Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 9

Artikel: Speicherung und Transport von Energie, ein wichtiges Thema für künftige Energiesysteme

Autor: Kesselring, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904191

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Speicherung und Transport von Energie, ein wichtiges Thema für künftige Energiesysteme

P. Kesselring

Es wird gezeigt, wie Anforderungen bezüglich Speicherdauer, Kapazität, Lade-/Entladeleistung, Verluste, Zyklenzahl usw. die Wahl der Speicherart und die Verteuerung der Energie beim Durchlauf durch den Speicher beeinflussen. Verschiedene Speichertypen werden kurz charakterisiert und der Stand der Technik skizziert. Am Beispiel der chemischen Speicher wird die Bedeutung der Speicherung und des Transportes für heutige und künftige Energiesysteme illustriert.

On montre que les exigences concernant la durée d'accumulation, la capacité, la puissance de charge et de décharge, les pertes, le nombre de cycles, etc. ont une influence sur le choix du genre d'accumulateur et sur le renchérissement de l'énergie accumulée. Divers types d'accumulateurs sont brièvement décrits, ainsi que l'état actuel de la technique. En prenant comme exemple les accumulateurs chimques, l'importance de l'accumulation et du transport est illustrée pour des systèmes d'énergie actuels et futurs.

Referat anlässlich der SEV-Informationstagung «Energiespeicherung in Grossanlagen» vom 20. März 1986 in Bern.

Adresse des Autors
Dr. *P. Kesselring*, dipl. Physiker ETHZ, Eidg. Institut für Reaktorforschung EIR, 5303 Würenlingen.

1. Einleitung

Energiespeicher braucht es, weil Energieangebot und Energienachfrage im allgemeinen einen verschiedenen zeitlichen Verlauf haben. Stimmen auch noch der Ort der Produktion (bzw. Umwandlung) nicht mit dem Ort des Verbrauches überein, so kommt zur Speicherung noch der Transport der Energie dazu.

Die Erdölwirtschaft gibt ein Paradebeispiel dafür, wie wichtig Transport und Speicherung von Energie sind. Erdöl – letztlich gespeicherte Sonnenenergie – wird kontinuierlich aus dem Boden gefördert, gelagert (zwischengespeichert), verarbeitet, mehrfach transportiert und wieder gelagert, bis es endlich beim Endverbraucher etwa im Heizöl- oder Benzintank nochmals gespeichert wird. Als Resultat dieser Struktur kann die Produktions- und Transportkapazität des ganzen Systems auf den *Mittelwert des Verbrauches ausgelegt* werden. Dies führt zu niederen Kosten und einer hohen Flexibilität, die beim Öl noch dadurch erhöht wird, dass es kein leitungsgebundener Energieträger ist. Bei der Elektrizität, welche zwar leicht transportiert, aber schwieriger gespeichert werden kann, muss die Produktions- wie die Verteilkapazität deswegen auf die *Spitzenleistung* dimensioniert werden.

2. Einige grundlegende Begriffsdefinitionen

2.1 Bezeichnungen

Ein Energiespeicher ist eine Vorrichtung, in welche Energie eingespeist (*Speicherladung*) und nach kürzerer oder längerer Zeit ganz oder teilweise wieder entnommen werden kann (*Speicherentladung*). Man pflegt im allgemeinen grob zwischen Speichern für *mechanische, thermische, elektrische und chemische* Energie zu unterscheiden. Die üblichen Bezeichnungen sind nicht immer konsequent, was hauptsächlich damit zusammenhängt, dass im Verlaufe des Speicherprozesses Energieumwandlungen stattfinden können. Im Extremfall sind eingespeiste, gespeicherte und entnommene Energiearten alle drei verschieden. Das geläufigste Beispiel dazu ist die Photosynthese, wo Strahlung etwa in chemische Energie des Holzes umgewandelt wird, deren thermische Entladung durch Verbrennung geschieht. Im Sprachgebrauch wird Holz als chemischer Speicher bezeichnet. Es ist also die gespeicherte Energieform, welche im Namen erscheint. Ein elektrischer Akkumulater wird hingegen meist als Stromspeicher bezeichnet, obwohl die Energie ebenfalls in chemischer Form gespeichert wird. Der Grund ist natürlich, dass elektrische Energie sowohl geladen wie entnommen wird. Im folgenden soll bei der Bezeichnung auf die gespeicherte Energieform abgestellt, z.B. also ein Akkumulator als chemischer Speicher bezeichnet werden.

Korrekterweise müsste man zur Charakterisierung Lade-, Speicher- und Entladeform angeben. Ein Boiler wäre dann etwa ein «Elektro-Thermo-Thermo-Speicher». Zieht man noch in Betracht, dass z.B. elektrische bzw. elektromagnetische Energie zu ganz verschiedenen Speicherformen führen kann (z.B. Kondensator, supraleitende Spule) oder dass auch Nuklearenergie eine speicherbare Energieform ist, so wird klar, wie beliebig komplex und umfangreich das Spektrum der Speicherphänomene in seiner ganzen Breite ist. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf die gebräuchlichsten und häufigsten Speicherformen.

2.2 Speicherkenngrössen

Die wichtigsten Speicherkenngrössen sind:

- Kapazität K
- Energiedichte (volumen- oder masse-spezifisch), k_v, k_m
- Ladeleistung P_L
- Entladeleistung P_E
- Zykluszeit t_z
- Nutzungsgrad η bzw. relative Verluste $(1-\eta)$

Anhand von drei repräsentativen Beispielen sollen diese Kenngrössen dargestellt werden (Tab. I).

Beispiel 1: Stausee in den Alpen
- Wasservolumen $V = 10^8$ m³
- Nutzbare Fallhöhe $h = 400$ m
- Füllzeit minimal 3 Monate (Schneeschmelze)
- Volumenspezifische Jahreskosten $u = 0{,}1$ Fr./m³ a (Grössenordnung)
- Natürliche Zuflüsse (gratis)

Beispiel 2: Haushaltboiler
- Wasservolumen $V = 300$ l
- Maximaltemperatur $T_o = 70$ °C
- Minimaltemperatur $T_u = 30$ °C
- Typische Wasserentnahme: $\dot{m} = 0{,}15$ kg/s bei $T = 25$ °C
- Jahreskosten $U = 200$ Fr./a
- Preis der gespeicherten Energie (Ladeenergie) $g_L = 0{,}1$ Fr./kWh
- Nutzungsgrad $\eta = 0{,}9$ (10% Verluste)

Beispiel 3: Benzintank eines Personenwagens
- Volumen $V = 50$ l
- Füllzeit $t_f = 100$ s
- Typische Entnahmeleistung gegeben durch Verbrauch von 10 l/100 km und Geschwindigkeit von 100 km/h
- Jahreskosten Tank $U = 20$ Fr./a
- Preis der gespeicherten Energie (Benzin) $g_L = 0{,}1$ Fr./kWh
- Nutzungsgrad $\eta = 1$ (keine Speicherverluste)

Die *Kapazität* ist das Mass für die gesamte im Speicher ansammelbare Energie.

Die *Energiedichte* eines Speichers ist die pro Volumen- oder Masseneinheit speicherbare Energie. In Figur 1 sind Energiedichten für verschiedene Speicherarten graphisch dargestellt. Die Zahlen sprechen für sich selbst!

Als *Ladeleistung* bezeichnet man die Leistung, mit welcher der Speicher geladen werden kann. Es gibt dafür im allgemeinen eine obere Grenze, die maximale Ladeleistung. Analoges gilt für die *Entladeleistung*. Maximale Lade- und Entladeleistungen müssen nicht gleich gross sein. Die Ladeleistung des Boilers entspricht seiner Anschlussleistung. Die Entladeleistung des Benzintankes entspricht natürlich nicht der mechanischen, sondern der chemischen Leistung. Man beachte, dass die Ladeleistung in den Benzintanks vergleichbar ist mit der eines Stausees!

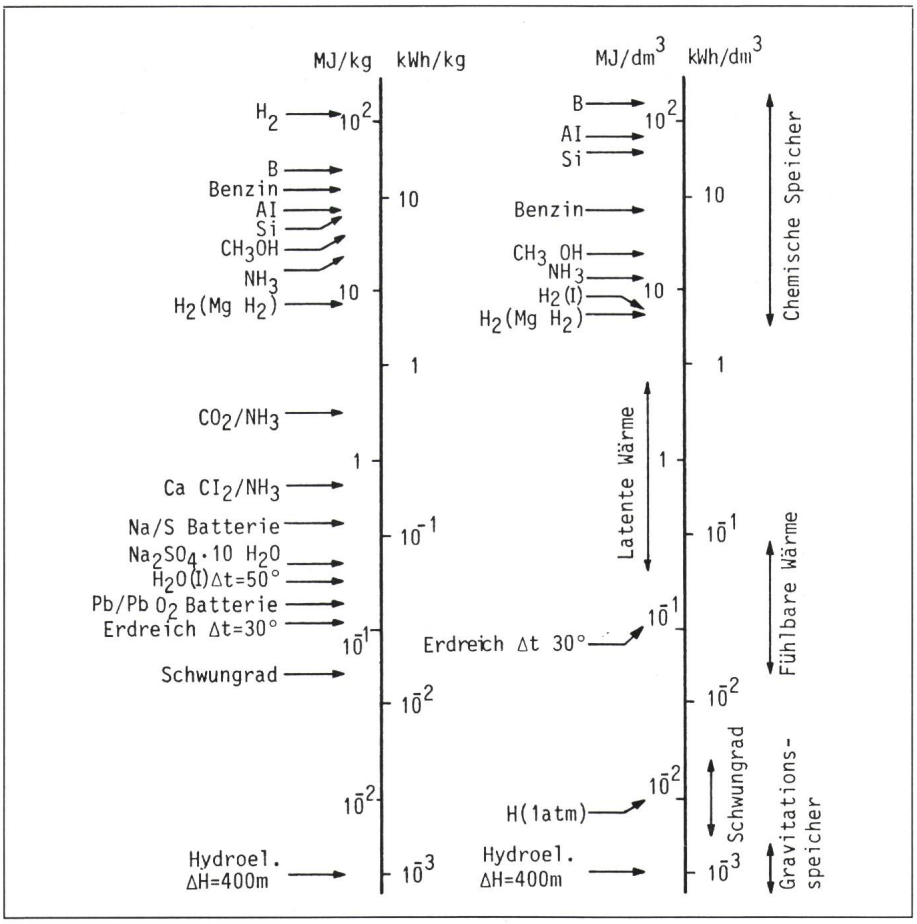

Fig. 1 Energiedichten von Speichern[1]
Die Energiedichte von chemischen Speichern ist am höchsten, jene von Speicherseen am niedrigsten. Wärmespeicher liegen dazwischen.

Die *Speicherzykluszeit* gibt bei Speichern, die zyklisch geladen und entladen werden, die Periode dieses Zyklus an (z.B. Saisonspeicher, Tagesspeicher). Der Parameter ist ökonomisch von grosser Bedeutung, da er den Energiedurchsatz durch den Speicher und damit die Höhe der Belastung der gespeicherten Energie durch Kapitaldienst, Betriebs- und Unterhaltskosten des Speichers wesentlich bestimmt.

Als *Nutzungsgrad* bezeichnet man das Verhältnis der aus dem Speicher entnommenen Energie zur eingespeisten Energie. Die beiden Grössen unterscheiden sich um die Speicherverluste.

3. Kosten der gespeicherten Energie

Die Kostenbilanz bei Selbstkosten (kein Gewinn, kein Verlust) ergibt sich aus der Überlegung, dass die Kosten der aus dem Speicher bezogenen Energie sich zusammensetzen aus dem Preis für die eingespeiste Energie und den Unkosten U (d.h. der Summe von Kapitaldienst inkl. Amortisation, Betrieb und Unterhalt des Speichers). Diese Bilanz muss über eine geeignete Zeitspanne t_o, z.B. die Zykluszeit, gezogen werden.

$$\int_0^{t_o} g_E \cdot P_E \, dt = \int_0^{t_o} (g_L P_L + U) \, dt$$

g_L Preis der Ladeenergie
g_E Kosten der Entnahmeenergie
U Unkosten der Speicherung pro Zeiteinheit

Alle Grössen können zeitabhängig sein. Falls g_L über die Zeitspanne als konstant angenommen werden kann, betragen die mittleren Kosten der während der Zeit t_o aus dem Speicher bezogenen Energie

$$g_E = \frac{g_L}{\eta} + \frac{\int_0^{t_o} U \, dt}{\int_0^{t_o} P_E \, dt}$$

Für lange Zykluszeiten mag es zudem nötig sein, die für den Kauf der gespeicherten Energie aufgewendeten Mittel während der Verweilzeit der Energie im Speicher zu verzinsen. Dies wurde hier vernachlässigt.

Die Kosten für die aus dem Speicher entnommene Energie der drei vorgenannten Beispiele sind ebenfalls in Tabelle I angegeben. Bei Stauseen ist wegen der geringen Energiedichte darauf zu achten, dass deren Bau- und Unterhaltskosten niedrig gehalten werden. Zudem wirkt sich die Annahme einer langen (einjährigen) Zykluszeit kostenverschärfend aus. Für Pumpspeicherwerke, die im Tagesrhythmus (t_o = 1 Tag) betrieben werden, ist der Energiedurchsatz durch den Speicher zwei Grössenordnungen grösser, die Situation deshalb günstiger. Allerdings ist dabei die Ladeenergie nicht mehr kostenlos und sind die Energieverluste im Speicherprozess nicht mehr vernachlässigbar.

Im Boiler (Tab. I) wird die Energie unter den gemachten Annahmen um 5 Rp./kWh verteuert. Dies darf nicht nur der Speicherung angelastet werden. Ein Teil geht auch auf Kosten der Energieumwandlung. Nach einem Durchlauferhitzer wäre die Entnahmeenergie um etwa 2...3 Rp./kWh teuerer als die eingespeiste Energie.

Beim PW-Benzintank fallen die Speicherkosten nicht ins Gewicht. Für einen Heizöltank würde die Rechnung etwa wie folgt ausgehen:

$K_{Öl} = 40\,K_B$ d.h. 40mal grössere Kapazität

$t_{ÖL} = 52 t_{oB}$ d.h. Zykluszeit 1 Jahr statt 1 Woche

$U_{Öl} \approx 10\,U_B = 200$ Fr./a, somit

$(g_E - g_L)_{Öl} = 13\,(g_E - g_L)_B \approx 1{,}3$ Rp./kWh

Dies zeigt die Bedeutung der Zykluszeit bzw. der mittleren Verweildauer der Energie im Speicher: Obwohl die Unkosten bezüglich der Speicherkapazität um den Faktor 4 kleiner sind, wird die kWh durch die Speicherung um mehr als den Faktor 10 stärker verteuert, weil die Verweilzeit im Speicher rund 50mal höher ist.

4. Kostenoptimierung

Ein Speicher ist immer ein Subsystem innerhalb eines Gesamtsystemes. Also muss das System als Ganzes kostenoptimiert werden. Insbesondere darf der Speicher nicht einfach auf minimale kWh-Verteuerung durch die Speicherung ausgelegt werden. Dies sei am folgenden allgemeinen Beispiel erläutert:

Bei einem Kraftwerk vorgegebener nomineller Leistung, welches mit Speicher betrieben wird, werde der jährliche Aufwand A grob wie folgt aufgeteilt:

$$A = X + Y + Z$$

X = Energiebeschaffungskosten
Y = Speicherkosten
Z = übrige Kosten

Eine solche Aufteilung kann im Prinzip immer vorgenommen werden. Die Energiebeschaffungskosten X sind z.B. bei einem Wasserspeicherkraftwerk die Kosten für die Einleitung von Zuflüssen in den Stausee; bei einem Pumpspeicherwerk kommen die Pumpenergiekosten dazu. Bei einem solarthermischen Turmkraftwerk handelt es sich bei X um die Kosten der Konzentration des Lichtes auf den Empfänger, also im wesentlichen um die Heliostatfeldkosten.

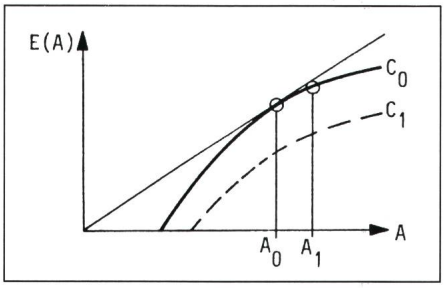

Fig. 2 Ertrag E als Funktion des Aufwandes A bei einem Kraftwerk
A_o kostenoptimaler Aufwand

Der Jahresertrag E, der dem Aufwand A entspricht, wird unter den gemachten Annahmen (feste Nominalleistung) qualitativ etwa nach Figur 2 verlaufen. Es gibt eine Aufwandschwelle, unterhalb derer kein Ertrag erwirtschaftet werden kann. Das Optimum wird dann erreicht, wenn der Ertrag pro zusätzlichen Franken Aufwand dE/dA gerade dem Verhältnis von Ertrag zu Aufwand entspricht ($dE/dA = E/A$). Der entsprechende Aufwand A_o ist gegeben als Abszisse des Berührungspunktes der Tangente aus dem Ursprung an die Kurve C_o, welche den höchstmöglichen Ertrag darstellt.

Wie bestimmt sich C_o? In erster Näherung kann man Z als konstant annehmen. Für einen gegebenen Aufwand A_1 gibt es verschiedene Möglichkeitenn den Betrag $A_1 - Z = X + Y$ auf Energiebeschaffung und Speicherung zu verteilen. Eine ungeschickte Wahl von X/Y führt zu einem geringeren Ertrag, wie er etwa der Kurve C_1 entsprechen würde. Ist im Punkt C_1 (A_1) etwa $\partial E/\partial X > \partial E/\partial Y$, d.h. dass ein zusätzlicher Franken Aufwand zur Energiebeschaffung mehr Ertrag als einer zur Speicherung bringt, so müsste X solange auf Kosten von Y vergrössert werden, bis gilt

$$\partial E/\partial X = \partial E/\partial Y$$

mit $dA = dX + dY = 0$; ($dZ = 0$)

Der zu dieser Bedingung gehörende Ertrag ist der höchstmögliche, welcher unter den gemachten Annahmen mit dem Aufwand A_1 erwirtschaftet werden kann. Die Kurve C_o der Maximalerträge bei gegebenem Aufwand A wird deshalb durch diese Bedingung definiert.

Es ist nun sehr wohl möglich, dass im so optimierten System die Verteuerung der Energie durch die Speicherung nicht minimal wird, d.h. das Sub-

Kenngrössen der Beispiele Tabelle I

Beispiel		Stausee 1	Boiler 2	Benzintank 3
Kapazität K	J	$4 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{7}$	$1{,}7 \cdot 10^{9}$
	bzw. kWh	$11 \cdot 10^{7}$	14	460
Energiedichte k_v	J/m³	$4 \cdot 10^{6}$	$1{,}7 \cdot 10^{8}$	$3{,}3 \cdot 10^{10}$
	bzw. kWh/m³	1,1	46	$9 \cdot 10^{3}$
k_m	J/kg	$4 \cdot 10^{3}$	$1{,}7 \cdot 10^{5}$	$4{,}2 \cdot 10^{7}$
	bzw. kWh/kg	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	$4{,}6 \cdot 10^{-2}$	11,6
Ladeleistung P_2	kW	$5 \cdot 10^{4}$ (max)	5...10	$1{,}7 \cdot 10^{4}$(!)
Entladeleistung P_E	kW	P_n	15	92
Zykluszeit t_z	Tage	365	1	1...30
Preis Ladeenergie g_L	Fr./kWh	-	0,1	0,1
Energiekosten ab Speicher g_E	Fr./GJ	27,8	43	28
	bzw. Fr./kWh	0,1	0,15	0,101

system Speicher für sich allein nicht kostenoptimiert ist. Das wäre z.B. dann der Fall, wenn ohne grosse Zusatzkosten etwa eine Staumauer höher gebaut und die Speicherkapazität damit wesentlich vergrössert werden könnte, zusätzliches Wasser aber sehr teuer von weit her zugeleitet werden müsste. In Figur 2 würde das bedeuten, dass die minimale kWh-Verteuerung durch Speicherung für $A > A_0$ erfolgte, d.h. jenseits des optimalen Gesamtaufwandes A_0 zu liegen käme.

Dieser Exkurs macht nachdrücklich deutlich, wie wichtig Systemfragen werden, wenn es um den Einsatz von Speichern geht.

5. Geläufigste Speichertypen

5.1 Speicher fühlbarer Wärme

Der *Wasserspeicher* in Form des mit billigerem Nachtstrom aufgeheizten Warmwasser-«Boilers» ist wohl der am häufigsten eingesetzte Wärmespeicher. Erwähnenswert ist, dass die Kenntnisse über Speicherverluste in den letzten zehn Jahren beachtlich zugenommen haben. Dies schlägt sich zunehmend in verlustarmen Produkten nieder. Wasser ist als billige, nicht aggressive Flüssigkeit mit hoher spezifischer Wärme als Speichermedium unterhalb der Siedetemperatur hervorragend. Auch die Wärmezu- und -abfuhr ist einfach und billig.

Werden höhere Temperaturen benötigt, so kommen *Thermoöle* bis etwa 300 °C, noch höher *Salzschmelzen* und Festkörper (insbesondere Keramiken) in Frage. Bekannt sind hier z.B. die Elektrospeicherheizungen. Es gibt aber auch Festkörperspeicher bei niederen Temperaturen, wie etwa die mit solaren Luftkollektoren beheizten Geröllspeicher unter Einfamilienhäusern. Natürlich bilden die Hausmauern und das Mobiliar einen Speicher, den jedes Haus besitzt.

Das generelle Problem aller Speicher für sensible Wärme sind die thermischen Verluste. Da die Wärmekapazität mit dem Volumen, die Verluste nur mit der Oberfläche zunehmen, gehen die relativen Verluste mit $1/r$ zurück (r = Lineardimension des Speichers). Das ist der Grund, weshalb für Langzeitspeicherung (Wochen, Monate) fast nur Grossspeicher in Frage kommen, da sonst die Verluste zu gross bzw. die Isolation zur Reduktion der Verluste zu teuer würde.

5.2 Latentwärmespeicher

Unter Latentwärmespeichern versteht man in der Praxis die Schmelzwärmespeicher. Grundsätzlich kann aber die latente Wärme jedes anderen Phasenüberganges eines Stoffes für Speicherzwecke verwendet werden (z.B. die Verdampfungswärme beim Phasenübergang flüssig/dampfförmig). Der grosse Vorteil der Latentwärmespeicher besteht darin, dass ihnen Wärme bei konstanter Temperatur zugeführt und entzogen werden kann. Allerdings muss diese (Schmelz-)Temperatur dann auch wirklich zum Prozess passen. Dies ist naturgemäss nicht allzu häufig. Mit Beimischungen ist es innerhalb gewisser Grenzen möglich, den Schmelzpunkt zu verändern. (Beispiel aus dem Alltag: das Salzen von Strassen).

Die lange Geschichte der Latentwärmespeicher ist durch viele, in der Mehrzahl der Fälle enttäuschte, Hoffnungen gekennzeichnet. Dafür gibt es einige prinzipielle Gründe aber auch ganz praktische Schwierigkeiten [2]. Die technischen Hauptprobleme sind:

- Komplizierte Wärmetauscher (Wärme erscheint an der Gefrierfront)
- Lebensdauer (beschränkte Zyklenzahl z.B. durch Entmischen; beim Ausfrieren bleiben Zusätze bevorzugt in der Lösung)
- Manche thermisch geeignete Substanzen sind korrosiv, ätzend oder toxisch (z.B. NaOH) und brauchen deshalb erhöhte Vorsichtsmassnahmen.

Im Niedertemperaturbereich (Haustechnik) wird kostenmässig ein Wasserspeicher einem Latentwärmespeicher praktisch immer überlegen sein. Der Grund liegt darin, dass der Latentwärmespeicher gleicher Kapazität volumenmässig höchstens zwei- bis dreimal kleiner ist als der Wasserspeicher. Da Wasser praktisch gratis ist, müsste man für das Geld eines isolierten Wasserbehälters mit einfachem Wärmetauscher ein zwar kleineres, aber dafür im allgemeinen mit anspruchsvollen Einbauten und Sensoren bestücktes Speichergefäss bauen und erst noch den Inhalt, die Latentwärmespeichersubstanz, bezahlen. Positive Erfahrungen liegen jedoch in Spezialfällen vor.

5.3 Mechanische Speicher

Der am meisten verbreitete mechanische Speicher ist der *Gravitationsspeicher* in Form der Speicher- und Pumpspeicherseen. Wie schon gezeigt, ist er attraktiv, obwohl er eine geringe Energiedichte hat. Sein Vorteil ist, dass er in sehr grossen Einheiten und, verglichen mit anderen Speichern, sehr billig gebaut werden kann.

Am meisten diskutiert wird heute der *Schwungradspeicher*. Er hat für Kurzzeitspeicherung (Stunden, allenfalls Tage) eine Zukunft.

6. Langzeitspeicherung und Transport von Energie

Der Unterschied zwischen kinetischer und potentieller Energie ist für die Speicherung von Energie von grosser Bedeutung. Potentielle Energie kann, mindestens im Prinzip, ohne Verluste beliebig lange gespeichert werden; Beispiele: gespannte Feder, Stausee, chemische Bindungen (z.B. Erdöl). Bei der Speicherung kinetischer Energie treten Verluste infolge irreversibler Vorgänge auf; Beispiele: Reibung beim Schwungrad, Widerstandsverluste in Magnetfeldspulen (bzw. Kühlleistung für supraleitende Spulen), irreversible Wärmeleitung in Wärmespeichern. Es ist also leichter, potentielle Energie zu speichern als kinetische.

In einer nachfossilen Periode wird es nach heutigen Kenntnissen drei Primärenergiequellen geben: Kernspaltung, Kernfusion und Sonnenenergie. Sie erzeugen vor allem drei Energieformen: Hochtemperaturwärme, elektrischen Strom, Sonnenstrahlung. Dies sind alles kinetische Energieformen[1], also behaftet mit den eben beschriebenen Nachteilen für die Speicherung. Es erscheint deshalb wünschenswert, diese kinetischen Energieformen zur Speicherung über längere Zeit in eine potentielle Form umzuwandeln.

Zu jeder solchen Energieform gehört eine Kraft. Überlegt man, welche Kräfte in der Natur zur Speicherung in Frage kämen, so sieht man [4], dass etwa Van-der-Waals-Kräfte oder Wasserstoffbrückenbindungen zu schwach sind (zu kleine Energiedichten, zu grosse Volumina), die Kernkräfte hingegen so stark, dass zu ihrer Handhabung spezielle Vorkehrungen nötig sind (Radioaktivität).

Was übrig bleibt, sind die ionischen Bindungskräfte und vor allem die *ko-*

[1] Wohl ist z.B. im nuklearen Brennstoff Energie in potentieller Form gespeichert. Einmal im Reaktor, wird er aber vorzugsweise im Bandbetrieb genutzt und liefert dabei Wärme bzw. Strom, für die sich das Speicherproblem stellt.

valenten chemischen Bindungen (d.h. die auch im Erdöl genutzten Kräfte). Sie sind genügend stark, um Energiedichten vergleichbar mit Erdöl zuzulassen, und doch genügend schwach, um einfach gehandhabt werden zu können. Diese Zusammenhänge sind ausführlicher in [4] dargelegt worden.

Will man also die in der Einleitung erwähnten Vorteile der Erdölwirtschaft über die Periode der fossilen Energieträger hinaus erhalten, so scheint es langfristig wichtig, vor allem auch die chemische Speicherung zu untersuchen. Den drei Hauptenergieformen Wärme, Strom und Strahlung entsprechend sind *Thermochemie, Elektrochemie* und *Photochemie* die Disziplinen, von denen hier Beiträge erwartet werden können.

Die Kommission für Energiefragen des Schweizerischen Schulrates (KES) hat, ausgehend von solchen Überlegungen, das Thema Transport und Speicherung von Energie in ihrem Bericht «Konzept für eine Energieforschungspolitik» [3] als eines der künftig wichtigen und deshalb prioritär zu fördernden Forschungsgebiete bezeichnet. Natürlich gibt es bereits heute Arbeiten auf diesem Gebiet (z.B. zu Wasserstoff, Methanol, Batterien, Brennstoffzellen, Leichtmetallen). Die Meinung ist, dass solche Arbeiten der langfristigen Bedeutung des Themas wegen ausgebaut und unabhängig von kurzfristigen Schwankungen des Interesses kontinuierlich gefördert werden sollten. Erwähnt seien in diesem Zusammenhang die kürzlich erschienenen Aufsätze im EIR-Bulletin [5...8].

7. Schlussbemerkungen

Seit klar geworden ist, dass wir bei den fossilen Energieträgern noch für einige Zeit wohl eher ein *Ent*sorgungs- als ein *Ver*sorgungsproblem haben werden (z.B. Schadstoffe der Luft), ist die Hektik der 70er Jahre aus der Energieforschung weitgehend verschwunden. Das ist gut so. Es darf aber nicht dazu führen, Energieprobleme weniger ernst zu nehmen, sondern dazu, ihnen ohne «Crash»-Programme in Ruhe auf den Grund zu gehen.

Die vorstehenden Ausführungen implizieren, dass die Lösung von Speicherproblemen mithilft, ein Energiesystem flexibel zu gestalten, Vorräte zu halten sowie *Produktions- und Verteilsysteme voll und gleichmässig auszulasten*. Das sind wertvolle Eigenschaften, die grundsätzlich auch kostensenkend wirken müssen.

Dass Speicher in heutigen Systemen trotzdem relativ bescheiden vertreten sind, liegt nicht zuletzt darin begründet, dass das Erdöl bis jetzt diese Rolle in fast idealer Weise erfüllt hat. Solange es, gemessen an den Funktionen, die es erfüllt, so unerhört billig ist, haben andere Speicher nur geringe Chancen, abgesehen von Ausnahmefällen. Ihre Zeit wird wahrscheinlich kommen, wenn es gilt, diese Funktionen vom Erdöl zu übernehmen. Es ist deshalb wohl klug, vorerst an günstigen Einzelfällen praktische Erfahrungen zu sammeln und parallel dazu die nicht einfachen technischen Grundlagenprobleme langfristig zu untersuchen.

Literatur

[1] *W. Durisch* u.a.: Chemische Speicherung. In: Beiträge aus der Forschung des Eidgenössischen Institutes für Reaktorforschung. Festgabe zum 60. Geburtstag von Herrn Professor H. Gränicher. Würenlingen, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung (EIR), 1984; 17 Seiten.

[2] *P. Kesselring:* Zur Energiedichte im Latentwärmespeicher – einige grundsätzliche physikalische Überlegungen. In: Rationelle Energienutzung durch Wärmespeicherung. Tagung, Stuttgart 1977. VDI-Berichte 288. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1977; S. 87...95.

[3] Konzept für eine Energieforschungspolitik des Schulrates. KES-Bericht. 2. Auflage. Zürich, Kommission für Energiefragen des Schweizerischen Schulrates/ETH, 1985.

[4] *P. Kesselring:* Die Verarbeitung und Speicherung von Energie – ein wichtiges Problem jeder zukünftigen Energieversorgung. Bull. SEV/VSE 74(1983)7, S. 350...355.

[5] *T.H. Schucan:* Speicherung und Transport von Energie. EIR-Bulletin (1986)57, S. 10...15.

[6] *W. Durisch* und *R. Mülli:* Aluminium – ein hochwertiger chemischer Energiespeicher. EIR-Bulletin (1986)57, S. 34...41.

[7] *O. Haas:* Aluminium-Batterien und Brennstoffzellen. EIR-Bulletin (1986)57, S. 41...46.

[8] *M. Taube* u.a.: Die saisonale Speicherung von Wasserstoff und seine Verwendung zum Antrieb von schweren Fahrzeugen. EIR-Bulletin (1986)57, S. 47...57.