

Einsatz von Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerken beim Ausgleich fluktuierender Windenergie-Produktion mit aktuellem Strombedarf¹

Dipl.-Ing. Fritz Crotogino

Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH, a Schlumberger company

Karl-Wiechert-Allee 3, D-30625 Hannover

Tel. +49 (0)511 94032-618 / Fax +49 (0)511 94032-607

E-mail: Crotogino@hannover.oilfield.slb.com /

Internet: www.kbbnet.de

0 Zusammenfassung

Windenergie ist gekennzeichnet durch stark wetter- aber nicht bedarfsabhängige Erzeugung und speziell in Deutschland durch örtliche Konzentration auf die Küstenländer. Es ist offensichtlich, dass der geplante Zubau an Windenergie in Deutschland mit mittelfristig ca. 2.500 MW und langfristig ca. 25.000 MW mit der bestehenden Netz- und Kraftwerks-Struktur nicht realisierbar sein wird.

Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke ermöglichen die Absorption von Überschussleistung in Zeiten starken Windaufkommens bei gleichzeitig geringer Last und die zeitversetzte Erzeugung bei hoher Nachfrage. Hieraus resultieren verminderter Bedarf an zusätzlicher Regelleistungs-Kapazität bzw. an Backup-Kraftwerken, geringerer CO₂-Ausstoß und bessere Auslastung bestehender Netze bzw. geringerer Ausbaubedarf.

1 Einleitung

Pumpspeicher-Wasser-Kraftwerke werden seit über 70 Jahren erfolgreich eingesetzt bei der Aufnahme überschüssigen Nachtstroms und der zeitversetzten Bereitstellung von Spitzenlast sowie als kurzfristig verfügbare Störungsreserve. Ein alternatives Verfahren stellen Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke dar, nachfolgend mit CAES-Kraftwerke (**C**ompressed **A**ir **E**nergy **S**torage) bezeichnet, die sich ebenfalls in der Praxis bewährt haben, konkret die CAES-Kraftwerke in Huntorf und in McIntosh, USA.

Grundlegend geänderte Rahmenbedingungen haben das Interesse an der Installation weiterer, moderner CAES-Kraftwerke geweckt:

- die zunehmende Bedeutung erneuerbarer Energien, deren Produktion nicht bedarfsabhängig anfällt,

¹Vortrag gehalten anlässlich der Tagung FORTSCHRITTLICHE ENERGIEWANDLUNG UND -ANWENDUNG der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Stuttgart 2003

- die Liberalisierung der Strommärkte und der daraus resultierende Stromhandel u. a. an Strombörsen.

Mit diesem Beitrag soll das Interesse der Fachöffentlichkeit an dem bewährten Konzept der Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke als Alternative zu Pumpspeicher-Kraftwerken geweckt werden, vornehmlich in Hinblick auf zukünftige Anwendungen bei der Integration großer, ungleichmäßig anfallender Windenergie-Leistungen in das Netz und bei Strom-Handel.

2 Bedarf an zusätzlichen Energiespeichern

Der Ausbau der Windenergie-Erzeugung nimmt stark zu; derzeit sind in Deutschland bereits über 12.000 MW installiert; bis 2010 sind off-shore Windparks mit insgesamt 2.000 bis 3.000 MW geplant, langfristig mit 25.000 bis 30.000 MW. Bereits heute deckt die Windenergie in nördlichen Netzbereichen die Netzlast in 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 Stromerzeugung und -verbrauch gewährleisten zu können. Die nachfolgende Abb. 1 /1/ 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 sehr hohe Spitzen bis über > 2.000 MW,
- längere mehrtägige Flauten,
- große Gradienten für Zu- und Abnahme der Windleistung pro Zeiteinheit.

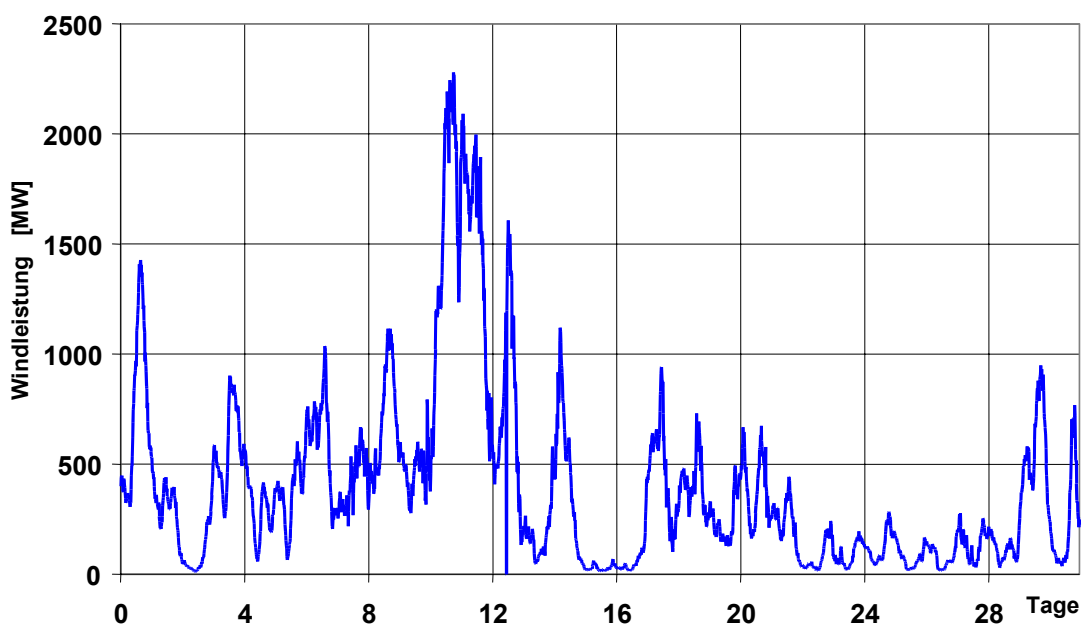


Abb. 1: Summenganglinie der Windleistung für das Gebiet der E.ON Netz im Juli 2001

Weiterer Bedarf an Speicherung elektrischer Energie ergibt sich aus der Liberalisierung der Strommärkte; zunehmend wird elektrische Energie an Strombörsen wie NordPool (Skandinavien), EEX (Deutschland), APX Amsterdam gehandelt.

Geeignete Speicher für elektrische Energie ermöglichen, Überschussleistung günstig einzukaufen, im Speicher zu parken und später gewinnbringend zu verkaufen.

3 Konzept einer CAES-Anlage

3.1 Idee

Das grundlegende Ziel der großtechnischen Speicherung elektrischer Energie ist:

- *Speicherung* von Überschuss-Energie erzeugt in Schwachlastzeiten (mögliche Quellen: Grundlast-Kraftwerke, Windenergie),
- *zeitversetzte Produktion* in Zeiten erhöhter Nachfrage als Spitzenlast-Energie.

Die nachfolgende Abb. 2 zeigt beispielhaft, wie in Schwachlast-Zeiten überschüssige Energie einem Druckluft-Speicher zugeführt wird und in Hochlast-Zeiten wieder produziert wird.

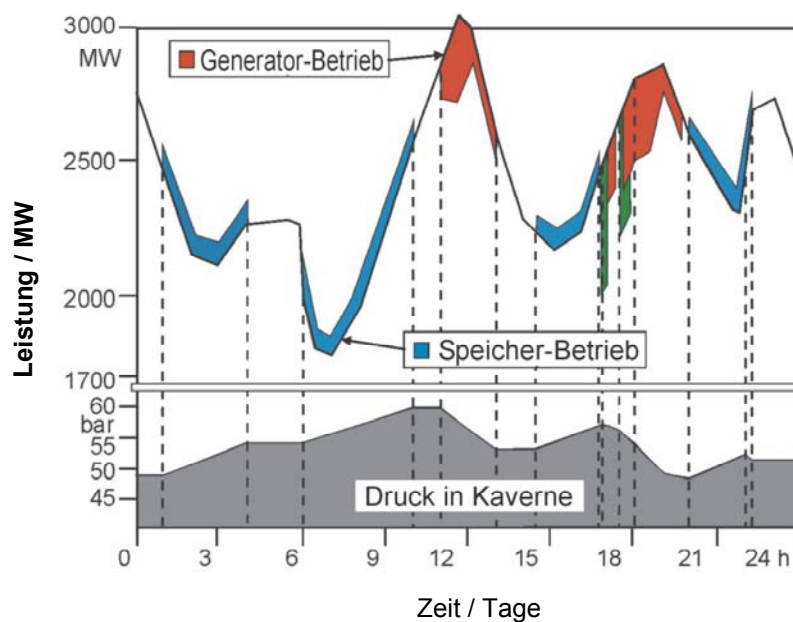


Abb. 2: Stromproduktion eines EVU über 24 h mit integriertem CAES-Kraftwerk

3.2 Druckluftspeicher-Gasturbinen-(CAES)-Kraftwerke

Das Grundkonzept besteht in der räumlichen Aufteilung einer konventionellen Industrie-Gasturbine in (1) Kompressor-Einheit für die Verdichtung der Verbrennungsluft und (2) Expansions-Turbine zur Erzeugung von mechanischer Leistung; hiermit ist es möglich, den Einsatz des hochwertigen fossilen Brennstoffs auf das Erhitzen der bereits komprimierten

Luft zu reduzieren. Die Kompression selbst, die je nach Turbinen-Bauart bis zu 2/3 des Gesamt-Energie-Einsatzes betragen kann, erfolgt in Schwachlast-Zeiten je nach Verfügbarkeit mit überschüssiger Windenergie oder Energie nicht ausgelasteter Mittel- oder Grundlast-Kraftwerke, was u. a. zu einer erheblichen Verminderung des CO₂-Ausstoßes führt.

Der separate Druckluftspeicher erlaubt dabei, Kompressor- und Gasturbinen-Betrieb zeitlich zu entkoppeln.

Abweichend von einem Pumpspeicher-Kraftwerk handelt es sich bei einem CAES-Kraftwerk nicht um einen reinen Energiespeicher als vielmehr um ein Gasturbinen-Kraftwerk mit integriertem Druckluft-Energie-Speicher. Der Einsatz des zusätzlichen Brennstoffs ist bei dem bestehenden Konzept erforderlich zur Kompensation von Energieverlusten bei der Kühlung der Luft während der Verdichtung zur Ladung des Luftspeichers.

Abb. 3 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.

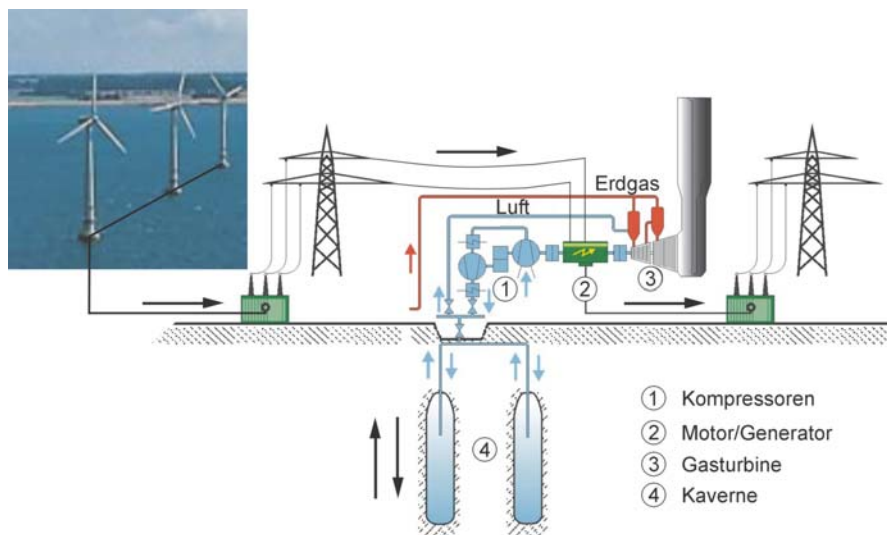


Abb. 3: Konzept einer CAES-Anlage in Verbund mit einem Windpark

In Schwachlastzeiten absorbiert der Motor überschüssige Energie zur Einlagerung 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 erhitzt die Druckluft, die in der Turbine expandiert und die Welle zum Generator antreibt. Der Wirkungsgrad moderner CAES-Anlagen beträgt mit Luftvorwärmung über Abgas bis ca. 54 %. Ein besonderes Merkmal ist die hohe Flexibilität dieser Anlagen: Bereits nach ca. 10 min kann die volle Leistung zur Verfügung gestellt werden.

Als Druckluft-Speicher für die erforderlichen Speichervolumina kommen anschließend Hohlräume im geologischen Untergrund infrage – Salzkavernen, Aquifer-Strukturen und aufgelassene Bergwerke.

Bei SALZKAVERNEN handelt es sich um soltechnisch 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 m³ bis 700.000 m³, (2) Teufenbereich 600 m bis 1.800 m, (3) Druckbereich je nach Teufe bis über 200 bar.

AQUIFER-STRUKTUREN stellen eine weitere Speichervariante dar, deren Einsatz für die Druckluftspeicherung in den 80er Jahren erfolgreich von EPRI (Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA) untersucht wurde. Hierbei handelt es sich um poröse, wasserführende Gesteinsformationen, die gegen darüber liegende Gesteinsschichten durch undurchlässiges Deckgebirge abgedichtet sind.

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

3.3 Einsatzmöglichkeiten von CAES-Anlagen

Die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten decken sich weitgehend mit denen eines Pumpspeicher-Kraftwerkes /2/:

- Überführung von Schwachlast-Energie in Spitzenlast-Energie (Energie-Veredelung),
- 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 /3/ & /4/ der damaligen NWK (heutiger Betreiber E-ON Kraftwerke) wurde Ende der 70er Jahre in Betrieb genommen; sie ist ausgelegt für einen Turbinen-Betrieb von 290 MW über 2 h 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.

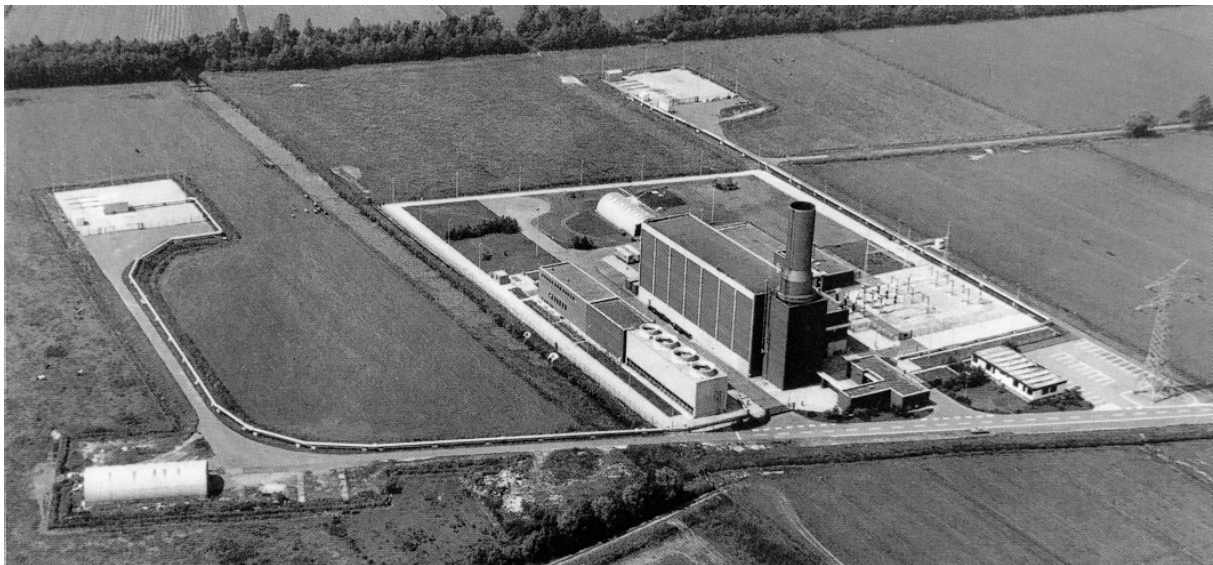


Abb. 4: CAES-Kraftwerk Huntorf der E-ON

Abb. 4 zeigt ein Luftbild der Anlage (die später hinzugefügte Erdgas-Kaverne ist nicht eingezeichnet), Abb. 5 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, weshalb damals auf eine Luftvorwärmung über die Abgase verzichtet wurde, 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.

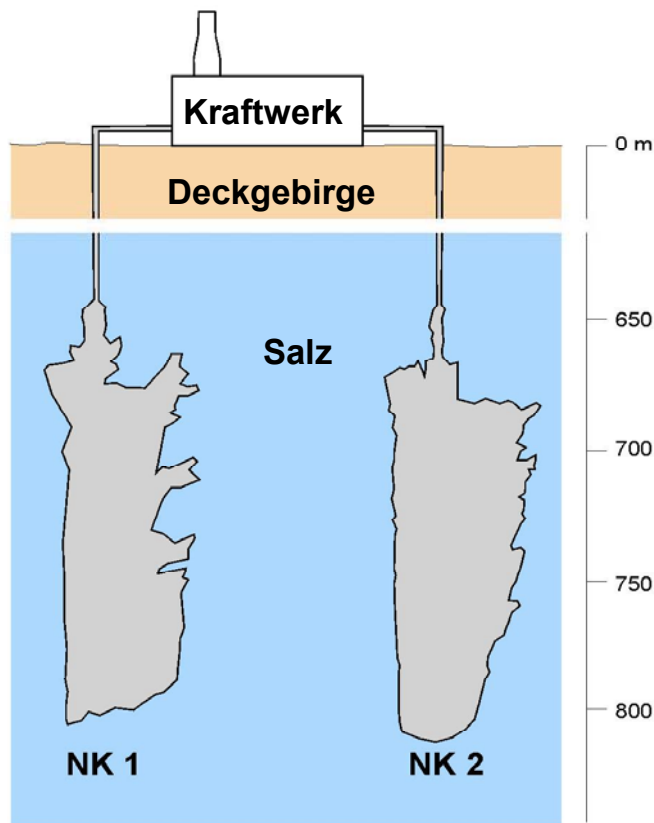


Abb. 6: Druckluftspeicherkavernen des CAES-Kraftwerkes Huntorf

4.2 Geplante CAES-Anlage in Norton, Ohio

Vor dem Hintergrund der Liberalisierung des Strommarktes und den sich hieraus ergebenden Möglichkeiten des Strom-Handels ist das Interesse an CAES-Anlagen wieder erwacht.

Derzeit befinden sich in den USA mehr als 10 Anlagen in der Planung; das bekannteste Projekt liegt in Norton, Ohio. Als Druckluft-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 über 8 Tage /5/.

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

4.3 Vergleich von Pumpspeicher- und CAES-Kraftwerken

Beim derzeitigen Stand der Technik und auch in absehbarer Zeit kommen vorrangig zwei Verfahren für die Speicherung großer Energiemengen infrage: Pumpspeicher-Kraftwerke und Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke. Das jüngste Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal ist für eine Leistung von 1.060 MW bzw. Speicher-Kapazität von 8.480 MWh ausgelegt.

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

Druckluft-Speicher können dagegen umweltfreundlich 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-Druckluft-Speichern in Nähe zu den geplanten off-shore Windparks, die bei dem geplanten Ausbau auf 20 bis 30 GW installierte Windenergie-Leistung den wesentlichen Anteil übernehmen werden.

CAES-Anlagen zeichnen sich weiter durch die Möglichkeit der modularen Erweiterbarkeit aus; je nach Bedarf können in späteren Ausbau-Stufen unabhängig voneinander erweitert werden:

- *Einspeicher-Leistung* zur Absorption von Überschuss-Leistung über zusätzliche Motor-Kompressor-Einheiten
- *Stromerzeugungs-Leistung* zur Produktion von Spitzen-Leistung über zusätzliche Gasturbinen-Generator-Einheiten
- *Speicherkapazität* über Erstellen zusätzlicher untertägiger Speicher.

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

In der Regelzone der E-ON Netz ist bereits heute (Anfang 2003) eine Einspeiseleistung aus Windenergie-Anlagen von etwa 5.000 MW mit überwiegend küstennahem Anteil installiert /6/. Mittelfristig bzw. langfristig werden installierte Leistungen von 2.500 bzw. 25.000 MW an off-shore Standorten in Deutschland erwartet.

Hieraus resultieren erhebliche zusätzliche Anforderungen an die betroffenen Netzbetreiber, die sowohl für die zuverlässige Versorgung der Verbraucher als auch für die bevorzugte Abnahme der Windenergie zuständig sind:

- Bereitstellung von zusätzlicher Regelenergie bzw. neuen Backup-Kraftwerken, um die stark zunehmenden Schwankungen im Regelenergie-Bedarf auszugleichen,
- umfangreicher Netzausbau, um nach der Verlagerung der Energieerzeugungs-Zentren in den Küstenbereich dennoch die Stromversorgung in die küstenfernen Verbrauchs-Zentren gewährleisten zu können.

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

Energiespeicher werden bei der Bewältigung dieser Aufgaben eine wichtige Rolle einnehmen. Grundsätzlich sind folgende CAES-Standort-Varianten auf dem Weg von der Stromerzeugung zum -verbrauch denkbar:

- (1) *Erzeuger-nah* in Hinblick auf ausgeglichene, planbare Strom-Abgabe an das Netz;
- (2) *Netz-intern* in Hinblick auf eine höhere Auslastung des bestehenden Netzes und auf eine Reduzierung der Spitzenleistungen bei der Auslegung der notwendigen Netz-Erweiterung;
- (3) *Netz-intern* zur Bereitstellung von Regel-Energie;
- (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 Verbund von off-shore Windparks

Off-shore Anlagen können im Jahresdurchschnitt gut 40 % der installierten Leistung liefern. Ein den 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 für den längerfristigen, vollständigen Ausgleich ausgelegter Speicher, d. h. die Möglichkeit der vollständigen Aufnahme der Windenergie-Leistung zu Zeiten maximalen Windaufkommens und garantierter Strom-Abgabe auch bei mehrtägigen Flauten.

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

Ein solches Kraftwerk könnte Teil eines zentralen Kraftwerkleitsystems für einen Verbund von Windparks sein, dessen Aufgabe wiederum die Koordination und Kontrolle der diversen Windenergie-Anlagen wäre.

Vorteile dieser skizzierten CAES-Anwendungen wären:

- Bessere Ausnutzung bestehender Netzkapazität und Auslegung zusätzlich erforderlicher Leitungen für geringere Leistung, indem die Speicher das Netz von kurzfristig auftretenden Leistungs-Maxima entlasten.
- Sicherstellung der Windenergie-Produktion auch in Zeiten hohen Windaufkommens bei gleichzeitig geringer Nachfrage im Netz.

- Verminderung des CO₂-Ausstoßes in Zeiten hoher Last und gleichzeitig geringen Windaufkommens, da die Gasturbinen des CAES-Kraftwerkes keinen fossilen Brennstoff für die Kompression der Verbrennungs-Luft benötigen. Vielmehr stammt die Energie, die für die Luft-Kompression erforderlich ist, weitgehend aus Windenergie, die in Zeiten mangelnder Nachfrage gespeichert werden konnte.

Hiermit wird es möglich sein, das Vorhalten von zusätzlichen thermischen Regel-Kraftwerken („Schattenkraftwerken“) in der bisher genannten Größenordnung von 70 bis 90 % der installierten Windenergie-Leistung erheblich zu mindern.

Denkbar ist weiterhin eine off-shore-Installation eines CAES-Kraftwerkes in unmittelbarer Nähe großer Windparks. Hiermit wäre es u. U. möglich, die Kapazität der Netzanbindung für geringere Leistungen zu dimensionieren. In der Nordsee stehen grundsätzlich geeignete Salzstrukturen zur Verfügung.

5.2 Bereitstellung von Regelenergie

Ein Vergleich einer beispielhaften Tagesbelastungskurve der E-ON in /2/ (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 Regelenergie offensichtlich. Nach Kässer /7/ betragen die Ausgaben für Regelenergie in Deutschland 150 Mio € in 2000 bzw. 300 Mio € in 2002.

Weiterhin sieht sich das „Engpass-Management“ /8/ 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 verschlechtertem Wirkungsgrad und höherer Wartungsaufwand durch häufiges An- und Abfahren.

CAES-Kraftwerke sind prädestiniert, die Mittel- und Grundlastkraftwerke wieder vermehrt ihren eigentlichen Aufgaben zuzuführen und damit von Regelaufgaben zu entlasten. Weiterhin vermindern Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke die Notwendigkeit, Prozessdampf mit damit verbundenem CO₂-Ausstoß für die Erzeugung von Spitzenleistung vorzuhalten.

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

Bei der Planung des Lastfahrplans der Netzbetreiber führt der zunehmende Anteil an Windenergie zu einem erheblichen Unsicherheitsfaktor. Die bei ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel) 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 /1/.

Die hohe Flexibilität von CAES-Kraftwerken erlaubt, diese noch verbleibenden Abweichungen kostengünstiger und umweltfreundlicher auszugleichen, weil

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

Literatur

- /1/ Rohrig: „Entwicklung eines Rechenmodells zur Windleistungsprognose für das Gebiet des Deutschen Verbundnetzes“, 13. Int. Sonneforum, 2002.
- /2/ Brandau: „Energieumwandlung in Pumpspeicherkraftwerken“, Bergbau 2/2002, S. 67 ff, 2002.
- /3/ Quast: „Druckluftspeicher“, VDI-Berichte Nr. 652, 1987.
- /4/ Crotogino, Mohmeyer, Scharf: „Huntorf CAES / More than 20 years of successful operation“; SMRI Spring Meeting, Orlando, Fl, USA, 2001.
- /5/ Van der Linden: „CAES for Today’s Market“, Alstom-Veröffentlichung, 2002.
- /6/ Matthias Boxberger: „Offshore Windpower and Electricity Grid / Getting Windpower to the Customer“
Workshop der der Vertretung des Landes Niedersachsen in Brüssel „Netzintegration von Offshore-Windparks / Probleme und Lösungsansätze“ (16.12.02).
- /7/ Kässer, RWE Net AG, im Energie-Informationsdienst 27/02.
- /8/ Luther, Santher: „Technische und betriebliche Aspekte für den Netzanschluss von Windenergieanlagen“, DEWI Magazin Nr. 19, 08/2001.