

Die Speicherung von Energie

Autor(en): **Burckhard, G. A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **67 (1976)**

Heft 13

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915181>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Speicherung von Energie¹⁾

Von G. A. Burkhard

Es werden die verschiedenen Speichermöglichkeiten für Energie vorgestellt. Die Eignung der einzelnen Speicherungsarten für einen rationalen und wirtschaftlichen Ausgleich der zeitlichen Unterschiede zwischen Nachfrage und Angebot werden kritisch bewertet.

1. Einleitung

Der stündliche Energiebedarf des Landes wechselt im Laufe eines Jahres innerhalb sehr weiter Grenzen. Einer in der Hauptsache klimabedingten Jahresschwankung sind noch die Unterschiede zwischen Werktag und Wochenende sowie die täglichen Schwankungen zwischen Tag- und Nachtbedarf überlagert. Für die Elektrizitätsversorgung bedeutet dies, dass die dem Netz entnommene Leistung zwischen einem Minimum von etwa 55 % und einem Maximum von 160 % variiert, wobei die mittlere Belastung des Netzes mit 100 % angesetzt ist. Beim Wärmebedarf für Raumheizung liegen die Extreme noch weiter auseinander, und zwar schwankt der mittlere Tagesbedarf hier zwischen 0 und 300 %, und der Wärmebedarf für die kälteste Stunde des Jahres steigt sogar auf 400 % des Jahresmittels an.

Die Anlieferung der Primärenergie, aus der wir unsere Elektrizität und Wärme gewinnen, kann niemals, auch nur angenähert, diesem Verbrauchsrhythmus angepasst werden. Das Wasser, als Betriebsmittel der hydraulischen Kraftwerke, sowie die in Zukunft vielleicht einmal genutzte Sonnenwärme fallen klimabedingt vorwiegend in Zeiten an, in denen der Energiebedarf relativ gering ist, und alle anderen Energiequellen stehen uns während des ganzen Jahres in angenähert gleichbleibender Menge zur Verfügung und sollten als Bandenergie bezogen werden, um Transporteinrichtungen und Kraftwerke mit einem hohen Ausnutzungsfaktor betreiben zu können.

Die Diskrepanz zwischen dem zeitlichen Ablauf des Energieanfalles und des Bedarfes wird durch Energiespeicher überbrückt. Verschiedene Möglichkeiten sind in Fig. 1 dargestellt.

2. Energiespeicher für die Elektrizitätsversorgung

Da bis zum Jahre 1965 der Elektrizitätsbedarf der Schweiz praktisch allein durch Wasserkraftwerke gedeckt wurde, hat man bisher auch für den Ausgleich zwischen Schwach- und Starklastzeiten ausschliesslich

2.1 Hydraulische Speicher

verwendet. Dabei unterscheidet man zwischen:

- *reinen Speicherwerken*, die nur durch natürliche Zuflüsse gefüllt werden,
- *kombinierten Werken*, bei denen in Schwachlastzeiten zusätzlich mittels Überschussenergie gepumpt wird, und
- *reinen Pumpspeicherwerken*, bei denen ein oberes Speicherbecken ausschliesslich mittels Pumpen in Schwachlastzeit gefüllt und während der Starklastzeit über die Turbinen wieder in das Unterbecken entleert wird.

Die beiden ersten Arten dienen dem Jahres-, Wochen- und Tagesausgleich, die reinen Pumpspeicherwerke ausschliesslich dem Ausgleich der Tagesschwankungen.

Les diverses possibilités d'accumulation sont passées en revue. Suit une analyse critique de la manière dont les divers modes d'accumulation se prêtent économiquement à la compensation des variations en fonction du temps de l'offre et de la demande.

Mit dem Übergang zur thermischen Energiegewinnung – speziell zur Atomenergie – nimmt der Bedarf an Tagesspeichern zu. Das Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft hat deshalb geprüft, an welchen Orten Pumpspeicherwerke aufgestellt werden könnten und insgesamt 273 mögliche Situationen festgestellt [1]. Darunter sind 26 besonders interessante Standorte genauer untersucht worden; und zwar 3 Projekte für kombinierte Werke, die auch Langzeitspeicherung gestatten und 23 für reine Pumpspeicherwerke zum Tagesausgleich. Die letzteren sind über das ganze Land verstreut und liegen meist in der Nähe der Verbrauchszentren. Die Grösse dieser Anlagen schwankt zwischen 1 und 10 Millionen kWh Speichereinheit und 100 MW bis 1400 MW Turbinenleistung.

Alle 23 Werke zusammen würden eine Speicherkapazität von rund 65 Millionen kWh haben und wären in der Lage, jährlich etwa 13 Milliarden kWh zu hochwertiger Starklastenergie zu veredeln.

Die Pumpspeicherwerke haben den Nachteil, dass sie oft recht starke Eingriffe in die Natur notwendig machen und dass sie die Fernübertragungsleitungen auch bei günstigster Standortwahl nur teilweise von den Lastspitzen befreien können.

2.2 Pneumatische Pumpspeicher

Vor allem in den Ländern mit vorwiegend thermischer Elektrizitätserzeugung werden einfach gebaute Gasturbinen oder kombinierte Gas-Dampfturbinen-Kraftwerke dazu benützt, in intermittierendem Betrieb die Starklastenergie zu produzieren. Sie haben den Vorteil, dass man sie in den Verbrauchsschwerpunkten aufstellen kann und damit die Fernleitungen entlastet. Der Nachteil ist, dass sie mit fossilen Brennstoffen betrieben werden (Luftverschmutzung) und keine Speicherung von Überschussenergie ermöglichen. Ihr Energiespeicher ist vielmehr das zugehörige Brennstofflager.

Da von der Bruttoleistung einer Gasturbine ungefähr zwei Drittel zum Antrieb des Kompressors benötigt werden, der die Verbrennungsluft in die Brennkammer liefert, kann die Nutzleistung der Anlage mit gleichem Brennstoffverbrauch ungefähr verdreifacht werden, wenn man die Verbrennungsluft aus einem Druckluftspeicher bezieht. Dieser Speicher wird in der Schwachlastzeit mittels eines elektrisch getriebenen Kompressors aufgeladen.

Im Hinblick auf die grossen Luftmengen, die für diese Zwecke notwendig sind, hat man an Untertagspeicher in unterirdischen Kavernen gedacht. Um dabei die grösstmögliche Speicherkapazität pro Kubikmeter Kaverneninhalt zu erzie-

¹⁾ Im Auftrag der BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Baden, erstellte und vom Autor überarbeitete Teilstudie zum Bericht «Elektrizität und Wärme» (s. Bulletin SEV/VSE 66(1975)21).

len, müsste der Druck während des Aufladens und während der Expansion konstant gehalten werden. Dies setzt voraus, dass der Speicher unter dem Wasserdruck eines Steigrohres steht. Bei einem Speicherdruck von 60 bar müsste die Kaverne also mindestens 600 m unter der Erdoberfläche liegen.

Bei diesem Druck liesse sich eine Energiemenge von etwa 13,5 kWh/m³ Speichervolumen gewinnen, wogegen zum Aufladen elektrische Schwachlastenergie von nur 10,5 kWh/m³ notwendig wäre. Der scheinbare Gewinn rührt daher, dass der Gasturbine ausser der Luft auch noch Brennstoff zugeführt werden muss. Allerdings ist der Brennstoffverbrauch, wie oben erwähnt, nur ungefähr ein Drittel von dem einer normalen Gasturbine gleicher Leistung.

Aufgrund verschiedener durchgerechneter Projekte kann man annehmen, dass die totalen Kosten solcher Anlagen, bezogen auf 1 kW an Turbinenleistung, vergleichbar sind mit denen von hydraulischen Pumpspeicherwerken gleicher Grösse. Der Nutzeffekt der Speicherung wird hingegen, bei Berücksichtigung des Brennstoffbedarfs der Gasturbine, für die pneumatische Lösung nur in der Grössenordnung von 50 % liegen, gegenüber etwa 70 % bei einem hydraulischen Pumpspeicherwerk.

Zurzeit wird in verschiedenen Ländern intensiv an der Entwicklung anderer Systeme der Energiespeicherung gearbeitet, von denen das eine oder andere in absehbarer Zeit baureif werden sollte. Davon sind zu nennen:

2.3 Hochtemperatur-Wärmespeicher

Diese sollen zum Beispiel die Überschussenergie eines Kernreaktors in der Schwachlastzeit, noch vor der Umwandlung in Elektrizität, speichern. Nach einem altbekanntem System, das für diesen Zweck weiterentwickelt werden kann, arbeitet der

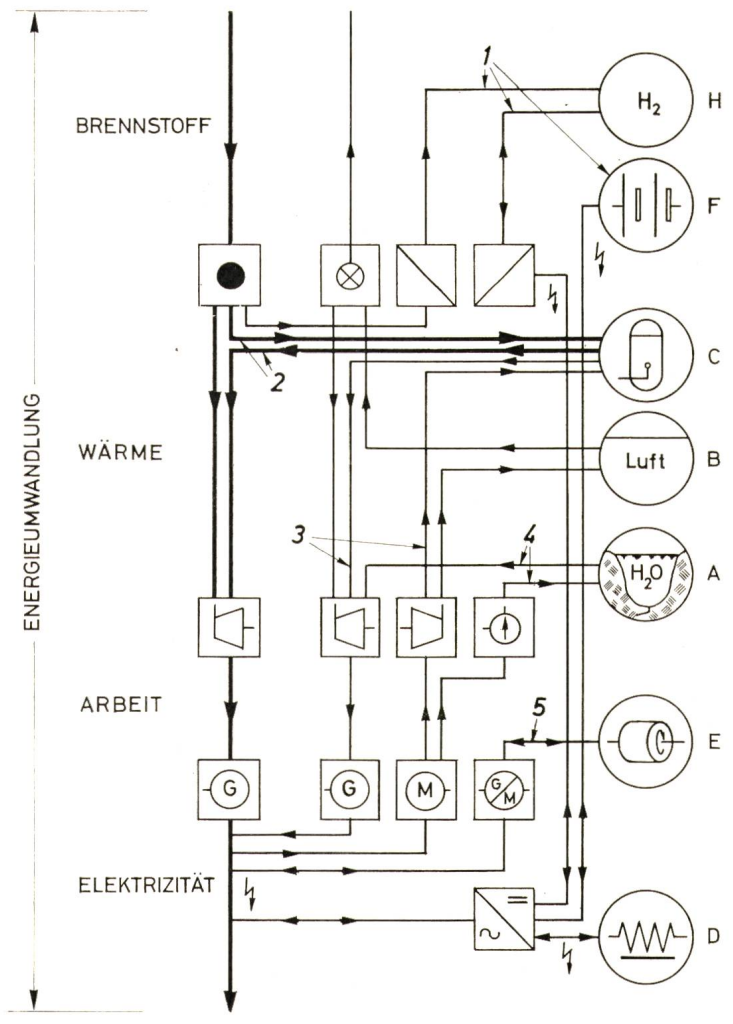
2.3.1 Dampfspeicher, auch Ruths-Speicher

Anlagen dieser Art sind zur Starklastdeckung in bescheidenem Umfang schon seit über fünfzig Jahren bekannt. Die grösste bisher gebaute hat eine Leistung von 50 MW bei einer Speichergrösse von 67 MWh. Das Speichervermögen könnte durch Aneinanderreihen einer grossen Zahl von Behältern fast beliebig gesteigert werden. Man schlägt als Ergänzung eines 1200-MW-Kernkraftwerkes ein Dampfspeicher-Spitzlastkraftwerk vor mit einem Turbosatz von 400 MW und 64 Dampfspeichern mit einer Gesamtkapazität von 800 MWh. Auch eine neuartige Behälterkonstruktion wird studiert, die einen Inhalt von 8000 m³ pro Druckgefäss bei 60 bar gestatten soll, so dass man bei einer spezifischen Speicherfähigkeit von etwa 50 kWh/m³ für obiges Projekt nur noch zwei Behälter benötigen würde [2].

Die Anlagekosten für ein solches Dampfspeicher-Spitzlastkraftwerk werden wohl höher sein als die für eine Gasturbinenanlage gleicher Leistung, was aber durch die niedrigeren Brennstoffkosten mehr als kompensiert werden dürfte.

Fig. 1
Spitzenlastdeckung durch Speicherung von Sekundärenergie (aus [2])

- A Hydraulische Pumpspeicherung
- B Druckluftspeicherung für Gasturbinen (pneumatische Speicherung)
- C Dampfspeicherung (thermische Speicherung)
- D Magnetspeicher
- E Schwungrad-Speicherung
- F Elektrochemische Batterie
- H Wasserstoffspeicherung mit Brennstoffzelle
- 1 Chemische Energie
- 2 Thermische Energie
- 3 Thermodynamische Energie
- 4 Potentielle Energie
- 5 Kinetische Energie



Mit ihrem bescheidenen Betriebsdruck und ihrer auch dementsprechend niedrigen Temperatur passen die Dampfspeicher gut zu den heute üblichen Leichtwasserreaktoren.

2.3.2 Latent-Wärmespeicher

Diese werden neuerdings für den gleichen Zweck vorgeschlagen wie die vorstehend beschriebenen Dampfspeicher, gestatten jedoch auch, höhere Temperaturen auszunützen.

Sie beruhen auf der Eigenschaft vieler Stoffe, während des Schmelzvorganges grosse Mengen von Wärmeenergie bei gleichbleibender Temperatur aufzunehmen und bei der Erstarrung ebenso wieder abzugeben. Das Prinzip ist vom Gefrier- und Schmelzvorgang «Wasser–Eis–Wasser» bei 0 °C bestens bekannt.

Man hat Materialien gefunden, die ein ähnliches Verhalten bei besser brauchbaren Temperaturen aufweisen. Es sind dies die sogenannten eutektischen Mischungen von Metallfluoriden. Die eutektische Temperatur, das heisst die Temperatur, bei der die feste und flüssige Phase des Gemisches mit jeweils gleicher Zusammensetzung nebeneinander bestehen, liegt je nach Material bei etwa 600 bis 900 °C, also bei Werten, die es gestatten, die von einem Hochtemperaturreaktor während der Schwachlastzeit produzierte Wärmeenergie bei seiner normalen Betriebstemperatur zu speichern und sie bei Starklastzeit an das Betriebsmittel der Gasturbine wieder abzugeben.

Bei den beiden vorstehend beschriebenen Speichersystemen könnte wohl der teuerste Teil des Kernkraftwerkes, das heisst der Reaktor, nur für eine mittlere Leistung ausgelegt und dauernd mit seiner Vollast betrieben werden. Den elektromechanischen Teil der Anlage, wie Turbogruppen, Transformatoren, Schaltanlage und die Übertragungsleitung, müsste man hingegen für die Spitzenleistung bemessen, so dass er nur mit einer schlechten Ausnützungsziffer betrieben würde.

Eine zweckmässigere Verwendung solcher Hochtemperatur-Wärmespeicher wäre hingegen in zukünftigen Sonnenkraftwerken denkbar. Dort könnte man in ihnen die unregelmässig anfallende Sonnenenergie speichern und die Wärme entweder als Bandenergie oder auch in einem den Bedarfsschwankungen angepassten Rhythmus an die Wärmekraftmaschine abgeben. Auf diese Art kann vermieden werden, dass letztere für die nur kurzzeitig auftretenden Maxima der Sonneneinstrahlung ausgelegt werden muss.

2.4 Rein elektrische Speicher

Wenn man von der Supraleitfähigkeit Gebrauch macht, ist es denkbar, Induktionsspulen und Magnete mit so geringen inneren Widerständen zu bauen, dass sie als Leistungsspeicher verwendet werden können.

Eine Überschlagsrechnung zeigt allerdings, dass für eine Speicherkapazität von 2,5 Millionen kWh – entsprechend einem mittleren Pumpspeicherwerk – ein kugelförmiger Magnet von etwa 70 m Durchmesser notwendig wäre [3]. Die Kugelform wird vorgeschlagen, um die grossen magnetischen Kräfte beherrschen zu können. Etwas entmutigend ist der Umstand, dass der Autor selber die Kosten vorläufig auf das Zehnfache derer für ein hydraulisches Pumpspeicherwerk schätzt.

Eine andere Forschungsgruppe [4] schlägt eine in Felsen eingebaute Induktionsspule vor, die bei einem Durchmesser

von 150 m eine Speicherfähigkeit von 1 Million kWh haben soll. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen der Autoren führen aber zu dem Schluss, dass nur bei noch wesentlich grösseren Kapazitäten und sehr kurzen Entladungszeiten Konkurrenzfähigkeit mit einem Pumpspeicherwerk erzielt werden könnte. Sie denken etwa an Induktionsspeicher mit einer Kapazität von 7,5 Millionen kWh, die bei einer Entladezeit von zwei Stunden eine maximale Leistung von 2800 MW abgeben würden.

Alle Autoren sind sich darin einig, dass noch etliche Jahre Entwicklungsarbeit notwendig ist, bis solche direkte elektrische Speicher einsatzfähig sind.

2.5 Kinetische Speicher

Diese bestehen im wesentlichen aus einem grossen Schwungrad, das mit einer Drehstrom-Induktionsmaschine fest gekuppelt ist. Letztere kann sowohl als Motor als auch als Generator laufen und ist über einen Frequenzwandler ans elektrische Netz geschaltet. Auch dieser Speicher könnte unmittelbar bei einem Grossverbraucher oder in einer lokalen Verteilstation aufgestellt werden und würde die Belastungsschwankungen vom Überlandnetz fernhalten.

Für kleine Leistungen ist der Kreisel als Energiespeicher bereits mehrfach versucht worden. Dass er sich bisher, zum Beispiel im Fahrzeugantrieb, noch nicht durchsetzen konnte, darf nicht als Beweis für seine Ungeeignetheit angesehen werden. Zurzeit werden bei den New-Yorker Untergrundbahnen Versuche gemacht, mittels Schwungradspeichern die grossen Lastwechsel zwischen Bremsen und Anfahren auszugleichen.

Als Material für die Schwungräder scheinen faserverstärkte Kunststoffe am besten geeignet zu sein, weil sie die höchsten Speicherkapazitäten pro Kilogramm Kreiselgewicht zulassen. Die maximale Energiedichte ist bei Verwendung solcher Baustoffe mit etwa 0,2...0,4 kWh/kg um fast eine Zehnerpotenz höher als für Schwungräder aus Nickelstahl. Die Kapazität ist aber trotzdem begrenzt. Für die Speicherung von höchstens 10 000 kWh, also nur etwa 1 % des kleinsten Pumpspeicherwerkes, wären Rotoren mit einem Gewicht von 100 Tonnen und mehr erforderlich. Die Drehzahl müsste etwa zwischen 1500 U/min im entladenen und etwa 3600 U/min im voll aufgeladenen Zustand schwanken, was voraussetzt, dass man die Frequenz im Speicher zwischen 50 und 120 Hz variiert. Der Aufbau dieser Schwungräder und die Lagerung von so schweren und schnelllaufenden Rotoren werden noch einige Entwicklungsarbeit notwendig machen.

Auch die kinetischen Speicher werden spezifisch teurer sein als Pumpspeicherwerke. Die Mehrkosten werden aber vielleicht in Grenzen bleiben, die wegen der Vorteile, die eine dezentralisierte Aufstellung bietet, annehmbar erscheinen. Diese Vorteile sind: bessere Auslastung der Fernleitungen, geringere Beeinträchtigung der Umwelt und – vielleicht – eine höhere Verfügbarkeit infolge der Aufteilung auf viele kleine Einheiten.

3. Die Speicherung von Brennstoffen

Über 80 % unseres Gesamtenergiebedarfes werden zurzeit durch fossile Brenn- und Treibstoffe gedeckt. Davon dient ungefähr die Hälfte der Raumheizung.

Bei den *flüssigen und festen Brennstoffen* dienen die Brennstofflager der Importeure und Verbraucher als Energiespeicher zum jahreszeitlichen Ausgleich der Verbraucherschwankungen. Die Energiedichte dieser Vorratslager ist ausserordentlich hoch und beträgt etwa 10 000 kWh/m³.

Das *Erdgas*, dessen Anteil an der Energieversorgung von etwa 1,5 % im Jahre 1970 in den nächsten Dezennien wahrscheinlich auf 10...15 % ansteigen wird, ist wesentlich schwerer zu speichern.

Für den Tagesausgleich verwendet man in der Gasversorgung heute schon Druckspeicher, für die sich aus Fertigungsgründen ein optimaler Innendruck von 17,5 bar ergibt. Hiermit ist eine Energiedichte von ungefähr 150 kWh/m³ erreichbar.

Zum Ausgleich grösserer Schwankungen im Gasverbrauch können mittlere Mengen in verflüssigtem Zustand gelagert werden. Die Energiedichte beträgt dann rund 5500 kWh/m³. Für die Verflüssigung muss das Gas auf etwa -160 °C abgekühlt werden, wofür eine Energiemenge erforderlich ist, die bei Grossanlagen etwa 15...20 % vom Heizwert des zu verflüssigenden Gases entspricht – bei kleineren Anlagen sogar noch mehr. Diese Energie kann beim Wiederverdampfen höchstens teilweise rekuperiert werden.

Die Lagerung von sehr grossen Gasmengen wird wahrscheinlich nur in Untertagspeichern in Frage kommen. Hierfür müssten künstliche Kavernen ausgebrochen werden, wenn es nicht gelingen sollte, bereits bestehende Hohlräume, wie aufgelassene Bergwerke, ausgewaschene Salzstöcke oder sogar natürliche Höhlen, dafür zu verwenden. In den meisten Fällen wird die Abdichtung solcher Untertagspeicher Probleme aufwerfen. Bei einem Druck von 60 bar lässt sich eine Energiedichte von etwa 550 kWh/m³ erzielen.

Die Langzeitspeicherung von Gas ist auf jeden Fall teuer. Man erwartet, dass der Brennstoff nach der Entnahme aus dem Speicher mindestens doppelt so viel kosten wird wie vor dem Einfüllen.

Auf längere Sicht ist damit zu rechnen, dass sowohl Erdgas als auch Heizöl durch synthetische Brennstoffe, wie zum Beispiel Wasserstoff, ersetzt werden wird.

Der *Wasserstoff* kann praktisch auf die gleiche Weise gespeichert werden wie Erdgas. Infolge seines grösseren spezifischen Volumens ist allerdings die bei gleichem Druck erreichbare Energiedichte wesentlich kleiner. Zusätzlich kann jedoch Wasserstoff auch in chemischen Verbindungen, das heisst in Metallhydriden, gelagert werden. Diese Methode hat den Vorteil, bei Umgebungstemperatur und relativ niedrigem Druck eine ähnliche Energiedichte zu ermöglichen wie bei Speicherung in verflüssigtem Zustand (siehe Tabelle I).

Für Langzeitlagerung in grossen Mengen wird voraussichtlich auch bei Wasserstoff der Untertagspeicher die günstigste Lösung sein.

Speicherung von Wasserstoff

Tabelle I

Art der Speicherung	Ungefähre Energiedichte
im Untertagspeicher bei 60 bar	150 kWh/m ³
in Gasflaschen bei 200 bar	550 kWh/m ³
in flüssigem Zustand bei -253 °C	2000 kWh/m ³
in Metallhydriden bei etwa 7 bar	1800 kWh/m ³

4. Kleinspeicher für die Endenergie

Die in den Abschnitten 2 und 3 behandelten Speicher dienen vorwiegend den Energielieferanten, wie Elektrizitäts- und Gasversorgungsunternehmen sowie Brennstoffimporteuren, um ihre zeitlichen Liefermöglichkeiten den Bedürfnissen der Abnehmer anzupassen. Meistens werden hierfür Grossspeicher für Primär- oder Sekundärenergie verwendet.

Andrerseits können aber auch die Endverbraucher mit Hilfe von Speichern ihren Energiebezug in der Art regeln, dass er vorwiegend oder ausschliesslich in die Zeiten fällt, in denen die Energiegewinnungs- und Transporteinrichtungen schwach belastet sind. Der Anreiz zu solchem Vorgehen wird durch günstige Schwachlasttarife für den elektrischen Strom und durch niedrigere Sommerpreise bei den Brennstoffen geweckt. Das Brennstofflager beim Verbraucher und in Zukunft vielleicht der kinetische Speicher in der Hausstation eines Grossbezügers wurden schon am Rande erwähnt.

Als typische Kleinspeicher für die Endenergie sind ausserdem noch zu nennen:

4.1 Warmwasserspeicher

Diese werden in Heiz- und Klimaanlage sowie bei der Warmwasserversorgung bereits in grosser Anzahl verwendet. Sie können nur für kurzzeitige Speicherung eingesetzt werden, meistens als Tagesspeicher. Die Energiedichte ist klein: Ungefähr 50 kWh/m³ bei einer Temperatursteigerung von 50 °C. Für Langzeitspeicherung würden ausserdem die heute verfügbaren Isolierstoffe nicht ausreichen.

4.2 Niedertemperatur-Latentspeicher

Sie sind in ihrer Wirkungsweise ähnlich den im Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Hochtemperatur-Wärmespeichern. Statt der Schmelzwärme eines Eutektikums nützen sie aber die Kristallisationswärme wässriger Salzlösungen. Sie können für verschiedene Umwandlungstemperaturen hergestellt werden, und man versucht in letzter Zeit, sie für Raumheizungs- und Warmwasserversorgungsanlagen zu verwenden.

Die Energiedichte ist höher als bei Warmwasserspeichern. Sie liegt in der Gegend von etwa 100 kWh/m³ bei einer eutektischen Temperatur von rund 50 °C.

4.3 Elektrochemische Speicher

Diese beruhen auf umkehrbaren chemischen Prozessen, die unter Aufnahme von elektrischer Energie ablaufen und bei ihrer Umkehrung wieder elektrischen Strom abgeben. Hierher gehören:

4.3.1 Akkumulatorenbatterien

In diesen findet beim Aufladen mit elektrischem Strom eine Umformung von Metallverbindungen – meist Bleiverbindungen – statt, die beim Entladen wieder rückgängig gemacht wird. Die erzielbare Energiedichte ist sehr verschieden, je nach Bauart, Verwendungszweck und vor allem je nach Entladezeit der Batterie, und liegt etwa zwischen 5 und 20 kWh/m³ bzw. 0,005 bis 0,03 kWh/kg. Speziell das hohe Gewicht der Bleiakumulatoren kann bei grossen Speicherkapazitäten hinderlich werden, weshalb man auch Akkumulatoren auf Eisen-Nickel-Basis baut.

Auch der Wirkungsgrad der Speicherung hängt stark von der Entladezeit ab. Gute Akkumulatoren können bei langsamer Entladung bis über 80 % der aufgewendeten Energie

zurückgeben. Bei rascher Entladung kann diese Zahl aber auch bis auf 10 % sinken.

4.3.2 Brennstoffzellen

Diese stellen eine H₂-Wirtschaft im Kleinen dar. Beim Aufladen wird in einem Elektrolyseur Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Beim Entladen werden die beiden Gase in der Brennstoffzelle wieder zu Wasser gelöst (ohne Verbrennung) und geben dabei wieder elektrischen Strom ab. In der sogenannten Drei-Elektroden-Speicherzelle kann die gleiche Apparatur für beide Arbeitsgänge verwendet werden.

Das Gewicht der Brennstoffzelle hängt nur von der gewünschten Entladeleistung ab und beträgt etwa 20 kg/kW. Die Speicherkapazität hingegen hängt von der Grösse der Gasbehälter ab. Siehe hierzu Abschnitt 3 über die Speicherung von Wasserstoff.

5. Energiegewinnung, -umwandlung und -speicherung

Die gesamte Energieversorgung basiert heute im wesentlichen auf den drei Primärenergien:

- hydraulische Energie, resultierend aus Niederschlag und topographischen Höhenunterschieden,
- Atomenergie, aus den nuklearen Spaltstoffen, und
- chemische Energie, aus der Verbrennungswärme fossiler Brennstoffe,

Fig. 2 zeigt den Ablauf der wichtigsten Umwandlungsprozesse von diesen Primärenergieformen bis zu den Nutzenergien, wie sie von den Verbrauchern benötigt werden. Die Kästen im Laufe der Energieflusslinien bezeichnen die nöti-

gen Einrichtungen zur Energieumformung und zum Transport. In jedem Kasten ist links ein Richtwert für den Wirkungsgrad angegeben, der mit der betreffenden Einrichtung heute erzielbar ist. Beim Atomreaktor fehlt diese Angabe, weil hierfür kein Wirkungsgrad im üblichen Sinn definiert werden kann. Die Zahl bei der thermischen Turbogruppe gilt deshalb für das ganze Kraftwerk.

Ferner ist zu beachten, dass auch die letzte Umwandlung aus Elektrizität in Nutzenergie, wie Licht, Kraft usw., mit Verlusten verbunden ist. Die entsprechenden Wirkungsgrade sind in der letzten Zeile vor den Bezeichnungen der Nutzenergieformen angegeben.

Die Fahnen, seitlich neben den Energieflusslinien, geben die heute schon verwendeten sowie die in absehbarer Zeit möglichen Energiespeicher an. Rechts in diesen Fahnen ist jeweils der ungefähre Speicherwirkungsgrad, das heisst das Verhältnis: entnommene Energie / gespeicherte Energie, vermerkt.

Durch Multiplikation der Wirkungsgrade der nacheinandergeschalteten Umwandlungs- und Transportprozesse kann der ungefähre Gesamtwirkungsgrad der Energienutzung von der Primärform bis zum Verbraucher errechnet werden. Wird die Energie zwischendurch auch noch gespeichert, so ist auch der entsprechende Speicherwirkungsgrad mit zu berücksichtigen.

Als allgemeine Richtlinie für den Einsatz von Energiespeichern muss gelten, dass Schwankungen im Energiefluss möglichst nahe an der Stelle ausgeglichen werden, an der sie entstehen. Das bedeutet konkret:

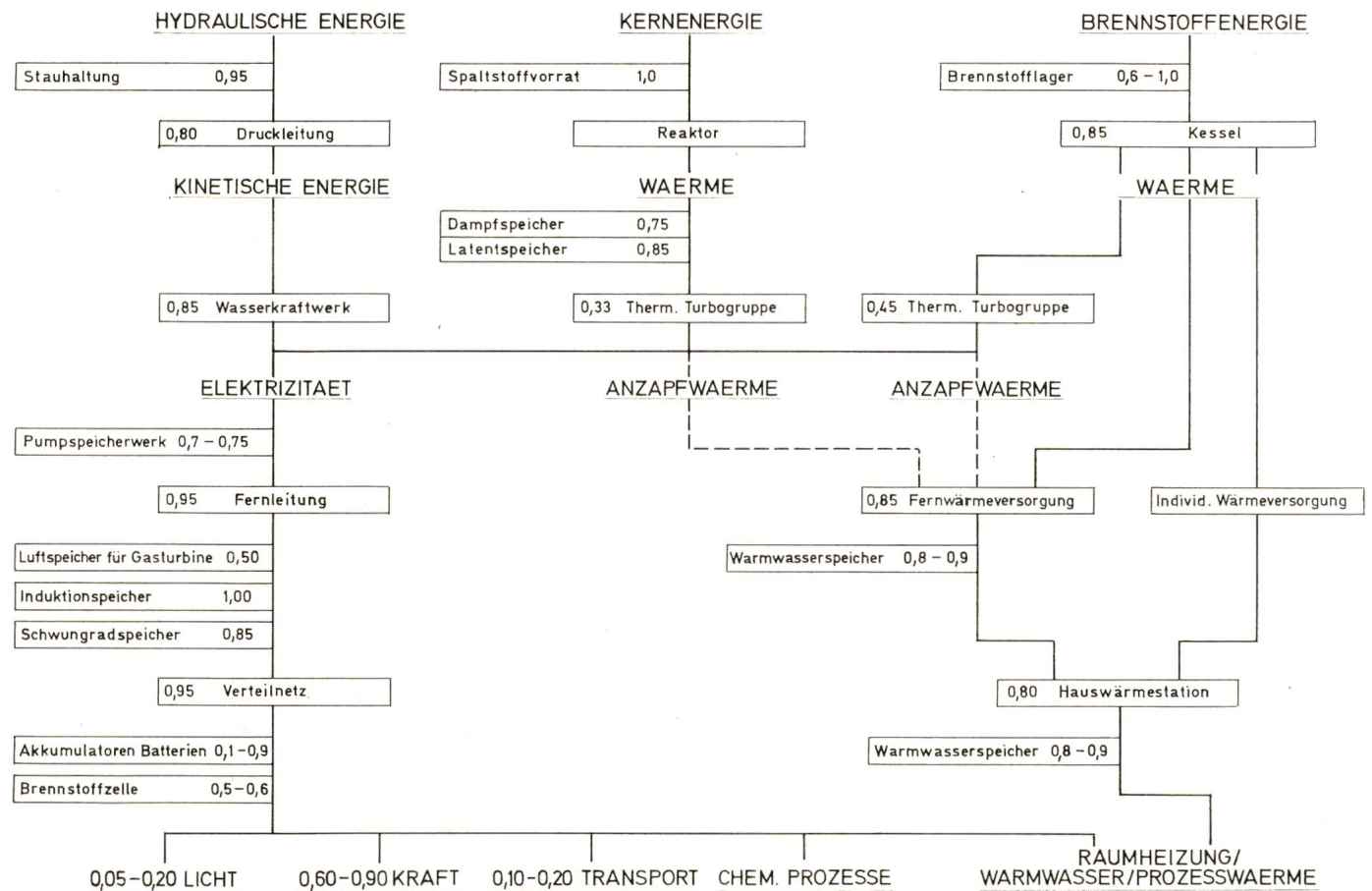


Fig. 2 Möglichkeiten und ungefähre Wirkungsgrade der Energiegewinnung, -umwandlung und -speicherung

– Schwankender und unzeitgemässer Anfall von Primärenergie soll am Gewinnungsort und möglichst in der ursprünglichen Energieform gespeichert werden.

Beispiele: Stauseen für die Speicherung des sommerlichen Schmelzwassers, Hochtemperatur-Wärmespeicher für Sonnenkraftwerke

– Schwankungen im Bedarf an Endenergie sollen am Verbrauchsort und wenn möglich auch in Form der Endenergie ausgeglichen werden.

Beispiele: Mit Nachtstrom geheizte Warmwasserspeicher, kinetische und rein elektrische Speicher in den Unterstationen oder bei den Endabnehmern.

Auf diese Art wird erreicht, dass die hochwertigen Elektrizitätserzeugungs- und Transportanlagen, wie Kernkraftwerke, die Wärmekraftanlagen von Sonnenkraftwerken, das elektrische Hauptverteilstromnetz usw., mit einer hohen Ausnutzungsziffer betrieben werden können.

Literatur

- [1] Eidgenössisches Amt für Wasserwirtschaft, Mitteilung Nr. 46, Bern 1972.
- [2] P. V. Gilli und G. Beckmann: Spitzenlastdeckung durch thermische Energiespeicher, VDI-Berichte 236.
- [3] W. Heinz: Energiespeicherung mit supraleitenden Magneten, «E und M», Jahrgang 90, Heft 9.
- [4] H. A. Peterson, R. W. Boom und W. C. Young: A Look at Superconductive Storage, Electrical World, March 1, 1975.

Adresse des Autors

G. A. Burkhard, Grossplatzstrasse 7a, 8122 Pfaffhausen.

Zur Bewertung der Wasserkräfte

Von A. Kroms

Man unterscheidet in der Energiewirtschaft zwei Arten von Primärenergiequellen:

- die durch Naturvorgänge laufend sich erneuernden Energiequellen;
- die gelagerten oder erschöpfbaren Energievorräte, deren Energiereserven bei ihrem Abbau allmählich versiegen.

Zur ersten Gruppe gehört zurzeit vorwiegend die Wasserkraft, wogegen die zweite Gruppe die fossilen und Kernbrennstoffe umfasst. Bei der energiewirtschaftlichen Beurteilung der Primärenergievorkommen und ihrer Nutzung muss man die unterschiedlichen Eigenschaften beider Primärenergiegruppen in Rechnung stellen. Zu diesem Zweck sind gewisse Grundsätze nötig, nach denen die beiden Energiequellen gleichwertig erfasst und ausgewertet werden können. Obwohl die beiden Gruppen der Energiequellen seit langem in der Energiebilanz gegenüber stehen, fehlen leider noch allgemein vereinbarte Richtlinien darüber, wie die beiden Primärenergieträger in die Energiebilanz eingesetzt werden müssen.

Nachstehend sind einige Probleme, die bei der Eingliederung der Wasserkraft in die Primärenergiebilanz und bei der Auswertung des Nutzungsgrades der Wasserkraftvorkommen entstehen, erörtert.

1. Probleme der Energiebilanzen

Die Energieversorgung setzt sich auf ihrem Wege von den Primärenergievorräten bis zu den Endverbrauchern der Energie aus einer Reihe nacheinandergeschalteter Vorgänge zusammen (Fig. 1). Längs dieser Kette wird die in der Natur vorhandene Primärenergie in einer oder in mehreren Stufen in andere Energiearten umgewandelt, welche zum Energietransport und zum Gebrauch geeignet sind. Man nennt dies Veredelung der Primärenergie, wobei die in diesen Prozessen erzeugten Energieformen als Sekundärenergien bezeichnet werden. Leider bestehen bezüglich verschiedener Ebenen der umgewandelten Energie keine bestimmte, überall anerkannte Definitionen und Bezeichnungen.

Ein typischer Veredelungsprozess, der eine immer grössere Bedeutung in der Energieversorgung erlangt, ist die Erzeugung elektrischer Energie. Da die Nutzung der Wasserkräfte fast ausschliesslich über diese Umwandlungsstufe führt, sind die

En économie énergétique, on distingue deux genres de sources d'énergie primaire:

- les sources énergétiques inépuisables qui se renouvellent constamment au gré des phénomènes naturels;
- les réserves énergétiques accumulées ou tarissables, dont le montant s'épuise progressivement.

Au premier groupe se rattachent essentiellement les forces hydrauliques, tandis que le second groupe comprend les matières fossiles et nucléaires. Pour apprécier la présence et l'utilisation des énergies primaires, il faut tenir compte des propriétés différentes des énergies primaires des deux groupes. Pour cela certains principes sont nécessaires, qui permettent une commune mesure et appréciation de ces deux sources énergétiques. Bien que de longue date toutes deux se côtoient, nous manquons encore généralement de directives conventionnelles permettant d'introduire les deux sources d'énergie primaire dans les bilans énergétiques.

Nous évoquons ci-dessous quelques-uns des problèmes que soulève l'inclusion des forces hydrauliques dans le bilan des énergies primaires et l'évaluation du degré d'utilisation des réserves hydrauliques.

weiteren Erörterungen mit der Erzeugung elektrischer Energie verknüpft.

Bei der Bewertung der Rolle einzelner Energieformen in der Energiebilanz können nur diejenigen Energiemengen unmittelbar verglichen werden, die sich in der gleichen Phase der Energieumwandlungskette befinden. Hierzu können entweder die Endstufe der Kette, das heisst die von den Verbrauchern verwertete End- oder Gebrauchenergie, die Mittelstufe der Sekundärenergien oder auch die Anfangsstufe der Versorgungskette, das heisst der Primärenergieaufwand, benutzt werden. Obwohl die Endstufe der Versorgungskette den tatsächlichen Energieeinsatz für die eigentlichen Gebrauchszwecke andeutet und dadurch die effektiven Energiebedürfnisse an den Verbrauchsorten zeigt, begegnet man hier Schwierigkeiten dadurch, dass die Bewertung der «genutzten» Energie eine Analyse zahlreicher Verbrauchsprozesse und die Kenntnis der entsprechenden Umwandlungsgrade voraussetzt. Dies ist