

Speicherung und Übertragung der sekundären Energie

Autor(en): **Taube, M.**

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): **70 (1979)**

Heft 13

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905392>

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.



Speicherung und Übertragung der sekundären Energie ¹⁾

Von M. Taube

620.9.004.4: 620.92;

Im Rahmen des gesamten Energieflusses werden die Möglichkeiten und Grenzen der Verschiebung in der Zeit (Speicherung) und im Raum (Übertragung) der sekundären Energie, d.h. der elektrischen, chemischen und thermischen Energie, untersucht und formuliert. Sie werden mit qualitativen Umwandlungen der sekundären Energie gekoppelt. Die Fülle der technologischen Möglichkeiten, das Spektrum der Randbedingungen und die zahlreichen techno-ökonomischen Parameter lassen erkennen, dass nur eine komplexe und nicht triviale Optimierung möglich ist.

En considérant l'ensemble du flux de l'énergie, les possibilités et les limites des décalages dans le temps (accumulation) et dans l'espace (transport) de l'énergie secondaire, c'est-à-dire électrique, chimique ou thermique, sont examinées et formulées. Ces décalages sont liés à des conversions qualitatives de cette énergie. Les multiples possibilités technologiques, l'éventail des conditions marginales et les nombreux paramètres techniques et économiques montrent que seule une optimisation complexe est possible.

1. Einleitung

Der Fluss der Energie in der Zivilisation ist in Fig. 1 vereinfacht dargestellt. Leider ist das Angebot der Natur nicht auf die Bedürfnisse des Produzenten und des Verbrauchers abgestimmt. Die Differenzen können in drei Gruppen unterteilt werden:

- Unterschiede in Qualität und Form zwischen der primären, sekundären und der Nutzenergie,
- Unterschiede der zeitlichen Verteilung von Angebot und Bedarf,
- Unterschiede in der Raumverteilung: Distanz zwischen Quellen, Produzenten und Verbrauchern.

Die Tabelle I illustriert kurz diese Probleme. Der Aufsatz möchte mögliche Methoden aufzeigen, wie die Diskrepanzen zwischen dem Angebot der Natur und den Wünschen der Produzenten und Verbraucher weitgehend ausgeglichen werden können.

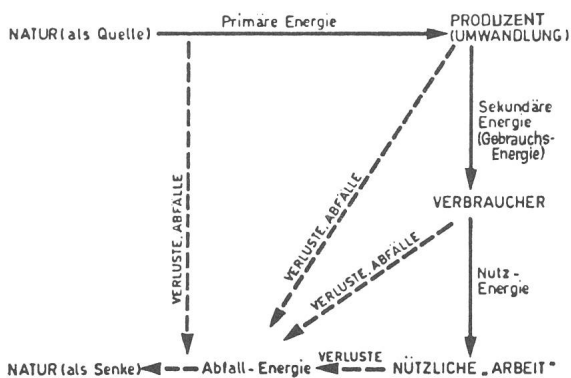


Fig. 1 Energieflussdiagramm

2. Energieträger in der Natur

Die Natur schenkt der Menschheit die freie Energie in verschiedenen Formen und Qualitäten sowie zu verschiedenen Zeiten. Diese primären Energieformen können wie folgt gegliedert werden.

1. Die nukleare Energie hat zwei Energieträger: Atomkerne der leichten Elemente und Atomkerne der sehr schweren Elemente. Zu den ersten gehört insbesondere ein Isotop des Wasserstoffs, Deuterium, sowie das künstlich erzeugte Wasserstoffisotop Tritium. Deuterium ist wahrscheinlich ein Geschenk aus den Zeiten des Urknalls, also der Schöpfung des Universums vor etwa 15 Milliarden Jahren. Seine grosse Stabilität, d.h. sehr grosse Lebensdauer, erlaubt es, enorme Mengen Energie von etwa 100000 GJ/kg²⁾ bis in unsere Zeit zu übertragen und sehr effektiv zu speichern.

Zu den schweren Trägern der nuklearen Energie gehört der Atomkern des Urans, in weiterem Sinne auch Thorium. Diese beiden stellen ein Geschenk einer Explosion eines grossen Sterns, einer sog. Supernova, dar. Wahrscheinlich haben uns vor etwa 4,7 Mia Jahren in etwa 60 Lichtjahren Entfernung zwei nacheinander explodierende Supernovae das Uran und das Thorium geliefert. Zwar sind diese Elemente nicht sehr stabil, aber ihre Lebensdauer liegt in der Grössenordnung von Milliarden Jahren. So haben diese Energieträger die freigesetzte Energie der Supernova bis in unsere Zeit sehr effektiv gespeichert und auf unsere Erdkruste übertragen. Ihre Energiedichte beträgt etwa 50000 GJ/kg.

¹⁾ Überarbeitete Fassung des Vortrages vom 26. Februar 1979 im Rahmen des Weiterbildungskurses der SIA-Fachgruppe der Ingenieure der Industrie, Sektionsgruppe Zürich.

²⁾ 1 GJ = 278 kWh.

	Angebot der Natur Primäre Energie		Diskrepanz zwischen primärer und sekundärer Energie	Bedürfnisse des Produzenten Sekundäre Energie	Diskrepanz zwischen sekundärer und Nutzenergie	Bedürfnisse des Verbrauchers Nutzenergie
Energieverteilung zeitlich	Energiefluss meistens nicht konti- nuierlich:	gespeichert: Kohle Öl Gas Holz Uran		immer und gleichmässig produzieren keine Schwankungen falls doch, nur mit Vorbereitung		Menge und Zeitpunkt beliebig beliebige Schwankungen keine Vorbestellung, auf Abruf
Energieverteilung räumlich	sehr unregelmässig nach: - Regionen - Klima, Höhe - in Wasser, Luft oder in der Erde			zentral in einer Anlage so nah wie möglich am Verbraucher und räumlich gleichmässig		dezentral weit vom «schmutzigen» Produzenten ungleichmässig verteilt
Formen und Qualität der Energie	sehr verschiedene: - gasförmig - flüssig - fest		Diskrepanz zwischen primärer und sekundärer Energie	wenige und einheitliche Formen	Diskrepanz zwischen sekundärer und Nutzenergie	viele verschiedene Formen, aber ausschliesslich elektro- magnetische Energie und einfache Umwandler
	- nukleare - elektro- magnetisch - schwache - Gravitation					

2. Die elektromagnetische Energie erhalten wir in Form von Sonnenlicht (Photonen). In der Mitte der Sonne laufen seit ca. 4,5 Mia Jahren nukleare Energieprozesse ab, welche einen enormen Fluss an Sonnenenergie erzeugen. Vor etwa 300 Mio Jahren wurde ein grosser Teil dieser Sonnenenergie auf der Erde in langlebige Energie-Konserven umgewandelt, gespeichert und in verschiedene geologische Formationen übertragen: Erdöl, Kohle und Erdgas. Alle diese Träger chemischer, also elektromagnetischer Energie, beinhalten ca. 0,04 GJ/kg.

Dieselbe Sonnenenergie erzeugt auch kurzlebige, nicht vernachlässigbare Mengen von konservierter chemischer Energie:

Holz und andere Produkte der Biosphäre. Der Energieinhalt entspricht ca. 0,01 GJ/kg, was nur beschränkte Speicherung und Übertragung dieser Form der Energie ermöglicht.

Die grösste und wichtigste Form der freien Energie auf unserem Planeten war, ist und wird immer die Sonne sein. Die masselosen Photonen, als eine Form elektromagnetischer Energie, übertragen die Energie der nuklearen Prozesse im Sonnenzentrum zu uns. Der mittlere Wert dieser Sonnenenergie entspricht etwa 5 GJ/m² pro Jahr. Diese Form der Energie ist nicht direkt speicherbar und praktisch nicht transportierbar.

Elementare Kräfte und primäre Energien (in Klammern: globaler Energiefluss in TW)

Tabelle II

		Elementare Kräfte							
		nukleare	elektromagnetische				schwache nukleare	Gravitation	
			chemisch	biologisch	Licht	thermisch mechanisch			
Spezifischer Energieinhalt J/kg		~ 10 ¹³	~ 10 ⁷	~ 10 ⁷	~ 10 ⁸ kmol Photonen	~ 10 ⁵	~ 10 ¹²	~ 10 ³	
Energie aus der Natur	Fluss der Energie	—	—	Biosphäre: Algen, Krill, Bäume, Rohr- zucker	← Sonnen- licht (122000) ↓	→ Wind → Wasser → Ozean- wärme geotherm. Wärme (32)	← Zerfall	Gezeiten (3)	
	gespeicherte Energie	vor 10–50 Jahren	—	Holz	←	←	—	—	—
		vor ~ 1 Mio Jahren	—	Lignit	← Biosphäre	← Sonnen- licht	—	—	—
		vor 300 Mio Jahren	—	Gas, Öl, Kohle	←	←	—	—	—
		vor ~ 5 Mia Jahren: Supernovae	Uran, Thorium	—	←	←	—	—	—
vor 15 Mia Jahren: Urknall	Deuterium	—	←	←	—	—	—		

Es besteht kein Zweifel, dass neben dem Hauptproblem, der Umwandlung des Sonnenenergieflusses in andere Formen brauchbarer Energie, die Lösung der Probleme der Speicherbarkeit und Transportierbarkeit von höchster Wichtigkeit für die Zivilisation ist. Ohne Zutun der Menschheit wird die Sonnenenergie auf der Erde in verschiedene Formen mechanischer Energie umgewandelt: in Wind-, Wellen- und Hydroenergie. Nur die letzte Form ist eine in der Atmosphäre spontan gespeicherte Sonnenenergie. Ihr Energieinhalt entspricht aber nur etwa 10^{-6} GJ/kg.

3. Die sog. schwache nukleare Energie kann man in den Prozessen des radioaktiven Zerfalls der instabilen Atomkerne beobachten. Auf der Erde ist diese Form der Energie für die geothermische Energie verantwortlich, als Folge des langsamen radioaktiven Zerfalles von Kalium, Thorium und Uran. Die geothermische Wärme ist in der ganzen Erdkruste verteilt und entspricht einer Energiedichte von etwa 0,001 GJ/kg. Sie ist von der Natur selber sehr gut gespeichert. Leider muss ihre Übertragungsfähigkeit sehr niedrig eingestuft werden.

4. Die Gravitation, die schwächste aller elementaren Kräfte, ist als freie Energie nur in Form von Gezeiten zugänglich. Diese Energieform ist wenig intensiv und erscheint in nicht-speicherbarer Form. Die Fähigkeit zur Übertragung ist sehr gering.

In Tabelle II werden die Formen der elementaren Energie verglichen, welche auf der Erde von praktischem Interesse sind.

3. Vom Menschen genutzte Energieformen

Selbstverständlich war und bleibt die wichtigste Form der Energie für den Menschen die chemische Energie, welche in der Nahrung steckt. Der Mensch braucht aber auch andere Formen der Energie. Die wichtigsten seien aufgezählt:

1. Thermische Energie zur Erzeugung eines Ersatzes für das «verlorene Eden» mit seinem subtropischen Klima: warme

Luft und warmes Wasser. Der Mensch braucht enorme Mengen Energie, um dieses subtropische Mikroklima herzustellen.

2. Thermische Energie für die thermische Bearbeitung der Nahrung: kochen, braten usw.

3. Strahlungsenergie, Licht, um in seinen künstlichen Höhlen das Dunkel der Nacht zu vertreiben.

4. Mechanische Energie, um Muskelkraft zu sparen bzw. sie vielfach zu vermehren.

5. Mechanische Energie, um seine Bewegungsarbeit zu verkleinern und um die Geschwindigkeit signifikant zu vergrößern.

6. Elektrische Energie, um seine Geräte im Informationsbereich zu betreiben.

Alle diese Formen der Energie, welche der Mensch direkt nutzt, gehören zur elektromagnetischen Energie. In Tabelle III sind sie, mit Ausnahme der Nahrung, zusammengestellt.

Die Differenz zwischen der Qualität der primären Energie, welche die Natur zur Verfügung stellt, und der Nutzenergie für den Menschen ist evident. Daneben gibt es auch andere signifikante Unterschiede zwischen der primären und der Nutzenergie.

4. Die zeitliche und räumliche Diskrepanz zwischen primärer, sekundärer und nutzbarer Energie

Die primäre Energie findet man in der Natur verstreut, oft weit vom potentiellen Verbraucher der Nutzenergie, ferner zu einer Zeit, welche dem momentanen Verbrauch der Energie nicht entspricht, und in einer Form und Qualität, die nicht den Bedürfnissen des Verbrauchers entspricht. Fig. 2 zeigt in sehr vereinfachter Form die drei prinzipiellen Diskrepanzen zwischen sekundärer und nutzbarer Energie: Qualitätsdiskrepanz; Zeitverschiebung und Raumverschiebung.

Tabelle IV enthält einen Versuch, die Problematik der Zeit- und Raumverschiebung zwischen den verschiedenen Arten der

Möglichkeiten der Umwandlung der sekundären Energie in Nutzenergie

Tabelle III

		Sekundäre Energie (Gebrauchsenergie)						
		nukleare	elektromagnetische				schwache nukleare	Gravitation
			elektrische	chemische	Licht	thermische		
Nutzenergie nur in Form elektromagnetischer Kraft	Informatik	—	Speisung	—	—	—	—	—
	Arbeit, stationär	—	Elektromotor	Verbrennmotor, stationär	—	—	—	—
	Arbeit, Verkehrsmittel	—	Akkumulator	Verbrennmotor	—	—	—	—
	Licht	—	Glühbirne	Öl-, Gaslampe	—	—	—	—
	Wärme, hohe Temperatur	—	Elektroofen (Herd)	Öl-, Gasofen	Sonnenofen	—	—	—
	Wärme, mittlere Temperatur	—	elektr. Heizung	Öl-, Gasheizung	—	Fernheizung	—	—
	Wärme, niedrige Temperatur	—	elektr. Heizung	Öl-, Gasheizung	Sonnenkollektor	—	—	—
	Kälte	—	mech. Kälteanlage	Öl, Gas, Absorptionsanlage	—	—	—	—

Energie einfach darzustellen. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass die Nutzenergie, wenn überhaupt, nur schlecht gespeichert und übertragen werden kann. Diese Funktionen sind von der sekundären Energie zu tragen. Die hohe Aufgabe, die sekundäre Energie dem Verbraucher im richtigen Moment und am richtigen Ort zur Verfügung zu stellen, ist die Kunst der Energiespeicherung und der Energieübertragung.

Der Verbraucher wünscht, die für ihn nutzbare Energie zu beliebiger Zeit an irgendeinem Ort zu beziehen. Er will sich oft kaum bewegen, um die Energiequelle zu erreichen, er will oft nicht warten, bis seine Energiequelle auf «vollen Touren» läuft. «Hier und jetzt» ist die Devise des Energieverbrauchers; zusätzlich verlangt er auch noch die richtige Form der Energie.

Der Produzent sekundärer Energie hat bei weitem nicht das gleiche Interesse. Er will gleichmässig über längere Zeit und wenn möglich in zentraler Lage für ihn wirtschaftlich günstige Energie erzeugen. Der Konflikt zwischen den beiden ungleichen Interessen ist offensichtlich.

5. Umwandlung, Speicherung und Übertragung verschiedener Formen der Energie

Aus Tabelle IV ist ersichtlich, dass die beste Eignung für Zeit- und Raumverschiebung diejenigen Formen der primären Energie haben, welche dem Verbraucher nicht zugänglich sind, wie z. B. die nuklearen Energieträger. Die sekundäre Energie muss deshalb die Rolle des Vermittlers zwischen verschiedenen Formen, Zeit- und Raumverteilung der primären Energie und der Nachfrage der Nutzenergie übernehmen.

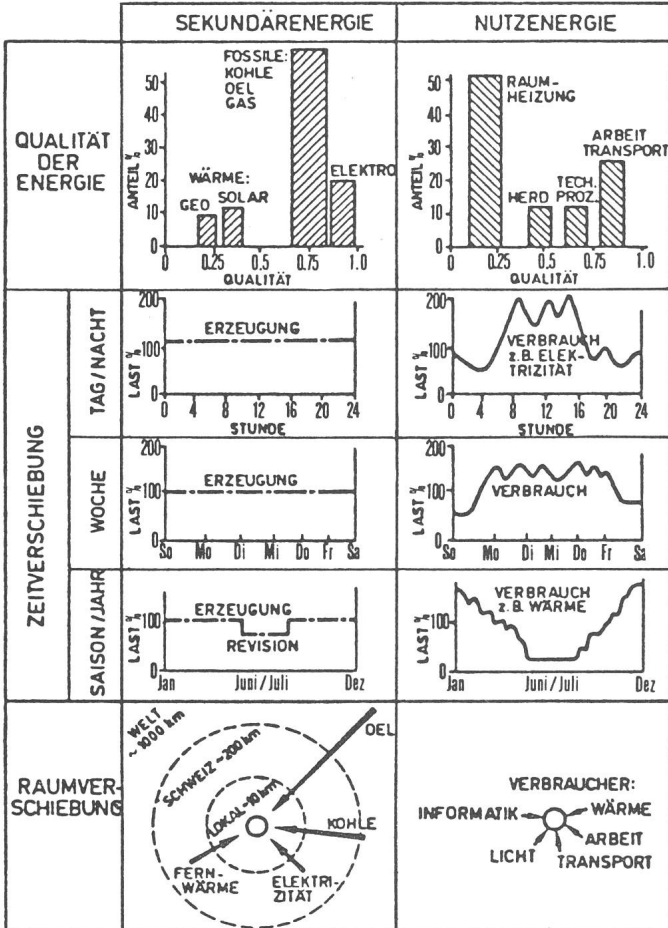


Fig. 2 Gegenüberstellung der Eigenschaften von sekundärer und Nutzenergie

Eignung der Energiearten für die Verschiebung in Raum und in Zeit

Tabelle IV

Primäre Energie	Zeitverschiebung: Speicherbarkeit			
	keine	genügende	gute	sehr gute
Raumverschiebung, Transportfähigkeit	keine	elektromagn. Sonnenlicht	thermische $T < 100\text{ °C}$ (geothermische)	Gravitation Gezeiten
	genügende	—	—	chemische feste (Kohle)
	gute	—	chemische gasförmige (Erdgas)	chemische flüssige (Öl)
	sehr gute	—	—	nukleare Deuterium Thorium Uran

Sekundäre Energie	Zeitverschiebung: Speicherbarkeit			
	keine	genügende	gute	sehr gute
Raumverschiebung	keine	—	latente thermische	thermochemische
	genügende	—	thermische $T > 100\text{ °C}$	—
	gute	elektrische Strom	—	chemische feste
	sehr gute	—	chemische gasförmig	chemische flüssig

Nutzenergie	Zeitverschiebung: Speicherbarkeit			
	keine	genügende	gute	sehr gute
Raumverschiebung	keine	Licht, mech. Arbeit, Wärme, $T \approx 300\text{ °C}$ Informatik	—	—
	genügende	—	thermische (Raumheizung) $T \approx 100\text{ °C}$	—
	gute	—	—	—
	sehr gute	—	—	—

Leider ist aus technologischen, wirtschaftlichen wie auch geschichtlichen Gründen die Sekundärenergie in vielen Fällen gar nicht so einfach zu speichern oder zu übertragen. Die verschiedenen Formen der sekundären Energie unterscheiden sich in dieser Hinsicht wesentlich. Tabelle V gibt hierzu eine Übersicht. Die Lösung dieser Problematik liegt in der optimalen Kopplung aller drei Verschiebungen in Raum, Zeit und Form. Wie die weitere Analyse zeigt, handelt es sich dabei um eine sehr komplexe Aufgabe mit sehr vielen Parametern.

Fig. 3 gibt ein einfaches Schema für die am meisten gebrauchten und derzeit hoffnungsvollsten Methoden der Um-

		Speicherbarkeit			
		keine	genügende	gute	sehr gute
Eignung zur Übertragung	keine	mechanische Arbeit *) Licht *) sensible thermische Energie $T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$	latente thermische Energie $T < 100 \text{ }^\circ\text{C}$	thermochemische Energie $T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$	
	genügende		thermische Energie $T \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$	elektrochemische Energie (Akkumulatoren)	
	gute	elektrischer Strom		thermochemische Energie fest (Kohle **)	chemische Energie fest (Kohle **)
	sehr gute		chemische Energie gasförmig (Erdgas **) synthetischer Wasserstoff		chemische Energie flüssig (Erdöl **) synthetische Kohlenwasserstoffe

*) Nur als Nutzenergie; keine sekundäre Energie.
**) Natürliche fossile Brennstoffe: Kohle, Öl, Gas, aber wahrscheinlich an der Ausschöpfungsgrenze.

wandlung der Energie mit dem Ziel, die Eignung zur Speicherung bzw. zum Transport wesentlich zu verbessern. Einschränkend sei festgehalten, dass Methoden, welche die Umwandlung vorhandener Träger der chemischen Energie in andere Formen chemischer Energie betreffen, nicht diskutiert werden.

Anhand eines umfassenden Beispiels soll die Umwandlung sekundärer Energie aus chemischen oder aus nuklearen Brennstoffen in verschiedene Formen der sekundären Energie illustriert werden, welche zum Verbraucher transportiert und dazwischen auch gespeichert wird (Fig. 4).

6. Speicher- und Übertragungsmethoden

Eine der Schwierigkeiten in der Betrachtung der Problematik der Speicherung und des Transportes der sekundären Energie ist die Vielfalt der vorgeschlagenen, schon entwickelten wie auch schon im Grossen eingeführten Technologien. Vergleiche werden oft durch unvollständige Darstellungen der Technologien erschwert. Trotzdem soll versucht werden, die wichtigsten Eigenschaften der entsprechenden Anlagen zusammenzufassen und nach Möglichkeit auf einen allgemeinen Nenner zu bringen.

Tabelle VI gibt eine Übersicht über die wichtigsten Speichertechnologien. Die Reihenfolge entspricht der abnehmenden Qualität, d.h. dem Entropiezuwachs. Sie fängt mit der elektrischen Energie an und führt über chemische zu thermischen Energieformen.

Analog gibt Tabelle VII eine Übersicht über die wichtigsten Transporttechnologien.

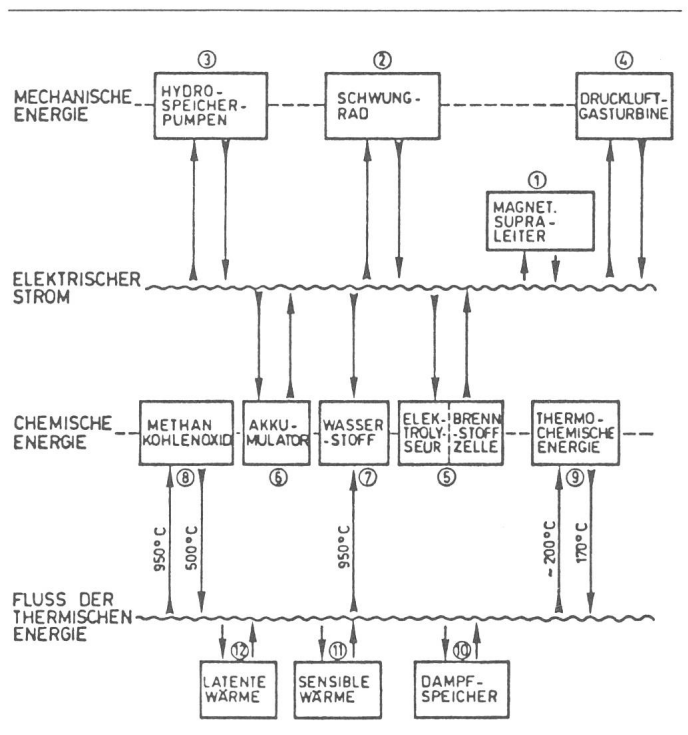


Fig. 3 Umwandlung der sekundären Energie für Speicherung und Übertragung
Die Nummern beziehen sich auf Zeilen in Tabelle VI

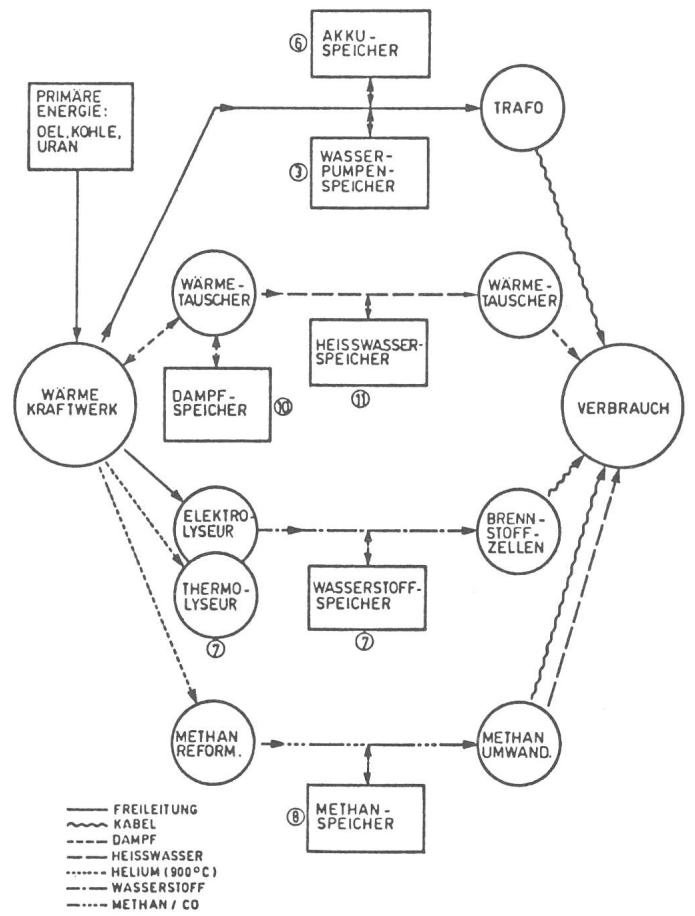


Fig. 4 Beispiel von Speicherung und Transport der sekundären Energie
Nummernangaben entsprechen Fig. 3 und Tabelle VI

7. Relative Kosten der Speicherung und der Übertragung

Die verfügbaren, auch die in der Literatur zu findenden Angaben über die Kapital- und die Betriebskosten der gespeicherten sowie der übertragenen Energie streuen sehr stark, da sie von vielen Parametern, insbesondere auch von den örtlichen Verhältnissen abhängen. Immerhin lassen sich die relativen Kosten etwa nach Fig. 5 in logarithmischer Darstellung einreihen.

8. Folgerungen

1. Die Speicherungstechnologie und die Übertragungstechnologie sind sehr komplexe Probleme, bei denen viele Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Die spezifischen Gegebenheiten, im Raum und in der Zeit, spielen eine entscheidende Rolle.

2. Die beste Form der sekundären Energie, vom Standpunkt der Speicherung und der Übertragung, ist die chemische Energie, z.B. gasförmige (Wasserstoff) oder, noch besser, flüssige

Kohlenwasserstoffe. Die Vorteile dieser Energieträger sind um so ausgeprägter, als z.B. die Kohlenwasserstoffe auch in der Natur noch zu finden sind, d.h. in Form von gespeicherter primärer Energie.

3. Die neuen Quellen der primären Energie, wie z.B. Sonnenenergie, Windenergie, Gezeitenenergie, sind nur mit grossem Aufwand in eine Form der sekundären Energie umzuwandeln, welche sich für Speicherung und Übertragung gut eignet.

4. Die sekundäre Energie mit höchster Qualität, die elektrische Energie (auch aus nuklearer primärer Energie), ist für Speicherung relativ schlecht geeignet.

5. Die Optimierung der gesamten Energiewirtschaft ist zum guten Teil von der Verbesserung der Effizienz der Speicherung und Übertragung abhängig.

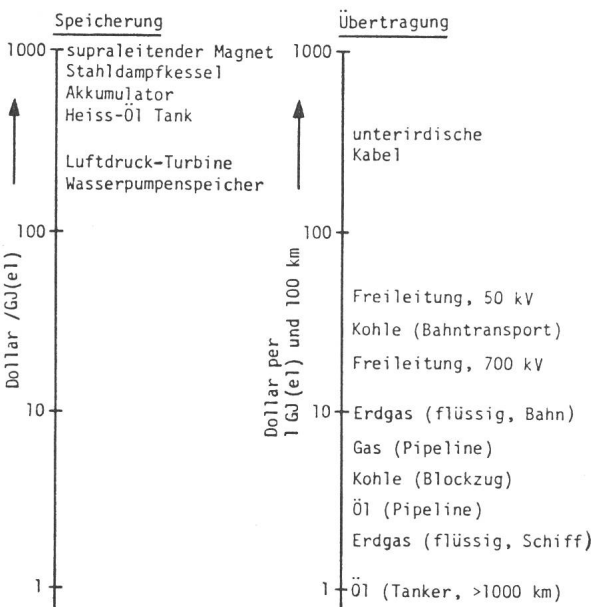
6. Nur ein breites Spektrum verschiedener Technologien auf dem Gebiet der Energiespeicherung und Energieübertragung kann eine signifikante Verbesserung der Energiewirtschaft mit sich bringen.

Zusammenstellung der Technologien der Energiespeicherung

Tabelle VI

Nr. in Fig. 3	Art der Umwandlung		Anlage und deren wirtschaftliche Grösse MW(el) oder MWh(el)	Kosten 1978 \$/kW \$/kWh	Stand der Technik	Wirkungsgrad % Lebensdauer; Jahre	spezifische Eigenschaften		
	Input Output	Im Speicher					unter- bzw. oberirdisch	Geologie, Geographie, Parameter	Druck (bar) Temperatur
1	elektrisch	magnetisch	supraleitendes Magnet 10000 MWh	50...60	Forschung	< 70	ober	kein	kein
	elektrisch			30...140		< 25			—
2	elektrisch	mechanisch	Schwungrad 10-50 MWh	65...75	Forschung	> 70	ober	kein	kein
	elektrisch			100...300		25			—
3	elektrisch	mechanisch Gravitation	Wasserspeicherungspumpen 200-2000 MW	90...160	Gross- maßstab	< 70	ober	Wasser- becken: $\Delta H \geq 100$ m	kein
	elektrisch			2...12		< 50			—
4	elektrisch	mechanisch + chemisch	Druckluft 200-1000 MW	100...210	Gross- maßstab	< 25	unter	grosse, dichte Kaverne	60
	elektrisch			4...30		< 25			—
5	elektrisch	chemisch	Elektrolyseur und Brennstoff- zelle		Entwicklung	50	unter	keine	40
	elektrisch					≈ 10			$T \approx 600$ °C
6	elektrisch	chemisch	Zukünftiger Akkumulator 20-50 MWh	60...70	Entwicklung	< 80	ober	keine	kein
	elektrisch			20...60		< 20			≈ 400 °C
7	elektrisch	chemisch	Wasserstoff- speicher 20-50 MW	500...900	Forschung	< 50	ober	keine	keine
	chemisch			6...15		< 20			unter
8	thermisch	chemisch	Synthese-, Gas- Methanspeicher		Entwicklung	< 90			70
	thermisch					< 30			—
9	thermisch	chemisch	thermo- chemischer Speicher < 800 MWh		Forschung	< 85	ober	keine	< 10
	thermisch					< 30			—
10	thermisch	thermisch + Druck	Dampfspeicher 50-200 MW	150...250	Industrie- Maßstab	< 75	ober	Gusseisen	< 40
	thermisch			30...70		25			unter
11	thermisch	sensible Wärme	Heisswasser, heisser Sand		Entwicklung	< 90	ober	tiefe Kaverne	10
	thermisch					< 90			< 180 °C
12	thermisch	Latent- wärme	Salzschmelze- speicher < 500 MWh		Forschung	< 90	unter		kein
	thermisch					< 25			≈ 300 °C

Nr. in Fig. 3	Art der Umwandlung		Anlage	Stand der Technik	Wirkungsgrad %	spezifische Eigenschaften		
	Input Output	Transportform				unter- bzw. oberirdisch	Geologie, Geographie, Parameter	Druck (bar)
0	elektrisch elektrisch	elektrischer Strom	Elektrische Freileitung	Gross- maßstab	90	oberirdisch	keine	kein
0	elektrisch elektrisch	elektrischer Strom	Elektrische Kabelleitung	Gross- maßstab	95	unterirdisch	keine	Öl oder SF ₆ unter Druck
0	elektrisch elektrisch	elektrischer Strom	Elektrische Leitung Kabel, Supraleiter	Forschung	95	unterirdisch	keine	Helium- kühlung
5	elektrisch elektrisch	chemisch	Elektrolyzer und Brennstoffzelle	Entwicklung	≈ 50	unterirdisch	keine	
6	elektrisch elektrisch	elektrisch- chemische Anlage	Hochtemperatur- Akkumulator	Entwicklung	< 70	für Ver- kehrsmittel	keine	kein
7	elektrisch chemisch	chemisch	Wasserstoff- Rohrleitung	Klein- maßstab	≈ 97	unterirdisch	keine	< 50
8	thermisch thermisch	chemisch	Synth.-Gas-Methan- Rohrleitung	Entwicklung	≈ 90	unterirdisch	keine	< 70
9	thermisch thermisch	chemisch	Thermochemische in Waggons	Forschung	≈ 85	Eisenbahn- waggon	Eisenbahn- linien	< 10
10	thermisch thermisch	sensible Wärme	Heisswasserrohrleitung (geschlossen)	Gross- maßstab	≈ 90	unterirdisch	keine	< 10
11	thermisch thermisch	sensible Wärme	Warmwasserrohrleitung (offen)	Entwicklung	≈ 90	unterirdisch	keine	kein
12	thermisch thermisch	latente Wärme	Salzschmelze Rohrleitung (geschlossen)	Forschung	≈ 90	unterirdisch	keine	kein



Literatur

- [1] P.H. Abelson: Energy: Use, conservation and supply. Washington, American Association for the Advancement of Science, 1974.
- [2] Speichersysteme für Sekundärenergie. Vorträge der VDI-Tagung, Stuttgart, 2...3 Oktober 1974. VDI-Bericht No. 223. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1974.
- [3] J.B. Berkowitz and H.P. Silverman: Energy Storage. Proceedings of the Symposium on Energy Storage. Princeton, New Jersey, The Electrochemical Society, 1976.
- [4] N. Getoff: Wasserstoff als Energieträger. Herstellung, Lagerung, Transport. Wien/New York, Springer Verlag, 1977.
- [5] Das Schweizerische Energiekonzept, Schlussbericht Bd. I/II. Herausgegeben von der Eidgenössischen Kommission für die Gesamtenergiekonzeption. Bern, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, 1978.
- [6] M. Taube: Das Projekt Salamo. Vorschlag zur Optimierung der Wärmenutzung mittels thermochemischen Anlagen. NZZ-Beilage Forschung und Technik vom 8. Februar 1978.
- [7] M. Taube a.o.: Thermochemical system for the management of heat from LWR's and other sources. Proceedings of the American Nuclear Society, Summer Meeting, San Diego, 1978.
- [8] W. Seifritz a.o.: Second world hydrogen conference, Zürich, august 1978. Advances in Hydrogen Energy 2(1978).
- [9] A.L. Hammond, W.D. Metz and T.H. Maugh: Energy and the future. Washington, American Association for the Advancement of Science, 1973.
- [10] Criteria for energy storage r & d. A report by the Committee on Advanced Energy Storage Systems. Washington, National Academy of Science, 1976.
- [11] Investigation of storage systems. Final report vol. II. Columbus/Ohio, Battelle Columbus Laboratory, 1967. NASA CR-147593.
- [12] E.K. Cox and K.D. Williams: Hydrogen. Vol. 1/5. Cleveland/Ohio, CRC Press, 1977.
- [13] W. Fischer: Die Natrium-Schwefel-Batterie. Schweiz. Ing. Arch. 97(1979)5, S. 61...64.
- [14] W. Hausz, B.J. Berkowitz and R.C. Hare: Conceptual design of thermal energy storage systems for near term electric utility applications. Vol. I/II. Washington, U.S. Department of Energy, 1978.
- [15] Future energy concepts. International conference, January 30th to February 1st, 1979. Savoy Place, London. IEE Conference Publication Vol. 171, 1979.

Fig. 5 Kosten der Speicherung bzw. der Übertragung auf 100 km Distanz von 1 GJ (el)

Adresse des Autors

Ass. Prof. Dr. M. Taube, Eidg. Institut für Reaktorforschung, 5303 Würenlingen.