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: 74 (1983)

Heft: 7

Artikel: Die Verarbeitung und Speicherung von Energie : ein wichtiges Problem jeder zukünftigen Energieversorgung

Autor: Kesselring, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904786

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: 09.12.2025

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

Die Verarbeitung und Speicherung von Energie – ein wichtiges Problem jeder zukünftigen Energieversorgung

P. Kesselring

Die fossilen Energieträger und speziell das Erdöl sind beinahe perfekte Langzeit-Energiespeicher. Will man sie substituieren, so muss man auch diese für unsere technische Zivilisation so wichtige Funktion ersetzen. Im vorliegenden Artikel wird versucht, diese Bedeutung anhand einiger einfacher Überlegungen herauszuarbeiten. Dabei findet die chemische Speicherung von Energie besondere Beachtung, und zwar nicht nur in Form von Wasserstoff oder Batterien. In seinen Schlussfolgerungen wirbt der Artikel dafür, dass Fragen der Langzeitspeicherung entsprechend ihrer Bedeutung vermehrt diskutiert und insbesondere die F + E-Anstrengungen auf dem Gebiet der chemischen Speicherung verstärkt werden.

Les porteurs fossiles d'énergie, notamment le pétrole, sont des accumulateurs d'énergie de longue durée presque parfaits. Si l'on veut les substituer, notre civilisation technique doit également remplacer cette importante fonction. Dans cet article, on tente de mettre en évidence cette importance par quelques simples considérations. C'est l'accumulation chimique d'énergie qui est particulièrement intéressante, ceci non seulement sous forme d'hydrogène ou de batteries. Il convient donc de s'occuper plus activement des questions d'accumulation de longue durée et en particulier de renforcer la recherche et le développement de l'accumulation chimique.

Adresse des Autors

Dr. *P. Kesselring*, Leiter der Abteilung für Prospektivstudien, Eidg. Institut für Reaktorforschung (EIR), 5303 Würenlingen.

1. Die Vorzüge des Erdöls als Energiespeicher

Die Substitution von Erdöl durch andere Primärenergien ist unbestritten eines der langfristigen Ziele der weltweiten und auch der schweizerischen Energiepolitik. Was das Öl und die anderen fossilen, organischen Energieträger gegenüber den nuklearen und nicht nuklearen Alternativen auszeichnet, ist u. a. die Leichtigkeit, mit der die Energie in *Raum und Zeit* verschoben werden kann [1; 2]. Als wichtige Konsequenz dieser Eigenschaft resultiert die Möglichkeit, sowohl Produktions- wie Verteilkapazitäten auf den *Mittelwert* des Verbrauchs auslegen zu können. Voraussetzung dazu sind natürlich dezentrale Speicher am Ort des Verbrauches. Typisches Beispiel sind die Heizöl- und Treibstoffversorgung[1]). Die Schwierigkeiten, welche bei Ersatz des Erdöls in diesen Anwendungen durch Wärme jeglicher Herkunft bzw. durch Elektrizität entstehen, sind bekannt. Insbesondere bedingt die schlechte Langzeitspeicherbarkeit der Ersatzenergien die Auslegung von Produktions- und Verteilkapazitäten auf *Spitzenwerte*, was zu einer schlechten Auslastung der Anlagen und deshalb zu hohen Kosten führt.

In Tabelle I ist die Rolle der Energiespeicherung für Erdöl, Uran und Sonnenenergie dargestellt. Diese einfache Aufstellung macht deutlich, wie zentral die Lagerfähigkeit des Erdöls für seine Bedeutung in der heutigen Energieversorgung ist. Die Fragezei-

[1]) Die Flotte der Tanker und Lastzüge kann – relativ gesehen – klein sein, weil sie das ganze Jahr unterwegs ist und z. B. das Heizöl für den Winter auch im Sommer in den Öltank einer Liegenschaft gefüllt werden kann.

Wo spielt Energiespeicherung eine Rolle? Tabelle I

Stationen der Energie von der Primär- zur Nutzenergie	Primärenergieart		
	Erdöl	Uran	Sonne
Primärenergie	Förderung ***Lagerung***	Förderung ***Lagerung***	Strahlung ***Speicherung?***
Sekundärenergie	Raffinierung ***Lagerung zentral*** Verteilung ***Lagerung dezentral***	Brennstab-produktion ***Lagerung zentral*** Reaktor (Wärme) ***(Speicherung zentral)?*** Elektrizität ***(Speicherung zentral)?*** Verteilung ***(Speicherung dezentral)?***	Umwandlung Wärme, Elektrizität, Chemie ***Speicherung?*** Verteilung ***Speicherung?***
Nutzenergie	Nutzung	Nutzung	Nutzung

N.B. Die Zuordnung von raffinierten Erdölprodukten und von Brennstäben zur Kategorie Sekundärenergie mag etwas ungewöhnlich sein. Sie wurde vorgenommen, um im Sinne dieses Artikels darauf hinzuweisen, dass bereits eine Verarbeitung der Primärenergieträger unter Aufwendung von Energie stattgefunden hat.

chen bei «Uran» und «Sonne» zeigen, dass entsprechende Funktionen für diese Energienutzungsketten noch weitgehend fehlen.

2. Die mit Wärmepumpen beheizte Schweiz – ein Gedankenspiel

Zur Illustration dieser Überlegungen soll ein Gedankenspiel dienen. Der Endenergieanteil für Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung beträgt heute bekanntlich rund die Hälfte des gesamten schweizerischen Endenergieverbrauchs und wird zu einem grossen Teil durch Erdöl gedeckt. Man nehme einmal an, dieser Anteil werde durch architektonische und bautechnische Massnahmen um einen Drittel gesenkt und betrage also noch 33% des heutigen Endenergieverbrauchs. Würde diese Energie durch elektrische Wärmepumpen mit einer guten mittleren Leistungsziffer von 2 gedeckt werden, so bedeutet dies einen *zusätzlichen* jährlichen Elektrizitätsverbrauch von 16,5% des Endenergieverbrauchs, was gerade beinahe dem heutigen Verbrauch entspricht (1981: 19,2%). Da diese Energie aber als *saisonale Spitzenenergie* während etwa vier Wintermonaten anfällt, müssten die *zusätzlichen* Produktions- und Verteilkapazitäten rund das *Dreifache* der heute bereits bestehenden betragen (Fig. 1).

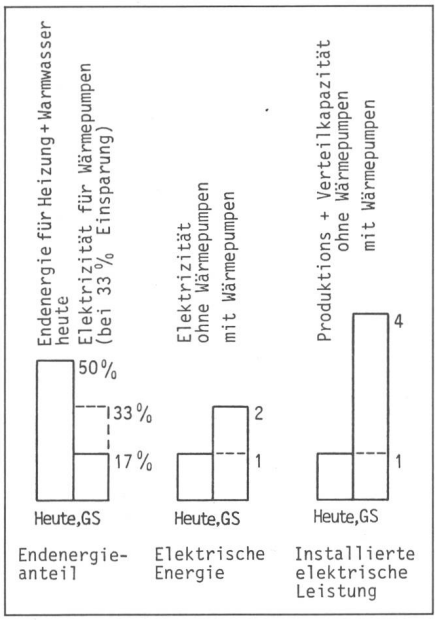

Fig. 1 Die mit elektrischen Wärmepumpen beheizte Schweiz

GS = Gedankenspiel. Würde man die Schweiz voll mit elektrischen Wärmepumpen beheizen, so ergäbe sich eine Verdoppelung des Elektrizitätsverbrauchs, aber eine Vervierfachung der installierten Produktions- und Verteilkapazität.

Die Anlagen würden zudem während zwei Dritteln des Jahres brachliegen. Wäre es hingegen möglich, die Energie während des ganzen Jahres zu produzieren, zu verteilen und wie Öl dezentral zu speichern, so wäre das Ganze ein schönes Stück weniger utopisch.

Im Ernst denkt natürlich niemand an die Verwirklichung eines solchen Szenarios. Das Gedankenspiel zeigt aber doch schlaglichtartig auf, wie wichtig die saisonale Energiespeicherung langfristig gesehen ist. Und da in dieser Beziehung bis jetzt noch sehr wenig anwendungsbereite Technik vorhanden ist, scheint es sehr wohl möglich, dass wir noch mit Energiespeicher- und Energietransportkrisen konfrontiert werden, selbst wenn an und für sich genügend Energie zur Verfügung stehen wird. Das Beispiel macht zudem klar, dass Energiespeicherung nicht nur für die Sonnenenergie, sondern, bei stärkerer Verbreitung, ebenso für die Kernenergie lebenswichtig sein wird.

3. Die Energiespeicherung in Zwischenprodukten oder Konsumgütern

Im vorhergehenden Gedankenspiel ist es nicht unbedingt notwendig, dass im Sommer ein speicherbarer und transportfähiger Sekundärenergieträger für die Hausheizung im Winter produziert wird. Es wäre auch schon geholfen, wenn die Sommerenergie zur Fabrikation eines leicht und billig lagerbaren Produktes verwendet werden könnte, das z. B. selber wieder ein Edukt, d. h. ein Ausgangsprodukt für einen chemischen Fabrikationsprozess oder aber auch bereits ein Konsumgut sein könnte. Ein nach heutigen Vorstellungen überdimensioniertes Elektrizitätserzeugungs- und Verteilsystem würde dann wie folgt sinnvoll eingesetzt werden können:

a) Im Winter: Antrieb von elektrischen Wärmepumpen
b) Übrige Zeit: Immer wenn mehr Elektrizität produziert als benötigt wird, werden die dafür vorgesehenen Produkte fabriziert. Statt der schwer speicherbaren Elektrizität werden Produkte «an Halde gelegt», wobei für Produkte, die vordem mit Erdöl hergestellt wurden, auch eine Substitution stattfindet.

Folgende Aspekte einer solchen «Energiespeicherung in Produkten» sind beachtenswert:

- Keine Energie-Speicherverluste.
- Die Produktionsanlage übernimmt die Zusatzfunktion der Energieumwandlung in eine speicherbare Form. Sonst wird dazu oft ein separater Apparat benötigt, wie z. B. bei einer Batterie.
- Die Speicherkosten bestehen im wesentlichen aus der Verteuerung des Produktes durch die reduzierte Betriebsstundenzahl der Produktionsanlage, durch den zusätzlich benötigten Lagerraum sowie durch die verlängerte Lagerdauer des Produktes.

Daraus ergeben sich unter anderem die Forderungen:

- Hoher Energiekostenanteil an den Gesamtkosten des Produktes erwünscht.
- Möglichst nicht kapitalintensive Produktionsanlage.
- Billige Lagerbehälter (Schüttgut, nicht aggressive Flüssigkeiten).
- Während normalerweise das Elektrizitätswerk dem Produzenten dienen muss, ist es hier gerade umgekehrt. Die Produktionsprozesse müssen so ausgewählt bzw. bestehende Prozesse so modifiziert werden, dass sie mit variabler Leistung betrieben und kurzfristig ein- bzw. ausgeschaltet werden können.

Es ist noch wichtig, zu erwähnen, dass die Energiespeicherung in Produkten natürlich unabhängig von irgendwelchen Szenarien und Gedankenspielen von Interesse ist. So könnte z. B. die Möglichkeit, Bedarfsspitzen durch Abschalten grösserer Lasten – etwa eben dieser «Speicherproduktionsanlagen» – zu brechen, bereits heute für die Elektrizitätsversorgung interessant sein. Die Funktion des Leistungsausgleichs würde dabei am Anfang wahrscheinlich wichtiger sein als die der Energiespeicherung. Ein praktisches Beispiel dazu gibt es bereits, nämlich die Chlor-Alkali-Elektrolyse der Sodawerke in Zurzach.

4. Die Verarbeitung und Veredelung von Energie

Die bisherigen Überlegungen können als Spezialfall eines allgemeineren Gedankens aufgefasst werden. Den Ausgangspunkt bildet die triviale Tatsache, dass die Natur den Menschen Rohstoffe anbietet, die zur Verwendung einer sehr unterschiedlichen Bearbeitung bedürfen. Marmor kann z. B. als Baustoff praktisch so verwendet werden, wie er aus dem Steinbruch kommt. Die Ingredienzen von Beton oder Glas durchlaufen einen relativ komplexen Prozess, bis das Endprodukt verwendet werden kann. Ähnli-

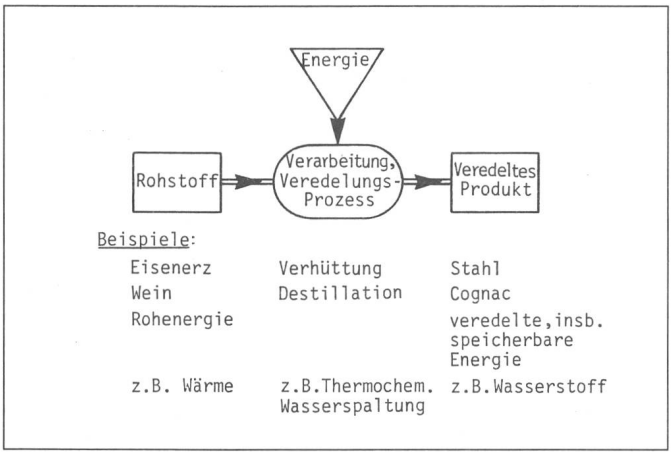

Fig. 2 Die Veredelung von Energie

Fast immer wird bei einem Veredelungsprozess Energie als «Werkzeug» gebraucht. Das ist nicht anders, wenn der Rohstoff selbst Energie ist, und führt zu Energienutzungsgraden, die beträchtlich kleiner als eins sein können. Wie bei jedem Prozess wird man aber versuchen, diesen unerwünschten Energieanteil durch geschickte Prozessführung möglichst klein zu halten.

ches gilt für die Aufbereitung von Erzen zu Metallen (Fig. 2).

Auch Energie ist ein *Rohstoff*. Erdöl ist ein Produkt, das in der Natur durch einen sehr langsamen Prozess aus einfacheren, für uns weniger attraktiven Ausgangsmaterialien entstanden ist. Erdöl ist aus der Sicht des technischen Menschen also bereits ein «von der Natur veredeltes» Produkt. Die meisten anderen Energierohstoffe, wie z. B. Kernspaltmaterial, Fusionsbrennstoff oder die Solarstrahlung, bedürfen einer viel weitergehenden «Verarbeitung», bevor sie für uns nützlich werden. Der einfachste Umwandlungsprozess ist offenbar derjenige in Wärme. Die einzigen, heute im grossen Stil betriebenen «Veredelungsprozesse» sind die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie und Elektrizität. Will man für die Übernahme derjenigen Funktionen, welche einleitend beim Erdöl als so wichtig erachtet wurden, neue Verfahren entwickeln, so erfordert das nach diesen Überlegungen die Untersuchung von weiteren geeigneten Bearbeitungsmethoden für Rohenergie (als Rohenergie sei hier z. B. Hochtemperaturwärme bezeichnet).

Zusammenfassend: So wie heute z. B. die Verarbeitung des Rohstoffs Eisenerz zu Stahl unter Zuhilfenahme von Energie als Werkzeug ein wichtiger Industriezweig ist, so könnte in Zukunft die *Veredelung von Rohenergie* ebenfalls *unter Zuhilfenahme von Energie als Werkzeug* zu leicht speicherbaren und transportierbaren sekundären Energieträgern *ein sehr wichtiges Gebiet der Energietechnik* werden.

Ein Aspekt dieses Vergleichs dürfte besonders erwähnenswert zu sein: Es ist für jedermann selbstverständlich, dass die Herstellung von Stahl Energie braucht und Geld kostet. Man wird sich auch daran gewöhnen müssen, dass «stärker veredelte» Energieträger mehr kosten als relativ wenig bearbeitete. Der Energieaufwand für die Veredelung kann erheblich sein. Umwandlungswirkungsgrade und Prozessausbeuten sind dafür ein Mass. Kommen solche Techniken in grösserem Stil zum Einsatz, so wird deshalb bei konstantem Endenergiebedarf der Primärenergiebedarf ansteigen. *Die Übernahme der hochwertigen Funktionen des Erdöls durch synthetische Produkte muss also wohl mit höheren Kosten wie auch mit zusätzlichem Primärenergieverbrauch bezahlt werden.* Es ist selbstverständlich, dass solche Energieformen nur dort eingesetzt würden, wo ihre Eigenschaften auch wirklich benötigt werden. Die Richtlinien, nach denen geeignete Prozesse ausgesucht werden sollten, könnten nach dem bisher Gesagten u. a. sein:

- Es sind Systeme gesucht, welche Energie, die mit zeitlich variabler Leistung anfällt, verarbeiten können.
- Als «Rohenergieformen» kommen vor allem in Frage: Hochtemperaturwärme, Elektrizität sowie Solarstrahlung.
- Die Produkte des Verarbeitungsprozesses können speicherfähige Energieträger sein, aber auch Stoffe, die sich als Rohmaterial für weiterführende technische Prozesse eignen (z. B. als Edukte für chemische Prozesse).
- Die Produkte sollen einfach gelagert werden können, d. h. wenn möglich flüssig oder fest sein (z. B. nicht hygroskopisches Schüttgut). Dies ist besonders für die saisonale Speicherung wichtig, da wegen der kleinen Lade/Entlade-Frequenz die Betriebs- und Amortisationskosten für den Behälter sich stark verteuernd auf die gespeicherte kWh auswirken.
- Die Produkte müssen stabil sein, sie dürfen sich während der Lagerung nicht verändern.
- Leichte Transportierbarkeit bei annehmbaren Risiken (Umwelt, Sicherheit, Toxizität usw.).
- Die energieverarbeitenden Systeme müssen einfach sein (Möglichkeit der variablen Leistungsaufnahme, relativ kleine Jahresauslastung; Kosten trotzdem annehmbar).

5. Die Rollen der Wärmespeicherung und der chemischen Speicherung

Es fällt auf, dass in dieser Aufzählung die Wärmespeicher keinen Platz haben. Das kommt nicht von ungefähr, sondern hängt im wesentlichen mit dem bekannten Unterschied zwischen kinetischer und potentieller Energie zusammen. Beide Energieformen lassen sich speichern: kinetische Energie z. B. in einem Schwungrad, potentielle etwa in einem Stausee. Es ist aber klar, dass die mögliche Speicherzeit für das Wasser im Speichersee sehr viel grösser ist als für das Schwungrad, dessen Reibung nur durch sehr raffinierte Lagerung so weit heruntergesetzt werden kann, dass eine Speicherung über Tage noch sinnvoll ist. Dieses einfache Beispiel zeigt ein allgemeines Prinzip: *Die Verlustraten von Speichern für kinetische Energie sind bedeutend grösser als von solchen für potentielle Energie.*

Das gilt auch noch im molekularen Bereich: Wärme ist zwar nicht gerichtete kinetische Energie, sondern statistisch ungeordnete Bewegungsenergie der Moleküle und Atome. Der zur Reibung analoge, entropievermehrende Effekt der irreversiblen Wärmeleitung macht trotzdem die Zeitkonstante jeder Wärmespeicherung bei höherer als Umgebungstemperatur klein im Vergleich etwa zu derjenigen für die kovalenten chemischen Bindungen im Erdöl.

Die chemische Bindung aber ist der Prototyp eines molekularen Speichers potentieller Energie [2]. Betrachtet man die Palette der in Frage kommenden Bindungskräfte, so zeigt sich bald, dass deren Anzahl beschränkt ist (Tab. II):

- Van-der-Waals-Kräfte. Sie sind z. B. wichtig für viele Lebensprozesse und so schwach, dass sie für die Energietechnik nicht in Frage kommen.

Die Grössenordnung von Bindungskräften Tabelle II

Bindungsart	Relative Bindungsstärke
Van der Waals	$<10^{-3}$
Wasserstoffbrücken	10^{-1}
Kovalente Bindung	1
Ionenbindung	1
Kernkräfte	10^{6}

Eine typische kovalente Bindungsenergie beträgt etwa 100 kcal/mol = 418 kJ/mol = 4,35 eV.

- Wasserstoffbrückenbindungen. Sie sind z. B. verantwortlich für die Wärme, die entsteht, wenn man Ammoniak in Wasser löst. Sie sind zwar stärker als die Van-der-Waals-Kräfte, aber immer noch so schwach, dass für die Energiespeicherung viel zu grosse Volumina gebraucht würden.
- Kovalente chemische Bindungen sind z. B. an Verbrennungsprozessen beteiligt und damit über die fossilen Brennstoffe unsere wichtigsten Energiespeicher.
- Ionische Bindungen sind von ähnlicher Stärke wie die kovalenten Bindungen, aber für die Energietechnik weniger leicht zu nutzen.
- Die Kernkräfte sind so stark, dass ihre Handhabung die aus der Kernenergietechnik bekannten Vorsichtsmassnahmen erfordert. Sie eignen sich wohl nur für die Speicherung sehr grosser Energiemengen, z. B. in Kernbrennstablagern.

Macht man mit diesen Überlegungen ernst, so wird man also, wenn immer es die Qualität der zu verarbeitenden «Rohenergie» gestattet, Energie über längere Zeit nicht in Form von Wärme, sondern z. B. als chemische Energie kovalenter Bindungen speichern. Die dazugehörigen Prozesse liegen im Bereich *Hochtemperaturchemie, Elektrochemie* und *Fotochemie*.

Saisonale Speicherung von Wärme hat dagegen eigentlich nur in dem Falle eine Chance, wo billige Wärme in grossen Mengen in Grossspeichern (z. B. Erdspeichern) deponiert wird. Hier wird das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Speichers klein, so dass die Verluste und die spezifischen Investitionskosten in diskutablen Grenzen gehalten werden können.

Etwas pauschal lässt sich also sagen, dass nur Energie hoher Qualität (z. B. die chemisch gespeicherte Energie in Brennstoffen) sich leicht weit transportieren und leicht über lange Zeit speichern lässt. Selbst wenn von der Nachfrageseite her Energie minderer Qualität genügen würde, wie z. B. für die Raumheizung, kann es deshalb doch sinnvoll sein, Energie hoher Qualität dafür einzusetzen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Vorteile von der Versorgungsseite her (z. B. Auslegung von Produktions- und Verteilanlagen auf Mittelwert statt auf Spitzenwert) dies rechtfertigen. Und es ist natürlich immer anzustreben, dass der Schritt von der hochwertigen gespeicherten Energie zur niederwertigen Nutzenergie so intelligent wie möglich durchgeführt wird, also etwa durch die Verwendung zum Antrieb von Wärmepumpen.

Auf Erdöl übertragen, ergeben diese Überlegungen die Qualitätsmerkmale der Tabelle III. Dazu ist folgendes zu bemerken:

- Erdöl als H_2-Speicher soll folgendes bedeuten: Kohlenwasserstoffe und Metallhydride haben zwar physikalisch-chemisch wenig miteinander zu tun. Speichertechnisch gibt es jedoch eine Gemeinsamkeit: Im einen Fall wird Wasserstoff an Kohlenstoff gebunden, im anderen an ein Metall. Da das Kohlenstoffatom leichter ist als das Metallatom und im Mittel etwa zwei statt nur ein H-Atom – wie das in den meisten heute zur Wasserstoffspeicherung verwendeten Metallhydriden der Fall ist – bindet, so ist in aliphatischen Kohlewasserstoffen pro kg bedeutend mehr Wasserstoff «gespeichert» als in Metallhydriden; pro Volumeneinheit ist es theoretisch ungefähr gleich viel, praktisch ebenfalls mehr. Kommt natürlich noch dazu, dass im Erdöl auch der Kohlenstoff verbrannt wird (etwa zwei Drittel der Verbrennungswärme).
- Elektrizität ist bereits eine veredelte Energieform. Da sie aber immer als elektrischer Strom, also als kinetische Energie, erzeugt wird, ist sie für die direkte Langzeitspeicherung nicht sehr geeignet (supraleitende Spulen).

Die Qualitäten von Erdöl Tabelle III

- Potentielle nicht kinetische Energie gespeichert
- Arbeitet mit der «richtigen» Bindungsart
- Erdöl ist ein sehr guter H_2-Speicher
- Erdöl ist ein von der Natur veredelter Energierohstoff, während Strahlung, Wärme oder auch Elektrizität mittels der Technik in speicherfähige, sekundäre Energieträger oder Produkte umgewandelt werden müssen.

Sie muss dazu weiter umgewandelt werden und ist insofern ein Rohstoff.

6. Zum Stand der Forschung

Sieht man sich in der Praxis um, so sind die Forschung zum Thema Wasserstoffwirtschaft sowie die Entwicklung verschiedener neuer Batterietypen die hervorstechendsten Aktivitäten in die als günstig dargestellte Richtung. Falls die dargelegte Einschätzung der künftigen Bedeutung von Energieverarbeitung und Speicherung stimmt, müsste hier eigentlich viel stärker und auf breiter Front vorgegangen werden. Es gibt verschiedene Gründe oder Meinungen, warum dies nicht so ist. Hier einige oft genannte Ansichten:

- Das Problem des versiegenden Öls und erst recht das der zur Neige gehenden Kohle wirkt sich erst in einer derart fernen Zukunft aus, dass man heute noch nicht nach Lösungen zu suchen braucht.
- Energiespeicherung und -verarbeitung ist zwar ein echtes, wichtiges Problem, wird aber als solches noch nicht von genügend vielen Leuten erkannt (Ansicht des Autors).
- Es gibt keine vernünftigen Lösungen für diese Probleme. Alles Denkbare ist mit negativem Erfolg schon untersucht worden (Resignation).
- Mit Wasserstoff lassen sich alle Probleme lösen. Was braucht es mehr?

Am gefährlichsten sind wohl die beiden letzten, nicht ganz selten gehörten Ansichten: die letzte, weil ein neuer Anlauf zur Weiterentwicklung eines so wichtigen Gebietes der Energietechnik nicht schon von Anfang an die Züge einer Monokultur tragen sollte, die zweitletzte, weil Resignation ganz einfach nicht am Platze ist. Allerdings ist es richtig, dass eine wirtschaftliche Energiespeicherung heute nur in günstigen Fällen möglich sein wird. Wenn aber überhaupt der Gedanke erlaubt ist, das werde sich mit knapper werdendem Erdöl ändern, dann sicher hier. Geht es doch um den Ersatz von Funktionen, die für unsere technische Gesellschaft hochwichtig sind und die bis jetzt nur vom Erdöl getragen werden können.

7. Die Aluminiumwirtschaft – ein zweites Gedankenspiel

An einem modellhaften und – auf den ersten Blick – weit hergeholten Beispiel soll gezeigt werden, dass es wirklich weitere, wenn auch vorläufig noch nicht wirtschaftliche chemische Speichersysteme gibt, die recht attrak-

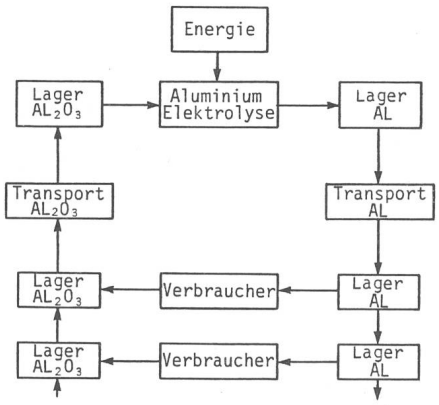

Fig. 3 Der «Aluminiumkreislauf

Aluminium als synthetischer Brennstoff wird beim Verbraucher oxidiert und das Aluminiumoxid wird wieder der Elektrolyse zugeführt (rezykliert).

tive Züge haben können. Dazu soll die Schweiz für einmal mit Aluminium beheizt werden.

Beim Verbrennen von Aluminium in Luft entsteht eine Wärmemenge, die pro Liter grösser, pro Kilogramm nur wenig kleiner ist als diejenige bei der Verbrennung von Erdöl. Damit ergibt sich folgendes Szenario (Fig. 3 und Tab. IV).

Aluminiumpulver wird mit Lastwagen, ähnlich wie Zement heute, zu den Liegenschaften transportiert und dort in Tanks gelagert. Es wird in einem neu zu entwickelnden Brenner verbrannt und heizt anstelle von Erdöl die Gebäude. Die «Asche» besteht aus völlig ungiftigem Aluminiumoxyd, Al_2O_3; das analoge Magnesiumoxid ist als «Magnesia» zum Einreiben der Hände aus der Turnstunde am Reck wohl bekannt. Die Bildung von Aluminiumnitrid ist zu unterdrücken. Der «Rauch» enthält bei reinem Aluminium und richtiger Verbrennung keinerlei Schadstoffe. Die «Asche» wird gesammelt und bei der nächsten Lieferung von Aluminiumpulver zurückgenommen. Am Ort des Kraftwerkes (z.B. Kernkraftwerk, Sonnenkraftwerk) wird das Al_2O_3 durch Elektrolyse oder einen thermischen Prozess unter Aufnahme von Energie wieder zu Aluminium reduziert und erneut in den Kreislauf eingespeist.

Die wenigen Zahlen der Tabelle IV zeigen, dass das Verbrennen von Aluminium ein interessanter Prozess ist, wenigstens was Energieinhalt und Logistik betrifft. Die erwähnte Tatsache, dass die Veredelung von Energie selbst Energie benötigt («Energie als Werkzeug») schlägt sich im energetischen Wirkungsgrad von 61% nieder.

Sowohl von der technischen wie der logistischen Seite scheinen alle Probleme eines solchen Systems handhabbar. Die Wirtschaftlichkeit ist jedoch unter heutigen Preisannahmen für Rohaluminium nicht gegeben (etwa 0,4 Fr./kWh). Die relevante, ohne weitere Studien und experimentelle Untersuchungen nicht beantwortbare Frage ist aber natürlich diejenige nach den kWh-Kosten in einem auf diese Anwendung hin optimierten System: Wieviel billiger kann weniger reines Aluminium produziert werden, welche Verunreinigungen sind tolerierbar, wie nah kann der praktische energetische Wirkungsgrad des Systems an den theoretischen herangebracht werden, was kosten die Lagerung, der Brenner, die Sicherheitsmassnahmen usw.

Interessant ist der Vergleich der Gedankenspiele «Aluminium» und «Wärmepumpe». In beiden Fällen wäre die installierte Kraftwerksleistung unter den getroffenen Annahmen fast dieselbe[2]). Die Annahmen sind übrigens für die Wärmepumpe optimal, für Aluminium nicht sehr günstig angesetzt worden. Der wesentliche Unterschied der beiden Varianten besteht im Verteilaufwand: Ein zusätzliches Elektrizitätsverteilnetz von etwa 3facher heutiger Kapazität hier, ein zusätzlicher LKW pro etwa 2000 Einwohner dort. Ebenso dürften die Hausinstallationen im Falle des Aluminiums wahrscheinlich einfacher sein als für die Wärmepumpe. Das Beispiel zeigt qualitativ die Vorteile der saisonalen Speicherung: Auslegung auf Mittelwert statt saisonalen Spitzenwert; es zeigt aber auch, dass dies mit erhöhtem Primärenergieaufwand erkauft werden muss.

Es sei ausdrücklich betont, dass diese pauschalen Überlegungen nicht als die «Wirklichkeit von morgen», sondern als Anstoss zur Diskussion des grossen Potentials der chemischen Speicherung aufzufassen sind[3]). Eine erste kleine Studie zur Verwendung von Leichtmetallen als Speicher ist am EIR bereits 1982 durchgeführt worden [3].

Ein paar Zahlen zur Aluminium-Energiewirtschaft — Tabelle IV

Aluminium als Brennstoff

Reaktion:	$4\,Al + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Al_2O_3$	
Verbrennungswärme:	Alumin.	8,6 kWh/kg
		23,2 kWh/l
	Heizöl	9,7 kWh/l
Volumenzunahme bei der Verbrennung:	$V_{Al_2O_3}: V_{2Al} = 1{,}28$	

Zahlen für ein Einfamilienhaus mit 3000 l Heizölbedarf

Al-Bedarf:	3400 kg	1,25 m³
«Asche-Anfall» (Al_2O_3):	6400 kg	1,61 m³
Al-Verbrauch bei 18 kW Leistung (Spitzenleist.):	2 kg Al/h	0,8 l Al/h

Gedankenspiel: Die mit Aluminium beheizte Schweiz

Heizbedarf Schweiz:	300 000 TJ/a
Aluminiumverbrauch:	9,7 Mio t/a
Verteilung während	260 Tagen/a
Transportleistung:	37 000 t/Tag
oder LKW (à 10 t):	3 700 LKW/Tag
Die Schweiz hat etwa	3 000 Gemeinden
Installierte Leistung für die Al-Produktion bei 14 kWh/kg Al:	18 GW (el)
Energetischer Nutzungsgrad: 8,6 kWh/kg zu 14 kWh/kg:	61%
Unter Einbezug des Elektrodenkohleverbrauchs:	50%

Es ist zu beachten, dass die angegebenen Dichten für Al und Al_2O_3 den festen Stoffen entsprechen. Als Schüttgut sind die Volumina grösser.

[2]) Energetischer Nutzungsgrad des Al-Systems 0,61
Leistungsziffer des Wärmepumpensystems 2
Dauer der Heizperiode ⅓ Jahr
Daraus ergibt sich:
$(P_{Wärmepumpe}/P_{Al\text{-}System}) = 0{,}61 \times 0{,}5 \times 3 = 0{,}92$

Falls je eine durch Wärme betriebene Absorberwärmepumpe für Heizzwecke auf den Markt kommt, könnte diese natürlich ebenfalls mit Aluminium befeuert und so der Primärenergieverbrauch reduziert werden.

[3]) Die vorhergehenden Überlegungen berücksichtigen den Wirkungsgrad der für die Alu-Erzeugung notwendigen Elektrizität nicht (Uran/Elektrizität 1/3). Die Primärenergie wird eigentlich nur zu 17% in Endenergie überführt. Dazu folgende Gedanken:
- Langfristig gesehen ist Primärenergie keine Mangelware (Brutreaktor, Sonnenenergie, Fusion). Es geht darum, diese Primärenergie so umzuwandeln, dass sie bestimmte *Funktionen übernehmen* kann. Man wird dazu das Verfahren mit der besten Vorteil/Nachteil-Bilanz wählen.
- Im Rahmen des technisch-wirtschaftlich Möglichen sollen und können die energeti-

schen Wirkungsgrade für chemische Speicher verbessert werden. Wo die praktischen Grenzen liegen, kann nur Forschung und Entwicklung zeigen.
- Man soll sich nicht am Aluminium «festkrallen». Es ist vorläufig nicht mehr als ein Modellfall, an dem die Problematik der chemischen Speicherung durchexerziert wird.

8. Einige Schlussfolgerungen

Ausgehend von diesen allgemeinen Gedanken wurde am EIR in der Abteilung für Prospektivstudien zu Beginn des Jahres 1981 ein zweijähriges Vorhaben «Speicherung» lanciert. Im ersten Jahr wurde mit Blick nach aussen (Literatur, Konferenzen, Vorträge usw.) der internationale Stand der Technik erkundet. Im Jahr 1982 wurde versucht, ein auf die Bedürfnisse der Schweiz zugeschnittenes Programm zu formulieren. Insbesondere interessierte natürlich auch der Beitrag, den das EIR dazu beisteuern könnte. Die bisherigen Schlussfolgerungen können wie folgt zusammengefasst werden:

Es sollte *heute* mit der verstärkten Untersuchung von Speicherproblemen begonnen werden. Dabei ist zwischen kurzfristig (Auswirkungen nach 5–10 Jahren), mittelfristig (10–20 Jahren) und langfristig (über 20 Jahre) wirksamen Aktivitäten zu unterscheiden. An Aufgaben für alle drei Zeithorizonte ist gleichzeitig zu arbeiten.

Kurzfristig wirksam

- Untersuchung bereits bestehender (Produktions-)Prozesse auf ihre Nützlichkeit zur Energiespeicherung. Es kommen insbesondere Elektrolyse (nicht nur zur Wasserstoffproduktion) und Prozesswärmeanwendung aus Kernkraftwerken in Frage.
- Kostenoptimierung der besten Prozesse im Hinblick auf die neue Anwendung.
- Identifizierung von elektrizitätsintensiven Industrieprozessen, die leichtes An- und Abschalten erlauben. Optimierung so, dass sie zum Leistungsausgleich in der bestehenden Elektrizitätsversorgung benützt werden können (abschaltbare Lasten).

Mittelfristig wirksam

- Untersuchungen von bekannten und neuen Hochtemperaturprozessen zur Herstellung chemischer Speicherstoffe.
- Analoges Vorgehen auf den Gebieten Elektrochemie und Fotoelektrochemie.
- Suche nach neuen Produktionsprozessen, bei denen Erdöl durch Hochtemperaturwärme oder Elektrizität aus Kernkraftwerken substituiert werden kann.
- Suche nach Prozessen, die mit zeitlich variabler thermischer und/oder elektrischer Leistung betrieben werden können.
- Erarbeitung von Vorschlägen und Untersuchung von neuartigen Energieverteilsystemen (als Beispiel: die Aluminium-Wirtschaft).

Langfristig wirksam

- Untersuchung von Speicherprozessen, welche die speziellen Verhältnisse in hochkonzentrierter Sonnenstrahlung (einige tausend Sonnen) ausnützen.
- Solare Hochtemperaturchemie.
- Fotochemie, insbesondere Fotosynthese verschiedenster Stoffe.
- Produktion von chemischen Grundstoffen (Speicherung in Produkten und gleichzeitig «Energie als Werkzeug» zur Substitution von Erdöl).

Diese allgemeinen Schlussfolgerungen geben einen möglichen Rahmen für ein allfälliges Forschungsprogramm. An den Hochschulen, in der Industrie und an Forschungsinstituten ist ein grosses Potential zur Bearbeitung der relevanten Fragen latent vorhanden. Es geht deshalb vor allem darum, vermehrt das Interesse an den Problemen der Verarbeitung und Langzeitspeicherung von Energie zu wecken.

Am EIR gibt es bis jetzt zwei bescheidene Versuche in dieser Richtung. Der erste, das sog. MTH-Projekt (*M*ethylcyclohexan-*T*oluol-*H*ydrogen) befasst sich mit der saisonalen Speicherung von Wasserstoff durch Anlagerung an Toluol [4]. Die Arbeiten werden vor allem an der ETH-Zürich und bei der Firma Saurer AG, Arbon, durchgeführt. Das EIR hat die Projektleitung. Seit Anfang 1983 werden zum anderen punktuelle Laborversuche zur Problematik von Aluminium als Energiespeicher und sekundärer Energieträger angestellt. Beide Untersuchungen werden vom Nationalen Energieforschungs-Fonds (NEFF) finanziell unterstützt.

Literatur

[1] *M. Taube:* Speicherung und Übertragung der sekundären Energie. Bull. SEV/VSE 70(1979)13, S. 641...647.

[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] *W. Durisch, O. Haas* und *H. Weber:* Thermochemische Reaktionen, die sich zur Energiespeicherung eignen. Interne EIR-Technische Mitteilung TM-13-83-2. Würenlingen, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, 1983.

[4] *M. Taube:* Nutzung der Sommerelektrizität zur Substitution von Automobiltreibstoff. Bull. SEV/VSE 72(1981)4, S. 185...188.