

Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke für die netzverträgliche Integration erneuerbarer Energien

Dr.-Ing. Stefan Zunft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart

Dr.-Ing. Christoph Jakiel, MAN TURBO AG, Oberhausen

Dipl.-Ing. Andreas Nowi, ALSTOM Schweiz AG, Baden, Schweiz

Kurzfassung

Ein weiter erhöhter Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms ist Ziel nationaler und europäischer Energiepolitik. Die Netzintegration dieser fluktuierenden Energie wird dabei jedoch schon mittelfristig erhöhte Anforderungen stellen – insbesondere in den Küstenregionen in der Nähe von Offshore-Windparks. Speicher-technologien mit dem Potenzial zur großmaßstäblichen Umsetzung können die bei Netzausgleich und Strom-transport erwarteten Engpässe in ihren Auswirkungen erheblich abfedern. Dabei stellen adiabate Druckluftspeicherkraftwerke eine besonders aussichtsreiche Option dar. Sie ermöglichen einen emissionsfreien, reinen Speicherbetrieb mit hohem Speicherwirkungsgrad und einem hohen Anwendungspotenzial in Europa. Dieser Beitrag umreißt die Technologie und die im europäischen Projekt AA-CAES dazu durchgeführten Entwicklungen.

1 Einführung

Die Abhängigkeit von Importenergie ist – neben der Reduktion der klimarelevanten Emissionen – eine der wesentlichen Triebkräfte für die Entwicklung und Nutzung erneuerbarer Energien: Die Energieeinfuhren der EU sollen bis 2030 auf 70% steigen – heute sind es etwa 50%. Zusammen mit einer global stark ansteigenden Energienachfrage – es wird eine 30%-ige Zunahme bis 2030 erwartet – dürften so erhebliche Energiepreisseigerungen mit entsprechenden Lasten für Verbraucher und Märkte die Folge sein [1].

Solchen Entwicklungen durch eine Diversifizierung des Energiemixes in Richtung erneuerbarer Energien entgegenzuwirken, ist erklärtes Ziel europäischer und deutscher Energiepolitik. Bis zum Jahr 2010 sollen 12% des europaweit verbrauchten Stroms aus erneuerbaren Quellen – größtenteils aus Offshore-Windstrom – kommen. Eine weitere Anhebung dieses Ziels auf 15% bis 2015 ist im Gespräch.

Die Netzintegration des erneuerbaren Stroms stellt jedoch die Netz- und Kraftwerkssysteme vor erhebliche Herausforderungen. Dazu durchgeführte Studien weisen darauf hin, dass die bestehende Netzinfrastruktur schon sehr bald an seine Kapazitätsgrenzen stoßen wird. So ermittelt die „dena-Netzstudie“ Engpässe beim Netzausgleich und Transportkapazitäten ab 2015 [2].

Der Betrieb von Speicherkraftwerken mit entsprechend leistungsfähiger und kosteneffektiver Technik kann die Integrationsprobleme erheblich mildern:

Spitzenlaststrom kann CO₂-neutral bereitgestellt werden. Auch kann durch Vergleichmäßigungseffekte eine bessere Ausnutzung der knappen Transportnetzkapazitäten erreicht werden. Im Prinzip sind Pumpwasserkraftwerke dazu besonders geeignet und werden entsprechend eingesetzt. Leider sind die vorhandenen Kapazitäten wegen geographischer Beschränkungen nicht weiter ausbaubar. Druckluftspeicherkraftwerke auf der Basis unterirdischer Kavernen haben diesen Nachteil nicht und werden daher als Alternative mit vergleichbaren Betriebseigenschaften gesehen.

2 Druckluftspeicherkraftwerke mit adiabater Betriebsführung

Für den Betrieb von Druckluftspeicherkraftwerken gibt es mittlerweile mehr als 25 Jahre Betriebserfahrung: Eine erste Anlage mit einer Leistung von 290 MW wurde 1978 in Deutschland bei Huntorf gebaut. Eine weitere 110 MW-Anlage entstand 1991 in McIntosh, Alabama. Beide Anlagen sind bis heute in Betrieb. In Schwachlastzeiten speichern sie Strom aus Grundlastkraftwerken durch die Kompression von Luft in unterirdischen Kavernen. Bei Spitzenlastbedarf wird der Kavernenspeicher entladen, indem die komprimierte Luft zunächst erhitzt und dann in einer Gasturbine erspannt wird.

Diese „konventionelle“ Druckluftspeichertechnik benötigt für ihren Betrieb Erdgas, ist also eine „Hybridtechnik“, die zudem konzeptinhärente Wirkungsgradbeschränkungen aufweist.

Als Weiterentwicklung mit einer besseren Anpassung an die Entwicklung bei Energiepreisen und CO₂-Zertifizierung zielt die *Adiabate* Druckluftspeicher-technik darauf, diese Nachteile zu überwinden und eine lokal emissionsfreie, reine Speichertechnik mit hohem Wirkungsgrad zur Verfügung zu stellen.

Grundidee des Konzepts ist es, zusätzlich einen Wärmespeicher als zentrales Element des Aufbaus zu verwenden. Damit wird es möglich, die für den Expansionsprozess benötigte Wärme aus der Kompressionswärme des Beladungsprozesses bereitzustellen und so den bisher benötigten Gasbrenner zu vermeiden: Bei der Beladung muss dazu die Wärme der komprimierten Luft auf hohem Temperaturniveau entzogen und gespeichert werden. Bei der Entladung wird die zu entspannende Luft mit der gespeicherten Wärme auf die Kompressionsendtemperatur aufgeheizt, s. **Bild 1**.

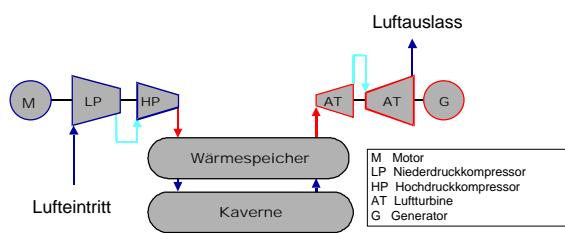


Bild 1 Prinzipskizze eines quasi-adiabaten Druckluftspeicherkraftwerks in einstufiger Anordnung

Eine solche adiabate Prozessführung wurde bereits zu Beginn der 1980er Jahre diskutiert, allerdings wegen der ambitionierten technischen Spezifikationen nicht weiterverfolgt. Heutige Marktbedingungen und eine fluktuierende Einspeisung aus erneuerbarer Energie führen jedoch zu neuen Bewertungen.

Das EU-Projekt „AA-CAES“ (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage) untersucht die technische und ökonomische Machbarkeit dieser Technik und entwickelt Konzeptentwürfe für die Anlagenkonfiguration und alle Anlagenkomponenten.

3 Zielanwendungen und Anlagenkonfiguration

Zur Absicherung der Marktnähe des Anlagenentwurfs werden die Entwicklungsarbeiten durchgehend von ökonomischen Analysen begleitet. Die einzelnen Technikoptionen werden danach nicht nur in technischer Hinsicht, sondern auch im Hinblick auf die Erlössituation bewertet. Das beschleunigt den Entwicklungsprozess zu einem marktfähigen System – eine

wegen der Vielzahl der Parameter recht komplexe Aufgabe.

Ökonomischer Anreiz zum Betrieb von Speicher-kraftwerken ist die Nutzung von Strompreisdifferenzen zwischen Spitzenlastzeiten und Niedriglastzei-ten. Weitere Einflussgrößen sind die am Zielmarkt vorhandenen Grundlast- und Spitzenlasttechnolo-gien, der vorhandene und projizierte Ausbau erneuer-barer Energien, vorhandene Speichertechnologien u.a. mehr. Eine Auswertung der bestimmenden Fak-toren zeigt, dass insbesondere die Niederlande, aber auch Deutschland, Belgien, Spanien und Großbritan-nien günstige Bedingungen für einen marktfähigen Betrieb solcher Anlagen aufweisen [4].

Zielanwen-dung	Betriebsstrategie	Typische Größe [MW]
Zentrale Anwen-dung	Erlöse aus Spotmarkt-Preisdifferenzen und Sys-temdienstleistungen	300
Dezentrale Anwen-dung an Windparks	Große Windparks: Erhö-hung der Vollaststunden, Systemdienstleistungen, Spitzenlastverkauf	150
Autarker Inselbetrieb in abgele-genen Ge-bieten	Kombination aus Wind-park und Druckluftspei-cher: Einsparung von Netzanbindung oder Gas-turbinensystem. Erhöhung der Vollaststunden des Windparks	10

Tabelle 1 Untersuchte Einsatzfelder für adiabate Druckluftspeicherkraftwerke

Die untersuchten Zielanwendungen der Technik sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Die am Hochspan-nungsnetz betriebene, zentrale Anwendung erzielt Erlöse durch die Veredelung preisgünstig erzeugten Grundlaststroms zu Spitzenlaststrom. Zusätzlich kann sie am Regelenergiemarkt agieren und dort pos-itive und negative Regelenergie anbieten. Diese Op-tion stellt sich als die günstigste Betriebsstrategie heraus. Weitere Möglichkeiten sind die direkte An-bindung an große Windparks und die Nutzung in In-selnetzen.

Die avisierten Anlagenleistungen liegen zwischen 10 MW bei Inselanlagen und 300 MW bei der zentra- len Anwendung. Einige Eckdaten günstiger Anlagenkonfigurationen sind in **Tabelle 2** zusammenge-fasst. Die Maximalwerte für Druck und Temperatur bewegen sich im Bereich zwischen 100 und 150 bar bzw. bis 620 °C. Damit sind Speicherwirkungsgrade von 70% und mehr erreichbar.

Konfiguration	Einstufig 300 MW	Zweistufig 10 MW (Inselnetz)
Kapazität [MWh]	1800	120
Erzeugungsleistung [MW]	300	10
Druck [bar a]	100	15 / 150
Luftdurchsatz (Laden) [kg/s]	220	20
Luftdurchsatz (Entladen) [kg/s]	550	20
Eintrittstemperatur Speicher (Laden) [°C]	620	450 / 450
Eintrittstemperatur Speicher (Entladen) [°C]	20	20
Austrittstemperatur Speicher (Entladen) [°C]	600	420 / 420

Tabelle 2 Eckdaten der bevorzugt untersuchten Konfigurationen

4 Entwurfsanforderungen

Die Techniken für die einzelnen Systemkomponenten sind zwar im Prinzip vorhanden, an den konkreten Entwurf sind jedoch hohe Anforderungen gestellt. Ebenso anspruchsvoll ist die Optimierung der freien Parameter des Gesamtsystems nach Kosten- und Effektivitätsgesichtspunkten.

So muss sich der Entwurf des Kompressorstrangs anstatt an der üblichen Annäherung an eine isotherme Kompression an einer adiabaten Kompression orientieren. Die Kombination hoher Drücke und Temperaturen in den letzten Stufen zusammen mit der Forderung nach hohen Wirkungsgraden und kurzen Anfahrzeiten erzwingt dabei Lösungen, die vom konventionellen Kompressorbau nicht abgedeckt werden.

Schwierige Entwurfsforderungen für die von Dampfturbinen abgeleiteten Druckluftturbinen sind hohe Wirkungsgrade über den gesamten Betriebsbereich, hohe Leistungsdichten sowie Schnellstartzeiten, die um eine Größenordnung kleiner sind als bei heutigen Maschinen.

Für den thermischen Speicher, ein zentrales Element des Aufbaus, gibt es bei den benötigten Betriebsbedingungen kaum vergleichbare Vorbilder, was hier grundsätzliche Überlegungen zur Wahl der Speicher-technik nötig macht. Hohe Drücke und Temperaturen, große Wärmeleistungen und Temperatursprei-zungen sowie die Fähigkeit, den Betriebsbedingun-

gen von Kompressor und Turbine zu folgen, sind zusammen mit Kostenaspekten die bestimmenden Spezifikationen.

Die Speicherung von Druckluft in unterirdischen Kavernen ist dagegen Stand der Technik. Die verschiedenen Betriebskonzepte erfordern eine größtmögliche Flexibilität bezüglich Speichervolumen, Drucksprei-zung und Speicherraten. Für die Schaffung solcher Kavernen bestehen mehrere Optionen, wobei das Aussönen von Salzkavernen die günstigste ist. Geeig-nete Salzformationen finden sich im Nordwesten Eu-ropas und lokal begrenzt auch in anderen europäi-schen Regionen.

Die genannten Anwendungen stellen z.T. hohe Anforderungen an das Startverhalten der Anlagen. Teil der Entwicklung sind daher auch Lösungen für den Schnellstart von Turbine und Kompressor.

5 Kompressorstrang

Aufgrund ihres modularen und anpassungsfähigen Aufbaus bieten Industriekompressoren die Mög-lichkeit, die individuellen Anforderungen von konven-tionellen und auch adiabaten Speicherwerkwerken opti-mal zu erfüllen. Allerdings sind Industriekompre-soren in der Regel mit Zwischekühlung ausgeführt, wodurch sich moderate Betriebstemperaturen erge-ben. Die hier für die adiabate Prozessführung benö-tigte Hochtemperaturtechnologie existiert zwar für Gasturbinenkompressoren, allerdings für sehr viel niedrigere Drücke. Daher wird ein neues Hochdruck-Hochtemperatur-Design benötigt, welches die Industriekompressorphilosophie und die Hochtemperatur-technologien von Dampfturbinen und Gasturbinen verbindet. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die kurzen Startzeiten dar, welche für die Be-reitstellung von Reserveleistungen erforderlich sind.



Bild 2 Einwellen-Radialkompressor für Industrie-anwendungen

Die in den obigen Textabschnitten beschriebenen Kraftwerkskonzepte und Anlagenparameter erfordern einen mehrgehäusigen Maschinensatz. Im Rahmen der Projektarbeiten wurde daher zunächst eine Reihe von Konzepten für die Gestaltung des Kompressorstrangs entworfen und untersucht. Die Anordnung der Kompressorgehäuse, Zwischenkühler und Wärmespeicher, sowie der Kompressortyp und die Anzahl und Größe der Verdichterstufen werden durch den Kraftwerksprozess bestimmt und mussten somit individuell für jeden Anwendungsfall neu ermittelt werden.

Das aussichtsreichste Strang-Layout besteht aus einem zwischengekühlten Axialkompressor als Niederdruckteil, sowie zwei nachfolgenden Einwellen-Radialkompressoren mit Hochtemperatur-Design, **Bild 3**. Mehrwellen-Radialkompressoren werden als Alternative vorgesehen, insbesondere für kleine Kraftwerksanlagen. Obwohl der adiabate Ansatz für den Kraftwerksprozess theoretisch keine Zwischenkühler vorsieht, benötigt ein realistisches Konzept dennoch in geringem Umfang Zwischenkühlung, um Speicherdruck und Endtemperatur voneinander entkoppeln zu können.

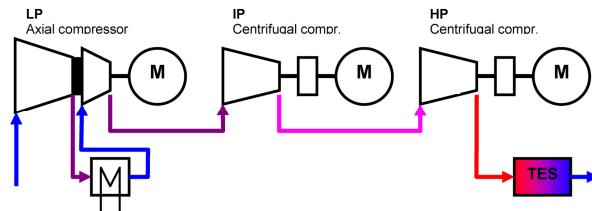


Bild 3 Basiskonfiguration des Kompressorstrangs für eine einstufige Kraftwerksanordnung

In der aktuellen Projektphase werden die Designgrundsätze für die hier formulierten Anforderungen entwickelt, z. B. durch Übernahme von Lösungsansätzen aus dem Dampfturbinenbau. Dabei werden eine Vielzahl von Themen, einschließlich Materialwahl, Welle-Nabe-Verbindungen und Montage, behandelt. Als Basis hierfür werden umfangreiche thermische und mechanische Simulationen durchgeführt, welche die stark transienten Betriebsbedingungen berücksichtigen.

6 Wärmespeicher

Der thermische Speicher ist ein zentrales Element der Kraftwerksanordnung und seine Leistungsfähigkeit ist entscheidend für den Wirkungsgrad des Gesamtprozesses. In der betrachteten Anwendung wird eine thermische Speicherfähigkeit von bis zu 2400 MWhth bei hohen Wärmeentnahmeraten und hoher Konstanz der Austrittstemperatur benötigt, um

die Entladezyklendauer von 4-12 Stunden zu ermöglichen. Gleichzeitig sind für hohe Prozesswirkungsgrade die Temperaturverluste beim Be- und Entladen gering zu halten.

Die Gestaltung des Speicheraufbaus erlaubt Freiräume, die insbesondere im Hinblick auf Kosten und technische Risiken zu untersuchen sind: Von den potentiell nutzbaren Speichertechnologien wurden Feststoffspeicher und Flüssigspeicher genauer untersucht. Beim Direktspeicher, der den direkten Kontakt des Luftstroms mit dem Speichermaterial vorsieht, kann besonders kostengünstig eine große Wärmeübertragungsfläche bereitgestellt und damit ein geringer Wärmeübertragungsverlust realisiert werden. Auf der anderen Seite wird damit ein druckbeaufschlagtes Speicherkonzept benötigt, was mit deutlichem Mehraufwand für den Behälter verbunden ist und für diese Komponente innovative Konzepte verlangt. Dennoch stellt sich diese Technologie in den Bewertungen als die günstigste Variante heraus, **Bild 4**.

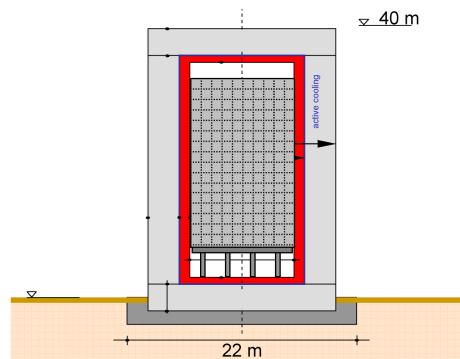


Bild 4 Wärmespeicher auf der Basis von Feststoffinventar in einem druckbeaufschlagten Behälter

Feststoffspeicher oder „Regeneratoren“ sind mit einer Vielzahl von Speichermaterialien einsetzbar, so etwa mit Naturstein, Beton, Feuerfestmaterial und Metall, siehe **Tabelle 3**. Diese Materialien umspannen einen weiten Parameterbereich im Hinblick auf thermophysikalische Eigenschaften und Kosten und eröffnen damit kostengünstige Entwurfsoptionen. Haltbarkeitsaspekte sind hier von besonderer Bedeutung, da eine Lebensdauer von 30 Jahren mit täglichen Zyklen anzusetzen ist.

Konzept	Feststoffspeicher				
	Schüttung	Cowper-Derivat	Betonwand	Guss	Hybrid-PCM
Inventar-material	Naturstein	Keramik	Beton	Guss-eisen	Keramik, Salz

Tabelle 3 Konzeptauswahl für Feststoffspeicher

7 Turbine

Die Aufgabe der Luftpumpe ist die Umwandlung der Druckenergie der heißen, komprimierten Luft in mechanische Energie zum Antrieb des Generators für die Stromproduktion. Der für die AA-CAES-Anlage spezifizierte Einsatzbereich erstreckt sich von 40% bis 100% Turbinenlast. Die hieraus resultierende Massenstromvariation in Kombination mit der durch Kavernengröße und -füllungsgrad gegebenen Druckvariation ergibt eine große Volumenstromvariation bis zu Faktor 3. Die Erzielung maximaler Wirkungsgrade über dem gesamten Einsatzbereich erfordert eine effiziente Eintrittsvolumenstromadaption. Herkömmliche Turbinenregelungskonzepte mit Ventildrosselung und Regelstufe scheiden aufgrund ihrer nachteiligen Verlustcharakteristika aus. Stattdessen wird im Rahmen des AA-CAES-Projekts ein Konzept für eine adaptive Eintrittsstufe entwickelt, die die Verarbeitung großer Druck- und Massenstromvariationen mittels verstellbarer Leitschaufeln bei hohen Wirkungsgraden erlaubt. Eine besondere Herausforderung hierbei stellt die bisher unbekannte Kombination von hohen Drücken und hohen Temperaturen dar.

Eine weitere Folge der großen Volumenstromvariation ist eine starke Dralländerung am Austritt der Turbine, die zu extremen Diffusorfalschanströmungen und damit verbundenen Wirkungsgradminderungen führt. Zur Minimierung dieser Verluste wird ein Diffusor mit adaptiver Eintrittsleitreihe und optimierter Geometrie für axial-radiale und axial-axiale Abströmung implementiert.

Die Bereitstellung von Sekundär- und Minutenreserve erfordert eine ausgeprägte Schnellstartfähigkeit von Turnbetrieb bis Volllast im Bereich weniger Minuten. Zum Vergleich: die Anfahrzeiten konventioneller Dampfturbinen liegen etwa eine Größenordnung darüber. Mittels gezielter Wärmezufuhr sollen die für die mechanische Beanspruchung während des Anfahrens bestimmenden Betriebstemperaturprofile während der Stillstandzeiten konserviert werden. Dies erlaubt ein schnelles Wieder-Beladen der Turbine ohne erhöhten Lebensdauerverbrauch.

Die beschriebenen Konzeptentwicklungen erfolgen auf Basis des modularisierten ALSTOM-Standardsortiments, dessen Module an die spezifischen Konzept-, Standort- und Kundenanforderungen angepasst werden können (s. **Bild 5**), unter besonderer Berücksichtigung der über 25-jährigen Betriebserfahrung mit der Anlage Huntorf.

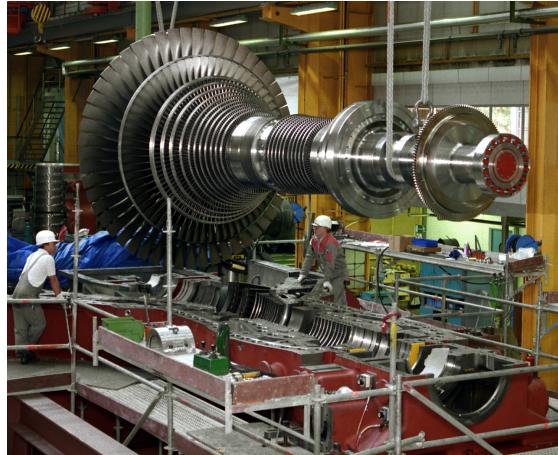


Bild 5 Eingehäusige, einflutige Turbine mit großer Leistungsdichte

8 Zusammenfassung

Für eine Entwicklung zu einer sicheren Energieversorgung mit einem erhöhten Anteil erneuerbarer Energien muss der Aspekt der Netzintegration angegangen werden. Stromspeicher auf der Basis leistungsfähiger und kosteneffizienter Technologien können hierbei eine entscheidende Rolle spielen.

Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke sind dafür besonders geeignet. Sie ermöglichen eine lokal emissionsfreie Speicherung von Strom mit Speicherwirkungsgraden, die mit denen von Pumpwasserkraftwerken vergleichbar sind. Anders als für letztere besteht ein hohes Anwendungspotential an vielen Standorten Europas.

Das EU-Projekt AA-CAES untersucht die Machbarkeit und Leistungsfähigkeit dieser Technologie und entwickelt Konzepte für die aussichtsreichsten Anlagenkonfigurationen und Komponentenentwürfe. Um die Entwicklung zu umsetzbaren Konzepten hin zu beschleunigen, sind die Arbeiten von Marktstudien begleitet.

Als Ergebnis der Projektarbeiten zeigt sich u.a., dass große, netzgeführte Speicherkraftwerke die besten Aussichten auf eine kommerzielle Nutzung haben. Eine günstige Konfiguration solcher Anlagen ist ein einstufiger Aufbau mit moderaten Maximaldrücken. Damit können Speicherwirkungsgrade von 70% und mehr erreicht werden. Kleinere Zielanwendungen können von einem zweistufigen Aufbau profitieren.

Für alle Anlagenkomponenten konnten geeignete technische Lösungen identifiziert werden. Trotz der Ähnlichkeit der adiabaten Technik mit konventionel-

len Druckluftspeicheranlagen unterscheiden sich die Komponentenanforderungen beträchtlich. Für einige der Komponenten sind herausfordernde Spezifikationen zu erfüllen. Mit einer fortgesetzten Entwicklung ist jedoch kurz- bis mittelfristig die Realisierung einer Demonstrationsanlage möglich.

Die Untersuchung der geografischen und technischen Voraussetzungen zeigt ein großes Anwendungspotenzial in den europäischen Regionen zukünftiger Windenergieproduktion. Die vorläufigen Marktstudien weisen auf gute Marktperspektiven für die meisten Länder in diesen Regionen.

9 Literatur

- [1] European Commission: Green paper. A European strategy for sustainable, competitive and secure energy. Brussels, 2006
- [2] DENA (Ed.): Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore. www.dena.de
- [3] AA-CAES, Vertrag ENK6-CT-2002-000611 im 5. Rahmenprogramm der europäischen Kommission, www.cordis.lu
- [4] Gatzen C.: Modellgestützte Wirtschaftlichkeitsanalyse innovativer Speichertechnologien am Beispiel eines adiabaten Druckluftspeichers. 8. Symposium Energieinnovation „Erfolgreiche Energieinnovationsprozesse“, Graz, Austria 2004