

Speicher für sicheren Strom aus Wind und Sonne

Matthias Popp

Welche Erzeugungsstruktur zu einer möglichst nachfragegerechten regenerativen Stromproduktion führt und welcher Ausgleichsbedarf verbleibt, um eine sichere Versorgung mit volatilen Energien gewährleisten zu können, war bisher eine offene Frage. Mit einer aktuellen Forschungsarbeit wird diese Lücke geschlossen und aufgezeigt, dass sich Ringwallspeicher als geotechnische Speicherlösung für große Kapazitäten anbieten. Sie wären in der Lage, einen entscheidenden Beitrag zur Bewältigung des Ausgleichsbedarfs zu leisten.

Welchen Einfluss hat der Aufbau einer wetterabhängigen regenerativen Stromerzeugung auf den Ausgleichs- und Speicherkapazitätsbedarf einer nachfragegerechten und sicheren Stromversorgung? Diese Frage stellt sich, wenn eine zukünftige Elektrizitätsversorgung ohne Rückgriffsmöglichkeit auf fossile und nukleare Energieträger aufgebaut werden soll, denn schließlich gilt es, eine Antwort darauf zu geben, ob in dieser Strategie tatsächlich eine reale Zukunftsoption liegt. Die Forschungsarbeit „Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien“ analysiert erstmalig systematisch diesen Zusammenhang. Im Folgenden wird über zentrale Annahmen und Ergebnisse berichtet.

Potenziale natürlicher Energiekreisläufe

In den meisten dicht besiedelten Ländern Europas wird sich eine regenerative Stromversorgung auf die großen Energiepotenziale von Wind und Sonne konzentrieren, wenn der Stromverbrauch damit nachhaltig gedeckt werden soll. Die Sonne strahlt permanent das mehrere Tausendfache des Energiebedarfs der Menschheit auf die Erde ein. In den damit angefachten Windbewegungen steckt immer noch das mehrere Hundertfache des Weltenergiebedarfs.

Diese beiden Arten von nachhaltig und praktisch unbegrenzt verfügbarer Energie werden

in Zukunft die Hauptlast einer regenerativen Stromversorgung übernehmen. Andere Arten, wie Fließwasser, Biomasse, Geothermie usw. können einen kleinen weiteren Beitrag dazu leisten. Die beiden großen Energiepotenziale stehen aber lediglich volatil, also mit wechselnden Phasen von Überschuss und Defizit, zur Verfügung. Nur durch Speichereinsatz können sie der Nachfrage angepasst werden.

Versorgungsaufgabe und Ladungsabweichung

Der Stromverbrauch in den europäischen Ländern ist im Normalfall im Winterhalbjahr höher als im Sommer. Er zeigt in Abhängigkeit von der Jahreszeit einen typischen Verlauf mit tageszeitlichen und wochentäglichen Schwankungen, die bis ca. +/- 50 % vom Langzeitmittelwert abweichen können. Die Energiewirtschaft hat diese anspruchsvolle Versorgungsaufgabe in jedem Moment präzise zu erfüllen, egal welcher Kraftwerkspark sich dahinter befindet.

Die beispielhaften Leistungsdiagramme in Abb. 1 zeigen in Anlehnung an die tatsächliche Windstromeinspeisung des Jahres 2005, welche Verhältnisse sich eingestellt hätten, wenn die Windenergie so ausgebaut gewesen wäre, dass damit ein viel größerer Anteil des Strombedarfs hätte gedeckt werden können. Sobald die installierte Leistung die Nachfrage übersteigt und die Exportmöglichkeiten ausgeschöpft sind, können die Überschüsse nur noch zeitversetzt über Speicher genutzt werden.

Diese Leistungsdarstellungen der Windenergieeinspeisung sind nur eingeschränkt geeignet, um daraus die Speichereigenschaften abzulesen zu können, die erforderlich sind, um damit eine bedarfsgerechte Versorgung zu erreichen. Dazu wird die Ladungsabweichung eingeführt, zu deren Erklärung Abb. 2

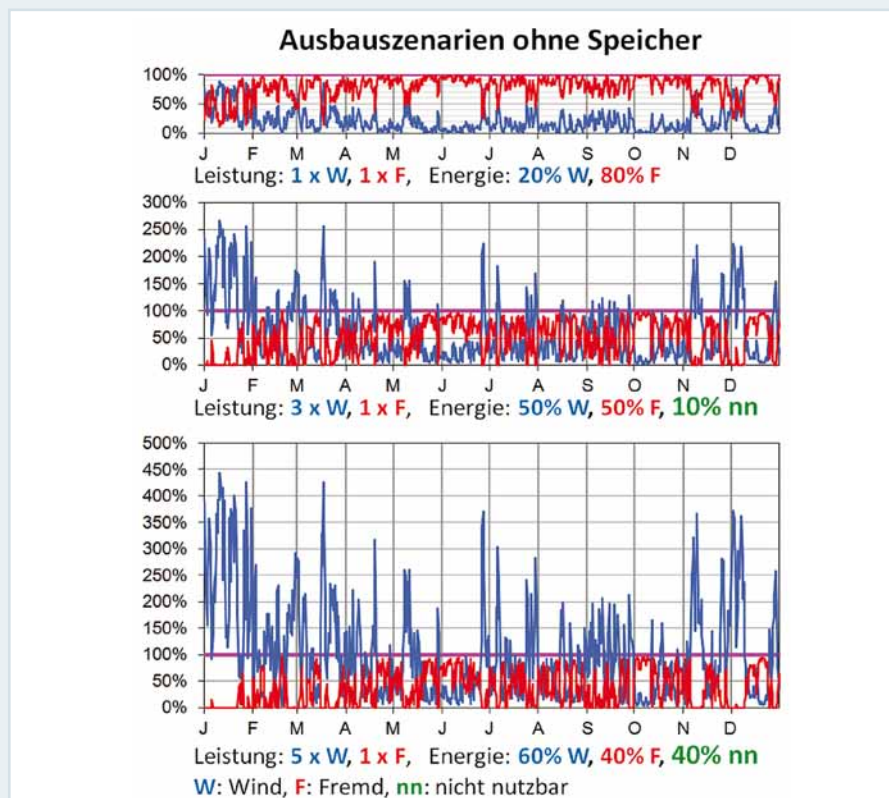


Abb. 1 Ausbau von Windenergie ohne Speicher am Beispiel der tatsächlichen Einspeisung des Jahres 2005. Die vereinfacht als konstant angenommene Stromnachfrage ist dabei auf 100 % gesetzt

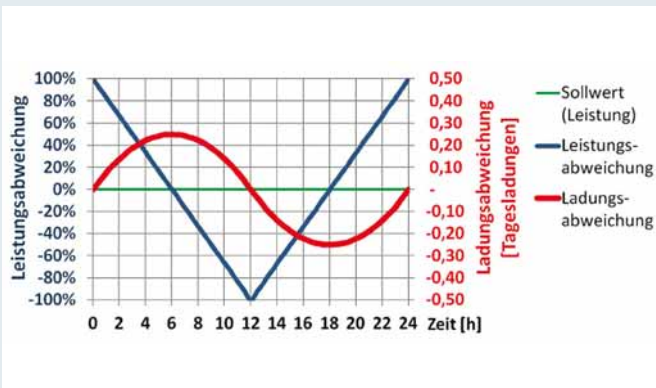


Abb. 2 Ladungsabweichung als charakteristisches Merkmal volatiler Energiequellen

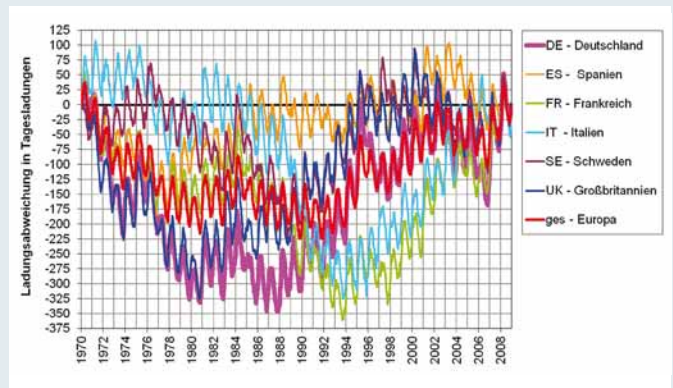


Abb. 3 Ladungsabweichung der Windenergie in Europa

dient. Diese zeigt, wie ein idealer, verlustfreier Speicher bewirtschaftet werden müsste, damit aus einer volatilen Erzeugungsleistung eine konstante Versorgungsleistung wird. Leistungsüberschüsse würden einen Speicher aufladen, Defizite ihn entleeren. Am Ende eines Untersuchungszeitraums hätte der Speicher wieder den anfänglichen Ladezustand. Mathematisch handelt es sich um das Integral der Durchschnittsleistungsabweichung über der Zeit.

Windenergie in Europa und Deutschland

Mit dem oben skizzierten Konzept wurde die Windenergie in Europa untersucht. Zur Verfügung stand ein digitaler Windatlas mit Windgeschwindigkeiten in 90 x 90 km großen Rastergebieten in 100 m über Grund von 1970 bis 2008 in dreistündigen Zeitschritten. In diesem Zeitraster wurden Windleistungen berechnet, die sich an den Kennlinien realer Windenergieanlagen orientieren. Der Vergleich dieser berechneten Werte mit den tatsächlichen Windstromeinspeisungen in Deutschland ergab eine hohe Übereinstimmung. Diese Validierung schaffte Vertrauen in die angewandte Vorgehensweise. Abb. 3 zeigt die ermittelten Ladungsabweichungen.

Für den Untersuchungszeitraum ergeben sich für einige große Stromverbrauchsländer und für Europa insgesamt die in Abb. 3 dargestellten Verläufe. In windschwachen Perioden kommt es zu einer Speicherleerung, in windstarken zu deren Aufladung. Am Ende des Untersuchungszeitraums, in dem genau so viel Strom erzeugt wie verbraucht wor-

den wäre, ist die Ladungsabweichung, wie am Anfang, wieder bei null.

Die Kurven zeigen erhebliche Unterschiede im jährlichen Windenergieangebot der einzelnen Länder. Die Ladungsabweichungen bauen sich in einigen Ländern über diesen Zeitraum hinweg zu Beträgen auf und wieder ab, die dem Stromverbrauch eines gesamten Jahres entsprechen. Besonders zu beachten ist jedoch, dass es in allen Ländern Europas im Winter, wegen durchschnittlich stärkerer Winde, zu einer Ladungszunahme und im Sommer, wegen durchschnittlich schwächerer Winde, zu einer Ladungsabnahme in den Speichern kommen wird. Diese jahreszeitlichen, den gesamten Kontinent betreffenden Schwankungen könnten auch durch ein leistungsstarkes Stromnetz nicht weiter ausgeglichen werden.

Die bei der Windenergienutzung auftretende Ladungsabweichung hängt dabei stark von der Auslegung der Windenergieanlagen ab. Werden diese auf größere Volllaststundenzahlen oder gleichbedeutend auf einen höheren Benutzungsgrad ausgelegt, dann kann die Ladungsabweichung der damit umgewandelten Windenergie deutlich reduziert werden. Dies kann unter Beibehaltung der Nennleistung einer Windenergieanlage über größere Rotordurchmesser und Nabenhöhen, die in Luftschichten mit höheren Windgeschwindigkeiten reichen, erfolgen. Einige Hersteller bieten sog. „Schwachwindanlagen“ an, die in diese Richtung weisen.

Abb. 4 zeigt auf Deutschland heruntergebrochen die Rastergebiete des verwendeten europäischen Windatlas. Vergleicht man die

Ladungsabweichungen der einzelnen Gebiete Deutschlands, dann stellt man fest, dass die Kurvenverläufe alle sehr ähnlich sind. Die Diagramme zeigen beispielhaft für vier Jahre von Norden nach Süden die Ladungsabweichungen einiger Gebiete. Die Ähnlichkeit der Verläufe ergibt sich daraus, dass die Windverhältnisse in der Regel einem großräumigen Wettergeschehen folgen. Dieses reicht meist weit über die Grenzen einzelner Länder hinaus. Die Ausgleichseffekte durch eine leistungsstarke nationale Vernetzung werden sich deshalb bezüglich der Windenergie in Grenzen halten. Viel größer ist jedoch der Effekt, der sich über einen höheren Benutzungsgrad erzielen lässt.

Kombination von Wind- und Sonnenenergie

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden in analoger Weise zur Wind- die Ladungsabweichungen der Solarenergie untersucht. Dafür standen Globalstrahlungsdaten aus Meteosatmessungen zur Verfügung. Die in täglichen Pulsen ankommende Einspeiseleistung erreicht im Langzeitdurchschnitt für Deutschland ca. 10 % der mit Solarmodulen installierten Nennleistung. Speicher für Solarstrom würden sich naheliegender Weise im Sommer füllen und im Winter leeren. Damit verhält sich die Ladungsabweichung der Sonnenenergie in Europa genau gegenläufig zur Ladungsabweichung der Windenergie. Daher liegt es nahe, über eine Kombination der beiden volatilen Energieressourcen nachzudenken.

Zur Veranschaulichung dieser Verhältnisse werden in Abb. 5 die Ladungsabweichungen

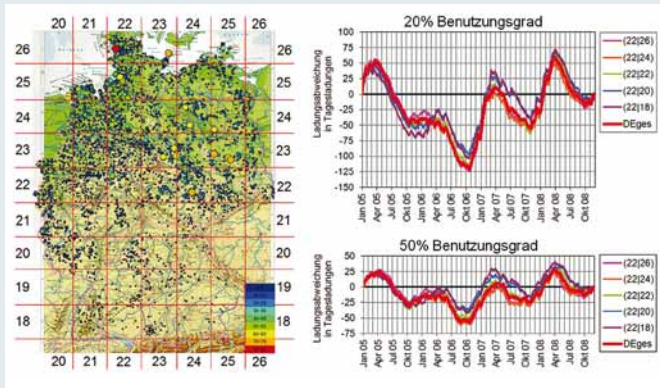


Abb. 4 Rastergebiete des Windatlas und Ladungsabweichungen der Windenergie in Deutschland

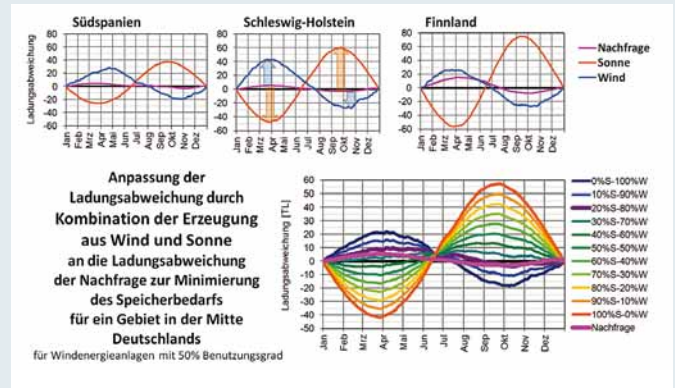


Abb. 5 Kombination von Wind und Sonne zur Anpassung der Erzeugung an die Nachfrage. Für das beispielhaft gezeigte Gebiet in der Mitte Deutschlands läge der ideale Mix, welcher der Nachfrage am nächsten liegt, bei ca. 20 % Solaranteil und ca. 80 % Windanteil

von Wind, Sonne und der Nachfrage auf einen Jahreszeitraum zusammengefasst. Die Summe der blauen Pfeile im Beispiel für Schleswig-Holstein gibt die Speicherkapazität wieder, die dort ein bedarfsgerechter Ausgleich der Windenergie erfordern würde. Die Summe der beiden orangenen Pfeile ergibt die erforderliche Speicherkapazität analog für einen bedarfsgerechten Ausgleich einer reinen Photovoltaik-Versorgung.

Die Erzeugungsbeiträge von Wind und Sonne können für jede Region und jedes Land so aufeinander abgestimmt werden, dass sie in Summe eine minimale Abweichung von der regionstypischen Nachfrage aufweisen. Über den damit ermittelten optimalen Erzeugungsmix lässt sich die maximal erforderliche Speicherkapazität minimieren.

Anwendung auf reale Versorgungssysteme

Reale Versorgungssysteme müssen mit verlustbehafteten Speichern und Übertragungsnetzen zurecht kommen. Speicher verfügen zudem nur über begrenzte Kapazität und Übertragungsnetze nur über begrenzte Übertragungsleistungen. Damit sich trotzdem eine sichere und jederzeit bedarfsgerechte Stromversorgung aufbauen lässt, sind Erzeugungsrreserven erforderlich. Diese erlauben es, im Langzeitdurchschnitt mehr volatile Energie in elektrischen Strom umzuwandeln, als tatsächlich verbraucht wird. Erzeugungsrreserven werden benötigt, um nach Flaute-Phasen sowie nach erzeugungsschwächeren oder verbrauchsstarken Perioden die Speicher immer wieder aufladen zu können.

Die Speicherbewirtschaftung, die sich unter realen, technisch umsetzbaren Bedingungen ergäbe, ist für 30 % Erzeugungsreserve in den Speicherleerungskurven der Abb. 6 dargestellt. Eine Versorgung mit technisch umsetzbaren Systemen würde bei einer reinen Photovoltaik-Versorgung die größten Speicherleerungen am Ende des Winters mit teilweise über 100 Tagesladungen aufweisen. Windenergie mit dem niedrigen, derzeit in Deutschland feststellbaren Benutzungsgrad von ca. 20 % hätte die größten Speicherleerungen mit bis zu 60 Tagesladungen am Ende des Sommers. Windenergie mit dem höheren Benutzungsgrad von 50 % könnte die Speicherleerung und damit die für eine sichere Stromversorgung erforderliche Speicherkapazität auf ca. 26 Tagesladungen reduzieren.

Ein optimaler Mix dieser beiden Energiearten würde eine drastische Reduzierung der maximal notwendigen Speicherkapazität bewirken. Nur alle paar Jahre, während des Winters, käme es zu einer bedeutenden Inanspruchnahme der Speicherkapazität. Häufig würden die Speicher über viele Monate hinweg mit weniger als einer halben Tagesladung beansprucht, meistens wären die Speicher gut gefüllt.

Die Palette der vorgenommenen Untersuchungen umfasst sowohl nationale als auch europaweite Szenarien. Dabei wurden erzeugungsseitig verfügbare Handlungsspielräume, verschiedene Speicheralternativen und unterschiedlich leistungsfähig ausgebaute Übertragungsnetze analysiert. Eine den Speicherbedarf minimierende Kombination zur Stromgewinnung aus Sonne und

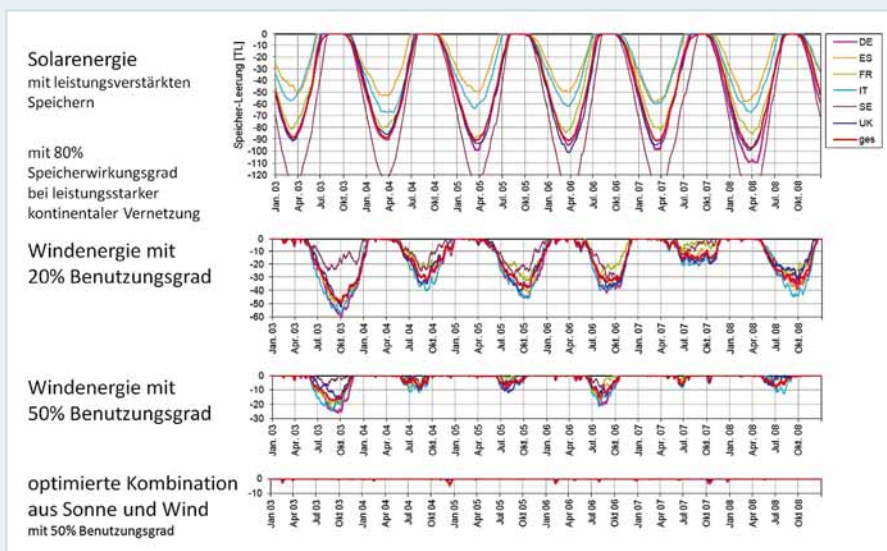


Abb. 6 Speicherleerungskurven technisch umsetzbarer regenerativer Versorgungssysteme für 30 % Erzeugungsreserve

Wind mit hohem Benutzungsgrad von 50 % würde bei Speichern hohen Wirkungsgrads im Falle einer nationalen Versorgungslösung mit ca. 14 und bei einer europaweiten Kooperation mit ca. 6 Tagesladungen Speicherkapazität auskommen.

Auch mit Speichern niedrigen Wirkungsgrads, bei denen Wasserstoff oder Methan als Energieträger dienen könnte, kann eine sichere und bedarfsgerechte regenerative Stromversorgung realisiert werden. Bei 40 % elektrischem Speicherwirkungsgrad würde bei einer optimierten Erzeugung mit einer Speicherkapazität von ca. 65 Tagesladungen eine bedarfsgerechte Versorgung bei 30 % Erzeugungsreserve noch funktionieren.

Ringwallspeicher als Zukunftsoption

Die in Deutschland im Jahr 2011 verfügbare Pumpspeicherkapazität entspricht ca. 1/36 Tagesladung der durchschnittlichen Stromnachfrage. Zur Speicherung von 1 kWh Energie, die heute für ca. 20 ct aus der Steckdose bezogen werden kann, ist bei Pumpspeichern ca. 1 t Wasser auf 400 m Höhe zu heben. Für eine in weiterer Zukunft angestrebte regenerative Stromversorgung Deutschlands auf der Basis von Wind und Sonne und ohne Rückgriffmöglichkeit auf fossile und nukleare Energieträger würde das bedeuten, dass im nationalen Alleingang die derzeit vorhandene Speicherkapazität mit 14 Tagesladungen in etwa um den Faktor 500 zu erhöhen wäre. Bei einer sich aus heutiger Perspektive jedoch nicht abzeichnenden optimalen europaweiten Kooperation würde sich bei erforderlichen sechs Tagesladungen immer noch ein ca. 200-facher Speicherbedarf ergeben.

Als denkbare geotechnische Realisierungsoption von Speichersystemen, die diesen Bedarf decken könnten, bietet sich das Ringwallspeicherkonzept an (Abb. 7). Damit können auch in Gebieten, die für klassische Pumpspeichersysteme nicht in Frage kommen, große Speicherkapazitäten mit hohem Wirkungsgrad errichtet werden. Der Vorteil dieser Speichertechnologie ist, dass dabei große Höhenunterschiede geschaffen oder natürlich vorhandene Höhenunterschiede vergrößert werden können.

Ringwallspeicher unterscheiden sich von klassischen Pumpspeichern dadurch, dass

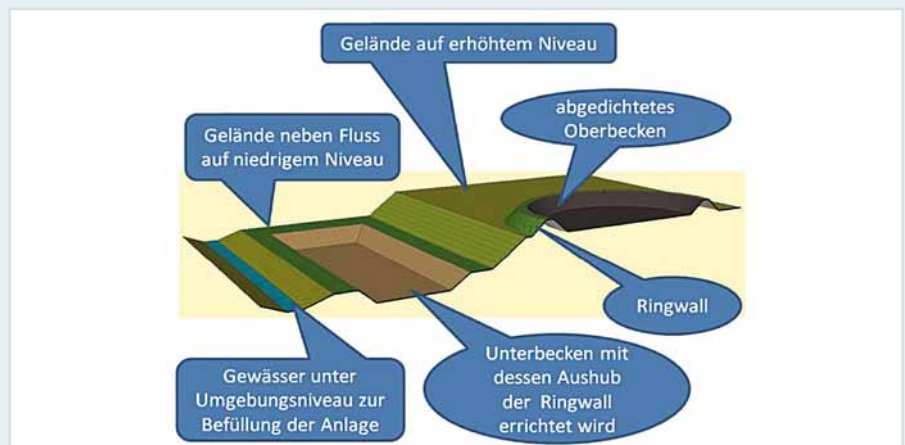


Abb. 7 Ringwallspeicher als geotechnische Option zur Schaffung großer Speicherkapazitäten

auf die direkte Flutung sensibler Flusstäler verzichtet werden kann. Zudem führen bereits geringere Höhenunterschiede sowie weniger markante und sensible Höhenlagen zu wirtschaftlich interessanten Konfigurationen und es lassen sich damit auch sehr große Speicherkapazitäten realisieren. Die Geometrie dieser Speicher führt mit zunehmender Größe zu einer rasanten, mit der vierten Potenz der geometrischen Abmessungen anwachsenden Kapazität.

Aufbruch zu einer neuen nachhaltigen Stromversorgung

Eine sichere, robuste und bedarfsgerechte, zu 100 % regenerative Stromversorgung erfordert heute eine Windenergieanlage pro ca. 1 300 Einwohner. Hinzu kommen pro Einwohner ca. 20 m² Solarmodulfläche und bspw. ca. 40 m² Wasserfläche für wirkungsgradstarke, dezentrale, gut über das Land verteilte Stromspeicheranlagen. Zusammen beansprucht das ca. 1 % der Landesfläche. Im Vergleich dazu würde eine 100 %-ige Stromversorgung mit Biomasse pro Einwohner ca. 2 200 m² oder nahezu die Hälfte der Landesfläche Deutschlands erfordern. Der als machbar erachtete Volatilitätsausgleich mit Ringwallspeichern dürfte sich damit für ein regeneratives Stromversorgungssystem als vergleichsweise kostengünstige Lösung erweisen.

Soll die Energiewende kein Wunschtraum bleiben und nicht zu einer kostspieligen Eskapade der deutschen Energiepolitik werden, dann sollten alle Regionen, die sich eine bedarfsgerechte Stromversorgung aus natürlichen Energiekreisläufen wünschen, auch die

erforderlichen Erzeugungs-, Speicher- und Übertragungseinrichtungen begrüßen. Eine sichere und bedarfsgerechte zu 100% regenerative Stromversorgung ist eine reale Zukunftsoption. Für die Umsetzung bestehen sowohl erzeugungsseitig, als auch bei den Speichertechnologien große Spielräume. Die Lernkurve zur gesamtwirtschaftlich vorteilhaften Erschließung dieser Potenziale befindet sich jedoch noch ganz am Anfang.

Zu begrüßen wäre heute deshalb eine ganzheitliche Herangehensweise beim Aufbau und bei der Förderung erneuerbarer Energiesysteme bezüglich aller dazu notwendigen Komponenten. Ziel sollte sein, dass man damit am Ende des Tages in der Lage ist, konventionelle Kraftwerkskapazitäten zu ersetzen und diese nicht nur zu ergänzen. Dabei geht es weniger um die Bewältigung einer technisch oder finanziell schwer lösbaren Herausforderung als vielmehr um eine gesellschaftliche Willensbildung sowie die Schaffung geeigneter rechtlicher und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen, welche die erforderlichen Investitionen in Gang bringen.

*Dr.-Ing. M. Popp, Inhaber, Ingenieurbüro Popp, Wunsiedel
matthias@popppware.de*

Die Forschungsarbeit und Dissertation des Autors „Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien“ ist im Springer-Verlag 2010 als Buch erschienen und schaffte es ins Finale um den RWE Zukunftspreis 2011.