

Energie und Umwelt



Perpetuum mobile nach Maurits C. Escher:

Trotz unzähligen Vorschlägen von wunderbaren Maschinen wird der Traum der Menschheit, Energie aus nichts zu bekommen, Illusion bleiben. Alle Vorhaben scheitern an den zwei Hauptsätzen der Thermodynamik.

August 1990

Energie und Umwelt

Verfasst im Auftrag der SPG von:

Prof. Dr. J.-P. Blaser (ETHZ - PSI)

Prof. Dr. B. Giovannini (Universität Genf)

Dr. P. Kesselring (PSI)

Prof. Dr. W. Kröger (PSI - ETHZ)

Dr. D. Spreng (ETHZ)

Prof. Dr. P. Suter (ETHZ - PSI)

Prof. Dr. F. Troyon (EPFL)

Für die SPG:

Prof. Dr. W. Kündig (Univ. Zürich, Präs. der SPG)

PD Dr. H. J. Schötzau (AEW - ETHZ, Präs. der WPK)

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	1
Was ist Energie ?	3
Mensch und Energie	12
Energie aus dem Natur-Kreislauf	19
Kernspaltung (Fission)	32
Kernverschmelzung (Fusion)	41
Speicherung, Umwandlung und Transport von Energie .	45
Energiebilanzen	51
Perspektiven des Energieverbrauchs	57
Zusammenfassung und Ausblick	69

Diese Broschüre kann bei der Schweizerischen Physikalischen Gesellschaft, c/o Physik-Institut der Universität Zürich, Schönberggasse 9, 8001 Zürich bezogen werden. Sie ist in Deutsch und Französisch erhältlich. Bitte adressiertes und frankiertes C5-Couvert beilegen. Als Unkostenbeitrag werden Fr. 5.-- in Rechnung gestellt.

Vorwort

Die Wissenschafts-Politische Kommission (WPK) und der Vorstand der Schweizerischen Physikalischen Gesellschaft (SPG) haben vor einem Jahr die Broschüre "Vom Menschen verursachte Klimaveränderungen" herausgegeben und damit über die sich schon heute abzeichnenden und noch zu erwartenden Klimaveränderungen informiert. Für die Klimaveränderungen sind die Treibhausgase, vor allem das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid verantwortlich.

Die Hauptverursacher des Treibhauseffektes sind die Industrieländer, die mit rund 1/3 der Bevölkerung 2/3 des Weltenergieverbrauchs beanspruchen. Der gewaltige Anstieg des Energieverbrauchs durch die Menschheit führte zu einem kaum verantwortbaren Raubbau an unseren Ressourcen. Wir verbrauchen heute pro Jahr die fossilen Brennstoffe, für deren Bildung die Natur rund eine Million Jahre benötigte! Seit 100 Jahren hat sich der Energieverbrauch weltweit verzehnfacht! Die Energieproblematik ist nicht nur ein Ressourcenproblem, sondern in noch höherem Masse ein Umweltproblem. Das Verbrennen der fossilen Brennstoffe führt zu unabsehbaren Klimaveränderungen. Der jährliche Weltenergieverbrauch beträgt heute rund 350 Exajoule, was einer mittleren Leistung von 12 Terawatt oder 2.4 Kilowatt pro Person entspricht. Die dominierenden Energieträger sind heute die fossilen Brennstoffe (85 %). Wir verbrennen $5.5 \cdot 10^{12}$ Kilogramm Kohlenstoff pro Jahr (1986) und erzeugen dabei $20 \cdot 10^{12}$ Kilogramm resp. 10^4 Kubik-Kilometer Kohlendioxid-Gas. Als Ersatzenergien stehen heute einzig die Wasserkraft und die Kernenergie zur Verfügung. Die direkte Nutzung der Sonnenenergie und die Windenergie tragen zur Zeit kaum mehr als 0.1 % bei und werden auch in naher Zukunft aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Eine Begrenzung der drohenden Klimaveränderungen ist nur möglich durch **Sparen und die Förderung und Entwicklung nicht fossiler Energieträger.**

In der Öffentlichkeit wird heute zu Recht das Problem des Verbrauchs der verschiedenen Energieformen diskutiert und gefragt, wie diese Energie bei uns und weltweit in der näheren aber auch fernen Zukunft erzeugt werden soll. Die sozioökonomischen und technischen Fragen sind komplex und daher kontrovers. Bei den Auseinandersetzungen zeigt sich, dass schon der Begriff Energie als physikalische

Grösse viele Facetten hat, deren schwer zu erfassende Zusammenhänge auf Naturgesetzen basieren. Eine seriöse energiepolitische Meinungsbildung setzt daher Kenntnisse voraus, die oft fehlen. Energiedebatten werden daher leider oft nur emotionell, politisch und mit festgefahrenen Meinungen statt sachlich geführt.

Die Naturwissenschaft hat in der Energiedebatte die wichtige Aufgabe die komplexen Vorgänge aufzuzeigen. Sie hat denn auch frühzeitig auf die mit der Energie zusammenhängenden Probleme hingewiesen: "Der zu deckende Energiebedarf der Menschheit bringt ernsthafte ökonomische, soziale und ökologische Probleme mit sich. Ihre Lösung verlangt vernünftige technologisch und wirtschaftlich machbare Alternativen" (C. Starr, Scientific American, Sonderausgabe "Energy and Power", 1971).

In Anbetracht der derzeitigen Auseinandersetzung über die Energie-Umwelt-Problematik empfand es die SPG als ihre Pflicht objektiv und neutral zu informieren. In dieser Broschüre möchten Physiker aus ihrer Sicht versuchen, Orientierungshilfe zu geben, indem Grundgesetze, Zusammenhänge und quantitative Begrenzungen in Erinnerung gerufen werden. Objektive Tatsachen sind dabei unbestritten, aber Bewertungsunterschiede existieren auch zwischen Naturwissenschaftlern, sobald man das Energieproblem umfassend ins soziale und wirtschaftliche Umfeld und in die ethische Entwicklung der Menschheit einbezieht.

Die vorliegende Broschüre wurde so sorgfältig wie möglich redigiert. Angesichts der stark divergierenden Angaben in der Fachliteratur ist es unvermeidlich, dass in den verschiedenen Kapiteln einzelne Zahlen nicht übereinstimmen. Die aufgezeigten Tendenzen und Schlussfolgerungen werden dadurch nicht beeinflusst. Die Verantwortung für die, trotz angestrebter Sachlichkeit, von den verschiedenen Autoren der einzelnen Kapitel ausgedrückte Haltung liegt kollektiv bei den Autoren und bei den Präsidenten von WPK und SPG.

Was ist Energie ?

Für die meisten Menschen ist Energie gefühlsmässig nur erfassbar als:

- Bewegungsenergie (Beispiel Autounfall, Wirbelsturm)
- potentielle Energie (z.B. Sturz, Wasserfall)
- Wärme, wobei aber oft Temperatur gemeint wird

Das ist nicht erstaunlich, hat doch erst die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts einen umfassenden, für alle Gebiete - Mechanik, Thermodynamik, Elektrodynamik und Chemie - gültigen Energiebegriff definiert und die entsprechenden Naturgesetze erkannt. Diese sind das Energieerhaltungsprinzip, das sagt, dass bei Umwandlung von Energie in verschiedene Formen die Gesamtenergie stets konstant bleibt (1. Hauptsatz der Thermodynamik) und der 2. Hauptsatz, der die "Qualität" der Wärmeenergie präzisiert (Entropie).

Unser Jahrhundert brachte dann neue Dimensionen durch die Äquivalenz von Energie und Masse ($E = m \cdot c^2$, Kernenergie) und durch die Quantisierung der Energie des Lichtes ($E = h \nu$, Laser, Solarzellen).

Energie ist also der zentrale Faktor für alle Vorgänge in der Natur. Ohne Energie würde im Universum oder auf der Erde keine Evolution stattfinden. Evolution (von selbst) bedeutet in der Tat immer die Umwandlung von Energie von einer Stufe hoher zu tieferer Qualität.

Energie in der Natur

Das Weltall mit unserem Sonnensystem besteht überwiegend aus Wasserstoff (resp. Plasma), und die alles dominierende Energieform ist die **Gravitation**.

Im Weltall ist die Evolution bestimmt durch **nukleare Prozesse**, die die Wirkung der Gravitation verzögern. Die Prozesse der Sternbildung und der Elementsynthese sind heute bekannt.

● Das Beispiel Sonne:

Nach einigen 100 Millionen Jahren der Kontraktion begann die Kernfusion des Wasserstoffs zu Helium. Dieser Prozess findet schon seit Milliarden Jahren statt und wird noch lange dauern. Schliesslich wird nach Aufbrauchen der "verbrennbaren" Elemente die Sonne als sog. Weisszer Zwergstern enden. Der Mensch kann

also für "ewig" auf den braven, weit entfernten Kernfusionsreaktor Sonne zählen. Anders wäre es gegangen, wenn die Sonne nur etwas schwerer gewesen wäre: Sie hätte nach dem "Verbrennen" aller leichten Kerne in ihrem Schwerfeld kollabiert - eine Supernova-Explosion, wie sie 1987 in den Magellanschen Wolken unserer Galaxie beobachtet werden konnte.

● **Energieumsatz der Erde:**

Im Gegensatz zu anderen Himmelskörpern besteht die Erde vor allem aus schwereren Elementen. Wasserstoff ist fast nur im Wasser der Weltmeere enthalten. Als einziger Planet des Sonnensystems hat die Erde zudem eine Atmosphäre, die durch biologische Vorgänge gebildeten Sauerstoff enthält. Dies ermöglicht erst die heutige Vielfalt des Lebens, ist aber auch die Voraussetzung, um Energie durch Chemie umzusetzen, eine Energieform, die es im Universum sonst nicht gibt und auch auf der Erde nur einen ephemeren Charakter haben wird. Das heisst, dass die heutige Nutzung der fossilen Brennstoffe nur ein relativ kurzes "Freuden"-feuer sein wird, gemessen an der Skala der menschlichen Kulturen von Jahrtausenden. Langfristig wird auch der Mensch nur mit nuklearer Energie auskommen müssen, d.h. mit der Sonne (Fusion) und wahrscheinlich selbst gewonnener Fissions- oder Fusionsenergie. Andere Alternativen gibt es nicht.

Die Energie auf der Erde hat drei Quellen:

- Die Strahlung der Sonne
- Gezeitenenergie (von der Rotationsenergie der Erdkugel geliefert)
- Geothermie (Aufheizung durch Radioaktivität und Restwärme)

Gezeitenenergie und Geothermie sind verglichen zur Sonnenstrahlung vernachlässigbar (nur Bruchteile von Promille) und werden nur lokale Bedeutung für die Energiegewinnung haben können. Diesen Energien steht als Verlustquelle die Abstrahlung der Erde im Infrarotbereich gegenüber. Die Bilanz von zugeführten Energien und Abstrahlung führt zur mittleren Temperatur der Erdkugel - ein delikates Gleichgewicht. Wir haben begonnen, dieses Gleichgewicht zu manipulieren, hauptsächlich, aber nicht nur, durch Verbrennen von fossilen Brennstoffen (Treibhauseffekt).

Zusätzlich zu diesen natürlichen Energien hat der Mensch aber gelernt, andere Energieformen zu erschliessen:

Prozess		seit	bis *)
Chemisches Feuer (von Sonne)	Holz	jeher	nur quantitativ begrenzt
	Kohle	1800	noch Jahrhunderte
	Oel, Gas	1930	noch Jahrzehnte
Nukleares "Feuer"	Uran-Fission	1950	noch Jahrzehnte
	Brüter (U, Th) Fusion (D, T)	1980 2040?	Jahrtausend praktisch unbegrenzt
Sonne indirekt	Wasserkraft, Wind	1500	zeitlich unbegrenzt aber
	Wärme, Elektrizität	1980	räumlich und zeitlich unregelmässig und quantitativ begrenzt
direkt			

* Die Nutzungsdauer ist hier nur eine grobe Grössenordnung geschätzt auf der Basis des heutigen Verbrauchs, der Mischung der Energieträger und der bekannten Ressourcen (siehe einzelne Kapitel für genauere Angaben)

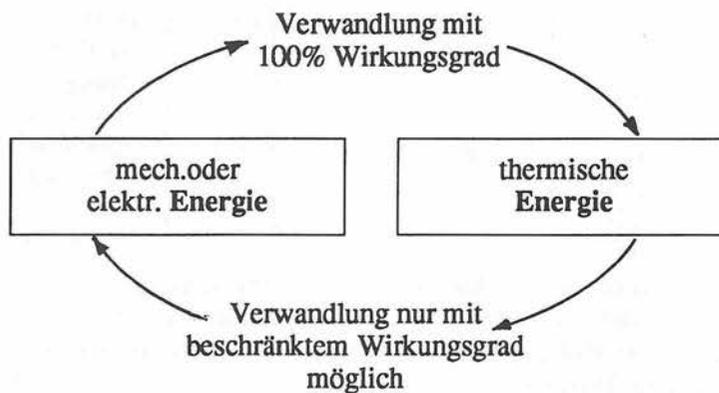
Qualität der Energie

Wegen des Energieerhaltungsprinzips gibt es im Grunde genommen weder Energie-"Quellen" noch einen Energie-"Verbrauch". Was tut der Mensch dann, wenn er Energie "nutzt"? Er wandelt Energie um. Bei dieser Umwandlung nimmt die Qualität der Energie jedoch immer ab (Begriff der Entropie in der Thermodynamik).

Als weitere Schwierigkeit kommt hinzu, dass die Energie für uns nicht absolut, sondern nur relativ zum Bezugssystem oder zur Umgebungstemperatur definiert ist. Unser Gefühl ist deshalb ein sehr schlechter Ratgeber. Beispiele:

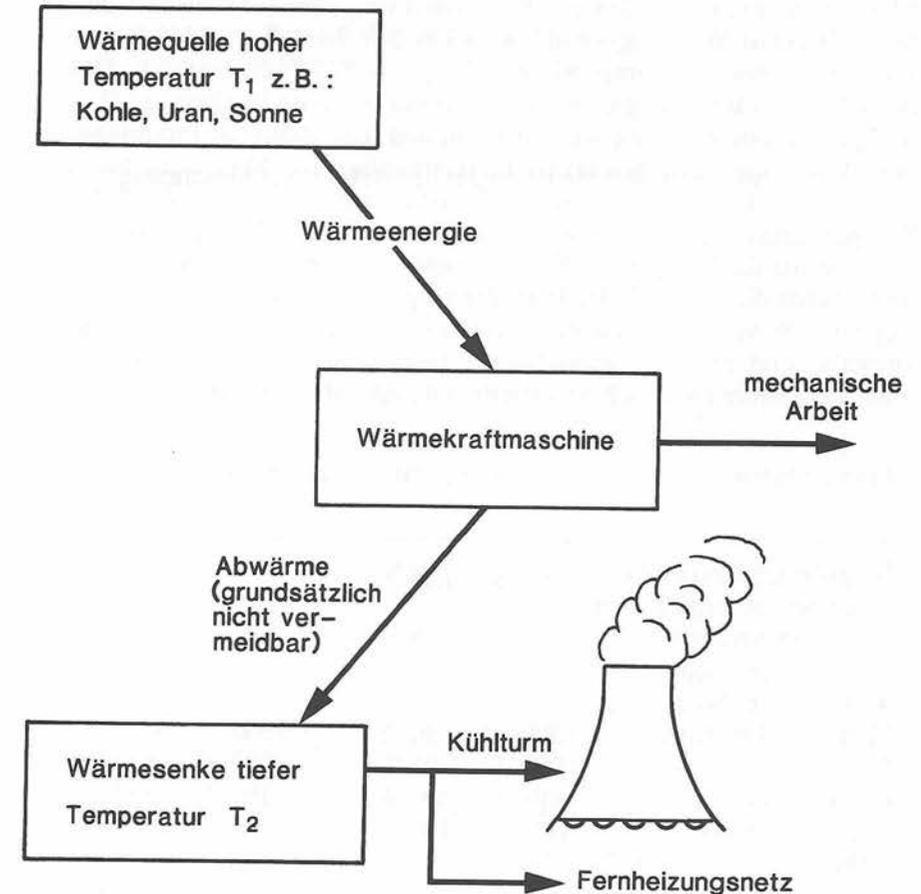
- **Bewegungsenergie:** Ein Flobertschuss hat genügend Energie um zu töten. Einem Flugzeug nachgeschossen, erreicht er dieses aber nicht, dafür sind jetzt die Passagiere grosskalibrige Geschosse!
- **Potentielle Energie:** 1 kg Wasser aus einem Stausee hat verschiedenen Energieinhalt, je nachdem, wohin es gelangt: bis ins Tal, nach Basel oder zum Meer.

Besonders wichtig ist dieses Problem bei der **Wärmeenergie**. Diese ist zwar eigentlich mechanische Energie der molekularen Temperaturbewegung aller Materie. Sie ist aber "ungeordnet" auf atomarem Niveau. Daher ist uns grundsätzlich Information darüber verwehrt. Das führt zum zentralen Punkt der Wärmelehre, dem 2. Hauptsatz, den man durch folgendes Schema veranschaulichen kann:



Mechanische und elektrische Energie haben also eine hohe Qualität, thermische Energie eine geringere. Die Konversion von thermischer in hochwertige Energie ist grundsätzlich beschränkt.

Betrachten wir zur Illustration ein thermisches Kraftwerk zur Erzeugung von elektrischer Energie:



Energiefluss eines thermischen Kraftwerkes: Wärme wird dem Heizkessel der Temperatur T_1 entnommen und mit der Wärmekraftmaschine (z.B. Turbine) z.T. in mechanische Arbeit (Elektrizität) ver-

wandelt. Auf Grund des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik wird dabei unvermeidbar Abwärme, z.B. in einem Kühlturm an die Umgebung abgegeben (Temperatur T_2). Der im Idealfall mögliche (Carnot-) Wirkungsgrad, d.h. das Verhältnis der geleisteten Arbeit pro verbrauchte Wärme ist $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$. Beispiel: $T_1 = 500 \text{ K}$, $T_2 = 300 \text{ K}$ $\eta = 40 \%$, 60% geht als Abwärme verloren.

Der grösstmögliche Wirkungsgrad (d.h. bei perfekten und verlustfreien Maschinen), mit dem Wärme in Elektrizität umgewandelt werden kann, heisst "Carnot-Wirkungsgrad", wobei er den Wert $(T_1 - T_2) / T_1$ hat. Für T sind absolute Temperaturen ($T_{\text{celsius}} + 273 \text{ }^\circ$) einzusetzen. Das heisst, dass Wärmeenergie grundsätzlich nur teilweise in Energie höherer Qualität umgewandelt werden kann, und dass dabei die Produktion von Abwärme naturgesetzlich unvermeidbar ist. Man sieht auch, dass thermische Energie umso besser konvertierbar ist, je grösser die Temperaturdifferenz ist z.B. zwischen Dampfkessel und Umgebung.

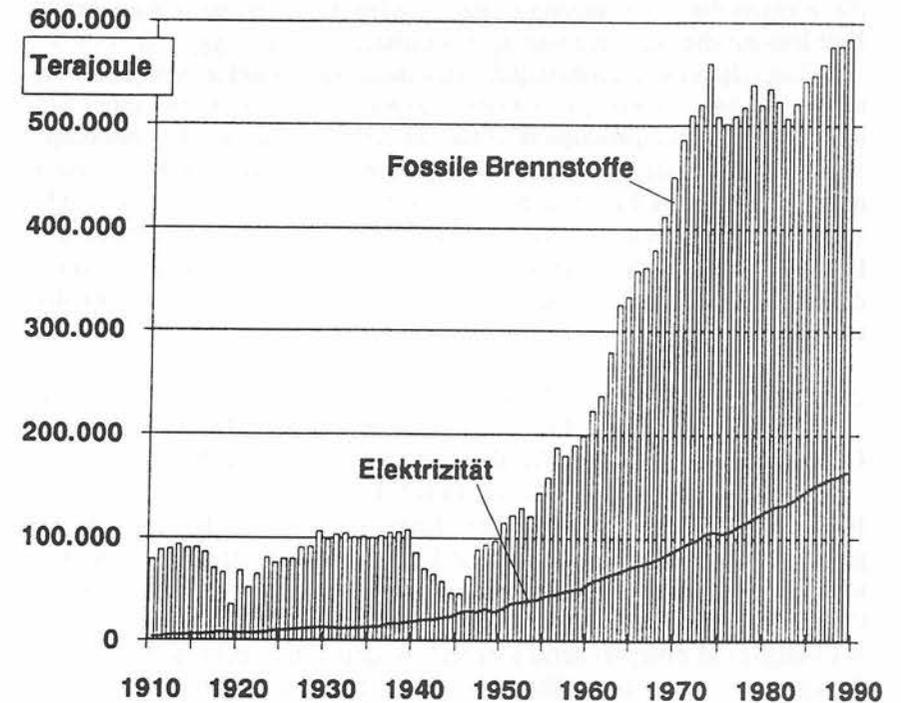
Leider ist die Temperatur T_1 bei einem Kraftwerk meist bei weitem nicht durch die Qualität der Primärenergie begrenzt, sondern in der Regel durch Materialprobleme rein technischer Art. In der Tabelle wird vereinfachend die ideal erreichbare "Temperatur und der Wirkungsgrad" dem heute technisch Realisierbaren gegenübergestellt.

Energieform	Temperaturen und Wirkungsgrade			
	ideal		praktisch	
Umgebungswärme bei Umgebungstemperaturen	20 °C	0 %		
Umgebungswärme tiefer Temperaturen (Geothermie, Solar)	100 °C	25 %	100 °C	<10 %
Chemisch(Oel/Luft)	1500 °C	80 %	500 °C	40 %
Sonne	6000 °C	95 %	400 °C	40 %
Kernenergie	$10^{12} \text{ }^\circ\text{C}$	100 %	350 °C	35 %
Hochtemperaturreaktor	$10^{12} \text{ }^\circ\text{C}$	100 %	900 °C	60 %

Die elektrische Energie hat eine ganz besondere Bedeutung. Neben der mechanischen Energie besitzt sie maximale Qualität und ist in alle anderen Formen konvertierbar. Im Gegensatz zur ersteren ist sie aber

leicht transportierbar und als einzige in der Lage, die moderne Technologie mit Energie zu versorgen (Computer, Fernsehen, Audiogeräte, medizinische Geräte, usw.). Elektrizität ist also eine Schlüsselenergie, muss aber, wenn sie nicht aus Wasserkraft gewonnen wird, aus Wärmeenergie gewonnen werden, dies mit einem Wirkungsgrad von nur etwa 1/3. Bei gleichem Energieinhalt ist Elektrizität deshalb dreimal mehr wert als z.B. Oel. In gewissen Energiebilanzen sollte daher elektrische Energie mit einem Faktor drei eingehen.

Die besondere Bedeutung der Elektrizität wird auch aus den Verbrauchskurven auf der nächsten Figur deutlich.



Quellen: Bundesamt für Energiewirtschaft/Schweiz, Nationalkomitee des Weltenergieverbrauches.

Energieverbrauch der Schweiz: Der Energieverbrauch zeigt einen zeitlich starken Anstieg. Der Verbrauch an fossilen Brennstoffen ist dabei starken Schwankungen unterlegen, wogegen der Elektrizitätsverbrauch (Schlüsselenergie) kontinuierlich zunimmt.

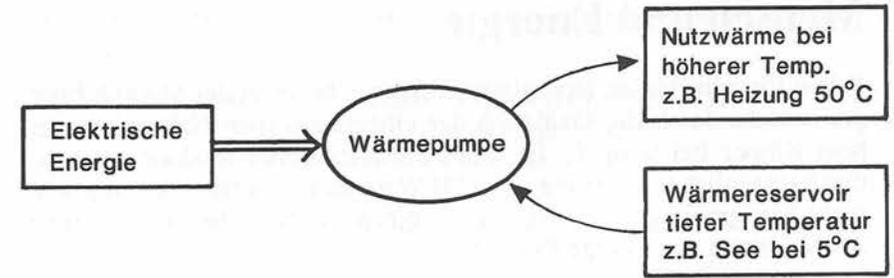
Während bei den fossilen Brennstoffen Ereignisse wie die zwei Weltkriege und die Oelkrise zu drastischen Reduktionen führten, entspricht der Verbrauch an elektrischer Energie einer unbeeinträchtigt um 2 - 3 % pro Jahr steigenden Kurve. Dieses "unelastische" Verhalten zeigt, dass die elektrizitätsspezifischen Anwendungen zunehmend wichtig werden und praktisch nicht mit anderen Energieträgern zu erbringen sind. Dies wird auch Sparmassnahmen sehr schwierig machen, ganz im Gegensatz zum fossilen Verbrauch, bei dem bei Heizung und Verkehr eine grosse Elastizität besteht, wie die Kurve zeigt. Für die spezifischen Anwendungen der Elektrizität ist aus den oben angeführten Gründen der Strom dreimal mehr wert als die gleiche fossile Energiemenge, was den Schlüsselcharakter illustriert. Wie in der Zukunft die elektrische Energie produziert werden kann, ist also das zentrale Problem für die Schweiz wie auch weltweit.

Schliesslich ist noch darauf hinzuweisen, dass immer dann eine Verschwendung von Energie vorliegt, wenn damit Wärme bei einer kleineren Temperatur produziert wird, als der Qualität des Energieträgers entspricht. Das ist technisch im Kraftwerk nicht vermeidbar, wäre es aber im täglichen Leben sehr oft. So ist eine direkte elektrische Heizung eigentlich nicht vertretbar, weil 2/3 der im Kraftwerk eingesetzten Energie nutzlos verschwendet wird. Die energetisch richtige Lösung ist die direkte Nutzung der Abwärme des Kraftwerkes in einem Fernheizungsnetz.

Zweitbestes Vorgehen ist die Umkehrung des Prozesses im Kraftwerk:

Die **Wärmepumpe**. Dazu wird mit Einsatz hochwertiger Energie Umgebungswärme von tiefer Temperatur auf höhere gebracht.

Die an sich wertlose Wärme tiefer Temperatur des Sees wird mit Hilfe hochwertiger elektrischer Energie auf ein höheres Niveau gebracht, dies umso wirksamer, je kleiner die Temperaturdifferenz ist, um die "gepumpt" werden muss. (Wird die Wärmepumpe mit thermischer Energie angetrieben, z.B. mit einem Gasmotor, ist der Wirkungsgrad entsprechend kleiner). In den heute technisch möglichen Anlagen ist man ungefähr "energieneutral", d.h. man gewinnt mit Umgebungswärme gerade etwa die Energie zurück, die man bei der Produktion der Elektrizität für die Wärmepumpe im thermischen Kraftwerk als Abwärme verloren hat.



Wärmepumpe: Die mechanisch (elektrisch) angetriebene Wärmepumpe entnimmt der Umgebung Wärme (Temperatur T_2) und bringt diese zusammen mit der verbrauchten mechanischen Arbeit ins Reservoir der höheren Temperatur T_1 . Der theoretisch mögliche "Wirkungsgrad", das Verhältnis der abgegebenen Wärme zur verbrauchten mechanischen Energie, beträgt: $\eta_{ideal} = T_1 / (T_1 - T_2)$. Für unser Beispiel: $\eta_{ideal} = 7.1$, d.h. pro kWh verbrauchte Arbeit erhält man im Idealfall mit der Wärmepumpe 7.1 kWh Wärme.

Mensch und Energie

Schon für seine blosse biologische Existenz benötigt der Mensch Energie, welche durch die Oxidation der eingenommenen Nahrung in seinem Körper frei wird. Er ist somit ein chemischer Reaktor mit einer durchschnittlichen Leistung von 100 Watt. Bei stärkerer Aktivität wird mehr Energie umgesetzt, aber der in mechanische Arbeit überführbare Anteil beträgt nur wenige Prozent:

Aktivität	Metabolische Leistung Watt	Davon mechanische Leistung Watt
Schlafen	100	0
Sitzen	120	0
Laufen (9km/h)	700	100
Last ziehen	150-1200	20-120
Velofahren	200-800	50-200
Höhere Werte nur kurzzeitig		

Als natürliche Energiequelle steht die Sonnenenergie zur Verfügung, in unseren Breitengraden durchschnittlich (über Tag und Nacht gemittelt) etwa 120 W/m^2 , in südlichen Ländern bis 250 W/m^2 . Es ist unter Berücksichtigung des Umwandlungswirkungsgrades in chemische Energie durch Photosynthese der Wälder und Pflanzen (Mittelwerte von der Grössenordnung Promille) leicht ableitbar, dass die Bevölkerungsdichte aus energetischen Gründen auf wenige Personen pro km^2 beschränkt wäre. Eine höhere Bevölkerungsdichte benötigt intensivierete Nahrungsbeschaffung, umfangreiche Transporte und deshalb zusätzliche Energie.

Dazu kommt aber noch der Bedarf an anderen Energiedienstleistungen:

Dienstleistungen	End-Energiebedarf pro Person und Jahr in MJ	
	Entwicklungsland	Schweiz
Nahrung	3000 - 4000	4000
Kochen, Haushalt	1000 - 2000	6000
Heizen	0 - 4000	40000
Transport	400 - 1000	30000
Gewerbe, Industrie	600 - 7000	28000
Total	5000 - 18000	108000

Es ist eine empirische Feststellung, dass der Energiebedarf pro Person mit steigender Bevölkerungsdichte stark wächst.

	BSP*/Kopf \$/Jahr	Primärenergie/Kopf MJ/Jahr
Entwicklungsländer	250	7000
Schwellenländer	1200	35000
Früherer Ostblock	2500	140000
OECD-Staaten	12000	150000

* BSP: Bruttonationalprodukt

Wirtschaftskraft ist notwendig für ein menschenwürdiges Dasein bei hoher Bevölkerungsdichte, aber auch für den Umweltschutz. Erst ab einem gewissen zivilisatorischen Niveau ist eine weitere Entwicklung ohne Energiezunahme möglich (qualitatives Wachstum); dies ist seit etwa einem Jahrzehnt in Industrieländern zu beobachten (der Gesamtenergiebedarf pro Kopf nimmt ab, der Elektrizitätsbedarf aber zu!). Aus physikalischen Gründen ist aber für Materialherstellung, Transport, Lebensmittelkonservierung, Heizung bei weitem nicht eine gleich drastische Reduktion des spezifischen Energiebedarfs wie in den Sektoren Informatik und Kommunikation möglich.

Für den Einsatz der Energie bestehen zwei fundamentale Anforderungen:

- Zeitliche und örtliche Verfügbarkeit

welche zu zwei Schlüsselproblemen führen:

- Speicherung und Transport von Energie

Für die Speicherung ist chemische Energie ideal (z.B. Holz, Kohle, Erdöl und Erdgas).

Früher bot der Energietransport erhebliche Schwierigkeiten. Deshalb war die Standortnähe eine wesentliche Bedingung für die Wirtschaftsblüte.

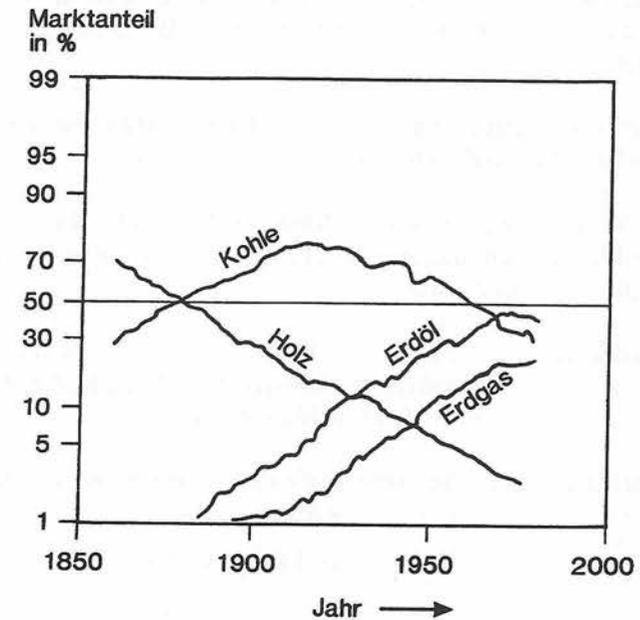
Die leichtere Transportierbarkeit ist ein wichtiger Grund für den Aufschwung von Erdöl und Erdgas; ideal für den Transport bis zur Feinverteilung ist aber die Elektrizität wegen der unerhörten Transportschnelligkeit, der Unterhaltsfreiheit, der hervorragenden Umweltschonung, der leichten Möglichkeit zu Verzweigungen und raschen Einschaltungen. Sobald aber ein zusätzlicher Verbraucher sich in das Netz einschaltet, muss die notwendige zusätzliche Stromproduktion ins Netz eingespiessen werden. Aus physikalischen Gründen muss Angebot und Nachfrage gleich sein. Das setzt in der Praxis die Bereitstellung einer Kapazitätsreserve voraus.

Fossile Energieträger

Fossile Energieträger bestreiten in der Vergangenheit den Grossteil des Weltenergiebedarfs, und sie werden dies mit Sicherheit noch weit ins 21. Jahrhundert hinein tun.

Energieträger	Anteil am Weltverbrauch in % (primär)	
	1980	WEK* 2020
Kohle	23	31
Erdöl	40	29
Erdgas	17	18
Total fossile	80	78

* Weltenergiekonferenz



Die dominanten Energieträger haben sich in den letzten Jahrhunderten abgelöst, wobei neue Träger jeweils Vorteile brachten. Der Uebergang vom Holz- zum Kohle-, Oel- und Gasenergiezeitalter erfolgt nach logistischen Gesetzmässigkeiten und dauert jeweils rund 100 Jahre. Die Abbildung zeigt diesen Vorgang in einem entsprechenden nichtlinearen Massstab.

Dabei haben sich die dominanten Energieträger im Laufe der letzten Jahrhunderte abgelöst, weil eine neue Technik jeweils Vorteile bezüglich Handhabung oder Preis bot, und zwar geschah dies interessanterweise jeweils nach logistischen Wachstumskurven. Somit dauerte es stets etwa 100 Jahre, bis ein neuer Energieträger seine maximale Marktdurchdringung erreichte. Dies muss beachtet werden bei der Beurteilung neuer Energiesysteme, deren Einführungszeit trotz aller Anstrengung nicht kürzer sein dürfte.

Dabei bedeuten natürlich 30 % Energiemarktanteil im Jahre 1900 oder 2000 jeweils einen ganz anderen absoluten Wert, denn die Welt-Primärenergienachfrage nahm in der Vergangenheit um mehr als 3 % pro Jahr zu; auch in Zukunft dürfte sie infolge der Bevölkerungszunahme um 1 bis 2 % pro Jahr weiter ansteigen.

Es ist auch zu beachten, dass in das globale Energiesystem grosse Summen investiert sind, und jährlich werden für Erneuerung, Verbesserung und Erweiterung etwa 1 % des Welt-Bruttosozialproduktes aufgewendet.

Die Energieversorgung mit fossilen Brennstoffen ist zwar beschränkt, aber noch auf viele Jahrzehnte gesichert.

Mit der Verwendung fossiler Brennstoffe sind aber schwere Umweltprobleme verbunden, wobei sich die Schadstoffe in drei Hauptkategorien einteilen lassen:

Hauptschadstoffe: Partikel, Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NOX), Kohlenwasserstoffe ohne Methan (HC)

Spezielle Schadstoffe: Schwermetalle (z.B. Blei), Polyaromate, Dioxine etc., Radioaktivität

Treibhausgase: Kohlendioxid CO₂, Methan

Die verschiedenen Schadstoffe lassen sich so den fossilen Energieträgern zuordnen (es sind nur die Emissionen beim Betrieb der Anlagen berücksichtigt).

	Vorkommende Schadstoffemissionen									
	Partikel	CO	SO ₂	NOX	HC	Aromate	Metalle	Radioakt.	CO ₂	Methan
Benzinmotor		x		x	x		x		x	
Dieselmotor	x		x	x	x	x			x	
Gasmotor				x	x				x	x
Kohlekraftwerk	x		x	x				x	x	x
Ölkraftwerk			x	x					x	
Gaskraftwerk				x					x	x
Ölheizung			x	x					x	
Gasheizung				x					x	x
Kernkraftwerk								x		

Die Schadenswirkungen sind vielfältig:

- Akuter Tod (CO, Dioxine)
- Krankheit der Atemorgane (Partikel, NOX und HC via Ozon)
- Krebs (Polyaromate, Radioaktivität)
- Pflanzenschädigung (Wald, Landwirtschaft) (SO₂, NOX, HC, Metalle)
- Fischereieinbusse (SO₂, Metalle)
- Materialangriff (SO₂, NOX)
- Treibhauseffekt (CO₂, Methan)

Eine wesentliche Erschwerung der Umweltproblematik liegt darin, dass man oft die Aufmerksamkeit jeweils nur einem bestimmten Schadstoff zuwendet, statt die ganze Schadstoffpalette zu überschauen. Früher waren dies zunächst Partikel und CO, später SO₂ ("saurer Regen"), während heute die Stickoxide ("Waldsterben", "Smog") im Mittelpunkt stehen. Eine selektive Wahrnehmung ist aber gefährlich, weil eventuell falsche Massnahmen ergriffen werden (wegen der Russbildung wurden neue heisse Ölbrenner eingeführt, welche viel mehr NOX produzieren), weil einseitig vorgegangen wird (der Sekundär-Schadstoff Ozon rührt von den NOX und von den HC her, wobei letztere diesbezüglich wichtiger sind und vorrangig beseitigt werden müssen) und weil die begrenzten Mittel so falsch eingesetzt werden.

Bezüglich des CO₂-Ausstosses unterscheiden sich die fossilen Brennstoffe je nach dem C-Anteil im Brennstoff und je nach dem

wichtiger sind und vorrangig beseitigt werden müssen) und weil die begrenzten Mittel so falsch eingesetzt werden.

Bezüglich des CO₂-Ausstosses unterscheiden sich die fossilen Brennstoffe je nach dem C-Anteil im Brennstoff und je nach dem Heizwert. Pro MJ Energie, welches bei der Verbrennung frei wird, resultieren an CO₂:

Braunkohle	120 gr CO ₂ /MJ
Steinkohle	100 gr CO ₂ /MJ
Erdöl	80 gr CO ₂ /MJ
Erdgas	50 gr CO ₂ /MJ

Nun ist aber neben CO₂ auch Methan ein sehr gefährliches Treibhausgas (unter Berücksichtigung der kürzeren Lebensdauer pro kg immer noch 20 mal wirksamer als CO₂); die Substitution von Kohle durch Erdgas ist also nur dann vorteilhaft, wenn durch Lecks im Gassystem (vom Gasfeld via Pipeline bis zur Feinverteilung) weniger als 1 bis 2 % des Gases verloren geht.

Es darf nun aber darauf hingewiesen werden, dass alle Schadstoffemissionen der fossilen Energieträger (ausser dem CO₂) im Prinzip durch verbesserte Technik eliminiert werden können. Ist der entsprechende politische Wille vorhanden, so ist durch Ingenieurkunst mit vertretbarem Aufwand fast jedes Niveau erreichbar, doch ist zur Entwicklung und weitverbreiteten Durchsetzung stets eine bedeutende Zeitspanne (Jahrzehnte) erforderlich. In der Tat wurden bereits spektakuläre Verbesserungen erzielt, so bei Staub, CO, SO₂ und bei den NOX.

Eine Ausnahme macht das CO₂, für welches die möglichen Entsorgungsverfahren (Einpressen in leere Gasfelder, Versenken im tiefen Meer, Herauswaschen aus den Rauchgasen) bestenfalls einen beschränkten Beitrag liefern könnten.

Es hat sich deshalb die Erkenntnis durchgesetzt, dass wegen des Treibhauseffektes gar nicht alle Vorräte an fossilen Energieträgern verbrannt werden dürfen. Somit ist das Energieproblem weit weniger ein Ressourcenproblem, sondern vielmehr ein Umweltproblem.

Energie aus dem Natur-Kreislauf

Die Energie, welche aus dem Kreislauf der Natur für menschliche Zwecke abgezweigt wird, stammt bis auf die Geothermie letztlich von der Sonne. Dazu zählen die Wasserkraft, Windenergie, Umgebungswärme und Biomasse.

Wasserkraft

Treibende Kraft für die Wasserkraftnutzung ist die Gravitation. Da sie eine sehr schwache Kraft ist, sind die zur Nutzung im technischen Massstab benötigten Wassermassen und Höhendifferenzen recht gross: Um 1 kWh Arbeit zu leisten, muss 1 m³ Wasser 360 m fallen. Zum Vergleich: 0.1 l Benzin hat ebenfalls einen Energieinhalt von 1 kWh (Verbrennungswärme). Wenn Wasserkraftwerke trotzdem rentabel sind, so hängt das damit zusammen, dass die "Kollektoren" der Hydroenergie, d.h. Bäche und Flüsse, wie auch die Speicher, d.h. z.B. Bergtäler, die mit Wasser gefüllt werden, in der Natur fast gratis zur Verfügung stehen. Die Kosten für das "Einsammeln" und den Transport der Energie zum Kraftwerk beschränken sich auf den Bau von Staumauern oder Stauwehren und Kanälen oder Rohrleitungen. Es ist das Grundproblem der Sonnenenergienutzung, dass in den weitaus meisten Fällen Kollektoren und Speicher technische Objekte sind, die - anders als bei der Wasserkraft - Material, Energie und Arbeit für ihren Bau erfordern.

Die Bedeutung der Wasserkraft ist für die Schweiz gross, im Unterschied zu manch anderen Ländern Europas. Nicht viele sind in dieser Hinsicht von der Natur so grosszügig beschenkt worden wie die Schweiz.

Windenergie

Windräder jeglicher Bauart zapfen die Bewegungsenergie (kinetische Energie) eines Luftstromes an, indem sie ihn abbremsen. Daraus resultiert eine mechanische resp. elektrische Nutzleistung, welche von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit v abhängt. Ein Hauptproblem der Windenergienutzung ist nun gerade diese v^3 -Abhängigkeit der Leistung. Ist eine Anlage z.B. auf 100 kW elektrische Leistung ausgelegt, so liefert sie bei halber Auslegegeschwindigkeit nur noch 1/8 d.h. 12.5 kW, während bei doppelter Windgeschwindigkeit eigentlich

800 kW zur Verfügung stünden. Davon können aber nur 100 kW genutzt werden (wenn nicht die Maschine aus Sicherheitsgründen gar abgestellt werden muss).

Voraussetzung für eine kostengünstige Nutzung dieser Energieform sind also stetige Winde, die über lange Zeit mit optimaler Geschwindigkeit wehen. Wichtig sind auch einfache Speicher- oder Puffermöglichkeiten, wie sie bei den althergebrachten Anwendungsgebieten, wie z.B. Bewässerung, vorhanden sind. Stromerzeugung erfolgt heute vorzugsweise mit dem Netz als Puffer resp. Speicher.

Einen wesentlichen Vorteil hat die Windenergie mit der Hydroenergie gemeinsam: Auch hier wird hochwertige **mechanische Energie** gratis am Standort des Kraftwerkes angeliefert. Dies ist wiederum die Basis dafür, dass Windanlagen an günstigen Standorten kostengünstig produzieren.

Erdwärme

In einer Erdbohrung nimmt die Temperatur mit zunehmender Tiefe zu und zwar in der Schweiz zwischen 10 bis 45 °C/km (sogenannte geothermische Tiefenstufe). Es muss deshalb ein dauernder Wärmefluss aus dem Erdinnern an die Oberfläche und von dort in die Atmosphäre stattfinden. Seine Hauptquelle bildet die Zerfallswärme radioaktiver Isotope. In der Schweiz beträgt der Fluss im Mittel 0.08 W/m², die Maximal- und Minimalwerte liegen je etwa um einen Faktor 2 höher resp. tiefer.

Soll die Geothermie eine wirklich erneuerbare Energiequelle sein, so kann man nicht mehr als diesen Wärmefluss nutzen. Da die Schweiz eine Fläche von etwa 40'000 km² hat, beträgt diese obere Grenze höchstens 3.2 GW. Fachleute schätzen den technisch (d.h. ohne Rücksicht auf Kosten) nutzbaren Anteil auf 2.5 - 4 % des heutigen Endverbrauches an fossiler Energie. Wird aus Kostengründen einer Erdwärmequelle mehr Wärme entnommen, als kontinuierlich nachgeliefert wird, so kühlt sie aus. Das Wärmereservoir wird wieder aufgefüllt, wenn die Nutzung eingestellt wird.

Die Nutzung erfolgt auf verschiedene Weise:

- Erdsonden, die 50 - 300 m in den Boden reichen, produzieren Niedertemperaturwärme. Die Wärme wird in Wärmepumpen zur Heizung und Warmwasserbereitung verwendet.

- Erbohrung von warmen Tiefenwässern. Sie ist insofern günstig, als auch hier wieder Wärme eines grossen Einzugsgebietes gratis gesammelt und mit einer einzigen Bohrung erschlossen werden kann. Nutzung je nach Temperatur direkt oder mit Wärmepumpen.
- Tiefe Geothermie ist eine Technik im Versuchsstadium zur Nutzung der Erdwärme im trockenen kristallinen Gestein bis ca. 7 km Tiefe.
- Es gibt im Ausland vereinzelte Orte, wo Bohrungen so heisse Quellen erschliessen, dass der austretende Dampf direkt zum Betrieb von Dampfturbinen gebraucht werden kann (Beispiel: Kraftwerk von Lardarello, Italien). Hauptproblem ist der hohe Gehalt an gelösten Mineralien, der sowohl technische Schwierigkeiten (Ablagerungen) wie auch Umweltprobleme macht.

Umgebungswärme

Umgebungswärme ist Sonnenenergie, die in der Luft, im Wasser und in den obersten Bodenschichten gespeichert ist. Die zur Verfügung stehenden Energiemengen sind gross, aber - da sie bei Umgebungstemperatur anfallen - qualitativ nichts wert und deshalb nicht direkt brauchbar. Die Wärme muss mit Wärmepumpen auf Nutztemperatur angehoben werden. Die Nutzung wird bisher hauptsächlich begrenzt durch Kosten und technische Probleme (z.B. grosse Wärmetauscherflächen), zum Teil auch durch Rücksicht auf die Umwelt.

Biomasse

Biomasse ist chemisch gespeicherte Sonnenenergie. Der Wirkungsgrad von Pflanzen als Sonnenkollektor beträgt im Weltjahresmittel etwa 0.1 %, unter optimalen Wachstumsbedingungen maximal etwa 10 %. Pflanzen entziehen der Atmosphäre bekanntlich CO₂. Sie konzentrieren es dabei um einen Faktor von mehr als 2 Millionen. Das Blatt ist u.a. ein erstaunlich guter "selektiver CO₂-Kompressor"!

Beim Anbau von Pflanzen für die energetische Nutzung ("Energieplantagen") stellt sich sehr oft die Streitfrage, was höhere Priorität hat, Nahrung oder Energie. Sie kann nicht generell, sondern nur im konkreten Fall entschieden werden. Häufig wird Nahrung allerdings wichtiger sein.

Neben der traditionellen Verbrennung stellen Vergasung, Verflüssigung und die Herstellung von Methanol sowie höheren Alkoholen moderne Nutzungsarten von Biomasse dar.

Für die Schweiz ist Holz die wichtigste Form von Biomasse. Dabei geht es um Energieholz aus dem Wald, Holzabfälle und Altholzverwertung. Eine begrenzte Bedeutung kommt auch der Biogasproduktion z.B. aus Jauche oder Faulschlamm zu.

Potential erneuerbarer Energien

Es ist bekannt, dass rund 60 % des Schweizer Stromverbrauchs durch Wasserkraftwerke gedeckt werden. Ihre Bedeutung steht ausser Frage. Weniger klar sind die möglichen Beiträge der übrigen erneuerbaren Energien. Die obere Grenze des Potentials ist an sich beachtlich gross.

Die bis ins Jahr 2010 erreichbaren Beiträge zur Energieversorgung bewegen sich auch unter günstigen Voraussetzungen im Rahmen von einigen wenigen Prozenten des heutigen Energieverbrauches (vgl. dazu Tab. Potentiale und mögliche Beiträge).

Potentiale und mögliche Beiträge (Schweiz) ¹							
Energieform	Potential PJ/Jahr		Beitrag 2000 ³ PJ/Jahr		Beitrag 2010 ³ PJ/Jahr		
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Holz	40	75	12	15	12	22	
Wärme ²	63	105	1.7	3.3	7.9	14	
Strom, (Sonne)	39	65	1.2	1.6	4.1	6.2	
Strom, (Wind)	1	3					
Zum Vergleich:							
Endenergienutzung		766 PJ/Jahr					
davon Strom		160 PJ/Jahr					

1) "Neue erneuerbare Energien, Analyse und Synthese von Originalstudien" EIR 1980

2) *Passive Sonnenenergienutzung (Architektur) Sonnenkollektoren, Umgebungswärme, Geothermie, Biomasse (ohne Holz)*

3) *Maximalwerte: Keine kostenbedingte Wachstumsbeschränkung
Minimalwerte: Unter Berücksichtigung von 500 Mio. Fr./Jahr Investitionsbeihilfen (Subventionen)*

Sonnenenergienutzung

Generelle Bemerkungen

Die Sonnenenergie hat eine Stärke und im wesentlichen drei Schwächen. Nur wenn man die Stärke ausnützt und die Schwächen so gut wie möglich zu umgehen sucht, hat die Sonnenstrahlung als Energiequelle eine Chance.

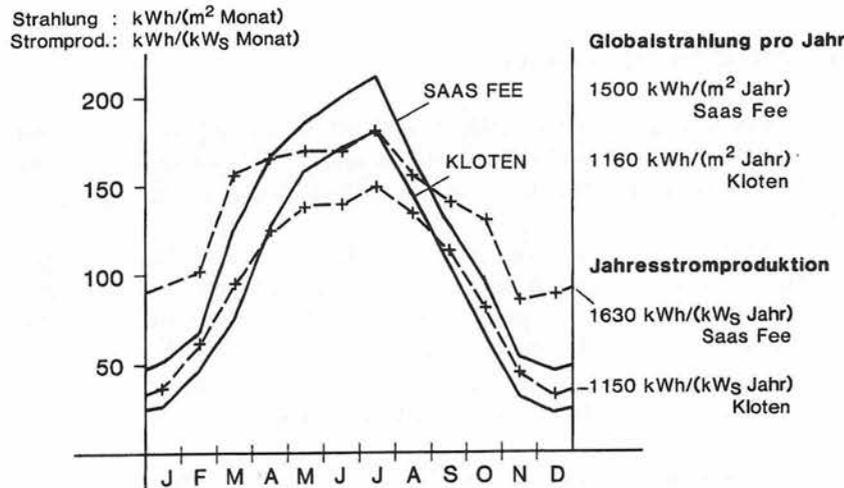
Die **Stärke** der Solarstrahlung ist ihre hohe Qualität. Das Spektrum der Strahlung widerspiegelt die hohe Oberflächentemperatur der Sonne von rund 6000 °C. Dieses Spektrum ermöglicht die Konstruktion photovoltaischer Zellen, die Existenz der Photochemie und das Erreichen von sehr hohen Temperaturen durch Konzentration der Strahlung (2000 °C sind mit mässigem Aufwand leicht zu erreichen).

Die drei **Schwächen** und die für ihre Umgehung zu lösenden Hauptprobleme sind:

- Die Solarstrahlung ist - technisch gesprochen - "dünn". Der maximale Energiefluss an der Erdoberfläche beträgt lediglich 1 kW/m² gegenüber sonst in der Technik üblichen Werten von der Grössenordnung MW/m². Die Strahlung führt in der Tendenz zu einem hohen Bedarf an Platz, Material, Energie und Arbeit um die Strahlung aufzufangen. Es ist deshalb für die Solartechnik wichtig, diesen Aufwand zu minimieren.
- Die Sonne scheint, mit variabler Intensität (Sommer/Winter; Tag/Nacht; Wolken), und vielfach nicht dann, wenn man sie am liebsten hätte. Das führt zur Notwendigkeit des Ausgleichs von Angebot und Nachfrage. Die **Speicherung** ist deshalb ein zentrales Problem der Sonnenenergienutzung. Dabei stellt die **saisonale Speicherung** ungleich härtere Anforderungen als die Tag/Nacht-Speicherung.

- Sonnenstrahlung ist nicht direkt speicherbar. Sie muss dazu erst in andere Energieformen umgewandelt werden.

Der Jahresverlauf der Sonnenenergie im Mittelland und in den Alpen ist in der folgenden Figur dargestellt.



Globalstrahlung (kWh/(m² Monat)) in Saas Fee und Kloten auf einer horizontalen Oberfläche. Die gestrichelte Kurve zeigt den jährlichen Ertragsverlauf für unter 45 ° nach Süden geneigte Solarzellen mit 1 kW Spitzenleistung (rund 10 m²).

Passive Sonnenenergienutzung

Unter passiver Sonnenenergienutzung versteht man bauliche Massnahmen, welche die auf ein Gebäude einfallende Strahlung so lenken sollen, dass sie im Idealfall im Winter und in den Uebergangszeiten zur Heizung beiträgt, ohne das Haus im Sommer zum Backofen zu machen. Ein anderer Zweig ist das sogenannte "Daylighting". Hier wird vor allem in Grossbauten (z.B. Bürobauten) versucht, durch geschickte Führung des Tageslichts die elektrische Beleuchtung auf ein Minimum zu beschränken.

Passive Sonnenenergienutzung ist also ein Teilgebiet des klima- und energiegerechten Bauens. Es ist eine sehr sinnvolle Anwendung, da in vielen Fällen der Mehraufwand an Material und Kosten bescheiden gehalten werden kann. Es geht primär um den intelligenteren Einsatz auch sonst benötigter Baumaterialien.

Eine wichtige praktische Grenze dieser Technik besteht darin, dass sie besser für Neubauten (Planung!) geeignet ist als für Renovationen. Ausschlaggebend für ihre Förderung ist die Ausbildung von Baufachleuten auf allen Stufen.

Aktive Nutzung für Wärmeanwendungen

Niedertemperaturwärme: Die üblichen nicht konzentrierenden Warmwasser- und Luftkollektoren liefern Wärme unter dem Siedepunkt des Wassers. Sie nutzen die hohe Qualität der Sonnenstrahlung an sich schlecht. Der Materialaufwand kann dort klein gehalten werden, wo Kollektoren zusätzliche Funktionen am Bau übernehmen, wie etwa als Teile der Gebäudeaussenhaut (Fassadenelemente, Dach).

Eine kostengünstige, heute oft bereits wirtschaftlich konkurrenzfähige Anwendung ist die solare Vorwärmung von Haushaltswarmwasser (im Jahresmittel z.B. 20 % Sonne, der Rest der Energie wird durch Oel, Gas oder Elektrizität geliefert). Ihr Substitutionspotential für konventionelle Energien ist offensichtlich begrenzt.

Die Gebäudeheizung mit solarer Niedertemperaturwärme ist technisch möglich, wie gerade in jüngster Zeit in der Schweiz wieder gezeigt wurde. Voraussetzung sind hochisolierte Häuser und grosse Wärmespeicher. Mit Sicherheit erfüllen Anwendungen dieser Art das Kriterium minimalen Materialverbrauches nicht. Sie sind heute auch teuer. Wie weit sie überhaupt sinnvoll sind, ist immer noch kontrovers.

Prozesswärme mit konzentrierenden Kollektoren: Das Handicap von konzentrierenden Kollektoren üblicher Bauart ist, dass sie den Diffusanteil der Sonnenstrahlung nicht ausnützen können. Dieser kann im Schweizer Mittelland bis über 50 %, in den weltweit besten Lagen mindestens noch 20 % ausmachen. Die Vorteile dieser Technik sind die höheren erreichbaren Temperaturen. Die Technik im Temperaturbereich bis zu etwa 200 °C ist nicht sehr fortgeschritten, und es gibt wenige Anwendungen.

Solare Elektrizitätserzeugung

Photovoltaik: Solarzellen (photovoltaische Zellen PV), sind Halbleiterelemente, die eingestrahktes Sonnenlicht direkt in elektrische Energie umwandeln. Ihr Wirkungsgrad ist abhängig von der Art des Halbleiters, vom Spektrum des einfallenden Lichtes und dessen Intensität sowie von verschiedenen Verlustmechanismen wie z.B. Reflexionen oder Erwärmung der Zellen. Das heute hauptsächlich verwendete Material ist Silizium, und zwar in einkristalliner, polykristalliner oder amorpher Form. Heute typischerweise erreichte Wirkungsgrade für Si-Zellen sind

Silizium	kommerzielle Panel	Laborzellen
einkristallin	12 - 15 %	23 %
polykristallin	10 - 13 %	18 %
amorph	5 - 8 %	12 %

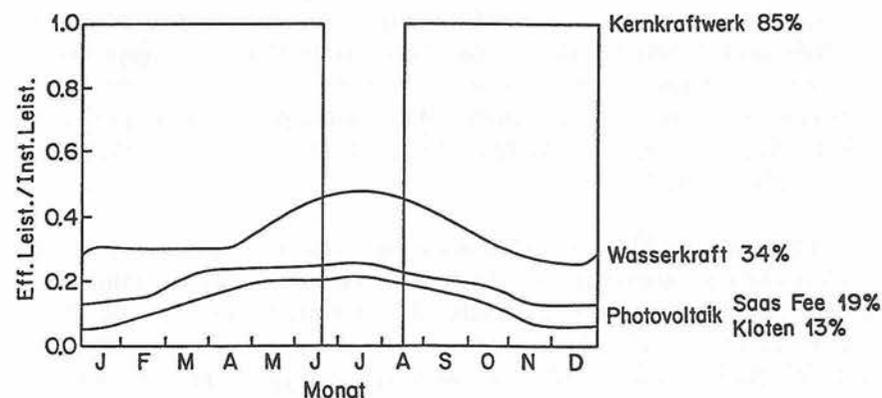
Diese Werte gelten für unkonzentriertes Sonnenlicht bei der maximalen Einstrahlungsleistung von 1 kW/m^2 . Die Angabe der elektrischen Leistung unter diesen Bedingungen wird als "Spitzenleistung" bezeichnet und erfolgt in "Watt Spitze" (W_s).

Das Interesse für polykristalline und amorphe Si-Zellen erklärt sich dadurch, dass sie - trotz kleinerem Wirkungsgrad - längerfristig pro Watt billiger sein dürften als monokristalline Zellen. Heutige Mindestpreise sind für alle Zellarten etwa $4 \text{ \$/}W_s$. Während die Preise für monokristalline Zellen mehr oder minder stagnieren, hofft man amorphe oder polykristalline Zellen in 5 - 10 Jahren für etwa $1 \text{ \$/}W_s$ zu verkaufen.

Welcher Zellentyp letztlich im Grossen das Rennen machen wird, ist heute noch unklar. Wichtig ist zu sehen, dass die Kosten-Nutzen-Optimierung bezüglich eines ganzen Systems und nicht nur bezüglich der Solarzellen gemacht wird. Eine Zelle, die pro Watt Spitzenleistung billig ist, kann trotzdem sehr teuren Strom produzieren, wenn ihr Wirkungsgrad sehr schlecht ist: Die Minderkosten für die Zellen werden mehr als kompensiert durch den Mehraufwand an Platz und Infrastruktur für Montage und elektrischen Anschluss der Panel.

Beim Vergleich verschiedener Stromproduktionstechniken ist es wichtig, als Basis nicht Nominalleistungen zu verwenden. Da eine

Solarzelle nur während weniger Stunden im Jahr die maximal mögliche Einstrahlung erhält, fällt der Ertrag pro Watt Spitzenleistung entsprechend niedrig aus (Figur). Für Solarstromanlagen ist Netzeinspeisung wichtig. Das Netz bildet solange einen Speicher, als durch Drosselung der Produktion aus Speicherseen der eingespeiste Solarstrom kompensiert werden kann. Das ist sicher noch für viele Jahre der Fall.



Ertragsstruktur für verschiedene Arten der Stromerzeugung. Die schweizerischen Kernkraftwerke laufen rund 10 Monate pro Jahr auf Vollast und werden im Sommer zur Revision abgestellt. Im Jahresmittel ist daher der Ausnutzungsgrad 85 %. Die Wasserkraftwerke erzeugen vor allem im Sommer Strom. Der Ausnutzungsgrad (erbrachte Leistung/installierte Leistung) beträgt im Jahresmittel 34 %. Für die Solarzellen werden unter 45° nach Süden orientierte Panels mit einer Spitzenleistung von 1 kW (rund 10 m^2) angenommen.

Der Flächenbedarf für Solarzellenanlagen ist grösser als die von den Zellen eingenommene aktive Fläche (Vermeidung der Beschattung von Nachbarzellen, Zugänglichkeit für Unterhalt). Für die heute auf dem Markt erhältlichen Zellen sind in der Schweiz $18 - 22 \text{ m}^2$ pro MWh jährlich erzeugten Strom nötig. Anschaulicher heisst dies, dass zur Produktion von 1 % des heutigen Schweizer Stromverbrauchs (Endenergie) etwa $8 - 10 \text{ km}^2$ Fläche benötigt werden. Zum Vergleich:

- 100 km Autobahn, zweispurig in jeder Richtung ca. 2,5 - 3 km²
- 3000 Fussballplätze (einer je Gemeinde) ca. 20 km²
- Gesamte Dachfläche in der Schweiz ca. 100 - 200 km²

Durch künftige Verbesserung des Wirkungsgrades der Solarzellen wird der Flächenbedarf reduziert. Das Ausmass und der zeitliche Verlauf sind schwierig vorauszusagen. Eine Halbierung des Flächenbedarfes dürfte an der oberen Grenze des Machbaren liegen.

Was die Kriterien bezüglich Minimierung von Aufwand an Material, Energie und Arbeit betrifft, ist das langfristige Entwicklungspotential für Solarzellen noch gross. Der aktive Teil, die Halbleiterschicht, benötigt grundsätzlich nur eine minime Materialmenge. Der Grossteil wird für die Kapselung und die Montage benötigt. Dieser ist heute noch alles andere als minimal.

Solarthermische Elektrizitätserzeugung: Die Grundidee der solarthermischen Stromerzeugung ist einfach: Wird die Sonnenstrahlung mit einem Spiegelsystem nur ausreichend konzentriert, so stellt sie einen "solaren Brennstoff" dar, mit dem - anstelle von fossilem Brennstoff - eine Wärmekraftanlage betrieben werden kann. Diese Idee ist mindestens aus drei Gründen attraktiv:

Ein Spiegel kann grundsätzlich mit sehr wenig Material gebaut werden. Für die reflektierende Schicht braucht es nicht mehr als einige Gramm Aluminium pro m². Die entscheidende Frage lautet, wieviel zusätzliches Material ist notwendig, um es korrekt auf die Sonne auszurichten und 20 - 30 Jahre vor Wind und Wetter zu schützen. Das Gewicht von Heliostaten (der Sonne nachgeführte Spiegelsysteme von 50 - 150 m² Fläche) wurde in den letzten 10 Jahren um etwa einen Faktor 10 reduziert. Entsprechend fielen auch die Kosten um rund einen Faktor 12. Diese Entwicklung geht weiter.

Werden so viele Spiegel montiert, dass bei maximaler Einstrahlung mehr Wärme produziert wird, als die Wärmekraftanlage schlucken kann, so kann diese Wärme gespeichert werden. Sie ermöglicht die tägliche Betriebsdauer um einige Stunden zu verlängern. Jahreserträge bis zu 4 kWh pro Watt installierte elektrische Leistung sind möglich.

Es besteht bei geeigneter Konstruktion die Möglichkeit, relativ einfach und billig eine fossile Zusatzheizung zu installieren und so solaren und fossilen "Brennstoff" in jedem gewünschten Verhältnis zu mischen.

Die Hauptvorteile von thermischer Kurzzeitspeicherung und fossiler Zusatzheizung sind:

- Verlängerter Betrieb in die Nacht hinein und Ueberbrückung von Wolkendurchgängen.
- Verkauf des Stromes zu den Tageszeiten, während derer er am meisten Geld einbringt.
- Möglichkeit, Liefergarantien einzugehen.

Die Anlagen unterscheiden sich in der Art und Weise, wie die Strahlung konzentriert und für die Weiterverarbeitung gesammelt wird.

- **Farmkraftwerke** (englisch: Distributed Collectors System, DCS)
Ein sogenannter Trogkollektor mit linearem Fokus konzentriert die Strahlung um den Faktor 40 bis 100, und ein Wärmeträgermedium absorbiert sie. Über einen Wärmeträgerkreislauf wird die im Kollektorfeld gesammelte Energie zur Wärmekraftzentrale transportiert. Die wie in jedem Wärmekraftwerk anfallende Abwärme wird meist in einem Kühlturm abgegeben. Typische Kreislauftemperaturen betragen 300 - 400 °C, mit typischen Leistungsgrössen 30 - 70 MW Nennleistung des elektrischen Generators. Speicherung und fossile Zusatzheizung sind möglich.
Diese sogenannten Solar-Farmkraftwerke werden industriell in USA und Israel gebaut (LUZ). Die Anlagen produzieren mit 25 % Erdgasanteil ca. 3 kWh Strom pro installiertes Watt (elektrisch) in Kalifornien kostendeckend. Bis jetzt wurden mehr als 200 MW (elektrisch) installiert, und weitere 400 MW sollen in Betrieb gehen. Die LUZ-Kraftwerke produzieren zur Zeit mehr Strom als alle weltweit existierenden Solarzellenanlagen zusammen.
- **Turmkraftwerke** (englisch: Central Receiver System, CRS)
Konzentration um einen Faktor von einigen hundert bis über 1000 mit Heliostatfeldern. Die Absorption der konzentrierten Strahlung findet in einem zentralen, auf der Spitze eines Turmes sitzenden Empfänger statt. Konzentration und Transport der Energie erfolgen also rein optisch. Hier wird die Strahlung in Wärme von 500 °C bis etwa 1000 °C umgewandelt. Typische Leistungsgrössen sind 50 - 150 MW (elektrisch) Generatorleistung. Speicherung und fossile Zusatzheizung sind möglich.

Attraktiv an dieser Anlage ist die Verfügbarkeit der konzentrierten Strahlung bei industriell interessanten Leistungen auf kleinem Raum (typische Lineardimension einige Meter) und zu bereits heute recht bescheidenen Kosten (einige wenige Rp./kWh). Diese Energie kann nicht nur zur Stromerzeugung sondern auch für andere, etwa solarchemische Prozesse verwendet werden.

Bis jetzt sind nur Prototypanlagen zur Stromerzeugung gebaut worden. Der grösste und bekannteste ist Solar One (10 MWe) bei Barstow, Kalifornien. Eine 30 MWe Anlage (PHOEBUS) ist in Planung. Die Verfechter dieser Technik glauben, dass die Stromgestehungskosten bei entsprechender Entwicklung der Turmtechnik mindestens so tief wie diejenigen von Farmkraftwerken liegen.

● "Dish-Sterling"-System

Wird im Fokus eines spiegelnden Rotationsparaboloides (englisch: Solar Dish) die Heizfläche eines Sterlingmotors mit gekoppeltem Generator situiert, so spricht man auch im Deutschen von einem "Dish-Sterling-System". Die typische Leistung beträgt 20 - 50 kW, bei einem Spiegeldurchmesser von 10 - 15 m. Konzentrationsfaktoren von einigen hundert bis zu 10'000 wären möglich. Diese Systeme sind technisch interessant, ein Versuch zur Kommerzialisierung schlug fehl. An einer Vorserie wurden Tagesmittelwerte des Wirkungsgrades von 28 % gemessen.

Vergleich von solarthermischer mit photovoltaischer Stromproduktion

Beim Vergleich von Leistungs- und Wirkungsgradangaben ist Vorsicht geboten. Photovoltaik (PV) nutzt die gesamte Strahlung, die Spiegeltechnik (ST) nur die Direktstrahlung. PV-Leistungen sind Spitzenwerte, ST-Leistungsangaben beziehen sich auf die Generatorleistung.

Der Flächenbedarf von PV- und ST-Anlagen ist - bezogen auf gleiche Jahresstromproduktion - vergleichbar.

Kostenvergleiche sind schwierig. Die einzigen auf kommerzieller Basis beruhenden Hinweise sind für ST-Systeme die Angaben von LUZ (siehe oben). In der Schweiz werden heute 3 kW_s PV-Anlagen mit Netzeinspeisung angeboten, die schlüsselfertig 40'000 Fr. kosten und im Mittelland nach Firmenangabe typischerweise 3500 kWh pro Jahr

liefern. Die Stromgestehungskosten mit einer Annuität von 8.8 %/Jahr belaufen sich auf 1 Fr./kWh.

Für die Schweiz hat vor allem die Photovoltaik aktuelle Bedeutung. Die zur Zeit in der Schweiz installierte PV-Kapazität dürfte zwischen 1 und 1.5 MW_s liegen. Dem entspricht ein Jahresertrag, den das Kernkraftwerk Gösgen in höchstens zwei Stunden produziert. Dieser PV-Beitrag wird sich in Zukunft sicher vergrössern. Der hauptsächliche wachstumsbegrenzende Faktor sind heute die Kosten.

Bedenkt man einerseits den heutigen Stand der Technik und den heutigen Beitrag zur Energieversorgung, andererseits die bei weitem unausgeschöpften Möglichkeiten dieser jungen Technik - deren physikalische Grenzen nicht erreicht sind - dann liegt der Schluss nahe, dass heute von vielen die kurzfristigen Möglichkeiten der Solartechnik überschätzt, die langfristigen hingegen eher unterschätzt werden.

Kernspaltung (Fission)

Die Energieerzeugung in Kernkraftwerken erfolgt während der Spaltung (Fission) von Atomkernen. Nicht alle Atomkerne sind spaltbar: Die Isotope Uran-235, Plutonium-239 sind es; Uran-238 ist es nicht. Die Spaltung eines Atomkerns findet statt, wenn ein Neutron mit der geeigneten Energie auf diesen Kern trifft; der Kern bricht in meistens zwei Teile (Spaltprodukte) und setzt gleichzeitig Energie und zwei bis drei Neutronen frei, die ihrerseits weitere Spaltungen erzeugen werden (Kettenreaktion).

Nicht-spaltbare Kerne können auf sie treffende Neutronen einfangen: Somit entstehen neue, spaltbare Isotope wie z.B. Plutonium-239 aus Uran-238. Dieses Prinzip wird in den sog. Brutreaktoren oder Brütern genutzt, um aus dem reichlich vorhandenen Isotop Uran-238 (mehr als 99 % des in der Natur vorkommenden Urans) neuen Kernbrennstoff zu erzeugen.

Aktueller Stand

Der aktuelle Stand der Kernenergie weltweit und in der Schweiz wird auf folgender Tabelle wiedergegeben.

		Weltweit	Schweiz
in Betrieb	Anzahl KKW	424	5
	Installierte Leistung (GWe)	337.4	3.08
	Stromerzeugung 1989 (TWh)	1944.3	22.8
	Anteil an		
	Gesamtstromerzeugung 1989 (%)	16	41.6
	Verfügbarkeit (%)	65*	83
im Bau	Anzahl KKW	104	--
	Installierte Leistung (GWe)	88.6	--

* ohne Ostblockstaaten
GWe = GW (elektrisch)

Aufbaugeschwindigkeit

Der Aufbau der Nuklearenergie in den westlichen Ländern verlangsamt sich bzw. stagniert. Berücksichtigt man zusätzlich zur obigen Tabelle noch die bestellten Anlagen und die zu erwartenden Stilllegungen von älteren Kernkraftwerken, so zeichnet sich eine Sättigung auf einem Niveau von 400 GW (elektrisch) installiert ab. Daneben werden Szenarien diskutiert, die zur Deckung des - trotz Sparmassnahmen - steigenden Energiebedarfs und bei Zwang zur Reduktion des CO₂-Ausstosses (Substitution von fossilen Brennstoffen) einen Ausbau der Kernenergie als notwendig ausweisen: Laut WEK 1989¹ auf 1100 bis 1500 GW (elektrisch) im Jahr 2020; laut OECD² sind bis zum Jahr 2025 mindestens 1000 GW (elektrisch) an Neu- oder Ersatzanlagen zu erwarten. Über die drei Jahrzehnte gemittelt, ergäbe dies einen weltweiten Zuwachs von 26 - 40 GW (elektrisch) pro Jahr, was einer jährlichen Inbetriebnahme von 20 - 30 Kernkraftwerken des heutigen LWR-Typs, 1'300 MW (elektrisch) entspräche. Zur Verdeutlichung der technischen Machbarkeit eines solchen Ausbaus soll bemerkt werden, dass in den Jahren 1983 und 1984 weltweit jeweils 33 neue Kernkraftwerke mit einer Leistung von insgesamt 31 GW (elektrisch) pro Jahr in Betrieb genommen wurden³. Sollte die Leistungsgrösse dieser Kernkraftwerke wesentlich niedriger als diejenige heutiger Anlagen sein (viele Reaktorkonzepte der nächsten und übernächsten Generation weisen Leistungen von höchstens 600 MWe auf), so fielen 44 - 66 neue Anlagen pro Jahr an. Dies würde anzahlmässig und wegen der Nähe zu dichtbesiedelten Gegenden die Standortfrage zusätzlich verschärfen.

Vorräte, Brennstoffkreislauf

Bei Unterstellung des "400 GW (elektrisch) Szenarios" ist die Brennstoffversorgung sogar im "once through cycle", d.h. ohne Wiederaufarbeitung und Rückgewinnung des noch verwendbaren Brennstoffes, kein Problem; bei unterstellter erhöhter Energiege-

- ¹ World Energy Horizons 2000 - 2020, 14th Congress of the World Energy Conference, Montreal 1989
- ² OECD/NEA Expert Group Report on "Nuclear Energy and its Fuel Cycle: Prospects to 2025", Paris 1987
- ³ H. Blix, "Global Challenges", SVA-Informationstagung "Kernenergie - wie weiter?", Bern 1990

winnung pro Brennstoff Gewichtseinheit (Erhöhung des "Abbrandes" von 30 auf 50 MW-Tage/t) und leicht erhöhter Anreicherung (von 2 auf 3 %) wären über die nächsten hundert Jahre gerechnet 6,4 Mio. t Natururan nötig, allerdings würden nur 0,6 % aller Uranatome "genützt". Die endzulagernde Menge an teilweise hochradioaktiven Schwermetallen (SM) beliefe sich auf 8'000 t/a, was bei der geschätzten Kapazität eines Endlagers von 70'000 t SM weltweit 8 - 9 neue Endlager erforderte.

Unterstellt man ein weltweites "Ausbauszenario", so ist die Versorgung mit Brennstoff nur dann gesichert, wenn die Uranausnutzung in gleichem Masse steigt. Dazu müssten schnelle Reaktoren mit besserer Neutronenökonomie (60 %ige Uranausnutzung) eingesetzt und der Brennstoff rezykliert werden (geschlossener Kreislauf mit Wiederaufarbeitung).

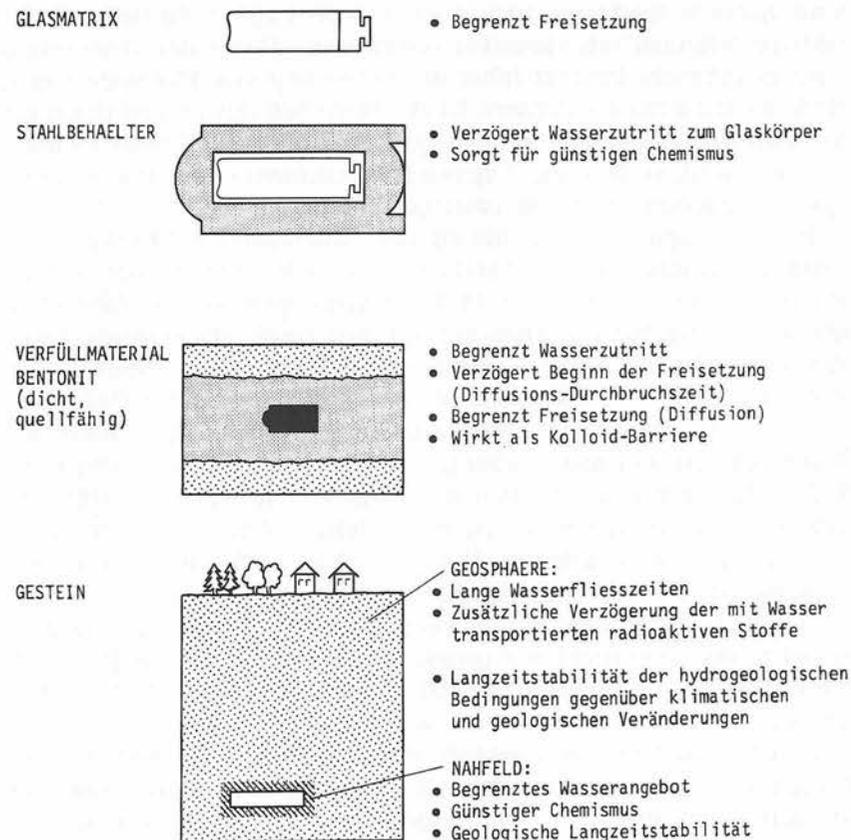
Radioaktive Abfälle

Würde man für die Schweiz den Zubau eines Kernkraftwerkes, also eine installierte Leistung von insgesamt 4 GW (elektrisch), unterstellen, so fielen bis Mitte des nächsten Jahrhunderts etwa 95'000 m³ (240'000 t) schwachaktive, 80'000 m³ (200'000 t) z.T. langlebige und 750 m³ (2'250 t) hochaktive Abfälle an. Die Endlagerung soll zu allen Zeiten einen genügenden Schutz der Umwelt vor diesen Abfällen gewährleisten; dieses wird durch eine Endlagerung in tiefen geologischen Schichten mit einem gestaffelten System von künstlichen und natürlichen Barrieren erreicht (Figur). Es besteht der internationale Konsens⁴, dass die Methodik zum Sicherheitsnachweis eines Endlagers genügend entwickelt ist. Trotz der prinzipiellen Schwierigkeit, belastbare Aussagen über extrem lange Zeiten zu machen, ist die Rückholbarkeit der Abfälle aus einem verschlossenen Endlager derzeit nicht vorgesehen, da sie die Sicherheit negativ beeinflussen könnte. Zur Verringerung der Unsicherheiten bzw. Konservativitäten in bestehenden Sicherheitsanalysen sowie zur Gewinnung standortspezifischer Daten sind weitere Untersuchungen nötig und auch weltweit im Gange.

Während im Ausland (z.B. Finnland, Schweden) Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle bereits in Betrieb sind, ist in der Schweiz die Realisierung gegen Ende des Jahrzehnts vorgesehen. Zur Zeit konzentrieren sich die schweizerischen Aktivitäten auf die Aus-

⁴ International Symposium on Safety Assessment of Long-term Radioactive Waste Disposal, OECD/CEC/IAEA, Paris, Oktober 1989

wahl von geeigneten Standorten und auf Konzeptanpassungen an den Stand der Technik. Die Aufgabe ist auch insofern nicht dringend, als die Endlagerung erst nach einer Abklingzeit von mehreren Jahrzehnten technisch sinnvoll ist.



Übersicht über das System der Sicherheitsbarrieren für hochaktive Abfälle

Für langlebige mittelaktive und hochaktive Abfälle ist der Baubeginn eines Lagers in der zweiten Dekade des nächsten Jahrhunderts geplant.

Schnelle Reaktoren

Schnelle Reaktoren basieren auf Kernspaltungen, die im Gegensatz zu den thermischen Reaktoren durch hochenergetische, "schnelle" Neutronen verursacht werden. Dies erlaubt gesamthaft eine bessere Neutronenausnutzung, besonders wenn Plutonium als Brennstoff eingesetzt wird. Schnelle Reaktoren sind dadurch in der Lage, mehr neuen Spaltstoff zu "erbrüten" als sie selbst verbrauchen. Durch den Brutprozess wird es möglich, indirekt (über die Erzeugung von Plutonium) rund 60% des sonst nicht nutzbaren Uran-238 zu verbrennen und damit die Versorgungsbasis für die Kernenergie um mehr als 2 Grössenordnungen zu strecken (heutige Leichtwasserreaktoren ohne Plutoniumrezyklisierung haben eine Uranausnutzung von 0.5%).

Bei einer optimalen Anordnung des Brutmantels im Reaktor wird soviel zusätzlicher Spaltstoff erzeugt, dass die in den schnellen Reaktoren installierte Leistung alle 15 Jahre verdoppelt werden kann (5 % jährliche Zuwachsrate). Dies gilt für den heute verwendeten Oxidbrennstoff; die sich in der Entwicklung befindenden dichteren Brennstoffe (Nitrid, Metall) könnten bei einem entsprechenden Bedarf ein noch wesentlich rascheres Wachstum ermöglichen. Die Grenze des Wachstums ist aber noch weiter gesteckt; durch den Einsatz von Uran-235 im Erstkern von schnellen Reaktoren könnte sehr kurzfristig eine grosse Population dieser Reaktoren aufgebaut werden. Während einer gewissen Zeit wäre dann das Wachstum hauptsächlich durch die von der Gesellschaft noch verkraftbaren Investitionen bestimmt.

Der Brutprozess kann relativ einfach so gesteuert werden, dass nur soviel Spaltstoff entsteht, wie gerade benötigt wird. Da heute Plutonium im Ueberschuss vorhanden ist und die Wirtschaftlichkeit durch eine kleinere Brutrate verbessert wird, werden die schnellen Reaktoren der nächsten Generation so ausgelegt, dass die Produktion und der Verbrauch von Spaltstoff etwa im Gleichgewicht sind. Durch eine Vergrösserung des Brutmantels und andere Optimierungsmassnahmen lässt sich die Spaltstoffproduktion jederzeit ohne wesentliche andere technische Änderungen wieder erhöhen.

Voraussetzung für die bessere Neutronenausnutzung des schnellen Reaktors ist vor allem ein Kühlmittel mit geringem Moderationseffekt. Da das Kühlmittel zudem eine relativ hohe Leistungsdichte im Kern ermöglichen muss, hat sich die Natriumkühlung wegen der guten Wärmeübertragungseigenschaften von Natrium durchgesetzt. Neben den daraus resultierenden guten Nachwärmeabfuhereigenschaften (die

Nachwärme kann per Naturkonvektion abgeführt werden) ist das niedrige Druckniveau schneller Reaktoren sicherheitstechnisch von Vorteil. Nachteilig hingegen sind die chemische Reaktionsfreudigkeit des Natriums, die durch konstruktive Massnahmen beherrscht werden muss, und der positive Void-Effekt (Zunahme des Neutronenmultiplikationsfaktors beim Auftreten von Blasen im Kern). Quantitative Abwägungen der sicherheitstechnischen Vor- und Nachteile lassen den Schluss zu, dass das Risiko natriumgekühlter schneller Reaktoren mindestens so klein ist wie dasjenige moderner thermischer Leichtwasserreaktoren.

Schnelle Reaktoren verwenden in erste Linie Plutonium als Brennstoff. Dieses wird beim Betrieb der heutigen Leichtwasserreaktoren erzeugt und in Wiederaufarbeitungsanlagen abgetrennt. Die sich im Umlauf befindende Plutoniummenge ist bei schnellen Reaktoren und Leichtwasserreaktoren mit Plutoniumrückführung etwa dieselbe. In beiden Fällen entspricht das Gesamtinventar im Brennstoffkreislauf ungefähr der Plutoniummenge, welche eine äquivalente Population von Leichtwasserreaktoren ohne Plutoniumrückführung während ihrer Lebensdauer (30 Jahre) erzeugen würde. Schnelle Reaktoren schneiden also grundsätzlich auch hinsichtlich der Plutoniumwirtschaft nicht ungünstiger als Leichtwasserreaktoren ab.

Schnelle Reaktoren grösserer Leistung werden in Westeuropa, der UdSSR, Japan und Indien entwickelt. Relativ fortgeschritten sind die Vorarbeiten für den European Fast Reactor (EFR) unter Beteiligung der wichtigsten EG-Länder. Einen anderen Weg haben seit einigen Jahren die USA mit der Entwicklung von kleinen Modulreaktoren eingeschlagen (PRISM).

Sicherheit zukünftiger Kernreaktoren

Der Sicherheit bei Kernreaktoren kommt grosse Bedeutung zu:

- Die im Reaktorkern akkumulierten Mengen an radioaktiven Stoffen ist so gross (z.B. 28000 Ci J-131 pro MW_{th}), dass Bruchteile davon, freigesetzt in der Umgebung, gesundheitliche Schäden nach sich zögen. Die Radioaktivität von 1 Ci J-131 entspricht unter ungünstigen Annahmen (Einnahme) einer Schilddrüsendosis von etwa 0,01 Sv (oder 1 rem), was etwa 4 mal höher als die durchschnittliche natürliche Dosisbelastung in der Schweiz liegt.
- Die über den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte entstehende Wärme (Nachwärme) liegt im Prozentbereich der Nennleistung

und muss, um Kernschäden mit Spaltproduktfreisetzung zu vermeiden, sicher abgeführt werden.

- Der Kern ist während des Normalbetriebes nicht unbedingt in seinem günstigsten neutronenphysikalischen Zustand. Gegen unkontrollierte Leistungssteigerungen oder -ausbrüche sind Vorkehrungen zu treffen.

Die heute üblichen Leichtwasserreaktoren weisen eine weitgehend inhärent sichere Kernausslegung auf (negative Koeffizienten der Reaktivität). Aufgrund der hohen Leistungsdichte und der Eigenschaften des Wassers als Kühlmittel sind sie allerdings bei Verlust der normalen Wärmeabfuhr (nach Lecks im Primärkreislauf oder Verlust der Dampferzeugerbespeisung) auf schnell wirksam werdende Not- und Nachkühlsysteme angewiesen. Aufgrund der aufwendigen Auslegung dieser Systeme (Redundanz/Diversität, automatische Inbetriebnahme, Qualitätssicherung etc.) ist ihr Ausfall sehr selten, würde aber einen Kernschaden (Kernschmelzen) und die Gefahr einer massiven Freisetzung radioaktiver Stoffe nach sich ziehen. Diesen "schweren", die Auslegungsgrenzen überschreitenden Unfällen wird in der Öffentlichkeit die grösste Bedeutung beigemessen; sie gelten als eine Hauptursache für die mangelnde Akzeptanz der Kernenergie. Für die sicherheitstechnischen Betrachtungen werden heute zwei Kenngrössen verwendet:

- Die "Ereignishäufigkeit" entspricht der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines gegebenen Ereignisses. Die Ereignishäufigkeit der hier besprochenen schweren Unfälle ist das Produkt der Wahrscheinlichkeit von Kernschmelzen und der Wahrscheinlichkeit eines undichten Containments.
- Das "Risiko" ist das Produkt der Ereignishäufigkeit und eines dem betrachteten Ereignis resultierenden konkreten Schadens. Das Risiko ist jeweils mit einer spezifischen Schadensform gekoppelt.

Von Wissenschaftern und Behörden wird die Vorgabe formuliert, die Häufigkeitsgrenzen solcher Unfälle um mindestens eine Grössenordnung gegenüber dem aktuellen Stand (d.h. von $5 \cdot 10^{-5}$ auf ca. $5 \cdot 10^{-6}$ pro GW-Jahr) herabzusetzen⁵; eine Einhaltung dieser Vorgaben allein würde jedoch bei einem postulierten Kernenergie-Ausbau das heutige

⁵ Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, Safety Series No. 75, INSAG-3, IAEA, Wien 1988

globale Risiko für schwere Unfälle etwa verdoppeln. Die von den Herstellern angebotenen Reaktorkonzepte der nächsten und übernächsten Generation übertreffen die genannten Zielwerte und erreichen Häufigkeiten von $5 \cdot 10^{-7}$ bis 10^{-7} pro GW-Jahr. Sollten zukünftig ausschliesslich Reaktoren dieses Typs zum Einsatz kommen, so würde das Risiko für schwere Unfälle vom Leistungsanteil der Reaktoren heutiger Bauart abhängen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit für Nachrüstungs- und Unfallbeherrschungsmassnahmen an bereits in Betrieb stehenden Anlagen.

Darüber hinaus arbeitet man international an einer Weiterentwicklung der Sicherheitsphilosophie in dem Sinne, dass Unfälle mit schädlichen Auswirkungen auf die Bevölkerung nicht nur extrem unwahrscheinlich, also vom Risiko her minimal sind, sondern im deterministischen Sinne ausgeschlossen werden können. An die Stelle des Risikokonzeptes tritt die Begrenzung des maximalen Schadens.

Daraus resultieren wiederum zwei prinzipiell unterschiedliche technische Ansätze:

- "Kernschmelzen" bleibt möglich. Sein bei einer grossen Anzahl von Anlagen recht wahrscheinliches Eintreten gilt als unproblematisch, da das Containment unter allen Umständen die Radioaktivität von der Umgebung fernhält und so ertüchtigt wird, dass seine Funktionsfähigkeit keiner aktiven Massnahmen, z.B. für Gebäudeabschluss, bedarf und seine Integrität nicht durch mechanische Einwirkungen kausal gefährdet werden kann.
- "Kernschmelzen" oder hinsichtlich ihrer Folgen vergleichbare Reaktorzustände sind aufgrund der physikalischen Auslegung des Reaktors, z.B. geringe Leistung und Leistungsdichte, und daraus resultierender inhärenter Sicherheitseigenschaften unmöglich; die radioaktiven Substanzen bleiben "immer" innerhalb der Brennelemente bzw. des Reaktors⁶.

Das gesamte Risiko für prompte Todesfälle und Spätfolgen, das alle Aspekte der Kernenergie von der Uranerz-Gewinnung bis zur Entsorgung einschliesst, kann eigentlich nur im Vergleich mit den entsprechenden Risiken anderer, gleichwertiger Energieversorgungs-Lösungen richtig bewertet werden; hier ergibt sich unter pessimistischsten An-

⁶ Int. Workshop of the Safety of Nuclear Installations of the Next Generation and Beyond, Chicago, IAEA-TECDOC-550, 1989

nahmen ein Unterschiedsfaktor von mindestens einer Grössenordnung zugunsten der Kernenergie.

An Reaktorkonzepten, die diese Anforderungen erfüllen können, wird gearbeitet, z.B. AP-600, SBWR, MHTGR, in den USA, PIUS/SECURE in Schweden, ertüchtigter Konvoi-DWR und HTR-Modul in Deutschland.

Der schwedische PIUS-Reaktor basiert auf bewährten Komponenten und Systemen. Im PIUS-Konzept hindert beim Normalbetrieb eine thermohydraulische Barriere das borierte Wasser eines grossen Beckens daran, in den Primärkreislauf einzudringen und die Kettenreaktion augenblicklich zu unterbinden. Bei jedem Störfall jedoch, der eine ausreichende Kühlung des Reaktorkernes gefährden würde, bricht das thermohydraulische Gleichgewicht zusammen, und das kältere borierte Wasser flutet den Kern und schaltet ihn ab. Zur Einleitung dieser Sicherheits-Abschaltung sind weder aktive Systeme noch eine Operateur-Aktion notwendig. Durch einen massiven Spannbeton-Behälter will man einen Kühlmittelverlust ausschliessen.

Im Gegensatz zum Leichtwasser-Reaktor wird beim gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktor (HTR) die Wärme nicht durch Wasser, sondern durch ein Inertgas (Helium) abgeführt. Die moderierende Wirkung des Wassers wird im HTR vom Graphit übernommen. Die Verwendung von Gas erlaubt weit höhere Betriebstemperaturen als mit Wasser zu erreichen sind. Die besonderen Sicherheitsmerkmale des HTR liegen einerseits in der grossen Wärmekapazität des Systems (Graphit im Reflektor und im Kern), welche zusammen mit der geringen Leistungsdichte eine grosse thermische Trägheit bei Kühlungsausfall bedingen. Andererseits sind die keramischen Brennelemente und Strukturen thermisch hoch belastbar und weisen einen grossen Abstand zu den Versagenstemperaturen auf; dies verzögert wesentlich oder schliesst sogar eine Freisetzung von Spaltprodukten in die Atmosphäre völlig aus.

Die Temperaturcharakteristiken des HTR machen seinen Einsatz als Prozess-Wärme-Erzeuger für industrielle Zwecke sinnvoll. Die wichtigsten Anwendungen wären (nebst der klassischen Chemie) im petrochemischen Sektor sowie Kohle-Vergasung und Wasserstoffseparierung aus Erdgas.

Kernverschmelzung (Fusion)

Es gibt zwei Wege, Energie bei der Umwandlung von Atomkernen zu gewinnen. Bei der Fission werden schwere Kerne in kleinere aufgespalten, während bei der Fusion leichte Kerne verschmolzen werden. Die Fusion ist bekanntlich die Energiequelle der Sonne, der Mensch ist noch nicht in der Lage sie auf der Erde in kontrollierter Weise zu nutzen, sondern nur in unkontrollierter Art als Wasserstoffbombe. Die Aufgabe, einen Energie produzierenden Fusionsreaktor zu bauen, welcher kommerziell wettbewerbsfähig und vom Standpunkt der Sicherheit und der radioaktiven Abfälle akzeptabel ist sowie keine seltenen Materialien benötigt, ist eine gewaltige wissenschaftliche und technische Herausforderung. Sie kann nur in einem jahrzehntelangen, international koordinierten Grossprogramm angegangen werden. Die gegenwärtigen weltweiten Anstrengungen der industrialisierten Länder umfassen etwa 7000 Wissenschaftler und Ingenieure und jährliche Kosten von 2.5 Milliarden Fr.. Hauptträger sind die vier grossen Blöcke: USA, UdSSR, Japan und Euratom. An Euratom ist auch die Schweiz beteiligt.

Unter den zahlreich möglichen thermonuklearen Fusionsreaktionen ist die am "leichtesten" realisierbare das Verschmelzen der zwei Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, wobei unter Aussendung eines Neutrons Helium entsteht. Günstiger aber viel schwieriger und daher nur als sehr langfristiges Ziel zu betrachten, ist die Fusion Deuterium-Deuterium. Solche Reaktionen produzieren unvorstellbare Energiemengen. Ein Gramm Deuterium entspricht etwa 100 MWh, dem Zehnmillionenfachen von normalen Brennstoffen! Deuterium kommt in der Natur häufig vor. 1 m³ gewöhnliches Wasser enthält 34 Gramm. Andererseits ist Tritium radioaktiv (Betazerfall von 12.6 Jahren) und daher in der Natur nicht vorhanden. Es muss also hergestellt werden, was durch Reaktion der Fusionsneutronen mit Lithium erfolgen kann. Lithium ist ein relativ häufiges Element, von dem es in der Erdkruste und im Meer etwa 100 Millionen Tonnen gibt.

Die physikalischen Probleme des Reaktorkerns

Damit die zu fusionierenden Kerne sich in der Temperaturbewegung nahe genug kommen, müssen, selbst bei Deuterium-Tritium, Temperaturen von etwa 100 Millionen Grad angewendet werden, um eine genügende Rate der Energieproduktion zu erreichen (Wasserstoff-

Plasma). Nach dreissig Jahren Forschung sind mehrere Techniken zur Erzeugung solcher Temperaturen bekannt, und kurzzeitig sind in USA und Europa schon 300 Mio Grad erreicht worden. Weiterentwicklungen erscheinen prinzipiell möglich.

Das zweite, viel schwierigere Problem ist die Erfüllung der sogenannten Zündbedingung. Dies ist analog zu einer gewöhnlichen Verbrennung zu verstehen; die Flamme einer Kerze muss die Energie zum Schmelzen des Waxes selbst liefern, damit sie nicht erlöscht. Der im Fusionsreaktor "vorgeheizte" Wasserstoff muss daher soviel Energie produzieren, wie zur Erhaltung der Millionentemperatur des Plasmas nötig ist. Das bedeutet, dass zwischen dem Plasma und der Struktur des Reaktors, die nicht heisser werden darf als etwa 1000 Grad, eine entsprechende Wärmeisolation bestehen muss: Der Einschluss des Plasmas. Die Zündung ist noch nie erreicht worden. Von einem fehlenden Faktor 100 anfangs der 80er Jahre ist man heute aber bis auf einen Faktor 5 an dieses Kriterium herangekommen. Wird das Ziel erreicht, bedeutet dies allerdings erst ein autonomes "Brennen" des Reaktors, noch keine Netto-Energieproduktion.

Die zwei Einschlussprinzipien

Um den heissen Brennstoff so einzuschliessen, dass er die Strukturen des Reaktors nicht berühren kann, gibt es zwei verschiedene Wege. Beim magnetischen Einschluss halten speziell angeordnete Magnetfelder das heisse Plasma so zusammen (z.B. im Tokamak), dass eine kontinuierliche Fusion des Brennstoffs bei etwa 100 Mio Grad und einigen Atmosphären Druck erfolgen kann. Beim Trägheitseinschluss hingegen wird eine ganz kleine Brennstoffmenge (Pellet) durch intensive Laser-, Elektronen- oder Ionenstrahlen in einer Milliardstelsekunde verdichtet (zu über tausendfacher Dichte, 10^{12} atm) und aufgeheizt, wobei Fusion stattfindet.

Auf dem Wege einen magnetischen Plasmaeinschluss zu erreichen stellt sich das Problem, keine zu grosse, unökonomischen und Sicherheitsfragen aufwerfenden Reaktoren bauen zu müssen. Wegen des grossen finanziellen und zeitlichen Aufwandes werden diese Entwicklungen gegenwärtig international verfolgt. Beim Trägheitseinschluss (Inertialfusion) liegen die Probleme bei der Zündung von genügend kleinen Pellets (um die Grösse der Explosion beherrschen zu können),

und andererseits bei den enorm grossen Leistungen, die der Treiber (z.B. Laser) erbringen muss. Während bei der magnetischen Fusion die internationale Zusammenarbeit bestens spielt, ist dies bei der Inertialfusion wegen der Verbindung zu militärischen Programmen leider nicht der Fall.

Die technologischen Probleme

Der im Fusionsreaktor reagierende Brennstoff gibt die erzeugte Energie zu 80% an den Mantel (blanket) ab, in dem das Tritium regeneriert wird, der Rest bleibt im Plasma. Die gesamte Wärmeenergie wird entzogen und, wie in jedem Kraftwerk, zur Erzeugung von Elektrizität verwendet.

Die schwierigsten technologischen Probleme der magnetischen Fusion sind:

- Entwicklung von geeigneten Materialien mit genügender Lebensdauer (Strahlenschäden) und kleiner induzierter Radioaktivität.
- Die Handhabung und Regeneration des Tritiums.
- Die Struktur des Reaktorkerns, die Magnetfelder, Zu- und Wegführen des Brennstoffs mit Gewährung der Reinheit.

Die Hauptfragen der Trägheitsfusion sind:

- Oekonomische Herstellung der Brennstoffkugeln (pellets) mit der zur Zündung notwendigen komplizierten Struktur.
- Entwicklung von Treibern mit genügendem Wirkungsgrad.
- Strukturen, die den "Miniexplosionen" standhalten.

Stärken und Schwächen der Fusionsenergie

Die positiven Aspekte sind:

- Der Brennstoff ist praktisch unbegrenzt und billig. Ein 1 GW (elektrisch) Kraftwerk würde pro Jahr 90 kg Deuterium und 300 kg Lithium verbrauchen!
- Die Fusion selbst erzeugt keine radioaktiven Produkte, nur Helium.

- Es gibt keine Möglichkeit eines nuklearen Vorfalles wie Kernschmelzen, da immer nur sehr kleine Brennstoffmengen beteiligt sind.
- Die beträchtliche Aktivierung der Struktur kann durch Materialwahl reduziert werden, und ist weniger problematisch als bei der Fission, was die Akzeptanz, trotz bestimmt grösseren Kosten, erleichtert.

Die negativen Seiten sind:

- Das Vorhandensein von Tritium in grösseren Mengen bildet im Falle eines unfallbedingten Austrittes eine radiologische Gefahr für die umgebende Zone, insbesondere wenn das Tritium in Wasser gebunden ist. Die daher anvisierte Minimisierung des Tritiuminventars hat aber Grenzen. (Nichtexistent wäre dieses Problem bei der langfristig erhofften reinen Deuteriumfusion).
- Die grosse Komplexität und die wahrscheinlich nicht zu umgehende Grösse eines Fusionsreaktors machen die ökonomischen und betrieblichen Probleme noch unabschätzbar.

Der Zeithorizont

Die Strategien der vier erwähnten Länderblöcke sind ähnlich und zielen auf Anlagen, mit denen die Möglichkeit der Energieproduktion demonstriert werden kann, indem für Zeiten von vielleicht zehn Minuten Leistungen von 1-2 GW erzeugt, aber noch nicht technisch genutzt werden. Um die Mittel effizient einzusetzen, wird die Möglichkeit einer einzigen internationalen Anlage (ITER) studiert. Nach den gegenwärtigen Planungen wäre eine Inbetriebnahme in vielleicht 15 Jahren denkbar. In einer nächsten Generation könnte, nach der Lösung vor allem der Materialprobleme, eine kontinuierliche Energieproduktion angestrebt werden. Erst dann, wenn das jetzige schrittweise Vorgehen beibehalten wird, käme der Bau eines eigentlichen kommerziellen Prototyps für ein Fusionskraftwerk in Frage.

Speicherung, Umwandlung und Transport von Energie

Wer Energie benützt, ist primär nicht an Kilowattstunden oder an Litern Benzin interessiert, sondern an den Funktionen, die damit erfüllt werden. Je besser eine Energieform in eine andere umgewandelt, gespeichert und transportiert werden kann, umso vielfältiger sind die Funktionen, die sie übernehmen kann. Elektrischer Strom ist z.B. so wertvoll, weil er relativ einfach in mechanische Energie (Motoren), Licht und Wärme auf fast jedem beliebigen Temperaturniveau umgewandelt werden kann. Nicht zu vergessen sind natürlich die elektrizitätsspezifischen Anwendungen wie Telekommunikation, Computing und andere elektronische Techniken. Die einzigen Schwachpunkte des elektrischen Stromes sind schlechte Speicherbarkeit und der leitungsgebundene Transport. Die Speicherung der Elektrizität wird vornehmlich mit Batterien bewerkstelligt. Dies ist aber nicht leicht, wie die Entwicklung des Elektroautos zeigt, dessen Schlüsselproblem nach wie vor die Batterie ist.

Das Beispiel eines gut speicher- und transportierbaren Energieträgers ist Erdöl ("chemische Energie"). Man bedenke nur, wie oft es auf seinem Weg vom Bohrloch bis in den Heizöl- oder Benzintank des Endverbrauchers transportiert, bearbeitet und zwischengelagert (d.h. gespeichert) wird. Es kommt auch nicht von ungefähr, dass Erdöl überall dort eingesetzt wird, wo diese beiden Eigenschaften zur Erfüllung entsprechender Funktionen wichtig sind. Beispiele: Strassen- und Flugverkehr, Heizung. Ein solches System kann auf den Mittelwert (statt den Spitzenwert des Bedarfes ausgelegt werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil (z.B. relativ kleine Tankerflotten zur See und zu Lande, die aber - mindestens im Prinzip - Tag und Nacht, Sommer und Winter im Einsatz sind).

In einer nachfossilen Ära stehen als Energiequellen nur noch die Kernenergie (Fission, Fusion) und die Sonne zur Verfügung. Sie liefern Hochtemperaturwärme, elektrischen Strom und Sonnenstrahlung. Das sind alles Energieformen, die direkt schwer speicherbar und zum Teil schwer transportierbar sind. Es ist deshalb langfristig von sehr grosser Bedeutung, dass die Funktionen, welche heute die fossilen Energieträger fast ideal erfüllen, anderweitig übernommen werden. **Umwandlung von Wärme, Strom und Strahlung in chemisch gebundene Energie ist dabei ein zentrales Thema.**

Warum ist Erdöl so gut speicher- und transportierbar?

Anhand einiger Beispiele wird klar, dass generell potentielle Energieformen leicht, kinetische schwer über längere Zeiten speicherbar sind. Immer sind es Verluste von der Art der Reibung, welche einer Langzeit-Speicherung entgegenstehen (vergleiche dazu Heizöl im Tank und Warmwasser im Boiler).

Schwierig zu speichern sind Bewegungsenergie (z.B. Schwungrad, Wärme, elektrische Ströme) und Strahlung (Sonnenlicht). Demgegenüber ist potentielle Energie leicht zu speichern. Das können chemische Bindungen (z.B. Erdöl, Batterie) oder Wasser im Stausee sein.

Starke chemische Bindung entspricht einem kleinen Speichervolumen. Die chemische Bindung gehört zur stärksten Kraft, die noch ohne wesentliche technische Probleme gehandhabt werden kann, und führt so zur hohen Energiespeicherdichte für fossile Brennstoffe.

Zwischen der kleinsten technisch genutzten Speicherdichte (Stausee) und derjenigen des Erdöls liegt rund ein Faktor zehntausend. Es dürfte schwierig sein, gerade die wichtigsten Funktionen des Erdöls in einer nachfossilen Ära anders als mit synthetischen chemischen Energieträgern (z.B. Wasserstoff, Methanol, ev. Leichtmetallen) zu übernehmen. Dieser Gedanke ist noch zu wenig Allgemeingut. Er wird dann plausibel, wenn man bedenkt, dass die Einfülleistung beim Betanken eines Personenwagens rund 30 MW beträgt! (50 Liter Benzin in einer Minute, d.h. es fließen 0.5 MWh chemische Energie in 1/60 Stunde in den Tank.)

Chemische Energiespeicherung

Die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form ist gut entwickelt (Raketentechnik). Weitere Speicherformen sind Anlagerung an Metalle (Metallhydridspeicher) oder organische Flüssigkeiten wie z.B. Toluol (flüssige Hydride) sowie die Speicherung in Druckflaschen. Der Einsatz von Wasserstoff im Verkehr wurde oder wird für alle dieser Speicherformen mit Versuchsfahrzeugen in kleinen Flotten oder Einzelfahrzeugen untersucht.

Für die Speicherung von grossen Wasserstoffmengen wird unterirdische Lagerung z.B. in entleerten Erdgasfeldern in Betracht gezogen. Es sind die Kosten und nicht so sehr technische Probleme, welche den praktischen Einsatz von Wasserstoff im Grossen kurzfristig als unwahr-

scheinlich erscheinen lassen. Als sekundärer Energieträger, der mit den Primärenergien der Kerntechnik und mit Sonnenstrahlung hergestellt werden kann, ist Wasserstoff und seine Speicherung langfristig trotzdem von grosser Bedeutung.

Leichter als Wasserstoffgas sind Flüssigkeiten zu speichern. Alkohole (Methanol resp. Äthanol) sind als leicht speicherbare sekundäre Energieträger bereits in Grossprojekten im Einsatz (als Benzinzusatz in USA oder als Treibstoff in Brasilien).

Wenig wird bis jetzt von den Leichtmetallen (z.B. Aluminium) als langfristig möglichen sekundären Energieträgern gesprochen. Man kann mit ihnen in Brennstoffzellen direkt elektrischen Strom erzeugen. Dabei werden sie oxidiert (Umkehrprozess zur Elektrolyse). Auch die direkte Verbrennung ist möglich. Leichtmetalle haben einen sehr hohen Energieinhalt und können als Festkörper leicht gelagert werden. Für die Reduktion der Oxide zum Metall (Speicherprozess) gibt es heute nur auf die Bedürfnisse der Metallurgie abgestimmte Prozesse, und man weiss heute noch wenig über die langfristigen Möglichkeiten.

Speicher für mechanische Energie

Bisher wurde vor allem die langfristige Bedeutung der chemischen Speicherung hervorgehoben. Die Speicherung von potentieller mechanischer Energie in Stauseen ist die für die Schweiz heute wichtigste Speichertechnik. Rund die Hälfte des mit Wasserkraft produzierten Stromes stammt aus dieser Quelle. Die Rolle der Speicherkraftwerke als Spitzenenergielieferant ist bekannt. Ebenso die Möglichkeit, in Pumpspeicherkraftwerken billigen überschüssigen Strom in teuren Spitzenstrom umzuwandeln. Auf die zusätzliche Bedeutung der Speicherkraftwerke für eine in der Zukunft wachsende Solarstromproduktion wurde vorne hingewiesen. Die Nachfrage nach Stauseekapazität dürfte wachsen, gleichzeitig wird der Bau neuer Becken aus Umweltschutzgründen zum Politikum. Hier liegen Zielkonflikte vor.

Die Speicherung von kinetischer mechanischer Energie in Schwungrädern hat zur Zeit wenig praktische Bedeutung. Das könnte sich eventuell ändern. Es gibt Ideen, Schwungräder zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs bei Autos einzusetzen. Dabei läuft der Motor immer mit seinem besten Wirkungsgrad (Ein/Aus-Betrieb), und das Schwungrad als Zwischenspeicher liefert jederzeit so viel Energie an die Räder, wie gerade benötigt wird.

Elektrische Energie kann im Prinzip auch dynamisch im vom Strom erzeugten Magnetfeld gespeichert werden. Solche Spulen können nur mit Hilfe der Supraleitung verlustfrei als Speicher betrieben werden. Ein erster, erfolgreicher Versuch wurde zur Glättung von Leistungsspitzen eingesetzt (mit einer Leistung von 10 MW während einer Sekunde bei einer 500 kV-Leitung in USA). In der Schweiz ist ein Projekt zur Deckung von Lastspitzen im Bahnbetrieb in Vorbereitung. Durch die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter, welche schon bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs arbeiten, stiegen die Hoffnungen, dass solche Anwendungen auch im grossen Massstab möglich werden. Ob dies langfristig der Fall sein wird, lässt sich heute noch nicht beurteilen.

Wärmespeicher

Wärmespeicher gibt es in vielen Arten. Bekannt sind die Tagesspeicher für Elektroheizungen. Am verbreitetsten ist der "Boiler" für das Haushaltswarmwasser. In den letzten Jahren wurden die Verluste durch fachgerechtere Isolation vermindert und die Schichtung verbessert (Verminderung der Durchmischung von heissem und nachfliessendem Kaltwasser), dies u.a. deshalb, weil das Solargewerbe für die Warmwasserbereitung mit Kollektoren auf bessere Speicher angewiesen war.

Relative billige Grossspeicher ergeben sich, wenn das Erdreich oder Grundwasserlinsen als Speicher material benützt werden (**Erdspeicher**, **Grundwasserspeicher**). Es werden meist kleine Temperaturhübe und Temperaturen nahe der natürlichen Bodentemperatur verwendet, wie sie für Wärmepumpen zu Heizzwecken günstig sind. Es sind Prototypanlagen mit variablem Erfolg gebaut worden. Die Technik wird aber wenig angewendet.

Anstatt einen Stoff aufzuheizen und abzukühlen, wird im **Latentwärmespeicher** die sogenannte latente Wärme bei einem Phasenübergang zum Speichern verwendet und zwar in den allermeisten Fällen die **Schmelzwärme**. Dies hat den Vorteil, dass die Wärme bei einer konstanten Temperatur aufgenommen (Schmelzen) und wieder abgegeben wird (Gefrieren). Damit geht der Nachteil einher, dass die Schmelztemperatur nicht frei gewählt werden kann. In den 70er Jahren wurden grosse Erwartungen in diese Speicher gesetzt, von denen man aber mit physikalischen Argumenten zeigen kann, dass sie nicht in Erfüllung gehen können. Bis auf Spezialanwendungen finden

Latentwärmespeicher in der Energietechnik deshalb wenig Anwendung.

Das **Grundproblem** jeder **Wärmespeicherung** sind die Wärmeleitverluste und die niedrige Energiedichte. Beides verursacht Kosten und braucht Material. Wie die etablierte Warmwasserspeichertechnik zeigt, sind die Probleme für Kurzzeitspeicher (ein bis einige Tage) leicht zu meistern. Sie verschärfen sich mit zunehmender Speicherdauer und können durch Vergrösserung der Speicherkapazität nur bedingt gemildert werden. Es ist umstritten, ob grosse saisonale Wärmespeicher, ausser unter sehr speziellen Bedingungen, je wirtschaftlich betrieben werden können.

Einige Umwandlungstechniken

Es gibt eine sehr grosse Zahl von Techniken, die es gestatten eine Energieform in eine andere umzuwandeln. Wir greifen hier einige heraus, die im Zusammenhang mit der Umwandlung von elektrischem Strom, Strahlung und Wärme in chemische Energie wichtig sind.

Elektrochemie: Hier geht es um **Elektrolyse** (z.B. die Produktion von Wasserstoff durch Wasserspaltung mit Strom), **Brennstoffzellen** (in denen der Umkehrprozess zur Elektrolyse stattfindet, d.h. z.B. die direkte Stromerzeugung durch Oxidation von Wasserstoff zu Wasser) und **Batterien**. Erwünscht sind hohe Wirkungsgrade sowie hohe Energie- und Leistungsdichten. Letztere vor allem dann, wenn es sich um das Elektroauto handelt.

Die Elektrochemie ist auch für die Solartechnik wichtig, weil mit Solarstrom z.B. Wasserstoff erzeugt werden kann. Die Batterieentwicklung macht langsame aber stetige Fortschritte (z.B. Natrium-Schwefel-Batterie). Wasserelektrolyseure sind ebenfalls kommerzielle Produkte. Die Brennstoffzelle erfuhr einen Entwicklungsschub durch die Weltraumtechnik. Es gibt Anlagen mit Demonstrationscharakter im MW-Leistungsbereich. Verschiedene neue Typen sind im frühen Versuchsstadium.

Auch in der Grundlagenforschung zur Elektrochemie bewegt sich vieles. Neue Werkstoffe und fortgeschrittene Analysemethoden berechtigen zur Hoffnung, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten weitere für die Energietechnik relevante Entwicklungen stattfinden werden.

Thermochemie: Hochtemperaturprozesswärme fällt in der Kern- und der Solartechnik an. Im Vergleich zu den Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen auf dem Gebiet der Stromerzeugung wurde mangels Nachfrage in der Kerntechnik bis jetzt wenig für die Thermochemie getan. Es gab in den 70er und 80er Jahren eine Reihe von Projekten, u.a. zur Wasserstoffherzeugung, die aber nie zu Grossanlagen führten.

Die Thermochemie in der Solartechnik steht ganz am Anfang. Sie kann nur begrenzt von den Erfahrungen der Kerntechnik profitieren, weil ihre Anlageleistungen um den Faktor 100 bis 1000 kleiner und die Temperaturen höher sind. Im weiteren kann die Solarstrahlung direkt durch das Reaktionsgut absorbiert werden.

Die hohen erreichbaren Temperaturen kombiniert mit den hohen Strahlungskonzentrationen ergeben Reaktionsbedingungen, die bisher weitgehend unerforscht sind. Neben Reaktionen zur Produktion von sekundären Energieträgern (z.B. wieder Wasserstoff) finden Prozesse zur Thermolyse von Giftstoffen wie z.B. Dioxinen Interesse. Es zeigt sich, dass unter der kombinierten Einwirkung von hohen Temperaturen und konzentrierter Strahlung die Restkonzentrationen der Giftstoffe um den Faktor 1000 und mehr kleiner sein können als ohne Strahlung bei sonst gleichen Bedingungen.

Photochemie: Für die Photochemie in der Solartechnik stehen Erfahrungen aus der Photochemie mit Lasern und aus der Photographie zur Verfügung. Die Strahlung wird im allgemeinen nicht oder nur wenig konzentriert. Häufigstes Medium sind wässrige Lösungen mit organischen, lichtempfindlichen Verbindungen, welche - ähnlich wie im photographischen Prozess - Lichtquanten absorbieren und danach chemisch reagieren. Auch hier ist die Wasserspaltung ein oft angestrebtes Ziel. Es ist anzunehmen, dass diese Technik vor allem für dezentrale Anlagen in Frage kommen wird. Die Zirkulation von grossflächigen Flüssigkeitsfilmen in zentralen Anlagen dürfte nicht ohne Probleme sein, ebenso wie die Gasdichtigkeit, wenn z.B. Wasserstoff produziert würde.

Die Solarchemie (Photochemie wie Thermochemie) ist eine noch sehr junge Disziplin. Es ist deshalb heute schwierig vorauszusehen, wo und in welchem Umfang diese Technik Beiträge zur chemischen Energiespeicherung in der Zukunft zu leisten vermag.

Energiebilanzen

Ein schwerwiegendes Problem beim Umgang mit Energie besteht heute darin, dass Ressourcen als freie Güter gelten und Umweltbeeinträchtigungen nicht automatisch abgegolten werden müssen. Unser Wirtschaftssystem ist so ausgelegt, dass sich Preise im Wechselspiel von Angebot und Nachfrage ergeben, durch die Interessenabwägung zwischen mehr oder weniger einflussreichen Marktteilnehmern. Leider ist die Natur, obwohl sie durch den Abbau leicht zugänglicher Ressourcen und durch Verschmutzung ärmer wird, nicht ein mit Macht und Einfluss ausgestatteter Marktteilnehmer.

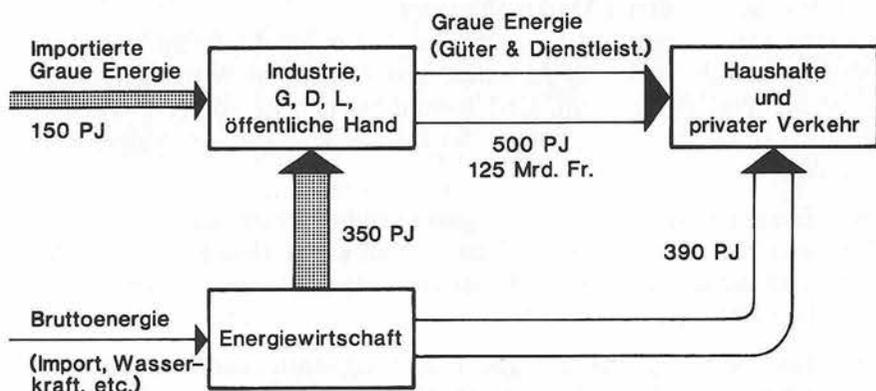
Physikalisch betrachtet nimmt die Natur als Lieferant von Rohstoffen und als Senke für Abwärme und Abfälle im Wirtschaftssystem eine Schlüsselstellung ein. Und sowohl bei den Ressourcen, wie auch bei den Umweltschäden, kommt der Energie eine ganz besondere Rolle zu, denn

- Energieproduktion und Energieanwendung, insb. die Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen in Autos und Heizungen aller Art, sind für den grössten Teil der Umweltverschmutzung verantwortlich und
- Energie ist letztlich die Quelle aller Rohstoffe, denn für eine industrielle Gesellschaft, welcher genügend Energie zur Verfügung steht, gibt es kein eigentliches Ressourcen-Problem. Durch die Kombination von Substitution knapper Ressourcen durch praktisch unbeschränkt vorhandene Rohstoffe wie Eisenerz und Bauxit und sorgfältigem Recycling von Stoffen kann der Verbrauch knapper nicht-energetischer Ressourcen vermieden werden. Dies würde auch mit heutiger Technologie unser Energiebudget nicht um mehr als ein Viertel erhöhen.

Oekonomen wissen selbstverständlich um die Wichtigkeit der Ressourcen und Umweltbelastungen, aber die Bewertung dieser Grössen bereitet grosse Schwierigkeiten. Die Mithilfe der Naturwissenschaften ist gefragt. Ein erster Schritt in dieser Richtung stellen Energiebilanzen dar. Sie selbst sind bereits von Interesse - nicht als Ersatz von, aber als Ergänzung zu monetären Bilanzen.

Es gibt verschiedene Methoden Energiebilanzen aufzustellen. Um Doppelzählung zu vermeiden empfiehlt sich eine klare Trennung des Energieverbrauchs der produzierenden Wirtschaft und des Energiever-

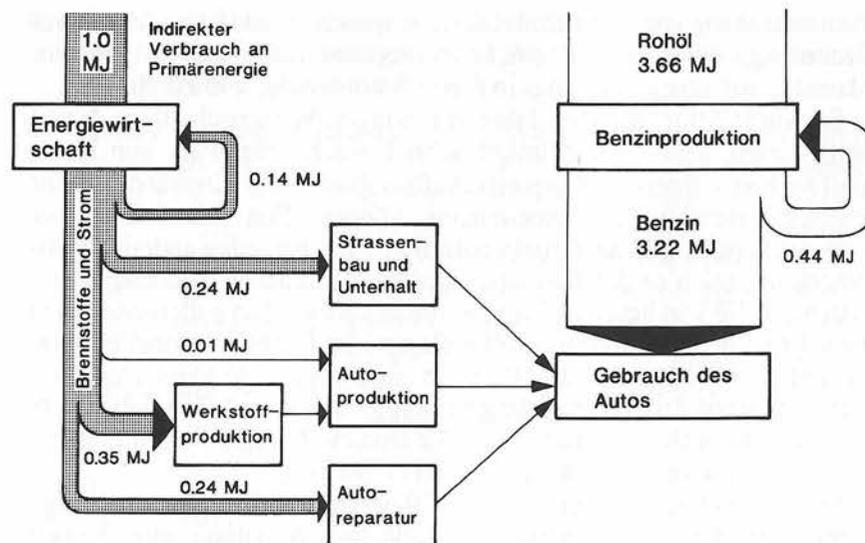
brauchs von privaten Haushaltungen. In der nachfolgenden Figur zeigt sich, dass die von den privaten Haushaltungen jährlich nachgefragten Güter und Dienstleistungen - im Wert von etwa 125 Milliarden Franken - rund 500 PJ sogenannte "Graue Energie" enthalten. Direkt verbrauchen die privaten Haushaltungen 390 PJ, hauptsächlich in Form von Heizöl, Haushaltstrom, Gas und Benzin. Netto wird in die Schweiz etwa 150 PJ Graue Energie importiert. D.h. die importierten Güter (Stahl, Chemikalien, Kunststoffe, Autos etc.) erforderten zu ihrer Herstellung 150 PJ mehr Energie als die exportierten Güter (Maschinen, Pharmazeutika, Uhren etc.).



Graue Energie der von den Haushalten nachgefragten Güter und Dienstleistungen (CH, 1986)

Dabei wird unter Grauer Energie immer die Summe aller Energien verstanden, die insgesamt in der ganzen produzierenden Wirtschaft (Industrie, Dienstleistungen, Landwirtschaft) und der öffentlichen Hand aufgewendet wird, um die Produktion und den Verkauf einer Ware zu ermöglichen: von der Erzgrube, inkl. Transport und Herstellung aller benötigten Materialien und Einrichtungen, bis zum Verkauf.

Autofahren braucht beispielsweise nicht nur Energie in Form von Benzin, sondern auch die Herstellung und der Unterhalt des Autos, der Bau der Strassen, wie auch die Herstellung und der Transport des Benzins brauchen Energie. Die Situation ist in der nachfolgenden Figur dargestellt: Es sind nicht nur 3.22 MJ Benzin, sondern insgesamt 4.66 MJ Primärenergie erforderlich pro Personenkilometer.



Energieflussdiagramm für den Gebrauch eines Autos (Zahlen in MJ pro Personenkilometer)

In der Öffentlichkeit wurde oft die Frage nach dem sog. Erntefaktor von bestimmten Energiesystemen gestellt. Beispielsweise wurde gefragt, ob Anlagen zur Gewinnung von Sonnenenergie nicht mehr kommerziell nutzbare Energie für ihre Herstellung und ihren Betrieb brauchen, als sie liefern. Hierzu ist folgendes zu sagen: Anlagen zur Gewinnung nutzbarer Energie, die auch nur annähernd wirtschaftlich betrieben werden können, sind auch energetisch sinnvoll - es sei denn, man befände sich in einem Bereich, in welchem Subventionen und Besteuerungen grobe Verzerrungen der Marktpreise bewirkten.

Als Beispiel für eine Situation der groben Marktverzerrung sei eine Anlage zur Produktion von Ethanol durch Mais erwähnt, in welcher der Anbau von Mais subventioniert und der Treibstoff, gegen den das Ethanol sich auf dem Markt zu bewähren hat, besteuert wird. Ein solches System kann eventuell betriebswirtschaftlich Gewinn bringen, ohne dass es energetisch (oder volkswirtschaftlich) sinnvoll ist.

Meldungen, wonach Kernenergie- oder umgekehrt Sonnenenergie-Anlagen für die Herstellung und den Betrieb mehr Energie benötigen, als sie später zu liefern vermögen, sind mit Vorsicht, aber differenziert zu betrachten. Die sog. Energie-"Pay-back"-Zeit (oft wird in diesem

Zusammenhang auch von Erntefaktor gesprochen) ist dann von grosser Bedeutung, wenn es gilt, ein Energiesystem rasch und in grossem Massstab aufzubauen, wie das in Zukunft notwendig sein könnte.

So wurde Mitte der 70er Jahre von einigen Wissenschaftlern darauf hingewiesen, dass ein unheimlich schnell wachsender Park von Kernkraftwerken während der rapiden Aufbauphase unter Umständen mehr Energie erfordern als produzieren könnte. Das Resultat dieser Untersuchungen gilt im Prinzip natürlich auch für jedes andere Crash-Programm, seien es der Bau einer grossen Anzahl von Sonnenenergiesystemen, die von heute auf morgen installiert werden sollen oder auch die sehr schnelle Einführung von Anlagen, die Energie rationeller nutzen sollen. Anfällig für das Problem sind aber besonders jene Programme, deren Anlagen eine lange Energie-"Pay-back"-Zeit haben, d.h. Anlagen, die während einer langen Zeitspanne Energie liefern müssen, um die in sie investierte Energie zurückzubezahlen.

Die Berechnung von Energie-"Pay-back"-Zeiten weist einige Schwierigkeiten auf. Folgende Beispiele (mit Annahme, eine Einheit elektrische Energie entspreche 3,34 Einheiten thermischer Energie) sollen aber die Grössenordnung klarstellen:

- Bei einem Kernkraftwerk der üblichen Art werden zum Bau der Anlage und für die Bereitstellung der ersten beiden Brennstoffchargen eine Energiemenge investiert, die in weniger als einem halben Jahr vom laufenden Kraftwerk produziert wird. Bei Hochtemperaturreaktoren, moderneren Anreicherungstechniken usw. ergeben sich kürzere Rückzahlzeiten.
- Bei einer solarthermischen Prototyp-Anlage, die für die Alpensüdseite geplant wurde, ergäbe sich eine Energie-"Pay-back"-Zeit von 1 Jahr. An sehr sonnigen Standorten weisen die Anlagen Rückzahlzeiten von wenigen Monaten auf.
- Die Elektrizitätserzeugung mittels Photovoltaik befindet sich noch in der Anfangsphase, sodass Erntefaktoren, die sich auf den jetzt notwendigen Aufwand bezügl. Material und Kosten beziehen, zu Rückzahlzeiten von vielen Jahren führen. Man darf aber davon ausgehen, dass in Zukunft Solarzellen, die mit ausgereiften industriellen Methoden produziert und in gut geplanten Systemen eingesetzt werden, zu Rückzahlzeiten führen, die mit den anderen Systemen vergleichbar sein werden.

- Besonders kurze Energie-"Pay-back"-Zeiten weisen Systeme auf, welche natürliche Bewegungsenergie in Elektrizität umwandeln, also Wasser und Windkraftwerke.
- Auch Energiesparmassnahmen sind oft mit Energie-Investitionen verbunden, die im Betrieb wieder rückbezahlt werden können. Beim Ersatz eines alten ineffizienten Kühlschranks durch einen neuen effizienteren entspricht die eingesparte Energie nach einem Jahr ungefähr der Grauen Energie, die zur Herstellung des neuen Kühlschranks erforderlich war. Ebenfalls in einem Jahr spart eine Energiesparlampe die Energie, welche zu ihrer Herstellung benötigt wurde, falls sie durchschnittlich etwa 3/4 Stunden pro Tag brennt. Bei unausgereiften Energiesparmassnahmen andererseits kann die Energie-Rückzahlzeit sehr lange sein.

Eine Schlussfolgerung, welche die vielen Analysen der Energiebilanzen von Energiesystemen erlauben, ist, dass die Entwicklung des gesamten Energiesystems Zeit erfordert: Ueberstürzte Crash-Programme, welche nicht-ausgereifte Techniken sowohl zur Bereitstellung als auch zur Einsparung von Energie fördern, sind wirkungslos. Sie erfordern zwar einen grossen Aufwand an Engagement und Geld, werden aber kaum eine Energiemangel überwinden helfen, da sie selbst zum nicht vernachlässigbaren Energiekonsument werden.

Die Falschmeldungen, welche hier und dort über grundsätzliche Unterschiede der Energie-Rückzahlzeiten von Kern- und Sonnenenergie zu lesen waren, beruhen einerseits auf der Verwechslung einer statischen mit einer dynamischen Betrachtungsweise, andererseits auf Unklarheiten bezüglich der Berechnungsmethoden.

Ein weiteres methodisches Problem, welches zu Falschmeldungen bezüglich des sog. Erntefaktors von Sonnenenergieanlagen geführt hat, ist die Verwendung von Angaben über die Graue Energie von Produkten pro Geldeinheit. Solche Angaben, welche durch elegante mathematische Umformung aus volkswirtschaftlichen Tabellen hervorgehen, sind mit grösster Vorsicht anzuwenden. Sie beziehen sich auf durchschnittliche Produkte von Branchen und können unmöglich auf Prototypen angewandt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Energiebilanzen nützliche Zusatzinformationen zu Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen liefern können und dass diese Zusatzinformationen besonders dort gefragt sind, wo die Wirtschaftlichkeit ein unzureichendes Kriterium ist: an den

Grenzen des Wirtschaftssystems, also insbesondere bei Fragen des Verzehrs von Ressourcen und bei Umweltbelastungen.

Neben Energie sind im übrigen auch Informationen und Zeit Grössen, die sowohl in der Physik als auch in der Volkswirtschaft von grundlegender Bedeutung sind. Die Substitutionsmöglichkeit von Energie durch Zeit und Information weist auf Lösungsansätze für die Energieprobleme der Zukunft hin:

- Wären wir nicht immer in gar so grosser Eile und
- setzten wir auf ein qualitatives Wachstum, in welchem mehr Wert auf Geist als auf Materie gelegt würde, in welchem Ausbildung, Präzision und Koordination gepflegt würde, so kämen wir mit deutlich weniger Energie aus.

Perspektiven des Energieverbrauchs

Die Schweiz verbraucht heute ⁷ 990 PJ Primärenergie und 724 PJ Endenergie. Für die OECD betragen diese Zahlen 157 EJ Primärenergie und 111 EJ Endenergie. Der weltweite Verbrauch beträgt 279 bzw. 197 EJ ⁸.

Mit Primärenergie ist die Energie der Brennstoffe gemeint, die in der Natur vorkommen, während die Endenergie dem Endverbraucher geliefert wird. Der Unterschied zwischen Primär- und Endenergie beruht vor allem auf der thermischen Elektrizitätserzeugung. In der Tat braucht es ungefähr 3 EJ Kohle, um dem Endverbraucher 1 EJ Elektrizität zu liefern. Im allgemeinen ist es besser, die gegenwärtige und zukünftige Nachfrage nach Endenergie zu analysieren und daraus die erforderliche Primärenergie zu berechnen, da diese von der Produktionsweise, also der gewählten Angebotspolitik, abhängig ist.

Zur Beurteilung eignet sich am besten ein Vergleich des jährlichen Pro-Kopf-Verbrauchs in den verschiedenen Teilen der Welt:

Land oder Region	Endenergie-Verbrauch pro Kopf und Jahr
OECD	137 GJ
USA	225 GJ
Schweiz	111 GJ
Entwicklungsländer	<20 GJ
Weltenmittel	42 GJ

Die bedeutenden Differenzen sind vor allem auf die Unterschiede in der wirtschaftlichen Entwicklung zurückzuführen.

Für die weitere Analyse ist es nützlich, den fossilen Anteil an der Energieversorgung festzuhalten:

⁷ im Jahre 1985

⁸ ohne nicht-kommerzielle Energien

	Anteil Endenergie	Anteil Primärenergie
Elektrizität	17 %	
davon:		
Fossile Energie	11 %	27 %
Wasserkraft	3.5 %	2.6 %
Kernenergie	2.5 %	6.2 %
Direkt als Endenergie verwendete fossile Energien	83 %	65 %

Die fossilen Energien tragen heute beinahe 94 % zum globalen Endverbrauch bei, die Wasserkraft 3,6% und die Kernenergie 2,6 %. Für die Schweiz lauten diese Beiträge 81 % fossile Energien, 10,8 % Wasserkraft und 8,2 % Kernenergie; für Frankreich 85,2 % fossile Energien, 2,8 % Wasserkraft und 12 % Kernenergie.

Nachfrageperspektiven

Der zukünftige globale Energieverbrauch ist sehr schwierig abzuschätzen. Energieszenarien für die Welt gehen von einem Primärenergieverbrauch im Jahre 2020⁹ in der Grössenordnung von 600 bis 1000 EJ und bis zum Ende des Jahrhunderts von noch wesentlich grösseren Zahlen aus. Um solche Zahlen zu überprüfen, stelle man sich eine Welt mit 10 Mia Bewohnern vor (diese Zahl wird für das Ende des 21. Jahrhunderts oft genannt), in welcher durchschnittlich jeder Bewohner gleichviel Energie verbraucht wie der Schweizer heute. Diese würde 1220 EJ Endenergie benötigen, d.h. sechsmal mehr als heute. Es ist daher davon auszugehen, dass in einem sogenannten Referenzszenario (Status quo oder "business as usual") der Energiebedarf der Welt stark zunehmen wird.

Daneben existieren natürlich auch Energieszenarien, in welchen der Weltenergieverbrauch nicht mehr oder nur sehr langsam steigt. In diesen Szenarien werden die Möglichkeiten einer optimalen Energieverwendung überall und sehr weitgehend ausgenutzt.

⁹ Energieszenarien, Bern, Mai 1988 Beilage 1 S. 5

Die verfügbaren Ressourcen

Ein Weltverbrauch in der Grössenordnung von bis zu 1000 oder 2000 EJ Endenergie pro Jahr ist mit den geschätzten Energiere Ressourcen zu vergleichen. Zur Illustration wird die Anzahl Jahre ermittelt, während welcher ein Jahresverbrauch von 500 EJ mit jedem Energieträger für sich allein aufrechterhalten werden könnte.

Energieform	Dauer der Vorräte für 500 EJ Endenergie pro Jahr *)	Dauer der Vorräte beim heutigen Verbrauch und Aufteilung
Erdöl	6 - 35 Jahre	30 - 165 Jahre
Erdgas	5 - 16 Jahre	50 - 170 Jahre
Kohle	30 - 200 Jahre	370 - 2300 Jahre
klass. Kernenergie ***	1 - 2 Jahre **	80 - 160 Jahre
Brüter***	10 - 140 Jahre	--
Fusion	> 1000 Jahre	--

*) *Quelle WEK (Weltenergiekonferenz). Annahme der heutigen Verteilung der Nutzung für Wärme, Transport und elektrizitäts-spezifische Anwendungen.*

***) *Für Elektrizität als Endenergie. Beim heutigen Verbrauchsspektrum drei mal länger.*

***) *Ohne nicht konventionelle Quellen wie z.B. Uran des Meerwassers. Beim Brüter Annahme von 10 - 70-facher Ausnützung.*

Es besteht somit kein absolut dringendes globales Energieversorgungsproblem. Geht man jedoch davon aus, dass wegen des CO₂-Problems die Beiträge der fossilen Energien nicht mehr zunehmen sollten, bleiben lediglich die Brutreaktoren, die Kernfusion und die erneuerbaren Energien als bedeutende Ressourcen.

Was die Vorräte betrifft, ist zu bemerken, dass die Schätzungen infolge von neuen Prospektierungen regelmässig erhöht werden können und dass sie vor allem davon abhängen, welche Gewinnungskosten zu Grunde gelegt werden. Erhöht man diese, steigen die Reserven sehr schnell an.

Die ökologischen Grenzen

Es gibt keine vollständig saubere Energie. Der Einsatz jedes Energieträgers führt zu ökologischen Belastungen. Die Folgen einer Erzeugung von 500 EJ Endenergie pro Jahr lassen sich für die einzelnen Energieträger wie folgt zusammenfassen. Dabei sind nur die direkten Emissionen eingeschlossen, da z.B. das CO_2 , das beim Bau der Infrastrukturen entsteht, auf Grund der noch umstrittenen Berechnungsmethoden nur ungenau bekannt ist.

Erdöl: 40 Mia Tonnen CO_2 pro Jahr (heute ungefähr 20 Mia Tonnen aus allen Energieträgern), Erhöhung der mittleren Temperatur der Atmosphäre um 0,03 - 0,09 °C pro Jahr; 2 - 3 grössere Tankerunfälle mit Meerverschmutzungen pro Jahr.

Kohle: 90 Mia Tonnen CO_2 pro Jahr (heute 20 Mia), Erhöhung der Durchschnittstemperatur um 0,06 - 0,18 °C pro Jahr; 166 Mio Tonnen SO_2 -Emissionen jährlich.

Klassische Kernenergie: 35 Mio Tonnen schwach- und mittlerradioaktive Abfälle pro Jahr und 340'000 Tonnen hochradioaktive, welche jährlich 5 neue Endlager erfordern. Für 500 EJ braucht es die installierte Leistung von 20'000-25'000 1 GW-Kraftwerken (gegenüber heute total 300 GW). Was die Unfallhäufigkeit anbetrifft, führt der von der Industrie angenommene Wert (Kernschmelzhäufigkeit $5 \cdot 10^{-5}$ /Reaktorjahr) zu einem Unfall pro Jahr. Mit der für die nächste Reaktorgeneration zugrunde gelegten Kernschmelzhäufigkeit von $5 \cdot 10^{-6}$ /Reaktorjahr ergäbe sich alle 10 Jahre ein solcher Unfall. Aber nur in einem von zehn Fällen ist ein wesentlicher Austritt von Radioaktivität zu erwarten.

Brutreaktoren: Produktion von 42'000 Tonnen Plutonium und 100'000 Tonnen wiederaufgearbeitete Brennstoffe pro Jahr (dabei 200 - 400 Tonnen Verluste). Unfallhäufigkeit analog zu den thermischen Kernreaktoren.

Kernfusion: Probleme des radioaktiven Gases Tritium und der radioaktiven Abfälle aus den Strukturen der Kraftwerkbauteile (z.B. Brennkammer).

Erneuerbare Energien: Nur die thermische oder photovoltaische Produktion von Elektrizität und die Biomasse kommen in sehr grossem Massstab in Frage. Das Hauptproblem besteht im Landbedarf: 100'000 km^2 wären für die Elektrizitätsproduktion, 1'200'000 km^2 für die Biomasse erforderlich (Oberfläche der Schweiz 40'000 km^2). Die solare Elektrizitätserzeugung in diesem Massstab führt auch zu Transport- und

damit Sicherheits- und Emissionsproblemen beim Verbrauch von Wasserstoff und Methanol.

Die Grenzen in der Einführungsgeschwindigkeit

Der Einsatz von Energie ist nicht nur durch die verfügbaren Ressourcen, sondern auch durch die Geschwindigkeit beschränkt, mit der die erforderlichen Techniken eingeführt werden können. Diese Einführungsgeschwindigkeit kann von verschiedenen technischen (z.B. breeding ratio für die Brutreaktoren), wirtschaftlichen (z.B. erneuerbare Energien) oder sicherheits- und gesellschaftspolitischen Hindernissen eingeschränkt werden, welche sich gegenseitig beeinflussen.

Allein aufgrund der maximal möglich erscheinenden Einführungsgeschwindigkeiten ergeben sich folgende Beiträge der nicht-fossilen Energien.

So würde eine neue Technologie, welche heute das Äquivalent von zehn 1 GW (elektrisch) Kraftwerken liefert, bei 4%/Jahr Wachstumsrate in 50 Jahren nicht einmal 1 EJ oder 0,5% des heutigen Endverbrauchs liefern. Solche Überlegungen gelten gleichermassen für Solaranlagen, Brüter oder Fusion.

Energieverbrauch

Geht man davon aus, dass wegen des Treibhausproblems der Verbrauch von fossilen Energien global nicht zunehmen sollte, so führt eine Entwicklung wie die skizzierte zu offensichtlichen Schwierigkeiten. Damit stellt sich die grundsätzliche Frage, wozu der Energieeinsatz dient, ob alle Energieverwendungen wirklich notwendig oder gar nützlich sind und ob die Energie immer möglichst rationell eingesetzt wird.

Die oft geäusserte Behauptung, dass ein wachsender Energieverbrauch gleichbedeutend ist mit Wirtschaftswachstum und Wohlbefinden, ist in Frage zu stellen. Beispielsweise ist der Energieverbrauch pro Kopf in den osteuropäischen Ländern gleich gross wie in Japan, und der Energieverbrauch pro Einheit Bruttoinlandprodukt oder pro Kopf der Bevölkerung in den Vereinigten Staaten ist doppelt so hoch wie in Japan! Der unterschiedliche Verbrauch in diesen Ländern ist wenigstens zum Teil eine Folge der verschiedenen Effizienz im Energieeinsatz.

Wozu dient die Energie ?

Die Energie dient vor allem zum Heizen, Transportieren und zur Produktion in der Industrie. Die Verteilung der gegenwärtig weltweit 207 EJ und der 724 PJ in der Schweiz genutzten Energie ist:

Verwendung	In der Schweiz	Weltweit
Heizung	288 PJ = 40 %	47 EJ = 23 %
Transport	205 PJ = 28 %	70 EJ = 34 %
Industrie	135 PJ = 18.6 %	70 EJ = 34 %
Haushalt	36 PJ = 4.9 %	10 EJ = 4.5 %
Dienstleistungssektor	49 PJ = 6.7 %	10 EJ = 4.5 %

Potentiale der rationellen Energieverwendung

Für Fachleute¹⁰ besteht kein Zweifel, dass das Potential einer optimalen Energieverwendung sehr gross ist. Bei den meisten Anwendungen könnte wesentlich weniger Energie verwendet werden, ohne dass die Kosten zu- und die Energiedienstleistungen oder der Komfort abnehmen. Solche Beispiele sind :

Verwendung	Mittlerer Verbrauch	Optimaler Verbrauch
Heizung	700 MJ/m ² Jahr	100-200 MJ/m ² Jahr
Elektrizität: Dienstleistungssektor (Banken)	400 MJ/m ² Jahr	<300 MJ/m ² Jahr
Beleuchtung	15 W/lumen	<60 W/lumen
Automobile	91/100 km	<51/100 km
Kühlschränke	2.5 GJ/Jahr	1.5 GJ/Jahr

¹⁰ Literaturverzeichnis siehe B. Giovannini und D. Pain, Technical and scientific arguments for the optimal use of energy, Update 22 Juni 1990, CUEPE

Hier werden die optimalen Verbrauchswerte von Pilotstudien oder industriellen Vorserien verwendet. Theoretische oder Laborversuche führen im allgemeinen zu tieferen Werten.

Es gibt jedoch gewisse Ausnahmen, nämlich diejenigen Anwendungen, für welche die Energiekosten einen wesentlichen Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Es handelt sich im wesentlichen um energieintensive Industrien (v.a. Aluminium, Glas, Zement, Stahl), die Luftfahrt und den Schienenverkehr.

Das oft vorgebrachte Argument, wonach in einer Marktwirtschaft alles realisiert wird, was sich wirtschaftlich lohnt, ist falsch. Der Mensch ist, selbst in einer Marktwirtschaft, nicht einfach ein Automat, welcher dauernd seine Kosten optimiert. Noch nie hat jemand einen einzigen Franken investiert, um dafür 20 % (20 Rappen) Zins zu erhalten, oder den energieeffizientesten Haushaltapparat ausgewählt, nur um dafür einige wenige Franken an Energiekosten zu sparen. Damit eine wirtschaftliche Energiesparmassnahme aus ökonomischen Gründen tatsächlich getroffen wird, muss sie auch wirtschaftlich bedeutsam sein. Für den grössten Teil der Wirtschaft, die Haushalte eingeschlossen, sind die Energiekosten jedoch oft marginal oder sogar zu vernachlässigen, sodass tausend andere Überlegungen wichtiger sind als die Energieeinsparung.

Die Methoden zur optimalen Energieverwendung

Die optimale Energieverwendung erfordert eine Optimierung in drei Schritten:

- die Optimierung der Bestandteile
- die Optimierung des Systems
- die Optimierung der Systemanwendung

Insgesamt lassen sich auf diese Weise spektakuläre Energieeinsparungen von 90 und mehr Prozent z.B. im Bereich der Beleuchtung erzielen, indem man die effizientesten Beleuchtungskörper und Reflektoren einsetzt und dann das Gesamtsystem optimal an die Bedürfnisse anpasst (maximaler Einsatz des natürlichen Lichts, zeitliche und örtliche Beschränkung der Beleuchtungsintensität an die Bedürfnisse der Benutzer).

Ein weiteres lehrreiches Beispiel liefern die tragbaren Computer (lap-top). Diese haben die gleichen Kapazitäten und Möglichkeiten wie

die entsprechenden Büroinstallationen, d.h. gleiche Geschwindigkeit, Prozessoren, RAM, Diskettenkapazitäten und Zugriffsmöglichkeiten. Um die Autonomie dieser Apparate zu erhöhen, haben die Ingenieure alle Bestandteile auch bezüglich Energieeinsatz so optimiert, dass ein solcher Computer ungefähr 20 - 30 mal weniger Elektrizität braucht als der entsprechende Büroapparat. Diese Optimierung erfordert ein grosses Fachwissen, viel Scharfsinn und führt oft zu bedeutenden technischen Fortschritten, nicht aber zu einer Verminderung der Dienstleistung und des Nutzens. In Einzelfällen haben einige der so erzielten Innovationen im Gegenteil sogar zu erhöhten Dienstleistungen geführt, so z.B. der "sleep mode", und bereits fordern Leserbriefe in Fach-Zeitschriften, dass diese Innovationen auch für die Bürocomputer eingeführt werden.

Die Spezialisten einer optimalen Energieverwendung wissen schon lange, dass solche spektakulären Resultate praktisch in sämtlichen Energieanwendungsbereichen erzielt werden könnten; trotzdem sind diese Sparpotentiale immer noch heftig umstritten.

Die Hindernisse einer optimalen Energieverwendung

Es gibt in Wirklichkeit aber viele Hindernisse für eine optimale Energieverwendung:

- Wie bereits erwähnt, spielt die Wirtschaftlichkeit für den Konsumenten keine Rolle, solange die Energiekosten einer bestimmten Anwendung tief sind. Viele Verbraucher, auch in der Industrie, wissen nicht einmal, wie viel Geld sie für Energie ausgeben. In den reicheren Haushalten der Industrieländer belaufen sich die gesamten Energiekosten auf etwa 2 % ihres Einkommens, in vielen Industrien auf weniger als 1 % der gesamten Produktionskosten.
- Beim Wirtschaftlichkeitsvergleich - sofern er überhaupt erstellt wird - werden oft ungleiche Spiesse verwendet: Für Investitionen im Bereich der Energieproduktion werden in der Regel tiefere Zinssätze und viel längere Abschreibungszeiten unterstellt als für Investitionen im Bereich der rationellen Energieverwendung.
- Die Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung der Energiepreise verzögern die Investitionen für die rationelle Energieversorgung.

- Das für solche Investitionen erforderliche Kapital ist oft weniger leicht verfügbar als für Investitionen im Bereich der Energieversorgung.
- Der persönliche Aufwand ist oft zu gross: Ein Teil des persönlichen Komforts besteht darin, dass man nicht immer an alles denken muss. Es ist oft einfacher und weniger aufwendig, einen Haushaltapparat im raschesten zugänglichen Geschäft zu kaufen, statt umfangreiche Recherchen nach dem energieeffizientesten Gerät zu unternehmen.
- Vielfach fehlen die erforderlichen technischen Kenntnisse über die Möglichkeiten der rationellen Energieverwendung.
- Oft trägt der Entscheidungsträger die Auswirkungen seines Investitions-Entscheids nicht selber (Mieter-Vermieterproblem).
- Volkswirtschaftlich oft unbefriedigende Tarifstrukturen führen zu Subventionen bestimmter Verbraucher zulasten anderer Konsumenten.
- Administrative und gesetzliche Bestimmungen erschweren vielfach energiesparende Investitionen.

Das wichtigste Hindernis ist jedoch der grundsätzliche Widerstand, auf den man vielfach nur schon gegenüber der Idee einer rationellen Energieverwendung trifft. Während eine Minderheit von Wissenschaftlern und Ingenieuren von der technischen und konzeptionellen Herausforderung der rationellen Energieverwendung begeistert ist, stemmt sich die Mehrheit noch hartnäckig gegen den Gedanken, dass man, anstelle zu produzieren, sparen könnte. Dabei geht es um eine eigentliche Kulturdebatte, die sich vermutlich aus dem fundamental-produktivistischen und dem die Natur plündernden Charakter unserer Zivilisation erklären lässt.

Optimaler Energieverbrauch und Komfort

Grundsätzlich wird die optimale Energieverwendung in sämtlichen Bereichen (Heizung, Beleuchtung oder Dienstleistung) so definiert, dass der Energienutzen (Wärme, Licht, Dienstleistungen) nicht abnimmt.

Selbstverständlich beeinflusst jedoch jede Änderung der Energieverwendungsparameter im weitesten Sinne auch den Komfort, und

zwar in beiden möglichen Richtungen. Vorschriften über die Wärmedämmung von Gebäuden vermindern die Freiheit des Bauherrn, der nicht mehr unbeschränkt tun kann, was er will; doch erhöht sich dadurch in der Regel die Behaglichkeit der Bewohner. Vorschriften über die Beleuchtung reduzieren die Wahlfreiheit des Verbrauchers und daher seinen subjektiven Komfort. Wenn dank dieser Massnahmen (zusammen mit anderen) eines Tages ein Kraftwerk weniger gebaut werden muss, so erhöht sich dadurch das politische und gesellschaftliche Wohlbefinden, vor allem der umliegenden Bevölkerung. Dieses Wohlbefinden hat ohne Zweifel in der Schweiz schon lange unter der Polarisierung gerade im Bereich der Kernenergie stark gelitten.

Das Thema ist also sehr komplex, und es handelt sich im wesentlichen immer um eine Wahl: Auf welchen Komfort ist man bereit zu verzichten, um dafür einen bestimmten anderen Nutzen zu erzielen. Es geht somit immer um eine typisch politische Diskussion.

Zurück zum Klimaproblem

Das Energieproblem ist heute vor allem ein Umweltproblem, wobei der Treibhauseffekt eine immer grössere Rolle spielt. Dabei stellen sich dieselben Fragen, welche bereits vor 10 - 15 Jahren aufgrund der Erdölkrise auftauchten.

Unabhängig von den langfristigen Potentialen der Energieträger und der rationellen Energieverwendung sind für unsere Generation vor allem jene Entscheidungen wichtig, welche heute gefällt werden können und sich in den nächsten Jahrzehnten konkret auswirken: Welche Rolle können das Wirtschaftswachstum, die rationelle Energieverwendung, die Kernenergie und die erneuerbaren Energien zur Lösung des Treibhausproblems in den nächsten 20 Jahren spielen?

Zur Analyse dieses Problems kann folgende Überlegung dienen:

Wachstum der CO₂-Emissionen = Wachstum des Anteils der fossilen Energien im Gesamtenergieverbrauch + Wachstum der Energieintensität der Volkswirtschaft + Wirtschaftswachstum ¹¹. Für die OECD ergibt sich während der Jahre 1972 - 1987:

$$+0,4\% = -0,6\% - 1,8\% + 2,8\%$$

¹¹ Zuwachsrate erfolgt aus der logarithmischen Ableitung des Produktes

Die Ziele, welche die Umweltkonferenz in Toronto 1988 aufstellte, verlangen, dass die CO₂-Emissionen abnehmen (-1% pro Jahr). Die Resultate von drei Szenarien ¹² (pro-nukleare Referenzentwicklung, anti-nukleare Sparpolitik und pro-nukleare Sparpolitik) lassen sich für die nächsten 30 Jahre ermitteln:

Jährliche Wachstumsraten für die Szenarien	Referenz mit Kernenergie	Sparpolitik ohne Kernenergie	Sparpolitik mit Kernenergie
Anteil der fossilen Energie	- 0.2 %	- 0.2 %	- 0.8 %
Anteil der Energie an der Bildung des Bruttoinlandprodukt (PIB)	- 1.5 %	- 3.1 %	- 3.1 %
Wachstum des Bruttoinlandprodukt (PIB)	2.5 %	2.5 %	2.5 %
Totaler CO₂ - Ausstoss	+ 0.8 %	- 0.8 %	- 1.4 %

Sparpolitik bedeutet dabei eine rasche Verwirklichung des optimalen Energieverbrauchs: innerhalb von etwa 20 Jahren werden die heute bekannten optimalen spezifischen Verbrauchswerte realisiert.

Eine Reihe von interessanten - aber keineswegs neuen - Schlussfolgerungen lassen sich aus diesen Resultaten ziehen:

- Eine pro-nukleare Referenzpolitik kann für sich allein das CO₂-Problem bei weitem nicht lösen. Alle Szenarien diese Typs führen systematisch zu einem bedeutend steigenden Verbrauch von fossilen Energien (zB. die der IIASAS).
- Demgegenüber kann die Kernenergie einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des Problems leisten, aber nur im Rahmen einer Politik der rationellen Energieverwendung, d.h. nicht zur Deckung eines weiteren Wachstums des Elektrizitätsverbrauchs, sondern zum

¹² Wichtigste Annahmen: Pro-nukleare Politik bedeutet ein Wachstum des Kernkraftparks um 3 % pro Jahr. Sparpolitik bedeutet ein allmählicher Übergang bisher beobachteten Fortschritt bei den Energiewirkungsgraden von 0.5 auf 2.5 %

Ersatz von fossil-thermischen Kraftwerken durch Kernkraftwerke. Dies wurde z.B. in Frankreich seit der Erdölkrise systematisch durchgeführt.

- Die Rolle der erneuerbaren Energien bleibt während den nächsten Jahrzehnten in diesen Szenarien ein unbedeutender Faktor, doch ist es wichtig, diese Energien im Rahmen einer langfristigen Politik zu fördern.

Die Wirksamkeit einer Sparpolitik für die Elektrizität ist eine umstrittene Frage, insbesondere ob dadurch der Verbrauchszuwachs und damit die Notwendigkeit weiterer Kraftwerke gestoppt werden könnte. Jedenfalls könnte aber eine moderate Sparpolitik, gekoppelt mit einem massvollen Anstieg der nuklearen Kapazität, die Substitution des fossilen Verbrauchs begünstigen.

Zusammenfassung und Ausblick

Es besteht kein Zweifel, dass die zukünftige Entwicklung der Menschheit entscheidend von der Verfügbarkeit von Energie, aber ebenso sehr auch von den indirekten Folgen des Energieverbrauchs bestimmt sein wird. Mit Holz als einzigem Energieträger könnte nur ein kleiner Bruchteil der heutigen Erdbevölkerung ein bescheidenes Dasein fristen. Erst die Erschliessung der "technischen" Energiequellen, Wind, Wasser, Kohle führte zur Industrialisierung und schliesslich zum heutigen hohen Wohlstand der entwickelten Welt. Parallel dazu erfolgte der explosive Anstieg der Erdbevölkerung, der an sich dramatische Konsequenzen hat. Zusätzlich zu lokalen Problemen zeichnet sich die Gefahr ab, dass globale Gleichgewichte (Klima) sich irreversibel verändern, wenn es nicht gelingt, den Kohlendioxidausstoss zu reduzieren. Eine weiter steigende Erdbevölkerung, gekoppelt mit einem pro Kopf den Industrienationen angeglichenen Energieverbrauch der Dritten Welt, ist nicht vorstellbar. Als Konsequenz müsste der Verbrauch der entwickelten Länder drastisch verkleinert werden. Früher oder später werden Korrekturmechanismen der Natur auftreten. Die Frage ist, ob der Mensch von sich aus in der Lage sein wird, den heutigen Trend frühzeitig genug zu korrigieren. Dabei ist die energetische Basis schmal, beruht sie doch im wesentlichen auf einem Raubbau an den fossilen Brennstoffen. Nicht nur die Auswirkungen auf die Umwelt werden begrenzend wirken, sondern die Deckung des Energiebedarfs überhaupt steht langfristig in Frage.

Geschichtlich haben sich Energieträger in langen Perioden von 50-100 Jahren abgelöst. Diese werden sich auch in Zukunft wegen der quantitativen Probleme kaum verkürzen. Heute leben wir in der fossilen Periode, dominiert von Erdöl, Erdgas und Kohle, welche für die Wärmeproduktion und vor allem für den Verkehr schwer zu ersetzen sind. Für die Produktion von Elektrizität sind zusätzlich zu den fossilen Energieträgern, die heute 2/3 davon decken, Wasserkraft und Kernenergie wesentlich. Nun zeichnet sich langfristig das Ende der dominanten Rolle von Öl und Gas ab, sodass nur drei Alternativen bleiben: **die Rückkehr zur Kohle, Kernenergie und Sonnenenergie.**

Vergleicht man die Möglichkeiten verschiedener Energieformen mit ihren Begrenzungen (ökologische Faktoren, begrenzte Ressourcen, Grenzen in der Aufbaugeschwindigkeit aller neuen Energiesysteme), so wird es klar, dass es keine einfachen Lösungen des Energieproblems geben kann. Die zu verfolgenden Strategien werden notwendigerweise

komplex sein, und man wird alle vorhandenen Möglichkeiten ausschöpfen müssen. Ebenso wird man die Aspekte des Angebots (Produktion der Energie) und des Bedarfs (rationelle Nutzung der Energie) in gleicher Weise berücksichtigen und in die Massnahmen einbeziehen müssen.

Zusammenfassend die wichtigsten Punkte zum Angebot an Energie:

Kohle: Die Vorräte genügen für einige Jahrhunderte. Man muss davon ausgehen, dass Kohle in grossem Massstab eingesetzt wird, falls die Substitution der fossilen Energien durch Kern- oder Sonnenenergie nicht rechtzeitig möglich ist, was nicht unwahrscheinlich scheint. Die Entwicklung eines Landes wie z.B. China scheint fast nur in dieser Weise möglich. Die entwickelte Welt sollte helfen, dies mit Technologien zu tun, welche hohe Wirkungsgrade (mit Blick auf das CO₂-Problem) und minimale Schadstoffbelastung ermöglichen. Geld und Know-how wären so besser eingesetzt als mit der Förderung von Energien mit marginalem Beitrag.

Kernspaltung (Fission): Angesichts der realen gesellschaftlichen Strukturen auf der Welt ist es vorderhand ratsam, die Kerntechnik im Grossmassstab auf Länder zu beschränken, in denen die für diese Technologie unverzichtbare fachliche und organisatorische Sorgfalt gewährleistet ist und auch die Gefahr der Proliferation unter Kontrolle ist. Dort kann aber die Kernenergie eine wichtige Rolle für die Elektrizitätserzeugung spielen und dazu beitragen, den Kohlendioxidausstoss zu begrenzen, indem sie graduell Kohlekraftwerke ersetzt. Mit den heutigen thermischen Reaktoren ist es angesichts der Vorräte an Uran wahrscheinlich nicht möglich, den Verbrauch an fossilen Energien in grossem Umfang zu substituieren. Bedingung dafür wäre der Einsatz des Brutreaktors, welcher aus nichtspaltbarem ²³⁸U sowie Thorium seinen eigenen Brennstoff produziert. Die Aufbaugeschwindigkeit des Brennstoffzyklus könnte jedoch begrenzend wirken, auch wenn die Entwicklung der Brutertechnik wieder in angemessenem Rhythmus anläuft.

Kernfusion: Es ist nicht zu erwarten, dass diese neue Energieform vor Mitte des nächsten Jahrhunderts überhaupt beginnen kann, wesentlich zur Energieversorgung beizutragen. Das Potential ist aber sehr gross,

und die Problematik nuklearer Technik erscheint günstiger als bei der Fission.

Bemerkungen zur Kerntechnik: Wie die anderen Energieträger ist auch die Kernenergie mit Risiken behaftet. Es ist zu erwarten, dass die heute überbewertete Problematik der Radioaktivität einer realistischen, an den natürlich vorhandenen Strahlungen sich orientierenden Einschätzung weichen wird. Dasselbe gilt für die nukleare Entsorgung.

Ob sich langfristig die Fusion oder der Brüter für die Gewinnung von Kernenergie durchsetzen wird, hängt, nebst politischen, von technischen und wirtschaftlichen Faktoren ab, die heute noch nicht beurteilt werden können. Demzufolge wird die Kernenergie voraussichtlich im Laufe des nächsten Jahrhunderts nicht in der Lage sein, allein das globale Energieproblem zu lösen.

Sonnenenergie: Das Nutzungspotential ist sehr gross, der Beitrag an die Energieversorgung wird aber in den kommenden Jahrzehnten durch viele Faktoren begrenzt bleiben. Vier Richtungen zeichnen sich ab:

Die **Solararchitektur** und die Nutzung von **Niedertemperaturwärme** ist vor allem bei Neubauten einsetzbar, viel weniger bei existierender Bausubstanz.

Die **Elektrizitätserzeugung mit solarthermischen Kraftwerken** erlaubt einen guten Wirkungsgrad. Sie ist in Wüstengebieten (z.B. West-USA), am besten kombiniert mit fossiler Unterstützung, heute schon nahezu wirtschaftlich und hilft die Verbrauchsspitze am Tag zu decken. In Mittel- und Nord-Europa ist sie wegen Flächenbedarf und Klima wenig aussichtsreich.

Die **Elektrizitätserzeugung mit Photovoltaik** (Sonnenzellen) hat einen kleineren Wirkungsgrad, ist aber weitgehend wartungsfrei. Der Umfang ihres Einsatzes wird stark durch die Kosten beeinflusst sein. Die Nutzung ist lokal begrenzt oder in grossem Massstab in Wüsten denkbar. In der Schweiz ist der mögliche direkte Beitrag - insbesondere im Winter - mittelfristig nicht sehr gross.

Die **chemische Speicherung** von Solarelektrizität sowie auch der Einsatz von Thermo- und Photochemie werden in Zukunft von grosser Bedeutung sein. So könnte z.B. die grossmassstäbliche Wasserstofftechnologie sehr langfristig als Nachfolge der fossilen Energiesysteme in Frage kommen, inkl. die Verwendung eines bestehenden Erdgasnetzes. Die quantitativen Probleme sind aber enorm, ebenso sind die wirtschaftlichen und globalen Sicherheitsprobleme nicht zu unter-

schätzen. Besonders heikel wären die geopolitischen Fragen. Man stelle sich ein von einer Sonnenfarm in der Sahara abhängiges Europa vor im Moment von Krisen wie denjenigen von Iran und Irak.

Krass ausgedrückt scheint die Sonne relativ schwach, am falschen Ort und zur falschen Zeit. Ihr Beitrag zur Energieversorgung wird aber in dem Masse zunehmend wichtig werden, wie es gelingt, Saisonspeicherung und Transport praktikabel zu machen. Ein wichtiges Element ist dabei das Vorhandensein eines grossen konventionellen Elektrizitätsnetzes, welches als Puffer, für den Transport und ev. auch für die Speicherung von Sonnenenergie dienen kann. Langfristig, d.h. in einem Übergang zur nachfossilen Phase, wird aber die Sonne zusammen mit einer Form von Kernenergie eine Rückgratfunktion übernehmen müssen.

Andere Alternativenergien wie Gezeiten, Wind, Geothermie, Biomasse werden nur punktuell einen willkommenen, aber eher kleinen Beitrag an die Energieversorgung liefern können.

Energienachfrage, Sparen: Es besteht zweifellos ein beträchtliches technisches Potential zur Einsparung von Energie durch ihre rationellere Nutzung. Dies auf allen Gebieten, nicht nur bei der Heizung. Allerdings bestehen mannigfache Hindernisse soziologischer, politischer und psychologischer Art, sodass es schwierig vorauszusagen ist, in welchem Masse und in welcher Zeitspanne solche Sparstrategien greifen können. Zu bedenken bleibt, dass die grossen Probleme der Umwelt, insbesondere der Treibhauseffekt, ohne eine wirklich ernsthafte Politik der rationellen Nutzung nicht zu beherrschen sein werden. Dies muss die Schlüsselenergie Elektrizität einschliessen, da diese weltweit noch lange in grossem Ausmass mit fossilen Brennstoffen erzeugt werden muss.

In der kurzfristigen Energiepolitik wird dem Sparen eine unterschiedlich grosse Bedeutung zugemessen. Unbestritten sind die substanzialen Einsparungsmöglichkeiten auf dem Bausektor: Isolation, passive Sonnennutzung, Optimierung der Haustechnik. Dies ist besonders wichtig bei Gebäuden im Dienstleistungssektor, in dem bei Beleuchtung, Lüftung und Klimatisierung beträchtliche Einsparungen möglich sind.

Eine wichtige Sparmöglichkeit wäre aus physikalischen Gründen die Fernheizung. Dies sowohl durch Ausnützung der Abwärme der grossen Kraftwerke als auch durch Wärme-Kraftkopplungsanlagen im kleineren

Massstab. Hindernisse sind im Moment der grosse Investitionsbedarf und teilweise die vermeintliche Verknüpfung mit der Kernenergie.

Produktenormen für den Energieverbrauch von Geräten und Anlagen könnten wesentlich zu einer Reduktion des Energiebedarfs beitragen. Aber Verbrauchergewohnheiten, Durchsetzungsprobleme und der notwendigerweise internationale Charakter von Normen setzen wohl im Moment engere Grenzen als dies notwendig wäre.

Zusätzlich ist für eine wirksame Politik des rationellen Energieeinsatzes die Information und die Ausbildung von grosser Bedeutung, ebenso die Förderung von Pilotstudien. Auch steuerliche und tarifliche Lenkungsmaßnahmen können wichtig sein.

Einer Sparpolitik kommt auch generell im Hinblick auf das Klimaproblem ein grosser Stellenwert zu. Es muss aber vermieden werden Sparen als die Lösung aller Probleme darzustellen, da dies die Notwendigkeit von grossen Weichenstellungen für die Zukunft verdecken könnte.

Forschung, Technologie: Entgegen den anfänglich geweckten Hoffnungen auf neue "alternative" Forschungsergebnisse zeigt sich heute klar, dass relevante Arbeiten durchwegs klassische Grundlagenwissenschaften betreffen, etwa die Festkörperphysik für die Sonnenzellen, die Chemie für die Speicherung, die Plasmaphysik für die Fusion oder die Atmosphären- und Geophysik für die Klimaforschung. Auch in Zukunft wird die wissenschaftliche Forschung für die Entwicklung neuer Energiesysteme eine zentrale Rolle spielen. Ebenso notwendig sind Arbeiten zum Verständnis der komplexen globalen Zusammenhänge und zur Verhinderung von negativen Folgen. In der Technik sind die Grundlagen vorhanden, aber manche Entwicklungen unterbleiben aus wirtschaftlichen Gründen. Wichtig ist es zu realisieren, dass auch bei den zukünftigen Alternativenergien kaum "sanfte", sondern ebenfalls hochtechnologische Entwicklungen erforderlich sein werden, wie das heute z.B. bei Windkraftwerken oder Solarmobilen schon der Fall ist.

Die Lösung der komplexen Probleme, die uns die Herausforderung im Zusammenhang mit der Energie stellt, erfordert die nüchterne Evaluation der Möglichkeiten, die uns zur Bewältigung zur Verfügung stehen. Leider gibt es weder mit den erneuerbaren Energien, noch mit der Kernenergie, noch mit einer Sparpolitik allein eine Wunderlösung. Es scheint auch, dass in Zukunft nur die gleichzeitige Nutzung der verschiedenen Energien (Energimix), regional und nach Verwendungszweck optimal eingesetzt, zu einer mit der Umwelt verträglichen Lö-

sung führen kann. Eine vernünftige Politik - weltweit und für jedes Land - muss sich daher auf die zur Verfügung stehenden Mittel stützen, ihre Begrenzungen berücksichtigen, aber auch die wahre Natur des menschlichen Verhaltens in Rechnung stellen.

Verdankung

Die SPG dankt allen Autoren für die angenehme Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen während der Ausarbeitung dieser Broschüre. Herrn Prof. Dr. J.P. Blaser gebührt ein spezieller Dank für die unermüdliche "Energie" und den Einsatz, der es ermöglichte, die vorliegende Arbeit in äusserst kurzer Zeit inhaltlich so homogen wie möglich und zweisprachig herauszugeben.

Im weiteren dankt die SPG Frau L. Adrion, Frau R. Bercher, Frau B. Gschwend und Mm. Pain sowie Herrn R. Kunz, die mit Ihrem Einsatz zum Gelingen beigetragen haben. Das PSI hat uns in verdankenswerter Weise seine Infrastruktur zur Vorbereitung des Druckes zur Verfügung gestellt.

Einheiten

Energie, Arbeit und Wärme werden in Joule gemessen:

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg/s}^2$$

Die Leistung (Arbeit pro Zeiteinheit) wird in Watt gemessen:

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ W} = 1 \text{ VA} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg/s}^3$$

Für die Umrechnung der z.T. veralteten Einheiten gilt:

1 eV	=	$1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
1 erg	=	10^{-7} J
1 cal	=	4.186 J
1 Btu	=	1055.1 J
1 kWh	=	$3.6 \times 10^6 \text{ J}$
1 PS	=	75 m kp/s = 735.5 W
1 hp	=	746 W

Gesetzliche Vorsilben (z.B. 1 GW = 10^9 W):

Vorsilbe	Abk.	Faktor	Vorsilbe	Abk.	Faktor
Kilo	k	$\times 10^3$	Milli	m	$\times 10^{-3}$
Mega	M	$\times 10^6$	Mikro	μ	$\times 10^{-6}$
Giga	G	$\times 10^9$	Nano	n	$\times 10^{-9}$
Tera	T	$\times 10^{12}$	Piko	p	$\times 10^{-12}$
Peta	P	$\times 10^{15}$	Femto	f	$\times 10^{-15}$
Exa	E	$\times 10^{18}$	Atto	a	$\times 10^{-18}$

Einige Umwandlungsfaktoren:

1 tOE	=	41.87	GJ
1 tKE	=	28.05	GJ
1000 m ³ Erdgas	=	37.68	GJ
1 m ³ Holz	=	8.8	GJ
1 kg U ₃ O ₈ (LWR)	=	470	GJ

Abkürzungen:

tOE = tonne ErdÖläquivalent, tKE = tonne Kohleäquivalent, Btu = British thermal unit, hp = horse power, cal = Kalorie, eV = Elektronvolt, VA = Volt-Ampère, W_{el} , W_{th} = elektrische, thermische Leistung, W_S = Spitzenleistung.