

Birgit Knoblauch

Energieversorgung aus 100 % regenerativen Energiequellen

**Möglichkeiten der Energiespeicherung
und der Netzstruktur**

**Knoblauch, Birgit: Energieversorgung aus 100 % regenerativen Energiequellen:
Möglichkeiten der Energiespeicherung und der Netzstruktur, Hamburg,
Diplomica Verlag GmbH 2014**

Buch-ISBN: 978-3-8428-8728-2

PDF-eBook-ISBN: 978-3-8428-3728-7

Druck/Herstellung: Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© Diplomica Verlag GmbH

Hermannstal 119k, 22119 Hamburg

<http://www.diplomica-verlag.de>, Hamburg 2014

Printed in Germany

Vorwort

Eine Vollversorgung mit 100% EE wird nur durch einen strukturellen Wandel des Energiesystems vollzogen werden können. Die Herausforderung besteht darin, den Elektrizitäts-, Wärme- und Transportsektor in Zukunft gemeinsam zu betrachten und Synergien zu nutzen. Die hauptsächliche Energiebereitstellung wird dabei durch PVA und WEA erfolgen. Der in nahezu allen grundlegenden Studien zur Energietransformation prognostizierte massive Ausbau von WEA offshore wird in dieser Arbeit nicht befürwortet. Eine regenerative Energieversorgung ist eine dezentrale Energieversorgung.

Die Volatilität der Strombereitstellung erfordert ein schnelles Reagieren des Kraftwerkparks, sowohl zur Begegnung der negativen wie auch der positiven Regelleistung. Konventionelle Großkraftwerke jeder Art sind daher für die zukünftige Versorgungsstruktur ungeeignet. Es müssen geeignete Kurzzeit- wie auch Langzeitspeicher für den Regelbedarf bereitgestellt werden. Insbesondere bei der PV sind zusätzliche Systemleistungen erforderlich. Durch eine bedarfsgerechte Verteilung der EE-Anlagen in Deutschland auch im Hinblick auf WEA oder PV werden Ausgleichseffekte erzielt. Diese dienen dem Lastausgleich. Der Grad der Ausgleichseffekte ist daher abhängig vom Grad der Dezentralisierung. DSM ist ein wichtiger Bestandteil der zukünftigen Netzstruktur und Regelglied für den Lastausgleich.

Die skizzierten Mengengerüste stellen nur mögliche Entwicklungsergebnisse des Energiesektors dar und sollen als eine Lösungsoption von vielen gesehen werden. Der daraus resultierende Speicherbedarf ist eine entsprechende Option. Eine Erhöhung der Speicherkapazität zieht eine Reduzierung der Erzeugungsreserve nach sich und umgekehrt. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine Erhöhung der Kapazität der EE-Anlagen mit zeitweiser Überproduktion in Kombination mit Speichersättigung, die zur Abregelung von EE-Anlagen führt, gegeben. Die Möglichkeiten, zu dem Ziel der 100% EE-Versorgung zu gelangen, sind sehr flexibel. Es ist genügend technologische Vielfalt und Potenzial geboten, um ausfallende Anteile bestimmter Technologien durch andere Technologien wieder abzufangen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Bilderverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Verzeichnis der Grundbegriffe	IX
Abkürzungen und Einheiten	X
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Schwerpunkt der Studie und Fragestellung	1
1.2 Methodik	1
2 Grundlagen.....	3
2.1 Ausgewählte Speichersysteme	3
2.1.1 EE-Gas-Speichersysteme.....	7
2.1.2 Pumpspeicherkraftwerke	14
2.1.3 Druckluftspeicherkraftwerk.....	27
2.1.4 Vergleich	30
2.2 Ausgewählte Erneuerbare Energien	33
2.2.1 Solarenergie	33
2.2.2 Windenergie.....	36
2.2.3 Wasserkraft.....	41
2.2.4 Biomasse zur Stromerzeugung.....	43
2.2.5 Tiefe Geothermie	43
2.3 Lastmanagement	44
2.3.1 Intelligentes Stromnetz (Smart Grid).....	45
2.3.2 Netztransformation.....	51

3	Szenarien	54
3.1	Stündlicher Strombedarf	54
3.2	Täglicher Strombedarf	56
3.3	Jährlicher Strombedarf und dessen Lastausgleich	56
4	Wirtschaftliche Aspekte	67
5	Zusammenfassung	73
	Literaturverzeichnis	75

Bilderverzeichnis

Bild 1:	Technische Speichermöglichkeiten	4
Bild 2:	Vergleich der Systemgrößen und Entladungszeit von verschiedenen Energiespeichern /1/	4
Bild 3:	Zeitlich unterschiedliche Fluktuationen der EE-Überschüsse (links) und des Spitzenlastbedarfs der verbleibenden Last (rechts). Darstellungsreihe mit aufsteigendem Anteil an EE /3/	6
Bild 4:	Aufbau und Funktionsweise einer Elektrolyse /10/	8
Bild 5:	Konzept zur Wandlung überschüssigen Stroms aus EE-Anlagen zu Methan (SNG) mit Rückverstromung in Gasturbinen- oder Gas- und Dampfturbinenkraftwerken (GuD) nach /6/	10
Bild 6:	Prinzip eines GuD, Gas- und Dampf Kombikraftwerk /13/	11
Bild 7:	Prinzip einer Brennstoffzelle /14/	12
Bild 8:	Potenziale zur SNG-Erzeugung aus CO ₂ Quellen /9/	12
Bild 9:	Schema eines Pumpspeicherkraftwerkes /20/	15
Bild 10:	Standort Pumpspeicherkraftwerke und deren Turbinenleistung /9/	16
Bild 11:	Einsatzbereitschaft bei Betriebsartenwechsel am Beispiel PSKW Goldisthal /23/	17
Bild 12:	Schema Pumpspeicherwerk unter Tage /27/	19
Bild 13:	Bergbauregion nach Eignung entsprechend des Kriterienkataloges aus den bergmännischen Untersuchungen /28/	20
Bild 14:	Querschnitt durch einen Braunkohletagebau /29/	21
Bild 15:	Konzept Pumpspeicherkraftwerk in einem Tagebaurestloch /29/	22
Bild 16:	einfachste Form eines Ringwallspeichers /31/	23
Bild 17:	Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk /32/	24
Bild 18:	Flächenverbrauch in km ² in Relation zum Energiebedarf und Anzahl bereitgestellter Tagesladungen. Annahme: mittlere Fallhöhe 100 m, Pegelschwankung 20 m, Entladewirkungsgrad 94%. Bedarf an Ober- und Unterbecken.	26
Bild 19:	Funktionsprinzip eines adiabaten Druckluftspeichers nach /38/	28
Bild 20:	Solarkarte Deutschland, mittlere Jahressummen /46/	33

Bild 21: Flächenbedarf für 200 GW installierte Photovoltaik (linke Abbildung), sowie Potenziale der Photovoltaik /49/	34
Bild 22: Flächenpotenzial für die Installation von PVA /50/	35
Bild 23: Geplante und tatsächliche Stromproduktion /51/	36
Bild 24: Beispiel einer Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeiten /10/	37
Bild 25: Anteil an nutzbarer Fläche in Prozent /54/	38
Bild 26: Verteilung von Flächen für gute Standorte und Schwachwindstandorte /54/	39
Bild 27: Nutzbare Fläche in km ² pro Bundesland /54/	40
Bild 28: Aufteilung des technischen Potenzial großer (links) und kleiner bis mittelgroßer Gewässer (rechts) /55/	42
Bild 29: Dezentrale Stromerzeugung eines Smart Grid Systems /62/	46
Bild 30: eGrain /64/	47
Bild 31: Verschiedene Ladearten für E-Fahrzeuge /67/	48
Bild 32: Zeitbereiche der Demand Side Integration im Vergleich mit netzüblichen Prozessen und Technologien /68/	50
Bild 33: Anteile Energiemedien verschiedener Entwicklungsziele im Verkehrssektor.	52
Bild 34: Durchschnittlicher Tageslastgang, Mittwoch und Sonntag /74/	54
Bild 35: Zeitlicher Verlauf ruhender Anteil der Fahrzeuge /75/	55
Bild 36: Tägliche Höchst- und Tiefstlast im deutschen Verbundsystem des Jahres 2006 /74/	56
Bild 37: Verlauf des prognostizierten Bruttostrombedarfs/a bis zur annähernden Vollversorgung mit EE (Säule 2060) der Leitstudie 2011 des BMU /58/.	57
Bild 38: Energieverbrauch nach Nutzungsart ohne Umwandlungs-und Transportverluste.	59
Bild 39: Vergleich Anteile verschiedener EE-Quellen, 3 Fokussierungen. Annahme VLS: Photovoltaik 900, Windenergie onshore 2071, Windenergie offshore 4400.	60
Bild 40: Möglichkeit der Deckung und Darstellung des zukünftigen Bruttoenergiebedarfs in TWh/a	61

Bild 41: Höchst- und Tiefstwerte der kalendertäglichen Windenergieeinspeisung für das Jahr 2006 /74/	62
Bild 42: Höchst- und Tiefstwerte der kalendertäglichen Windenergieeinspeisung für das Jahr 2007 /74/	62
Bild 43: Jahresganglinie von Last, EE-Erzeugung und Residuallast im Referenzszenario (Daten der Jahre 2009/2010) /35/	63
Bild 44: Jahresganglinie von Last, EE-Erzeugung und Residuallast im 100% Szenario /35/	64
Bild 45: Szenario von Stromnutzung und -erzeugung in einer Winterwoche /50/	66
Bild 46: Investitionskosten der Leistung verschiedener Speicher (bezogen auf Austrittsleistung); bei P2G und Wasserstoffspeicher inkl. Kosten für GuD-Anlage (700 €/kW) zur Rückverstromung /9/	69
Bild 47: Spezifische Investitionskosten der Kapazität der Speicher.	69
Bild 48: Spezifische Stromeinspeisungskosten inklusive Kosten des Strombezugs /9/	70
Bild 49: Stromgestehungskosten /35/	71
Bild 50: Gesamtentwicklung der Differenzkosten aus den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr /79/	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einige Kenngrößen und Kriterien zur Beurteilung von Energiespeichern	3
Tabelle 2: Gesamtwirkungsgrad unter Einbeziehung von Transport mit Lade- und Entladevorgang, Erneuerbare Energie aus Windenergieanlage und Photovoltaikanlage. Wirkungsgrade basierend auf Angaben für die jeweilige Technik bzw. Anlageform, Daten eigene Berechnung und teilweise überarbeitet nach /42/; Wirkungsgrad (WG), Wirkungsgrad Zwischenschritt (WGZ)	30
Tabelle 3: Speicherdichte in Kavernen, bzw. bei Pumpspeicher Speichersee, Daten teilweise aus /43/	32
Tabelle 4: ausgewählte Eigenschaften verschiedener Speichersysteme. (AZ = Aktivierungszeit)	32
Tabelle 5: Jährliches Leistungs- und Ertragspotential durch Windkraftanlagen	40
Tabelle 6: Leistungspotenzial der einzelnen Bundesländer im Vergleich (berechnet auf Grundlage von Daten der Studie /54/)	41
Tabelle 7: Netzspannungen in Deutschland nach /61/	44
Tabelle 8: Steuerbare Lasten in GW nach BMU Leitstudie 2010 nach /8/	50
Tabelle 9: Reduktion der Kurzzeitspeicherenergie und -leistung durch DSM nach /35/	51
Tabelle 10: Frequenzanalyse der Residuallasten nach /35/ und daraus resultierender Speicherbedarf	64
Tabelle 11: Parameter zur Berechnung der Investitionskosten eines Pumpspeicherkraftwerkes . Nach /35/	67
Tabelle 12: Parameter zur Berechnung der Investitionskosten eines Adiabaten Druckluftspeichers . Nach /35/	68
Tabelle 13: Parameter zur Berechnung der Investitionskosten einer Elektrolyseanlage . Die Turbine wird im Kraftwerkspark berücksichtigt. Nach /35/	68

Verzeichnis der Grundbegriffe

Bruttostromverbrauch	ist die verbrauchte Gesamtstrommenge. Im Gegensatz zum Nettostromverbrauch fließen auch Verteilungsverluste und der Eigenverbrauch der Kraftwerke mit in den Wert ein.
Grundlast	beschreibt das Lastband, das über 24 Stunden nahezu konstant ist.
Mittellast	beschreibt prognostizierbare, geschlossene Leistungsblöcke, die den größten Teil des zur Grundlast zusätzlichen Tagesbedarfs abdecken.
Nettostromverbrauch	ist die vom Endverbraucher abgenommene elektrische Energie (Endenergie), er enthält keine Übertragungsverluste und keinen Eigenbedarf von Kraftwerken
Performance Ratio	Zum Effizienzvergleich netzgekoppelter PVA an verschiedenen Standorten und mit verschiedenen Modultypen wird häufig der Performance Ratio verwendet. Unter "Performance Ratio" versteht man das Verhältnis von Nutzertrag (Wechselstromertrag) und idealisiertem Ertrag (Produkt aus Einstrahlungssumme auf die Generatorfläche und nominellem Modulwirkungsgrad) einer Anlage. Neue, sorgfältig geplante Anlagen erreichen PR-Jahreswerte zwischen 80 und 90%.
Residuallast	Differenz zwischen der benötigten Leistung und der Leistung, die nicht regelbare Kraftwerke erbringen. Sie weist daher zeitliche Schwankungen auf
Spitzenlast	deckt den verbleibenden Leistungsbedarf ab, wobei es sich in der Regel um die Tagesmaxima handelt.
Systemwirkungsgrad	Der Systemwirkungsgrad einer PVA ist das Verhältnis von Nutzertrag (Wechselstromertrag) und Einstrahlungssumme auf die Generatorfläche. Der nominelle Modulwirkungsgrad geht in den Systemwirkungsgrad ein.