

Herausforderungen größer als erwartet

Die wissenschaftlich-technische Komplexität der effektiven Speicherung großer Energiemengen stellt ein praktisches und theoretisches Kernproblem der Energiewende dar

Von Lutz-Günther Fleischer und Norbert Mertzsch



Prof. Dr.-Ing. habil.
Lutz-Günther Fleischer

Mitglied des Präsidiums der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.
Sekretar (Vorsitzender) der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften



Dr. rer. nat. Norbert Mertzsch

Vorsitzender des Vereins Brandenburgischer Ingenieure und Wirtschaftler e.V. und Leiter des Arbeitskreises Umweltschutz / Erneuerbare Energien
(Foto: Bernd Geller, Eisenhüttenstadt)

Die Energiewende in Deutschland, bei der das gesamte Energiesystem zu transformieren ist, fordert innerhalb der vielschichtig miteinander verflochtenen Probleme mit klimarelevanten Komponenten, dass fossile und nukleare Primärenergieträger (Vermögensenergieträger) konsequent und koordiniert substituiert werden. Angestrebt wird ein breiter und dynamisch ausgewogener Mix aus Einkommensenergieträgern. Diese ressourcenschonenden Substitute sind zwar nachhaltig, im Fall der dominierenden primären und sekundären Solarenergien fluktuieren sie jedoch naturgemäß.

Mit ihren Basis-Funktionen der bedarfsgerechten Bereitstellung, effizienten Wandlung, Übertragung, Speicherung und Verteilung sowie dem effektiven Einsatz von (Gebrauchs)Energien der erforderlichen Art, Form und Menge bildet die Energetik die technisch-technologische Hauptkomponente der Energiewende. Den funktionell/strukturellen Kern formiert die Elektroenergetik. In diesen ursächlichen Wechselwirkungen steht die Speicherung von Energien mit einer Vielfalt optimiert zu erfüllender Kriterien. Die Speicherung ist ein essentielles Element des energietechnischen Funktions- und Sicherungssystems. Sie bedarf der integrativen Entwicklung sowie des effektiven Einsatzes qualifizierterer und innovativer Energiespeichertechnologien. Diese Herausforderung betrifft die Technologien als prozessorientierte Sachsysteme (Technologien im tradierten Sinn) sowie die Theoriensysteme (Technologien als Wissenschaft), die diese begründen und permanent evolutionär verändern. Im Mittelpunkt des nachfolgenden Aufsatzes stehen Notwendigkeiten, Probleme, wissenschaftlich-technische Entwicklungen und Perspektiven der Energiespeichertechnologien.

Keywords:

Chemische Speicher, Energiewende, Elektrochemische Speicher, Energiespeichertechnologie, Einkommensenergieträger, Erneuerbare Energieträger, Mechanische Speicher, Vermögensenergieträger, Wasserstoffwirtschaft

1 Prioritäten und wissenschaftlich-technische Lösungsvarianten

Die ‚Energiewende (vgl. Abb.1) erweist sich als wesentlicher Ursprung und maßgebendes Ziel diverser wissenschaftlich-technischer Entwicklungen. Begrifflich dominiert in der Chiffre zwar die Energie (vgl. Tab.1), tatsächlich umschreibt diese Metapher die weit komplexere Transformation des ganzheitlichen soziotechnischen Systems. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind dazu pars pro toto die Effizienzsteigerung und

Effektivitätserhöhung der gesamten Energetik und darüber hinausreichend alle materiellen und ideellen Ressourcen heranzuziehen (vgl. Abb.1). Zu den unverzichtbaren technisch-technologischen Backup-Systemen bei der koordinierten Entwicklung und fortschreitenden Nutzung der Einkommensenergieträger (Charakterisierung siehe Tab. 2) gehören bestimmte Qualitäten und Quantitäten konventioneller Kraftwerke, vor allem aber modernisierte und (wohl erwogen) ergänzte (hybride Wechselstrom und Gleichstrom-)Netze im Nieder-, Hoch- und Höchstspannungsbereich, intelligente Netzeinbindungen sowie

das flexible Lastmanagement zur Lastglättung und kompatible Energiespeicher aller Typen und Leistungsmerkmale, für die heute nicht einmal die technischen Komponenten ausgereift sind.

Das diffizile *wissenschaftlich-technische Grundproblem der Energetik* (mit zahlreichen ökonomischen, ökologischen, soziotechnischen, politischen und weiteren Determinanten) besteht in der technologisch unerlässlichen (wirklich alternativlosen) Aufrechterhaltung eines, sich aus den *Bedarfs- und Deckungsbilanzen* definierenden, stationären Zustandes: eines adaptiven (ständig zu messenden, steuernden und einzuregelnden) technisch-technologischen *dynamischen Gleichgewichts (Fließgleichgewichts)*. Jederzeit müssen dafür positive und negative Regelleistungen/Speicherleistungen (im weiten Wortsinn) gesichert verfügbar sein, um Defizite (Last > Einspeisung) und Überschüsse (Einspeisung > Last) auszugleichen. Die

funktional zwingende Äquilibration¹ umfasst dementsprechend die Lastabforderungen, den momentanen Energiebedarf pro Zeiteinheit (Leistungen, Energieströme [W]) am gegebenen Ort (und über die vermaschten und spannungsgestufteten hybriden Netze im Gesamtsystem), mit jenen, von den Verbrauchern lokal und zentral abgeforderten Energieformen sowie Mengen pro Zeiteinheit und die adäquate Energiebereitstellung für jeden Gebrauchsenergiebedarf [Elektroenergie, Wärme(mengen), Mobilität; zum Beispiel für die EU-27: 50 Prozent, 31 Prozent, 20 Prozent,]. Die Lasten und die Aufkommen divergieren generell örtlich sowie zeitlich, wesensgemäß besonders gravierend bezüglich der Spitzen [Maxima] sowie der Minima in den Zeitreihen. Die Spezifik der tages- und jahreszeitlichen Lastabforderungen ist aus den bekannten Grafiken der (erfahrungsbasiert errechneten) Standardlastgänge der elektrischen Energie EE (zum Beispiel für die Haushalte an Sommer- oder Wintertagen) und aus den wesensgemäß graphisch weit bizarreren realen Lastprofilen für EE (aber auch für Gas und Fernwärme) bekannt. In Praxi müssen zur Sicherung dynamischer Gleichgewichte (damit der System- und Versorgungsstabilität) grundsätzlich zwei außerordentlich komplexe instationäre Teilsysteme der Energetik mit hoher Dynamik und Zufallsanteilen fortlaufend quantitativ und qualitativ nach mehreren energietechnischen Parametern kontrolliert und reguliert werden. Systemtheoretisch handelt es sich um deterministisch-chaotische Prozesse [1]. Sie sind – insbesondere wegen des irregulären Zeitverhaltens – schwer berechnen- und bilanzierbar, zukunftsgerichtet nur eingeschränkt zu extrapolieren, und sie stellen auch für die Wissenschaft eine enorme Herausforderung dar. Bei der herausragenden (universell nutzbaren, ausgezeichnet steuer- und regelbaren, rein exergetischen) elektrischen Energie umfasst das Lastmanagement unter anderem mit „Smart Grids“ und dem „Smart Metering“ neben den Energieflüssen mit exakt definierten Parametern, vor allem die Spannungs- und die Frequenzstabilität mittels Regelleistungen. Noch fehlen gesamtsystemische Analysen großer hybrider Netzstrukturen aus Gleich- und Wechselstromnetzen.

Wer sich ein realistisches Bild von den damit einhergehenden komplizierten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der (Mess-, Steuer-, Regelungs-, Informations- und Kommunikations-)Technik, die fachliche und soziale Kompetenz der Menschen sowie die dabei zu übernehmende außerordentliche Verantwortung ver-

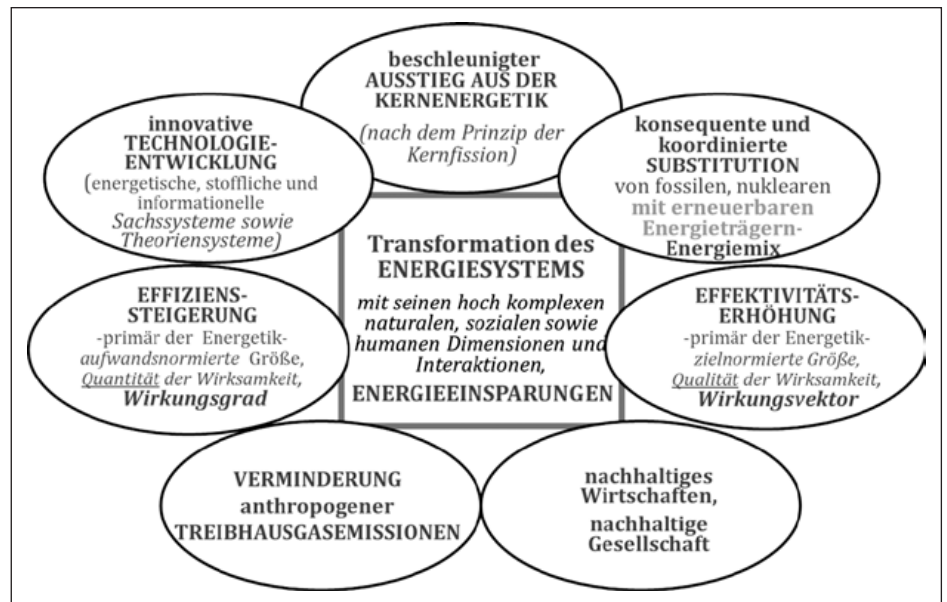


Abbildung 1: Kooperative Teilprozesse, Ziele und Mittel des hoch komplexen Transformationsprozesses „Energiewende“ [Fleischer, 2013]

schaffen möchte, dem wird eine aufschlussreiche Konsultation empfohlen bei der Cottbuser Firma GridLab GmbH, dem Europäischen Trainings- und Forschungszentrum für Systemsicherheit der Elektrizitätsnetze in Europa.

Generell kommt es bei der *Leistungs-Äquilibration* darauf an, alle realistischen zeitpunkt- und zeitraumorientierten Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Bedarfs- und die Deckungsbilanzen optimiert zu nutzen, eine qualifizierte Regulation mittels Organisation (Koordination) sowie Adaption (Anpassung) [beziehungsweise Assimilation und Akkommodation] zu bewirken. Zu den wirkungsvollen primären Anpassungen gehören das (auch ökonomisch zu stimulierende) zeitpunktorientierte (momentane) Verhalten aller Konsumenten sowie (weit bedeutsamer und nachhaltiger) das zeitraumorientierte Möglichkeitsfeld energierelevanter Handlungen und Vorkehrungen. Sie betreffen vorrangig die Erhöhung der zielnormierten Effektivität (des Wirkungsvektors-„das Richtige tun“) und die Steigerung der aufwandnormierten Effizienz (des Wirkungsgrades – „Etwas relational bestens bewirken“). Die Ergebnisse beider wesentlicher Anliegen der Energiewende bleiben bisher hinter den konzipierten Erwartungen und den Notwendigkeiten zurück. Die kostenintensive und zumeist verlustbehaftete Energiespeicherung zählt zu den sekundären technisch-technologischen Maßnahmen der Äquilibration. Es gilt, sie ursächlich möglichst weitgehend quantitativ zu minimieren. Zum umfassenden Komplex energieökonomischer Indikatoren der qualitativen und quantitativen Wirksamkeit gehört prinzipiell die Energieintensität. In Deutschland sank im Durchschnitt der zurückliegenden 15 Jahre dieser Primärenergieaufwand pro Einheit des preisbereinigten Bruttoinlandproduktes (BIP) um 1,3 Prozent pro Jahr (% a⁻¹). In der Primärenergie-Ebene beträgt der mittlere Leistungsbedarf eines statistischen Bürgers Deutschlands derzeit circa 5,2 Kilowatt (kW) – in den USA circa 10 kW, im Weltdurchschnitt circa 2 kW. Entscheidend ist allerdings die mengen-, qualitäts-, orts- und zeitgerechte Bereitstellung der erforderlichen Gebrauchsenergien und letztendlich deren effektiver prozesswirksamer Einsatz als Nutzenergien.

Die Elektroenergieerzeugung aus den regulär und irregulär fluktuierenden primären und sekundären Solarenergien mit den dafür in Deutschland gegenwärtig entscheidenden Photovoltaik- und Windkraftanlagen (PVA, WKA) unterliegt naturgesetzlich deut-

Energie: fundamentale physikalische Kategorie, extensive physikalische Größe, allgemeiner Oberbegriff (Abstraktum), beschreibt phänomenologisch alle Eigenschaften von Zuständen und Prozessen, die einer ARBEIT äquivalent sind, d. h. mit ihr identisch, zu ihr gleichwertig, proportional oder auf sie rückführbar und so physikalisch messbar [20]

Als (additive) Energieanteile $[\Gamma_j \cdot P_j]$ sind die Teilenergien j wegunabhängige Zustandsgrößen und als Energieformen $[\Gamma_j \cdot dP_j]$ bzw. $[\Gamma_j \cdot (dP_j/dt)]$, wie Arbeiten und Wärme(mengen) bzw. mechanische und elektrische Leistungen, Energieströme, wegbabhängige Prozessgrößen, also technisch-technologisch über den gewählten Weg der Veränderung beeinflussbar.

Generell gilt:

Gesamtenergie: $E_{ges.} = U + E_{kin.} = const.$ (Erhaltungssatz)
innere Energie: $U = \sum \Gamma_j \cdot P_j = T \cdot S + \sum L_i \cdot I_i + \sum \mu_k \cdot m_k$ (generalisierte Euler-Gleichung)

Symbolerläuterungen:

P_j – generalisierte **Quantitätsgröße** (state), Kapazität, systemtheoretisch räumliche 1-Punkt-Pergröße
 Γ_j – generalisierte, zu P_j energie-konjugierte **Qualitätsgröße** (rate), Potential, *Intensität*
 L_i – generalisierte Arbeitskoeffizienten (wie $L_1 = -p$ [Druck], elektrische Feldstärke, „magnetische Feldstärke“)
 I_i – generalisierte Arbeitskoordinaten (wie $I_1 = V$ [Volumen], elektrische Polarisation $\cdot V$, Magnetisierung $\cdot V$)
 μ_k – spezifisches chemisches Potential der Stoffkomponente k mit m_k (wobei $m_k = M_k \cdot N_k$ gilt)

Jeder Term der generalisierten Euler-Gleichung repräsentiert eine *Speichergruppe* mit charakteristischen Kapazitäten P_j und dazu energie-konjugierten Intensitäten/Potentialen Γ_j .

Jedes $\Gamma_j \cdot (dP_j/dt)$ definiert einen *Energiestrom*.

Jegliches energetische Geschehen in Natur, Technik und Gesellschaft unterliegt elementaren Gesetzmäßigkeiten: dem *bilanzierenden Energieprinzip* und zugleich dem „regierenden“ *Entropieprinzip*, dem ersten und zweiten Hauptsatz der persistenten Physik.

Das *Exergieprinzip* vereint praktikabel und anschaulich die Aussagen beider Hauptsätze und bilanziert die maximale technische Arbeitsfähigkeit unter definierten Umgebungsbedingungen. [20]

Energieträger sind phänomenologische Realitäten, messbare makrophysikalische Konkreta, die Energie (überdies Informationen) enthalten und/oder übertragen:

Stoffe	(Vielfalt von Spezies und Zuständen mit der elementaren Eigenschaft Masse bzw. Stoffmenge N_k),
Impulse	(präziser: translatorische und rotatorische <i>Bewegungsgrößen</i> [Erhaltungssatz], wie $m \cdot w_i$, [bzw. deren Dichten $\rho \cdot w_i$] mit Geschwindigkeitskomponenten w_i oder als Zeitintegral der Kräfte [Impulse]),
Felder	(skalare [wie p , T , p , μ_k], vektorieller [wie w_i und Kräfte z. B. K_G , $K_{el.}$, $K_{mag.}$] sowie weit seltener tensorieller Größen noch höherer Stufe. Die Feldgrößen sind räumlich und zeitlich verteilt).
Strahlungen	(Teilchen, Wellen mit räumlicher, zeitlicher und meist breiter spektraler Verteilung der Frequenzen bzw. Wellenlängen [v , λ mit $v \cdot \lambda = c$; $c \approx 3 \cdot 10^8$ m \cdot s $^{-1}$])

Tabelle 1: Physikalische Grundbegriffe und fundamentale Relationen

Einkommensenergieträger, Erneuerbare Energieträger (RETs):

Naturgegebene, ökologisch vorteilhafte Energieträger, die unter definierten Bedingungen fort-dauernd aber generell mengenlimitiert, zu einem Zeitpunkt (als Energieströme bzw. Leistungen [W]) oder über endliche Zeiträume integriert (als Energiemengen [W \cdot s = J]), aus den im Geosystem oder seinen Teilsystemen fließenden natürlichen (periodischen, intermittierenden, regulär und irregulär fluktuierenden) volatilen primären und sekundären Energie-/Stoffströmen oder aus seinen Bewegungen (wie der Erdrotation) gewonnen werden können bzw. die die Fähigkeit besitzen, sich über stoffliche und energetische Wandlungsprozesse in annehmbaren Zeitintervallen im jeweiligen Bilanzraum zu erneuern (z. B. Biomassen). Dabei sind die thermodynamisch offenen Systeme im Interesse ihrer zu sichernden multiplen Funktionalitäten im stationären Zustand (dynamischen Gleichgewicht) stabil zu (er)halten.

RETs sind letztlich aus der natürlichen exergetischen Entwertungskette (in erster Linie) der Solarstrahlung an begünstigten Stellen „extrahierte Exergien“, d. h. unter bestimmten Bedingungen (Bezugszustand) arbeitsfähige Energien [20]. Biomassen, Geothermie und Gezeitenenergien bleiben in ihrem energetischen Stellenwert deutlich hinter der Solarenergie zurück.

Erneuerbare Primärenergieträger dienen zunehmend der energetischen Direktnutzung oder zur Konversion in anwender- und bedarfsgerechte Gebrauchsennergien (Endenergien): elektrische, thermische und chemische [stoffliche] Energien unterschiedlicher Anforderungsniveaus und Parameter. Als Gebrauchsennergieträger fungieren in der „Drehtür“ der Energiewandlungskette vor allem feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe, Treibstoffe, Elektroenergie und fluide Heizmedien.

Vermögensenergieträger :

An Lagerstätten gebundene erschöpfbare natürliche Ressourcen: fossile und nukleare Energieträger-Kohlen [(Lignite)Braun- und Steinkohlen], Kohlenwasserstoffe [Erdöl und Erdgas], Kernbrennstoffe [Uran, Thorium] für Kernspaltungsreaktoren einschließlich deren vierter Generation.

Tabelle 2: Charakterisierung der Einkommens- und Vermögensenergieträger

lich ausgeprägter und volatiler als der Verbrauch von Elektroenergie den wetter-, tagszeit- und jahreszeitbedingten Schwankungen. Es gehört zu den problematischsten Eigenarten der Einkommensenergieträger, dass in den erzeugerbestimmten Transformationsprozessen insbesondere EE nicht bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden kann. Auch der ‚Wärmebedarf‘ und der Solarertrag stehen antizyklisch zueinander, weshalb die sozio-technischen Nutzungsstrategien zunehmend den synchronen ‚Kältebedarf‘ der Nutzergruppen einbeziehen. Leider werden überdies die – im Vergleich mit den Vermögensenergieträgern (Charakterisierung siehe Tab. 2) – technologisch wesentlich geringeren Energiedichten der Einkommensenergieträger und der daraus resultierende technische, ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Aufwand unterbewertet. Optimistische Leistungsbewertungen unterstellen eine mittlere globale Sonneneinstrahlung von 240 Watt pro Quadratmeter an der Erdoberfläche, für die Wind- und Wasserkraftnutzung unter unseren geographischen Bedingungen (bezogen auf die punktuell nach erzeugungstechnischen Anforderungscharakteristiken territorial verteilten Bedarfsflächen der Anlagen) etwas mehr als 8 Watt pro Quadratmeter und für den biochemischen Leistungsumsatz der Pflanzen (hoch veranschlagt) circa 0,5 Watt pro Quadratmeter (bis maximal 1 W \cdot m $^{-2}$ für ‚Energiepflanzen‘ in Monokulturen) [2]. Dennoch ist die komplexe Photosynthese in den Pflanzen (mit ihren wahrscheinlich 24 Teilreaktionen) der bei weitem bedeutungsvollste Prozess der natürlichen Energiespeicherung und überdies ein bionisches Modell für die Wasserstoffsynthese gegebenenfalls mit Konversion und stofflicher Speicherung (H $_2$, CH $_4$, CH $_3$ OH). Aus dem extensiven und territorial gegliederten Flächenbedarf entsteht für Deutschland – neben der Notwendigkeit der dezentralen Erfassung der ‚Energieernte‘, der zweckmäßigen Integration lokal generierter EE in die Niederspannungsebene sowie dem Umbau sowie der Installation leistungsfähiger Übertragungs- und Verteilungsnetze – das Problem der massiven Flächenkonkurrenz zum Natur-, Wirtschafts- und Siedlungsraum. Der anwachsende Flächenbedarf der Umnutzung lässt sich abschätzen. Laut Nationalem Aktionsplan erneuerbare Energien vom 4. August 2010 erwartet die Bundesregierung für das Jahr 2020 immerhin einen Anteil der Einkommensenergieträger am Elektroenergieverbrauch von 38,6 Prozent – das entspricht schätzungsweise 245 Terawatt elektrische Energie (TWh.EE). Für 2012 werden circa 135 TWh.EE ausgewiesen. In ihren Beschlüssen hat die Bundesregie-

zung dieses Sektorziel mit mindestens 30 Prozent fixiert. Modellrechnungen anderer Institutionen operieren mit Zahlenwerten, die davon abweichen.

2 Problemspektren der Entwicklung und des Einsatzes leistungsfähiger Energiespeicher

Energiespeicher sind Anlagen, Einrichtungen und Ausrüstungen mit verschiedenartigen Wirkprinzipien, Funktionsweisen, Betriebsverhalten und einem speziellen Aufbau. Sie müssen in der Lage sein, kleine Schwankungen und/oder unterschiedliche zeitliche Differenzen des (Gebrauchs)Energiebedarfs, der Nachfrage und des Energieangebots effektiv und effizient auszugleichen. Klassifiziert werden sie (im gegebenen Spezialfall des universellen Problems der Speicherung) vorzugsweise nach der ein- und/oder ausgespeicherten Energieform beziehungsweise nach den Energieströmen, die bei diesen Prozessen übertragen werden. In der Regel wird die zu speichernde Energieform transformiert. Beim Be- und Entladen der Speicher handelt es sich also um transiente physikalische Größen und keine energetischen Speicherzustände (vgl. Tab.1). Speicher sind in zahlreiche Technologien implementierte energie-, informations- und verfahrenstechnische Grundelemente mit breiter Anforderungscharakteristik. Schon heute ist unverkennbar, dass die technischen Herausforderungen größer sein werden, als vielfach dargestellt [3].

Es fällt auf, dass die Vielfalt energetischer Speicherkonstruktionen deutlich zunimmt. Gleichzeitig steigen die Fixkosten – das heißt die Investitionsaufwendungen für die installierte Leistung, gerechnet in Euro pro Megawatt [EUR (MW)^{-1}] – sowie die variablen Kosten (Betriebskosten der Anlage [EUR (MWh)^{-1}]). In der Literatur findet man jedoch viele euphorische Berichte über angeblich funktionsfähige innovative Speicherkonstruktionen und fortgeschrittene Speichertechnologien, die sich bei genauerem Hinsehen jedoch oftmals als ‚Papierspeicher‘ herausstellen. Dennoch werden sie im Interesse einer Forschungsstrategie oder Wissenschaftspolitik als funktionsfähige innovative Speicherkonstruktionen und fortgeschrittene Speichertechnologien angepriesen, die angeblich den geschilderten objektiven Erfordernissen gerecht werden, wirksam technologische Defizite reduzieren oder gar Lücken schließen.

Mit fortgeschrittenen Speichertechnologien sollen Erzeuger und Verbraucher bis zur Deckung der Grundlast harmonisiert werden. Anwendungstechnisch dominieren thermische Speicher aller Art, weil sich thermische Energie noch immer weitaus effizienter und kostengünstiger speichern lässt als elektrische Energie (woraus unter anderem die ‚power-to-heat‘ Empfehlungen resultieren).

Zur Speicherung größerer Elektroenergiemengen werden vorwiegend mechanische, chemische (stoffliche) und elektrochemische Speicher herangezogen. Elektroenergiespeicher in der Größenordnung des Tagesbedarfs einer Großstadt, das heißt circa 1 Gigawattstunde (GWh), sind ein ungelöstes Problem. Die funktionsfähigen Ansätze, die derzeit mit Pilotanlagen demonstriert werden, liegen erheblich unter dieser erstrebenswerten Kapazität. Die Erforschung, Entwicklung und der Einsatz leistungsfähiger Speicher für elektrische, thermische und chemische (stoffliche) Gebrauchsenergien/Endenergien gehört folgerichtig zu den dringendsten Aufgaben im FuE-Bereich. Die strategisch ausgerichtete Grundlagenforschung exponiert neben den Wirk-/Funktionsprinzipien materialwissenschaftliche Aspekte bis in die Strukturebene der Nanomaterialien. Unverzichtbar sind effiziente, kostengünstige, anpassungsfähige (idealerweise selbstregelnde) dynamische Speicher, die sich gut in das sich stetig wandelnde Energiesystem

integrieren lassen. Darüber hinaus sollten sie einen geringen Oberflächenbedarf aufweisen, eine hinreichende Kapazität besitzen sowie über hohe volumen-, flächen-, mengenbezogene ‚Energiedichten‘ beziehungsweise Energiestromdichten [W m^{-3} , W m^{-2} , W kg^{-1} oder W mol^{-1}] verfügen. Einen Universalspeicher wird es wesensgemäß selbst für einzelne Energieformen nicht geben und es existiert auch kein Pool ‚fertiger Lösungen‘.

Kriterien für die zu optimierende Auswahl aus der Vielfalt mechanischer, thermischer, elektrischer, chemischer, elektrochemischer und hybrider Speichertechnologien (mit und ohne Phasenumwandlungen beziehungsweise Reaktionen) sind grundsätzlich:

- die Speicherkapazitäten und -energiedichte
- die Speicherwirkungsgrade,
- die Speicherdauer (Verweilzeiten)
- die Speicherbe- und -entladezeiten
- die Speicherzyklen (Anzahl und Stabilität)
- die spezifischen Speicherkosten und generell
- die gesellschaftliche Akzeptanz.

Daraus resultieren für die stationären und die mobilen Energiespeicher die Ambitionen und die Möglichkeiten, die teils beträchtlichen Verbesserungspotentiale für bewährte Speichertechnologien weitreichender auszuschöpfen und über Neuentwicklungen der unterschiedlichsten Speichersysteme deren komplexe Leistungsfähigkeit (vgl. Speicherkriterien) auszugestalten sowie die Formenvielfalt bedarfsabhängig zu differenzieren. Einen guten Überblick bieten die Studien ‚Speicher für die Energiewende‘[4] und ‚Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit [5].

Fokussiert zu entwickeln und zielsicher einzuführen sind Kurz- und Langzeitspeicher aller Funktionsprinzipien sowie Größenskalen, die primär vom Einsatzzweck, insbesondere von den ein- beziehungsweise ausgespeicherten (Haupt-)Energieformen sowie vom Standort abhängen.

3 Ausgewählte Energiespeichersysteme

3.1 Speicherung elektrischer Energie

3.1.1 Schlüsselfunktion und Besonderheiten der elektrischen Energie

Die elektrische Energie – die ‚edelste‘ und vielseitigste der Gebrauchsenergien (Endenergien) – ist aus den verschiedensten Primärenergieträgern erzeugbar, wenn auch mit stark differierenden Wirkungsgraden η_{WI} und beträchtlichen technisch-ökonomischen Aufwendungen. Sie bietet indes einzigartige Vorteile, die selbst folgenschwere wissenschaftlich-technische und ökonomische Aufwendungen rechtfertigen. EE (hundertprozentige Exergie) generiert als herausragendes Arbeitsmittel eine qualitativ neue Gruppe von Technologien, kann universell genutzt und komfortabel mit vergleichsweise großen Wirkungsgraden η_{WII} in jede prozesswirksame Nutzenergieform umgewandelt werden. Sie hat eine nahezu unikale Schlüsselstellung in der Informations-, Kommunikations- (IuK), Mess-, Steuerung-, Regelungs-, Antriebs- und Beleuchtungstechnik, ist selbst ausgezeichnet mess-, steuer- und regelbar. Die EE weist allerdings auch typische Nachteile auf. Vor allem ist sie nur sehr investitionsintensiv zu erzeugen und bezogen auf die Energiemengen bisher nur unzureichend und damit unbefriedigend speicherbar.

Der gemeinhin genutzte (im Alltag völlig ausreichende) Begriff Strom wird hier bewusst vermieden. Auch die elektrische Energie ist eine transiente Größe. Sie wird vom Produkt aus zwei physikalischen Größen bestimmt: dem elektrischen Potential sowie der strömenden elektrischen Ladung. Für die elektrische Gesamtladung

dung gilt ein Erhaltungssatz. Infolge dieser Besonderheit durchfließt der Ladungsstrom – als der im physikalischen Sinne eigentliche Strom – lediglich die Leitungen, wird im stationären Zustand ladungsmengengleich zu- und abgeführt.

Wie für keine zweite Gebrauchsenergie kommt es bei der Erzeugung und effektiven Nutzung von EE nicht nur auf eine regelgerechte Integration der Einkommensenergieträger in die Wirkungszusammenhänge und Bedarfsstrukturen der Energetik an, wie dies zum Beispiel beim Implementieren der Solarthermie in die weitgehend verfügbare energetische Infrastruktur der Fall ist. Als notwendig erweist sich die qualitativ darüber hinausgehende wissenschaftliche und kostenintensivere Inklusion: die ausgeprägte Konnektivität mit höheren Wechselwirkungsgraden im komplexen System anwachsender Kompliziertheit mit qualitätssteigernden Informations- und Kommunikationstechnik-Systemen. Anders als bei einer Integration, die diesen Pfad lediglich sekundiert, beinhaltet dies eine im Vergleich hierzu vollständigere funktionelle und strukturelle Vernetzung der resultierenden organischen Ganzheit samt der Neben- und Fernwirkungen. Die bei der Inklusion der Photovoltaik und der Windenergie-Transformation resultierende Vielzahl sowie essentielle Vielfalt energie- und informationstechnischer Erfordernisse sowie energiewirtschaftlicher ‚Sicherungsstrategien‘ bis zu neuen Netzarchitekturen verschiedener Spannungsstufen, intelligenten Betriebsregimen und durchgehend regelbarem Verbraucherverhalten sowie speziellen Speichertechnologien sind dafür beredete Zeugnisse.

Nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik sind für die Speicherung technologisch bedeutender Mengen von Elek-

troenergie vorwiegend mechanische, chemische beziehungsweise elektrochemische Speicher praktikabel.

3.1.2 Annotationen zu bewährten und neueren Ausführungsformen mechanischer Speicher

In Tab 3 sind ausgewählte Speichersysteme für elektrische Energie in einer Übersicht dargestellt.

Schwungräder, die seit langer Zeit für die Bereitstellung gleichförmiger und unterbrechungsfreier Drehbewegungen eingesetzt werden, nur als Kurzzeitspeicher geeignet sind und materialtechnisch weiterentwickelt wurden, werden lediglich erwähnt. Bei bis zu 100.000 Umdrehungen pro Minute sind Energiedichten von circa 100 Wh kg⁻¹ möglich.

Pumpspeicher-Kraftwerke werden in Deutschland seit den 1920-iger Jahren betrieben. Kennzeichnend für diesen Kraftwerktyp sind Ober- und Unterbecken, die über optimierte Rohrleitungen mit möglichst hohem Gefälle $\Delta z/L$ miteinander verbunden sind. Da die Druckverluste unter anderem linear mit der durchströmten Rohrlänge L wachsen, gilt es, die Neigung anzupassen. Die Energieanlage, die aus der Pumpturbine beziehungsweise getrennter Pumpe, Turbine und dem Motorgenerator besteht, liegt am Unterbecken. In Schwachlastzeiten wird Wasser aus dem Unterbecken in das Oberbecken gepumpt. In Spitzenlastzeiten fließt es leitungsgebunden vom Ober- ins Unterbecken zurück und wird in elektrische Leistung transformiert.

Die potentielle Energie determiniert die Speicherkapazität. Sie resultiert aus der Gravitationskraft K_G im Schwerfeld der Erde mit der (kostenfreien) Schwerebeschleunigung g und repräsentiert – wie alle Feldenergien (vgl. Tab.1) – einen definierten Teil der inneren Energie: $\Delta U_G = K_G \cdot \Delta z = m \cdot g \cdot \Delta z$, der grundsätzlich von der speicherbaren Wassermenge $m = \rho \cdot V = \rho \cdot z_m \cdot A$ (z_m – mittlere Tiefe des Oberbeckens, A – Wasserfläche) und dem nutzbaren Höhenunterschied Δz zwischen dem Auslauf des Oberbeckens und der Turbine abhängt. Reine Pumpspeicher-Kraftwerke sind meist so ausgelegt, dass die Generatoren aus der Speicherkapazität unter Volllast 4 bis 8 Stunden EE produzieren können (für das Pumpspeicherwerk Goldisthal, Thüringen, werden 8 bis 10 Stunden genannt). Eine konkurrierende Nutzung als Wasserreservoir setzt Schranken.

In Deutschland existieren derzeit 33 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 6,61 Gigawatt (GW) und einer Speicherkapazität von insgesamt 40 Gigawattstunden (GWh). Die größte Anlage in Goldisthal (Thüringen) speichert maximal 12 Millionen Kubikmeter Wasser, verfügt über 8,48 GWh Speicherkapazität und erbringt 1,06 GW Leistung. Der Wirkungsgrad der Pumpspeicher-Kraftwerke beträgt $\eta = 0,70$ bis $\eta = 0,80$. Deutschland rechnet für 2050 mit einer installierten Pumpenleistung von 8,6 GW. Der Zuwachs hält sich mangels geeigneter Standorte in engen Grenzen. Daran ändern auch Überlegungen nichts Grundsätzliches, die vorsehen, dass Ringwallanlagen errichtet werden.

Druckluftspeicherkraftwerke arbeiten nicht allein auf der Basis eines mechanischen

Speicherart	Wirkprinzip	Ausführungsform	Einsatzgebiet
Mechanische Speicher	Speicherung als kinetische Energie	Schwungrad	Primärregelleistung
	Speicherung als Druckenergie (pV)	Druckluft-Gas-Speicherkraftwerk	Sekundärregelleistung
	Speicherung als potentielle Energie	Pumpspeicherkraftwerk	Sekundärregelleistung
Elektrochemische Speicher	Speicherung als chemische Energie	Blei-Säure-Akkumulator	unterbrechungsfreie Stromversorgung Notstromversorgung
		Hochtemperaturbatterien	unterbrechungsfreie Stromversorgung Notstromversorgung
		Lithium-Ionen-Akkumulatoren (verbessert mit nanostrukturierten Elektroden sowie Elektrolytzusätzen-Nano SiO ₂)	Primärregelleistung unterbrechungsfreie Stromversorgung Notstromversorgung Pufferbatterie für Eigenstromversorgung Elektromobilität
		Redox-Flow-Batterien	unterbrechungsfreie Stromversorgung Notstromversorgung Pufferbatterie Elektromobilität
Chemische Speicher	H ₂ -Produktion in dezentralen Elektrolyseuren (nachfolgend u. U. CH ₄ - oder CH ₃ OH-Synthese). Speicherung als chemische Energie	Wasserstoff (fortentwickelt mit metallorganischen Gerüststrukturen für extrem poröse Festkörperspeicher)	Mengenlimitierte Einspeisung ins Erdgasnetz Mobilität Wasserstoffwirtschaft Rückverstromung
		Synthetisches Methan (Potenz für die Methanolsynthese)	Einspeisung ins Erdgasnetz Mobilität Rückverstromung

Tabelle 3: Ausgewählte Speichersysteme für elektrische Energie

Energiespeichers (Luftspeichers). Exakter sind sie als kombinierte Druckluft-Gas-Speicherkraftwerke zu bezeichnen. In Schwachlastzeiten wird zwar die Luft mit überschüssiger Elektroenergie verdichtet und unter Druck in unterirdische Kavernen (üblicherweise in Salzstöcke) eingespeist. Bei Elektroenergie-Bedarf wird die Druckluft aber nicht nur ausgespeichert, sondern zusätzlich mit Erdgas angereichert, das Gasgemisch verbrannt, der Gasturbine zugeführt und aus der Rotationsenergie über einen Generator elektrische Energie gewonnen. Um das Vereisen der Turbine zu verhindern wird Abwärme verwandt.

Bisher funktionieren nur das weltweit erste Kraftwerk in Huntorf (Deutschland), das seit 1978 betrieben wird, und das Kraftwerk der McIntosh Power Plant in Washington County (USA) [6], das seit 1991 kommerziell genutzt wird. Geplante Projekte sind das Druckluftspeicherkraftwerk Staßfurt und das Norton Energy Storage in Ohio/USA (Wikipedia 2013b).

Die Kaverne in Huntorf lässt sich in Schwachlastzeiten mit Kompressoren bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 60 MW in acht Stunden laden. Beim Einspeichern erhöht sich der Druck von 46 bar auf den Enddruck von 72 bar. In der Entladephase des Zyklus kann damit für zwei Stunden elektrische Leistung von 320 MW bereitgestellt werden. Die Wirkungsgrade werden für die Gesamtanlage in Huntorf mit $\eta=0,42$ und für die 110-MW-McIntosch-Anlage, die mit Expansionsturbinen ausgerüstet ist, mit $\eta=0,54$ angegeben. Da der zweigeteilte energetische Aufwand für die Rückverwandlung aus investierter Elektroenergie und dem (damit nur eingeschränkt vergleichbaren) Erdgas besteht, ist ein so gebildeter energetischer Wirkungsgrad nur formal. Die beim Beladen des Speichers freiwerdende Kompressionswärme ist bisher nicht erschlossen. Mit der Nutzung der Kompressionswärme könnte ein formaler Wirkungsgrad von ca. $\eta=0,7$ erreicht werden. Dazu sind effektive Lösungen zur Zwischenspeicherung der Kompressionswärme gefragt.

Die favorisierte Installation von Druckluftspeichern in Salzstöcken begrenzt die Standorte für dieses Speicherkonzept. Die zwei Huntorfer Kavernen liegen in einer Zechstein-Formation.

3.1.2 Annotationen zu bewährten und neueren Ausführungsformen elektrochemischer Speicher

Batteriespeicher (Akkumulatoren) fungieren als elektrochemische Speichersysteme. Sie werden über einen chemisch/elektrischen beziehungsweise elektrisch/chemischen Wandler geladen beziehungsweise entladen. Die chemische Energiespeicherung kann intern oder extern erfolgen. Besonders bedeutungsvoll sind Blei-Säure-Speicher, Hochtemperaturbatterien, Lithium-Ionen-Akkumulatoren und Redox-Flow-Batterien.

Der *Bleiakkumulator* ist auch über 150 Jahre nach der Erfindung durch Wilhelm Josef Sinstedten [7] der gebräuchlichste Batteriespeicher und zur kurzfristigen Leistungsbereitstellung gut geeignet. Technologische Weiterentwicklungen verbesserten die Ladeakzeptanz, die Zyklen-Lebensdauer und die Leistungsdichte.

Als *Hochtemperaturbatterien* sind Natrium-Nickelchlorid-Batterie und Natrium-Schwefel-Akkumulatoren (NaSA) für spezielle Anwendungen eingeführt. NaS-Akkus arbeiten mit einem festen Elektrolyt (natriumhaltiges Aluminiumoxid) und flüssigen Elektroden. Als Anode (Elektronenakzeptor) dient flüssiges Natrium und als Kathode (Elektronendonator) mit flüssigem Schwefel getränktes Graphitgewebe. Zu den wesentlichen Vorteilen dieses Speichertyps zählt, dass es nahezu keine Nebenreaktionen gibt und dass der Wirkungsgrad deshalb entsprechend hoch und die elektrochemische Alterung entsprechend klein ist. Neben der sicheren Einbettung des flüssigen Natriums verlangt das System jedoch ein

aufwendiges Temperaturmanagement, mit dem Temperaturen von 270 bis 390 Grad Celsius reguliert werden können [8] Im stationären Bereich eignen sich diese Batterien zur Reduzierung elektrischer Spitzenleistungen, zur unterbrechungsfreien Stromversorgung und zur Notstromversorgung. Die Speicherdichten sind mit ungefähr 200 Wattstunden pro Kilogramm ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) relativ hoch. Große Module ermöglichen Nutzungen im Stundenbereich.

Unter dem Namen *Lithium-Ionen-Akkumulator* werden derzeit variantenreiche Speichersysteme eingesetzt und funktional sowie materialtechnisch weiterentwickelt. Einsatzgebiete sind Kommunikationsgeräte, die Elektromobilität und die Speicherung der Elektroenergie-Überschüsse aus den Photovoltaikanlagen (PVA) und Windkraftanlagen (WKA) [9].

Die aktuellen Speicherdichten überdecken einen Bereich von 120 bis 180 $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, erwartet werden Steigerungen auf 250 bis 300 $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(Noch) wird den Li-Ionen-Akkumulatoren ein großes Entwicklungspotential zugeschrieben. Dafür sprechen neben den Leistungsparametern die zahlreichen Varianten für verwirklichte stationäre Pilot-Speichersysteme. Mittelfristig entstehen wahrscheinlich Probleme, weil die Lithiumvorkommen auf wenige Länder verteilt sind, geringe Konzentrationen aufweisen und die geologisch/bergmännisch verfügbaren Mengen nicht den zunehmenden Bedarf decken können.

Als Beispiel für einen Großspeicher auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen kann der der vollautomatisierte Batteriepark der WEMAG angeführt werden, der derzeit mit dem Berliner Technologieunternehmen Younicos errichtet wird. Mitte 2014 soll die Anlage mit einer Kapazität von 5 MWh in Betrieb gehen. Ihr Einsatzgebiet ist der Regelleistungsmarkt [10]. Das Unternehmen



Abbildung 2: Stromspeicher der WinBat Technology GmbH im geöffneten Zustand. Im oberen Teil befindet sich die Speicherteuerung und die Leistungselektronik, darunter die Lithium-Eisenphosphat-Batterien für eine Kapazität von 15 kWh

Samsung SDI liefert die verwendeten Akkumulatoren mit einer Leistungsgarantie von 20 Jahren.

Der auf dem Markt verfügbare Elektroenergiespeicher „MAXIMUS“ (Abb. 2) stammt von der WinBat Technology GmbH aus Elsterwerda [11]. Er dient vorrangig dazu, Elektroenergie zu speichern, die zum Eigenverbrauch erzeugt wurde, aber auch zur Senkung von Verbrauchsspitzen in Gewerbe und Landwirtschaft. Ausgestattet sind diese Speicher mit einer Kapazität von 5, 10 beziehungsweise 15 kWh mit brandsicheren Lithium-Eisenphosphat-Batterien chinesischer Produktion. Der Gesamtwirkungsgrad wird mit $\eta=0,93$, die Lebensdauer mit über 20 Jahren angegeben. Die Steuerung des Speichers erfolgt mit einem intelligenten Batterie-Management-System und einen Balancer. Über einen externen Wechselrichter können Verbraucher auch dreiphasig versorgt werden.

Redox-Flow-Batterien (Flüssigbatterien) sind elektrochemische Systeme, mit denen elektrische Energie in definierten chemischen Verbindungen stofflich gespeichert wird. Die Elektronen werden bei der Reduktion (Red) aufgenommen und bei der Oxidation (-ox) abgegeben. Als Redoxpaare fungieren Verbindungen aus Vanadium, Brom sowie Titan, Eisen, Chrom, Cer, Zink und Schwefel. Der Elektroenergiespeicher dienen zwei getrennte Elektrolyte, in deren Lösungsmittel die Reaktionspartner (Salze) gelöst sind. Die Elektrolytlösungen zirkulieren (flow) in zwei, von einer Membran mit Ionenaustausch getrennten Kreisläufen. Die Elektrolyte brauchen in der Zelle des Akkumulators nicht ständig präsent zu sein. Die Energiemengen und die Leistung des Akkumulators sind unabhängig voneinander auslegbar. Infolge der getrennten Lagerung der Elektrolyte ist ihre Neigung zur Selbstentladung sehr gering. Das Laden ist über den Ersatz der flüssigen Elektrolyte möglich, was ihrer Nutzung im Bereich der Mobilität zugutekommt. Redox-Flow-Batterien können langfristig verlustfrei speichern. Sie werden im Leistungsbereich von einigen Kilowatt bis zu mehreren Megawatt betrieben. Diese Eigenschaften begünstigen ihren Einsatz als EE-Speicher an Netzknoten.

3.1.3 Annotationen zu bewährten und neueren Ausführungsformen chemischer Speicher

Für die chemische (stoffliche) Speicherung von Elektroenergie sind Verfahren zur Wasserstoffherzeugung und gegebenenfalls zur weiteren Umwandlung in gasförmige beziehungsweise flüssige Energieträger wie Methan und Methanol geeignet. Vom Methanol kann zudem ein chemischer Synthese-Baum zur stofflichen Höherveredelung ausgehen.

Im ersten Schritt der „Power-to-Gas“-Strategie (PTG) wird mit überschüssiger Elektroenergie vor allem aus WKA dezentral mittels Elektrolyse in Normaldruck- oder Hochdruck-Elektrolyseuren Wasserstoff erzeugt. Die Elektrolyse ist die Schlüsselkomponente dieses Energiespeicherkonzepts. Der elektrische Energiebedarf zur Erzeugung eines Normalkubikmeters (Nm^3) Wasserstoff (H_2) definiert den Wirkungsgrad. Hochdruck-Elektrolyseure mit $p=12$ bar Betriebsdruck benötigen derzeit beispielsweise $4,8 \text{ kWh}_{\text{el.}} \text{ pro } \text{Nm}^3 \text{ H}_2$. Bezogen auf die Reaktionsenthalpie von H_2 (früher unterer Heizwert) entspricht das einem energetischen Wirkungsgrad von $\eta \approx 0,63$. Mehrere Anlagenhersteller bieten Elektrolyseure der Firma H-TEC SYSTEMS an, die mit protonenleitender Polymerfolie (Polymer-Elektrolyt-Membran, kurz PEM) ausgerüstet sind und Betriebsdrücke bis $p=30$ bar ($\eta \approx 0,75$), Betriebstemperaturen von 60 bis 80 Grad Celsius und Erzeugungsraten von $0,3$ bis $3,6 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ H}_2$ aufweisen. Kathodenseitig werden in dieser Variante katalytisch aktive poröse Platin-auf-Ruß Elektroden und katalysierendes metallisches oder oxidisches Indium/Ruthenium ano-

disch eingesetzt. Die im industriellen Maßstab mäßigen Erzeugungsraten bilden gegenwärtig einen Schwachpunkt der PTG-Technologie.

Der elektrolytisch erzeugte Wasserstoff kann in Tanks gelagert, bei Bedarf dem Gas eines Gasmotors oder einer Gasturbine zugemischt, mengenlimitiert direkt in das Erdgasnetz injiziert, so mitgespeichert und für eine Rückverstromung in Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerken (GuD-Kraftwerken) beziehungsweise Gasturbinen-Kraftwerken vorgehalten werden. Alternativ lässt sich H_2 gemeinsam mit Kohlendioxid (CO_2) zu Methan reformieren. Für die separate H_2 -Speicherung in Kavernen gibt es realistische Optionen. Im bewährten Kavernenfeld des Salzstocks Etzel bei Wilhelmshaven mit seiner ausgezeichneten Infrastruktur und Nähe zu Windkraftanlagen, plant etwa der Dienstleister IVG Caverns (mit 59 Kavernen) mittelfristig in einer Standardkaverne mit dem Volumen von 700.000 Kubikmetern und einer Speicherkapazität von 250.000 MWh (H_2) eine Demonstrationsanlage mit 1400 MW Leistung. Sie ermöglicht die Speicherung im Tages- und Wochenbereich. Das PTG-Konzept verbindet prinzipiell das Elektroenergiesystem mit der Gasinfrastruktur und bietet die Chance, eine effektive Wasserstoffwirtschaft zu entwickeln. Die Erzeugung von Methan wurde unter dem Signum „Erneuerbares Methan“ vorgestellt [12]. Die exergone ($\Delta_R H^0 = -165 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) katalytische CH_4 -Bildungsreaktion ist als Sabatier-Prozess bekannt. Der verlängerte Pfad zu flüssigen Produkten führt über die Fischer-Tropsch-Synthese [13]. So lassen sich flüssige Kohlenwasserstoffe hoher Energiedichte erzeugen und es kann die Infrastruktur genutzt werden, die für Erdölprodukte geschaffen wurde.

Würde das PTG-Konzept mit chemischer Konversion konsequent verfolgt, könnte es zu einer vollständigen Kohlenstoffdioxid-Kreislaufwirtschaft führen [14]. Interimistisch bieten sich als CO_2 -Quellen kontinuierliche Prozesse mit entsprechendem Kohlendioxidanfall (wie die Roheisen- sowie Zementproduktion) und hinzuzufügender Kohlendioxidabtrennung an. Beim Einsatz von CO_2 aus solchen Biogasanlagen, die Biogas mit Erdgasqualität liefern, ist das Problem der Stofftrennung bereits gelöst. Mit fortschreitender Umstellung der Wirtschaft müsste das klimaschädigende Treibhausgas CO_2 aus der Luft gewonnen werden. Realisierbar wäre dieses Konzept nur unter Nutzung sehr großer Einkommensenergiemengen solaren Ursprungs. Deshalb ist zu klären, ob derartige Mengen tatsächlich technologisch und ökonomisch verfügbar wären.

Zur Überführung überschüssiger Elektroenergie in Wasserstoff stehen beispielsweise im Land Brandenburg in der Nähe von Prenzlau [15] und in Falkenhagen bei Pritzwalk [16] Pilotanlagen zur Verfügung. Das sind Regionen mit hohem Windstromaufkommen, die damit für „Power-to-Gas“-Technologien (PTG) oder Hybridkraftwerke sowie praktische Optimierungen des Betriebskonzepts prädestiniert sind. Während der Wasserstoff aus den Wasser-Elektrolyseuren der Anlage bei Prenzlau (Leistung: $120 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ H}_2$) in Hochdrucktanks gespeichert und für die Mobilität sowie die Rückverstromung in einem Wasserstoff-Biogas-Blockheizkraftwerk genutzt wird, speist Falkenhagen seit dem 28. August 2013 den Wasserstoff aus der Alkali-Elektrolyse erstmals im industriellen Maßstab in das Erdgasnetz ein. Die Anlagenleistung beträgt $2 \text{ MW}_{\text{el.}}$ (das ist einer Erzeugung von $360 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ H}_2$ äquivalent) Die bisherige Limitierung der H_2 -Konzentration im Erdgasnetz auf zwei bis vier Volumenprozent resultiert nicht zuletzt aus den derzeit verwendeten Rohmaterialien der erneuerten Gasnetze. Im abgelösten Stadtgasnetz der DDR betrug die H_2 -Konzentration circa 50 Prozent. Unter technischen Restriktionen dürften nach einer Testphase Beimischungen zum Erdgas im höheren einstelligen Prozentbereich möglich werden [17] Der deut-

sche Erdgasmarkt wird mit circa 1.000 TWh beziffert. Die Erdgaspeicher können 200.000 GWh, damit mehr als 20 Prozent des Jahresbedarfs aufnehmen.

3.1.4 Weitere Optionen zur Speicherung elektrischer Energie

Als Elektroenergiespeicher eignen sich für spezielle Anwendungsgebiete überdies prinzipiell supraleitende magnetische Energiespeicher, konventionelle Kondensatoren und elektrochemische Doppelschichtkondensatoren. Aus Platzgründen können diese Varianten lediglich erwähnt werden.

In technologisch bedeutenden Größenordnungen lässt sich Elektroenergie als *thermische Energie* speichern. Diese Speichertechnologie ist als „Power-to-Heat“-Konzept bekannt, wenn bei einem Überangebot elektrischer Energie die Windkraft- beziehungsweise Photovoltaikanlage nicht vom Netz genommen sondern elektrische direkt in thermische Energie überführt (exergetisch entwertet) wird. Diese Verfahrensweise stößt vielfach (zum Teil durchaus berechtigt) auf Kritik, da Exergie in Niedertemperaturwärme (t kleiner 100 Grad Celsius oder sogar t kleiner 50 Grad Celsius) mit geringem exergetischen Niveau irreversibel umgewandelt (dissipiert) wird. Für exergetisch derart verlustreich erzeugte thermische Energie mit beispielsweise $T = 373$ Kelvin beträgt der exergetische Wirkungsgrad (bei $T_U = 293$ K) lediglich $\eta_{ex.} = 0,21$. Allerdings verringern sich die Einsatzmengen anderer Energieträger für die Wärmebereitstellung. Weil bisher keine Speicher für Elektroenergie in vergleichbarer Größenordnung zur Verfügung stehen, ist diese Speichertechnologie aus ökonomischer Sicht mitunter zweckmäßig [19]. Zudem existieren Optionen für den Einsatz elektrischer Wärmepumpen, die thermische Umgebungsreservoirs nutzen können [Abb. 3] oder für den Einsatz gewöhnlicher Heizstäbe beziehungsweise eines Elektrodenkessels.

In Tab. 4 sind ausgewählte Speichersysteme für thermische Energie in einer Übersicht dargestellt. Damit kann nur ein konturierter Einblick gegeben werden, der der objektiven Bedeutung der thermischen Energie und ihrer Speicherung absolut nicht gerecht wird. Dem könnte sich nur ein separater Beitrag annehmen. Die Solarisierung gewerblicher und großer industrieller Energieanlagen sowie der Nah- und Fernwärmeversorgung gehört zu den gesellschaftlich unterschätzten Schlüsseltechnologien der Energiewende in Deutschland. Selbst der Anteil der Solarthermie an der Verminderung der globalen CO_2 -Emissionen ist größer als jener der Photovoltaik.

4 Fazit

Schon heute ist es sicher, dass der Energiewende nicht der gesamtgesellschaftlich notwendige Erfolg beschieden sein kann, wenn es nicht gelingt, die skizzierten trans- und interdisziplinären Probleme bei der evolutionären Verbesserung und zweckgerechten Entwicklung der Energiespeichertechnologien – zumindest für die [Haupt]Energieformen elektrische und thermische Energie – zu bewältigen. Die langfristige Speicherung großer Energiemengen, die als neue Dispositionsreserven für überdies ertüchtigte Netze dienen sollen, stellt die Beteiligten vor größere Herausforderungen als erwartet. Es gilt insbesondere, die wissenschaftlich-techni-



Abbildung 3: Bankgebäude Raiffeisenbank in Chateau d'Oex, Schweiz (Baujahr 2009)

Zweigeschossiger Flachbau in Massiv- und Holzbauweise, Vollkeller. Beheizte Fläche 740 Quadratmeter; Heizlast 17 Kilowatt; Solar-Hybridanlage Gesamtgröße 86 Quadratmeter; Erdwärmespeicher eTank 340 Kubikmeter der deematrix Energiesysteme GmbH Fürstenwalde. Das Gesamtsystem arbeitet unter Verwendung einer Wärmepumpe nach der offenen, oszillierenden Pufferspeichertechnik (ooPS), einer Entwicklung der eZeit Ingenieure GmbH, Berlin. Animation: eZeit Ingenieure GmbH, Architektur: architecum GmbH, Foto: A. Gempeler

Speicherart	Wirkprinzip	Ausführungsform	Einsatzgebiet
Kapazitive (sensible) Speicher	Temperaturänderung des Speichermediums, $\Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ ($p = \text{const.}$)	Heißwasserspeicher Druckspeicher	Kurzzeitspeicher
		Kies-Wasser-Wärmespeicher	Kurzzeitspeicher Langzeitspeicher
		Erdsonden-Wärmespeicher	Saisonaler Langzeitspeicher
		Aquifer-Wärmespeicher	Saisonaler Langzeitspeicher
		eTank	Kurzzeitspeicher saisonaler Langzeitspeicher
Transformative (latente) Speicher	Umwandlungsenthalpien bei Phasenwechseln (T) auf unterschiedlichsten Temperaturniveaus $\Delta_T H = m \cdot \Delta_T h$ der Phasenwechselmaterialien (anorg. und organ. PCM)	Wasser (s,l,v)	Kurzzeitspeicher (z. B. Wärmetransportwagen) Langzeitspeicher
		Paraffine	
		Zuckeralkohole	
		Salzhydrate, wie Natriumacetat-Trihydrat	
Thermochemische Speicher	Nutzung der Chemisorptionsenthalpie	Zeolithe	Kurzzeitspeicher Langzeitspeicher
		Silicagel	
	Chemische Reaktionen (reversibel, $p, T = \text{const.}$) $\Delta_R H = \Delta_R G + T \cdot \Delta_R S$ Reaktionsenthalpie	Calciumoxid/ Calciumhydroxid	
		Calciumoxid/ Calciumcarbonat	
		Natriumhydroxid/ Natronlauge	

Tabelle 4: Ausgewählte Speichersysteme für thermische Energie

sche Komplexität praktisch zu bewältigen. Gemeint sind die differenzierten Anforderungen an die Kurz- und Langzeitspeicher aller Funktionsprinzipien sowie Größenskalen, die (auch vom Standort abhängende) Vielfalt effektiver Lösungen sowie die bewussten technologischen Verflechtungen und Vernetzungen – wofür exemplarisch die Wasserstoffwirtschaft steht, auf der beträchtliche Hoffnungen ruhen.

Der insgesamt erforderliche immense ideelle, materielle und finanzielle Aufwand für die Transformation des deutschen Energiesystems – einschließlich qualifizierterer und innovativer Energiespeichertechnologien – wird folgenswer auf die Energiepreise wirken. Komplettierend bedarf es des gravierenden Hinweises, dass für die diskutierten Sachverhalte die strategischen Perspektiven geklärt und bekannt sein müssen, dynamische wirtschaftliche und zuverlässige rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen, tragfähige Konzepte zu entwickeln, nachvollziehbare sowie mehrheitlich akzeptierte politische Entscheidungen zu treffen sind und diese – als „Gemeinschaftswerk“ verstanden – verwirklicht werden müssen.

In welchem Maße die derzeitigen Realitäten ziel- und qualitätsgemäß diesen Notwendigkeiten gerecht werden, ist eine andere Geschichte, die jeder mit seinem Wissen und aus eigenen Erfahrungen reflektieren kann.

Literatur

- [1] Fleischer, L.-G. (2011): Diskussionsbeitrag „Deterministisches Chaos und Gesellschaft“ In: Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 111, S.42-44
- [2] Schwarz, O. (2013): „Regenerative Energien, natürliche Wirkungsgrade und die besondere Rolle der Solarenergie“. In: Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd.31, S. 88
- [3] Lehmann, Harry; Herforth, Christian (2012): 2050: In Deutschland Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien. in: LIFIS ONLINE [11.01.12], www.leibniz-institut.de, ISSN 1864-6972. URL: http://www.leibniz-institut.de/archiv/lehmann_11_01_12.pdf
- [4] Rundel, P; Meyer, B.; Meiller, M.; Meyer, I.; Daschner, R.; Jakuttis, F.; Matthias; Binder, S.; Hornung, A. (2013): Speicher für die Energiewende. Herausgegeben vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg. URL: http://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/studien/studie_speicher_energiewende.pdf
- [5] Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, FA 43/12, Abschlussbericht: Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, Goslar 8.März 2013. URL: <http://www.bmw.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/eignung-von-speichertechnologien-zum-erhalt-der-systemsicherheit,property=pdf,bereich=bmw2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- [6] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Druckluftspeicherkraftwerk>
- [7] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bleiakkumulator>
- [8] URL: http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy_storage_systems_technology_high_temperature_batteries/
- [9] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>
- [10] URL: https://www.wemag.com/ueber_die_wemag/oeostrategie/Energiespeicher/Batteriespeicher/
- [11] URL: <http://www.winbat.de/stromspeicher/>
- [12] Sterner, M.; Saint-Drenan, Y.-M.; Gerhardt, N.; Specht, M.; Stürmer, B.; Zurbühler, U. (2010): Erneuerbares Methan. Ein innovatives Konzept zur Speicherung und Integration Erneuerbarer Energien sowie zur regenerativen Vollversorgung. In: LIFIS ONLINE [09. Juli 2010]. – URL: http://www.leibniz-institut.de/archiv/sterner_09_07_10.pdf
- [13] URL: <http://www.sunfire.de/>
- [14] Möller, D. (2011): Das SONNE-Konzept: Die Kohlendioxid-Wirtschaft. In: LIFIS ONLINE (15. August 2011). – URL: www.leibniz-institut.de/archiv/moeller_15_08_11.pdf
- [15] URL: <https://www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html>
- [16] E.ON baut Power to Gas-Pilotanlage in Falkenhagen. Erdgasnetz als Stromspeicher für wetterabhängige Erneuerbare Energien. Pressemitteilung vom 21. August 2012. URL: <http://www.eon.com/de/presse/news/pressemitteilungen/2012/8/21/e-on-baut-power-to-gas-pilotanlage-in-falkenhagen.html>
- [17] Müller-Syring, G.; Henel, M.; Köppel, W.; Mlaker, H.; Sterner, M.; Höcher, T. (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Abschlussbericht für das DVGW-Projekt G1-07-10. Hrsg.: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn. URL: http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1_07_10.pdf
- [18] DENA – Deutsche Energieagentur (Hrsg.): Wasserstoff im Erdgasnetz. Bericht auf der Strategieplattform Power to Gas. URL: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern/wasserstoff-im-erdgasnetz.html>
- [19] Groscurth, H.-M.; Bode, S., Arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik Hamburg (2013): Discussion Paper Nr. 9 “Power-to-heat” oder “Power-to-gas”? – URL: http://www.arrhenius.de/uploads/media/arrhenius_DP_9_-_Power-to-heat.pdf. Stand 2. Juli 2013
- [20] Fleischer, L.-G. (2008): Reflexionen zur Triade Energie-Entropie-Exergie einer universellen Qualität der Energie. In: LIFIS ONLINE (21. Oktober 2008). – URL: http://www.leibniz-institut.de/archiv/fleischer_21_10_08.pdf

Anmerkung

- 1 Äquilibration (auch Equilibration): Streben zum Gleichgewicht, Gleichgewichtsbildung mit Systemstabilisierung. Äquilibration bezeichnet allgemein die Aufhebung des inneren Spannungszustandes eines Organismus oder eines Systems auf seine Umwelt durch diesen selbst (Selbstregulierung). Diese Regulation wird erreicht durch Organisation (Koordination) und/oder Adaptation (Anpassung) beziehungsweise Assimilation und Akkommodation. (Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quilibration>)

Kontakt

Prof. Dr. Lutz-Günther Fleischer

Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.
Luisenstraße 58/59 · D-10117 Berlin
Tel.: 030.97604332 (priv.) · Fax - 97604410 (priv.)
eMail: fleischer-privat@gmx.de · post@leibnizsozietat.de
Internet: <http://leibnizsozietat.de/>

Dr. Norbert Mertzsch

Verein Brandenburgischer Ingenieure und Wirtschaftler e.V.,
Fürstenwalder Str. 46 · D-15234 Frankfurt (Oder)
Tel.: 033931.37111 (privat)
eMail: mertzsch@t-online.de · Internet: <http://www.vbiw-ev.de/>

REZENSION

Umwelt- und Technikrecht

In der Reihe Umwelt- und Technikrecht des Erich Schmidt Verlags wird eine Dissertation mit dem o.g. Titel veröffentlicht. Das Buch gliedert sich in drei Teile:

- Stoffliche Verwertung von Bioabfällen und tierischen Wirtschaftsdüngern,
- Grenzen des Abfallbegriffs,
- Abfallhierarchie.

Für eine Dissertation ist dieses vierteilige Werk sehr ordentlich. Es gibt auch für Nicht-Fachleute eine gute Einführung. Für Fachleute des technischen Umweltschutzes und der Abfallwirtschaft sind die Ausführungen je nach Betrachtungsweise etwas zu ausführlich oder nicht ausreichend tiefgehend. Für Juristen mag sich dies an-

ders darstellen. Doch auch für diesen Personenkreis ist es – sofern er sich nicht scheut, diese umfangreiche Schrift zu lesen – eine passable Einführung in die Bio-Abfallwirtschaft. Nachteilig ist das, dass ein Schlagwortverzeichnis fehlt. (TK)

Die Verwendung von Bioabfällen und tierischen Wirtschaftsdüngern in der Landwirtschaft. Grenzen des Abfallbegriffs und rechtlicher Stellenwert der stofflichen Verwertung nach dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz.

Stefanie Wahlen. Band 118 der Reihe Umwelt- und Technikrecht. Herausgegeben von Bernd Hecker, Reinhard Hendl, Alexander Proelß und Peter Reiff. 2013. 423 Seiten, DIN A5, EUR 118,00, gebunden. Erhältlich beim Erich Schmidt Verlag Berlin. ISBN 978-3-503-14420-4