



Druckluftspeicher-Kraftwerke

Abb 1



- ▶ **Windenergie wird für Spitzenlast einsetzbar**
- ▶ **notwendige Regelernergie, Reserveleistung und Netzausbau werden reduziert**
- ▶ **günstige geologische Voraussetzungen in vielen Starkwindgebieten**
- ▶ **Synergieeffekt bei der Nutzung von Schwachgasen**

*30 Jahre in Betrieb – und seiner Zeit voraus?
Druckluftspeicher-Kraftwerk in Huntorf*

Die Windenergienutzung wächst in Deutschland mit großer Dynamik. Potenzial für den weiteren Ausbau an Land und vor der Küste ist vorhanden und die Technik zur Realisierung ist ausgereift. Bereits 5% des in Deutschland erzeugten Stroms stammt aus der Windenergie. Erneuerbare Energiequellen insgesamt sollen nach den Plänen der Europäischen Union bis 2020 europaweit 20% erreichen. Dies macht Anpassungen von Stromnetzen, Kraftwerkspark und Energiemanagement erforderlich, da Windenergieanlagen nicht bedarfsorientiert, sondern witterungsabhängig produzieren. Die kurzfristigen Schwankungen der eingespeisten Strommenge lassen sich zwar schon recht gut vorhersagen, es bleiben aber Prognoseungenauigkeiten. Hinzu kommt, dass Windenergieanlagen vorwiegend in schwachen Netzbereichen der Küstenregion und fern von großen Verbraucherzentren errichtet werden. Schon heute kommt es vor, dass Windenergieanlagen wegen Netzüberlastung im Norden zeitweise keinen Strom einspeisen dürfen.

Bis 2015 wird sich, laut der so genannten dena-Netzstudie, der Bedarf an Regelernergie – also Energie zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage – mehr als verdoppeln. Gleichzeitig müssen 400 Kilometer Stromtrassen verstärkt und 850 Kilometer neu gebaut werden. Viele Experten bezweifeln, dass dies in der kurzen Zeit möglich ist.

Entlastung könnten große Energiespeicher bringen, durch die die Energielieferung der Windparks ähnlich planbar und regelbar wird wie bei konventionellen Kraftwerken. Mit ihrem Platzverbrauch und ihren speziellen Geländeanforderungen kommen die etablierten Pumpspeicherkraftwerke aber für einen breiten Einsatz nicht in Frage, zumal sich die Leistungsspitzen der Windenergieanlagen im flachen Norden konzentrieren. Eine aussichtsreichere Lösung liegt tief in der Erde verborgen: die in Norddeutschland weit verbreiteten Salzstöcke bieten ideale Voraussetzungen für den Bau von großen Kavernen als Herzstück von Druckluftspeicher-Kraftwerken. Weltweit gibt es bisher erst zwei dieser sogenannten CAES-Kraftwerke (Compressed Air Energy Storage), die überschüssige Energie in Form von Druckluft speichern, und bei Bedarf zusammen mit Erdgas wieder verstromen.

Ob und wie sich Windenergie durch CAES-Kraftwerke besser in die deutsche und europäische Stromversorgung integrieren lässt, wurde in verschiedenen, vom Bundesumweltministerium geförderten Studien untersucht. Voraussetzungen der Technologie, Chancen und Kosten wurden in Konkurrenz zu anderen Lösungsansätzen ausgelotet. Dabei zeigten sich auch überraschende Verwendungsmöglichkeiten bisher nicht mehr nutzbarer Erdgasvorkommen.

► Speicherkraftwerke – Windenergie wird planbar

Aufgrund langjähriger Erfahrung und ausgefeilter Prognosemethoden können Netzbetreiber die Verbrauchsschwankungen im Netz gut vorhersagen. Mit der Einspeisung von Windenergie tritt ein zusätzlicher Unsicherheitsfaktor auf der Erzeugerseite hinzu. Hier erlauben neu entwickelte Verfahren (Projekt-Info 14/03) inzwischen eine Prognose der zu erwartenden Windeinspeisung mit einem mittleren quadratischen Fehler von 10% für den Folgetag sowie 6% für die

Kurzzeitprognose von 3 bis 6 Stunden bezogen auf die installierte Nennleistung. Flexible und schnelle Speicherkraftwerke können diese Abweichungen ausgleichen. Statt thermische Kraftwerke zu drosseln, übernimmt der Speicher überschüssige Energie, die anschließend für den kurzfristigen zusätzlichen Bedarf zur Verfügung steht und so teure Leistung vom Spot-Markt ersetzen kann. Im Ergebnis könnten die Wärmekraftwerke im konstanten optimierten Betrieb

fahren und damit einen höheren Wirkungsgrad und geringeren Verschleiß erreichen. Gleichzeitig erhöht die zusätzliche Reserveleistung der Speicherkraftwerke mit ihrer Fähigkeit zur Spannungs- und Leistungs-Frequenzregelung die Betriebssicherheit im Stromverbund. Auch Betreiber von Windenergieanlagen profitieren, wenn Anlagen nicht mehr wegen Netzüberlastung still stehen müssen.

► So funktionieren Druckluftspeicher-Kraftwerke

Herkömmliche Druckluftspeicher-Kraftwerke arbeiten wie konventionelle Gasturbinen-Spitzenlastkraftwerke. Mit einem entscheidenden Unterschied: Die Gasturbinen in herkömmlichen Kraftwerken benötigen bis zu zwei Drittel der von ihnen erzeugten mechanischen Energie für den Antrieb ihrer Verdichter. Nur etwa ein Drittel steht als Antriebsenergie für die Stromgeneratoren

zur Verfügung. Anders bei Druckluftspeicher-Kraftwerken – hier wird die bereits verdichtete Druckluft und Brenngas direkt der Brennkammer zugeführt. Entsprechend höhere Turbinenleistungen können auf die Generatoren übertragen werden. Kern eines CAES-Kraftwerkes ist ein großer Druckluftspeicher, der zu Schwachlastzeiten mit hohem Windangebot über elektrisch

angetriebene Kompressoren beladen wird. Neben Aquiferen und porösen Gesteinsformationen eignen sich vor allem große Kavernen in unterirdischen Salzstöcken, die durch Aussolung erzeugt werden können. Für den Einsatz in CAES-Kraftwerken gibt es zwei Beispiele.

► Erfahrungen mit CAES-Kraftwerken

Abb 2: Derzeit existierende CAES-Kraftwerke

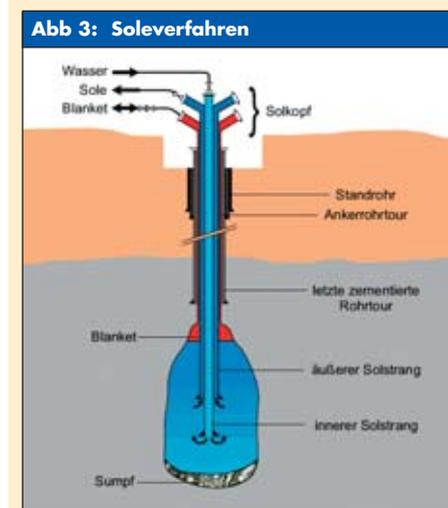
Ort	Huntorf, Deutschland	McIntosh, USA
Inbetriebnahme	1978	1991
Speicher	zwei zylindrische Salzkavernen mit je 150.000 m ³ in 600 - 800 m Tiefe (Höhe 200 m Ø 30 m)	Salzkaverne 538.000 m ³ in 450 - 750 m Tiefe
Leistung	290 MW über 2 Stunden	110 MW über 26 Stunden
Energieaufwand für 1 kWh _{el}	0,8 kWh Strom 1,6 kWh Gas	0,69 kWh Strom 1,17 kWh Gas
Druckspiel	50-70 bar	45 - 76 bar
Anmerkung	Weltweit erste CAES Anlage	Erste CAES Anlage mit Rekuperator

Bereits vor 30 Jahren ging in Niedersachsen ein 290-MW CAES-Kraftwerk ans Netz, um Grundlaststrom des Kernkraftwerks Unterweser zu Spitzenlaststrom zu veredeln. Das Kraftwerk arbeitet als Minutenreserve bis heute mit hoher Verfügbarkeit, allerdings bei einem relativ geringen Gesamtwirkungsgrad. Etwa 1,6 kWh Gas und 0,8 kWh Grundlaststrom werden benötigt, um 1 kWh

Spitzenlaststrom zu erzeugen. Wesentliche Ursache ist, dass die bei der Kompression erhitzte Luft vor Einlagerung in die Kaverne heruntergekühlt werden muss. Umgekehrt muss die bei der Expansion in der Turbine auftretende Abkühlung durch Erdgaseinsatz kompensiert werden. Ein Kraftwerk in McIntosh, USA, nutzt Wärme der Turbinenabgase über einen Wärme-

tauscher für die Vorwärmung der Druckluft. Dadurch erzielt das Kraftwerk, das 1991 in Betrieb ging, etwas höhere Wirkungsgrade. Zukünftige „Adiabaten Speicherkraftwerke“ (AA-CAES) sollen gänzlich ohne fossile Brennstoffe auskommen und für die Erzeugung von einer kWh Spitzenlaststrom etwa 1,4 kWh Schwachlaststrom benötigen.

Die Investitionskosten für ein konventionelles CAES-Kraftwerk werden voraussichtlich in der gleichen Größenordnung wie bei vergleichbaren Spitzenlast-Kraftwerken liegen. Das Gleiche gilt für die Betriebskosten. Für die großen Stromkonzerne könnte es sich womöglich bei steigenden Brennstoffpreisen schon sehr bald lohnen, mit Pressluftspeichern billigen Überschussstrom in wertvolle Reserveenergie zu verwandeln.



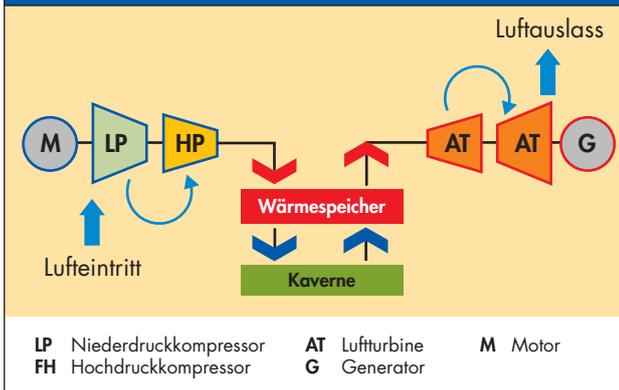
Kavernenspeicher

Speicherkavernen mit weit über 500 000 m³ Volumen werden schon lange zur Speicherung von Erdgas genutzt. Für ihren Bau eignen sich vor allem Salzstöcke, die in weniger als 800 m Tiefe liegen und über 300 m mächtig sind. In Schleswig-Holstein und Niedersachsen sind diese in großer Zahl verfügbar, der Nordostdeutsche Küstenraum weist hingegen lediglich im südwestlichen Teil von Mecklenburg einzelne Salzstöcke auf. Neben der geologischen Eignung sind weitere Standortfaktoren zu beachten: Günstige Entfernung zu bestehenden Windparks in Norddeutschland sowie zu zukünftigen Offshore-Windparks in deutschen Küstengewässern und in Bezug auf das existierende Spannungsnetz, ausreichende Frischwasserversorgung für die Aussolung und Entsorgungsmöglichkeiten für die anfallende Sole (Meeresnähe).

Speicherkavernen entstehen durch Aussolung über mehrfach verrohrte Bohrlöcher (Abb 3). Mit gegeneinander verschiebbaren Sol-Rohrsträngen wird Wasser zugeführt, das das Steinsalzgebirge auflöst und die entstehende Sole über Tage fördert. Das Kavernendach wird währenddessen durch eine Kappe aus Luft, Erdgas oder Öl gegen unkontrollierte Auflösung geschützt. Umweltrelevante Faktoren sind in erster Linie der Frischwasserbedarf bei der Herstellung der Salzkaverne und die anfallende Sole. Im Küstenraum der Nordsee bietet sich Meerwasser für den Solprozess an. Die anfallende Sole kann in die Unterläufe der großen Ströme und in die Nordsee abgeleitet werden. Bei dem geringeren Salzgehalt der Ostsee ist mit einem höheren Aufwand für eine verträgliche Verdünnung der Kavernensole in unmittelbarer Umgebung eines Einleitbauwerkes zu rechnen.

► AA-CAES – Forschungsziele

Abb 4: Adiabate Speicherkraftwerke



„Adiabate Speicherkraftwerke“ (AA-CAES) speichern nicht nur die Druckluft, sondern – in einem separaten Wärmespeicher – auch die Wärme, die beim Verdichten der Luft frei wird (Abb 4). Für die Stromerzeugung wird die Wärme der zur Turbine strömenden Druckluft wieder zugeführt. Dies macht den Einsatz von Erdgas überflüssig. Allein mit regenerativem Strom betrieben, sollen AA-CAES Wirkungsgrade von bis zu 70% erreichen. Die Entwicklung wurde durch die Europäische Union gefördert, steht aber noch am Anfang. Nahezu alle Komponenten müssen neu entwickelt werden. Entsprechend vorsichtig sind die Forscher mit Prognosen, wann die Technik einsatzbereit ist. Ein Demonstrationskraftwerk könnte in fünf bis zehn Jahren gebaut werden. Bis dahin sind noch zahlreiche Aufgaben zu lösen:

Wärmespeicher werden mit einer Speicherkapazität bis zu 1.200 MW_{th} bei Temperaturen von über 600°C benötigt. Zwei Entwicklungslinien werden untersucht:

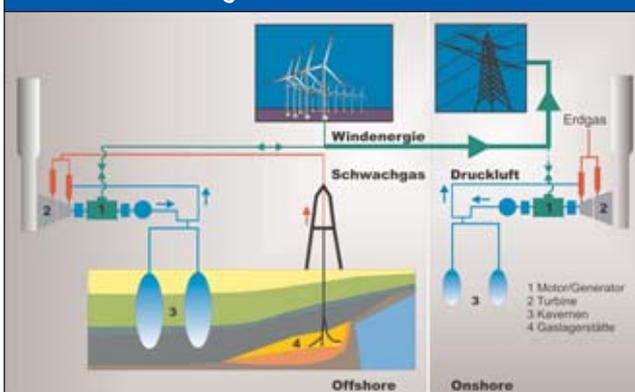
- Feststoffspeicher aus Keramik, Natursteinen, Beton oder Gusseisen könnten direkt be- und entladen werden. Sie haben sich in der Industrie bewährt, sind einfach aufgebaut und haben eine große Wärmeübertragungsfläche. Allerdings erfordern Feststoffspeicher eine druckfeste Hülle.
- Eine ebenfalls industriell vielfach erprobte Technologie nutzt kommerziell verfügbare Flüssigkeiten. Die Be- und Entladung erfolgt über Wärmetauscher mit entsprechenden Temperatur- und Druckverlusten. Dafür können aber kostengünstige Behälter verwendet werden.

Kompressoren für die Speicherbeladung sollen Temperaturen bis 600°C verkräften und Drücke bis 160 bar erzeugen. Erforderlich ist zudem ein hoher Wirkungsgrad, ein variabler Durchsatz und eine schnelle Verfügbarkeit mit wenigen Minuten Anfahrzeit. Designstudien für entsprechende Radialkompressoren sind ermutigend.

Luftturbinen müssen neu entwickelt werden, die durch Expansion der komprimierten, heißen Luft auf Atmosphäreniveau Leistungen bis 300 MW erreichen. Herausforderungen sind u. a.: hohe Leistungsdichte, hohe Eintrittstemperaturen, große Volumenströme und Volumenstromänderungen. Gleichzeitig soll ein hoher Wirkungsgrad über dem gesamten Lastbereich bei niedrigen spezifischen Kosten erreicht werden.

► Grundlaststrom von der Nordsee

Abb 6: Gemeinsame Netzanbindung von Windenergieanlagen und Schwachgas-Turbinen



In der deutschen Nordsee sind Gasvorkommen bekannt, deren Verwertung wegen hoher Stickstoffanteile nicht mehr wirtschaftlich war. Der Wirtschaftsverband für Erdöl- und Erdgasgewinnung schätzt das Explorationspotenzial auf bis 230 Milliarden m³. In dem vom Bundesumweltministerium geförderten Projekt „Netzintegration von Offshore Großwindanlagen – Grundlast von der Nordsee“ untersuchen Forscher der TU Clausthal, ob die Infrastruktur, die für künf-

tige Offshore-Windparks in der Nordsee notwendig ist, auch für diese Ressource genutzt werden kann. Mit einem integrierten Einsatz von Windkraft, Druckluftspeichern, Gaslagerstätten, Schwachgasverstromung und Gaskraftwerk wäre ein beträchtlicher Synergiegewinn verbunden.

Bei geringer Last speichert ein Druckluftspeicher überschüssige Energie, die bei Bedarf zusammen mit dem Schwachgas in einer speziellen Gasturbine verstromt wird. Die Offshore-Stromlieferung würde planbar bis hin zur Grundlastversorgung von der Nordsee. Gleichzeitig werden die elektrischen Übertragungsleitungen zu den Offshore-Windparks optimal genutzt. Die gemeinsame Nutzung der Infrastruktur senkt die anteiligen Kosten. Die Nordsee und die norddeutsche Küstenregion bieten ideale geologische Vorausset-

zungen für den Bau von Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerken. Inwieweit das vorgestellte Konzept tatsächlich umsetzbar ist, prüft eine Arbeitsgruppe der TU Clausthal. Die Forscher untersuchen dabei auch, ob und in welchem Umfang bei einem solchen Konzept die zusätzlichen Kraftwerke mit Gasturbinen an der Küste notwendig und wirtschaftlich sind. Voruntersuchungen zum „Clausthaler Konzept“ kommen zu folgenden Ergebnissen:

- Gasturbinen zur Verstromung von Erdgas mit einem Stickstoffgehalt bis etwa 70% sind verfügbar
- Die Nutzung von Erdgasvorkommen gemeinsam mit Windparks ist (bis zu 3500 h/a Windvolllaststunden) wirtschaftlich vergleichbar mit einer Entwicklung der Erdgasvorkommen allein
- Der Aufbau von Windparks ist mit Erdgasnutzung wirtschaftlicher als ohne
- Ein gemeinsamer Betrieb ist nur für größere Leistungen wirtschaftlich sinnvoll (200 MW und mehr).

► Ausblick

Die geologischen Voraussetzungen für den Bau von CAES-Kraftwerken sind in Norddeutschland und auch in weiten Teilen Europas, etwa in den Niederlanden, Großbritannien und Spanien, günstig. An vielen Küsten- und Bergstandorten, wo der Wind kräftig bläst, finden sich geeignete Salzstöcke. Vorteilhaft für Deutschland ist, dass diese Standorte dort liegen, wo die Potenziale für den zukünftigen Ausbau der Windenergie liegen: Auf See, d.h. vor den deutschen Küsten. Mit ihren unterirdischen Kavernen haben die Anlagen einen kleinen Flächenverbrauch und nur geringe Einflüsse auf die Umwelt.

CAES-Kraftwerke sind ähnlich flexibel wie Pumpspeicherkraftwerke. Wenige Minuten nach dem Hochfahren steht die volle Leistung zur Verfügung. Die Druckluftspeicher decken über begrenzte Zeiträume den kurzfristigen Reservebedarf, die Minutenreserve und die Regelleistung, die aufgrund der Prognoseungenauigkeiten der Windstromspeisung benötigt werden. Dies reduziert den Bedarf an fossilen Reservekraftwerken und an zusätzlicher Netzkapazität. Bei Netzüberlastung müssen Windenergieanlagen nicht abschalten und bei einem Überangebot elektrischer Energie veredelt die Speichertechnologie Grundlaststrom zu Spitzenlaststrom. Damit lassen sich die schwankenden Strompreise auf dem liberalisierten Strommarkt gewinnbringend nutzen.

Speicherkraftwerke können nicht den kompletten Bedarf an Reserve-Kraftwerken ersetzen. In einem Gesamtkonzept reduzieren sie den notwendigen Netzausbau und teilen sich die Spitzenlastversorgung mit schnell regelbaren Gas-Kraftwerken. Die Netzoptimierung wird nicht zuletzt durch ein effektiveres Verbrauchsmanagement komplettiert, mit dem Lastschwankungen nicht nur auf der Angebots-, sondern auch auf der Nachfrageseite geregelt werden.

Die Speichertechnologie kann auch mit Offshore-Windparks kombiniert werden. Faszinierend erscheint die Idee, mit einer gemeinsamen Infrastruktur Schwachgasvorkommen unter der Nordsee zu nutzen. Inwieweit dies technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, ist noch nicht abschließend geklärt.

CAES-Kraftwerke werden derzeit weltweit konzipiert, allein in den USA sind 10 Anlagen in Planung. Auch an der deutschen Nordseeküste soll bis 2011 ein CAES-Kraftwerk des Energieversorgers EnBW in Betrieb gehen. Zunächst noch konventionell mit Gas befeuert, wird es als Forschungsobjekt für die effizientere Speichertechnik mit Wärmespeicher dienen, die in einer zweiten Phase realisiert werden soll. Rund 20 Unternehmen und Institute arbeiteten an dieser AA-CAES-Technologie im Rahmen des EU-geförderten Projekts „Advanced Adiabatic – Compressed Air Energy Storage“. Industriell einsetzbare Anlagen werden bis etwa 2015 erwartet.

► PROJEKTADRESSEN

- Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen (Koordinator)
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Hans-Jürgen Haubrich
Schinkelstraße 6
52056 Aachen
- Alstom Power Generation AG, Baden
Ecofys GmbH, Berlin
E.ON Energie AG, München
E.ON Engineering GmbH,
Gelsenkirchen
KBB Underground Technologies
GmbH, Hannover
Repower Systems AG, Hamburg
Vattenfall Europe
Powerconsult GmbH, Vetschau

► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Literatur

- Verbesserte Integration großer Windstrommengen durch Zwischenspeicherung mittels CAES. Wissenschaftliche Studie, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin. Endbericht. FKZ 0327558. Alstom Power Generation AG, Baden; Ecofys GmbH, Berlin; E.ON Energie AG, München; KBB Underground Technologies GmbH, Hannover; Repower Systems AG, Hamburg; Vattenfall Europe Powerconsult GmbH, Vetschau (Hrsg.). 2006. 46 S. + 17 Anlagen; 29 S., 39 S.

Service

- Ergänzende Informationen wie Literatur, Adressen und Internet-Links sind beim BINE Informationsdienst erhältlich oder im Internet unter www.bine.info (Service/Infoplus) abrufbar

Abbildungsnachweis

- Abb 1: E.ON Kraftwerke GmbH, Wilhelmshaven
Abb 3: KBB Underground Technologies GmbH, Hannover
Abb 5: MAN TURBO AG, Oberhausen
Abb 6: Technische Universität Clausthal, Clausthal

PROJEKTORGANISATION

■ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
11055 Berlin

Projektträger Jülich (PTJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
Jochen Viehweg
52425 Jülich

■ Förderkennzeichen

0327558
0327628

IMPRESSUM

■ ISSN

0937 – 8367

■ Herausgeber

FIZ Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

■ Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares; Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

■ Autor

Dr. Franz Meyer

BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienztechnologien und erneuerbaren Energien:

In kostenfreien Broschüren, unter www.bine.info und per Newsletter zeigt BINE, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst von FIZ Karlsruhe.

Kontakt

Fragen zu diesem **projektinfo?**
Wir helfen Ihnen weiter:

Tel.: 0228 92379-44

 **BINE**
Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn
Kaiserstraße 185 – 197
53113 Bonn

Tel.: 0228 92379-0
Fax: 0228 92379-29

bine@fiz-karlsruhe.de
www.bine.info