

Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke zum Ausgleich fluktuierender Windenergie-Produktion¹

0 Zusammenfassung

Windenergie ist gekennzeichnet durch stark witterungs-, aber nicht bedarfsabhängige Erzeugung, die in Deutschland geographisch auf die Küstenländer konzentriert ist. Im nördlichen Deutschland deckt die Windenergie-Produktion in Schwachlastzeiten bei gleichzeitig hohem Windaufkommen schon heute den Bedarf an elektrischer Energie; es ist deshalb offensichtlich, dass der zukünftig vorgesehene Zubau an Windenergie-Kapazität in Deutschland von derzeit ca. 13.000 MW mit weiteren ca. 2.500 MW mittelfristig und ca. 25.000 MW langfristig mit der bestehenden Netz- und Kraftwerks-Struktur nicht realisierbar sein wird.

Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke ermöglichen – vergleichbar mit hydraulischen Pumpspeicher-Kraftwerken – die Aufnahme von Überschuss-Leistung 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 vorzuhaltenden Reserve-Kraftwerken, erheblich geringerer Brennstoff-Verbrauch und damit CO₂-Ausstoß sowie bessere Auslastung bestehender Netze bzw. geringerer Ausbaubedarf.

1 Einleitung

Der zunehmende Anteil der Windenergie-Erzeugung bei der Stromproduktion in Ländern wie Deutschland, Dänemark und Spanien führt inzwischen zu gravierenden Auswirkungen auf den Netzbetrieb, da die Windenergieproduktion durch starke Fluktuation und Abhängigkeit von Witterung, nicht aber Bedarf, gekennzeichnet ist, gleichzeitig aber gesetzlichen Vorrang für die Einspeisung genießt.

Um die Einspeise-Entnahme-Bilanz im Netz jederzeit zu gewährleisten, resultiert hieraus vermehrter Bedarf an Regel- bzw. Ausgleichsleistung. Da die heute vorhandenen Pumpspeicher- und Gasturbinen-Kraftwerke diese Aufgabe über ihre bisherige Aufgabe der Bereitstellung von Regelleistung hinaus nicht alleine leisten können, werden hierfür zunehmend Mittellast- und teil-

weise auch Grundlast-Kraftwerke eingesetzt. Die Folge ist häufigerer Teillast-Betrieb mit vermindertem Wirkungsgrad bzw. höherem spezifischem Brennstoff-Verbrauch und damit CO₂-Ausstoß, um Kapazitäten für den Windausgleich vorhalten oder überschüssige Leistung abnehmen zu können. Damit werden die windseitig erzielten Einsparungen an fossilen Brennstoff und resultierenden CO₂-Emissionen teilweise wieder kompensiert.

Der Zubau weiterer Pumpspeicher-Kraftwerke scheitert an dem erheblichen Eingriff in die Umwelt, der mit dem Bau der erforderlichen großen Speicherbecken in Gebirgslandschaften verbunden ist. Eine realistische Alternative bieten Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke, die im Zuge des Ausbaus fluktuierender regenerativer Energie-Erzeugung, aber auch in Hinblick auf den zunehmenden Energiehandel an Strombörsen, in Zukunft an Bedeutung gewinnen werden.

2 Konzept eines CAES-Kraftwerks

Das grundlegende Ziel der großtechnischen Speicherung elektrischer Energie ist die Speicherung von Überschuss-Energie bzw. Speicherung von Energie mit niedrigeren Erzeugungskosten, erzeugt in Schwachlastzeiten, und die zeitversetzte Produktion in Zeiten erhöhter Nachfrage als Spitzenlast-Energie, siehe Abb. 1.

Das Grundkonzept eines Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerks, üblicherweise als CAES-Kraftwerk bezeichnet (CAES – Compressed Air Energy Storage), besteht in der räumlichen Aufteilung einer konventionellen Industrie-Gasturbine in Kompressor-Einheit für die Verdichtung der Speicherluft und 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 beträgt, erfolgt in Schwachlast-Zeiten je nach Verfügbarkeit mit überschüssiger Windenergie oder Energie nicht ausgelasteter Mittel- oder Grundlast-Kraftwerke, was auch zu einer erheblichen Verminderung der einzusetzenden fossilen Brennstoffe und des

¹ Autor: Fritz Crotogino, KBB Hannover (Schlumberger), Karl-Wiechert-Allee 3, 30625 Hannover
Crotogino@Hannover.Oilfield.Slb.com

Vortrag gehalten anlässlich des Herbsttreffens

des AK ENERGIE der DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT in Bad Honnef im Oktober 2003

resultierenden CO₂-Ausstoßes führt. Der separate Druckluftspeicher ermöglicht, Kompressor- und Gasturbinen-Betrieb zeitlich zu entkoppeln.

Abb. 2 zeigt das Konzept eines CAES-Kraftwerks 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 Einlagerung von Druckluft in dem untertägigen Speicher. In Zeiten hoher Nachfrage wird die gespeicherte, bereits komprimierte Druckluft der Brennkammer zugeführt; das gleichzeitig zugeführte Erdgas verbrennt und erhitzt die Druckluft, die in der Turbine expandiert und den Generator antreibt. Der Wirkungsgrad moderner CAES-Anlagen mit Luftvorwärmung über Abgas beträgt ca. 55 %. Ein besonderes Merkmal ist die hohe Flexibilität dieser Anlagen: Bereits nach ca. 3 min kann 50 % und nach 11 min die volle Leistung der Anlage am Netz zur Verfügung gestellt werden.

Als Druckluft-Speicher kommen für die erforderlichen großen Volumina Hohlräume im geologischen Untergrund infrage: Salzkavernen und in eingeschränkter Form auch natürliche Aquifer-Strukturen und aufgelassene Bergwerke.

Bei SALZKAVERNEN – siehe Abb. 3 – 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: geometrisches Volumen 300.000 m³ bis 700.000 m³, Teufenbereich 600 m bis 1.800 m, Druckbereich je nach Teufe bis über 200 bar.

AQUIFER-STRUKTUREN – siehe Abb. 4 – 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 Vergleich von Pumpspeicher- und CAES-Kraftwerken

Wie bereits erwähnt, kommen auf absehbare Zeit nur zwei Verfahren für die Speicherung elektrischer Energie im Netzmaßstab infrage: Hydraulische Pumpspeicher- und CAES-Kraftwerke.

Pumpspeicher- benötigen im Gegensatz zu CAES-Kraftwerken keinen zusätzlichen fossilen Brennstoff, ihr Wirkungsgrad ist mit bis zu 80 % erheblich günstiger. Nachteilig ist der erhebliche Eingriff in die Umwelt für die Erstellung von Stau- und Auffangbecken, der die Akzeptanz für Neuanlagen in Mitteleuropa weitgehend infrage stellt. Das jüngst in Betrieb genommene Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal (Leistung: 1.060 MW; Speicher-Kapazität: 8.480 MWh) stellt eine Ausnahme dar, da die Planung aus der Vorwendezeit datiert.

Die denkbare Nutzung weit bisher nicht genutzter entfernter Wasserreservoirs als zusätzliche Speicher z. B. in Nordnorwegen scheitert in der Praxis an den erforderlichen Höchstspannungsleitungen (Investkosten, Genehmigungsrisiko, fehlende Redundanz).

Druckluft-Speicher können umweltfreundlich im geologischen Untergrund errichtet werden; der sichtbare Teil der Anlage reduziert sich weitgehend auf das eigentliche Kraftwerk. Zahlreiche Salzvorkommen im Nordsee- und einige im Ostsee-Küstenbereich – auch off-shore (!) – 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.

Ein entscheidendes Merkmal zukünftiger Anlagen ist die mechanische Trennung der Hauptkomponenten Motor / Kompressor – Speicher – Gasturbine / Generator. Diese Lösung ermöglicht, die entscheidenden Auslegungsparameter Kompressorleistung, Speicherkapazität und Generatorleistung weitgehend unabhängig von einander festzulegen und insbesondere, diese Parameter in späteren Ausbaustufen bedarfsabhängig und unabhängig von einander anzupassen:

- *Einspeicher-Leistung* zur Aufnahme 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.

Die Investitions- und die Stromgestehungskosten liegen für beide Speicher-Varianten, Pumpspeicher- bzw. CAES-Kraftwerke, in ähnlicher Größenordnung.

4 Existierende und konkret geplante Anlagen

Das CAES-Kraftwerk HUNTORF der E-ON Kraftwerke wurde Ende der 70er Jahre als erstes seiner Gattung in Betrieb genommen; es ist ausgelegt für einen Turbinen-Betrieb mit 290 MW über 2 h und Kompressor-Betrieb mit 60 MW 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. 5 zeigt ein Luftbild der Anlage, Abb. 6 einen Schnitt durch den geologischen Untergrund mit den beiden Speicherkavernen.

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.

Derzeit befinden sich in den USA mehrere Anlagen in der konkreten Planung; das bekannteste Projekt ist in Norton, Ohio, geplant. 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 entsprechend 520.000 MWh.

5 Praktische Anwendungen

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

- Überführung geringwertiger Schwachlast-Energie in hochwertige Spitzenlast-Energie (Energie-Veredlung)
- Verwertung von Überschussstrom aus dem Grundlastbereich
- Unmittelbare Deckung von Spitzenbedarf im Stromversorgungsnetz
- Optimierung des Betriebs thermischer Kraftwerke durch Einschränkung deren Einsatzes für Leistungsregelung und damit Verlängerung deren Betriebszeit mit konstanter Leistung
- Wiederaufbau eines Netzes nach Zusammenbruch (Schwarzstart-Fähigkeit).

Nachfolgend werden zwei konkrete Möglichkeiten, ein CAES-Kraftwerk zum Ausgleich fluktuierender

Energieproduktion einzusetzen, diskutiert (s. Abb. 7):

OPTION I besteht in der Integration in einen Pool von Windparks vor Einspeisung der Leistung in das Netz. Diese Konstellation ermöglicht die garantierte Abgabe einer definierten Leistung über einen definierten Zeitraum an den Netzbetreiber; das Windenergie-Kraftwerk verhält sich ähnlich einem konventionellen Kraftwerk.

Einer Realisierung dieser technisch sinnvoll erscheinenden Lösung stehen die derzeitigen Förderregularien für erneuerbare Energie im Wege, die keinen finanziellen Bonus für eine „Veredlung“ von fluktuierender erneuerbarer Energie vorsehen.

OPTION II: Einsatz eines CAES-Kraftwerkes zur kostengünstigen Erzeugung von Regelleistung (Minuten- und ggf. Sekundärreserve²). Die zunehmende Einspeisung bevorrechtigter, fluktuierender Windenergie erfordert vermehrt die Bereitstellung von Reserve-Kapazität zum Ausgleich von Flauten und Regelleistungs-Kapazität zur schnellen Reaktion auf größere Fehlanpassung von Strom-Bedarf und -Erzeugung im Netz.

Da die heute vorhandenen Pumpspeicher- und Gasturbinen-Kraftwerke diese Aufgabe über ihre bisherigen Aufgaben der Bereitstellung von Regelleistung hinaus nicht alleine zusätzlich leisten können, werden hierfür zunehmend Mittellast- und teilweise auch Grundlast-Kraftwerke (Braunkohle, Kernkraft) eingesetzt. Die Folge sind Teillast-Betrieb bei vermindertem Wirkungsgrad und damit höherer spezifischer CO₂-Ausstoß (Ausnahme Kernkraft) sowie höherer Wartungsaufwand.

Da Teillastbetrieb nicht unbegrenzt möglich ist, müssen bei hoher Windenergieeinspeisung im Norden und gleichzeitig niedriger Last zeitweise große Leistungen in die Verbrauchsschwerpunkte anderer Netzbereiche verschoben werden, was mit zusätzlichen Netzverlusten verbunden ist.

Unter dem Strich geht mit diesen Maßnahmen ein Teil des ökologischen Vorteils beim Übergang auf erneuerbaren Energien wieder verloren; dieser negative Trend verstärkt sich mit zunehmendem Anteil der Windenergie-Erzeugung.

Eine Lösung bei der Bereitstellung von Regelleistung bieten flexible Gasturbinen- und insbesondere Speicher-Kraftwerke. Letztere sind

² Bei Regelleistung wird unterschieden zwischen Primär-, Sekundär- und Minutenreserve. Kriterium ist der Zeitpunkt, zu dem die Leistung verfügbar sein muss nach Anfall der Regelabweichung.

hierbei reinen Gasturbinen-Kraftwerken überlegen, da sie nicht nur Regelleistung erzeugen, sondern in Schwachlastzeiten auch aufnehmen können; hieraus ergibt sich der wesentliche Vorteil, diese negative Regelleistung später in Hochlastzeiten als kostengünstige Antriebsleistung wieder nutzen zu können; bei Einsatz von CAES-Kraftwerken ist ein um 40 bis 60 % geringerer Brennstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß zu erwarten.

Im Gegensatz zu OPTION I (Speicherkraftwerk als Bestandteil eines Pools von Windparks) wäre bei OPTION II eine Kraftwerksgesellschaft typischer Betreiber des Speicherkraftwerks zur Bereitstellung von Regelleistung, eine Gesellschaft, die das Speicherkraftwerk in ihren bestehenden Park an Grund-, Mittel- und Spitzenlast-Kraftwerken integriert; aber auch singuläre Lösungen sind denkbar. Der Betreiber wird hiermit in die Lage versetzt, sich an den Ausschreibungen der Netzbetreiber für Regelenergie mit kostengünstigerer und umweltfreundlicherer Regel- und Reserveleistung zu beteiligen.

Der Verbraucher profitiert langfristig von dieser Lösung durch geringere Aufschläge auf die Strompreise, die aus den Zusatzkosten für die Integration der Windenergie-Erzeugung in das Netz entstehen, sowie durch verminderte Belastung der Umwelt durch Treibhausgase.

Abb. 1: Stromproduktion eines Versorgers über 24h mit integriertem CAES-Kraftwerk

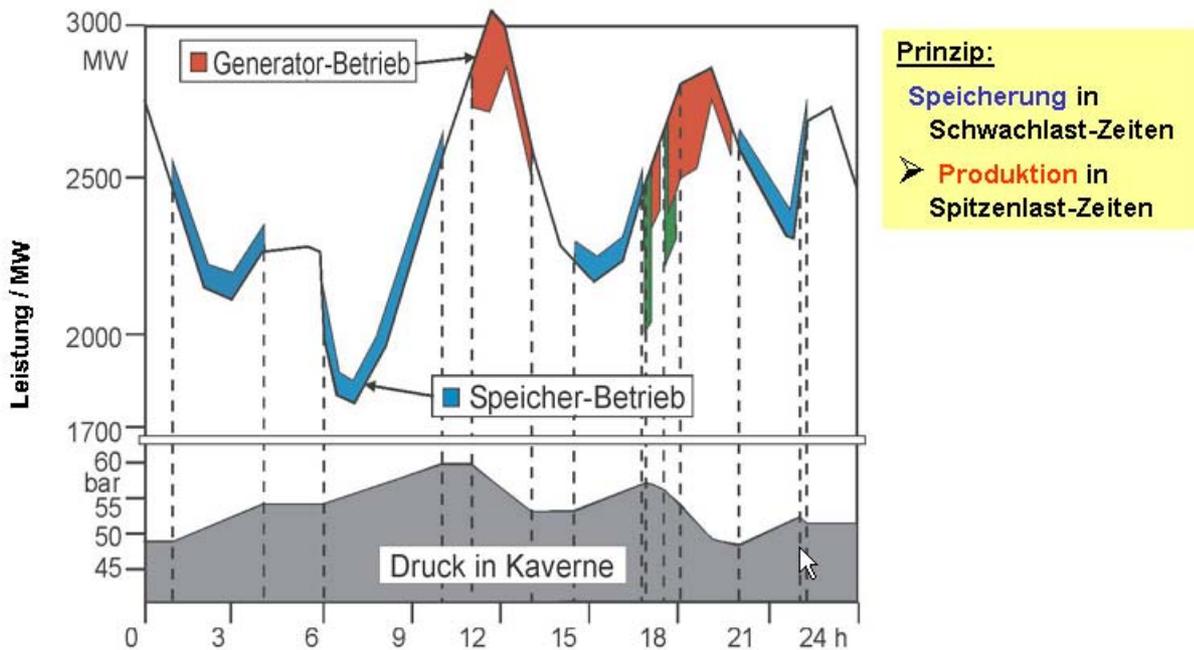


Abb. 2: Konzept eines CAES-Kraftwerks im Verbund mit einem Windpark

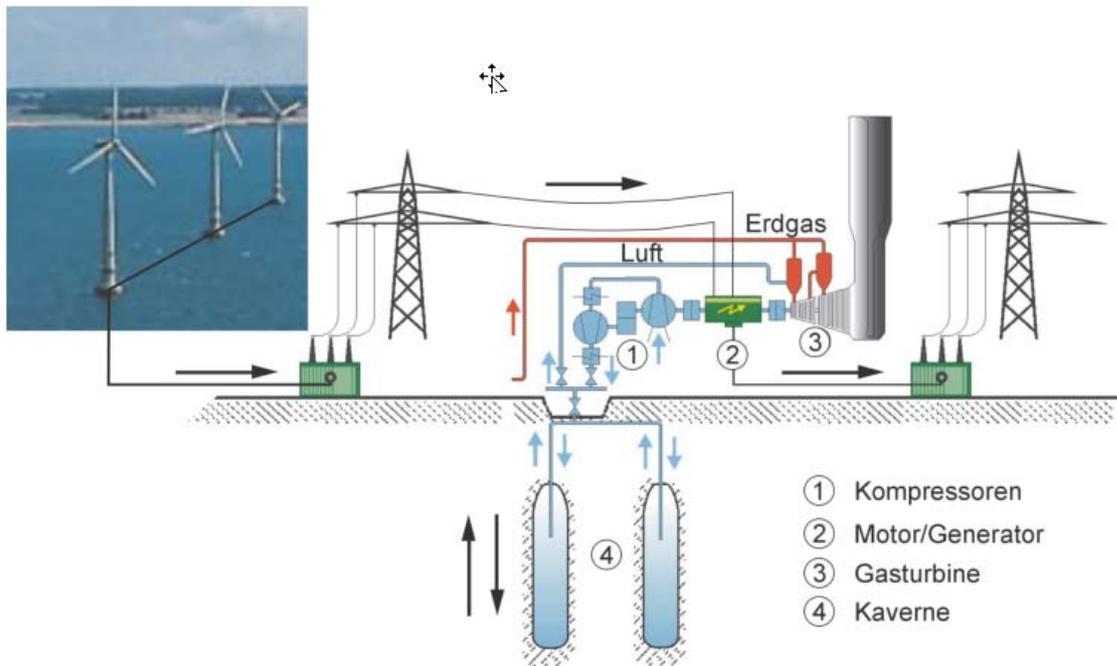


Abb. 3: Druckluft-Speicherung in Salzkavernen in einem Salzdom

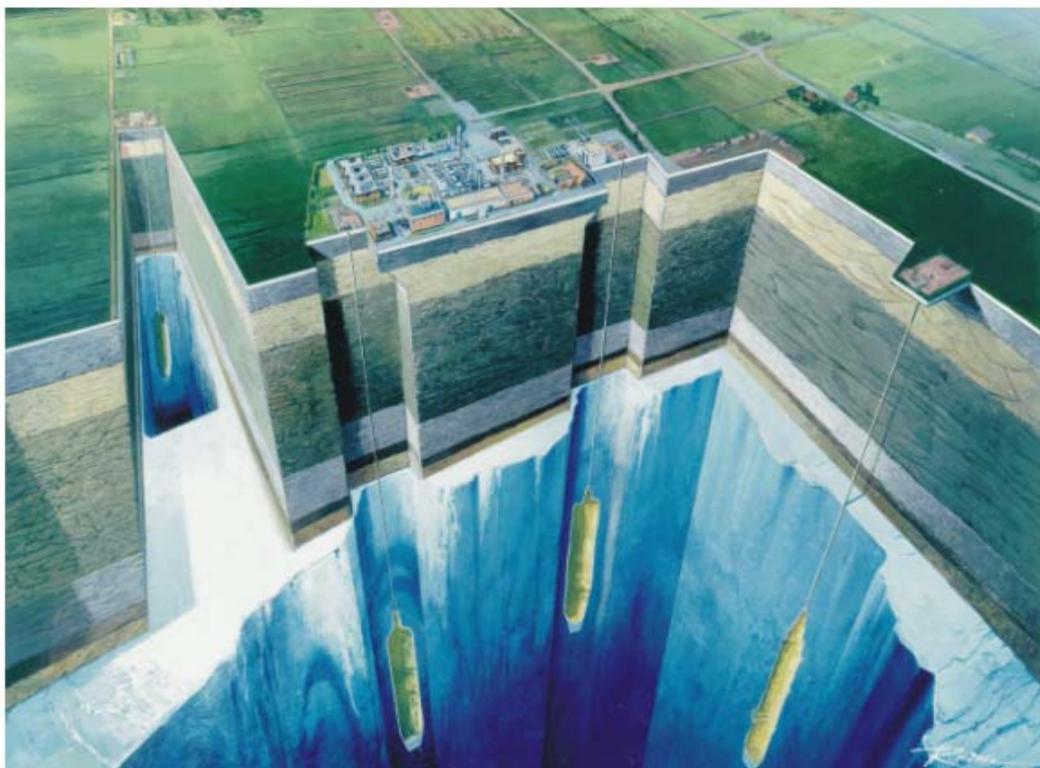


Abb. 4: Druckluft-Speicherung in einer Aquifer-Struktur



Abb. 5: 290 MW CAES-Kraftwerk Huntorf der E.ON Kraftwerke AG

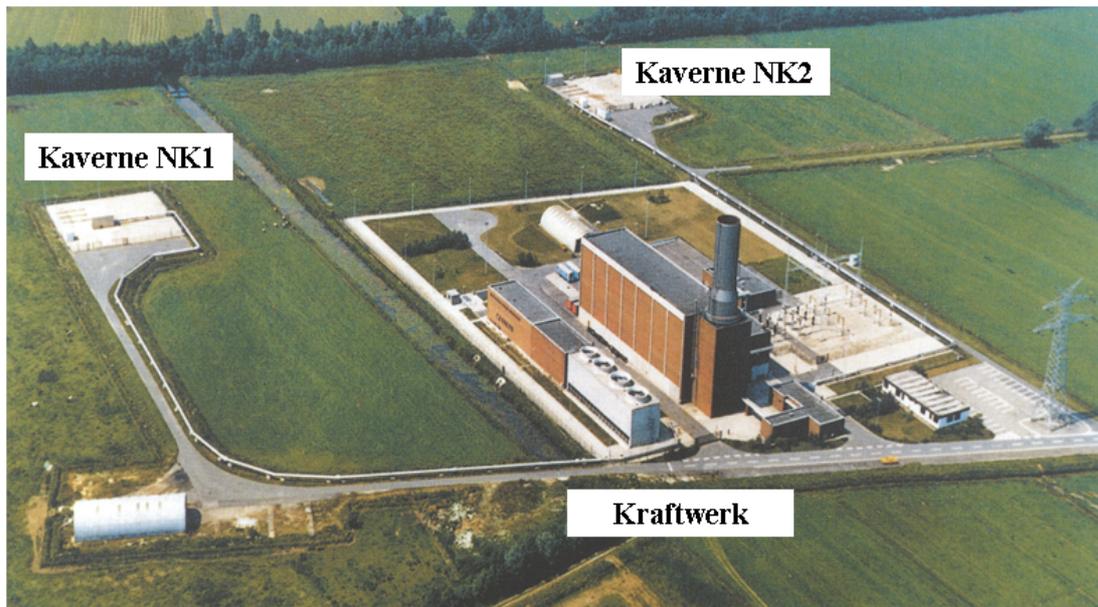


Abb. 6: Querschnitt durch den geologischen Untergrund des Druckluftspeichers in Huntorf

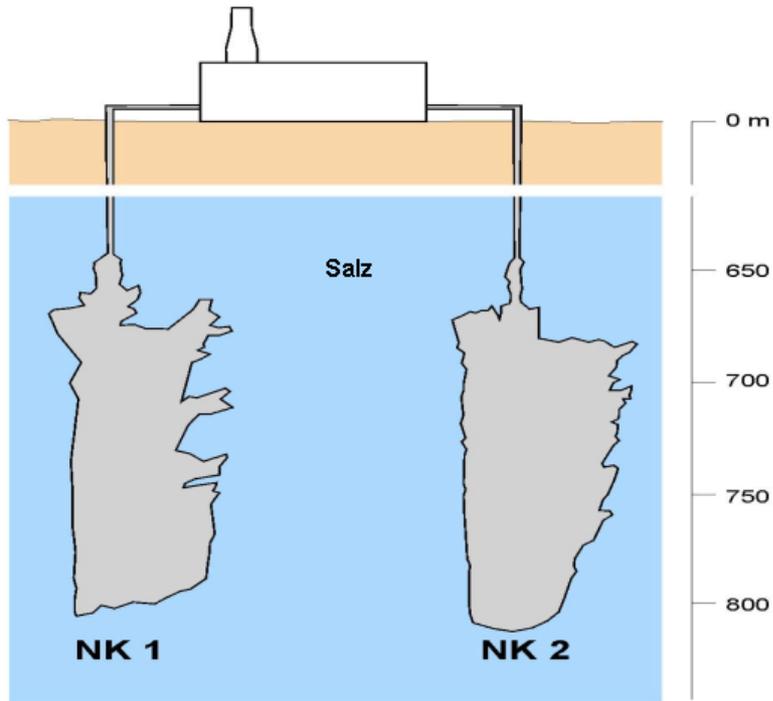


Abb. 7: Optionen zur Integration von CAES-Kraftwerken in das Netz

