipzig, APX Amsterdam gehandelt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Verteilung bzw. Bandbreite der Strompreise über 365 Tage (x-Achse) und die jeweilige Tageszeit (y-Achse).

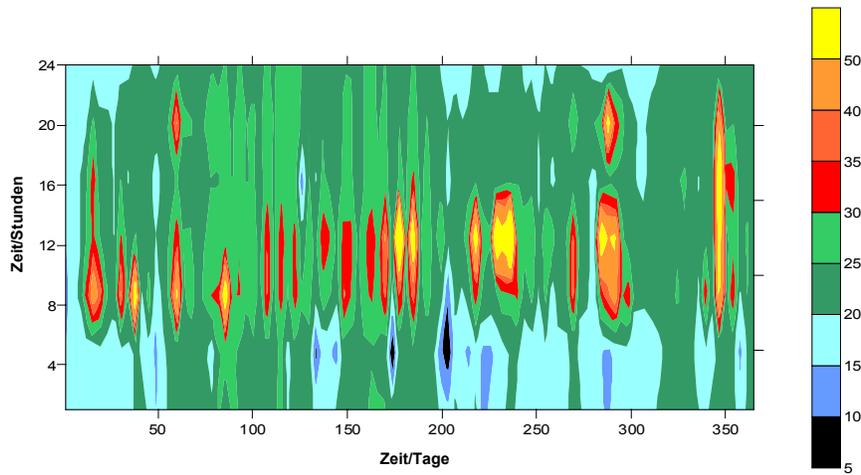


Abb. 2: Aktuelle Strompreise in Deutschland im Jahr 2001

Geeignete Speicher für elektrische Energie ermöglichen Stromhändlern, Überschuss-Mengen günstig einzukaufen, im Speicher zu parken und später gewinnbringend zu verkaufen. Vorrangiges Motiv für die derzeit in den USA geplanten CAES-Anlagen ist Stromhandel und erst in zweiter Linie Ausgleich erneuerbarer Energien.

3 Konzept einer CAES-Anlage

3.1 Idee

Das grundlegende Ziel der Speicherung elektrischer Energie – ob Pumpspeicher oder Druckluftspeicher – ist:

- *Speicherung* von in Schwachlastzeiten erzeugter Überschuss-Energie (Quelle: Grundlast-Kraftwerke, Windenergie)
- *Zeitversetzte Produktion* von Spitzenlast-Energie in Zeiten großer Nachfrage.

Die nachfolgende Abbildung (Stromproduktion in einem Netz mit integriertem Druckluft-Speicher über 24 h) zeigt beispielhaft, wie in Schwachlast-Zeiten überschüssige Energie einem Druckluft-Speicher zugeführt wird und in Hochlast-Zeiten wieder produziert wird.

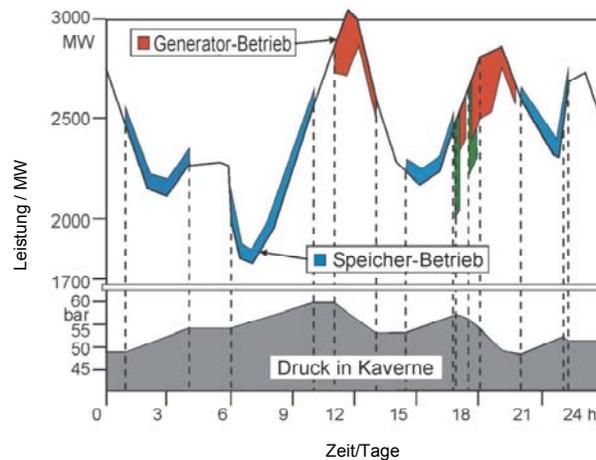


Abb. 3: Stromproduktion eines Versorgers über 24 h mit integriertem CAES-Kraftwerk



3.2 Adiabate Speicher

Das Pendant zu einem Pumpspeicher-Kraftwerk stellt der *adiabate* Luftspeicher dar:

- Im *Speicherbetrieb* wird elektrische Energie zur Kompression der Luft eingesetzt; die Rolle des Speicherbeckens übernimmt ein unterirdischer Druckluft-Speicher, z. B. eine Salz-Kaverne.
- Im *Generatorbetrieb* wird die Luft dem Speicher entnommen und einer Entspannungs-Turbine zugeführt, die über einen Generator Strom erzeugt.

Die Verwirklichung dieses theoretisch simplen Prinzips scheitert bisher an den hohen Temperaturen bei der adiabaten Kompression der Luft von Atmosphären- auf Speicherdruck: (> 600 °C bei 50 bar bzw. > 800 °C bei 100 bar), denen unterirdische Speicher nicht standhalten.

Die Lösung des Problems liegt in der Speicherung der Kompressions-Wärme zwischen den einzelnen Verdichterstufen und späterer Rückgewinnung zwischen den einzelnen Expanderstufen. Derzeit sind allerdings noch keine konkreten Lösungen verfügbar.

3.3 Druckluftspeicher-Gasturbinen-(CAES)-Kraftwerke

Als Ausweg aus dem Temperatur-Problem des adiabaten Druckluftspeichers bietet sich die Kombination von Druckluft-Speicher und Gasturbinen-Kraftwerk an. Im Gegensatz zu einem Pumpspeicher-Kraftwerk handelt es sich hierbei nicht um einen reinen Energiespeicher – vielmehr um ein Gasturbinen-Kraftwerk mit integriertem Druckluft-Energie-Speicher.

Das Grundprinzip ist die Aufteilung einer konventionellen Gasturbine in (1) Kompressor-Einheit für die Verdichtung der Verbrennungs-Luft und (2) Expansions-Turbine; hiermit ist es möglich, den Einsatz hochwertigen Erdgases auf das Erhitzen der bereits komprimierten Luft zu reduzieren. Die Kompression selbst, je nach Turbinen-Bauart bis zu 2/3 des Gesamt-Energie-Einsatzes, kann je nach Verfügbarkeit mit überschüssiger Windenergie oder Energie nicht ausgelasteter Mittel- oder Grundlast-Kraftwerke erfolgen, was u. a. zu einer erheblichen Verminderung des CO₂-Ausstoßes führt.

Der integrierte Druckluftspeicher erlaubt, Kompression und Gasturbinen-Betrieb zeitlich zu entkoppeln.

Abb. 4 zeigt das Konzept einer CAES-Anlage in Verbund mit einem Windpark und die wesentlichen Komponenten: (1) ND- und HD-Kompressoren mit Kühlern, (2) Motor-Generator-Einheit, (3) Gasturbine und (4) unterirdischer Druckluftspeicher.



In Schwachlastzeiten nutzt der Motor überschüssige Energie zur Kompression von Druckluft in dem untertägigen Speicher.

In Zeiten hoher Nachfrage wird die bereits früher komprimierte Druckluft der Brennkammer zugeführt; das ebenfalls zugeführte Erdgas verbrennt und treibt die Gasturbine an und damit den Generator zur Erzeugung elektrischer Energie. Der Wirkungsgrad moderner CAES-Anlagen beträgt ca. 55 %. Ein besonderes Merkmal ist die hohe Flexibilität dieser Anlagen: Bereits nach ca. 14 min kann die volle Leistung zur Verfügung gestellt werden.

Als Druckluft-Speicher kommen Hohlräume im geologischen Untergrund infrage: Salzkavernen, Aquiferstrukturen und aufgelassene Bergwerke.

Bei SALZKAVERNEN handelt es sich um künstlich erstellte Hohlräume in Salzformationen. Salzkavernen wie Aquifer-Strukturen werden seit vielen Jahren in großem Maße für die Speicherung von Hochdruck-Erdgas eingesetzt.

Typische Dimensionen von Salzkavernen sind: (1) geometrisches Volumen 300.000 bis 700.000 m³, (2) Teufenbereich 600 bis 1.800 m, (3) Druckbereich je nach Teufe bis über 200 bar.

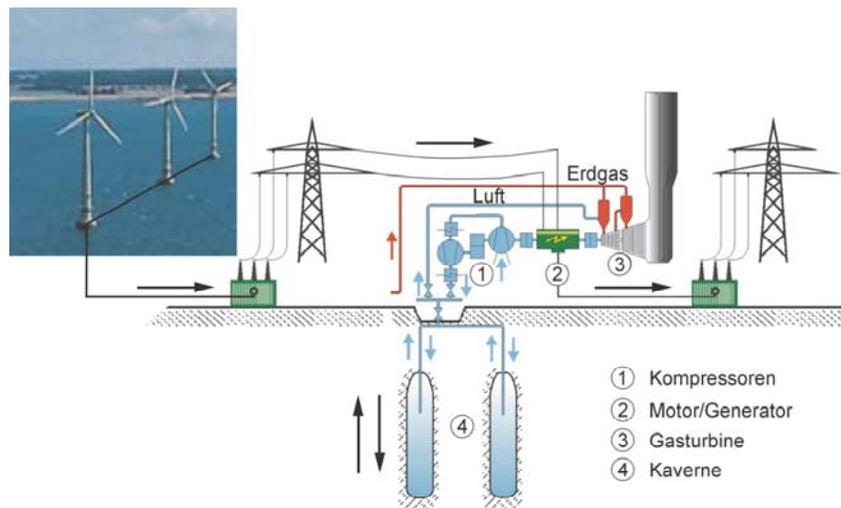


Abb. 4: Konzept einer CAES-Anlage in Verbund mit einem Windpark



AQUIFER-STRUKTUREN, stellen eine weitere Speicher-Variante dar, deren Einsatz für die Druckluftspeicherung in den 80er Jahren erfolgreich von EPRI² untersucht wurde. Hierbei handelt es sich um poröse, wasserführende Formationen, die gegen darüber liegende Horizonte durch undurchlässiges Deckgebirge abgedichtet sind.

AUFGELASSENE BERGWERKE stellen eine weitere Option für den Speicher-Hohlraum dar; der Nachweis der ausreichenden Dichtheit begrenzt allerdings wesentlich die Verfügbarkeit geeigneter Objekte.



3.4 Grundsätzliche Einsatzmöglichkeiten von CAES-Anlagen

Die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten decken sich weitgehend mit denen eines Pumpspeicher-Kraftwerkes /BRANDAU 2002/:

- Überführung von Schwachlast-Energie in Spitzenlast-Energie (Energie-Veredlung)
- Verwertung von Überschussstrom aus dem Grundlastbereich
- Unmittelbare Deckung von Spitzenbedarf im Stromversorgungsnetz
- Optimierung des Betriebs von Wärmekraftwerken durch Einschränkung deren Einsatzes für Leistungsregelung (Ausdehnung der Betriebszeit mit konstanter Leistung von Wärmekraftwerken)
- Bereitstellung von momentan einsetzbarer Reserveleistung (Erhöhung der Betriebssicherheit im Stromverbund)
- Sekundärregelung (Leistungs-Frequenz-Regelung)
- Phasenschieberbetrieb (Spannungsregulierung).

4 Existierende und konkret geplante Anlagen

4.1 CAES-Anlagen in Huntorf und in McIntosh, USA

Die Prototyp-Anlage HUNTORF /QUAST 1987/ & /CROTOGINO, MOHMEYER, SCHARF 2001/ der damaligen NWK (heutiger Betreiber E.ON Kraftwerke) wurde Ende der 70er Jahre erstellt; sie ist ausgelegt für einen Turbinen-Betrieb von 290 MW über 2 Stunden und Kompressor-Betrieb über 8 h. Die Druckluft wird in 2 Salzkavernen mit je ca. 150.000 m³ in einer Teufe von ca. 700 m bei Drücken zwischen 50 und 70 bar gespeichert.

² EPRI – Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA



Abb. 5: CAES-Kraftwerk Huntorf der E.ON

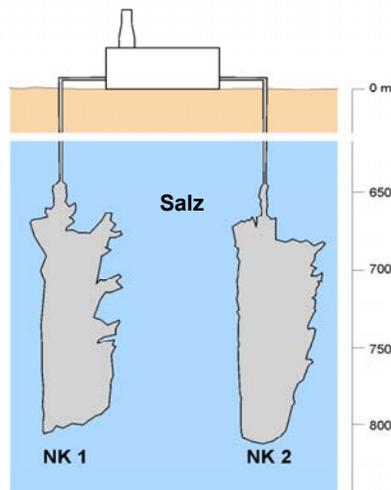


Abb. 6:
Druckluftspeicherkavernen des
CAES-Kraftwerkes Huntorf

Abb. 5 zeigt ein Luftbild der Anlage (die später hinzugefügte Erdgas-Kaverne ist nicht eingezeichnet), Abb. 6 einen Schnitt durch den geologischen Untergrund mit den beiden Speicherkavernen.

Zum Zeitpunkt der Planung der Anlage standen die Investitionskosten im Vordergrund, die Gaspreise waren niedrig; deshalb wurde damals auf eine Luftvorwärmung über die Abgase verzichtet, die den Wirkungsgrad von 42 % auf 54 % nennenswert verbessert hätte.

Anfang der 90er Jahre wurde eine zweite CAES-Anlage in McIntosh, Alabama, USA, in Betrieb genommen. Diese Anlage leistet 110 MW über 26 h; zur Speicherung der Luft dient eine Einzelkaverne mit 538.000 m³ Volumen. In dieser Anlage wurde bereits ein Recuperator installiert.



4.2 Geplante CAES-Anlage in Norton, Ohio

Vor dem Hintergrund der Liberalisierung des Strommarktes in den USA und den sich hieraus ergebenden Möglichkeiten des Strom-Handels ist das Interesse an Energie-Speichern wieder erwacht.

Derzeit befinden sich mehr als 10 Anlagen in der Planung; das bekannteste Projekt ist in Norton, Ohio, geplant; als Speicher ist hier ein ehemaliges Kalkstein-Bergwerk mit einem Hohlraum-Volumen von 10 Mio m³ vorgesehen; in der Endausbau-Stufe soll die Anlage 2.700 MW leisten; die Speicherkapazität beträgt ca. 2.700 MW mal 8 Tage /VAN DER LINDEN 2002/.

Die geplanten Anlagen unterscheiden sich insofern wesentlich von den bestehenden, als Kompressoren- und Gasturbine nicht mehr mechanisch über eine Welle gekoppelt sind; vielmehr werden heute sogenannte Insel-Lösungen bevorzugt, bei denen Motor-Kompressor-Einheiten und Gasturbinen-Generator-Einheiten vollkommen separat arbeiten und nur elektrisch verbunden sind.

4.3 Vergleich Pumpspeicher- zu CAES-Kraftwerken

Beim derzeitigen Stand der Technik und auch in absehbarer Zeit kommen vorrangig zwei Verfahren für die Speicherung großer Energie-Mengen infrage: Pumpspeicher-Kraftwerke und Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke. Die Leistungs-Bereiche moderner Anlagen unterscheiden sich nicht wesentlich: Das jüngste Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal ist für eine Leistung von 1.060 MW bzw. Speicher-Kapazität von 8.480 MWh ausgelegt. Das Gros der geplanten CAES-Kraftwerke bewegt sich in einem Bereich von 150 bis 1.000 MW bzw. 2.000 bis 20.000 MWh. D. h., die Leistungsbereiche sind weitgehend deckungsgleich.

Pumpspeicher-Kraftwerke benötigen im Gegensatz zu CAES-Anlagen keinen zusätzlichen fossilen Brennstoff, ihr Wirkungsgrad ist günstiger. Nachteilig ist der erhebliche Eingriff in die Landschaft für die Erstellung der Becken, der die Akzeptanz für weitere Anlagen in Mitteleuropa infrage stellt.

Druckluft-Speicher können dagegen im geologischen Untergrund errichtet werden. Der sichtbare Teil der Anlage reduziert sich auf das eigentliche Kraftwerk. Zahlreiche Salzvorkommen im Nordsee- und einige im Ostsee-Küstenbereich erlauben die Erstellung von Salzkavernen-Speichern in Nähe zu geplanten off-shore Windparks, die bei dem geplanten Ausbau auf 20 bis 30 GW installierte Leistung den wesentlichen Part übernehmen werden.

CAES-Anlagen zeichnen sich weiter durch die Möglichkeit der modularen Erweiterbarkeit aus: Je nach Bedarf können später unabhängig zusätzliche Kompressor-, Gasturbinen- und Speicher-Einheiten nachgerüstet werden.

5 Grundsätzliche Einsatzmöglichkeiten von CAES-Anlagen in Zusammenhang mit dem erwarteten Ausbau der Windenergie-Produktion

In der Regelzone der E.ON Netz wird bereits bis 2005 eine Einspeiseleistung aus Windenergie-Anlagen von 5.000 MW mit überwiegend küstennahem Anteil erwartet [LUTHER, SANTJER 2001]. Für den zukünftigen Ausbau der Windenergie-Produktion an off-shore Standorten werden mittelfristig installierte Leistungen von 2.000 bis 3.000 und langfristig 25.000 MW genannt.

Nur wenn die Integration der erwarteten großen fluktuierenden, stochastischen Windenergie-Produktion in das Netz in absehbarer Zeit technisch-wirtschaftlich gelöst werden kann, sind die ehrgeizigen Pläne in die Realität umzusetzen.

Energiespeicher stellen bei der Bewältigung dieser Aufgabe eine wichtige Option dar; grundsätzlich bestehen folgende Einsatzmöglichkeiten auf dem Weg von der Strom-Erzeugung zum -Verbrauch:

- (1) *Erzeuger-nah* in Hinblick auf ausgeglichene, planbare Strom-Abgabe an das Netz;
- (2) *Netz-intern* in Hinblick auf Auslastungs-Optimierung und auf Auslegung zukünftiger Netz-Erweiterung;
- (3) *Netz-intern* zur Bereitstellung von Regel-Energie (mittel- und kurzfristig);
- (4) *Stromverteiler-nah*, um den aktuellen Bedarf in Regionen großen Verbrauchs unabhängig von begrenzten Zuleitungskapazitäten decken zu können;
- (5) *Großverbraucher-nah* (z. B. Bundesbahn).

5.1 Integration in einen Pool von off-shore Windparks

Off-shore Anlagen liefern im Jahresdurchschnitt gut 40 % der installierten Leistung. Ein einem oder mehreren Windparks nachgeschalteter Speicher ermöglicht die Vergleichmäßigung der Ausgangsleistung in Hinblick auf planbare Strom-Erzeugung; die Windparks wären damit ähnlich konventionellen Kraftwerken einsetzbar.

Die Maximal-Lösung wäre ein Speicher-Kraftwerk ausgelegt für den längerfristigen, vollständigen Ausgleich, d. h. Möglichkeit der vollständigen Aufnahme der maximalen



Windenergie-Leistung zu Zeiten maximalen Windaufkommens und garantierter Strom-Abgabe auch bei mehrtägigen Flauten.

Eine wahrscheinlich realitäts-nähere Variante wäre ein CAES-Kraftwerk, das Erzeugungs-Spitzen zumindest anteilig absorbiert und andererseits für einen Zeitraum von Stunden bis Tagen eine bestimmte Leistung garantieren kann. Abweichend von bisherigen Auslegungen würde bei einem solchen Speicher-Kraftwerk das Schwergewicht der Investition von der Erzeugerseite (Gasturbinen) auf die Einspeicherseite (Kompressoren) verlagert, um die großen Leistungs-Spitzen verarbeiten zu können.



Ein solches Kraftwerk könnte Teil eines zentralen Kraftwerksleitsystems für einen Pool von Windparks sein, dessen Aufgabe die Koordination und Kontrolle der diversen Windenergie-Anlagen ist.

Vorteile dieser skizzierten CAES-Anwendungen:

- Bessere Ausnutzung bestehender Netzkapazität und Auslegung zusätzlich erforderlicher Leitungen für erheblich geringere Leistung, indem die Speicher das Netz von kurzfristig auftretenden Leistungs-Maxima entlasten.
- Sicherstellung der Windenergie-Produktion in Zeiten maximalen Windangebotes und gleichzeitig geringer Nachfrage im Netz.
- Verminderung des CO₂-Ausstoßes, da durch Kappen der Windenergie-Leistung-Spitzen kein Vorhalten thermischer Kraftwerke in einer Größenordnung von 90 % der installierten Windenergie-Leistung nötig sein wird.

5.2 Bereitstellung von Regelernergie

Ein Vergleich einer typischen Tagesbelastungskurve der E.ON in /BRANDAU 2002/ (Gesamtlast: 11.000 bis 14.000 MW) und der darin enthaltenen einzelnen Kraftwerks-Anteile von Grund-, Mittel- und Spitzenlast (durchschnittliche Leistung ca. 300 MW) mit den bereits heute schon auftretenden Schwankungen der Windeinspeisung von zeitweise über 3.000 MW macht die zunehmende Problematik der Bereitstellung der Regelernergie offensichtlich. Nach Kässer /KÄSSER 2002/ betragen die Ausgaben für Regelernergie in Deutschland 150 Mio € in 2000 bzw. 300 Mio € in 2002.

Weiterhin sieht sich das „Engpass-Management“ /LUTHER, SANTJER 2001/ mit neuen Anforderungen konfrontiert, wenn z. B. im nördlichen E.ON-Netz in Starkwind-Phasen Leistungs-Gradienten von bis zu 500 MW innerhalb 15 min verkraftet werden müssen.

Mangels ausreichender Speicherkraftwerks-Kapazität übernehmen inzwischen vermehrt Mittellast- und teilweise auch Grundlastkraftwerke Regel-Aufgaben, für die sie nicht

ausgelegt sind. Die Folge sind Betrieb bei verringertem Wirkungsgrad und höherer Wartungsaufwand durch häufiges An- und Abfahren.

CAES-Kraftwerke sind prädestiniert, die Mittel- und Grundlastkraftwerke wieder vermehrt ihren eigentlichen Aufgaben zuzuführen.

Weiterhin vermindern Speicher-Kraftwerke die Notwendigkeit, Prozessdampf mit damit verbundenem CO₂-Ausstoß für die Erzeugung von Spitzenleistung vorzuhalten. In Dänemark werden angeblich etwa 1.000 MW über Kohlekraftwerke vorgehalten, um Leistungs-Einbrüche durch Windflauten zu kompensieren.

5.3 Bereitstellung von Regelenergie bei kurzfristigen Abweichung von day-ahead-Planung und tatsächlichem Bedarf

Bei der Planung des sogenannten Lastfahrplans des Netzbetreibers führt der zunehmende Anteil an Windenergie zu einem erheblichen Unsicherheitsfaktor. Die deshalb bei ISET³ entwickelten Verfahren erlauben inzwischen eine Prognose der zu erwartenden Windeinspeisung in das Netz mit einem Fehler bezogen auf die installierte Nennleistung von 10 % für den Folgetag und 6 % für die Kurzzeitprognose von 3 bis 6 Stunden /ROHRIG 2002/.

Die hohe Flexibilität von CAES-Kraftwerken erlaubt, diese Abweichungen auszugleichen:

- kurzfristiger zusätzlicher Bedarf kann aus dem Speicher bedient werden, anstatt teure Leistung auf dem Spot-Markt zuzukaufen,
- Überkapazität kann vom Speicher übernommen zu werden, anstatt thermische Kraftwerke herunter zu regeln.

³ Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel



6 Literatur

- /BRANDAU, 2002/: „Energieumwandlung in Pumpspeicherkraftwerken“, Bergbau 2/2002, S. 67 ff
- /CROTOGINO, MOHMEYER, SCHARF 2001/: „Huntorf CAES / More than 20 years of successful operation“; SMRI Spring Meeting, Orlando, Fl, USA, 2001
- /LUTHER, SANTJER 2001/: „Technische und betriebliche Aspekte für den Netzanschluss von Windenergieanlagen“ DEWI Magazin Nr. 19, 08/2001
- /KÄSSER 2002/: RWE Net AG im Energie-Informationsdienst 27/02
- /QUAST 1987/: „Druckluftspeicher“, VDI-Berichte Nr.652, 1987
- /ROHRIG 2002/: „Entwicklung eines Rechenmodells zur Windleistungsprognose für das Gebiet des Deutschen Verbundnetzes“, 13. Int. Sonneforum, 2002
- /VAN DER LINDEN 2002/: „CAES for Today's Market“, Alstom-Veröffentlichung

