

## Speicher für sicheren Strom allein aus Wind und Sonne

### Analyse des Speicherbedarfs einer sicheren und bedarfsgerechten erneuerbaren Stromversorgung Europas auf der Basis langjähriger Wind- und Globalstrahlungsdaten

Kompakt:

Erstmals wurde im Zuge der Dissertation des Autors „Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien“ systematisch analysiert wie viel Speicher eine sichere und jederzeit bedarfsgerecht lieferfähige Stromversorgung auf der Basis von Wind und Sonne erfordert. Die Forschungen zeigen die große Bandbreite von Lösungsmöglichkeiten für diese Herausforderung, die heute als Umbauziel für die nächsten Jahrzehnte angesehen wird. Dabei werden weder Einsparungen noch Eingriffe in Verbrauchsgewohnheiten (Lastmanagement) vorausgesetzt.

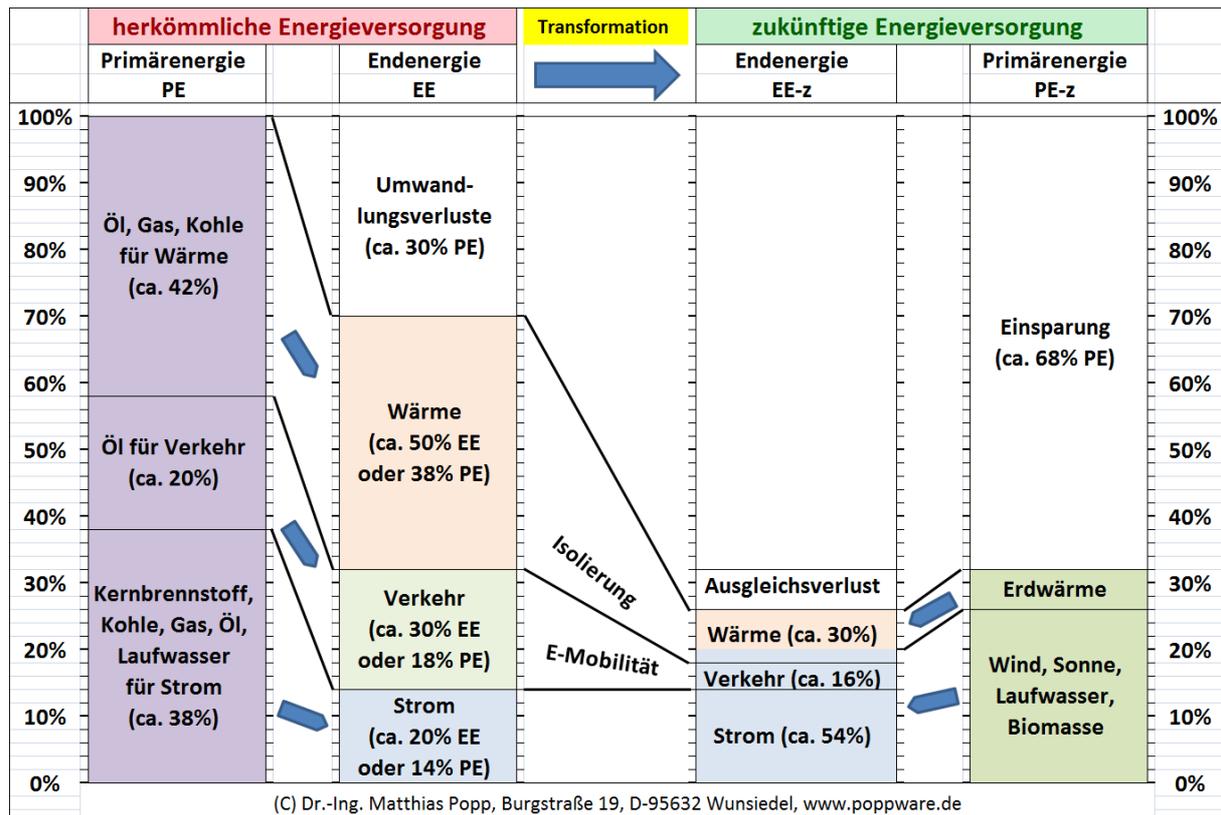
Die Arbeit liefert Grundlagen für einen ganzheitlichen und gesamtwirtschaftlich optimierten Ansatz beim Aufbau einer regenerativen Stromversorgung, der es erlaubt, konventionelle Kraftwerke nicht nur zu ergänzen, sondern zu ersetzen. Sie macht Vorschläge zur Errichtung großer Energiespeicher hohen Wirkungsgrads in Form von Ringwallspeichern, die es ermöglichen, die längsten zu erwartenden Defizitphasen von Strom aus Wind und Sonne zu überbrücken.

Die derzeitige energiepolitische Diskussion zum Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung vernachlässigt in hohem Maße, dass elektrische Energie präzise, zeitgenau auf die Nachfrage abgestimmt, verfügbar sein muss. Wetterlaunig, temporär über dem Bedarf verfügbare Energie, kann aber nur genutzt werden, wenn sie gespeichert und zeitversetzt abgegeben werden kann. Die Anforderungen an diese Speicher wurden erstmals systematisch analysiert.

Technisch stellt die Arbeit Lösungsvorschläge zur Diskussion, wie eine bedarfsgerechte und robuste Stromversorgung auf der Basis von Wind und Sonne errichtet werden kann. Ökologisch zeigt sie einen Weg, wie dies mit möglichst geringem Landverbrauch durchgeführt werden kann. Ökonomisch liefert sie maßgebliche Auslegungsparameter zu einer Minimierung der Gesamtkosten einer erneuerbaren Stromversorgung.

Die gewonnen Erkenntnisse lassen sich kommerziell nutzen durch den Bau der vorgeschlagenen Speicher zum Langzeitausgleich von Strom aus Wind und Sonne und durch geschickte Kombination des Aufbaus von Wind- und Solarenergieanlagen. Diese Frage erlangt hohe Brisanz, wenn mit dem Ausstieg aus der Kernenergie und der Begrenzung von CO<sub>2</sub> Emissionen in Zukunft ernst gemacht werden soll und durch die Politik dafür geeignete wirtschaftliche Anreize entwickelt werden. Die Vorschläge sind zudem geeignet, für eine energiewirtschaftliche Nachfolgenutzung von Tagebaugebieten, wenn dies in der Abbauphase berücksichtigt wird.

Die Transformation der Energieversorgung, wie in Abbildung 1 dargestellt, erhält, bei einer drastischen Einsparung von Primärenergie, den Lebensstandard der Verbraucher. Die herkömmlichen nuklearen und fossilen Primärenergieträger werden durch nachhaltig verfügbare Energien aus Sonne, Wind, Wasser, Biomasse und Erwärme ersetzt. Bei der benötigten Endenergie kommt es zu erheblichen Einsparungen ohne Komforteinschränkungen durch Isolation von Gebäuden und durch elektrisch betriebene Fahrzeuge.



**Abb. 1.** Transformation der Energieversorgung. Die erreichbaren Einsparungen und die Ausgleichsverluste der zukünftigen Energieversorgung hängen stark von der konkreten Ausgestaltung der Transformation ab. Abweichungen von den überschlägig angebrachten Prozentsätzen können dadurch in erheblichem Umfang auftreten.

Nur noch wenige Verkehrsmittel wie z.B. Flugzeuge werden auf flüssige Brennstoffe angewiesen sein, die dann aus Biomasse hergestellt werden können.

Wichtigstes Standbein der Energieversorgung mit einer Größenordnung von beispielsweise 75% am gesamten Endenergiebedarf der Verbraucher wird der Strom sein. Über Wärmepumpen kann damit auch die Erdwärme zur Gebäudeheizung erschlossen werden.

Die Isolierung von Gebäuden und die Substitution der herkömmlichen Primärenergieträger durch Strom aus regenerativen Quellen ermöglicht eine drastische Reduzierung des Energiebedarfs. Wegen der Volatilität des Energiedargebots aus Wind und Sonne werden Speicher und großräumige leistungsstarke Stromübertragungsnetze benötigt. Die damit verbundenen Wirkungsgradverluste werden durch den Aufbau zusätzlicher Wind- und Solarenergieanlagen ausgeglichen.

Der Ausgleichs- und Speicherbedarf einer bedarfsgerechten Stromversorgung allein aus Wind und Sonne, hängt von zahlreichen Parametern ab. Er variiert zwischen einigen Tagesladungen<sup>1</sup> und mehreren Monatsladungen der durchschnittlich nachgefragten elektrischen Leistung. Diese Einflussparameter wurden in der Dissertation<sup>2</sup> systematisch untersucht. Mit Ringwallspeichern werden Pumpspeichersysteme zur Diskussion gestellt, die in allen Ländern, unabhängig von Gebirgen, errichtet werden könnten, um die Speicherlücke zu schließen.

<sup>1</sup> Eine Tagesladung ist die Energie, die in einem Versorgungsgebiet im Langzeitdurchschnitt an einem Tag umgesetzt wird.

<sup>2</sup> Matthias Popp: Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien, Springer Verlag 2010

Die Einbindung von Wind- und Solarenergieanlagen in das Stromversorgungsnetz, in der in Zukunft geplanten Größenordnung, als Ersatz für Kohle und Kernkraftwerke, erfordert Speicher in erheblichem Umfang. Die Frage, welchen Ausgleichs- und Speicherbedarf eine so aufgebaute Energieversorgung erfordert, wurde in der Vergangenheit, bemerkenswerter Weise, kaum erforscht. Das betrifft auch die Frage, von welchen Einflussparametern dieser Bedarf abhängt. Öffentliche und in Medien ausgetragene Diskussionen bei der Errichtung von Speicherbauwerken sind häufig von Unkenntnis darüber geprägt, welche wichtige Rolle Stromspeichersysteme für eine nachhaltige regenerative Stromversorgung spielen.

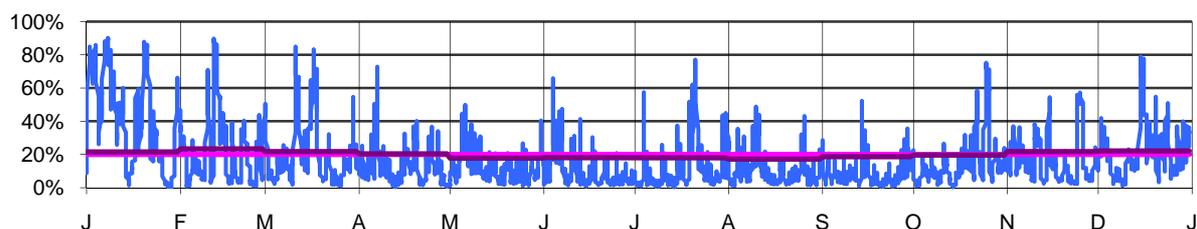
Der so launig wie das Wetter verfügbare Strom aus Wind und Sonne orientiert sich, im Gegensatz zu dem Strom, der mit konventionellen Kraftwerken produziert wird, nicht an der Nachfrage. Eine Stromversorgung funktioniert allerdings nur, wenn der ins Netz eingespeiste Strom exakt der Nachfrage folgt. Solange Wind und Sonne nur in geringem Umfang zur Stromversorgung beitragen, können andere, bedarfsgerecht arbeitende Kraftwerke, in dem Maß wie dieser Strom anfällt, ihre Leistung zurücknehmen und dafür sorgen, dass die Bilanz aus Erzeugung und Verbrauch ausgeglichen ist. Die Windenergie erreicht in einigen Regionen bereits heute eine Größenordnung, die bei Starkwind zu einem Überangebot führt. Mit der vorher beschriebenen Methode und den Möglichkeiten des konventionellen Kraftwerksparks lässt sich dieses nicht mehr ausgleichen.

Mögliche Ventile, um die Stabilität der Stromversorgung zu erhalten, sind dann noch der Export, wenn entsprechende Leitungskapazitäten vorhanden sind oder die Abschaltung von Windenergieanlagen.

Wenn die technischen Voraussetzungen dafür vorhanden sind, kann auch die abgenommene Windleistung reduziert werden. Wären Speicher verfügbar, dann könnten diese mit der ansonsten ab zu regelnden Leistung aufgeladen werden.

### Leistungsdargebot der Windenergie und Stromnachfrage

Wind und Sonne können, im Gegensatz zu anderen regenerativen Energien, auch in Deutschland, ein Vielfaches von der Energie liefern, welche im Land benötigt und verbraucht wird. Die Einspeisung von Windenergie ins deutsche Stromnetz ist in Abbildung 2 beispielhaft für das Jahr 2005 dargestellt.

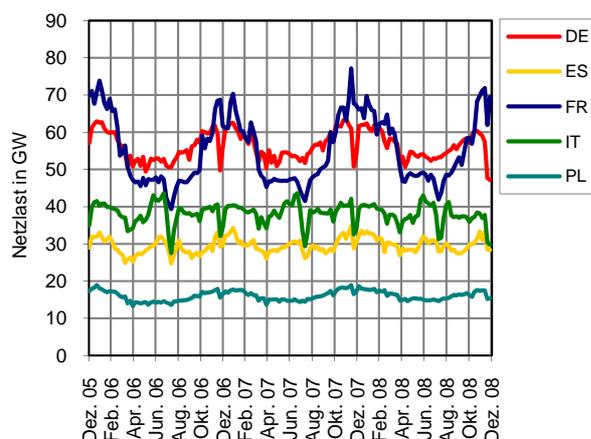


**Abb. 2.** Tatsächliche Windstromeinspeisung in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2005 bezogen auf die installierte Leistung (blau). Im Durchschnitt abgegebene Leistung (rosa). 100% entspricht der zum jeweiligen Zeitpunkt installierten Nennleistung der Windenergieanlagen. Mit der Durchschnittsleistung vergleichender Verlauf der durchschnittlichen monatlichen Stromnachfrage (lila). (Quelle: eigene Berechnung, Datenbasis: ISET)

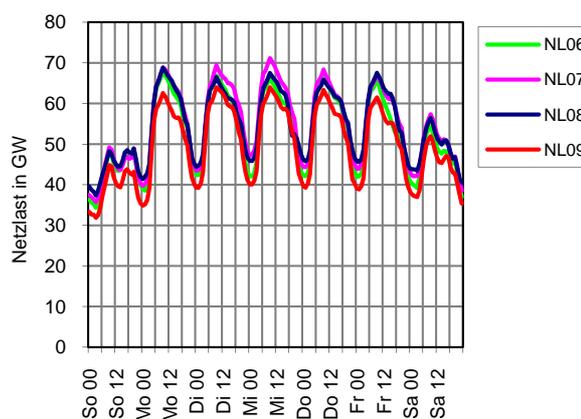
Aufgetragen ist die tatsächlich eingespeiste Leistung in Prozent, bezogen auf die Nennleistung der vorhandenen Windenergieanlagen. Die Nennleistung (100%) würde erreicht, wenn im gesamten Land der Wind so stark bliese, dass alle Windenergieanlagen ihre volle Leistung abgeben würden. Es zeigt sich, dass dies praktisch zu keinem Zeitpunkt eintritt, weil in einigen Regionen der Wind doch

schwächer ist. Allerdings lassen sich immer wieder Flaute feststellen, die das gesamte Land erfassen. Im Langzeitdurchschnitt kann man feststellen, dass die vom Kollektiv der deutschen Windenergieanlagen abgegebene Leistung etwa 20% der installierten Leistung (Nennleistung) erreicht. Der Benutzungsgrad der Anlagen liegt somit bei ca. 20%. Diese Leistungsentfaltung unterscheidet sich erheblich von der Stromnachfrage. Sie ist in Abbildung 2 mit ihren Monatsdurchschnittswerten im Vergleich zur Durchschnittswindleistung aufgetragen.

Die Stromnachfrage in Europa liegt gemäß Abbildung 3 im Winter etwas über ihrem Jahresdurchschnitt und im Sommer etwas darunter. Zudem weist sie einen typischen Tages- und Wochenverlauf auf, der in Abbildung 4 beispielhaft für eine Sommerwoche in Deutschland dargestellt ist.



**Abb. 3.** Zeitlicher Verlauf der Netzlant Wochen-Mittelwerte europäischer Länder mit mehr als 15 GW im Durchschnitt. (Datenquelle: entsoe.net, transparency platform of ENTSO-E)



**Abb. 4.** Zeitlicher Verlauf der Netzlant in Deutschland während der 26. Kalenderwoche der Jahre 2006 bis 2009. (Datenquelle: entsoe.net, transparency platform of ENTSO-E)

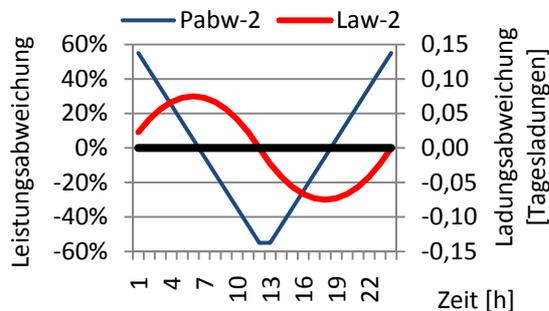
Sie unterscheidet sich allerdings deutlich von der volatili<sup>3</sup> verfügbaren Windleistung. Würde im Jahresverlauf mit Windenergieanlagen genau so viel Energie gewonnen, wie auch verbraucht wird, dann müsste damit immer dann, wenn ein Überangebot vorliegt, ein idealisiert angenommener verlustfreier Speicher gefüllt werden um damit die Defizite in Flautezeiten ausgleichen zu können.

### Ladungsabweichung bei Windenergie

Ein idealisierter Speicher würde, von seinem Anfangsladezustand ausgehend, Ladung aufnehmen, wenn ein temporäres Überangebot volatiler Windleistung vorliegt. Ladung müsste entnommen werden, wenn die verfügbare Windleistung nicht ausreicht, um die Nachfrage zu decken. Am Ende des Untersuchungszeitraums in dem **genau so viel Energie eingespeist, wie verbraucht** worden wäre, hätte der ideale Speicher wieder die gleiche Ladung wie am Anfang. Die Abweichung der Speicherladung vom Anfangs- und Endzustand wird als Ladungsabweichung bezeichnet. Sie kann in Tagesladungen in Bezug auf die im Langzeitdurchschnitt<sup>3</sup> nachgefragte Leistung anschaulich angegeben werden. Mit einer Tagesladung könnte ein Speicher die volle Versorgung für einen Tag mit der im Durchschnitt nachgefragten Last übernehmen, wenn wegen Flaute keine volatile Erzeugung stattfände.

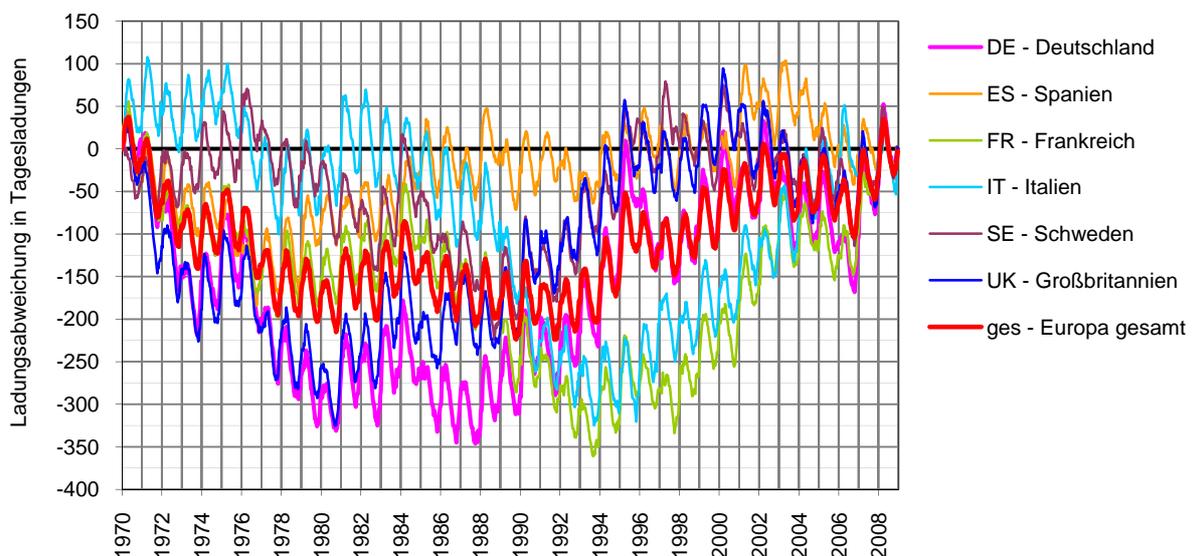
<sup>3</sup> launenhaft, wechselhaft (entsprechend Wetterlage und Sonnenstand)

Die in Abbildung 5 beispielhaft erklärte Ladungsabweichung ist besser, als die in Abbildung 2 gezeigte Leistungskurve geeignet, das Einspeiseverhalten volatiler Energieanlagen über einen längeren Zeitraum zu charakterisieren. Die Ladungsabweichung gibt einen deutlichen Hinweis auf den Ausgleichsbedarf, den eine bedarfsgerechte Stromversorgung erfordern würde.



**Abb. 5.** Ladungsabweichung: Wenn eine Erzeugungsleistung von ihrem Durchschnittswert erst nach oben, dann nach unten und schließlich wieder nach oben abweicht (siehe Pabw-2), dann würde, bei permanent geforderter Durchschnittsleistung, ein Speicher erst aufgeladen, dann entladen und danach wieder aufgeladen. Die Ladung (siehe Law-2, rechte Ordinate) des Speichers würde erst zunehmen, dann abnehmen und später wieder zunehmen. Die Ladungsabweichung zeigt anschaulich, wie ein Speicher beansprucht würde, um aus einer veränderlichen Leistung eine gleichbleibende, in Höhe der Durchschnittsleistung, zu machen. Die Ladungsabweichung ist viel besser als die äußerst wechselhafte Erzeugungsleistung aus Wind und Sonne, geeignet, den Ausgleichsbedarf zu beschreiben.

In der Dissertation wurde die Ladungsabweichung der Windenergie über 39 Jahre, von 1970 bis 2008, für alle Länder Europas untersucht. Ein Ergebnis ist in Abbildung 6 wiedergegeben.



**Abb. 6.** Ladungsabweweichung von Windenergieanlagen mit 20% Benutzungsgrad in Tagesladungen ausgewählter Länder sowie anteilsgewichtete Summe aller europäischen Länder des ETSO Verbundes von 1970 bis 2008.

Es zeigt sich für alle Länder Europas ein typischer Verlauf. Im Herbst und im Winter nimmt die Ladungsabweweichung zu – die Speicher werden aufgeladen, im Frühjahr und im Sommer nimmt die Ladungsabweweichung ab – die Speicher werden entleert. Das globale Wettergeschehen sorgt folglich in allen europäischen Ländern für stärkere Winde im Winter als im Sommer. Dieser kontinentale Effekt ließe sich folglich auch durch eine leistungsstarke Vernetzung Europas nicht ausgleichen. Abbildung 6 zeigt auch, dass die einzelnen Windjahre in den Ländern Europas und auch kumuliert, erhebliche Unterschiede aufweisen. Gesamteuropäisch geht aus dem Diagramm hervor, dass die 70-er Jahre überwiegend windschwächer waren. Die Speicher wären in diesem Zeitraum für ca. 200 Versorgungstage entleert worden. Ab etwa der Mitte der 90-er Jahre wären die Speicher aufgrund stärkerer Winde wieder aufgeladen worden. Dabei können im Vergleich einzelner Länder durchaus

erhebliche Unterschiede und deutlich höhere Ladungsabweichungen als im gesamteuropäischen Durchschnitt festgestellt werden.

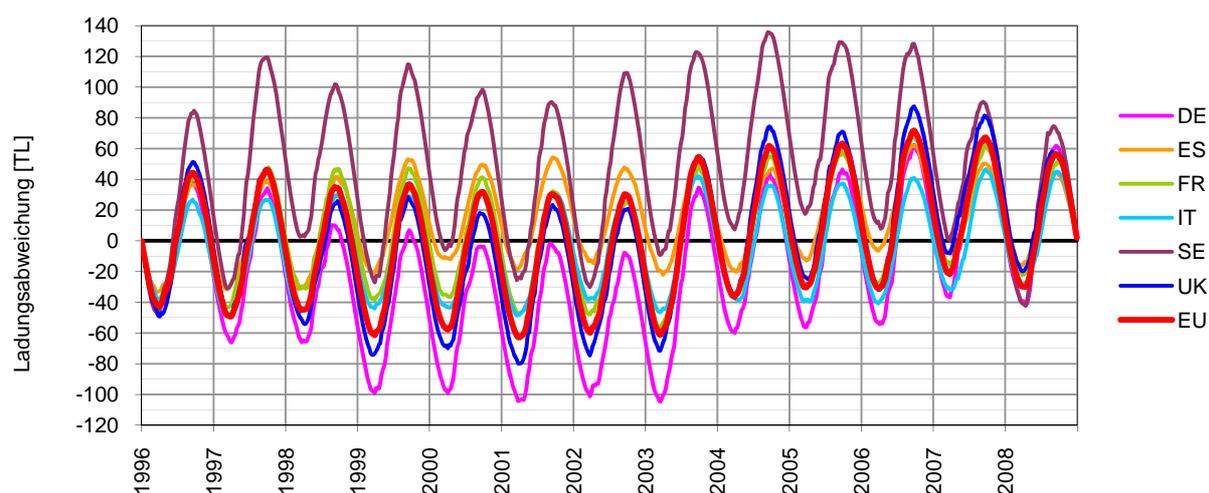
### Ladungsabweichung und Benutzungsgrad von Windenergieanlagen

Aus Abbildung 2 geht hervor, dass hohe Windleistungen im Vergleich zur installierten Nennleistung im deutschen Windpark relativ selten vorkommen. Würde man die Windenergieanlagen mit niedrigeren Generatorleistungen ausstatten, dann würde ihr Benutzungsgrad steigen, ohne dass es zu großen Einbußen bei der insgesamt umwandelbaren Windenergie käme. Dieses ginge einher mit einer deutlichen Reduzierung der Ladungsabweichungen. Der Abbildung 2 kann unschwer entnommen werden, dass das Leitungsnetz bei Windenergieanlagen mit 20% Benutzungsgrad auf die fünffache Leistung ausgelegt sein müsste, um Überschüsse abnehmen zu können, die über der durchschnittlichen Leistung liegen, mit der die Verbraucher dauerhaft versorgt werden könnten. Auch die Einrichtungen zur Aufladung der Speicher müssten, um die Leistungsspitzen aufnehmen zu können, etwa vier Mal höher ausgelegt werden, als diese an Abgabeleistung zur Versorgung bei Flauten benötigen würden. Niedrigere Nennleistungen führen zu höheren Benutzungsgraden von Windenergieanlagen. Auf diese Weise ließe sich ein Gesamtsystem zur bedarfsgerechten Versorgung mit niedrigeren Übertragungs- und Speicherladeleistungen aufbauen.

Möchte man die Nennleistungen nicht reduzieren und den Benutzungsgrad anheben, dann können die Rotordurchmesser vergrößert und die Naben der Windenergieanlagen in höhere Luftschichten mit größeren Windgeschwindigkeiten verlegt werden. Die Windleistung erhöht sich mit dem Quadrat der Rotordurchmesser und mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit<sup>4</sup>. Wird bei diesen Maßnahmen die Nennleistung beibehalten, dann erhöht sich die im Durchschnitt abgegebene Leistung und damit der Benutzungsgrad.

### Ladungsabweichung der Solarenergie

Ebenso wie beim Wind, kann die Ladungsabweichung auch für die Solarenergie bestimmt werden.



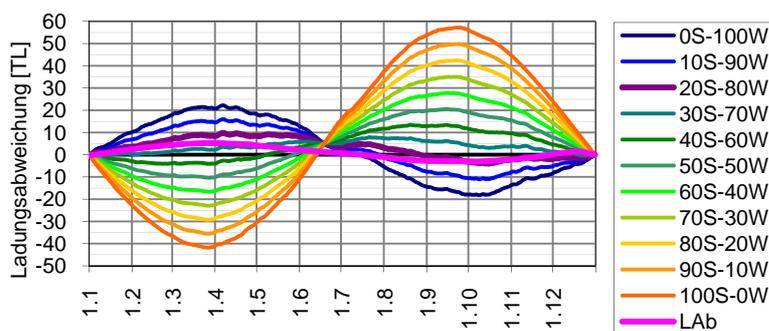
**Abb. 7.** Ladungsabweichung einer Solarstromversorgung mit zur Globalstrahlung proportionaler Leistungsabgabe in Tagesladungen [TL] für die großen Stromverbrauchsländer Europas und verbrauchsanteilgewichtet für alle Länder des ETSO-Verbands.

<sup>4</sup> doppelter Durchmesser => vierfache Leistung, doppelte Windgeschwindigkeit => achtfache Leistung

Hierfür stand über das physikalische Institut der Universität Oldenburg eine europaweite Datenbasis aus Satellitenmessungen von Meteosat über 13 Jahre von 1996 bis 2008 zur Verfügung. Die europäischen Ladungsabweichungen der Solarenergie sind in Abbildung 7 wiedergegeben. Erwartungsgemäß kann hier ein gegenläufiges Verhalten festgestellt werden. Speicher würden sich im Sommer füllen (Ladungszunahme) und im Winter leeren (Ladungsabnahme). Abbildung 7 zeigt, dass die jährlichen Ladungsabweichungen der Solarenergie in nördlichen Ländern deutlich stärker ausfallen als in den südlichen, was klar auf die größeren Unterschiede in den Tageslängen im Jahresverlauf zurückzuführen ist.

### Kombination reduziert die Ladungsabweichung

Der Befund der jahreszeitlich gegenläufigen Ladungsabweichungen zwischen Wind und Sonne legt es nahe, diese beiden Energieformen so zu kombinieren, dass sich die resultierende Ladungsabweichung möglichst gut an den Verlauf der Nachfrage anpasst. In Abbildung 8 ist beispielhaft für eine Region in der Mitte Deutschlands gezeigt, wie bei einer Kombination der volatilen Stromerzeugung, die sich aus Solar- und Windenergieanteilen zusammensetzt, die resultierende Ladungsabweichung verändert und an die Ladungsabweichung des Bedarfs angenähert werden kann.



**Abb. 8.** Variation der Anteile von Solar- und Windenergie zur Veränderung der Ladungsabweichungen in Tagesladungen [TL] des damit gewinnbaren Stroms gegenüber dem Strombedarf in Deutschland. Die unterstellten Windenergieanlagen weisen einen Benutzungsgrad von 50% auf und die verfügbare Solarenergie wurde leistungsproportional zur Globalstrahlung angesetzt. Basis ist eine Zeitpunktmittelung zwischen 1996 und 2008 für ein Gebiet zur Windenergiegewinnung in Hessen und das urbane Zentrum zur Solarenergiegewinnung Frankfurt am Main. ##S-##W (Beispiel: 20S-80W): Ladungsabweichung bei einer Erzeugungsstruktur mit den angegebenen prozentualen Beiträgen der Solarenergie und der Windenergie für die Kombinationskurve in %. Solaranteil und Windanteil zusammen ergeben immer 100%. LAB: Stromnachfrage, dargestellt als Ladungsabweichung des Bedarfs vom Mittelwert.

Im gezeigten konkreten Beispiel wird von Windenergieanlagen mit 50% Benutzungsgrad ausgegangen, die von Haus aus geringere Ladungsabweichungen aufweisen würden als die heute in Deutschland eingesetzten Anlagen mit ca. 20% Benutzungsgrad. Bei einer Stromerzeugung, die zu 80% aus Windenergie und zu 20% aus Solarenergie käme, würde sich in dieser Region die geringste Ladungsabweichung von der Nachfrage ergeben.

### Kontinentale Vernetzung

Weitere Ausgleichseffekte bei einer Stromversorgung mit volatilen erneuerbaren Energiesystemen ergäben sich durch eine leistungsstarke länderübergreifende Vernetzung von Erzeugungsgebieten. Abbildung 9 zeigt die Länder, die in der Untersuchung berücksichtigt wurden und bereits heute in einem kontinentalen Stromnetz zusammen geschlossen sind. Statistisch gesehen würden sich Überschüsse und Defizite des volatilen Energiedargebots mit dem Durchzug von Hoch- und Tiefdruckgebieten in den einzelnen Regionen häufig gegenseitig ausgleichen.



**Abb. 9.** Teilnehmerstaaten im Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber. (Quelle: Internetseite von ENTSO-E, Zugriff am 23.12.2009)

Allerdings ergibt die Wetterdatenanalyse über lange Zeiträume, dass auch mit kontinentalen Windflauten zu rechnen ist, bei der die europaweit verfügbare Windleistung auf unter 10% der Durchschnittsleistung abfällt. Auch lassen sich kontinentale Starkwindsituationen feststellen, bei denen Windenergieanlagen mit 20% Benutzungsgrad europaweit über das Vierfache ihrer durchschnittlichen Leistung abgeben könnten.

Eine großräumige Vernetzung kann deshalb zwar zu einer Reduzierung des Ausgleichs- und Speicherbedarf beitragen, sie kann diesen aber keinesfalls eliminieren.

Die Länder eines so aufgebauten erneuerbaren Energieverbands wären gleichberechtigte Partner, die zum gegenseitigen friedensstiftenden Vorteil voneinander profitieren würden. Die Kosten der eigenen Stromversorgungsinfrastruktur würden sich reduzieren und die Versorgungssicherheit würde zunehmen. Die den konventionellen Energiehandel prägenden Interessenskonflikte zwischen Liefer- und Abnehmerländern von Energierohstoffen würden wegfallen.

### Reale Versorgungssysteme

Mit der Betrachtung der Ladungsabweichung wurde von idealisierten Systemen mit verlustfreien Speichern und Übertragungsmöglichkeiten ausgegangen, bei denen die im Langzeitdurchschnitt verfügbare Erzeugung mit der im Langzeitdurchschnitt vorhandenen Nachfrage übereinstimmen müsste, damit die Energiebilanz aufginge.

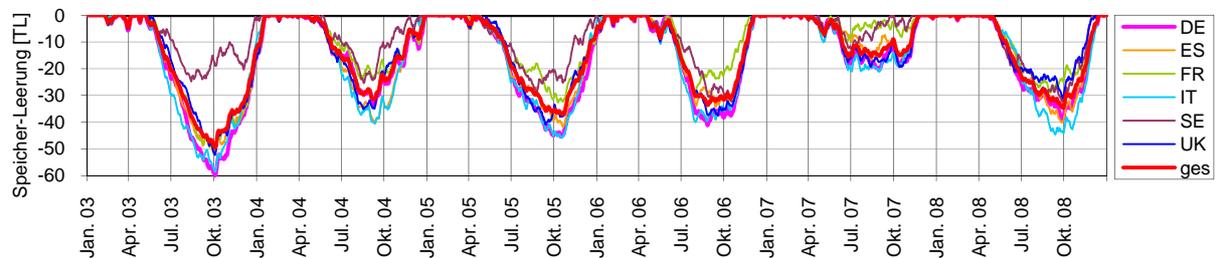
Reale Systeme weisen Verluste bei der Übertragung und Speicherung elektrischer Energie auf. Es lassen sich wind- und sonnenstärkere und – schwächere Jahre feststellen. Das Gleiche gilt für den Stromverbrauch. Speichergrößen und Leistungen, sowie Übertragungsleistungen können nur auf begrenzte Maximalwerte ausgelegt werden. Wie im konventionellen Kraftwerkspark ist es deshalb auch bei einer erneuerbaren Energieversorgung notwendig, Erzeugungsüberschüsse bereit zu halten, um alle auftretenden Verluste ausgleichen und um windschwache und nachfragestarke Jahre sicher überbrücken zu können.

Die bestehende konventionelle Stromversorgung ist deshalb so ausgelegt, dass sie die größte zu erwartende Nachfragespitze erfüllen kann. Diese liegt in Deutschland und in Europa beim ca. 1,6-fachen der im Durchschnitt nachgefragten Leistung. Bei einer alleinigen Stromversorgung aus Wind und Sonne müssten reale Speichersysteme in der Lage sein, diese maximale Leistung, zu erbringen, da es immer wieder landesweite Windflauten gibt und Solarstrom in der Nacht immer ausfällt. Je nachdem, mit welcher Erzeugungsreserve die durchschnittlich volatile Erzeugungsleistung über der durchschnittlich nachgefragten Leistung aufgebaut wird, beeinflusst das den Ausgleichs- und Speicherbedarf. Höhere Erzeugungsreserven reduzieren die Leerung von Speichern und sorgen dafür, dass diese schneller wieder aufgefüllt werden.

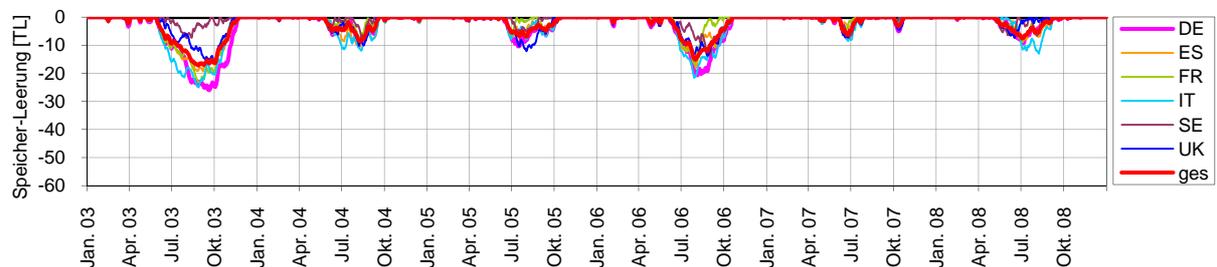
### Speicherleerungskurven zur Ermittlung des Speicherbedarfs

Die Abbildungen 10 a bis c zeigen Speicherleerungskurven für die größten Länder Europas und verbrauchsanteilsgerichtet für den gesamten Kontinent. Mit einer jeweiligen Erzeugungsreserve von

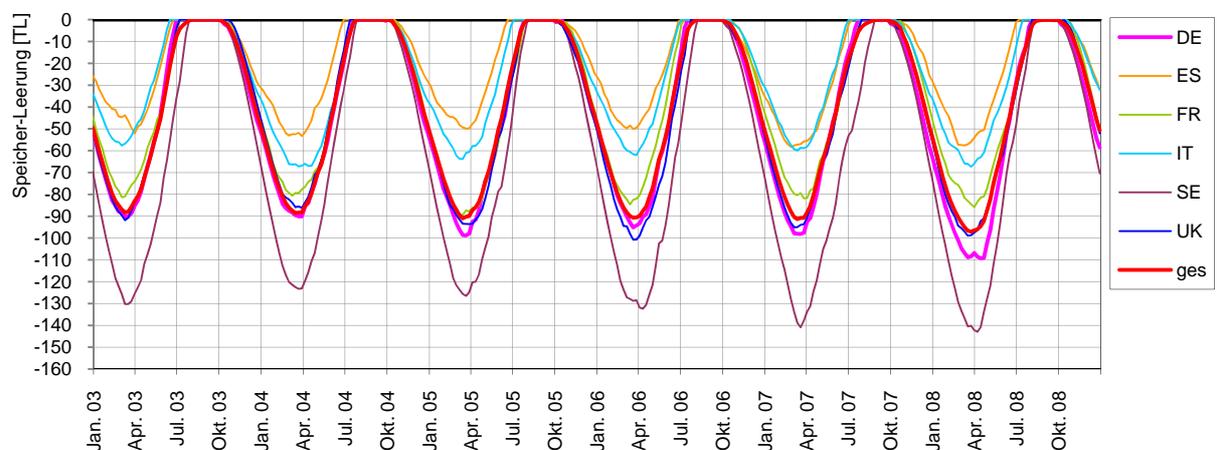
30%, Speichern mit 80% Wirkungsgrad<sup>5</sup>, leistungsstarker kontinentaler Vernetzung und einer Reihe weiterer Annahmen, die den Szenarien zugrunde liegen, zeigen sie die Inanspruchnahme von Speichern für eine sichere und bedarfsgerechte Stromversorgung, die alleine aus a) Windenergieanlagen mit 20% Benutzungsgrad, b) Windenergieanlagen mit 50% Benutzungsgrad und c) Solarenergieanlagen bestehen würde.



**Abb. 10 a.** Speicherleerung in Tagesladungen zu Windenergieanlagen mit 20% Benutzungsgrad



**Abb. 10 b.** Speicherleerung in Tagesladungen zu Windenergieanlagen mit 50% Benutzungsgrad

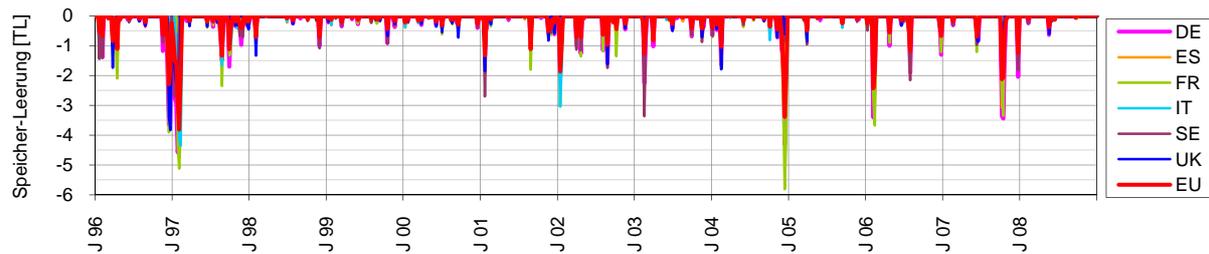


**Abb. 10 c.** Speicherleerung in Tagesladungen zu globalstrahlungsproportionaler Solarenergie.

Den Speicherleerungskurven, wie beispielhaft gezeigt, kann bei einer repräsentativen Langzeituntersuchung die erforderliche Speicherkapazität entnommen werden, die notwendig wäre um eine stets sichere und bedarfsgerechte Versorgung gewährleisten zu können. Der Vergleich der Speicherleerungsphasen zwischen Windenergie (Abbildungen 10 a und b) und Solarenergie (Abbildung 10 c) zeigt eindrucksvoll deren zeitlich gegenläufiges Auftreten.

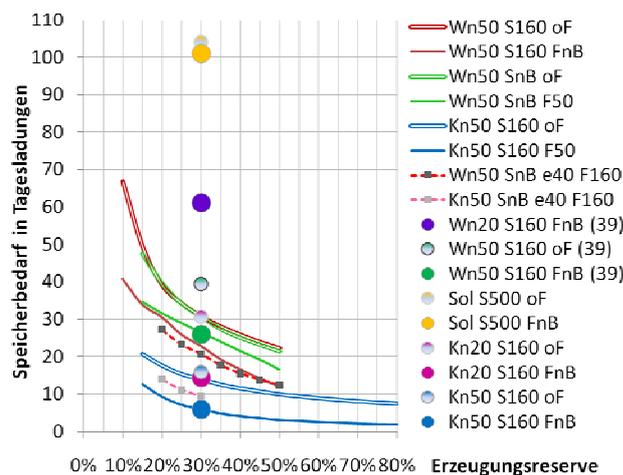
In der Realität würde es sich bei einer erneuerbaren Stromversorgung nicht um eine Monostruktur handeln, wie in den Szenarien der Bilder 10 a bis c angenommen, sondern um einen Mix von Erzeugungsanlagen.

<sup>5</sup> Dieser Wirkungsgrad wird von Pumpspeicherkraftwerken erreicht.



**Abb. 11.** Speicherleerung in Tagesladungen einer kontinental vernetzten und auf minimalen Speichbedarf optimierten Kombination aus Windenergieanlagen mit 50% Benutzungsgrad und Solarenergieanlagen.

Würden diese allein aus Windenergieanlagen mit 20% Benutzungsgrad und Solarenergieanlagen in einer regional jeweils speicherbedarfsminimierenden Kombination bestehen, dann ließe sich bei einer kontinentalen Vernetzung der Speicherbedarf bei einer 30%igen Erzeugungsreserve auf ca. 14 Tagesladungen reduzieren. Würden stattdessen Windenergieanlagen mit 50% Benutzungsgrad eingesetzt, wie in Abbildung 11 gezeigt, dann läge der Speicherbedarf bei lediglich sechs Tagesladungen. Man erkennt bei dieser optimiert kombinierten Erzeugung aus Wind und Sonne, dass die Speicher dabei sehr selten und vorwiegend im Winter in größerem Umfang in Anspruch genommen werden müssten. In der weit überwiegenden Zeit wären die Speicher gut gefüllt.



- W: Windenergie,
- K: speicherbedarfsminimierende Kombination aus Wind- und Solarenergie,
- Sol: Solarenergie mit globalstrahlungsproportionalem Einspeiseverhalten,
- n##: Benutzungsgrad der Windenergieanlagen in ##%,
- S##: Speicherladeleistung in Bezug auf den Durchschnittsverbrauch in ##%,
- SnB: Speicherladeleistung nach Bedarf (ohne Begrenzung),
- F##: Fernübertragungsleistung in Bezug auf den Durchschnittsverbrauch in ##%,
- oF: ohne Fernübertragung (jedes Land versorgt sich selbst),
- FnB: Fernübertragungsleistung nach Bedarf (ohne Begrenzung),
- e40: Exportpriorität<sup>6</sup> und Speicherwirkungsgrad 40%<sup>7</sup> (Standard: Speicherpriorität<sup>8</sup>, Speicherwirkungsgrad 80%),
- (39): 39-jähriger Untersuchungszeitraum (Standard: 13 Jahre).

**Abb. 12.** Speicherkapazitätsbedarf in Abhängigkeit von der Erzeugungsreserve und weiteren Einflussparametern. Die Bedeutung der Abkürzungen in der Legende ist auf der rechten Seite angegeben.

Rauten (##) stehen dabei als Platzhalter für Ziffern (z.B. n## für n20 oder n50 oder S## für S160 oder S500):

Durch Erhöhung der Erzeugungsreserve auf beispielsweise 80%, ließe sich der Speicherbedarf weiter reduzieren auf z.B. zwei Tagesladungen. Abbildung 12 gibt einen Überblick über die notwendige Speicherkapazität in Abhängigkeit von der angenommenen Erzeugungsstruktur.

### Einordnung des Speicherbedarfs einer Stromversorgung aus Wind und Sonne

Auch Speicherkapazitäten, die die vollständige Stromversorgung mit einer Reichweite von nur sechs Tagen sicherstellen müssten, liegen um mehr als das 200-Fache über der Speicherkapazität, die

<sup>6</sup> Überschüsse werden vorrangig exportiert, bevor die eigenen Speicher aufgeladen werden.

<sup>7</sup> Dieser Wirkungsgrad soll zukünftig von Wasserstoff-Speichersystemen erreicht werden können.

<sup>8</sup> Überschüsse werden vorrangig zur Aufladung der eigenen Speicher eingesetzt, bevor sie exportiert werden.

derzeit in Deutschland verfügbar ist und zum Ausgleich der vergleichsweise geringen Erzeugungsabweichungen der konventionellen Stromversorgung eingesetzt wird. Wegen insgesamt günstiger Eigenschaften wären Pumpspeicherkraftwerke prädestiniert für diese Aufgabe. Diese müssten allerdings in neue Kapazitätsgrößenordnungen vorstoßen.

### Ringwallspeicher

Da weitere gut geeignete und konfliktarm genehmigungsfähige Standorte für konventionelle Pumpspeicherkraftwerke in Gebirgslandschaften der meisten Länder kaum aufzufinden sind, wird vorgeschlagen, diese als Ringwallspeicher gemäß Abbildung 13 auf dem flachen Land oder im Meer zu errichten.

Der Aushub des äußeren Wasserrings für das Unterbecken würde dafür verwendet um den Ringwall für das innen liegende Oberbecken aufzubauen.

Bei der Bemessung einer derartigen Anlage gilt der Zusammenhang, dass eine Verdoppelung der geometrischen Abmessungen von Durchmesser, Höhe und vorgesehenen Pegelschwankungen in Ober- und Unterbecken zu einer Versechzehnfachung des Energieinhalts führt<sup>9</sup>.

Ein Ringwallspeicher ermöglicht bei einer ausreichenden Größe damit größte Speicherkapazitäten. Die in Abbildung 13 dargestellte Anlage hätte einen Durchmesser von 11,4 Kilometer und eine Ringwallhöhe von 215 Meter.

In Kombination mit ca. 2000 Windenergieanlagen (Nabenhöhe z.B. 160 Meter, Rotordurchmesser 120 Meter) würde die dargestellte Anlage die Leistung zweier Kernkraftwerke ersetzen und besser als diese eine bedarfsgerechte Stromversorgung sicher stellen.



**Abb. 13.** Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk mit 3,2 GW Spitzen- und 2 GW Durchschnittsleistung bei einer Reichweite von 14 Tagen. (Illustration: Stefan Schiessl, Dachau)

Weil die Gesamtanlage damit die Funktionen Energiegewinnung und – Speicherung vereinigt, wird sie als Hybridkraftwerk bezeichnet.

Mit ca. 30 der in Abbildung 13 dargestellten Anlagen wäre Deutschland allein auf sich gestellt in der Lage, eine regenerative sichere Stromversorgung, allein aus Wind und Sonne darzustellen. Ein Rückgriff auf fossile und nukleare Energieträger wäre nicht erforderlich. Primärenergiekosten würden dauerhaft nicht mehr anfallen.

Bei einer Verdoppelung der geometrischen Abmessungen (Durchmesser ca. 20 Kilometer, Ringwallhöhe ca. 440 Meter) würden bei halbiertem Erdbauvolumen und Viertelung des insgesamt notwendigen Flächenbedarfs, zwei Ringwallspeicher ausreichen, um den Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch in Deutschland für eine sichere Stromversorgung allein aus Wind und Sonne zu ermöglichen.

Zur Einordnung der Dammhöhe sei beispielsweise auf den im Jahr 1980 fertig gestellte Nurek Staudamm in Tadschikistan<sup>10</sup> hingewiesen. Er ist mit 300 Metern das bisher weltweit höchste

<sup>9</sup> Vierfache geometrische Abmessungen ver-256-fachen die Kapazität, achtfache ver-4096-fachen diese, usw.

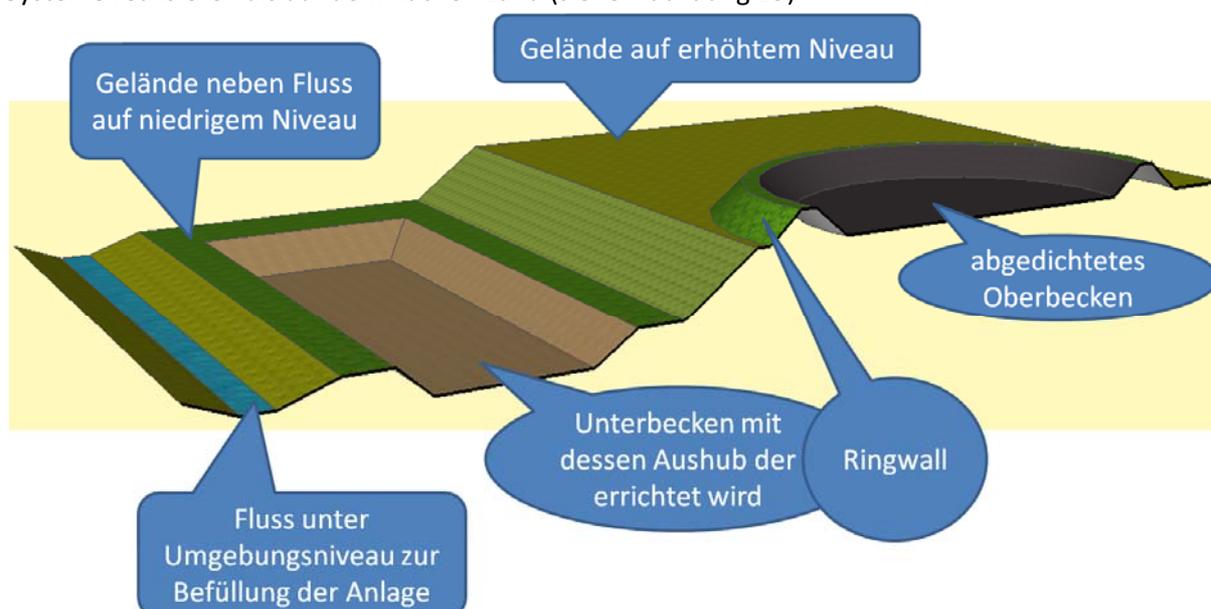
<sup>10</sup> Siehe z.B. <http://de.wikipedia.org/wiki/Nurek-Staudamm>

Stauwerk. Wegen der Erdbebengefährdung des dortigen Gebietes ist er als Erddamm ausgeführt. Bei Ringwallspeichern würde im Fall einer Havarie die zu einem ungeplanten Auslaufen des gefüllten Oberbeckens führt, zunächst das dann leere Unterbecken aufgefüllt werden. Durch diesen Aufbau verfügen sie gegenüber fast allen anderen Stauseen, die mitunter viel größere Wassermassen zurückhalten, über eine zusätzliche und damit deutlich höhere Sicherheit.

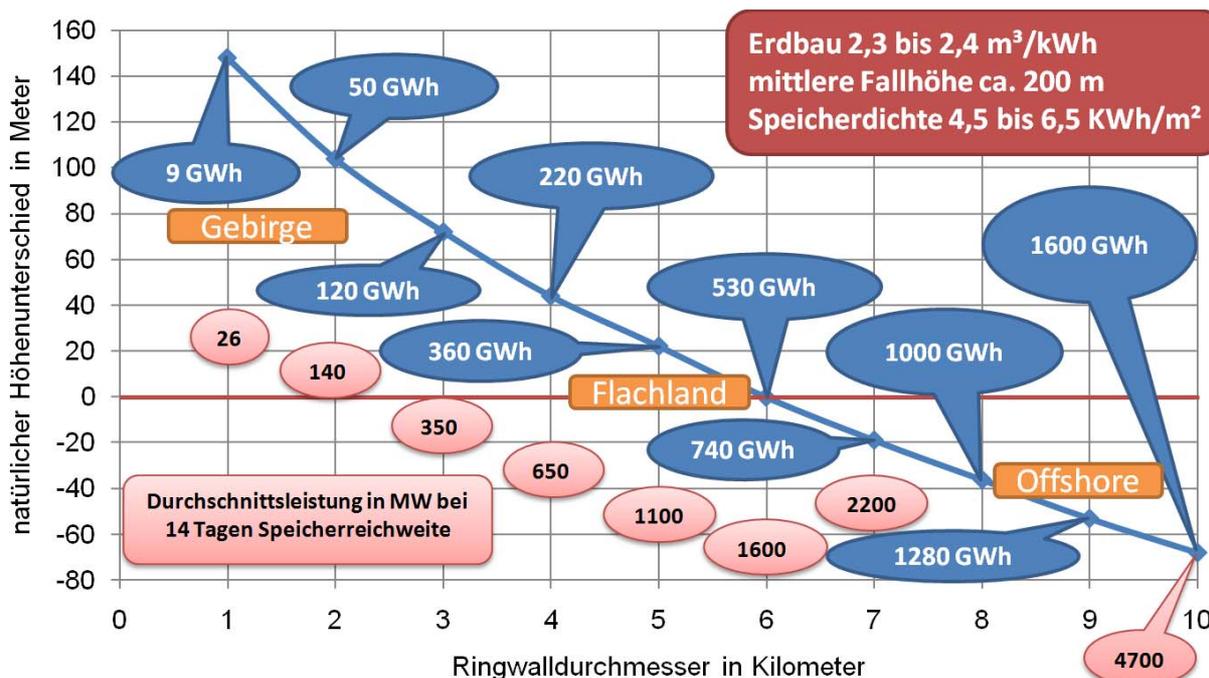
Im Gegensatz zu konventionellen Pumpspeichern, die als Kurzzeitspeicher ihre Kapazität im Tagesrhythmus oder in noch kleineren Zeitabständen umwälzen, würden die Pegelschwankungen in einem Ringwallspeicher viel langsamer stattfinden. Die Speicherleerungskurve in Abbildung 11 zeigt, dass der Speicher meistens aufgeladen wäre und insbesondere im Sommer nur sehr geringe Pegelschwankungen aufweisen würde. Nur alle paar Jahre wäre, in besonders windschwachen Wintern, mit einer größeren Endladung zu rechnen. Der Pegelverlauf im Unterbecken wäre deshalb vergleichbar mit den Verhältnissen an einem Fluss, bei dem ab und zu einmal mit einem Hochwasser zu rechnen ist. Die im normalen täglichen Betrieb zu erwartenden Pegelveränderungen würden sich im Zentimeterbereich abspielen und bei der Freizeitnutzung des Unterbeckens kaum bemerkt werden.

### Anlagengröße und gesamtwirtschaftliche Optimierung

Ringwallspeicher in der angegebenen Größenordnung könnten mit einem spezifischen Erdbauaufwand pro Kilowattstunde Speicherkapazität errichtet werden, der dem von Mittelgebirgspumpspeicherkraftwerken entspricht. Die Größe der Maßnahme und die bessere Zugänglichkeit der gesamten Baustelle berechtigt zu der Erwartung, dass die spezifischen Kosten niedriger ausfallen werden, als bei Gebirgsspeichern. Sind in einer Region natürliche Höhenunterschiede vorhanden, wie in Abbildung 14 schematisch dargestellt, dann lassen sich mit dem Ringwallspeicherprinzip der Nutzung des Aushubs für das Unterbecken zur Errichtung des Walls für das Oberbecken, bei gleichem Erdbauaufwand pro Speicherkapazitätseinheit, auch kleinere Systeme realisieren als auf dem flachen Land (siehe Abbildung 15).



**Abb. 14.:** Ringwallspeicher in einer Region mit Geländebereichen auf unterschiedlichen Höhenniveaus, die von einem Fluss durchzogen ist. Das Unterbecken braucht den Ringwall nicht zu umschließen, sondern kann in seiner Form frei gestaltet werden und Siedlungen und sonstige sensible Landschaftsbestandteile umgehen.



**Abb. 15.:** Ringwalldurchmesser mit ähnlichem Bauaufwand, bei natürlich vorhandenen Höhenunterschieden. Zugrunde liegen maximale Pegelschwankung von 20 Meter im Unterbecken und 50 Meter im Oberbecken.

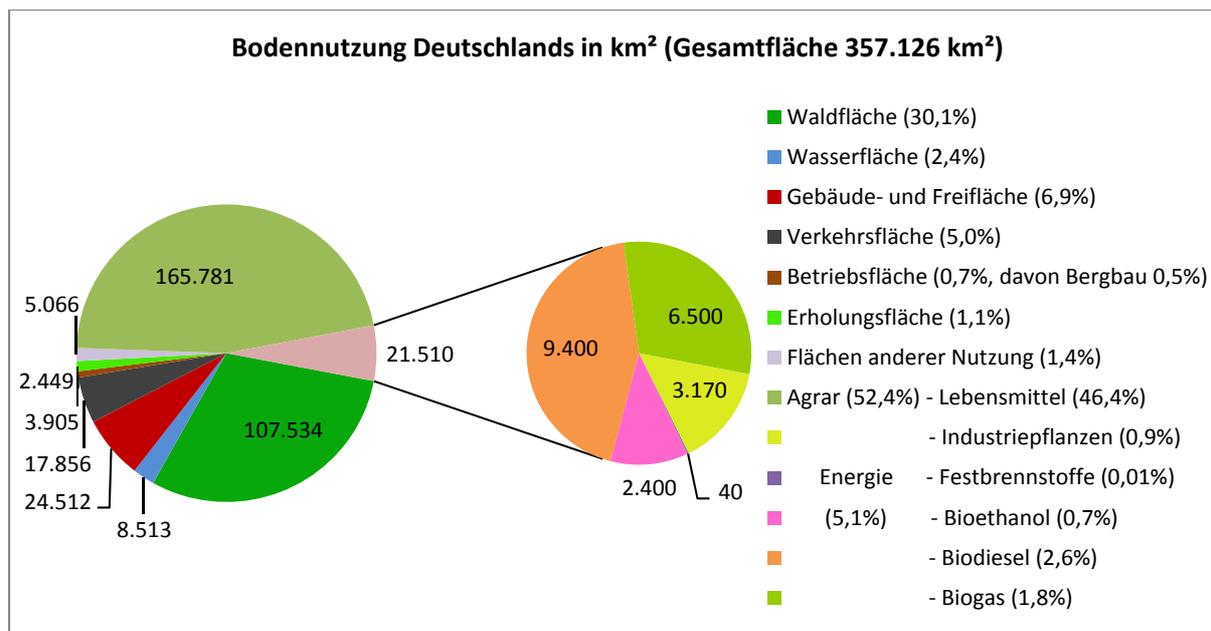
Die Minimierung des Speicherbedarfs führt sicher nicht zur kostenoptimalen Lösung einer erneuerbaren Stromversorgung.

Solange der Preisunterschied zwischen Solar- und Windstrom so hoch wie im Jahr 2011 ist, kann erwartet werden, dass es gesamtwirtschaftlich kostengünstiger wäre, etwas größere Speicher aufzubauen, als durch massiven Ausbau der Fotovoltaik den Speicherbedarf zu minimieren. Der Bedarf an Speichersystemen ließe sich durch europaweite leistungsstarke Vernetzung, höhere Erzeugungsreserven und bevorzugten Einsatz der Biomasse zum Ausgleich der Volatilität von Wind und Sonne auch deutlich unter die Kapazität zur Überbrückung von 14 Tagen reduzieren. Bei Offshore errichteten Speichern würde der Flächenbedarf des Unterbeckens wegfallen, weil das dann das Meer wäre.

### Vergleich zur Biomasseverstromung

Der in Abbildung 13 skizzierte Ringwallspeicher beansprucht eine Bodenfläche von 100 Quadratkilometern. Als Aufstell- und Zufahrtsflächen für die ca. 2000 Windenergieanlagen entsteht ein weiterer Flächenbedarf von ca. 10 Quadratkilometern. Solarenergieanlagen können ohne eigenen Flächenverbrauch auf dem Ringwallspeicher und/oder auf den Dächern des Versorgungsgebiets angebracht werden. Würde auf der für das Gesamtsystem beanspruchten Bodenfläche Biomasse zur Stromerzeugung angebaut, dann würde das eine durchschnittliche Leistungsabgabe von ca. 40 Megawatt ermöglichen. Das System aus Ringwallspeicher, Wind- und Solarenergieanlagen ermöglicht, bei entsprechender Auslegung, den ca. 50-fachen Energieertrag pro Flächeneinheit gegenüber einer Stromversorgung mit Biogasanlagen.

Abbildung 16 zeigt die Bodennutzung Deutschlands, wobei die für industrielle und für energetische Zwecke genutzten Landflächen besonders herausgestellt sind.



**Abb. 16.:** Flächennutzung in Deutschland (Ein Teil der zugrunde liegenden Daten sind entnommen aus: <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltoekonomisheGesamtrechnungen/Flaechennutzung/Tabellen/Content100/Bodenflaeche.templateId=renderPrint.psm1>, Zugriff am 07.06.2011).

Biomasse für Biogasanlagen wurde im Jahr 2010 in Deutschland auf einer Fläche von ca. 6500 Quadratkilometern angebaut<sup>11</sup> und damit ca. 18 Terawattstunden Strom erzeugt<sup>12</sup>, was etwa 3 % des deutschen Stromverbrauchs von ca. 600 Terawattstunden entspricht. Etwa die Hälfte der heute schon zur Biogasproduktion eingesetzten Landflächen wäre erforderlich, um mit den in Abbildung 13 zur Diskussion gestellten Ringwallspeicher-Hybridkraftwerken die vollständige Stromversorgung Deutschlands zu ermöglichen.

Würde man Biomassekraftwerke nicht wie im Jahr 2011 üblich, in der Grundlast, sondern in erster Linie zum Ausgleich der Volatilität von Wind und Sonne betreiben, dann wäre auch das ein Beitrag zu einer Verminderung des Speicherbedarfs für eine nachfragegerechte regenerative Stromversorgung.

### Vergleich zu Desertec (Solarstrom für Europa aus der Sahara)

Die am Boden ankommende Globalstrahlung in Nordafrika liegt knapp beim Doppelten wie in der Mitte Deutschlands. Der Wirkungsgrad liegt, wegen des hohen Anteils direkter Strahlung und der thermodynamischen Prozesse, die damit zur Energieumwandlung möglich werden, höher als bei Fotovoltaik. Die Solarkraftwerke an sich könnten damit Strom erzeugen, der preislich mit dem aus Windenergie konkurrieren kann. Der so gewonnene Strom müsste durch das Mittelmeer und über tausende Kilometer lange Leitungen in die europäischen Verbrauchszentren transportiert werden. Speicher müssten auf alle Fälle zur Überbrückung der Nachtstunden geschaffen werden. Durch einen Aufbau von Überkapazität bei den Solaranlagen in der Wüste, ließe sich auch für die verbrauchsstarken Jahreszeiten im Winter genügend Strom bereitstellen. Eine Versorgungssicherheit ließe sich auch für dieses weit über Europa hinausreichenden Gesamtsystems herstellen. Der verbleibende Speicherbedarf ließe sich damit bei entsprechender Auslegung weiter reduzieren. Hofft

<sup>11</sup> Siehe z.B. <http://www.nachwachsenderohstoffe.de/service/daten-und-fakten/anbau/> (Zugriff am 04.04.2011)

<sup>12</sup> Siehe z.B. <http://www.solar-und-windenergie.de/blog/?p=1093> (Zugriff am 04.04.2011)

man jedoch auf eine maßgebliche Versorgung der europäischen Verbrauchszentren mit Solarstrom aus der Wüste, dann würde sich Europa neben der Abhängigkeit von Öl und Gas in eine weitere externe Abhängigkeit von Strom begeben.

Die Schwierigkeit einer in der Dimension von Desertec angedachten Elektrizitätsversorgung liegt darin, dass selbst in zahlreichen Ländern Europas im Jahr 2011 nicht daran gedacht ist, eine leistungsstarke Vernetzung für eine optimale regenerative Energieversorgung aufzubauen. Die ehrgeizigen zeitlichen Ziele zur Transformation des Energiesystems in Deutschland lassen es andererseits nicht zu, derartige Veränderungen abzuwarten.

Gut auf die Regionen verteilte Speichersysteme in Verbindung mit ortsnahen Wind- und Solarenergieanlagen ermöglichen ebenfalls eine robuste Stromversorgung, die nicht auf die Errichtung und Sicherung so langer Übertragungswege angewiesen wäre.

### **Vergleich zur Nutzung skandinavischer Wasserspeicher**

Sollten Norwegen und Schweden dazu bereit sein, dann wäre es möglich, die dort vorhandenen und technisch in Frage kommenden Seen zu Pumpspeichieranlagen auszubauen. Bei Aufbau entsprechend leistungsstarker Stromleitungen könnte der Ausgleich der volatilen erneuerbaren Energien der Nord- und Ostseeanrainerstaaten über Stromtransporte von und nach Skandinavien erfolgen. Im Gegensatz zu den zur Diskussion gestellten Ringwallspeichern, würde man in Skandinavien vergleichbare Pegelschwankungen in natürlich vorhandenen Seen auslösen, um die Speicherfunktion auf analoge Weise zu erreichen. Damit würde man zwar massiv in existierende Wasserökosysteme eingreifen, könnte aber mit niedrigeren Investitionskosten für das Gesamtsystem rechnen.

Im Gegensatz zu dezentral erzeugungs- bzw. verbrauchsnahe errichteten Ringwallspeichern fielen beim Stromtransport nach Skandinavien zusätzliche Wirkungsgradverluste für den Hin- und den Rückweg an. Statt einem Speicherwirkungsgrad von ca. 80% käme man inklusive der erforderlichen Hin- und Rückübertragung nur noch auf einen Gesamtwirkungsgrad von 60% bis 70%. Diese erhöhten Speicherverluste müssten wiederum durch die Errichtung zusätzlicher Wind- und Solarenergieanlagen ausgeglichen werden. Je kleiner der Abstand einer Region zu den skandinavischen Speichermöglichkeiten ist, desto mehr dürfte diese Option in Erwägung gezogen werden.

### **Vergleich mit anderen Speichertechnologien**

Wasserspeichersysteme wie Pumpspeicher-, Ringwallspeicher- und Speicherwasserkraftwerke erreichen hohe Wirkungsgrade und weisen kaum Selbstentladungsverluste auf. Ihre Lebensdauer liegt bei vielen Jahrzehnten und hätte bei entsprechender Pflege und Bewirtschaftung kaum Grenzen. Sie gelten als die am kostengünstigsten realisierbaren Stromspeicher in der Energiewirtschaft. Lade- und Entladeleistung kann in Form von Pumpen- und Turbinensystemen, nach Bedarf bereitgestellt werden. Ihr Nachteil sind der große Flächenverbrauch, die noch zu gewinnende gesellschaftliche Akzeptanz und die hohen Investitionen für einzelne Anlagen, weil deren Wirtschaftlichkeit erst mit der Größe entsteht und zunimmt.

### **Batteriesysteme**

Einige Batteriesysteme, z.B. Lithium-Ionen-Akkus, erreichen ähnlich gute Wirkungsgrade und Leistungseigenschaften. Die Selbstentladung über der Zeit ist systemabhängig und bei den meisten

Batteriesystemen höher, als bei Wasserspeichersystemen. Die Lebensdauer ist bei vielen Systemen deutlich kürzer. Sie bieten sich für spezielle Anwendungen, wie z.B. Elektroautos an, weil ihre vergleichsweise hohe Energiedichte kleine Baugrößen ermöglicht. Die derzeit bekannten Kosten zur Schaffung der Speicherkapazität liegen größenordnungsmäßig um das ein bis mehrere Hundertfache über denen von Wasserspeichersystemen. Für Langzeitspeicheraufgaben im großen Umfang kommen sie deshalb aus der Perspektive des Jahres 2011 kaum in Frage.

### **Druckluftspeicher**

Druckluftkavernenspeicher die mit Turboverdichtern aufgeladen und über Turbogeneratoren entladen werden, erreichen in Kombination mit Wärmespeichern Wirkungsgrade bis zu 70%. Die Selbstentladung ist in der Regel höher als bei Wasserspeichersystemen. Die Lebensdauer in der Regel kürzer, die Herstellungskosten, insbesondere mit Wärmespeichereinheit als Voraussetzung für den hohen Wirkungsgrad, liegen in der gleichen Größenordnung tendenziell höher, als bei Wasserspeichersystemen. Sie haben, wenn nicht durch einen oberirdischen See für konstanten Druck in der Kaverne gesorgt wird, keinen nennenswerten oberirdischen Flächenbedarf und sie bilden eine zusätzliche Speicheroption. Die Möglichkeit ihrer Errichtung ist auf Regionen mit dafür geeigneten Untergrundverhältnissen beschränkt.

### **Wasserstoff- und Methanspeicher**

Speichersysteme, die auf Wasserstoff oder das weiter zu Methan (Erdgas) aufbereitete Medium zur Zwischenspeicherung zurückgreifen, sind nach heutigem Stand deutlich teurer als Wasserspeichersysteme und sie erreichen wesentlich niedrigere Wirkungsgrade von 20% bis maximal ca. 40%. Der Vorteil von Wasserstoff und Methan sind die hohe Energiedichte und die vorhandene Erdgas Infrastruktur. Insbesondere Methan als Speichermedium kommt deshalb zukünftig als Ersatz für fossile Energieträger bei mobilen Anwendungen wie Fahrzeugen oder Schiffen in Frage, bei denen die Speicherdichte von Batterien nicht ausreicht. Wegen der hohen Speicherverluste erscheinen sie für den großtechnischen Ausgleich einer erneuerbaren Stromversorgung jedoch fragwürdig, weil die über den Speicher verbrauchte Energie vorher in zweieinhalb- bis fünffacher Höhe erzeugt werden muss. Der Ausgleich dieser Verluste würde im Vergleich zu Wasserspeichersystemen einen erheblichen Zubau von Wind- und Solarenergieanlagen erfordern.

### **Lastmanagement, Kurzzeitspeicher, Langzeitspeicher**

Kurzzeitige, im Stunden- bis Tagesbereich auftretende Abweichungen zwischen volatiler Stromerzeugung und Nachfrage können durch darauf ausgelegte Kurzzeitspeicher und/oder durch Lastmanagement<sup>13</sup> (Smart Grids) ausgeglichen werden. Wenn in Zukunft Langzeitspeicher wie z.B. die vorgeschlagenen Ringwallspeicher aufgebaut werden sollten, dann sind diese in der Lage, auch die Kurzzeitspeicheraufgaben zu übernehmen.

Kurzzeitspeicher und Lastmanagementsysteme erfordern nach ihrer Entleerung bzw. ihrer maximalen Unterbrechungszeit, die Verfügbarkeit von nach Bedarf abrufbaren Kraftwerken, die dann die Versorgung sicherstellen. Dieses Konzept hätte das dreifache Vorhalten der Kraftwerkskapazität zur Folge: 1. volatile regenerative Erzeugungssysteme, 2. Kurzzeitspeicher- und/oder Lastmanagementsysteme, 3. konventionelle bedarfsgerecht abrufbare Erzeugungssysteme. Auch

---

<sup>13</sup> Eingriffe in die Stromabgabe durch Zu- und Abschaltung flexibler Verbraucher

wenn dabei die konventionellen Systeme nur sehr selten zum Einsatz kämen, müssten sie gepflegt, gewartet und vom Betriebspersonal in dauerhafter Einsatzbereitschaft gehalten werden. In diesem Fall wäre zu überlegen, ob es tatsächlich sinnvoll ist, Kurzzeitspeicher- und/oder Lastmanagementsysteme überhaupt weiter auszubauen. Eine zu 100% regenerative Stromerzeugung dürfte damit kaum erreichbar sein.

Entwickelt man das Stromversorgungssystem auf der Basis von Langzeitspeichersystemen mit gutem Wirkungsgrad, dann würde der Bedarf für Kurzzeitspeicher und/oder Lastmanagementsysteme entfallen und der konventionelle Kraftwerkspark könnte tatsächlich ersetzt werden.

### **Vergleich zur Braunkohleverstromung**

Bei Braunkohletagebauen handelt es sich um Bauwerke, die ein Vielfaches an Erdbewegungen erfordern, als dies zur Errichtung von Ringwallspeichern notwendig wäre. Der Flächenverbrauch erreicht die gleiche Größenordnung. Die Panoramaaufnahme in Abbildung 17 zeigt die Dimensionen, in die dabei vorgestoßen wird.



**Abb. 17.:** Ausschnitt aus Originalfoto: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tagebau\\_Garzweiler\\_Panorama\\_2005.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tagebau_Garzweiler_Panorama_2005.jpg),  
© Raimond Spekking / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0 & GFDL

Der Braunkohle Tagebau Hambach wird im Endausbau eine Fläche von 85 Quadratkilometern umfassen. Er reicht über 400 Meter in die Tiefe und mit der Sophienhöhe entsteht der größte künstliche Berg Deutschlands mit einem Volumen von 10 Kubikkilometern und einer Höhe von ca. 200 Metern. Das Grundwasser wird dazu großflächig auf ca. 500 Meter Tiefe abgesenkt. Die geförderte Kohle reicht aus, um damit noch für ca. 45 Jahre Braunkohlekraftwerke mit einer Leistung von ca. vier Gigawatt zu versorgen. Während die Braunkohle am Ende unwiederbringlich verbraucht und zu Kohlendioxid verbrannt sein wird, kann das Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk, bei einmaligem und geringerem Erdbauaufwand von beispielsweise 1,4 Kubikkilometern für eine Anlage wie in Abbildung 13 skizziert, nachhaltig und ohne zeitliche Begrenzung betrieben werden.

Würden die abzutragenden Deckschichten von Braunkohletagebauen nicht einfach auf Halde gelegt, sondern von Anfang an so verbaut, dass ein standsicherer Ringwall entsteht, dann ließe sich damit eine nachhaltige energetische Folgenutzung erreichen. Bestehende Tagebaue lassen sich dagegen nicht einfach in nachfolgende Ringwallspeicher überführen, weil der Abraum dort ohne entsprechend strukturierten Einbau und Verdichtung im Nachgang erhebliche Setzungen aufweisen wird. Sollte der Ausstieg aus der Kernenergienutzung tatsächlich so beschleunigt werden, dass neue Braunkohletagebaue zur Überbrückung in das Zeitalter der erneuerbaren Energie erschlossen werden müssten, dann könnten sie damit für die Zukunft einen Beitrag zur Schaffung der notwendigen großen Speicherkapazitäten leisten.

Bei Tagebauen muss alles weichen, was sich in der Landschaft über den Rohstoffvorkommen befindet. Ringwallspeicher erfordern nicht die idealisierte, in Abbildung 13 gezeigte, kreisrunde

Form. Sie können sich insbesondere beim Unterbecken den landschaftlichen Gegebenheiten, wie Siedlungen, ökologisch wertvollen Arealen, Infrastruktureinrichtungen usw. anpassen und diese umgehen und reizvoll einbeziehen. Die trotzdem erheblichen Eingriffe in eine bestehende Landschaft können daher deutlich mehr Rücksicht auf vorhandene Strukturen nehmen, als große Tagebaue.

### **Vergleich zur Kernenergie**

Der Flächenbedarf des in Abbildung 13 gezeigten Ringwallspeichers ist zweieinhalb Mal kleiner, als die Zone um das zur Erweiterung anstehende Kernkraftwerk im tschechischen Temelin mit 16 Kilometern Durchmesser, in der Schutzräume zur Unterbringung der Bevölkerung bei Störfällen vorgesehen sind.

Die um das 1986 havarierte Kernkraftwerk Tschernobyl wegen Verstrahlung eingerichteten Sperrzonen umfassen ca. 4300 Quadratkilometer<sup>14</sup>. Das übertrifft die Fläche, die in Deutschland zur vollständigen Stromversorgung mit Ringwallspeicher-Hybridsystemen gemäß Abbildung 13 notwendig wäre, um über 1000 Quadratkilometer.

Die Evakuierungszone um die sechs außer Kontrolle geratenen Kernkraftwerke von Fukushima hatte anfangs einen Durchmesser von 40 Kilometern, umfasst also eine Fläche von ca. 1250 Quadratkilometer, wobei dort wegen der Küstenlage die Hälfte der Fläche das Meer betrifft. Bei der am 12. April 2011 angeordneten Ausweitung auf 60 Kilometer Durchmesser (Radius 30 Kilometer) betrifft das eine Fläche von über 2800 Quadratkilometer oder den Platzbedarf für ca. 28 der skizzierten Ringwallspeicher. Anfang Juni 2011 wurde in den Nachrichten berichtet, dass bereits Ortschaften in 40 Kilometer Entfernung unzulässig hohe Strahlungswerte aufweisen. Ein Kreis mit 40 Kilometern Radius hat eine Fläche von über 5000 Quadratkilometern.

Trotz günstiger Erzeugungskosten und keiner Freisetzung von Klimagasen kämpft die Kernenergie, wie die erneuerbaren Energien, mit der gesellschaftlichen Akzeptanz. Probleme der Kernenergie sind beispielsweise die ungelöste Endlagerung oder das nicht versicherbare Störfallrisiko.

Probleme der erneuerbaren Energien sind der immense Flächenbedarf für den Anbau von Biomasse, der landschaftsprägende Einfluss von Windenergieanlagen, die hohen Kosten von Solarenergie und die bisher ungelöste Speicherfrage. Sie ist ein Schlüssel dafür, dass sich überhaupt eine sichere regenerative Stromversorgung darstellen lässt.

### **Fazit**

Beim Übergang von der konventionellen fossil- und nuklear betriebenen Elektrizitätsversorgung zu einer regenerativen geht es um eine technische, ökonomische und ökologische Optimierung des Gesamtsystems. Dazu werden auch die anderen regenerativen Energien, wie Laufwasser, Biomasse, Abfallverwertung, Geothermie, usw. ihre Beiträge leisten. Für einen volkswirtschaftlich vorteilhaften Übergang gilt es Verständnis und einen tragfähigen gesellschaftlichen Konsens zu finden, die es ermöglichen, die benötigten Potentiale zu erschließen.

Die aufgezeigten Grundlagen sollen dazu beitragen, eine gute Zukunft zu gestalten.

Wunsiedel, den 07.06.2011,

Dr.-Ing. Matthias Popp,

Tel. 09232/9933-11, matthias.popp@t-online.de, [www.ringwallspeicher.de](http://www.ringwallspeicher.de).

---

<sup>14</sup> Aus [http://de.wikipedia.org/wiki/Katastrophe\\_von\\_Tschernobyl](http://de.wikipedia.org/wiki/Katastrophe_von_Tschernobyl) (Zugriff am 05.04.2011)