

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 92 (1974)
Heft: 17: SIA-Heft, Nr. 4/1974: Mensch und Technik

Artikel: Einwirkungen der Energieerzeugung auf die Umwelt, Betrachtungen zur Gesamtenergiekonzeption
Autor: Hohl, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-72339>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.04.2025

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

stoff in Methanol (Methylalkohol) umzusetzen, um einen flüssigen Brennstoff zu erhalten.

In einer weltweiten, auf Wasserstoff beruhenden Energie-wirtschaft dürfte eine auf lange Sicht gesehen gute Lösung der sich anbahnenden Krise liegen, die insbesondere die jüngere Ingenieurgeneration begeistern könnte. Die unmittelbare Zukunft sieht allerdings düsterer aus. Wir haben uns schwer verrechnet und daher versäumt, die Energietechnik der Zukunft vorzubereiten. Jetzt muss der Mensch vermutlich für etwa zehn Jahre den Konsum bremsen und grosse Kapitalien investieren. Hier stossen wir auf die erste Schwierigkeit: die Inflation. Bei einem Zinsfuss von 10% ist es unmöglich, mit geliehenem Kapital Anlagen zu bauen, die erst in 6 bis 8 Jahren einen Gewinn abwerfen werden. Die grösste Triebkraft des freien Wirtschaftssystems, in dem Unternehmer mit Fremdkapitalien arbeiten, geht dabei verloren. Selbst das Kapital der grossen Unternehmen wird wahrscheinlich für die gewaltigen Aufgaben nicht ausreichen. Der Staat muss eingreifen und das Kapital aus Steuern aufbringen.

Schlusswort

Eine weitere und wahrscheinlich noch grössere Schwierigkeit ist, dass die Völker in den freien Wirtschaftsländern, die sich an den stetig wachsenden Privatkonsum gewöhnt haben, die nötigen Einschränkungen nicht leicht hinnehmen werden. In England wütet bereits der Klassenkampf, und es ist kaum anzunehmen, dass andere Länder davon ganz verschont bleiben werden. Die Ölkrise wird wahrscheinlich auch von extremistischen Gruppen dazu benutzt, Unruhe zu stiften. Wir müssen leider erwarten, dass die technischen Vorbereitungen für die achtziger Jahre durch die von ihnen ausgelöste Zwietracht stark verzögert werden.

Der Techniker, den man viel zu lange nicht befragt hat, kann zum sozialen Frieden beitragen, wenn er dem Volk den Weg zum Wiederaufstieg klar und sachlich darstellt.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Dennis Gabor, Nobelpreisträger für Physik, Imperial College of Science and Technology.

Einwirkungen der Energieerzeugung auf die Umwelt, Betrachtungen zur Gesamtenergiekonzeption

Von R. Hohl, Baden

DK 620.9

Grenzen des Wachstums, Umweltschutz, Ölkrise, Gesamtenergiekonzeption, Abwärme der Kernkraftwerke sind Schlagworte, die seit einiger Zeit durch unseren Blätterwald rauschen. Je weniger Kompetenz vorhanden ist, desto lauter tönt es. Die schweigende Mehrheit ihrerseits nimmt den Disput mit wachsendem Interesse zur Kenntnis, hofft jedoch, dass die aufgeworfenen Probleme ihren lieb gewordenen Lebensrhythmus so wenig

wie möglich tangieren möchten. Das Energieproblem ist aber ein echtes Problem unserer Gesellschaft geworden. Zum jetzigen Zeitpunkt sind die Weichen so zu stellen, dass die künftigen Generationen bessere Voraussetzungen bekommen. Im folgenden wird versucht, etwas Ordnung in das Energiedickicht zu bringen und einige Grundsätze herzuleiten, die mögliche Wege für Verbesserungen öffnen sollten.

Gesamtenergieverbrauch der Schweiz

Es sei mit der Definition einiger Begriffe begonnen:

– *Primärenergie* oder Rohenergie ist die Energieform, wie sie die Natur zur Verfügung stellt. Beispiele: Erdöl, Erdgas, Kohle, Spaltstoff, Wasserkraft, Sonneneinstrahlung.

– *Sekundärenergie* ist die Form, wie sie nach Veredlungsprozessen aus der Rohenergie dem Verbraucher zugeführt wird. Beispiele: Heizöle und Treibstoffe aus Erdöl; Gas und Koks aus Kohle; Elektrizität aus Wasserkraft oder Kernenergie; Heisswasser und Elektrizität aus Heizöl, Erdgas oder Kernenergie im Fernheizkraftwerk. Es kann meh-

Tabelle 1. Struktur des Gesamtenergieverbrauchs der Schweiz 1971/1972 in %

Energieform	Verbrauchersektoren					Total
	Transport, Verkehr	Industrie	Haushalte, Gewerbe, Landwirtschaft, Dienstleistungen, Öffentlichkeit	Verluste		
<i>Elektrische Energie</i>	Total	1	6,5	8	2	17,5 ↑
Quelle:	hydraulisch	1	5,5	6,5	1,5	14,5 ↓
	fossil	} ~ 0	1	1,5	0,5	1,5 ?
	nuklear					1,5 ↑↑
<i>Fossile Energie</i>	Total	22,5	19	37,5	3,5	82,5 ↓
Quelle:	Heizöle	—	17,5	34	3,5	55 ↓
	Treibstoffe	22,5	—	—	—	22,5 ?
	Kohle	} einschl. Holz	1	2	—	3 ↓?
	Gas		0,5	1,5	—	2 ↑↑
	Total	23,5 ?	25,5 ↓	45,5 ↑	5,5	100

100 %: 1971 150 000 Tcal/Jahr (20 000 MW, 3,2 kW/Einwohner)
2000 350 000 Tcal/Jahr (46 500 MW, 6,6 kW/Einwohner)

Mittlere Zuwachsrate 2,3 %/Jahr und Einwohner
Tendenzen der Anteile:
↑ steigend ↓ sinkend ? unbestimmt

Tabelle 2. Verbrauch für Heizung und Warmwasser in % des Gesamtenergieverbrauchs der Schweiz 1971/1972

Energieform	Verbrauchersektoren				
	Industrie	Raum- heizung und Warm- wasser		Haushalte usw.	
	Total	davon R+W	davon R+W	davon R+W	Total
Elektrische Energie	6,5	0,5	5	4,5	8
Fossile Energie	19	4,5	41,5	37	37,5
Total	25,5	5	46,5	41,5	45,5

1971 46,5 % 70 000 Tcal/Jahr [11 (11 Gcal/Jahr und Einwohner)
2000 40,0 % 140 000 Tcal/Jahr [20 (20 Gcal/Jahr und Einwohner)
Mittlere Zuwachsrate 2 %/Jahr und Einwohner

Aufteilung der 20 Gcal/Jahr und Einwohner

einerseits: 11 bis 12 eigentliche Wohnstätten
8 bis 9 alle anderen Gebäude

andererseits: 16 Raumheizung
4 Warmbrauchwasser-Bereitung
(200 l/Tag und Einwohner)

R+W: Raumheizung und Warmwasser

Tabelle 3. Beeinflussung der Umwelt durch Umwandlung von Primärenergie in Endenergie, Versuch einer qualitativen Bewertung

	1	2	3	4	5	6	7
Gestehungskosten		**	**	*	*	**	****
Erschöpfbarkeit der Weltreserven							
Nutzungsgrenze in der Schweiz	**	***	***	***	*	***	****
O ₂ -Verbrauch	***	***	***	—	—	—	—
Wasserhaushalt	—	—	—	—	—	***	—
Abwärme	***	***	***	***	***	—	—
Gewässerverschmutzung	*	***	*	*	*	*	—
CO ₂ -Emissionen	***	***	***	—	—	—	—
SO ₂ -Emissionen	***	***	—	—	—	—	—
NO _x -Emissionen	**	**	**	—	—	—	—
Staub-Emissionen	***	*	—	—	—	—	—
Emission von Radioaktivität	**	—	—	**	**	—	—
Abfallbeseitigung	**	—	—	***	***	—	—
Landschaftsbild	**	**	**	**	**	***	***
Unfall-Folgeschäden	*	**	*	***	***	***	—

* → **** mehr Mängel
1 Kohle 4 Kernenergie heute (Leichtwasserreaktor)
2 Öl 5 Kernenergie zukünftig (Brüter)
3 Erdgas 6 Wasserkraft
7 Sonnenenergie

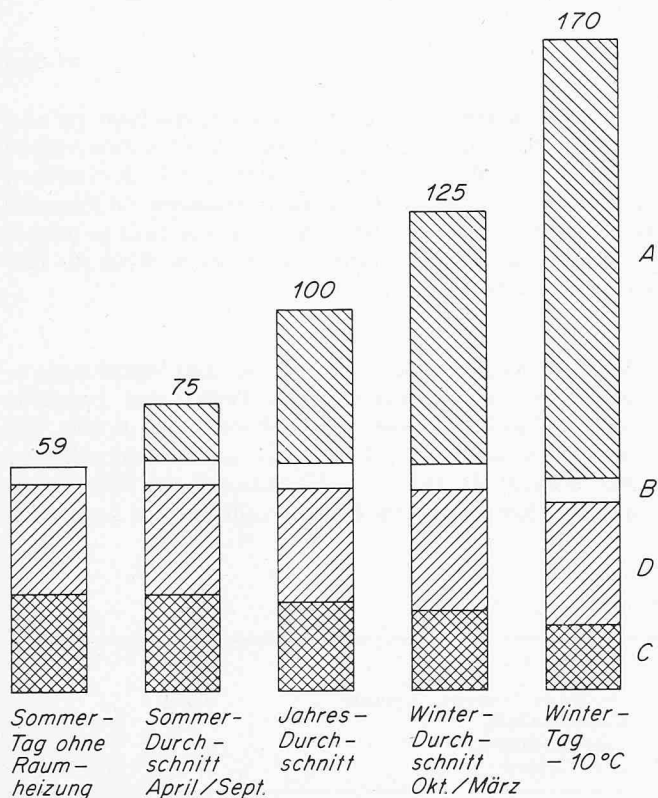


Bild 1. Struktur des Gesamtenergieverbrauchs in Abhängigkeit der Jahreszeit, Schweiz 1971/72, relative Zahlen

Die elektrische Energie beansprucht – leider – nur 17,5 %, das elektrifizierte Bahnsystem sogar nur 1 %. Die gesamte Beleuchtung, in der Tabelle nicht ausgewiesen, verschwindet beinahe mit ihrem Anteil von 0,6 %. Hier zu sparen hätte also nur psychologische Bedeutung. Elektrizität aus Nuklearenergie ist noch unbedeutend, immerhin ist ihr Anteil 1973 auf 3 % gestiegen.

Die fossilen Energieträger umfassen den Löwenanteil, davon sticht der Anteil der Heizöle am stärksten hervor, nämlich mit mehr als der Hälfte des Gesamtverbrauchs. Die Kohle, die bis etwa 1940 den Platz der Heizöle einnahm, ist unbedeutend geworden. Der Anteil des Erdgases ist noch sehr gering; der Holzanteil ist auf etwa 1 % gesunken (vor 50 Jahren betrug er noch 15 %). Die Treibstoffe machen 22,5 % aus, davon entfallen etwa vier Fünftel auf den Strassenverkehr, der Rest auf den Flugverkehr. Der gesamte Erdölanteil beträgt 79 % oder etwa vier Fünftel am Gesamtenergieverbrauch.

rere Stufen der Sekundärenergie geben, z.B. Heizöl aus Erdöl, daraus im ölthermischen Kraftwerk Elektrizität, damit warmes Wasser im Elektroboiler.

– Endenergie ist eine besondere Bezeichnung für die vom Letztverbraucher oder Konsumenten nachgefragte Form der Sekundärenergie.

– Nutzenergie ist die Energieform, für die beim Endverbraucher ein Bedarf vorliegt und die er mit Hilfe der Endenergie (Sekundärenergie) bei sich erzeugt. Beispiele: Wärme, Kälte, Kraft, Licht.

Jeder Übergang von einer Energieform in die andere ist mit mehr oder weniger grossen Verlusten verbunden.

Tabelle 1 zeigt die Struktur des Gesamtenergieverbrauchs der Schweiz für das Jahr 1971 in prozentualen Anteilen.

Wärme für Raumheizung und Warmwasserbereitung nimmt den grössten Anteil am Gesamtenergieverbrauch in Anspruch und wird in unseren Betrachtungen eine wichtige Rolle spielen. Da sie in den Sektoren Haushalt und Industrie versteckt enthalten ist, ist sie in Tabelle 2 gesondert ausgewiesen. Für die Heizung und Warmwasserversorgung aller Gebäude der Schweiz benötigen wir demnach 46,5 % der gesamten Energie. Die Wärme für industrielle Prozesse ist dabei nicht eingerechnet.

Beide Tabellen zeigen die Anteile am Gesamtjahresverbrauch. Wie aus Bild 1 hervorgeht, weichen nun extreme Tage stark davon ab.

Jede Energieumwandlung ist mit Verlusten behaftet. Bild 2 zeigt, wie in der Schweiz die Primärenergie in Nutzenergie umgewandelt wird.

Der Gesamtwirkungsgrad der schweizerischen Energiewirtschaft stellt sich heute auf bescheidene 39 %.

Die Abwärmeverluste treten im Diagramm vergleichsweise kaum in Erscheinung. Nehmen wir an, dass in 30 Jahren der Anteil der End-Elektrizität von heute 15,5 auf 25 % ansteige, was durchaus erstrebenswert wäre. Angesichts der bald erschöpften Wasserkraft erreichen wir das jedoch nur mit Kernkraftwerken, so dass die Abwärmeverluste von heute 5,95 auf 23 Einheiten ansteigen würden und damit vergleichbar wären mit den grössten Verlustquellen.

Die Verminderung der Abwärme nuklearer Elektrizitätserzeugung muss deshalb in einer Gesamtkonzeption ebenfalls Eingang finden.

Einwirkungen der Energieerzeugung auf die Umwelt

Die Einwirkungen, die man allgemein als Immissionen bezeichnet, sind mannigfaltig: Umweltwärmelastung (örtlich und weltweit), Sauerstoffverbrauch, Anreicherung der Atmosphäre mit Kohlendioxyd, Klimaveränderung, Luftverschmutzung durch Emission von schädlichen Gasen und Stäuben, radioaktive Strahlung, Lärm, Eingriff in das Landschaftsbild und in die Ökologie der Gewässer.

In Tabelle 3 wurde der Versuch unternommen, die Mängel der wichtigsten Energieerzeugungsmethoden zusammenzustellen und sie mit den Attributen stark, mittel, schwach und gar nicht (Bezeichnung durch Anzahl Sterne) qualitativ zu bewerten. Daraus geht hervor, dass es eine durchwegs ideale Methode nicht gibt und dass dabei Wasserkraft und Kernenergie erheblich besser als fossile Brennstoffe abschneiden.

Bei der Raumheizung mit fossilen Brennstoffen besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Gross- und Kleinanlagen. Bei der erfahrungsgemäss ungenügend überwachten Hausfeuerung z. B. ist der Immissionsindex, der die Einwirkung der schädlichen Abgase auf die Umgebung vergleicht, ungefähr fünfmal grösser als bei einer Grossanlage, denn bei dieser wird die Feuerung dauernd durch qualifiziertes Personal kontrolliert, Rauchgasreinigungsanlagen sind eingebaut, und ein hohes Kamin mit hoher Rauchgasaustrittsgeschwindigkeit sorgt dafür, dass die Rauchgase in einen viel grösseren Raum verteilt werden als bei Einzelfeuerungen¹⁾.

¹⁾ Ein Beweis: Letztes Jahr wurden von der Basler Chemie im aargauischen Rheintal und im Fricktal, verteilt über das ganze Gebiet, in Bodennähe mehr als 5 Mio Schwefeldioxyd-Messungen durchgeführt. Das Ergebnis überraschte zunächst dadurch, dass allgemein der SO₂-Gehalt der Atmosphäre viel niedriger war als erwartet. Dann stellte man fest, dass die SO₂-Konzentration bei zunehmender Kälte anstieg, insbesondere je näher der Messposten bei grösseren Wohngebieten lag, während ein Einfluss der ölbefeuerten Dampfzentralen der Chemiewerke nicht festzustellen war.

Bild 2, rechts. Energieflussbild der Schweiz 1971/72

Weil die Raumheizung überwiegend von individuellen Ölheizanlagen bestritten wird, lässt die Darstellung ahnen, wer, besonders im Winter, der Hauptverursacher der Luftverschmutzung ist. Hier liegt der wesentlichste Ansatzpunkt für ein neues Energiekonzept.

Von oben nach unten ist der Energiefluss dargestellt, aus Primär- über Sekundär- und Endenergie in Nutzenergie. Nach links und rechts zweigen die verschiedenen Verluste ab. Die Zahleneinheiten entsprechen den Tabellen 1 und 2.

Nur Wasserkraft und Holz sind einheimische Quellen. Über vier Fünftel unserer Energie müssen wir importieren. In Zukunft wird dieser Anteil noch grösser werden, da unsere Quellen ausgeschöpft sind.

Die Wasserkraft hat Verluste in Turbinen und Generatoren und wird in Elektrizität umgewandelt. Diese erleidet Übertragungsverluste für die Pumpspeicherung, bis sie den Endverbraucher erreicht. Die Nuklearenergie und ein geringer Anteil des Erdöls werden in thermischen Kraftwerken ebenfalls in elektrische Energie umgesetzt, wobei Abwärmeverluste entstehen.

Etwa zwei Fünftel des Öls erreichen die Schweiz als rohes Erdöl und werden unter Verlusten in unseren zwei Raffinerien zu Brenn- und Treibstoffen veredelt, während die übrigen drei Fünftel bereits als Sekundärenergie importiert werden.

Ganz rechts noch Kohle, Erdgas und Holz.

Die Endenergie ist in zwei Balken wiedergegeben, um die Umgliederung von elektrischer und fossiler Energie in die drei Verbrauchssektoren zu zeigen.

Ganz unten ist die überaus schlechte Umsetzung der Endenergie in eigentliche Nutzenergie zu erkennen. Die geschätzten Wirkungsgrade betragen nur 17 % im Sektor Transport und Verkehr und 45 % im Bereich Haushalt. Mit 73 % schneidet die Industrie noch gut ab.

Das zweite Motiv für eine neue Denkweise ist auf den Kampf gegen die Verschwendung auszurichten.

Umweltwärmelastung

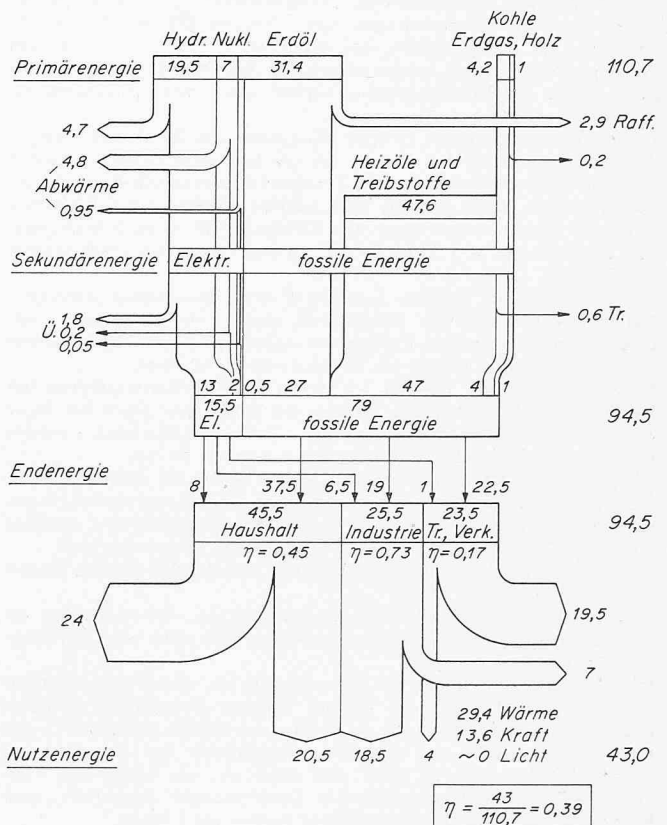
Heute weiss man, dass die Menschheit bis in die fernere Zukunft über genügend Energiereserven verfügt. Andere Grenzen des Wachstums werden viel früher erreicht werden.

Eine davon ist die Erwärmung der Atmosphäre durch die freigesetzte Energie. Weltweit gesehen, macht diese zusätzliche Wärmelastung heute erst 0,01 % der Sonneneinstrahlung aus, aber in unseren grossen Städten erreicht sie vorübergehend bereits 10 bis 20 %.

Die Energieerzeugungsmethoden sind deshalb auch unter diesem Gesichtspunkt zu beurteilen. Der *Umweltwärmelastungsfaktor f* gibt an, um ein Wievielfaches der Nutzenergie die Atmosphäre zusätzlich belastet wird, wenn Primär- in Nutzenergie umgewandelt wird. Zwei prinzipielle Fälle sind zu unterscheiden:

1. Der Faktor ist Null, wenn es sich um regenerative oder zyklische Energiequellen handelt, d. h. um Energie, die ohnehin ständig die Erdoberfläche trifft und die wir für unsere Zwecke umpolen können. In erster Linie ist das die direkte Sonneneinstrahlung, in zweiter Linie die durch sie bewirkten Energieformen wie Wasserkraft, Wind und haushälterisch genutztes Holz.
2. Ganz anders sieht der zweite Fall aus, wenn im Verlauf der Erdzeitalter gespeicherte fossile Energie oder Kernenergie freigesetzt wird; ein Vorgang, der thermische Energieerzeugung genannt und bei dem die Erdatmosphäre zusätzlich zur Sonneneinstrahlung erwärmt wird.

Im zweiten Fall ist der Umweltwärmelastungsfaktor *f* das Verhältnis der benötigten Primärenergie zur Nutzenergie. Da *f* dem Reziprokwert des thermischen Wirkungsgrades entspricht, ist sein Wert immer grösser als 1, wobei 1 die Nutzenergie selbst ist, die letztlich die Umgebung ebenfalls aufwärmt, nämlich dort, wo wir sie für unsere Zwecke nutzen. Alles, was über 1 liegt, wertet die Verlustwärme bzw. Abwärme.



Die Tabelle 4 zeigt einige Beispiele von Umweltwärmelastungsfaktoren aus der Energiewirtschaft. In den Zahlen sind Verluste und Aufwand für Gewinnung, Transport, Übertragung, Umwandlung, Anreicherung von Spaltstoffen usw. noch nicht berücksichtigt.

Schlussfolgerungen aus den Immissionsbetrachtungen

Aus den Immissions-Betrachtungen ergeben sich für ein Gesamtenergiekonzept der Schweiz einige wichtige Schlussfolgerungen:

Tabelle 4. Umweltwärmelastungsfaktoren f der thermischen Energieerzeugung

<i>Reine Elektrizitätserzeugung</i>		
fossilgefeuertes Dampfkraftwerk		2,6 bis 2,7
Kernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor mit Leichtwasserreaktor		2,4 bis 2,6 3,0 bis 3,2
Gasturbinenanlage		3,0 bis 5,0
<i>Kupplung von Kraft und Wärme</i>		
Gegendruck Fernheizkraftwerk	fossil	1,2
	nuklear	1,1
Gasturbine mit vollständiger Nutzwärmeverwendung		1,15 bis 1,3
Nuklear, Leichtwasserreaktor 900 MW Nennleistung mit 500 Gcal/h Nutzwärmeentnahme bei 120 °C		2
<i>Individuelle Heizanlage, Heizöl oder Erdgas</i>		1,3 bis 1,5
<i>Fahrzeugantrieb mit flüssigen Treibstoffen</i>		
wirtschaftlicher Dauerbetrieb		5 bis 6
integrierter Jahresbetrieb eines Personenwagens		10 bis 12
<i>Elektro-Fahrzeugantrieb, Batterie und Elektromotor</i>		(2 bis 4) f_s
<i>Wärmepumpe</i>		(0,25 bis 0,3) f_s
Zum Vergleich: <i>Regenerative Energie</i>		0
f_s = Faktor des Stromlieferanten		

Die Faktoren bei der reinen Elektrizitätserzeugung sind schlecht, bedingt durch die unvermeidlichen Abwärmeverluste, die das 1,5- bis 2fache der Nutzenergie betragen. Die Abwärme fällt nämlich bei 25 bis 40 °C an, Temperaturen, aus denen wir im allgemeinen keinen Nutzen ziehen können, ausgenommen für Wasserdestillation oder als kalte Quelle für Wärmepumpen, worauf später noch zurückgekommen wird.

Die Faktoren der zweiten Gruppe «Kupplung von Kraft und Wärme» dagegen gehören zu den besten, die die Energiewirtschaft erreichen kann. In diese Gruppe fallen die Fernheizkraftwerke mit Gegendruckdampfturbinen, fossil gefeuert oder nuklear geheizt, und Gasturbinen mit voller Abwärmeverwertung. Die Abwärme fällt, je nach Auslegung, mit Temperaturen von 50 bis 200 °C an und eignet sich ausgezeichnet zum Heizen.

Als besonders bei grossen Kernkraftwerken interessante Zwischenlösung besteht ferner die Möglichkeit, einen Teil des Dampfes aus einer Zwischenstufe der Turbine zu entnehmen, um damit heisses Wasser zu erzeugen und in ein Fernheiznetz zu schicken.

Entnimmt man zum Beispiel aus einem 900-MW-Kernkraftwerk mit LWR bei 120 °C 500 Gcal/h Wärme, mit denen eine Stadt wie Basel geheizt werden könnte, so vermindert sich die elektrische Leistung nur um 12 %, die Abwärme hingegen um ein Drittel.

Die in 5 bis 10 Jahren erwarteten Kernkraftwerke der nächsten Generation, nämlich diejenigen mit gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren, werden ihre Abwärme mit noch kleinerer Leistungseinbusse abgeben können, falls sie mit geschlossenen Gasturbinen ausgerüstet sind.

Bei der individuellen Hausheizanlage mit Heizöl oder Erdgas ist der Faktor 1,3 bis 1,5.

Eine ausserordentlich schlechte Ausnutzung der Energievorräte erlauben wir uns mit den Strassenfahrzeugen; man muss hier von Energieverschwendung sprechen.

Eine Sonderstellung nimmt die Wärmepumpe ein, deren Faktor kleiner als 1 wird, und zwar weil sie mit geringer elektrischer Antriebsenergie das Mehrfache davon an Wärme aus kaltem Wasser (evtl. aus der Umgebungsluft) auf das Temperaturniveau der Raumheizung pumpt. Die kalte Quelle kühlt sich dabei ab; wir haben also Umgebungswärme, gleichsam indirekte Sonnenenergie ausgenutzt, weshalb auch der Wärmelastungsfaktor kleiner als 1 bleibt.

1. Erdöl sollte längerfristig nicht mehr als Basisenergieträger verwendet werden. Dies ist erst nach einer längeren Umstellungszeit zu erreichen; werden die nötigen Massnahmen jedoch nicht heute schon eingeleitet, so kann in einem späteren Zeitpunkt die Lage äusserst kritisch werden. Diese Forderung steht im Einklang mit der Notwendigkeit nach Diversifikation der Energieträger und begegnet der Erpressung durch die OPEC-Staaten. Ob wir in der Schweiz Erdöl finden, hat gegenwärtig nur spekulativen Charakter. Substitutionsenergien sind heute in erster Linie die Kernenergie, dann Wasserkraft, Erdgas und Kohlendhydrate (gasförmig und flüssig).
2. Die gewichtete Summe der Faktoren f aller Energieerzeugungsanlagen muss so gering als möglich sein. Als Folge davon wird gleichzeitig der Primärenergieverbrauch auf ein Minimum reduziert.
3. Die Energiequellen mit $f = 0$ sind weitmöglichst auszuschöpfen. Über die Möglichkeiten der Sonnenenergie wird an anderer Stelle berichtet. Windenergie könnte in der Schweiz nur einen äusserst bescheidenen Beitrag leisten. Die Ausnutzung der Wasserkraft nähert sich in der Schweiz aus verschiedenen bekannten Gründen ihrem Ende. Trotzdem sollte keine Gelegenheit zum Weiterausbau versäumt werden, wird doch heute erst etwa ein Viertel des theoretischen Potentials ausgenutzt.
4. Die thermische Energie ist so einzusetzen, dass sich der Umweltwärmelastungsfaktor dem Wert 1 nähert. Diese Forderung wird mit der Kupplung von Kraft und Wärme vollständig erfüllt und bei den grossen Kernkraftwerken der Elektrizitätserzeugung teilweise, wenn deren Abwärme im Rahmen der Möglichkeiten ausgenutzt wird.
5. Der Strom aus Kernkraftwerken für reine Elektrizitätserzeugung ist im wesentlichen für die Kraftverbraucher einzusetzen und zu Heizzwecken, mittels elektrischer Speicherheizung, nur solange überschüssige Nachtenergie zur Verfügung steht.
6. Die *Wärmepumpe* sollte wieder in grösserem Massstab eingesetzt werden. Neben dem ausgezeichneten Wärmelastungsfaktor ist sie emissionsfrei und ist deshalb eine echte Alternative zur Ölheizung. Sie lässt sich auch vorteilhaft mit der Klimatisierung kombinieren. Nach dem Zweiten Weltkrieg war sie vom billigen Heizöl verdrängt worden und liess sich bis vor kurzem nur für Schwimmbäder wirtschaftlich rechtfertigen.

Heute sehe ich zwei Einsatzarten:

Zum einen grössere Anlagen, die eine Fernwärmeversorgung von solchen Ortschaften beliefern, die an einem Fluss, Bach oder See liegen; zum anderen kleine Hausanlagen in wartungsarmer Kompaktbauweise, bei denen die kalte Quelle von einem besonderen kommunalen Wasser-Netz sichergestellt ist, das mit aufgewärmtem Kühlwasser eines nahegelegenen Kernkraftwerkes gespeist wird. Ein solches System kann als Kaltwasser-Fernheizung bezeichnet werden. Da der Wirkungsgrad der Wärmepumpe um so günstiger wird, je wärmer die kalte Quelle ist, bietet sich auch die interessante Gelegenheit, die warmen Abwässer der Haushaltungen individuell oder auf kommunaler Ebene zu sammeln und der kalten Quelle zuzuführen. Damit berühren wir bereits die *sanfte Technologie*.

Weil Wärmepumpen, in grosser Zahl eingesetzt, die Gewässer abkühlen, könnten letztere wieder zur Kühlung grosser Kernkraftwerke herangezogen werden. Mit anderen Worten, die Wärmepumpe ist indirekt ein Mittel zur Verwertung der Abwärme von Kernkraftwerken während der Heizperiode.

7. Eine letzte Schlussfolgerung: Für den Fahrzeugantrieb sind bessere Lösungen zu suchen. Die sich erst abzeichnenden (spekulativen) Lösungen können noch nicht in eine Gesamtenergiekonzeption eingebaut werden.

Energiekonzept

Aus sechs einander zum Teil widersprechenden Zielforderungen ist ein optimaler Kompromiss zu finden. Es sind dies:

1. Sicherheit der Energieversorgung
2. Schonung der Umwelt
3. Kampf der Verschwendung
4. kleinstmöglicher Primärenergieverbrauch
5. Verwendung erprobter Technik, Fähigkeit der Anpassung an voraussehbare Zukunftstechnik
6. Wahrung der Wirtschaftlichkeit.

Auf die Punkte 2 und 4 wurde eben eingegangen. Punkt 6 ist selbstverständlich, allerdings nur innerhalb vernünftiger Grenzen, die von den anderen Forderungen gesetzt sind. Umweltschutz z.B. ist nicht gratis. Dazu gehört auch der Zwang, die Geschwindigkeit der Verwirklichung eines neuen Konzeptes mit unseren personellen und finanziellen Mitteln in Einklang zu bringen.

Vermehrte *Sicherheit der Energieversorgung* erreichen wir einerseits durch Diversifikation der Energieträger, andererseits durch Konzentration auf den Energieträger mit den grössten Weltreserven, z.B. die Kernenergie.

Mit dem Anspruch auf Sicherheit verknüpft ist auch die Forderung, ein Wärmeversorgungssystem zu wählen, das auf alle Zeiten mit *jedem Brennstoff* betrieben werden kann, sei er fossiler, nuklearer oder synthetischer Natur. Auf ideale Weise wird diese Forderung und jene der Verwendung erprobter Technik erfüllt durch die Anwendung der Kupplung von Kraft und Wärme, indem mittels Fernheizkraftwerken die Agglomerationen mit Fernwärme versorgt werden und die übrigen Gebiete mit Elektrizität, entweder zur direkten elektrischen Heizung oder zum Antrieb von Wärmepumpen.

Die dabei verwendeten leitungsgebundenen Energieträger *Heisswasser* und *Elektrizität* sind gleichzeitig die einzigen, die in unseren Wohn- und Arbeitszonen und in den Erholungsgebieten saubere Luft ermöglichen.

Für die Schweiz stehen Fernheizkraftwerke im Vordergrund, solche mit Gegendruckdampfanlagen und Gasturbinen, weil beide weder Kühltürme noch Flusskühlung benötigen und somit das Standortproblem vereinfachen. Gegebenenfalls wäre sogar Kavernenbau möglich.

Punkt 3, der Kampf der *Verschwendung*, sei am Beispiel der Raumheizung erläutert.

Untersuchungen in einigen Ländern haben gezeigt, dass der Gesamtnutzungsgrad der heutigen Heizung, unabhängig vom Brennstoff, sehr schlecht ist, nämlich nur 40 bis 45%. Während die Verluste der neuwertigen Kesselanlage mit etwa 15% annehmbar sind, erhöhen sie sich im Jahresbetrieb erheblich infolge ungenügender Einstellung und Wartung, ganz abgesehen von der damit verbundenen Luftverschmutzung. Zusätzlich verlieren wir im Durchschnitt weitere 30% dadurch, dass üblicherweise die Heizanlage so eingestellt ist, dass noch derjenige Wohnraum auf behagliche Temperatur geheizt wird, der am schwächsten mit Heizkörpern bestückt ist. Damit überheizen wir alle anderen Räume und sind gezwungen, sie häufig zu lüften. Man nennt dies «Fensterregelung». Auf diese Weise verschwenden wir jährlich etwa 2 Mio t Heizöl und an Devisen mindestens 1/2 Mrd Fr. Grosse Einsparungen ergäben sich mit dem Einbau von Regulierventilen und einstellbaren Thermostaten auf jedem Heizkörper, womit jeder Raum nur auf seiner unbedingt erforderlichen Temperatur gehalten werden könnte.

Dass die Raumtemperatur ohne Folgeschäden an Leib und Seele um 2 bis 3 °C gesenkt werden kann, haben viele von Ihnen seit der Ölpreisexplosion sicherlich gemerkt. Einsparung an Brennstoff: 10 bis 20%, also nochmals etwa 1 Mio t/Jahr.

Die grösste Einsparung, im Mittel nämlich weitere 30%, liesse sich durch bessere Gebäudeisolation erzielen. Bereits 1957 hat die EMPA in einer ausgedehnten Versuchsreihe nachgewiesen, dass es möglich ist, die Wärmedurchgangszahl der Hauswände zu halbieren. Mehrkosten lassen sich teilweise durch die kleiner bemessene Heizanlage kompensieren.

Bei Anwendung der Elektroheizung schreiben die Bau-normen eine erheblich bessere Wärmedämmung der Gebäude vor, was, angesichts des bisherigen Preisgefälles von Elektrizität zu Heizöl, wirtschaftlich berechtigt war. Heute ist es durchaus gegeben, alle Gebäude zumindest nach dieser Norm zu isolieren.

In neu zu erstellenden Gebäuden verursacht eine bessere Isolation keine grösseren Probleme. Anders bei den bestehenden. Auch in 25 Jahren werden etwa zwei Drittel aller Häuser solche sein, die schon heute stehen. Die Bauwirtschaft hat deshalb nach geeigneten Lösungen zu suchen, wie in bereits gebauten Häusern die Isolation den neuen Anforderungen angepasst werden könnte.

Als Synthese der bisherigen Erkenntnisse wurde in Bild 3 ein *Modell einer fernbeheizten Schweiz für das Jahr 2000* entworfen. Zunächst wird die Schweiz unterteilt in Agglomerationen mit über etwa 30000 Einwohnern, etwa 40 an der Zahl, die zusammen 60 bis 65% der Bevölkerung aufnehmen werden, und in die übrigen Siedlungsgebiete, kleine Ortschaften, Streusiedlungen und Berggebiete, also die restlichen 35 bis 40% der Bevölkerung. Die Agglomerationen werden mit Fernwärmeversorgungen versehen, in den übrigen Gebieten wird das elektrische Verteilnetz verstärkt.

Gedanklich wird die Wärmeversorgung getrennt in *Raumheizung*, deren Energiebedarf sich je nach Jahreszeit und Lufttemperatur stark ändert, und *Warmwasserbereitung*,

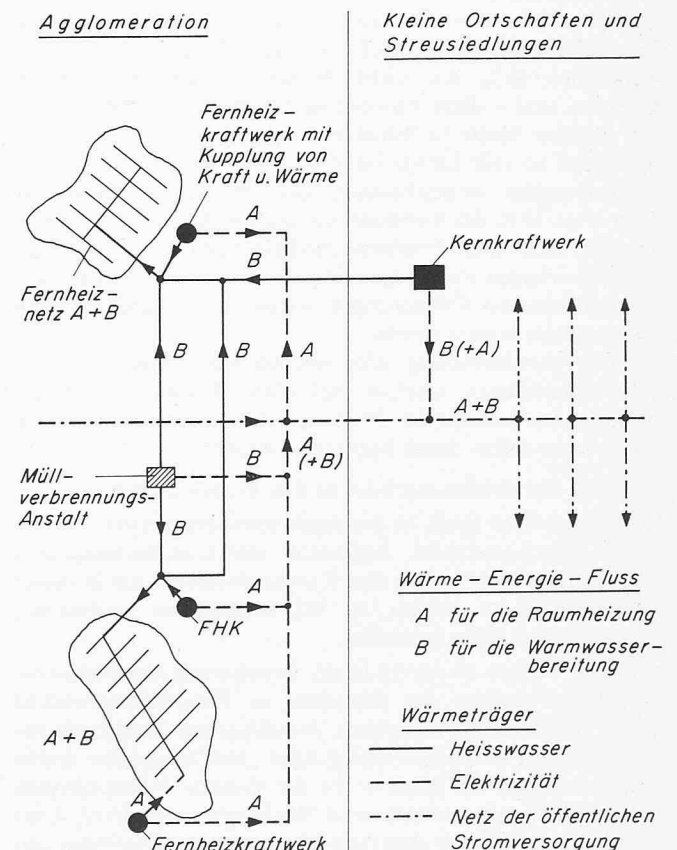


Bild 3. Modell einer fernbeheizten Schweiz

die übers Jahr einigermaßen konstant ist und nur tageszeitliche Schwankungen aufweist.

Für die Wärmeversorgung werden drei Kraftwerkstypen eingesetzt: Kernkraftwerke der allgemeinen Stromversorgung, Fernheizkraftwerke und Müllverbrennungsanlagen mit Gegendruckturbogruppen.

Zur Deckung der stark variierenden Raumheizung muss der Kraftwerkstyp mit den kleinsten Investitionskosten gewählt werden. Das sind Gegendrucktampfanlage und Gasturbine. Für die konstante Warmwasserbereitung dagegen ist am wirtschaftlichsten der Typ mit den tiefsten Brennstoffkosten, also Kernkraftwerk und Müllverbrennungsanlage. Aus Kostengründen des Heisswassertransportes dürfen diese Kraftwerke nicht zu weit entfernt von den Städten liegen. Da die Warmwasserbereitung eine gute jährliche Ausnützung gestattet, sind jedoch Entfernungen von 20 bis 30 km zumutbar. Daraus erhebt sich eine wichtige Forderung für die Standortwahl zukünftiger Kernkraftwerke.

Am Rand der Agglomerationen werden Fernheizkraftwerke aufgestellt, die nach dem Raumheizungsprogramm fahren. Die dabei produzierte Elektrizitätsmenge variiert proportional zum Wärmebedarf. Dieser Stromanfall passt zeitlich nicht überein mit dem allgemeinen Strombedarf. Als Kerngedanke dieses Modells wird nun die Elektrizität der Heizkraftwerke *gleichzeitig* den Raumwärmebedarf der übrigen Siedlungsgebiete decken. Letztere sind also mit direkten Elektroheizungen oder mit Wärmepumpen auszurüsten. Ein solches Verbundsystem ist berechtigt, weil in einem kleinen Land wie der Schweiz der Raumwärmebedarf überall etwa zu gleicher Stunde und im gleichen Masse variiert.

Kernkraftwerke mit Entnahmeturbinen und Müllverbrennungsanlagen decken den konstanten Energiebedarf der Warmwasserbereitung und zusätzlich die Grundlast des Raumwärmebedarfs, die an mindestens 180 Tagen des Jahres benötigt wird, einerseits in Form von Heisswasser für die Fernheiznetze der Agglomerationen, andererseits in Form von Elektrizität für die restlichen Siedlungen.

Wie sieht nun die Gesamtbilanz des vorgeschlagenen Heizverbundsystems der Schweiz aus? Wenn in den Agglomerationen 90% der Gebäude am Fernwärmenetz angeschlossen sind – diese Anschlussdichte kann erreicht werden, wie mehrere Städte in Schweden und Dänemark beweisen –, so können so viele übrige Gebäude elektrisch geheizt werden, Wärmepumpen eingeschlossen, dass im ganzen Land nur noch etwa 10% der Gebäude auf andere Art geheizt werden müssten: elektrische Nachtspeicherheizungen und noch einige Einzelfeuerungen mit Erdgas, Heizöl, Kohle oder Holz. 90% der individuellen Ölf Feuerungen wären somit durch saubere Energieträger ersetzt worden.

Die Verwirklichung eines solchen Vorschlages erfordert hohe Investitionen, weshalb mit einer Bauzeit von 30 bis 40 Jahren zu rechnen ist. Weil er sich auf erprobte Technik stützt, kann sofort damit begonnen werden.

Eine Verwirklichung wäre in drei Phasen zu denken:

1. Phase, etwa 10 Jahre. In den Agglomerationen erster Ausbau der Heisswassernetze, beginnend mit Quartierheizungen. Erste Heizzentralen. In den Kernkraftwerken, die in dieser Periode gebaut werden, ist Wärmeentnahme vorzusehen, jedoch noch nicht zu nutzen.
2. Phase, weitere 10 bis 15 Jahre. Erweiterung der Heisswassernetze. Ausbau der Zentralen zu Fernheizkraftwerken mit Wärme-Kraft-Kupplung. Anschluss der Kernkraftwerke an die Fernwärmeversorgungen. Die Kessel der ersten Phase dienen als Reserve. In der zweiten Siedlungszone Verstärkung der Mittel- und Niederspannungsnetze, Umstellung auf direkte elektrische Heizung und Erstellung von Wärmepumpenanlagen.

3. Phase, nochmals 10 bis 15 Jahre. Ausbau der Systeme bis zum Endzustand.

Das Modell verlangt neue Denkweisen: Zusammenarbeit auf überregionaler und interkantonaler Ebene zwischen Behörden, Elektrizitätswerken, Öl- und Gasgesellschaften, Bauwirtschaft. Dann die Festlegung eines Einheitspreises für die Wärmeeinheit, da die Heizmethode dem einzelnen je nach Wohnort vorgeschrieben wird. Anschlusszwang an Fernwärmeversorgungen usw.

Erdgas, Energiespeicherungen und Wasserstoff-Ökonomie

Der vermehrte Einsatz von Erdgas kommt der Forderung nach Diversifikation entgegen; Erdgas ist unter den fossilen Brennstoffen der sauberste. Es wird deshalb in zunehmendem Masse für die Feuerung von Heizungen gefragt. Dem wirken allerdings zwei Engpässe entgegen:

- Obwohl die Weltvorräte ungefähr denjenigen des Erdöls entsprechen, ist die Verteilung der Lagerstätten derart, dass der Transport in die Schweiz, teils gasförmig durch Leitungen, teils in verflüssigter Form, hohe Kosten verursacht und deshalb keinen entscheidenden Umfang annehmen kann. Bis 1980 rechnet die Schweiz mit etwa 1,8 Mrd m³/Jahr, was dann erst etwa 7% des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen wird. Aus diesen Gründen lässt es sich nicht rechtfertigen, das Gasverteilnetz bis in jedes Haus zu erweitern. Der dadurch eingesparte Geldbetrag ist sinnvoller für den Ausbau der Fernwärmeversorgungen zu verwenden, die unabhängig von der Energiequelle betrieben werden können. Dennoch ist soviel Erdgas als erhältlich zu importieren, sein Verbrauch aber auf Grossabnehmer, wie Fernheizkraftwerke und Industrie, zu beschränken.
- Der zweite Engpass besteht darin, dass Erdgas in kontinuierlichem Fluss in die Schweiz strömt, die Nutzung zu Heizzwecken hingegen übers Jahr gesehen stark schwankt. Die Winterbedarfsspitze steigt bis auf das Zehnfache des Sommerverbrauchs. Zum Ausgleich muss demnach Erdgas gespeichert werden können. Drei Möglichkeiten bieten sich an, die allerdings alle kostspieliger sind als einfache Öltankanlagen: Druckbehälter, Speicherung in flüssigem Zustand, d.h. bei etwa -160 °C, oder Speicherung im Erdbo-den, in ausgelaugten Salzlagerstätten oder in sogenannten Aquifern. Das sind poröse Gesteinsschichten einer Antisynklinale mit darüberliegender und durchlässiger Schicht. Nach solchen geologischen Formationen wird in der Schweiz gegenwärtig gesucht.

Kohle wäre einfach zu lagern. Die Weltvorräte sind etwa zehnmal so gross wie diejenigen des Erdöls oder des Erdgases und anders verteilt. Als Substitutionsenergie für Erdöl ist somit die Kohle ernsthaft in Betracht zu ziehen, auch wenn ihre Ausbeutung vielerorts wachsenden Schwierigkeiten begegnet. Die schlechten Eigenschaften der Kohle bezüglich Transportaufwand und Emissionen lassen sich mildern, wenn sie vergast oder verflüssigt wird – beides längst bekannte Verfahren.

Die Speicherung der Elektrizität ist nur in indirekter Form möglich, da Strom im gleichen Augenblick produziert werden muss, in welchem er vom Konsumenten benötigt wird. Neben den bekannten hydraulischen Saison- und Tages-Pumpspeicherwerken besteht zur Deckung von Verbrauchsspitzen die Technik der Luftspeicheranlage mit Gasturbine, die geringere Investitionen erfordert und das Landschaftsbild weniger beeinträchtigt, dafür an günstige Gesteinsformationen gebunden ist und als Zusatz fossile Brennstoffe benötigt. Eine luftdicht abgeschlossene Kaverne von 250 m Länge und 20 m Durchmesser z.B. genügt für eine Spitzenproduktion von 300 000 kW während 3 h. Mit billigem Nachtstrom treibt der als Motor arbeitende Generator

den Verdichter der Gasturbine an und fördert Luft von etwa 60 bar in die Kaverne. Im Leistungsbetrieb ist der Verdichter abgekuppelt, und die Gasturbine arbeitet mit Brennluft aus der Kaverne. Auf diese Weise verbraucht die Anlage nur etwa ein Viertel der für Gasturbinen üblichen Brennstoffmenge, die anderen drei Viertel hat der Nachtstrom aus Kernkraftwerken beigetragen.

Der Transport der elektrischen Energie in grossen Mengen und über weite Entfernungen – denken Sie an Grösst-Kernkraftwerke am Meer oder an Sonnenkraftwerke in heissen Gebieten – ist um eine Grössenordnung kostspieliger als der Transport von Erdöl oder Gas.

Es ist deshalb in letzter Zeit vorgeschlagen worden, die Elektrizität indirekt in Form von Wasserstoff zu speichern und zu transportieren. Wasserstoff wird aus Wasser gewonnen, das fast überall in genügender Menge vorhanden ist, und es verbrennt praktisch emissionsfrei wiederum zu Wasser. Der mit der Wasserstofferzeugung freigesetzte Sauerstoff wird bei der Verbrennung wieder verbraucht, so dass auch dieser Kreis geschlossen ist. Wasserstoff lässt sich wie Erdgas lagern, in Aquifern oder in flüssiger Form, und durch Leitungen verhältnismässig günstig transportieren. Er liess sich auch zusammen mit Elektrizität in supraleitenden Kabeln transportieren, die eine Kühlung auf die Temperatur des flüssigen Wasserstoffs benötigen. Es wird auch von der Möglichkeit gesprochen, Wasserstoff in Form metallischer Hydride zu binden, diese als Energiespeicher in Fahrzeugen zu verwenden – ihr Leistungsgewicht soll viel niedriger sein als dasjenige der Akkumulatoren – und den wieder freige-

machten Wasserstoff zum Antrieb des Verbrennungsmotors zu verwenden. Der Wasserstoff würde mittels Elektrolyse mit überschüssigem Strom aus Kernkraftwerken während der Schwachlastzeiten produziert oder direkt durch Zerlegung des Wassers mit chemischen Mitteln bei 800 bis 900 °C, einer Temperatur, die in den Kernreaktoren der nächsten Generationen, den Hochtemperaturreaktoren und Brütern, verfügbar sein wird.

Die entsprechende Forschung ist angestossen worden. Es zeichnen sich also für die Energiewirtschaft interessante Zukunftsperspektiven ab. Wenn wir auf das vorgeschlagene Fernheizkonzept der Schweiz zurückkommen, so steht die Erkenntnis im Vordergrund, dass auch diese künftigen Energieträger ohne weiteres in Fernheizkraftwerken eingesetzt werden können.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, wurde versucht, für das Energieproblem der Schweiz Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen, sie zur Diskussion zu stellen und zum Nachdenken anzuregen.

Der gegenwärtige Kollisionskurs, auf dem sich Energie und Umwelt befinden, muss nicht zwangsweise in eine Sackgasse münden. Einschränkungen dürften sich einzig dadurch ergeben, dass die Zeiten billiger Energie vorbei sind. Entscheidende Fortschritte können nur über einen langen und kostspieligen Prozess errungen werden. Da die Zeit drängt, sollten wir unvermittelt an diese Aufgabe herangehen.

Adresse des Verfassers: R. Hohl, dipl. Ing. ETH, Abteilung Energieerzeugung, AG Brown Boveri & Cie., Postfach, 5401 Baden.

Neue Möglichkeiten zur Verteilung elektrischer Energie

Von Dr. Adolf Eidinger, Baden

DK 621.3.05

Wandel von Energiebedarf und Energieversorgung

In den letzten Jahrzehnten lag die Zunahme des Primärenergiebedarfs weltweit bei etwa 3,5% (Verdoppelung also etwa alle 20 Jahre), die Zunahme des Verbrauchs an elektrischer Energie war aber doppelt so hoch (Verdoppelung alle 10 Jahre) [1]. Die entsprechenden Zahlen für hochentwickelte Industriestaaten – so auch für die Schweiz – liegen etwas unter diesen Werten, während sie für weniger entwickelte Länder, die gerade in ihre Industrialisierungsphase eintreten, wesentlich höher sind. Der Anteil der Primärenergie, der für die Elektrizitätserzeugung herangezogen wird, nimmt also rasch zu und liegt in den meisten Industriestaaten bei etwa 25%. Etwa $\frac{3}{4}$ des Primärenergiebedarfs gehen direkt an den Verbraucher, sei es nun in Form von Heizöl, sei es in Form von Kohle, Treibstoffen oder anderen Produkten. Die verbleibenden $\frac{1}{12}$ werden in Elektrizitätswerken umgewandelt, wobei $\frac{1}{12}$ in Form elektrischer Energie wiederum an den Endverbraucher geht, während die restlichen $\frac{2}{12}$ als nicht verwertbare Abwärme der thermischen Kraftwerke in Gewässer oder an die Atmosphäre abgegeben werden [2].

Würde das Wachstum des Elektrizitätsverbrauchs – bei gleichbleibender Zunahme des Gesamtenergieverbrauchs – unverändert anhalten, so würde dabei bereits um das Jahr 2030 der gesamte Primärenergiebedarf für die Erzeugung von elektrischem Strom verwendet werden. Die Endverbraucher würden dann ausschliesslich elektrische Energie beziehen. Eine derartige, vollständig elektrifizierte Wirtschaft erscheint jedoch aus mannigfachen Gründen nicht sinnvoll.

Die verwendeten Primärenergien sind heute zu 80% (Schweiz) bis 95% (USA) fossile Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle), der Rest verteilt sich auf hydroelektrische Energie

und auf den rasch zunehmenden Anteil von Kernenergie. Die übrigen Energiequellen, wie geothermische und solare Energie, sind bedeutungslos. (Wobei aber nicht vergessen werden soll, dass durch die eingestrahelte Sonnenenergie die Temperatur unserer Umwelt immerhin um etwa 290° angehoben wird. Wir werden auch in Zukunft keine Sonnenenergie zusätzlich gewinnen können, sondern wir können nur die ohnedies eingestrahelte Energie zeitlich und örtlich etwas umverteilen.)

Viel stärker als der Primärenergieverbrauch ist in den letzten Jahrzehnten der Erdölverbrauch gestiegen (von 1900 bis 1970 exponentiell um mehr als 2 Zehnerpotenzen). Der

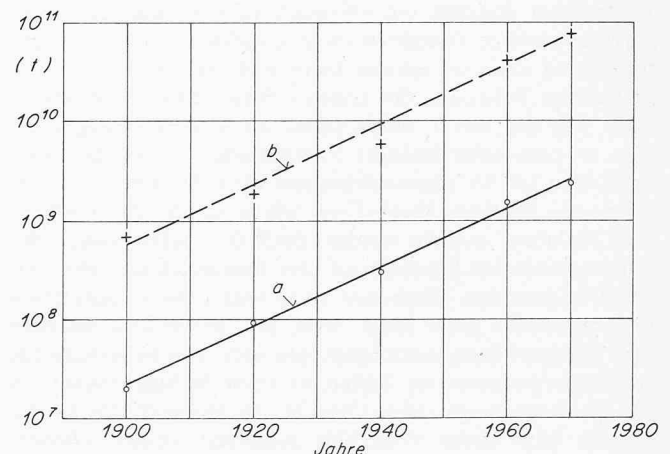


Bild 1. Anstieg des Erdölverbrauchs (Kurve a) sowie der bekannten und garantierten Reserven (Kurve b) zwischen 1900 und 1970. Der Abstand der beiden parallelen Geraden beträgt etwa 30 Jahre