

SCHWERPUNKT

Wang, G.; Chen, J.; Wang, X. et al., 2013: Influence of Several Additives on Stability and Electrochemical Behavior of V(V) Electrolyte for Vanadium Redox Flow Battery. In: Journal of Electroanalytical Chemistry 709 (2013), S. 31–38

Wu, X.; Xu, H.; Lu, L. et al., 2014: PbO₂-modified Graphite Felt as the Positive Electrode for an All-vanadium Redox Flow Battery. In: Journal of Power Sources 250 (2014), S. 274–278

Wu, X.; Xu, H.; Shen, Y. et al., 2014: Treatment of Graphite Felt by Modified Hummers Method for the Positive Electrode of Vanadium Redox Flow Battery. In: Electrochimica Acta 138 (2014), S. 264–269

Yeo, R.S.; Chin, D.-T., 1980: A Hydrogen-Bromine Cell for Energy Storage Applications. In: Journal of The Electrochemical Society 127/3 (1980), S. 549–555

Kontakt

Prof. Dr. Jens Tübke
Fraunhofer-Institut Chemische Technologie (ICT)
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7, 76327 Pfinztal
E-Mail: jens.tuebke@ict.fraunhofer.de



Energiespeicher und alternative Energieausgleichsoptionen aus diversen systemischen Perspektiven

von Bert Droste-Franke, EA European Academy of Technology and Innovation Assessment GmbH, Bad Neuenahr-Ahrweiler

Die Herausforderungen sind groß: Bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien müssen zunehmend Differenzen zwischen Angebot und Nachfrage im elektrischen Netz ausgeglichen und kritische räumliche Distanzen überwunden werden, um eine sichere Elektrizitätsversorgung in Deutschland und Europa zu gewährleisten. Neben Energiespeichern können auch diverse andere Optionen eingesetzt werden, um Angebot und Nachfrage im Stromsektor auszugleichen. Ausgehend von den erwartbaren Herausforderungen und Anwendungsbereichen werden in diesem Beitrag die bereits heute absehbaren möglichen und teilweise konkurrierenden Optionen aus verschiedenen systemischen Perspektiven diskutiert. Dazu werden zunächst vorliegende technisch-ökonomische Szenarioanalysen untersucht und ihre Grenzen diskutiert. Danach wird eine erweiterte Bewertung der Zukunftsfähigkeit einiger relevanter Ausgleichsoptionen unter Umwelt-, Ressourcen- und gesellschaftlichen Aspekten vorgenommen.

The challenges are big: In order to enable a safe and reliable energy supply in Germany and Europe with large shares of renewable energy, differences between supply and demand in the electrical grid have to be balanced as well as critical spatial distances need to be overcome. Beside storages, other diverse options can be used to stabilize supply and demand in the electricity sector. Based on expected challenges and areas of application this contribution discusses the already existing and partly competing options from different systemic perspectives. For this, assessments from technical-economic scenario-analyses are examined. Then, with the help of a framework of the assessment regarding future viability, several options and combinations with production

facilities environmental aspects, resource use and societal aspects are analysed.

1 Einleitung

Nach den meisten Szenarien für die zukünftige Energieversorgung und nach den aktuellen Entwicklungen wird der Anteil von Photovoltaikanlagen und Windkraftwerken in Deutschland in Zukunft deutlich anwachsen. Da sie nur dann elektrischen Strom produzieren, wenn Sonne und Wind ausreichend zur Verfügung stehen, müssen ergänzend Optionen entwickelt werden, die CO₂-arm Lücken zwischen Angebot und Nachfrage schließen können. Wenn man sich die Herausforderungen, die systemischen Zusammenhänge und technischen Möglichkeiten anschaut, ergeben sich diverse Optionen, die für die Anpassung von Angebot und Nachfrage im Stromsektor herangezogen werden können. Zur Beurteilung dieser Optionen ist eine ausgiebige Betrachtung aus möglichst vielen relevanten Perspektiven notwendig. Im Folgenden werden einige dieser Perspektiven eingenommen, indem technisch-ökonomische Ergebnisse jeweils um umweltseitige, ressourcenseitige und gesellschaftliche Aspekte ergänzt werden.

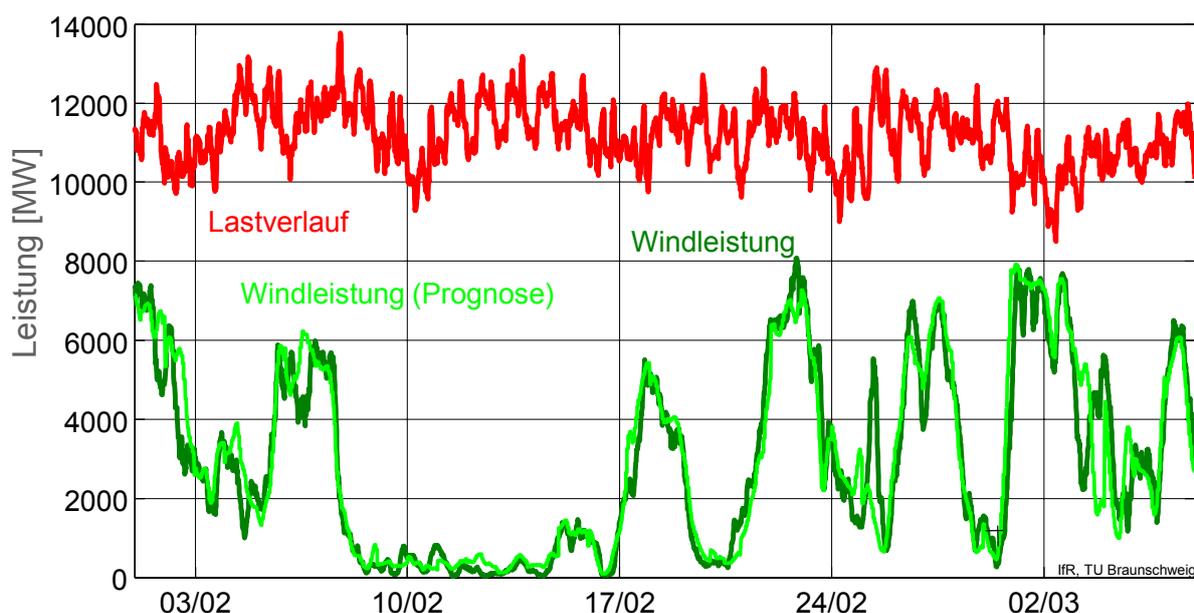
2 Die Herausforderungen

2.1 Zeitliche Schwankungen der Erzeugung

Eine beispielhafte Situation im Februar 2008 im elektrischen Netz von Vattenfall (Abb. 1), hervorgerufen durch Windkraftanlagen, zeigt bereits eindrücklich, in welchen Größenordnungen Stromlücken schon bei der Nutzung erneuerbarer Ressourcen in vergleichsweise geringen Mengen zu erwarten sind. So können auch die in Deutschland installierten Pumpwasserspeicherkraftwerke mit insgesamt etwa 40 GWh Speicherkapazität die benötigte Energiemenge von über 500 GWh für die 10-Tage-Lücke bei weitem nicht aufbringen. Um diese Lücken zu füllen, sind Ausgleichsoptionen notwendig, mit denen Energie in der benötigten Menge vorgehalten und über einen längeren Zeitraum bereitgestellt werden kann.

Außerdem müssen auch kurzfristige Schwankungen ausgeglichen werden können. Besonders die Windeinspeisung zeigt starke kurzfristige Änderungen der tatsächlichen Einspeisung (dunkel) gegenüber dem prognostizierten Wert (hell). Hierzu sind Ausgleichsoptionen mit hoher Leistung notwendig, um in kurzer Zeit besonders viel Energie bereitstellen zu können.

Abb. 1: Lastverlauf und Windleistung im Vattenfall Hochspannungsnetz (1.2.–6.3.2008)



Quelle: nach IfR/TU Braunschweig; Bünger et al. 2009, S. 13

2.2 Räumliche Verteilung elektrischer Energie

Auch Menge und räumliche Verteilung von Erzeugungsanlagen haben Einfluss auf die Stärke der Gradienten und Tiefe der Lücken. Im Fall einer Wetterfront mit Starkwind kann eine relativ gleichmäßige Verteilung von Anlagen dazu führen, dass die Erzeugungsleistung nur gering schwankt (Pape et al. 2013). Trotz optimaler Verteilung von Solar- und Windkraftanlagen über Europa wird jedoch voraussichtlich ein Bedarf an zusätzlicher Ausgleichsenergie verbleiben (Heide et al. 2010). Für die räumliche Verteilung der Elektrizität ist jedoch ein ausreichend dimensioniertes elektrisches Netz notwendig. Ohne entsprechende Kapazitäten in Übertragungsnetzen kann die erzeugte Energiemenge nicht zu den Verbrauchern transportiert werden. Kritisch sind hier die räumliche Distanz zwischen Erzeugung und Verbrauch und geringe Übertragungskapazitäten zwischen verschiedenen Regionen in Europa. ENTSO-E (2014, S. 59ff.) identifiziert besondere Probleme bei den Verbindungen der baltischen Staaten mit anderen EU-Ländern, von Großbritannien und Irland mit dem europäischen Festland, von Italien mit den nördlichen Nachbarn und der spanischen Halbinsel mit dem Rest von Europa.

3 Konkrete Systemaufgaben und Anwendungsfelder

Für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage lässt sich eine ganze Reihe von Systemaufgaben identifizieren. Die wesentlichen haben Perrin et al. (2015) auf Basis von DERri (2014) und Akhil et al. (2013) zusammengestellt. Diese sind im Folgenden wiedergegeben (basierend auf Perrin et al. 2015, S. 115ff.). Die *typischen Zeitskalen* sind in Klammern angegeben:

- Zeitverschiebung („Electric energy time shift“) (*Stunden*): Zeitliche Verschiebung elektrischer Energie im Netz aufgrund von Preisarbitrage durch Nutzung der Preisdifferenzen bei An- und Verkauf von elektrischer Energie zu verschiedenen Zeiten;
- Spitzenkappung („Peak-shaving“) (*Stunden*): Reduzierung der Nachfrage durch Bereitstellung von Energie in Zeiten hoher Nachfrage;
- Frequenzunterstützung („Frequency support“) (*Sekunden*): kontinuierliche Regulierung durch Energiebereitstellung und -nutzung mit dem Ziel, die erlaubten Grenzen der Frequenzabweichungen des Wechselstroms im Netz einzuhalten;
- Regelenergie („Control power/regulation“) (*Sekunden bis Minuten*): Regelung bzw. Ausgleich momentaner Abweichungen von Angebot und Nachfrage;
- Leistungsregulierung bei unregelmäßigen Energiequellen („power regulation with intermittent sources“) (*Sekunden bis Minuten*): Regulierung des Leistungsaustauschs mit übergeordneten Netzwerkebenen;
- Rotierende und stehende Reserve („spinning reserves, standing reserves“) (*Minuten bis Stunden*): Bereitstellung von Reserve mit vorhandenen laufenden oder stehenden Anlagen, sehr kurzfristig bis längerfristig;
- Kurzfristige Spannungsunterstützung („Voltage support – short timescale“) (*Sekunden bis Minuten*): Blindleistungsunterstützung auf Netzebene zu Haltung der Spannungshöhe in den erlaubten Grenzen;
- Lastnachbildung („Load following“) (*Minuten bis Stunden*): Bereitstellung von Energie bzw. Speicherung mit dem Ziel das Angebot an die Lastkurve anzunähern;
- Schwarzstart („Black start“) (*Sekunden bis Minuten*): Schwarzstartkapazität bereithalten, um die Elektrizitätsversorgung, z. B. nach einem technischen Ausfall, anzufahren;
- Glättung des Elektrizitätsangebots einer Anlage („Smoothing for integration of non-predictable sources“) (*Minuten bis Stunden*): Ausgleich des Stromangebots um eine möglichst gleichmäßige Abgabe zu erreichen;
- Investitionsaufschub („Investment Deferral“) (*Stunden*): Netzfremdliche Einspeisung um die Netzinfrastruktur optimal zu nutzen und Investitionen in dem Bereich so lange wie möglich hinauszuschieben;
- Langfristige Spannungsunterstützung („Voltage support – long timescale“) (*Minuten bis Stunden*): Spannungsbereitstellung, um die Netzspannung in den erlaubten Bereichen zu halten;
- Qualitäts- und Stabilitätsmanagement („Power quality and stability“) (*Sekunden*): Ge-

wahrleistung einer verlässlichen und qualitativ hochwertigen Versorgung mit wenigen Schwankungen in der bereitgestellten Energie und Leistung für Kunden;

- Verlässlichkeit der Versorgung („Power reliability“) (*Sekunden bis Minuten*): Vermeidung von Ausfällen der Elektrizitätsversorgung.

4 Die Optionen aus technisch-systemischer Perspektive

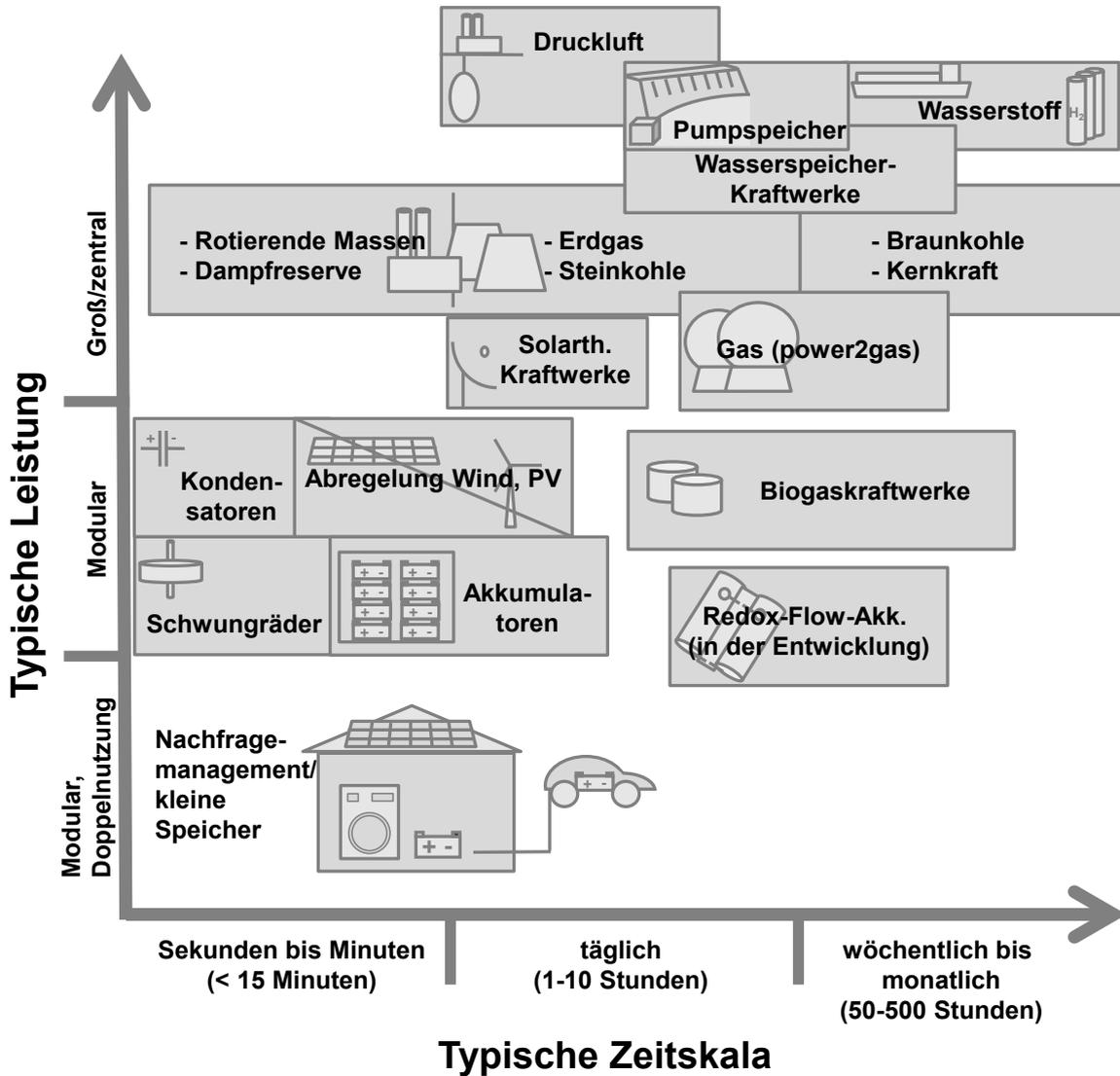
Wenn man die Einzeloptionen anschaut, ergibt sich eine Reihe von Möglichkeiten für den zeitlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage (Droste-Franke et al. 2012). Sie lassen sich danach sortieren, ob man mit ihnen Strom bereitstellen (positive Ausgleichsenergie) oder die Abnahme von Strom erhöhen kann (negative Ausgleichsenergie). Energiespeicher zeichnen sich dadurch aus, dass man mit ihnen sowohl positive als auch negative Regelenergie bereitstellen kann.

Um die Technologien nach ihren Eigenschaften zu sortieren, bietet es sich an, zu untersuchen, inwiefern mit ihnen wesentliche Aufgaben erfüllt werden können (s. oben). Zu unterscheiden sind für den Ausgleich zeitlicher Schwankungen in den Extremen: Optionen, die auf hohe Leistung ausgelegt sind, und Optionen, die eine hohe Speicherkapazität aufweisen oder langfristig Strom bereitstellen können. Eine Einordnung der Anlagen nach typischer Leistung und typischen Zeitskalen, auf denen sie besonders gut einsetzbar sind, macht die Konkurrenzen sichtbar. Bei der Leistung lassen sich große zentrale Anlagen, modulare Anlagen und kleine modulare Anlagen mit Doppelnutzen unterscheiden. Bei den typischen Zeitskalen, auf denen sie arbeiten (Energie zu Leistungsverhältnis) lassen sich Systeme unterscheiden, die im Sekunden- bis Minutenbereich, im stündlichen bis täglichen Bereich und im wöchentlichen bis monatlichen Bereich eingesetzt werden können. Eine entsprechende Einordnung von Technologieoptionen nach diesem Schema ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Optionen mit ähnlicher Leistung und mit ähnlichem Energie-Leistungs-Verhältnis (ähnlicher Zeitskala) können etwa gleich gut für die oben aufgelisteten Aufgaben herangezogen werden und stehen damit in direkter Konkurrenz zueinander.

Im Bereich der *Energiespeicher* (positive und negative Ausgleichsenergie bereitstellbar) sind bei den großen typischen Leistungen von 100 MW bis 1 GW v. a. Druckluftspeicher (100 MW–1 GW) und Pumpwasserkraftwerke (10 MW–1 GW) sowie Wasserstoffspeicher (10 kW–1 GW) (z. B. Kavernen mit entsprechender Rückverstromung über Gasturbinen) zu nennen. Sie sind v. a. für die mittel- und langfristige Speicherung nutzbar. Bei modularen Speichern mit geringerer typischer Leistung von 1 kW bis 100 MW und ohne Doppelnutzen sind v. a. Akkumulatoren und elektrische Speicher zu erwähnen. Während Kondensatoren, Schwungräder und Nickel-Cadmium-/Nickel-Metalhydrid-Akkumulatoren v. a. im Sekunden bis Minutenbereich der Bereitstellung von Ausgleichsenergie genutzt werden können, da sie ein hohes Leistungs- zu Energieverhältnis aufweisen, können Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Bereich von Sekunden bis mehreren Stunden eingesetzt werden. Weitere Akkumulatoren für den Stundenbereich sind Natrium-Schwefel- und Zink-Brom-Akkumulatoren. Redox-Flow-Akkumulatoren haben den Vorteil, dass der Strom in chemischer Energie in flüssigen Medien gespeichert wird, die die Aufgabe der Elektroden übernehmen. Durch Austausch der Flüssigkeit und Speicherung in extra Tanks kann die Speicherkapazität beliebig erhöht werden. Dadurch ist der Redox-Flow-Akkumulator auch für längerfristige Speicherung sehr gut nutzbar. Die Technologie ist allerdings noch in der Entwicklung. Modulare Speicher mit Doppelnutzen (1 kW–1 MW) sind v. a. Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge, die bidirektional geladen werden können, und Akkumulatorensysteme, die zusätzlich zu Photovoltaikanlagen installiert wurden. Sie sind typischerweise im Sekunden bis Stundenbereich einsetzbar.

Im Bereich der Bereitstellung *positiver Ausgleichsenergie* sind bei den großen Anlagen die konventionellen Kraftwerke, Wasserspeicherkraftwerke (ohne Pumpfunktion) und solarthermische Anlagen zu nennen. Dabei wird kurzfristige Ausgleichsenergie durch rotierende Massen und Dampferreserven bereitgestellt. Im Mittelfristbereich können Gas- und Steinkohlekraftwerke sowie Wasserspeicherkraftwerke und solarthermi-

Abb. 2: Schematische Einordnung konkurrierender Technologien zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage



Quelle: Droste-Franke et al. 2015, eigene Übersetzung

sche Kraftwerke eingesetzt werden. Auch langfristig sind Wasserspeicherkraftwerke einsetzbar und zusätzlich, aufgrund der hohen Fixkosten und niedrigen variablen Kosten, üblicherweise Braunkohle- und Kernkraftwerke. Als modulare Option ohne Doppelnutzen im Bereich von 1 kW bis 100 MW können Biogaskraftwerke im täglichen und Wochen- bis Monatsbereich eingesetzt werden. Im Bereich der modularen Optionen mit Doppelnutzen sind für den Sekunden- bis Minuten-, bis hoch zum Stundenbereich Ladungstopps bzw. -reduktion von unidirektional ladbaren Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen zu nennen. Im täglich-

chen Bereich sind zusätzlich Kraftwärmekopplungsanlagen und Nachfragemanagement elektrischer Lasten zu berücksichtigen.

Im Bereich der Bereitstellung *negativer Ausgleichsenergie*, d. h. Erhöhung des Verbrauchs oder Verringerung der Erzeugung, stellen die Produktion von Wasserstoff und die Verwendung des Wasserstoffs für andere Produkte außerhalb des Stromsektors Optionen mit großer Leistung dar. Dazu zählen die direkte Nutzung des Wasserstoffs im Verkehrssektor aber auch die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs in Methan und Methanol zur Nutzung in anderen Sektoren. Ihr Einsatz ist

im Stunden- bis Tagesbereich und wöchentlichen bis monatlichen Bereich sinnvoll. Die Optionen sind auch für die Bereitstellung geringer Leistung einsetzbar. Zur Verringerung der Erzeugung im Kurzfrist- und Mittelfristbereich können Wind- und Photovoltaik-Anlagen abgeschaltet werden. Modulare Optionen mit Doppelnutzen sind im Sekunden- bis Minuten- und Stundenbereich Nachfragemanagement von Verbrauchern in Haushalten und Industrie inklusive dem Einsatz elektrischer Hausheizungen und Klimatisierungen (inklusive Wärmepumpen) sowie das Laden von Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen.

Für die praktische Realisierung sind die Umsetzungspotenziale der Technologieoptionen wichtig. Die Potenziale für Doppelnutzen-Optionen sind grundsätzlich durch den konkurrierenden Hauptnutzen eingeschränkt. Ein Elektrofahrzeug muss z. B. so geladen werden, dass dem Eigentümer keine oder nur geringe Nutzungseinbußen zugemutet werden. Als weiteres Beispiel kann die Flexibilität von Kraftwärmekopplungsanlagen nur dann genutzt werden, wenn sie nicht Volllast laufen müssen, um den Wärmebedarf abdecken zu können. Zudem sinkt mit zunehmender Isolierung der Wärmebedarf in Häusern, wodurch das Potenzial des Einsatzes von Kraftwärmekopplungsanlagen sinkt. Vor allem bei Wasser-(pump-)speicherkraftwerken ist das Potenzial durch die räumlichen Gegebenheiten stark vorgegeben und eingeschränkt. Ein Hauptproblem stellt hierbei die nur sehr geringe volumetrische Energiedichte von ca. 1 kWh/m³ dar, weil zur Speicherung lediglich die potenzielle Energie des Wassers genutzt wird. Mit der Speicherung von Wärme und elektrochemischer Energie in Batterien oder chemischer Energie in Gasen sind deutlich höhere Speicherdichten von mehreren hundert kWh/m³ erreichbar. Flüssige synthetische Brennstoffe wie Wasserstoff und Methanol weisen Energiedichten von mehreren tausend kWh/m³ auf. Ihre Herstellung ist allerdings mit hohen Energieverlusten verbunden.

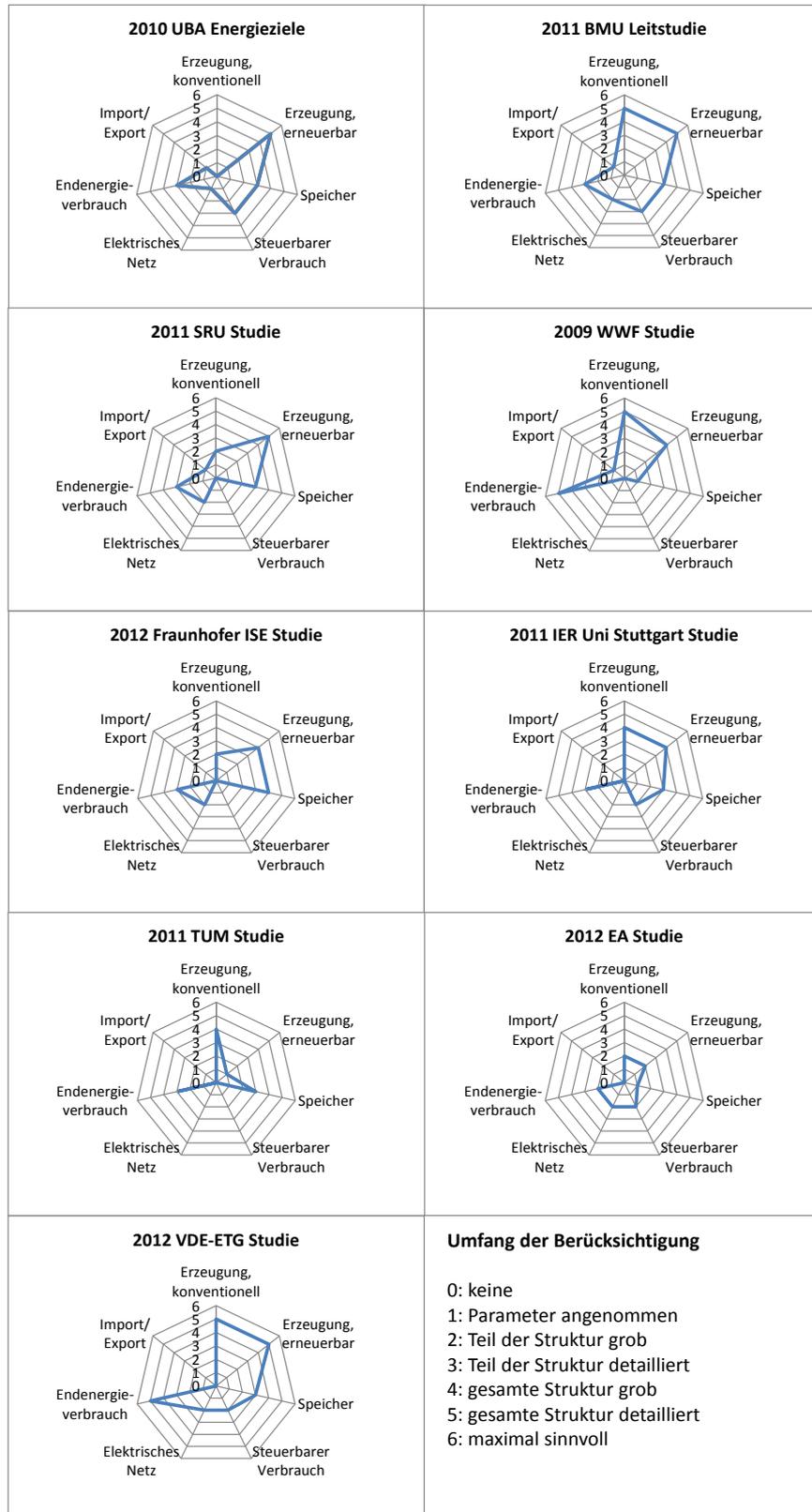
5 (Grenzen der) Aussagen aus technisch-ökonomischen Systemanalysen

Aus der obigen Diskussion ist ersichtlich, dass viele unterschiedliche Optionen für die Bereitstellung von Ausgleichsenergie genutzt werden kön-

nen. Entsprechend schwierig und stark abhängig von dem Betrachtungsbereich und den Annahmen sind daher auch Abschätzungen dazu, wie hoch der Bedarf an einzelnen Technologien – wie z. B. Energiespeichern – ist. Diverse technisch-ökonomische Analysen auf der Basis von Szenariobetrachtungen für zukünftige Jahre, meistens 2030 und 2050, analysieren solche Technologien explizit oder beinhalten sie zumindest, so dass ihnen ein Bedarf an einzelnen Technologien zu entnehmen ist. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt allerdings, dass belastbare Aussagen dazu weder auf deutscher noch auf europäischer Ebene möglich sind (Droste-Franke 2015). Je nachdem, welche Technologien in welcher Tiefe und mit welchen Annahmen berücksichtigt wurden, ergaben sich in den Studien sehr unterschiedliche Ergebnisse. Eine Analyse des Umfangs der in Studien berücksichtigten Technologien zeigte, dass vielfach einzelne relevante technische Optionen nur schwach oder gar nicht abgedeckt wurden (Abb. 3).

Aussagen lassen sich höchstens in Richtung des Bedarfs an Ausgleichsenergie ohne Bezug zu einer konkreten Technologie treffen, der von den verschiedenen, oben diskutierten technischen Optionen, inklusive flexibler Erzeugung, abgedeckt werden kann. Solche Abschätzungen sind jedoch für die Studien mit Schwerpunkt auf Deutschland kaum möglich, da die Rolle der Importe und Exporte von Strom und teilweise die Beiträge anderer Technologien zur Bereitstellung von Ausgleichsenergie den einzelnen Studien nicht zu entnehmen sind. Insgesamt ergeben sich starke Unterschiede in den Abschätzungen der potenziellen Verfügbarkeit von Ausgleichsenergie in den Szenarien. Bei Betrachtungen mit einem Anteil von 80 % erneuerbarer Energien an der Elektrizitätserzeugung ergeben sich ca. 20 bis 35 GW für die Leistung bzw. 2 bis 8 TWh für die „Speichergröße“; für Szenarien mit 100 % Anteil erneuerbarer Energien an der Elektrizitätserzeugung 20 bis 100 GW für die Leistung und 15 bis 140 TWh für die benötigte „Speichergröße“ (Droste-Franke 2015). In diesen Analysen sind allerdings nur Optionen enthalten, die im Stunden- bis monatlichen Bereich eingesetzt werden können. Der kurzfristige Bereich ist nur in einzelnen Studien und separaten Berechnungen grob abgedeckt. Der Bedarf an sehr kurzfristigem Ausgleich ist nicht berücksichtigt.

Abb. 3: Umfang der Berücksichtigung wichtiger technischer Optionen in verschiedenen Studien mit Fokus Deutschland



Quelle: Droste-Franke et al. 2015, eigene Übersetzung

Aus der Diskussion wird klar, dass sehr viele Technologien genutzt werden können und daher die Annahmen in den Studien so unterschiedlich sind, dass sich schon aus den rein technisch-ökonomischen Betrachtungen kein eindeutiges Ergebnis für den Ausgleichsbedarf und schon gar nicht für den Speicherbedarf bzw. Einsatzbedarf bestimmter Technologien herauslesen lässt. Dadurch, dass in den Hauptanalysen der betrachteten Studien die maximal übliche Auflösung eine Stunde ist, sind für die Technologiemixe Möglichkeiten des Einsatzes für kurzfristige Ausgleichsleistungen nicht berücksichtigt. Darunter fallen u. a. Einsatzmöglichkeiten im Regelenergiemarkt. Nutzen und Erlösmöglichkeiten mit Zeitskalen unterhalb einer Stunde, die z. B. eine Reihe von Akkumulatoren und Nachfragemanagement erwirtschaften könnten, werden daher systematisch vernachlässigt. Zusätzlich ist es schwierig, Leistungen, für die keine Märkte bestehen, zu honorieren. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass in einem gewissen Umfang Technologien wie Elektrofahrzeuge und Speicher von Photovoltaikanlagen vorhanden sein werden, die auch für die Bereitstellung von Ausgleichsenergie genutzt werden können (Doppelnutzen-Optionen). Die Nutzung von Energieprodukten in anderen Sektoren ist nur vereinzelt abgedeckt.

Solche rein technisch-ökonomischen Analysen betrachten keine Umweltauswirkungen. Sie beinhalten lediglich von außen vorgegebene Ziele, die darauf abheben eine gewisse Menge von CO₂-Emissionen nicht zu überschreiten oder die Menge der CO₂-Emissionen um einen Betrag zu reduzieren. Zusätzlich sind auch keine Ressourcenaspekte und nur vereinzelt gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt. Daher ist die Aussagekraft solcher Analysen im Hinblick auf die Zukunftsfähigkeit der Empfehlungen sehr begrenzt. Das ist u. a. an der Analyse der Perspektiven, die in den Studien eingenommen werden, zu erkennen. Die Analyse für zwei wesentliche Studien zum Energiekonzept der deutschen Bundesregierung (Schlesinger et al. 2010; Nitsch et al. 2010) zeigt z. B., dass diese zwei unterschiedliche Schwerpunkte haben, die im technisch-ökonomischen bzw. technisch-naturwissenschaftlichen Bereich liegen, ohne wesentliche detaillierte Betrachtungen in anderen Bereichen.

6 Zukunftsfähigkeit von Ausgleichstechnologien

Zur Realisierung zukunftsfähiger Systeme kann eine operative Handlungsregel in Form von vier Prioritäten abgeleitet werden, die sowohl Nachhaltigkeits- als auch Wohlfahrtsaspekte enthält (für Details Droste-Franke et al. 2012; Droste-Franke et al. 2009; Droste-Franke 2005):

1. „Schutz der Umwelt vor inakzeptablen Schäden durch Einhaltung kritischer Belastungsgrenzen“;
2. „Erhaltung [oder minimal notwendige Reduktion] des Gesamtwerts produzierten und natürlichen Kapitals“ unter Einhaltung von Priorität 1;
3. „Maximierung [gesamtgemeinschaftlicher] intertemporaler Wohlfahrt“ unter Einhaltung der Prioritäten 1 und 2;
4. „Gerechte Verteilung der Grundlagen in der Gegenwart“ (Droste-Franke et al. 2009, S. 18).

Basierend auf Steger et al. (2002) wurden in Droste-Franke et al. (2012) Umwelt-, Ressourcen- und gesellschaftliche Aspekte von Energiespeicheroptionen untersucht, welche hier, mit Schwerpunkt auf die Umweltaspekte, diskutiert werden sollen.

6.1 Umweltaspekte

Mit erster Priorität (s. „1.“ oben) sind im Bereich der Umwelteinflüsse solche Effekte zu berücksichtigen, die dazu führen können, dass kritische Belastungsgrenzen überschritten werden könnten. Zu diesem Zweck wurden in Droste-Franke et al. (2012) zunächst Projektionen wesentlicher industrieller Hintergrundprozesse auf 2050 herangezogen und ein Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien angenommen (ESU/IFEU 2008). Für die Analysen der Umweltbelastungen durch die Herstellung und Nutzung einzelner Energiespeichersysteme wurden entsprechende Prozesse aus Daten zu Lebenszyklusanalysen (Ecoinvent 2010) und Abschätzungen von Maack (2008) verwendet, auf deren Basis Lebenszyklus-Screenings für einige Technologien durchgeführt wurden.

Für die Bewertungen der Belastungen in kritischen Bereichen wurde das Bewertungsschema „CML 2001“⁴¹ verwendet. Unterschieden wurden für den kurzfristigen Ausgleich von Schwankungen Technologiekombinationen von Photovoltaik und Wind mit Blei-Akkumulator sowie mit Lithium-Ionen-Akkumulator und verschiedene Gaskraftwerke sowie für den längerfristigen Ausgleich Technologiekombinationen von Photovoltaik und Wind mit Pumpwasserspeicher-Kraftwerken sowie mit einem Elektrolyseur² zur Wasserstoffgenerierung und verschiedene Gaskraftwerke. Die Ergebnisse geben erste Hinweise dazu, in welchen kritischen Bereichen die Technologiekombinationen zu höheren Belastungen führen können als die anderen Optionen. Es ist zu erkennen, dass die Nutzung neuer technischer Optionen gegenüber den Erdgasoptionen mit Verschiebungen in den Umweltbelastungen verbunden ist, die in Szenarioanalysen näher betrachtet werden sollten, um die Zukunftsfähigkeit eines Energiesystems einschätzen zu können. So führt bei Optionen zum kurzfristigen Ausgleich die Verwendung von Blei-Akkumulatoren zu höheren Belastungen in den Bereichen der Versauerung und terrestrischen Ökotoxizität, während die Verwendung von Li-Ionen-Akkumulatoren zu Belastungen in den Bereichen Eutrophierung und Wasser-Ökotoxizität führt. Bei den Langfrist-Optionen schneiden Elektrolyseure schlechter ab als Pumpwasserspeicher, mit Schwerpunkten bei Versauerung, terrestrischer Ökotoxizität, Eutrophierung und Frischwasserökotoxizität. Die Verwendung von Gas-Kraftwerken als Alternativen führen u. a. zu erhöhtem Verbrauch abiotischer Ressourcen und Belastungen durch Ozonschichtzerstörung und Klimawandel (für weitere Details s. Droste-Franke 2012; Droste-Franke et al. 2012).

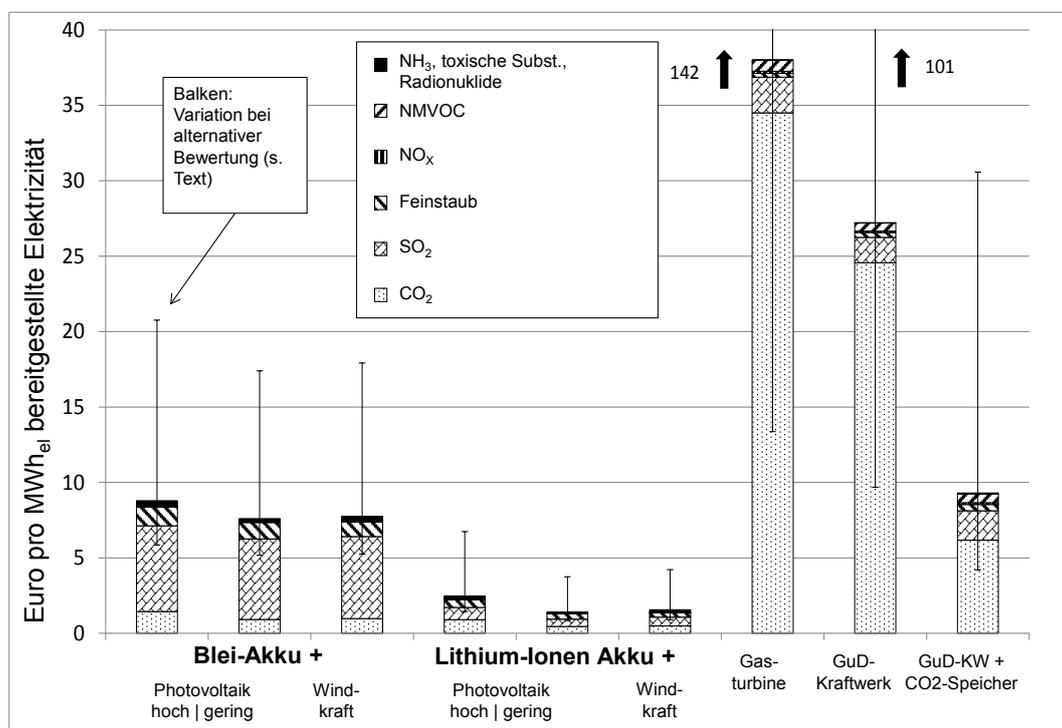
Marginale Schäden führen zu (markt-)externen Effekten, die zur Beseitigung von Marktunvollkommenheiten im Wirtschaftssystem adäquat internalisiert werden sollten. Diese Berücksichtigung zielt auf die in der operativen Handlungsregel angeführte Maximierung intertemporaler Wohlfahrt ab (s. o. Priorität 3), indem die Funktion des Marktes, im Gleichgewicht ein Pareto-Optimum zu realisieren, gewährleistet werden soll (Droste-Franke 2005, S. 31ff.). Können externe Kosten quantifiziert werden, so können diese über

entsprechende marktwirtschaftliche Instrumente wie Steuern eingepreist werden. Diese Kosten sollten auch berücksichtigt werden, wenn eine optimale Umsetzung eines Energiesystems im Sinne der wirtschaftlichen Effizienz (Kosten-Nutzenabwägung) angestrebt wird. In den Berechnungen wurden dieselben Daten verwendet wie für die Belastungen in kritischen Bereichen. Für die Ermittlung der marginalen externen Kosten (Abb. 4 und 5) wurden generalisierte Faktoren nach Preiss et al. (2008) verwendet, in denen Gesundheitseffekte, Ernteverluste, Materialschäden an Fassaden und Verlust an Biodiversität enthalten sind. Für die Bewertung der Lebenszeitverluste wurden 40.000 Euro³ pro verlorenes Lebensjahr (YOLL – years of life lost) angenommen (mit Sensitivitätsanalysen für 25.000 und 100.000 Euro/YOLL), für die Bewertung von Klimafolgen 70 Euro/t_{CO₂} (mit Sensitivitätsanalysen für 20 und 280 Euro/t_{CO₂}). Die eingezeichneten Fehlerbalken geben die Schwankungen durch die Sensitivitätsvariationen wieder. Es ist zu erkennen, dass bei den betrachteten Umweltauswirkungen die Kombinationen mit Photovoltaik und Wind besser abschneiden, Varianten mit Blei-Akkumulatoren allerdings in ähnliche Größenordnungen kommen wie die auf Erdgas basierenden Technologien (Abb. 4 und 5). Der große Anteil der Schadenskosten durch CO₂-Emissionen bei den Erdgastechnologien (rechte Tripel der Abb. 4 und 5), die in erster Linie auf direkte Emissionen zurückzuführen sind, zeigt, dass eine Verwendung von Brennstoffen, bei denen (mindestens bilanziell) kein zusätzliches CO₂ in die Atmosphäre abgegeben wird, wie z. B. Biogas oder Wasserstoff bzw. synthetisches Gas aus Wind und Sonne, das Bild bereits deutlich verändern würde. Des Weiteren wird deutlich, dass ein Systemwandel dazu führen kann, dass sich Belastungen, z. B. von CO₂- zu SO₂-intensiven Optionen, verschieben können (s. Blei-Akkumulator, linkes Tripel, Abb. 4). Solche Entwicklungen sollten beobachtet und ihre Folgen bei möglichem großtechnischem Einsatz im Vorfeld genauer analysiert werden.

6.2 Ressourcennutzung

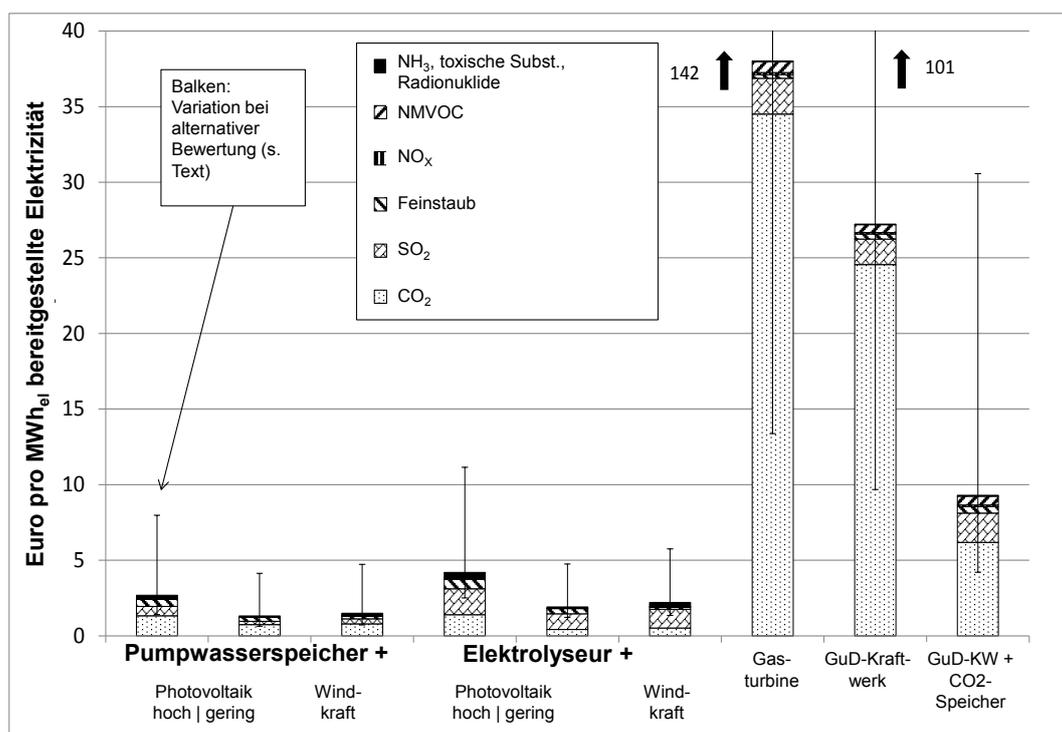
Der adäquate Umgang mit Ressourcen ist ein explizites Element zur Gewährleistung der Zukunftsfähigkeit eines Systems, wie an der ope-

Abb. 4: Marginale externe Kosten potenziell konkurrierender Optionen im Kurzfristbereich



Quelle: Eigene Darstellung, Droste-Franke 2012

Abb. 5: Marginale externe Kosten potenziell konkurrierender Optionen im Langfristbereich



Quelle: Eigene Darstellung, Droste-Franke 2012

rativen Handlungsregel zu sehen ist. Für die Bewertung der Ressourcennutzung durch die Verwendung von Energiespeichern wurden in Droste-Franke et al. (2012) diverse Indikatoren analysiert. Neben der Betrachtung der Höhe und Entwicklung der statischen Reichweite wurde die mit den vorliegenden Ressourcen produzierbare Speicherkapazität errechnet. Zusätzlich wurden Reservenbasis, Preisänderungen, regionale Konzentrationen in den Reservevorkommen und regionale Konzentrationen in Auslieferung und Erlösen analysiert. Verschiedene Materialien weisen Probleme im Bereich der Mengenentwicklung, der regionalen Konzentrationen, hoher Preise oder starker Preisanstiege auf. Titan ergab sich als vergleichsweise unproblematisch, während wenige Probleme mit Lithium, Vanadium, Arsen, Nickel und Zirkonoxid zu erwarten sind. Ein großtechnischer Einsatz von Akkumulatoren mit Lithium, Blei und Vanadium sollte allerdings mit der Erhöhung von Recyclingraten einhergehen.

6.3 Gesellschaftliche Aspekte

Gesellschaftliche Folgen haben diverse Anknüpfungspunkte an die Bewertung der Zukunftsfähigkeit von Technologien. Das gilt v. a. bei der Umstrukturierung des Energiesystems, da u. a. viel mehr Akteure direkt mit verschiedenen Komponenten des Energiesystems in Verbindung kommen als vorher. Die Zahl der Akteure und die Komplexität des Koordinationsbedarfs steigen. Die Analyse gesellschaftlicher Aspekte der technischen Optionen in Droste-Franke et al. (2012) ergab eine weitgehend positive Bewertung. Die Technologien tragen zur Versorgungssicherheit von Energie bei, die Diversität im System wird erhöht, der Zugang zu den Technologien und Möglichkeiten der Verbraucher beizutragen, steigt. Risikominimierung durch ausreichende Schutzmechanismen zur plötzlichen Freisetzung von Energie und gegebenenfalls weitere Zugeständnisse im technischen Design steigern voraussichtlich ihre Akzeptanz. Zusätzlich ist ein System mit solch hoher Diversität auch offen für weitere Optionen. Vor allem kleine modulare Technologien haben in diesem Bereich Vorteile. Bei der Realisierung großer zentraler Technologien sollte auf die Vermeidung von Importabhängigkeiten, der Schaffung von ausreichend Redundanz

und der adäquaten Beteiligung der Bevölkerung vor Ort geachtet werden.

7 Fazit

Aus den Analysen ist zu sehen, dass Energiespeicher und andere innovative Optionen für den Energieausgleich voraussichtlich in Zukunft eine wichtige Rolle im Elektrizitätssektor spielen werden. Energiespeicher können sowohl positive als auch negative Ausgleichsenergie bereitstellen. Sie stehen jedoch in Konkurrenz mit anderen innovativen Technologien. Zu berücksichtigen sind dabei u. a. Optionen mit Doppelnutzen, da ihre Verwendung für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage im Stromsektor oftmals nur einen geringen Mehraufwand bedeutet. Zu nennen sind hier beispielsweise Akkumulatoren in Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen und bei Photovoltaik- sowie Kraftwärmekopplungsanlagen, die vorzugsweise mit Biogas oder synthetischen Gasen aus erneuerbaren Energien betrieben werden.

Die Analyse einer Reihe von Studien zu Szenariobetrachtungen zukünftiger Energiesysteme zeigt, dass Technologien für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage benötigt werden. Allerdings ist die Zahl der Optionen so groß und sind die Annahmen und Aussagen der Studien so divers, dass in der Gesamtsicht der Studien keine konkreten Aussagen für den konkreten Bedarf einzelner Ausgleichstechnologien herauszuziehen sind. Eine genauere Betrachtung technoökonomischer Studien aufgrund einer Liste interessanter relevanter Perspektiven auf zukünftige Energiesysteme zeigt, dass einige Aspekte in den Studien fehlen. Unter anderem können mit den Studien nur beschränkte Aussagen zur Nachhaltigkeit bzw. Zukunftsfähigkeit bestimmter Umsetzungen getroffen werden.

Die Darstellung der Ergebnisse aus einer überschlägigen Analyse der Zukunftsfähigkeit einzelner Technologieoptionen und Kombinationen für den Energieausgleich zeigt, dass Umweltschutz, Ressourcennutzung und gesellschaftlicher Rahmen bzw. gesellschaftliche Auswirkungen weitere wesentliche Aspekte sind, die es zu beachten gilt, wenn ein Energiesystem langfristig zukunftsfähig gestaltet werden soll. Im Bereich der Umwelteffekte sind Verschiebungen der Um-

weltbelastungen aus dem Klimabereich zu anderen Bereichen zu erwarten. Diese sollten beobachtet und ihre Bedeutung weiter analysiert werden. Bei der Ressourcennutzung stehen mineralische Ressourcen im Vordergrund. Sie sind vernünftig zu bewirtschaften und ggf. aus genutzten Gütern möglichst wiederzugewinnen. Auch einige gesellschaftliche Aspekte sind bei der Gestaltung von Energiesystemen zu berücksichtigen. Auf rechtliche, weitere soziale und politische Belange konnte in diesem Rahmen nicht weiter eingegangen werden (s. hierzu Droste-Franke et al. 2012).

Insgesamt lässt sich aus der Betrachtung von Energiespeichern und anderen Ausgleichstechnologien aus den gewählten verschiedenen systemischen Perspektiven ableiten, dass einige CO₂-arme Optionen für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage im Elektrizitätssektor bestehen bzw. weiter entwickelt werden können, die, ergänzend zur Produktion von Wind- und Solarstrom, Systemaufgaben konventioneller Kraftwerke übernehmen können. Die verschieden ausgeprägte Eignung der einzelnen Optionen für unterschiedliche Anwendungen und die verschiedenen nicht-technischen Aspekte werden voraussichtlich dazu führen, dass letztendlich ein Mix verschiedener Technologien realisiert werden wird.

Anmerkungen

- 1) Name der verwendeten Methode zur ökologischen Bewertung innerhalb einer Ökobilanz.
- 2) Technische Vorrichtung zur Umwandlung elektrischer in chemische Energie über Elektrolyse.
- 3) Basis für die Bewertung ist das Jahr 2000.

Literatur

Akhil, A.A.; Huff, G.; Currier, A.B. et al., 2013: DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. Sandia National Laboratories, SAND2013-5131. Albuquerque

Bünger, U.; Crotogino, F.; Donadei et al., 2009: Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger. ETG Task Force Energiespeicher, Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG). Frankfurt a. M.

DERri – Distributed Energy Resources Research Infrastructures, 2014: Guidelines for Testing Grid Connected Storage. D_JRA-2.1.4, FP7 European Project. Brüssel

Droste-Franke, B., 2005: Quantifizierung von Umweltschäden als Beitrag zu Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Dissertation. Stuttgart

Droste-Franke, B., 2012: Assessing Environmental Impacts of Storage Technologies and Competing Options for Balancing Demand and Supply in 2050. Proceedings of 7th IRES Conference and Exhibition 2012. bcc. Berlin

Droste-Franke, B., 2015: Review of the Need for Storage Capacity Depending on the Share of Renewable Energies. In: Moseley, P.; Garche, J. (Hg.): Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing. Amsterdam

Droste-Franke, B.; Berg, H.; Kötter, A. et al., 2009: Brennstoffzellen und Virtuelle Kraftwerke. Energie-, umwelt- und technologiepolitische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung. Berlin (Ethics of Science and Technology Assessment 36)

Droste-Franke, B.; Carrier, M.; Kaiser, M. et al., 2015: Improving Energy Decisions. Towards Better Scientific Policy Advice for a Safe and Secure Future Energy System. Berlin (Ethics of Science and Technology Assessment 42)

Droste-Franke, B.; Paal, B.P.; Rehtanz, C. et al., 2012: Balancing Renewable Electricity. Interdisciplinary Perspectives on Energy Storage, Smart Grids, E-Mobility and Network Extension. Berlin (Ethics of Science and Technology Assessment 40)

Ecoinvent, 2010: ecoinvent data v2.2 – updated reports and tools online. Ecoinvent Centre – Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Empa/Technology & Society Lab (TSL), Switzerland; <http://www.ecoinvent.org>

ENTSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2014: 10-Year Network Development Plan 2014. Brüssel

ESU-Services Ltd.; IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2008: LCA of background processes. Deliverable D15.1, IP NEEDS, project no. 502687, Sixth Framework Programme. Brüssel

Heide, D.; Bremen, L. von; Greiner, M. et al., 2010: Seasonal Optimal Mix of Wind and Solar Power in a Future Highly Renewable Europe. In: Renewable Energy 35 (2010), S. 2483–2489

Maack, M., 2008: Generation, of the Energy Carrier HYDROGEN. In Context with Electricity Buffering Generation Through Fuel Cells. Deliverable 8.5 RS1a, IP NEEDS, project no. 502687, Sixth Framework Programme. Brüssel

Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y. et al., 2010: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksich-

tigung der Entwicklung in Europa und global. „Leitstudie 2010“. BMU, FKZ 03MAP146. Bonn; http://www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu_leitstudie2010.pdf (download 3.12.15)

Pape, C.; Arbach, S.; Gerlach A.-K. et al., 2013: Entwicklung der Windenergie in Deutschland. Eine Beschreibung von aktuellen und zukünftigen Trends und Charakteristika der Einspeisung von Windenergieanlagen. Kurzstudie. Berlin

Perrin, M.; Lemaire, E.; Bourien, Y.M. et al., 2015: Requirements for Test Procedures (WP IV). In: Doetsch, C.; Droste-Franke, B.; Mulder, G. et al. (Hg.): Electric Energy Storage – Future Energy Storage Demand. Final Report to International Energy Agency (IEA), ECES26. Paris

Preiss, P.; Friedrich, R.; Klotz, V., 2008: Report on the Procedure and Data to Generate Averaged/Aggregated Data and Respective Data Sheets. Deliverable 1.1 RS3a, IP NEEDS, project no. 502687, Sixth Framework Programme. Brüssel

Schlesinger, M.; Hofer, P.; Kemmler, A. et al., 2010: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Prognos AG, EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturfor-schung mbH (GWS). Basel et al.

Steger, U.; Achterberg, W.; Blok, K. et al., 2002: Nachhaltige Entwicklung und Innovation im Energiebereich. Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung Bd. 18. Berlin/Heidelberg

Kontakt

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Bert Droste-Franke
EA European Academy of Technology and
Innovation Assessment GmbH
Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Tel.: +49 (0) 26 41 973-324
E-Mail: bert.droste-franke@ea-aw.de



Speicher im Stromsystem der Energiewende

Eine Flexibilitätsoption im Wettbewerb

von **Christoph Brunner und Bernhard Heyder**, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien muss auch mehr für den Ausgleich der wetterabhängigen Erzeugung aus Wind und Sonne im Stromsystem getan werden. Um den steigenden Anteil schwankender Erzeugung zu integrieren, kommen unter anderem Speicher infrage. Aber auch Maßnahmen auf der Erzeugungs- und auf der Nachfrageseite sowie der regionale Ausgleich über das Stromnetz selbst können zu einer weiteren Flexibilisierung des Energiesystems beitragen. Welche Kombination dieser Flexibilitätsoptionen sich durchsetzt, hängt von ihren Kosten, dem energiewirtschaftlichen Rahmen, aber auch von den Bedürfnissen der Kunden ab. Der Artikel skizziert, wie ein kosteneffizientes Zusammenspiel von Flexibilitätsoptionen auch ohne genaue Kenntnis ihrer zukünftigen Entwicklung möglich wird. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die kontinuierliche Weiterentwicklung des Strommarktdesigns. Der Energiemarkt in seiner heutigen Form ermöglicht bereits in umfangreichem Maße den effizienten Einsatz bestehender Flexibilitätsoptionen. Am Beispiel von Batterien ist jedoch zu sehen, dass Preissignale des Marktes bei einigen Akteuren teilweise von weiteren Umlagen und Entgelten überlagert werden, sodass der Einsatz dieser Flexibilitätsoption derzeit unwirtschaftlich ist. Dies ist eine Erkenntnis, die auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in seinem kürzlich veröffentlichten Weißbuch „Ein Strommarkt für die Energiewende“ aufgegriffen hat und das in ersten Ansätzen aufzeigt, wie zukünftig weitere Flexibilitäten erschlossen werden sollen.

Due to the development of renewable technologies it is also necessary to do more for the balancing of the weather-dependent production from wind and sun in the electricity grid. Storage units are a way to integrate the gradually growing