**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 77 (1986)

**Heft:** 20

**Artikel:** Betrachtungen zur energiewirtschaftlichen Zukunft der Schweiz und der Welt

**Autor:** Gardel, A.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-904283

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 09.12.2025

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

# Betrachtungen zur energiewirtschaftlichen Zukunft der Schweiz und der Welt

A. Gardel

***Festvortrag gehalten an der Generalversammlung des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke vom 5. September 1986 in Montreux****

*Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Textes (September 1986) sind beinahe fünf Monate seit dem Unfall im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl vergangen. Für einige handelt es sich dabei um ein Ereignis, das in bezug auf seine Natur und seinen Umfang die energiewirtschaftlichen Basisdaten, auf die wir uns in Zukunft abstützen müssen, völlig verändert. Es ist eines der Ziele der folgenden Betrachtungen, dem Leser zu helfen, sich zu diesen Fragen eine eigene Meinung zu bilden. Der Kernkraftwerkunfall soll hier keineswegs verniedlicht werden. Unzweifelhaft ist etwas sehr Schwerwiegendes geschehen, und aus der Unfallanalyse müssen möglichst umfassende Lehren, die in konkrete Massnahmen umzusetzen sind, gezogen werden. Aber es ist auch den fundamentalen Aspekten, die die Energie in unserer Wirtschaft und bei den wesentlichen Mechanismen unserer Entwicklung spielt, die erforderliche Aufmerksamkeit zu schenken.*

*Diese Fragen sind selbstverständlich ohne jegliche Parteinahme anzugehen; ohne hintergründige Absicht der Bevorzugung irgendeiner Energiequelle und ohne irgendwie Rücksicht nehmen zu müssen, eventuell auch die eigene Meinung oder Beurteilung zu revidieren. Das Sprichwort «neue Fakten – neuer Rat» gilt auch hier wie anderswo.*

*Es soll hier klargestellt werden, dass es uns persönlich vollkommen gleichgültig sein könnte, ob die energiewirtschaftliche Zukunft eher auf der Sonnenenergie und der Kernfusion oder auf fossilen Brennstoffen und der Kernspaltungsenergie beruht. Falls sich die nachfolgenden Überlegungen bis zur Jahrhundertwende oder in den ersten Jahrzehnten des kommenden Jahrhunderts aufgrund der tatsächlichen Entwicklung bestätigen oder als Fehleinschätzung erweisen, wird niemand mehr dafür Rechenschaft ablegen müssen, denn ihr Urheber wird dann längst pensioniert oder bereits verstorben sein. Die Betrachtungen erfolgen in völliger Unabhängigkeit, allerdings mit dem Bestreben nach möglichst grosser Genauigkeit und Objektivität.*

*Diese Vorbemerkungen scheinen uns nötig, denn noch in den Jahren 1950 bis 1960 haben wir geglaubt, mit vielen anderen auch, dass der Kernspaltungsenergie infolge ihrer unkomplizierten Erzeugung und ihren geringen Gestehungskosten eine «strahlende» Zukunft bevorstehe. Später dann, gegen 1970 bis 1980, als die mit deren Anwendung verbundenen Probleme besser abgeschätzt werden konnten, als man aber auch auf die schweren Bedrohungen der Umwelt durch das Verfeuern fossiler Brennstoffe aufmerksam wurde, haben wir geglaubt, dass die breite Abstützung auf die Sonnenenergie die Zukunftslösung beinhalte.*

*Heute hat man gelernt, ihre ach so schmalen Grenzen besser abzuschätzen. Mit zunehmendem Alter (vielleicht auch mit zunehmender Weisheit!) können wir nun hoffen, eine bessere und differenziertere Sicht auf die uns zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zu besitzen. Der Verfasser dieser Zeilen möchte dem Leser versichern, dass die folgenden Bemerkungen nicht vom Wunsche geleitet werden, eingeprägten Meinungen treu zu bleiben und unter Missachtung der von der Wirklichkeit Jahr für Jahr gelieferten Vorkommnisse daran festzuhalten.*

*Diese Übersicht gliedert sich in vier Teile:*

- *der Stellenwert der Energie im Wirtschaftssystem*
- *die an der Jahrhundertwende zu erwartende Energiesituation in der Schweiz*
- *die Weltenergiesituation in der Mitte des nächsten Jahrhunderts*
- *die Rolle der Kernspaltungsenergie nach dem Unfall von Tschernobyl.*

**Adresse des Autors**
*André Gardel*, Professor an der ETH Lausanne, Beratender Ingenieur, Av. de Cour 61, 1007 Lausanne.

* Übersetzung: VSE

## 1. Der Stellenwert der Energie im Wirtschaftssystem

Man muss sich der Rolle der Energie in einer funktionierenden Wirtschaft bewusst sein, falls man den Versuch unternimmt, eine Langfristprognose zu erarbeiten und daraus Schlüsse über die Verhaltensweisen, die sich aufgrund des Einsatzes dieser Energien aufdrängen, ziehen will.

Es ist allgemein bekannt, dass noch Ende des letzten Jahrhunderts das Wirtschaftssystem besonders aufgrund der Faktoren Kapital und Arbeit, menschliche Arbeitskraft selbstverständlich, beurteilt wurde. Später wurde dann auch die Verfügbarkeit der Rohstoffressourcen, die offensichtlich nicht unbegrenzt sind, mit in die Betrachtungen einbezogen.

Aber es ist noch gar nicht lange her, seit auch die Bedeutung der Energie oder der Energien für den Wirtschaftsprozess klar erkannt worden ist. Vor allem der Erdölpreisschock im Herbst 1973 und die Furcht vor einem Energiemangel haben die breite Öffentlichkeit bezüglich der Allgegenwart dieses Einflussfaktors sensibilisiert. Allerdings sind wir auch heute noch nicht so ganz sicher, ob die effektiven Auswirkungen eines allfälligen Energiemangels von allen erkannt werden.

Zahlreich sind aber zweifellos diejenigen, die die Vorteile einer prosperierenden Volkswirtschaft zu schätzen wissen, verbunden mit einem Lebensstandard, der weltweit zu den höchsten zählt. Und dies alles bei einer äusserst geringen Arbeitslosigkeit. Viele erwarten zudem, dass sich die Lebensbedingungen in Zukunft sogar noch verbessern werden.

### *1.1 Wunschvorstellungen*

Da wir zu den Privilegierten gehören, die keine Befürchtungen für die nächsten Tage hegen müssen, können wir es uns auch erlauben, uns mit den Rahmenbedingungen unseres Lebens und besonders mit dem Naturschutz intensiver zu beschäftigen. Diese immer mehr in Gefahr geratende Natur wollen wir vor den zerstörerischen Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten bewahren. Dabei schweifen unsere Gedanken auf unseren kranken Wald und auf den Anteil des wachsenden Energiebedarfs, der diesen Zustand mitverursacht haben könnte.

Damit taucht wie selbstverständlich der Wunsch nach einer Stabilisierung und sogar nach einer Verminderung dieses Energieverbrauches auf. Dies sollte selbstverständlich nur dann geschehen, wenn kein wahrnehmbarer negativer Einfluss auf den Wohlstand vorhanden ist, die Arbeitslosigkeit sich nicht erhöht und die Kaufkraft sich nicht vermindert (von der jeder wünscht, dass sie sich sogar etwas erhöht!).

Wenn man auf der Ebene allgemeiner Ideen bleibt, kann man mit diesen Wünschen nur einverstanden sein. Und es ist nicht erstaunlich, dass solche Gedankengänge eine grosse Anhängerschaft und grossen Anklang finden in Kreisen, die in völliger Aufrichtigkeit oder aber teilweise auch aus wahltaktischen oder anderen Motiven verkünden, dass es nur den nötigen Willen dazu braucht, um diese Zielsetzung auch in die Tat umzusetzen.

Selbstverständlich gibt es noch Fälle von Energieverschwendung, die es zu bekämpfen gilt. Weiter bestehen auch viele Möglichkeiten zu einer besseren, rationelleren Energieverwendung sowie von Verbrauchseinsparungen durch Perfektionierung der Apparate und Geräte, der Gebäude oder der Energiesysteme. Vieles ist bereits in dieser Hinsicht geschehen, und der Schweizer ist ja dafür bekannt, dass hier Geld nicht einfach aus dem Fenster geworfen wird; er besitzt im Gegenteil den internationalen Ruf eines wirtschaftlich effizienten Gebarens. Dabei ist die wenig bekannte Tatsache hervorzuheben, dass die Schweiz unter allen hochindustrialisierten Staaten und unter Berücksichtigung des Lebensstandards den geringsten Energieverbrauch pro Einwohner aufweisen kann.

Anderseits ist es nicht überraschend, dass dem Umweltschutz heute vermehrte Aufmerksamkeit zuteil wird. Es wäre gut, wenn in dieser Hinsicht die Älteren in Selbstbeschuldigung nicht übertreiben würden. Zum Teil ist diese Thematik auch als Modeerscheinung zu betrachten, eine Art Widerstreit zwischen Konservativen und Modernen, dessen Grundlagen nicht alle objektiv sind.

### *1.2 Die Tatsachen*

Wie auch immer man diese Bemerkung interpretiert, sobald man mit Tatsachen konfrontiert wird, lässt sich folgendes feststellen:

Vorerst zeigt ein zahlenmässiger Vergleich der Energiesituation in allen Ländern der Welt, dass sich im grossen und ganzen der Energieverbrauch einfach proportional zum Lebensstandard verhält (siehe Fig. 1).

Wenn beispielsweise zwei Grossstaaten wie Indien und die USA miteinander verglichen werden, so lässt sich feststellen, dass das Bruttoinlandprodukt (BIP) pro Einwohner im Jahre 1980 in den USA 47mal und der Energieverbrauch 54mal höher war als in Indien. Oder wenn man, geografisch etwas näher, die Bundesrepublik Deutschland mit Griechenland vergleicht, so liegt das BIP pro Einwohner der ersteren rund das 3,2fache und der Energieverbrauch rund das 2,7fache über demjenigen von Griechenland. Allerdings gibt es auch einige, wenn auch wenig aussagekräftige Ausnahmen wie z.B. die Volksrepublik China, deren BIP im Vergleich viel zu tief liegt, oder im umgekehrten Fall von Saudiarabien, wo es sehr hoch ist. Aber auch die osteuropäischen Länder, die Sowjetunion inbegriffen, liegen etwas abseits, wo zwar der Energieverbrauch in ähnlichem Rahmen wie in den Ländern Westeuropas liegt, das BIP pro Einwohner jedoch 3mal tiefer ist. Bemerkenswert ist der Fall Schweiz, wo 2mal weniger Energie konsumiert wird als dem Lebensstandard eigentlich entsprechen würde.

Eine Untersuchung der Änderung der Energiesituation im Laufe der Zeit zeigt in den industrialisierten Ländern ebenfalls eine fast proportionale Entwicklung zwischen Energieverbrauch und Lebensstandard, besonders in Zeiten eines konjunkturellen Aufschwungs[1] (dies ist aus der Figur 2 für den Zeitabschnitt 1965–1973 ersichtlich). Einige analoge Darstellungen liessen sich ohne weiteres ebenfalls präsentieren. Auch hier bildet die Schweiz insofern einen Ausnahmefall, als bis zum Jahre 1973 der Energieverbrauch noch mit dem Quadrat der Entwicklung des BIP zugenommen hat. Nach einer Rückbildung des BIP von 1974 bis 1976, ohne gleichzeitige Abnahme des Energieverbrauches, hat sich die Entwicklung nun wieder gemäss der ursprünglichen Regel normalisiert.

[1] «Bewertete Elektrizität»: Stromverbrauch mit dem Faktor 2,5 multipliziert, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass es 2,5 GJ braucht, um 1 GJ Strom zu produzieren. (Die Bedeutung der Elektrizität wird in den Statistiken systematisch unterschätzt.)

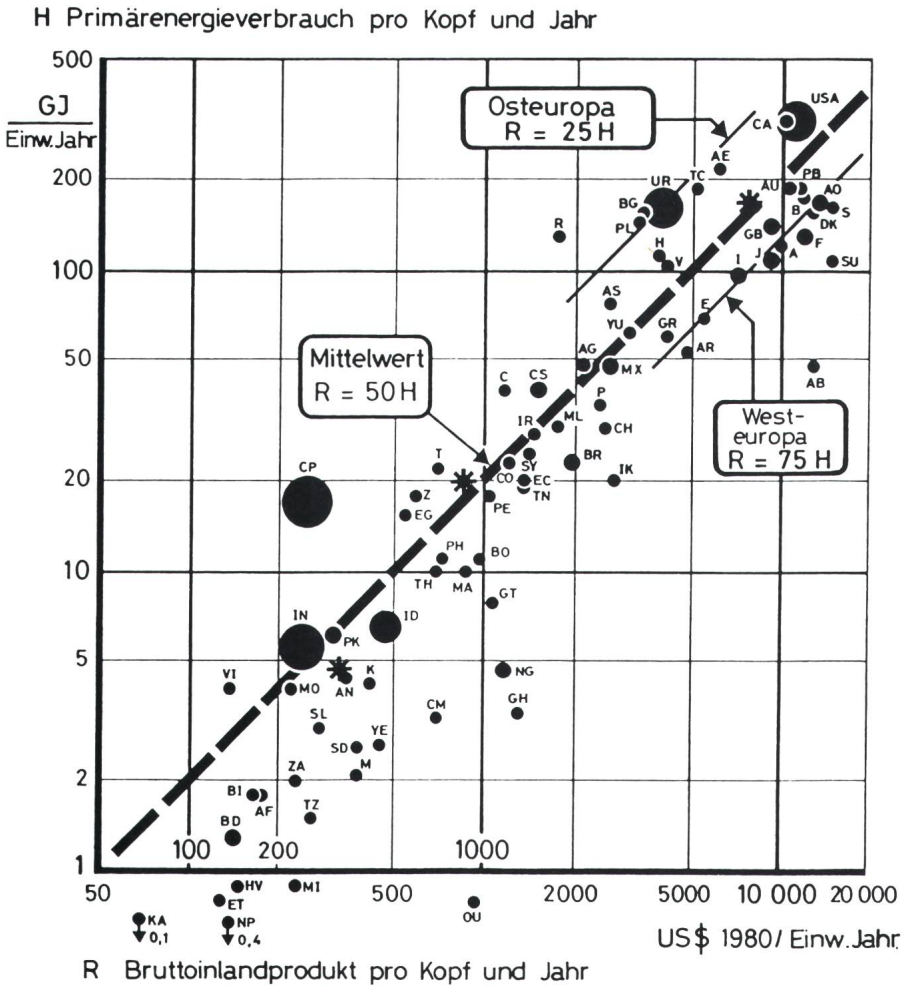



**Fig. 1 Zusammenhang zwischen Bruttoinlandprodukt R und Pro-Kopf-Primärenergieverbrauch H**

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AF | Afghanistan | CO | Kolumbien | J | Japan | SD | Sudan |
| AS | Südafrika | CS | Südkorea | K | Kenia | SL | Sri Lanka |
| AG | Algerien | C | Kuba | KA | Kambodscha | S | Schweden |
| AO | Westdeutschland | DK | Dänemark | M | Madagaskar | SU | Schweiz |
| AE | Ostdeutschland | EG | Ägypten | ML | Malaysia | SY | Syrien |
| AN | Angola | EC | Equador | MI | Mali | TZ | Tansania |
| AB | Saudi-Arabien | E | Spanien | MA | Marokko | TC | Tschechoslowakei |
| AR | Argentinien | ET | Äthiopien | MX | Mexiko | TH | Thailand |
| AU | Australien | USA | Vereinigte Staaten | MO | Moçambique | TN | Tunesien |
| A | Österreich | F | Frankreich | NP | Nepal | T | Türkei |
| B | Belgien | GH | Ghana | NG | Nigeria | UR | UdSSR |
| BD | Bangladesch | GR | Griechenland | OU | Uganda | V | Venezuela |
| BI | Birma | GT | Guatemala | PK | Pakistan | VI | Vietnam |
| BO | Bolivien | HV | Obervolta | PB | Niederlande | YU | Jugoslawien |
| BR | Brasilien | H | Ungarn | PE | Peru | YE | Nordjemen |
| BG | Bulgarien | IN | Indien | PH | Philippinen | Z | Simbabwe |
| CM | Kamerun | ID | Indonesien | PL | Polen | ZA | Zaire |
| CA | Kanada | IR | Iran | P | Portugal | | |
| CH | Chile | IK | Irak | R | Rumänien | | |
| CP | China | I | Italien | GB | Grossbritannien | | |

*Es kann deshalb festgehalten werden, dass sich ein ungefähr proportionaler Zusammenhang zwischen Lebensstandard und Energieverbrauch aufgrund der festgestellten weltweiten und zeitlichen Entwicklung bestätigt hat.*

Und genau an diesem zentralen Punkt entzündet sich heute die Kontroverse. Die Frage: Lässt sich der Energieverbrauch ohne Senkung des Lebensstandards drosseln, mit all den damit zusammenhängenden wirtschaftlichen und sozialen Problemen, kann nur mit einem «Nein» beantwortet werden. Niemand ist dazu in der Lage, selbst wenn eine solche Möglichkeit vielleicht kurzzeitig oder gelegentlich nicht auszuschliessen ist.

Bei näherer Betrachtung sollte uns dies eigentlich nicht überraschen. Überlegungen zu den Auswirkungen einer Erhöhung des Pro-Kopf-Bruttoinlandprodukts müssen zur Schlussfolgerung führen, dass damit automatisch auch ein ähnlicher Mehrbedarf an Energie verbunden ist. Sei es, dass es sich z.B. um grössere Räumlichkeiten handelt (zur Erstellung und zum Heizen), grössere oder leistungsstärkere Maschinen oder Anlagen installiert werden, ein höherer Automatisierungs- oder Robotisierungsgrad verlangt wird oder jeder einfach von seiner höheren Kaufkraft Gebrauch macht usw..

Man könnte im ersten Moment das Gefühl bekommen, dass eine laufende Vervollkommnung von irgendwelchen Energiesystemen zu einer Reduktion des Energieverbrauchs ohne gleichzeitige Verminderung der Leistungsfähigkeiten genutzt werden könnte. Aber dabei wird gerne vergessen, dass zur Erreichung dieser Verbesserungen zusätzliche Energie für die Entwicklung, Herstellung und Installation benötigt wird. Auch wird vergessen, dass damit Investitionserfordernisse verbunden sind, die anderweitig eine erhöhte Produktion mit eigenem Energieverbrauch bedingen, und schliesslich führt eine solche Perfektionierung zu höheren Gewinnen, die nicht eingesetzt werden können, ohne anderswo wieder eine Verbrauchserhöhung auszulösen.

Selbstverständlich wären andere Lösungen wünschbar. Aber die Tatsachen sprechen eine andere Sprache, und diesen hat man sich schliesslich zu fügen.

### *1.3 Das Wachstum*

Um die Rolle der Energie in unserem Wirtschaftssystem richtig einschätzen zu können, müssen wir uns noch fragen, wie sich dieses System in Zukunft entwickeln wird, oder genauer ausgedrückt, ob die Entwicklung in eine Stabilisierung einmündet. Erst mit der Beantwortung dieser Frage können wir mit Aussicht auf Erfolg versuchen, den zukünftigen Energiebedarf der Schweiz und der Welt abzuschätzen.

Die Hauptursache des Energieverbrauchswachstums liegt, weltweit betrachtet, in der Notwendigkeit der Erhöhung des Lebensstandards der am meisten benachteiligten Bevölkerungsschichten. Während eine Milliarde Bewohner der hochindustrialisierten

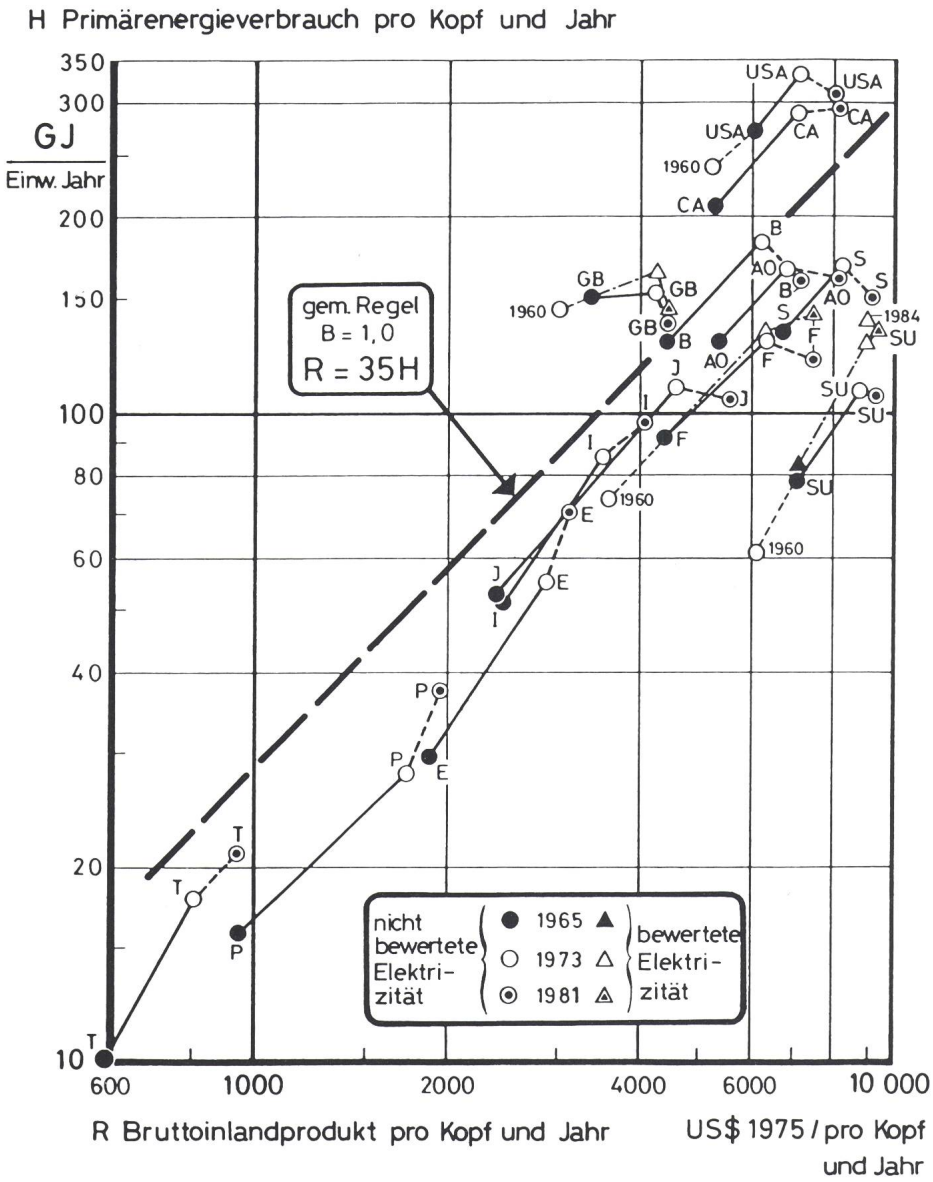



**Fig. 2 Zusammenhang zwischen Bruttoinlandprodukt und Pro-Kopf-Primärenergieverbrauch**
Entwicklung 1965–1973; 1973–1981

Länder im Mittel fast 200 GJ[2] pro Kopf und Jahr verbrauchen, entfalten auf eine andere Milliarde Menschen in den Entwicklungsländern unter 5 GJ pro Jahr, also mehr als 40mal weniger[3].

Von der Ende 1987 auf rund 5 Milliarden Menschen geschätzten Weltbevölkerung dürften also mindestens 4 Milliarden von der Zukunft eine rasche Verbesserung ihrer materiellen Lebensbedingungen erwarten.

Aber auch unter der Milliarde Privilegierter bestehen von Land zu Land oder von Region zu Region erhebliche Ungleichheiten. Man kann sogar sagen, dass die Mehrheit der Menschen ihre materielle Situation zu verbessern trachtet und dass dieses Anliegen auch die meisten Gemeinwesen und fast alle Unternehmungen haben.

Zusätzlich haben die industrialisierten Länder die Verpflichtung zur Verbesserung der Lage der armen Völker, sei es aus politischen oder sogar ethischen Gründen oder einfach aus kommerziellen Motiven. Weshalb soll man sich noch verwundern, dass der Weltenergieverbrauch dauernd ansteigt?

Neben diesen sozialwirtschaftlichen Aspekten sind auch noch andere Gründe anzuführen, die in ihrer Wirkung noch stärker ins Gewicht fallen. Es handelt sich dabei um die demografische Entwicklung.

Bei dem vorhin erwähnten Energieverbrauch, der eng mit dem Lebensstandard verknüpft ist, handelt es sich um den Pro-Kopf-Verbrauch. Die Bevölkerung nimmt jedoch ständig zu (mit einer mittleren Wachstumsrate von 1,7% pro Jahr für die Periode 1980–1982[4]), während der Energieverbrauch nur einen jährlichen Zuwachs von 1% in den letzten 10 Jahren auszuweisen hatte.

Es ist allerdings anzunehmen, dass sich dieses Wachstum der Weltbevölkerung in Zukunft abflachen wird. In vielen Ländern, insbesondere in der Volksrepublik China, werden diesbezügliche Anstrengungen unternommen im Wissen auf die grossen Lasten, die eine solche demographische Entwicklung unweigerlich mit sich bringt. Aber verspürt man nicht in andern Weltregionen eine entgegengesetzte Tendenz und den ausgeprägten Willen, den politischen und wirtschaftlichen Einfluss mittels einer höheren Bevölkerungszahl auszuweiten? Kinderreichtum wird über Sozialprogramme gefördert, während die Chinesen den umgekehrten Weg beschreiten!

Was auch immer administrativ und organisatorisch vorgekehrt wird, der Fortpflanzungstrieb ist ein Grundbedürfnis, das in ein religiöses und traditionelles Umfeld eingebettet ist, das schwierig zu beeinflussen ist. Im übrigen steigt die Bevölkerungszahl nicht nur aufgrund der Geburten an, sondern auch dank dem Rückgang der Sterbefälle (die Lebenserwartung bei der Geburt ist in China innert weniger Jahre von 40 auf über 60 Jahre angestiegen). Viele der allergrössten Staaten dieser Erde weisen demzufolge jährliche Zuwachsraten ihrer Bevölkerung von über 2% auf.

### *1.4 Schlussfolgerungen aus Abschnitt 1*

Somit kann als Zusammenfassung dieses ersten Themenkreises festgehalten werden, dass

- eine Erhöhung des Lebensstandards mit einem ungefähr proportionalen Pro-Kopf-Energieverbrauchszuwachs verbunden ist

[2] GJ: Gigajoule; auf die verwendeten Einheiten wird in Abschnitt 2 näher eingegangen.

[3] Im Jahre 1980 verbrauchten 21 Länder mit insgesamt 995 Mio Einwohnern total 188,1 EJ, also 189 GJ/Kopf. 19 andere Länder mit 1007 Mio Einwohnern verbrauchten 4,28 EJ oder 4,25 GJ/Kopf (EJ, GJ: siehe Definition §2).

[4] Letzte bekannte Zahl = 1,74%; diese Prozentzahl ist ziemlich konstant, sie betrug auch für die Periode 1975–1980 1,74%.

- bedeutende Ungleichheiten zwischen Industrie- und Entwicklungsländern bestehen, die bei einer Verbesserung der Situation unweigerlich zu einem höheren Energiebedarf führen
- fast die gesamte Bevölkerung sowie die privaten und öffentlichen Unternehmen einen weiteren materiellen Fortschritt anstreben und damit ebenfalls einen zusätzlichen Energieverbrauchsschub verursachen
- dieses Energieverbrauchswachstum vor allem auf die zunehmende Bevölkerungszahl zurückzuführen ist.

Man kann, ja man sollte vielleicht sogar, diese Entwicklung bedauern, aber was nützt es, Wunschgedanken zu äussern, statt den Realitäten ins Auge zu sehen. Diese Energiebedarfszunahme wird noch mehrere Jahrzehnte andauern, und es ist nur zu hoffen, dass dies wenigstens mit abnehmenden Wachstumsraten geschieht.

## 2. Entwicklungsperspektiven bis ins Jahr 2000 für die Schweiz

Die bisherigen Betrachtungen sind deshalb relativ ausführlich dargestellt worden, weil sie für den dritten Teil, der sich mit der Entwicklung der Weltenergiesituation in den ersten Jahrzehnten des kommenden Jahrhunderts befasst, sehr wesentlich sind. Aber sie geben auch für die Beurteilung der Perspektiven der Schweiz für die nächsten Jahre einige gute Hinweise.

### *2.1 Methodologie*

Zur Abschätzung des schweizerischen Energieverbrauchs im Jahre 2000 können wir uns auf die mutmassliche Entwicklung des Brutto-Inlandprodukts abstützen und versuchen, die entsprechende Relation mit dem Energiebedarf zu bestimmen. Eine andere Methode besteht in der getrennten Betrachtung der Verbrauchsentwicklung der einzelnen Energieträger. Es stehen damit zwei verschiedene Methoden zur Verfügung, deren evtl. unterschiedliche Ergebnisse man vergleichen kann, obwohl in beiden Fällen grundsätzlich die eigentlichen wirtschaftlichen Ursachen die gleichen sind. Im folgenden werden beide Vorgehensweisen gewählt. Anschliessend soll die Frage angegangen werden, wie dieser Energiebedarf gedeckt werden kann.

Dabei soll der Weltenergiebedarf in der Form einer Primärenergiebilanz festgehalten werden, d.h. die der Umwelt entzogene Energie (wie z.B. der Heizwert der Brennstoffe, die Wasserkraft usw.) wird in die Rechnung einbezogen. In der Schweiz verfügen wir allerdings über genauere Daten auf der Verteilstufe, also die dem Endverbraucher verkaufte Energie, die auch als «Endenergie» bezeichnet wird. Der Ausdruck «Lieferenergie» (énergie distribuée) soll hier allerdings vorgezogen werden, da diese Energieverwendung für den Verbraucher nicht die letzte, sondern eher die erste Stufe bedeutet!

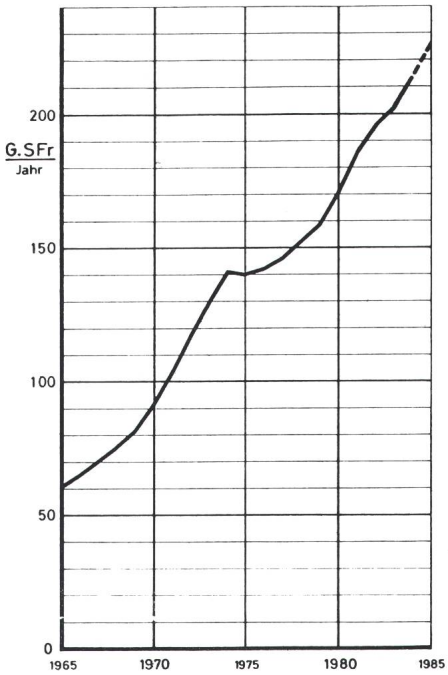



**Fig. 3 Bruttoinlandprodukt der Schweiz pro Jahr in nominellen Schweizer Franken**

### *2.2 Verwendete Einheiten*

Es ist allgemein bekannt, dass zur Messung von Energiemengen verschiedene Masseinheiten verwendet werden können. Nachfolgend wird nur mit Joule (und seinen Mehrfachen) gerechnet, da es sich dabei um die international genormte Einheit (SI) handelt, die in den meisten Ländern als einzige legalisierte Masseinheit gilt[5].

Es gelten folgende Definitionen:

1 Joule= 1 J= 1 Watt pro Sekunde[6] = Verschiebung von 1 Newton (Kraft) um 1 Meter

und weiter:

$10^9$ J = 1 Gigajoule = 1 GJ
$10^{15}$ J = 1 Petajoule = 1 PJ
(penta = 5; 1 PJ = $1000^5$ J)
$10^{18}$ J = 1 Exajoule = 1 EJ
(hexa = 6; 1 EJ = $1000^6$ J)

### *2.3 Bruttoinlandprodukt*

Wenn wir jetzt zur Schweiz und ihrer zukünftigen Entwicklung zurückkehren, so sehen wir in der Figur 3 den Verlauf des nominellen Bruttoinlandprodukts (BIP) seit 1965. Die Regelmässigkeit der Entwicklung ist erstaunlich, wenn man die Periode der Hochkonjunktur von 1969 bis 1974 sowie die Wirtschaftsrezession und die Wiederaufschwungsphase von 1974 bis 1979 ausklammert. Seit letzterem Datum entspricht der Kurvenverlauf wieder der Entwicklung in der Periode vor 1969.

Aber die Betrachtung der rein nominellen Entwicklung verschleiert den Teuerungseffekt wie auch denjenigen der Schwankungen der Bevölkerungszahl. In der Figur 4 ist das teuerungsbereinigte, also reale Bruttoinlandprodukt[7] der entsprechenden Bevölkerungszahl gegenübergestellt.

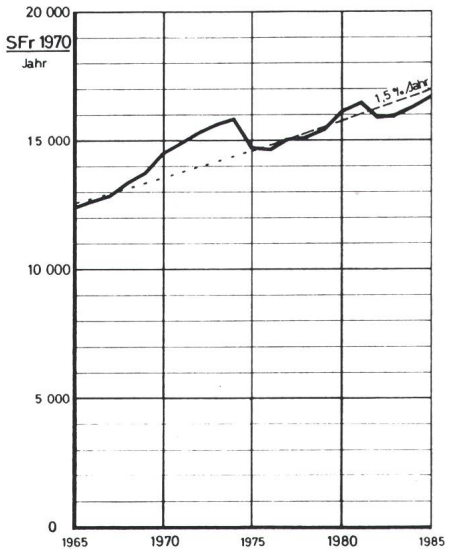



**Fig. 4 Pro-Kopf-Bruttoinlandprodukt der Schweiz pro Jahr und in Schweizer Franken 1970**

[5] Die Tonne Erdöleinheiten (TEP), die bei unseren französischen Nachbarn sehr beliebt ist, entspricht 44 Mia Joules (44 GJ) und wird vor allem verwendet, um die Öffentlichkeit in Bezug auf unsere Erdölabhängigkeit zu sensibilisieren. Sie wird hier nicht verwendet.

[6] Somit 1 kWh = 3 600 000 J = 3,6 MJ, 1 Mia kWh = 3,6 PJ

[7] Unter Einbezug des Lebenskostenindexes, dessen Ermittlungsmethodik auf einigen geschätzten Parametern beruht. Deshalb muss diese Berechnungsmethode auch periodisch den wechselnden Voraussetzungen angepasst werden. Einmal hat dies sogar zu einem erheblichen Berechnungsfehler (der Indexposition Früchte und Gemüse) und zur Auszahlung von Mehrlöhnen im Ausmass von einigen Milliarden Franken geführt.

Aus dieser Figur geht auch hervor, dass sich die mittlere Zuwachsrate auf rund 1,5% pro Jahr beläuft. Dieser Durchschnittswert dürfte für langfristige Betrachtungen gut geeignet sein, da er auch die Periode «Konjunkturüberhitzung - Rezession - Wiederaufschwung» von 1969 bis 1979 wie auch jene von 1981 bis 1984 «Rezession - Aufschwung» aufgrund des zweiten Erdölschocks umfasst. Die willkürliche Annahme eines pessimistischeren Szenariums, d.h. die Annahme einer noch geringeren Zuwachsrate für das nächste Jahrzehnt, dürfte sich kaum aufdrängen und ebensowenig die bewusst optimistische Annahme einer höheren Zuwachsrate.

In den 15 Jahren von *1985 bis 2000* kann deshalb mit einem *Zuwachs des realen Bruttoinlandprodukts von 25%* pro Einwohner gerechnet werden.

Es fragt sich demnach, welche Energieverbrauchsänderung mit diesem BIP-Wachstum verbunden ist.

## 2.4 Energieverbrauch

Die Figur 5 zeigt die diesbezügliche Entwicklung in den Jahren 1960 bis 1985. Es lässt sich feststellen, dass das Verhältnis zwischen dem BIP und dem Energieverbrauch in der Periode von 1960 bis 1973 durch eine Gerade mit der Neigung 1,6 dargestellt werden kann. Da ein logarithmischer Massstab gewählt wurde, bedeutet dies ein Anwachsen des Energieverbrauchs in der 1,6ten Potenz des BIP, oder anders ausgedrückt, dass einer Zunahme des BIP um 10% eine Energieverbrauchssteigerung von 16% entspricht, also merklich höher, als dies einem linearen Zusammenhang entsprechen würde.

Das mittlere Energieverbrauchswachstum scheint sich im Verhältnis zu demjenigen des BIP seit 1975 etwas abgeschwächt zu haben und die Annahme einer Neigung von 1,2 der effektiven Entwicklung eher angemessen zu sein (obwohl der Wert für 1985 nicht wesentlich vom früheren Mittelwert von 1,6 abweicht[8]).

Wir rechnen deshalb mit einem Wachstum von 1,2 für die Prognose von 1985 bis 2000, was uns zur bereits erwähnten *Zunahme* für das BIP um 25% und für den *Pro-Kopf-Energieverbrauch um 31% führt*[9].

Die Figur 6 zeigt die noch zusätzlich zu berücksichtigende Bevölkerungsentwicklung ab 1960. Nach einem Rückgang in den Jahren 1974 bis 1977 infolge der Einreisebeschränkungen für Fremdarbeiter steigt die schweizerische Wohnbevölkerung seither wieder leicht an; in den letzten Jahren um durchschnittlich 0,3%. Unter der Annahme der Beibehaltung dieser Wachstumsrate ergibt sich bis zum Jahr 2000 eine *Bevölkerungsvermehrung um 5%*.

Insgesamt ergibt sich demgemäss von 1985 bis 2000 eine Erhöhung des Energiebedarfs um 37%[10].

Der Gesamtenergiebedarf betrug im Jahr 1985 724 PJ, der sich gemäss Figur 7 auf die verschiedenen Kategorien aufteilte. Der *voraussichtliche Verbrauch im Jahr 2000 dürfte sich auf rund 990 PJ belaufen.*

Damit verfügen wir nun über eine erste Verbrauchsabschätzung für das Jahr 2000.

Wie bereits erwähnt, soll. diese Zahl von 990 PJ aufgrund einer getrennten Betrachtung der Entwicklung der ein-

[8] Bei der Interpretation dieser Kurve ist zu berücksichtigen, dass die Wachstumsraten des BIP oder des Energieverbrauches nur mit der Geschwindigkeit des Durchlaufens dieser Kurve, also dem Abstand zwischen zwei Punkten, zusammenhängen.

[9] $\left[(1+1{,}5\%)^{15\,\text{Jahre}}\right]^{1,2} = \left[(1{,}015)^{15}\right]^{1,2} = (1{,}250)^{1,2} = 1{,}307$

[10] $1{,}307 \times (1{,}003)^{15} = 1{,}367$

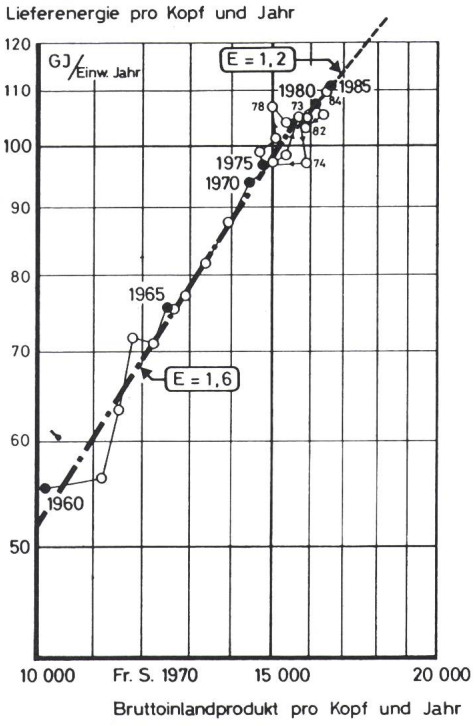
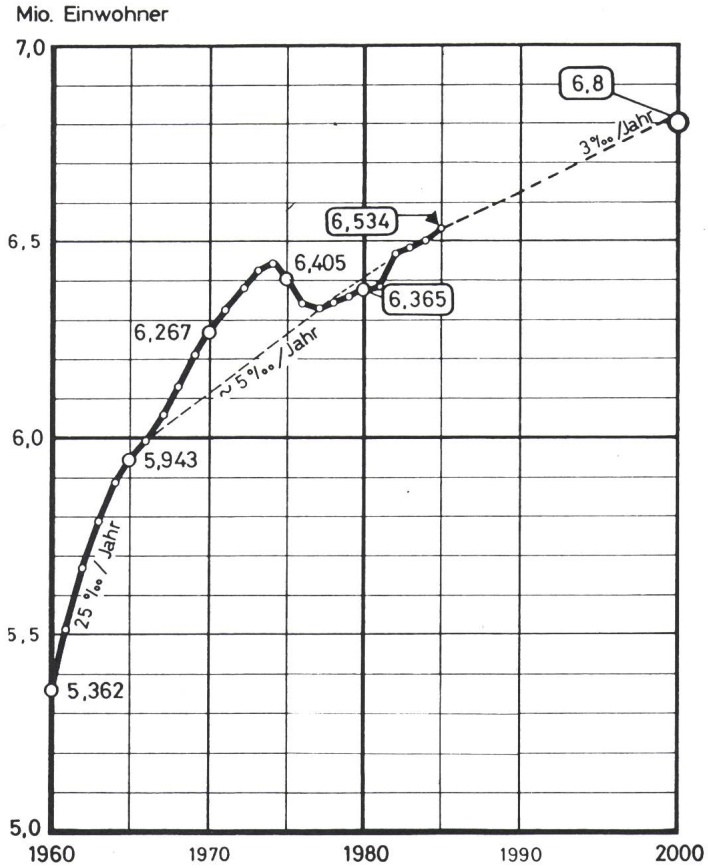



**Fig. 5 Zusammenhang Bruttoinlandprodukt-Lieferenergie, Fall Schweiz**

**Fig. 6 Schweizerische Wohnbevölkerung**



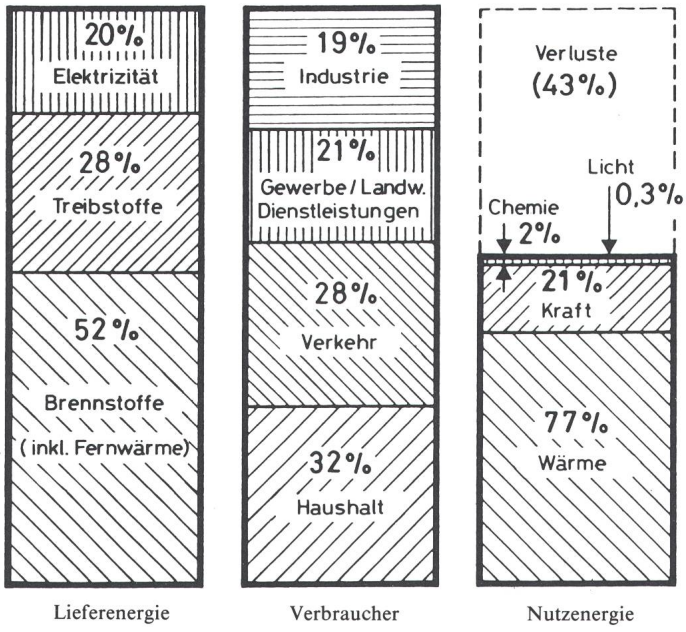



**Fig. 7**
**Energieverbrauch der Schweiz**
Lieferenergie
(= Endverbrauch)
1985: 724 PJ
PJ Petajoule =
1 Million mal
1 Milliarde Joules
(1 Joule ≅ 100 Gramm einen Meter fallend)

zelnen Energieträger: Brenn- und Treibstoffe sowie Elektrizität, überprüft werden.

### 2.4.1 Brennstoffe

Die Entwicklung der Brennstoffe in der Periode von 1950 bis 1985 geht aus der Figur 8 hervor. Nach Zuwachsraten von 4 bis 7% in den Hochkonjunkturjahren ist seit 1976 fast eine Stagnation eingetreten; es hat sich nämlich nur noch eine mittlere jährliche Zunahme von 0,4% eingestellt. Dies ist wohl zu einem beträchtlichen Teil den zahlreichen und unterschiedlichen ergriffenen Sparmassnahmen und den Anstrengungen zur Verminderung der Luftverschmutzung oder einfach den Preissteigerungen der Energieträger zuzuschreiben. Aber auch die Substitution der Brennstoffe durch Elektrizität für gewisse Anwendungen hat sich ausgewirkt.

Man könnte nun voraussetzen, dass der Wille zum Energiesparen und die Bemühungen zur Luftreinhaltung bis zur Jahrhundertwende nicht erlahmen, wodurch der Einfluss der Erhöhung des beheizten Bauvolumens begrenzt wird. Eine abgeschwächte Zuwachsrate von nur 0,4% bis ins Jahr 2000 würde einen *Jahresenergieverbrauch von 400 PJ* ergeben.

Auf diese Weise würde sich der Brennstoffverbrauch (in welchem zur Vereinfachung auch die geringe in Fernheiznetze eingespeiste Wärmemenge von 9 PJ im Jahr 1985 eingeschlossen ist) auf einen Anteil von 41% des gesamten Energiebedarfs zurückbilden. Noch im Jahre 1976 betrug er 58%.

Es wäre auf alle Fälle verlockend, auf noch grössere Anstrengungen zur Luftreinhaltung zu hoffen, was zu einem noch tieferen Energiebedarf im Jahre 2000 führen könnte. Aber es darf nicht vergessen werden, dass bereits zahlreiche Energiesparmassnahmen in die Wege geleitet worden sind; allerdings vor allem die am einfachsten durchführbaren und die billigsten. Es kann deshalb nicht erwartet werden, dass Jahr für Jahr weiterhin neue und immer teurere Massnahmen ergriffen werden[11]. Besonders das momentan sehr tiefe Preisniveau des Erdöls wirkt geradezu im gegenteiligen Sinne.

Trotzdem lässt sich eine ungefähre Stabilisierung des Energieverbrauchs aufgrund einer wesentlichen Erhöhung der Brennstoffpreise oder aus andern Gründen denken, was dazu führen könnte, dass der *Brennstoffverbrauch* im Jahre 2000 den Wert von *380 PJ* nicht übersteigt. In Wirklichkeit würde dies sogar eine mittlere jährliche Verbrauchsabnahme um 0,1 bis 0,5% bedeuten, sofern eine mögliche Erhöhung des Fernwärmeanteils von heute 9 auf 20 bis 40 PJ/Jahr in die Rechnung einbezogen wird (dies wird später noch erläutert).

### 2.4.2 Treibstoffe

Aus der Figur 9 geht die Entwicklung des Treibstoffverbrauchs hervor. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass die jährlichen Zuwachsraten von 9 bis 11% pro Jahr in den Hochkon-

[11] Wenn z. B. die Raumtemperatur noch relativ einfach von 22 °C auf 20 °C gesenkt werden kann, so lässt sich nicht jedes 2. oder 3. Jahr eine weitere Senkung von 2 °C durchführen!

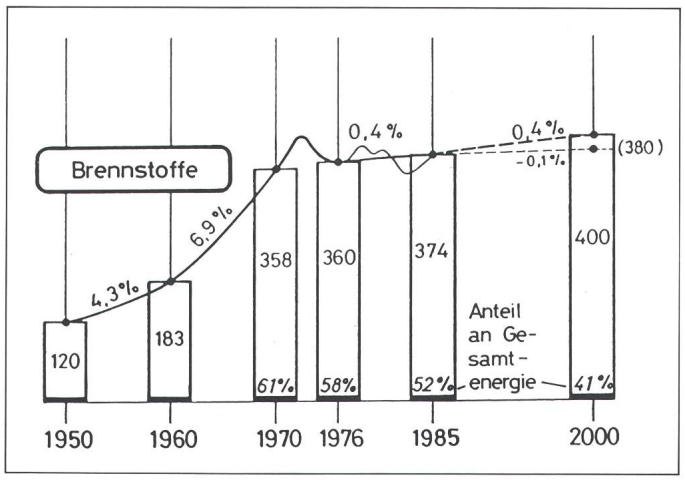



**Fig. 8 Verbrauch an Lieferenergie in der Schweiz: Brennstoffe**
PJ pro Jahr

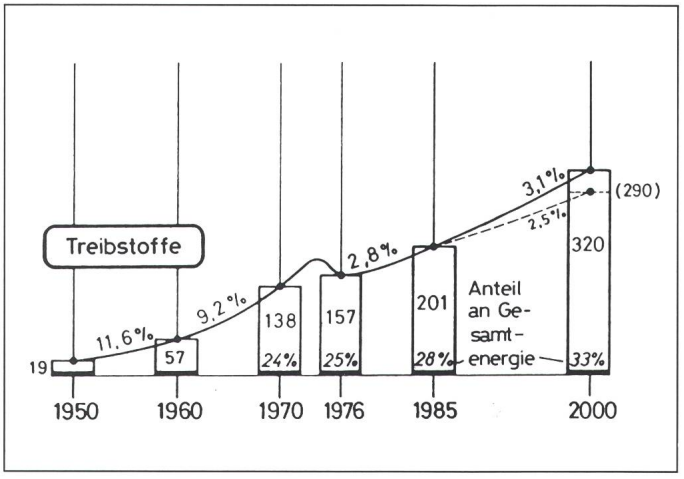



**Fig. 9 Verbrauch an Lieferenergie in der Schweiz: Treibstoffe**
PJ pro Jahr

junkturzeiten seit 1976 durch ein erheblich reduziertes Wachstum in der Grössenordnung von 3% pro Jahr abgelöst worden sind.

Bekannterweise nimmt der Bestand an Motorfahrzeugen bedeutend und ziemlich regelmässig zu. Im Gegensatz zu wiederholt geäusserten Aussagen scheint sich hier noch kein klarer Sättigungseffekt abzuzeichnen. Dies bedeutet allderdings nicht, dass auch die Zahl der Fahrzeugführer entsprechend proportional zunimmt!

Die laufende Erweiterung des schweizerischen Nationalstrassennetzes bewirkt verbesserte Einsatzbedingungen für die Fahrzeuge, eine Erhöhung der gefahrenen Kilometer, der Geschwindigkeiten und damit des Verbrauchs. Deshalb muss trotz der Senkung des spezifischen Kilometerverbrauchs (Liter/100 km) mit einer weiteren Zunahme des absoluten Treibstoffverbrauchs gerechnet werden.

In den nächsten 15 Jahren ist mit einer Fortsetzung dieser Entwicklung zu rechnen, d.h. Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs[12] und Steigerung der gefahrenen Kilometer. Die in der Periode von 1976 bis 1985 festgestellte Jahreszuwachsrate des Treibstoffverbrauchs von 2,8% dürfte sich dadurch in den Jahren 1985 bis 2000 auf etwa 2,5 bis 3% einpegeln. Insgesamt dürfte der *Treibstoffbedarf* an der Jahrhundertwende etwa zwischen 290 bis 320 PJ/Jahr erreichen.

### 2.4.3 Elektrizität

Es verbleibt der Energieträger Elektrizität, der selbst in den Rezessionsjahren einen Verbrauchszuwachs zu verzeichnen hatte, wie dies aus der Figur 10 hervorgeht. Und dies mit einer kaum veränderten Wachstumsrate, nämlich:

5% pro Jahr in den Hochkonjunkturjahren
3% pro Jahr von 1970 bis 1976
4% pro Jahr in den letzten 3 Jahren.

Die Regelmässigkeit dieser Zuwachsrate erklärt sich vor allem aus der bereits erwähnten Tatsache, dass in den Jahren mit zunehmenden Brennstoffpreisen vermehrt Elektrizität zu Substitutionszwecken eingesetzt wird; wenn aber der Erdölpreis sinkt, resultiert daraus ein Wirtschaftsaufschwung, der seinerseits zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs führt. Der Stromverbrauch ist direkt vom Industrialisierungsgrad abhängig. Auch das ständig zunehmende Umweltbewusstsein wirkt in der Richtung einer vermehrten Anwendung von elektrischer Energie.

Es ist deshalb eine jährliche Steigerung des *Stromverbrauchs* um rund 4% zu erwarten, was zur Jahrhundertwende unter Annahme eines Jahreszuwachses von 3,8% einen Bedarf von rund *260 PJ/Jahr* ergibt (oder von *280 PJ/Jahr* bei einer Zuwachsrate von 4,3%).

### 2.4.4 Gesamter Verbrauch

Mit der Bestimmung dieser drei Verbrauchszahlen erhält man einen Anteil der *Lieferenergie von rund 970 PJ/Jahr am Ende unseres Jahrhunderts* (bei Berücksichtigung des jeweiligen Mittelwertes innerhalb der angegebenen Bandbreite des Verbrauchs).

Dieses Total weicht nur sehr wenig von der früheren Schätzung von 990 PJ/Jahr ab.

*Der Wert von 980 PJ/Jahr ±20 (eventuell ±50) kann deshalb als wahrscheinlichster Verbrauch an Lieferenergie in der Schweiz im Jahre 2000 angesehen werden.*

Sollte diese Zahl von rund 1000 PJ im Jahr 2000 als relativ hoch erscheinen, so ist andererseits darauf hinzuweisen, dass dies nur einer ziemlich bescheidenen mittleren Jahreszuwachsrate von 2% entspricht. Falls also der tatsächliche Verbrauch im Jahre 2000 um 20 bis 40 PJ tiefer liegen sollte, so wird der geschätzte Wert einfach in den Jahren 2001 oder 2002 erreicht, also ein unbedeutender Unterschied.

## 2.5 Deckung des Energiebedarfs

Nachdem nun der voraussichtliche Verbrauch abgeschätzt werden konnte, müssen wir fragen, wie dieser gedeckt werden kann.

### 2.5.1 Deckung des Bedarfs an Brennstoffen

Beginnen wir bei den Brennstoffen und setzen wir voraus, dass der feste Wille zur Reduktion der Erdölabhängigkeit, aber auch der importierten Energieträger Erdgas und Kohle, auch in Zukunft vorhanden ist.

Gewisse Kreise möchten sich möglichst weitgehend auf die erneuerbaren Energieträger abstützen. Es sollte aber besser unterschieden werden zwischen solchen[13], die die Atmosphäre ebensoviel wie die fossilen Brennstoffe verschmutzen, und solchen, die man in dieser Hinsicht als «sanft» (wie Sonnenenergie, Erdwärme, Wasserkraft) bezeichnen kann. Zudem ist auch weiteren Umweltaspekten Rechnung zu tragen, wie z. B. dem Landbedarf für Sonnenkollektoranlagen. Schliesslich sind auch die relativen Kosten dieser Energien zu betrachten sowie der erforderliche Investitionsbedarf, die Zuverlässigkeit der Anlagen usw.

Einfachheitshalber schätzen wir den Anteil, den diese oft als «neue» Energien bezeichneten Energieträger im besten Fall bis zum Jahr 2000 zur Substitution von anderen Energieträgern beitragen können.

Der Schweizer Wald liefert heute jährlich etwa 1 Million Tonnen *Brennholz*, was 11 PJ entspricht. Eine maximale Nutzung der Wälder dürfte diesen Beitrag auf etwa 40 PJ erhöhen. Unter gebührender Berücksichtigung

[12] Mittelwert für den gesamten schweizerischen Motorfahrzeugpark, der eine Erneuerungsrate von ungefähr 10 Jahren aufweist.

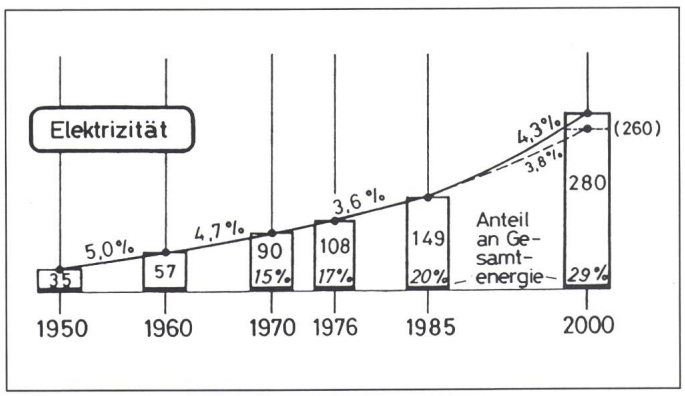



**Fig. 10 Verbrauch an Lieferenergie in der Schweiz: Elektrizität**
PJ pro Jahr

[13] Holz, Biogas, Abfälle usw.

der zu erwartenden Schwierigkeiten zur Erreichung dieses Nutzungsgrades, dem erforderlichen Zeitbedarf für die Bereitstellung der nötigen Anlagen sowie den damit verbundenen Komforteinbussen und dem Kostenaufwand dürfte der erreichbare Beitrag aus dieser Energiequelle etwa eine Verdoppelung innert 15 Jahren oder jährlich *20 PJ* ergeben.

Die Verfeuerung von *Müll und industriellen Abfällen* hat mit 6 PJ im Jahr 1985 zur Energieversorgung beigetragen. Im Jahr 2000 dürften etwa 2 Millionen Tonnen Abfälle zur Verfügung stehen, von denen etwa drei Viertel mit einem mittleren Heizwert von 13 MJ/kg der Verbrennung zugeführt werden könnten. Dies ergäbe einen Beitrag von 20 PJ/Jahr. Aus ähnlichen Gründen wie beim Holz setzen wir auch hier die Hälfte davon ein, also *10 PJ/Jahr*.

Die *Biogasproduktion* aus Mist ist noch in ihrer Anfangsphase und hat im Jahr 1985 rund 1 PJ erbracht. Die maximalen Erzeugungsmöglichkeiten bei einer energetischen Nutzung des Mists aus dem gesamtschweizerischen Viehbestand liegen bei 25 PJ/Jahr. Eine Annahme von *10 PJ/Jahr* im Jahr 2000 für die Gesamtproduktion dürfte wohl auf der optimistischen Seite liegen.

Die Schätzungen der aus *Erdwärmequellen* erzeugbaren Energie schwanken in weiten Grenzen von unterhalb 1 PJ/Jahr bis rund 10 PJ/Jahr. Der heutige Anteil in der Schweiz ist noch unbedeutend. Wir nehmen an, dass der Beitrag bis zur Jahrhundertwende *5 PJ/Jahr* erreicht.

Zum Schluss bleibt noch der direkte Beitrag der *Sonnenenergie*. Viele setzen sehr grosse Hoffnungen auf diese Energieform, denn sie ist in fast unermesslichen Mengen vorhanden, ist gratis verfügbar und zudem umweltfreundlich. Zahlreiche kleine Anlagen sind bereits in Betrieb, aber der gesamte Beitrag zur Energiebedarfsdeckung dürfte trotzdem heute noch unter 1 PJ/Jahr liegen.

Um der Sonnenenergie einen möglichst hohen Stellenwert zuzuweisen, könnten wir uns vorstellen, dass die Installation von rund 10 Millionen Quadratmetern Kollektorfläche bis zum Jahr 2000 Realität wird. Dies würde ungefähr der Oberfläche einer Autobahn von Genf nach Romanshorn entsprechen, und die Kosten würden sich auf rund 5 Milliarden Franken belaufen. An Wärmeerzeugung wären etwa *15 PJ/Jahr* zu erwarten[14]. Dabei darf allerdings nicht vergessen werden, dass diese Wärme zeitlich ungünstig anfällt und dass man heute noch nicht über die notwendigen Speichermöglichkeiten zu akzeptablen Bedingungen verfügt.

Obwohl zurzeit das nötige Vertrauen in die Zuverlässigkeit dieser Anlagen sowie die Opferbereitschaft zur Bereitstellung so grosser Landflächen noch fehlen und auch die Kosten dieser Energienutzung sehr hoch sind, wollen wir für unsere Rechnung einen Beitrag von 15 PJ/Jahr einsetzen.

Das Gesamttotal beträgt damit *60 PJ/Jahr für diese verschiedenen einheimischen und erneuerbaren Energiequellen* (vgl. Fig 11). Sofern dieses Ziel bis zum Jahr 2000 erreicht werden soll, wird der heute noch nicht vorhandene feste Wille zur Durchsetzung nötig sein. Das obenerwähnte Ziel dürfte also zweifellos allzu optimistisch sein. Wenn auch nur die Hälfte davon erreicht würde, wäre dies immer noch ein bemerkenswerter Erfolg.

Wie dem auch sei, 60 PJ/Jahr ergeben nur 15% der insgesamt benötigten 380 bis 400 PJ.

Die Deckung des restlichen Teils von 85% dürfte nur mit Hilfe der fossilen Energieträger oder mit Fernwärme möglich sein.

Eine Unterscheidung zwischen *Fernwärme* und fossilen Brennstoffen ergibt allerdings nur dann einen Sinn, wenn die Fernwärme aus nichtfossilen Energieträgern erzeugt wird. Und diese andere Quelle kann nur eine Wärmeauskopplung aus Kernkraftwerken sein (auf der Niedertemperaturseite des Dampfkreislaufes mit 100 bis 150 °C).

Die Fernwärme hat in den letzten Jahren einen Beitrag von 9 PJ/Jahr erbracht, wie vorhin schon erwähnt wurde. Eine Steigerung auf *20 bis 40 PJ/Jahr* bis ins Jahr 2000 erfordert grosse Anstrengungen für die Erstellung der erforderlichen Netz-Infrastruktur zur Verteilung dieser Wärme (durch die Wärmeauskopplung von 10 bis 30 PJ/Jahr wird die Elektrizitätsproduktion dieser Kraftwerke etwas reduziert, was an anderer Stelle noch zu berücksichtigen sein wird).

Damit verbleibt für die *fossilen Brennstoffe* an der Jahrhundertwende noch ein restlicher Deckungsanteil von mindestens *300 PJ/Jahr*.

Hinsichtlich der Notwendigkeit zur Verminderung des Erdölanteils könnte eine Erhöhung des *Erdgasanteils* ins Auge gefasst werden. Wie aus der Figur 11 hervorgeht, hat das Erdgas in den Jahren 1976 bis 1985 von 23 auf 53 PJ/Jahr zugenommen. Eine weitere Steigerungsmöglichkeit um 30 bis 50 PJ/Jahr scheint möglich, womit an der Jahrhundertwende *80 bis 100 PJ/Jahr* erreicht würden.

[14] Auf $10 \cdot 10^6$ m$^2$ Erdoberfläche könnten etwa $3 \cdot 10^6$ m$^2$ Kollektoren aufgestellt werden (Reduktion bedingt durch den Schattenwurf), die im Mittel eine Wärmemenge von rund 5 GJ/m$^2$ und Jahr (je nach Höhe und Kollektorexposition) verwerten könnten, also 15 PJ/Jahr. In der Öffentlichkeit wird im allgemeinen viel zu wenig beachtet, wie enorm tief die Leistungsdichte der Sonnenenergie und wie hoch unser Energiebedarf ist.

**Fig. 11**
**Verbrauchte Brennstoffe und Lieferenergie**
PJ pro Jahr

| | Jahr | 1976 | 1983 | 1984 | 1985 | 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Holz | 8 | 11 | 11 | 11 | max 20 |
| | Müll und Abfälle | — | 5 | 6 | 6 | max 10 |
| | Biogas | — | — | — | — | max 10 |
| | Erdwärme | — | — | — | — | max 5 |
| | Sonnenenergie | — | — | — | — | max 15 |
| 2 | Fernwärme | — | 9 | 9 | 9 | 20 - 40 |
| 3 | Erdgas | 23 | 44 | 51 | 53 | 80 - 100 |
| | Kohle | 9 | 15 | 20 | 20 | 30 - 50 |
| | Total 1 + 2 + 3 | 40 | 84 | 97 | 99 | 200 - 240 |
| 4 | Erdölprodukte | 320 | 271 | 274 | 274 | 160 - 180 |
| | TOTAL | 360 | 355 | 371 | 373 | 380 - 400 |

Schwieriger ist die mutmassliche Entwicklung der *Kohle* einzuschätzen. Ihr Anteil hat sich von 1976 bis 1984 verdoppelt, nämlich von 9 auf 20 PJ/Jahr. Wenn auch die Lagerung dieses Energieträgers relativ problemlos möglich ist, so ist seine Verwendung unbequemer als diejenige von Kohlenwasserstoffen und die Entsorgung der Asche nicht immer einfach. Sicherheitshalber setzen wir aber auch hier eine Zunahme von 10 bis 30 PJ/Jahr ein, wodurch im Jahr 2000 etwa *30 bis 50 PJ/Jahr* erreicht werden[15].

Unter diesen Voraussetzungen müssen noch weitere *160 bis 180 PJ/Jahr durch Erdölprodukte gedeckt* werden, also rund 100 PJ weniger als heute (274 PJ in den Jahren 1984 und 1985).

Diese Betrachtungen einer möglichen Bedarfsdeckung der Schweiz führen zur Schlussfolgerung, dass der mögliche Beitrag der erneuerbaren Energiequellen begrenzt ist (15% im Maximum, eventuell auch nur 10%, heute effektiv 4%) und dass eine nennenswerte Reduktion des Einsatzes von Erdölprodukten nicht ausgeschlossen ist. Zusätzlich dürfte sich vermutlich der Brennstoffverbrauch nur geringfügig oder gar nicht erhöhen, und grössere Versorgungsschwierigkeiten wären nicht zu erwarten.

**Fig. 12**
**Elektrizität (in PJ): mögliche schweizerische Energiebilanzen**

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Elektrizität (PJ) | 1983 nasses J. | 1985 leicht feuchtes Jahr | 2000 mittlere Hydraulizität | | |
| | | | (1) nuklear | (2) ökolog. | (3) mittl. Sz. |
| **Erzeugung** | | | | | |
| Wasserkraft | 126 | 113 | 130 | 120 | 130 |
| Kernenergie | 53 | 76 | 190 | 80 | 135 |
| Konv.-thermisch | 4 | 3 | 5 | 20 | 30 |
| Inlanderzeugung | 183 | 192 | 325 | 220 | 295 |
| Import | 40 | 56 | 45 | 120 | 60 |
| TOTAL | 223 | 248 | 370 | 340 | 355 |
| **Verbrauch** | | | | | |
| Lieferenergie | 137 | 149 | 270 | 270 | 270 |
| Verluste | 13 | 12 | 15 | 15 | 15 |
| Verbrauch | 150 | 161 | 285 | 285 | 285 |
| Export | 73 | 87 | 85 | 55 | 70 |
| TOTAL | 223 | 248 | 370 | 340 | 355 |

## 2.5.2 Deckung des Bedarfs an Treibstoffen

In den 15 Jahren bis zur Jahrhundertwende ist kein Durchbruch für ein neues Antriebssystem für Motorfahrzeuge zu erwarten, z. B. durch den Einsatz einer grösseren Anzahl von elektrisch oder sonnenenergiebetriebenen Fahrzeugen. Die im Gang befindlichen – relativ zahlreichen – Versuche sind noch weit von einem erfolgversprechenden Durchbruch entfernt. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass der Treibstoffbedarf (290 bis 320 PJ im Jahr 2000) weiterhin fast vollständig von den Erdölprodukten zu decken ist.

Es handelt sich dabei um die Dekkung eines zusätzlichen Bedarfs in der Grössenordnung von 100 PJ/Jahr (1985: 201 PJ), wodurch die Reduktion der Erdölprodukte im Brennstoffsektor ungefähr kompensiert würde.

Damit beläuft sich der gesamte Anteil der Erdölprodukte (Brenn- und Treibstoffe) auf etwa 460 bis 490 PJ/Jahr (160 bis 180 für die Brennstoffe und 290 bis 320 für die Treibstoffe), sofern man den Erdölprodukten nicht einen grösseren Stellenwert bei der Stromerzeugung zumisst (dies wird später noch erläutert). Im Jahr 1985 betrug der Anteil 475 PJ. *Bis ins Jahr 2000 ist deshalb keine Verminderung der schweizerischen Importe von Erdölprodukten zu erwarten.* Es könnte sich sogar eine Erhöhung ergeben, falls das Erdgas und die Kohle, vor allem aber auch die erneuerbaren Energien, die vorstehend angegebenen Werte nicht erreichen sollten, oder falls die Erdölprodukte zur Stromerzeugung herangezogen würden.

## 2.5.3 Deckung des Strombedarfs

Wir können jetzt das dritte und letzte Element der «Lieferenergie» angehen: die Elektrizität. Es stellt sich damit unweigerlich die Frage des Stellenwertes der Kernenergie, ein delikates Problem, das im Lichte der öffentlichen Meinung besonders sensible Aspekte aufweist. Das bedeutet mit anderen Worten, dass alle diesbezüglichen Überlegungen besonders bedacht werden müssen. Dies um so mehr, als ein gutes Funktionieren unserer Wirtschaft eng mit einer ausreichenden, sicheren und möglichst preisgünstigen Stromversorgung verknüpft ist.

Für den im Jahre 2000 auf 260 bis 280 PJ/Jahr geschätzten mutmasslichen Strombedarf müssen wir nun die Deckungsmöglichkeiten für durchschnittlich *270 PJ/Jahr* finden.

Die heutige Situation ist für die Jahre 1983 und 1985 in den Kolonnen 1 und 2 der Figur 12 aufgelistet. Es sticht dabei der erhebliche Anteil der Wasserkraftproduktion hervor, die allerdings stark von den klimatischen Verhältnissen abhängig ist. Der Kernenergieanteil hat von 1983 bis 1985 infolge der Inbetriebnahme des Kernkraftwerkes Leibstadt erheblich zugenommen. Der konventionell-thermische Anteil ist gering und schwankt kaum.

Die Tabelle zeigt auch, dass der Bedarf von 1983 bis 1985 um 11 PJ angestiegen ist (von 150 auf 161), während sich die Wasserkraftproduktion um 13 PJ vermindert hat (von 126 auf 113). Auf den ersten Blick würde dieses Manko von 24 PJ von der Zunahme der Kernenergie um 23 PJ fast genau aufgewogen. Aber dabei wird vergessen, dass die Kernkraftwerke üblicherweise mit konstanter Leistung betrieben werden und dass deshalb ein Teil der Produktion aus Leibstadt zeitweilig – wenn sich keine schweizerischen Abnehmer finden lassen – exportiert werden muss. Die Exporte sind im entsprechenden Zeitraum sogar um 14 PJ angestiegen, teils aus Gründen der jahreszeitlichen Verschiebung der Wasserkraftproduktion,

[15] 40 PJ/Jahr entsprechen ungefähr 1,5 Mio Tonnen Kohle pro Jahr, mit einem Ascheausstoss von rund 200 000 $m^3$.

teils infolge der Marktbedingungen. Deshalb haben sich die Importe erheblich von 40 auf 56 PJ erhöht.

Diese Kurzanalyse hat uns die Basis für verschiedene Szenarien zur Dekkung unseres Energiebedarfs bis ins Jahr 2000 geliefert. In den Kolonnen 3 bis 5 der Figur 12 wird nun im Detail darauf eingetreten.

### 2.5.4 Szenarium «Nuklear»

In einem ersten Szenarium, das man als Kernenergievariante bezeichnen könnte, werden folgende Voraussetzungen vorgegeben:

- maximal mögliche Ausnutzung des schweizerischen Wasserkraftpotentials
- Reduktion der Auslandabhängigkeit auf das minimal Mögliche durch eine Stabilisierung der Importquoten
- Beitrag zur Luftreinhaltung durch Verzicht auf eine Erweiterung der konventionell-thermischen Produktion.

Diese Prioritätensetzung zwingt zwangsläufig zum Rückgriff auf Kernkraftwerke, allerdings unter der Auflage einer rationellen Verwertung der in diesen Werken produzierten Energie. Dies erfordert den Ausbau von Pumpspeicherwerken, um die vorhandenen Produktionsüberschüsse im Inland verwerten zu können (statt sie zu exportieren).

Das erste Szenarium ist in der 3. Kolonne der Figur 12 angeführt. In dieser Figur sind alle angegebenen Zahlen auf 5 PJ gerundet, um deren approximativen Charakter zu unterstreichen.

Anderseits wurde von einem mittleren hydrologischen Jahr ausgegangen und nicht eine überdurchschnittliche Wasserführung, wie z.B. 1983, gewählt. Selbstverständlich muss das Produktionssystem solche Schwankungen der Hydraulizität ausgleichen können; es handelt sich dabei um 10 bis 15 PJ, für die eine entsprechende Reservekapazität in schweizerischen Kraftwerken oder gleichwertige Importmöglichkeiten zur Verfügung stehen müssen.

Die zusätzliche Nutzung unseres schweizerischen Wasserkraftpotentials inklusive der möglichen Erweiterungen wird die gesamte Erzeugungskapazität kaum über 130 PJ/Jahr (36 TWh) ausdehnen können. Mit rund 15 PJ Übertragungsverlusten (ungefähr den heutigen Verlusten entsprechend) und unter Begrenzung des Stromexports auf 85 PJ (Stand 1985) müssten total 370 PJ verfügbar sein.

Nehmen wir die Importe mit 45 PJ und die konventionell-thermische Produktion mit 5 PJ an, so müssen noch 190 PJ aus nuklearthermischer Erzeugung zusätzlich zur Verfügung stehen. Dies erfordert die Erstellung und den Betrieb von 4 neuen Kraftwerken von 1000 bis 1200 MWe Leistung in den nächsten 15 Jahren[16].

Selbstverständlich würde ein solches Programm die Akzeptanz der Kernenergie durch die Bevölkerung voraussetzen, die gegenwärtig – besonders als Folge des Unfalls von Tschernobyl – nicht vorhanden ist.

Unter Berücksichtigung einer erforderlichen Zeitspanne von rund 10 Jahren von der Projektphase bis zur Inbetriebnahme eines Kraftwerkes muss ernsthaft bezweifelt werden, ob die öffentliche Meinung innert nützlicher Frist derart umschlagen kann, um dieses Programm termingerecht zu verwirklichen.

Aus der Sicht der Wirtschaftlichkeit sowie der politischen und ökologischen Vorteile ist diese Situation zu bedauern, aber man muss sich insbesondere den psychologischen Gegebenheiten beugen, auch wenn diese eher auf subjektiven Elementen und auf unzureichender Information als auf technischer und wirtschaftlicher Objektivität beruhen mögen.

### 2.5.5 Szenarium «Ökologisch»

Damit kommen wir zum zweiten Szenarium, das man als «ökologisch» bezeichnen könnte. Die entsprechenden Kennwerte sind in der Kolonne 4 der Figur 12 aufgeführt.

Wir gehen auch hier davon aus, dass der Vorsatz zur Bereitstellung einer Lieferkapazität von 270 PJ elektrischer Energie weiterhin besteht. Die Prioritäten werden aber anders gesetzt:

- keine neuen Kernkraftwerke
- begrenzter Bau neuer Wasserkraftwerke
- Reduktion des Stromexports

Die vorgesehenen Beschränkungen bei der Nutzung der Gewässer zur Stromproduktion begrenzen die Wasserkrafterzeugung auf 120 PJ/Jahr.

Die Kernenergieproduktion wird bei maximal 80 PJ/Jahr belassen; eventuell ist sogar mit einem tieferen Wert zu rechnen, da der Vorsatz eines möglichst geringen Stromexports zu einer Verschlechterung der Ausnützung führt.

Dafür ist die Pumpspeicherung erheblich zu erhöhen, um den Export auf 55 PJ (15 TWh) zu beschränken (Stand vor 10 Jahren).

Damit verbleibt ein Rest von 140 PJ, der von der thermischen Erzeugung sowie durch Importe gedeckt werden muss.

Eine Erhöhung der konventionell-thermischen Produktion auf 20 PJ/Jahr wurde bereits vorgesehen, um bei diesem Szenarium nicht alles auf die Importenergie setzen zu müssen. Die zusätzlichen 15 PJ entsprechen z.B. der Inbetriebnahme von 4 Wärmekraftwerken zu je 200 MW (bei einem Lastfaktor von 0,6). Diese 15 PJ entsprächen andererseits einer Erhöhung der Brennstoffimporte um ungefähr 40 PJ/Jahr.

Damit ergibt sich ein Stromimportbedarf von rund 120 PJ/Jahr. Das einzige Land, das – sofern es dazu bereit wäre – in der Lage ist, uns eine zusätzliche Importquote von 75 PJ gegenüber dem ersten Szenarium zu gewähren, ist Frankreich. Damit würde allerdings Elektrizität aus Kernenergie importiert. Da diese Importe während den Spitzenzeiten erfolgen würden, würden dafür etwa 5 Kraftwerke à 1000 MWe benötigt (bei einem Lastfaktor von 0,6).

Einige der wesentlichsten Konsequenzen eines solchen Szenariums sind sofort erkennbar:

- grosse wirtschaftliche Abhängigkeit von einem einzelnen Land, das zudem in der Europäischen Gemeinschaft eingegliedert ist und nicht frei wäre, die Schweiz bevorzugt zu beliefern, sofern sich – was nicht auszuschliessen ist – auch in der Bundesrepublik Deutschland eine ähnliche Bedarfslücke einstellen würde. Es entsteht damit ein Zwang zur finanziellen Beteiligung an diesen Kraftwerken, sofern man sich die erzeugte Energie sichern will[17]. Auch ist nicht ausgeschlossen, dass wir zusätzlich noch mit der Entsorgung der radioaktiven Abfälle belastet werden.
- Konzentration von Kernkraftwerken an der französisch-schweizerischen Grenze, ohne dass unser Land

[16] Ein 1000-MWe-Kraftwerk erzeugt rund 25 PJ mit einem mittleren Lastfaktor von 0,8.

[17] Es ist bekannt, dass schweizerische Elektrizitätswerke bereits heute wesentliche Schritte in diese Richtung tun mussten.

über entsprechende Kontrollmöglichkeiten betreffend Zuverlässigkeit und Versorgungssicherheit verfügt.
- Notwendigkeit zur zusätzlichen Erstellung von Hochspannungs-Übertragungsleitungen, um diese Leistung (etwa 5000 MW) in die schweizerischen Konsumzentren zu übertragen.

In diesem Szenarium scheint die Schweiz in jeder Hinsicht sehr schlecht abzuschneiden: reduzierte Auslandunabhängigkeit, geringere Sicherheit, Arbeitsplatzverluste (beim Bau und Betrieb), Verluste an Reservekapazitäten, zusätzliche Hochspannungs-Freileitungen.

### 2.5.6 Szenarium «Mittelweg»

Diese Feststellungen führen fast automatisch zur Suche nach einer mittleren Lösung zwischen den Szenarien 1 und 2. Diese ist unter der Bezeichnung «Mittelweg» in der Kolonne 5 der Figur 12 aufgeführt.

Wie jede Kompromisslösung kumuliert auch diese qualitativ alle Nachteile, begrenzt aber quantitativ jeden einzelnen.

Dieses Szenarium «Mittelweg» erfordert dennoch die Inbetriebnahme von *zwei neuen Kernkraftwerken in der Schweiz* im Verlaufe der nächsten Jahre. Es ist nur durchführbar, falls der Baubeginn für das erste Kraftwerk nicht mehr allzu lange hinausgezögert wird, was offensichtlich nur möglich ist, wenn sich die öffentliche Meinung in Richtung auf eine objektivere Einschätzung der Risiken und Vorteile der Kernenergie zubewegt.

Das Szenarium beinhaltet auch eine begrenzte Erhöhung der installierten Leistung in konventionell-thermischen Kraftwerken auf insgesamt rund 1600 MWe.

Die Exporte sind demgegenüber auf 70 PJ limitiert (Stand 1983), während sich die Importe um die 60 PJ bewegen würden (also etwa die Hälfte gegenüber dem Szenarium «Ökologisch»).

Es bleibt zu hoffen, dass ein solches Szenarium «Mittelweg» bis zur Jahrhundertwende realisiert werden kann[18], wenn einmal die durch den Unfall von Tschernobyl ausgelösten Emotionen von einer besser relativierten Einschätzung dieses Ereignisses abgelöst worden sind.

### 2.5.7 Keine Zuflucht zur Kernenergie

Unter dem Eindruck dieser Emotionalisierung wurde von verschiedener Seite die Frage eines möglichst raschen Ausstiegs aus der Kernenergie zur Diskussion gestellt, z.B. innert 20 Jahren (einige haben sich sogar zur Forderung nach einer sofortigen Stillegung aller Kernkraftwerke verstiegen, was darauf hinweist, bis zu welchem Punkt sich solche Geister von allen Realitäten wegbegeben können).

Eine fundierte Meinungsbildung über diese Fragestellung ist unerlässlich, denn das Verhalten kann von jetzt ab weder von der Einschätzung der Möglichkeit eines späteren Ausstiegs aus der Kernenergie noch von dessen Zeitpunkt, noch vom Umfang der Verwendung der Kernenergie bis dahin, noch von den Ersatzlösungen unabhängig sein.

Diese Frage scheint auf den ersten Blick von einer grossen Komplexität. Aber eine genauere Überprüfung zeigt, dass trotz einer zwangsläufig mit grossen Unsicherheiten behafteten Abschätzung die wichtigsten Aspekte herausgeschält werden können, unter der Voraussetzung, dass diese Prüfung auf weltweiter Basis erfolgt. Es hätte in der Tat keinen Sinn, wenn die Schweiz und einige weitere einzelne Länder beschlössen, aus der Kernenergie auszusteigen, während sich gleichzeitig die restliche Welt mehr und mehr darauf abstützt.

Diese Überprüfung auf weltweiter Basis erfolgt im dritten Teil dieser Ausführungen, aber zunächst sollen die Schlussfolgerungen dieses zweiten Teils zusammengefasst werden.

### *2.6 Schlussfolgerungen aus Abschnitt 2*

- Der Verbrauch an Lieferenergie wird in der Schweiz im Jahr 2000 bei etwa 980 PJ pro Jahr (±20) liegen. Im Jahr 1985 betrug er 724 PJ. Es ist daher eine Steigerung von 35% zu erwarten.
- Die neuen einheimischen, erneuerbaren Energien (Sonnenenergie, Geothermie, Holz, Biogas, Abfälle) werden bestenfalls 5% dieses Bedarfs bereitstellen können.
- Der Bedarf an Erdölprodukten wird weiterhin in einer Grössenordnung von 500 PJ/Jahr liegen (mit einem Rückgang der Brennstoffe und einer Steigerung der Treibstoffe).
- Die Hauptfrage ist die Deckung des Bedarfs an Elektrizität, die für das Funktionieren der Wirtschaft eine wesentliche Voraussetzung ist, und deren Nachfrage von 149 PJ im Jahr 1985 auf 270 PJ ±10 im Jahr 2000, also um 80% steigen wird.

## 3. Die Entwicklung des Weltenergiebedarfs bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts

Zur Bestimmung des Weltenergiebedarfs in den nächsten Jahrzehnten ist zuerst die Bevölkerungsentwicklung und dann die mutmassliche Erhöhung des Lebensstandards abzuschätzen. Aus diesen Leitindikatoren lässt sich dann in analoger Weise, wie dies bereits für die Schweiz geschehen ist, die voraussichtliche Entwicklung des Energiebedarfes bestimmen.

Die Entwicklung ist getrennt nach den verschiedenen Bevölkerungsgruppierungen zu untersuchen, und zwar in demographischer Hinsicht wie auch in bezug auf den Lebensstandard. Selbstverständlich können einige Ländergruppen mit ähnlichen Entwicklungsperspektiven zusammengefasst werden: Industriestaaten, Volksrepublik China, Schwellenländer, Entwicklungsländer.

Wir beschränken uns hier auf den Zeithorizont 2040, womit eine Periode von 60 Jahren ab den verfügbaren statistischen Daten von 1980 umfasst wird. Der gewählte Zeithorizont ist einerseits entfernt genug, um die wichtigsten sich stellenden Probleme zu erkennen und andererseits nahe genug, um die mutmasslichen Grössenordnungen noch einigermassen abschätzen zu können.

Es sei noch darauf verwiesen, dass sich unsere Betrachtungen wie im ersten Teil auf die Primärenergie beziehen.

### *3.1 Demografische Entwicklung*

Bezüglich der demografischen Entwicklung liegen zahlreiche, relativ gut übereinstimmende Prognosen vor. Dies ist vor allem der Tatsache zuzuschreiben, dass sich die Wachstumsraten der Weltbevölkerung nur relativ langsam ändern (die Erwachsenen des Jahres 2020 sind alle im Jahre 2000 und deren Mütter bereits heute geboren und der Rückgang der Geburten

[18] Eine auf einer Analyse der geordneten Belastungskurven basierende, genauere Untersuchung der zeitlichen Verteilung des Energiebedarfs führt zu ähnlichen Schlussfolgerungen (siehe «Les besoins énergétiques de la Suisse en l'an 2000», Fédération Romande de l'Energie, Seiten 44ff).

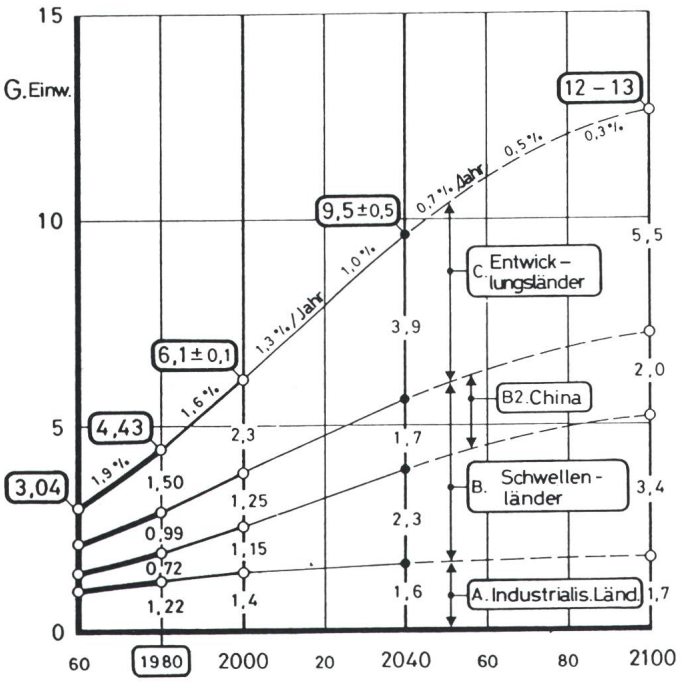



**Fig. 13**
**Mutmassliche Weltbevölkerungsentwicklung**

wird teilweise durch die Verlängerung der Lebenserwartung kompensiert).

Die Weltbevölkerungszahl, die sich Ende 1986 auf 4,9 Milliarden belaufen wird, dürfte bis ins Jahr 2000 auf 6,1 Milliarden (±0,1, eventuell ±0,2) und bis 2040 auf 9...10 Milliarden zunehmen. In der Figur 13 ist diese Entwicklung aufgetragen. Auch wenn diese Zahlen reichlich hoch erscheinen mögen, so zeigen sie doch eine erhebliche Abschwächung der jährlichen Wachstumsraten:

| | 1980 | 2040 |
|---|---|---|
| Industrieländer | 0,8%/Jahr | 0,2%/Jahr |
| Entwicklungsländer | 2,3%/Jahr | 1,0%/Jahr |

Das jährliche Bevölkerungswachstum wird demzufolge bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts unter 0,3% pro Jahr absinken. Das ist zwar keineswegs sicher, wichtig ist aber vor allem, dass die aus diesen Zahlen abgeleiteten Energieverbrauchswerte in keinem Fall als übertrieben bezeichnet werden können.

### *3.2 Lebensstandard*

Schwieriger sind die Erwartungen in bezug auf eine Erhöhung des Lebensstandards innerhalb der unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen abzuschätzen. Am unsichersten sind Prognosen für die Entwicklungsländer: Ihr Lebensstandard ist tief und kann sich relativ rasch erhöhen (was man diesen Ländern selbstverständlich wünscht); aber die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte waren nicht überwältigend (etwa 3% pro Jahr). Dies ist auf die rasche Bevölkerungszunahme und den damit verbundenen Finanzierungs- und Organisationsaufwand zurückzuführen. Auch der Energiebedarf ist gering geblieben und spielt insgesamt nur eine kleine Rolle (34% der Weltbevölkerung benötigten 1980 rund 4% der Energie; im Jahre 2040 dürfte ein Bevölkerungsanteil von 42% etwa 11% der Energie benötigen).

Die grossen Energieverbraucher sind offensichtlich die Industriestaaten; aber, und dies erleichtert die Voraussage, die Wachstumsraten der Wohnbevölkerung und des Lebensstandards sind hier gering. Für den Hauptanteil des Energieverbrauchs reduziert sich damit der wahrscheinliche Fehler (27% der Bevölkerung und 81% des Energieverbrauchs im Jahr 1980; vermutlich 17% der Bevölkerung und 48% des Energieverbrauchs im Jahr 2040).

Es sind die heute auf dem Weg der Industrialisierung befindlichen Länder (vor allem Volksrepublik China, Südamerika, Nordafrika, Naher Osten), die die grösste Rolle bei der Entwicklung spielen: Sie weisen eine starke Bevölkerungsvermehrung auf, haben bereits einen bemerkenswerten Lebensstandard und zum Teil bedeutende Ressourcen (39% der Weltbevölkerung und 15% des Energieverbrauchs im Jahr 1980; vermutlich 41% der Bevölkerung, aber 41% der Energie im Jahre 2040!).

Diese Schätzungen, die wir im folgenden nicht im Detail erläutern werden, führen zu den in den Figuren 14 und 15 aufgeführten Verbrauchswerten. Die Angaben für die Periode von 2040 bis 2100 wurden nur gemacht, um zu zeigen, dass auch die grosse Abschwächung des Wachstums (von 4 bis 5% zwischen 1960 und 1980 auf nur noch 1% in der Periode 2080 bis 2100) das Auftreten eines sehr hohen Gesamtenergieverbrauches nicht vermeiden kann, wenn auch die Entwicklung in die Richtung auf eine Stabilisierung hin tendiert.

Diejenigen, die diese Zahlen als unverantwortlich hoch und deshalb aus-

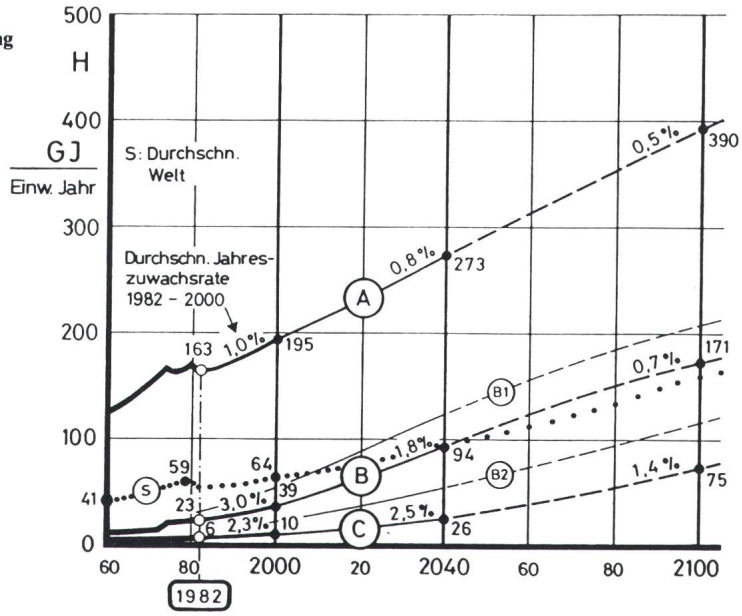



**Fig. 14**
**Mögliche Entwicklung des Pro-Kopf-Primärenergieverbrauchs**

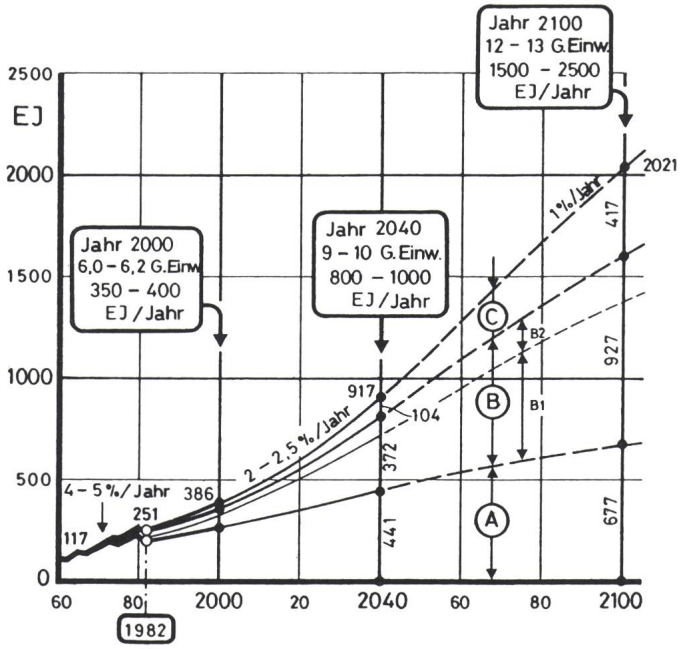



**Fig. 15**
**Mögliche Entwicklung des Welt-Primärenergieverbrauchs nach Ländergruppen**

serhalb der Realitäten erachten, seien darauf hingewiesen, dass sie auf einem Pro-Kopf-Energieverbrauch von 270 GJ/Jahr für den Durchschnitt der Industriestaaten im Jahre 2040 beruhen. Dieses Verbrauchsniveau wurde in den USA bereits 1965 (für den Durchschnitt der Bevölkerung) überschritten, d.h. vor 20 Jahren! Heute wird es weit überschritten von Kanada, und selbst Ostdeutschland ist nicht mehr weit davon entfernt.

Im übrigen ist es für unsere Überlegungen nicht allzu bedeutsam, ob diese Werte um 20% oder sogar um 30% zu hoch (oder zu tief) angesetzt werden, denn in diesem Fall tritt die Situation eben im Jahr 2050 (oder 2030) ein. Das Problem ändert sich damit in qualitativer Hinsicht nicht.

### *3.3 Ressourcen an nicht erneuerbaren Energien*

Es stellt sich nun die erste Frage, ob man über die notwendigen Ressourcen bzw. Brennstoffreserven verfügt, um einen solchen Energiebedarf abzudekken.

Die Figur 16 zeigt, dass der kumulierte Energieverbrauch bis zum Jahr 2040 etwa 30 000 EJ nicht übersteigen wird (etwas über 100 000 EJ bis ins Jahr 2100).

Die Ressourcen[19] an *fossilen Brennstoffen* können heute auf rund 250 000 EJ (Reserven: etwa 30 000 EJ) geschätzt werden. Zudem sind sehr wahrscheinlich noch lange nicht alle Vorkommen entdeckt worden. Die Ressourcen des in «thermischen» Kernreaktoren (heutige Reaktoren) verwendeten *Urans,* werden auf 10 000 EJ geschätzt, während bei einem Einsatz eines gewissen Anteils von Brutreaktoren grössenordnungsmässig 500 000 EJ erreicht werden könnten (bei zusätzlicher Verwendung von Thorium liesse sich diese Zahl noch verdoppeln, was das Interesse an diesen schnellen Brütern noch unterstreicht).

Daraus ist ersichtlich, dass in den nächsten Jahrzehnten und vermutlich auch im ganzen nächsten Jahrhundert keine Ressourcenprobleme zu erwarten sind, was allerdings vorübergehende Krisenlagen nicht ausschliesst.

### *3.4 Ressourcen an erneuerbaren Energien*

Bei den erneuerbaren Energien ist dieser Optimismus hingegen nicht angebracht, wenn man einen Blick auf das Bedarfsniveau von 800 bis 1000 EJ/Jahr in der Mitte des nächsten Jahrhunderts wirft.

Die gesamten Wasserkraftreserven liegen nicht über 50 bis 100 EJ/Jahr und zudem sind sie oft weit ausserhalb der Verbrauchszonen situiert. Aus Wind, Erdwärme, Meeresenergie, Abfällen usw. dürften wohl kaum mehr als 1 bis 2 EJ nutzbar sein; ihre Rolle ist deshalb relativ unbedeutend. Holz wird bereits heute zu einem grossen Teil genutzt, und grosse Wälder sind schon am Verschwinden. In diesem Zusammenhang muss man sich auch bewusst sein, dass zur Erzeugung von 10 EJ/Jahr rund 1 Milliarde m³ Holz verfeuert werden muss, was alljährlich ungefähr 100 Millionen grossen Bäumen entspricht!

Es verbleibt die *Sonnenenergie,* die deshalb genauer betrachtet werden muss, weil sie die einzige Energiequelle neben den fossilen Brennstoffen darstellt, die in fast unbegrenzten Mengen zur Verfügung steht, sofern man die Nutzung der Kernspaltungsenergie auf das minimal Notwendige beschränken will.

Von der heutigen Situation ausgehend, müssen wir uns deshalb ein Szenarium intensiver Entwicklung aus-

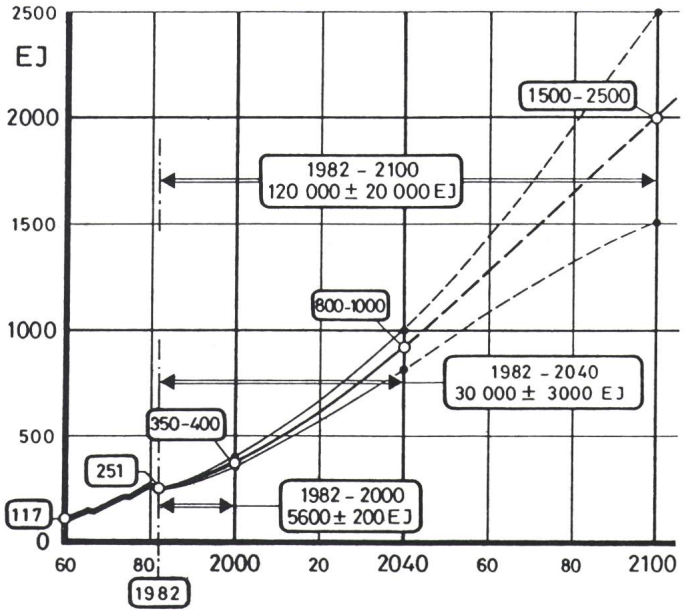



**Fig. 16**
**Mögliche Entwicklung des kumulierten Welt-Primärenergieverbrauchs**

[19] Man muss zwischen sicheren und zu heutigen wirtschaftlichen Bedingungen gewinnbaren «Reserven» und wahrscheinlichen «Ressourcen», die zu eventuell höheren Kosten gewinnbar sind, unterscheiden.

denken, das die Ermittlung des voraussehbaren Maximums erlaubt.

Nach unserem Wissen besteht kein weltweiter Kataster der heute bestehenden Sonnenenergieanlagen. Aus einigen Elementen von veröffentlichten statistischen Angaben, die auf den weltweiten Rahmen bezogen werden können, lässt sich ermitteln, dass im Jahr 1982 rund 1 Million m² Kollektorfläche, alle Typen inbegriffen, installiert gewesen sind.

Wir gehen deshalb von einer Fläche von 2 Millionen m² im Jahr 1985 aus und nehmen eine anfängliche Jahreszuwachsrate von 20% oder sogar 30% an, da die heutigen Ausgangswerte ja noch sehr tief liegen. Diese Zuwachsrate wird sich im Lauf der Zeit vermindern, so dass gegen das Jahr 2040 die jährlich neu zu produzierende Kollektorfläche 1 Milliarde m² nicht übersteigt[20].

Die eingestrahlte Sonnenenergie hängt von den lokalen Gegebenheiten ab (geographische Breite, Höhenlage usw.); sie beträgt ungefähr 3 bis 8 GJ/m² und Jahr. Davon kann nur ein Teil genutzt werden. Es ist auch daran zu erinnern, dass das Temperaturniveau, bei welchem die Wärme anfällt, im allgemeinen deutlich niedriger ist als bei den Brennstoffen, die damit ersetzt werden. Wir rechnen deshalb mit einem Wert von 3 GJ/m² und Jahr (die erforderliche Erdoberfläche wäre etwa 2- bis 3mal so hoch).

Die Figur 17 stellt ein entsprechendes Szenarium dar. (Nach dem Jahr 2040 müsste auch der Ersatzbedarf für die mehr als 20- bis 30jährigen Anlagen berücksichtigt werden, was zu einer Stabilisierung der jährlich neu zu erstellenden Anlagen führt.)

Trotz diesen enormen Entwicklungsanstrengungen (an deren Realisierbarkeit man wohl mit Recht zweifeln kann) mit einer zu installierenden Kollektorfläche von 1 Milliarde m² pro Jahr wird die Sonnenenergie in dieser Epoche höchstens mit *40 EJ/Jahr* zur Befriedigung des Weltenergiebedarfes beitragen können, also in der Grössenordnung von *5%*.

Diese Schlussfolgerung mag vor allem für diejenigen enttäuschend sein, die alle Hoffnungen zur Lösung unserer Energieversorgungssituation in den nächsten Jahrzehnten in die Sonnenenergie gesetzt haben. Man muss zur Kenntnis nehmen, dass dem eben nicht so ist, und dass dies mit der allzu geringen Energiedichte in Zusammenhang steht (GJ/m² und Jahr).

**Fig. 17**
**Entwicklungsszenarium bei starker Abstützung auf die Solarenergie**

| | Oberfläche der inst. Solarkollektoren | Jährl. Zuwachsrate | Neuinstall. Fläche | Verfügb. Sonnenenergie |
|---|---|---|---|---|
| 1982 | 1 M.m² | | 300 000 m² | 3 PJ |
| | | ~30% | | |
| 1990 | 8 M.m² | | 2 000 000 m² | 24 PJ |
| | | ~25% | | |
| 2000 | 75 M.m² | | 16 M.m² | 220 PJ |
| | | ~20% | | |
| 2010 | 450 M.m² | | 35 M.m² | 1,4 EJ |
| | | ~15% | | |
| 2020 | 2 G.m² | | 250 M.m² | 6 EJ |
| | | 12% | | |
| 2030 | 6,0 G.m² | | 700 M.m² | 20 EJ |
| | | 9% | | |
| 2040 | 14 G.m² | | 1 G.m² | 40 EJ |
| | | 6% | | |
| 2060 | 45 G.m² | | 2 G.m² | 130 EJ |
| | | 3% | | |
| 2080 | 80 G.m² | | 2 G.m² | 250 EJ |
| | | 2% | | |
| 2100 | 120 G.m² | | 2 G.m² | 360 EJ |

Wir wollen uns nicht auch noch mit der Frage des Investitionsbedarfes und den Kosten der erzeugten Energie auseinandersetzen. Es sei nur erwähnt, dass, wenn die Schweiz im Jahr 2040 etwa 0,5% der von der Gruppe der Industrieländer benötigten Energie verbraucht, prozentual gleich viel wie heute, die Erzeugung der angenommenen 5% in Sonnenenergieanlagen eine Bodenfläche von etwa 100 km² erfordern würde, was vollkommen unmöglich erscheint. Sollten Milliarden von Franken für die Erstellung solcher Anlagen in subtropischen Gebieten investiert werden, um anschliessend die damit produzierte Energie in die Schweiz zu übertragen, so kann man sich die dabei zu erwartenden enormen Probleme sehr gut ausmalen.

Trotzdem nehmen wir einmal an, dass dieses Programm weltweit realisiert wird, dass wir also voll auf die Karte Sonnenenergie setzen! Ferner fügen wir noch 30 EJ pro Jahr für andere erneuerbare Energien im Jahre 2040 hinzu (vor allem Wasserkraft) und erhalten damit *insgesamt 70 EJ pro Jahr*.

### *3.5 Neue Energieformen*

Betrachten wir diese bescheidene Zahl, so müssen wir uns fragen, ob es im nächsten halben Jahrhundert nicht möglich sein könnte, dass völlig *neuartige* Energien auf den Plan treten, und ob nicht vielleicht sogar die *Kernfusionsenergie* einen wichtigen Platz in der Energieversorgung einnehmen könnte.

Verschiedene Neuentdeckungen und Erfindungen, wovon sicher auch gewisse mit einer erheblichen Bedeutung, sind in den kommenden Jahrzehnten zweifellos zu erwarten. Die grundlegende Frage stellt sich nur nach der Zeitdauer bis zur Produktionsreife, zur Fertigung in industriellem Massstab und dann bis zum nicht nur marginale Bedeutung besitzenden Grosseinsatz.

Dabei kann es sich nicht um Kleinanlagen oder um Teile mit grossen Fertigungsserien bei geringem Rohstoffbedarf, wie z.B. auf den Gebieten der Elektronik oder Informatik, handeln. Damit thermische oder nukleare Anlagen zur Produktion von Strom in der Lage sind, z.B. 10 EJ Primärenergie pro Jahr zu verbrauchen, sind Investitionen von 300 bis 600 Milliarden Franken erforderlich! Wenn die Hälfte dieses Betrages aus der Arbeitsleistung besteht, so ergibt das 2 bis 3 Milliarden Arbeitsstunden oder 1 bis 2 Millionen Mannjahre[21].

[20] Man würde in diesem Fabrikationsbereich eine industrielle Fertigungskapazität in der Grössenordnung der heutigen ganzen Weltautomobilindustrie benötigen...

[21] 10 EJ/31,5 Ms/Jahr = 0,32 TWh. Mit einem Lastfaktor von 0,8 und einem Wirkungsgrad von 0,4 (thermische Kraftwerke) bzw. 0,3 (Kernkraftwerke) beträgt die installierte Leistung 160 GWh (thermische Kraftwerke) bzw. 120 GWh (Kernkraftwerke). Bei 2 GFr./GWe (thermische Kraftwerke) bzw 5 GFr./GWe (Kernkraftwerke) ergibt sich eine Investition von 320 bzw. 600 GFr. Wenn die Hälfte davon Arbeitsaufwand mit einem mittleren Stundenansatz von 100 Fr./h ist, so entspricht dies 1,6 bis 3 Milliarden Stunden oder 0,9 bis 1,6 Millionen Mannjahren, d.h. der Arbeit von 200 000 Menschen während 5 bis 10 Jahren.

Von der ersten Kernspaltungs-Kettenreaktion (1942) bis zur Inbetriebnahme der ersten grossen kommerziellen Kernkraftwerke von 1000 MW (1970) sind etwa 30 Jahre vergangen; 15 Jahre später liefert diese Energie erst 4 EJ Elektrizität pro Jahr (dies entspricht 12 EJ Primärenergie).

Es darf deshalb als sicher angenommen werden, dass die künftigen Neuentdeckungen nur einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Art der Energiebedarfsdeckung im Jahre 2040 ausüben.

Die einzig nennenswerte Hoffnung in dieser Hinsicht beruht auf der *Kernfusion,* für die auch grosse Entwicklungsanstrengungen mit einem Investitionsaufwand in Milliardenhöhe unternommen werden. Aber es ist daran zu erinnern, dass das physikalische Grundprinzip dieses Reaktortyps bereits seit 50 Jahren bekannt ist, und trotzdem ist es bis heute noch nicht gelungen, Fusionsenergie kontrolliert in makroskopischen Grössen freizusetzen. Allerdings besteht die berechtigte Hoffnung, dass dies nächstens gelingen wird.

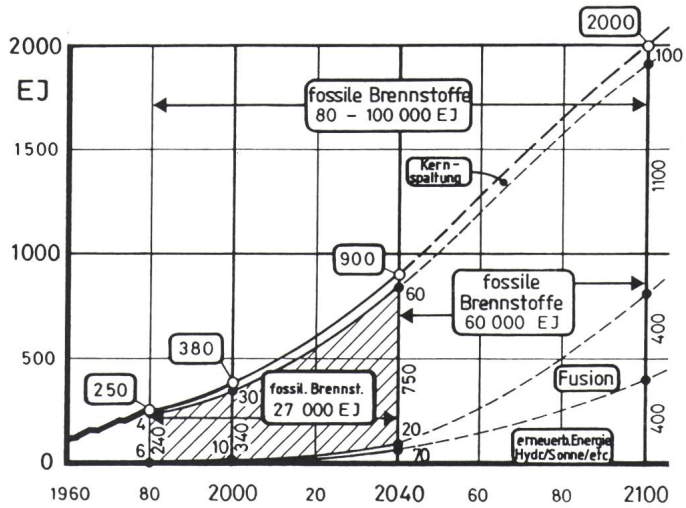
Es ist aber noch ein weiter Weg bis zur Inbetriebnahme der ersten Prototypanlage zu gehen (10 bis 100 MW, um 2000 bis 2010), dann der Bau der ersten leistungsstarken Kraftwerke (1000 bis 2000 MW thermisch, vielleicht um 2020). Sofern alle technischen und sicherheitsmässigen Probleme gelöst werden können, wäre es denkbar, dass im Jahre 2040 etwa 100 bis 200 Kraftwerke zu je 5000 MW eine thermische Energiemenge von *10 bis 20 EJ/Jahr* erzeugen könnten.

*Diese Überlegungen zeigen deutlich, auch wenn Unsicherheiten bei den angenommenen Zahlen bestehen, dass die Menschheit gegen die Mitte des 21. Jahrhunderts nur auf zwei effektiv wirksame Energieschienen zählen kann, nämlich auf die fossilen Brennstoffe und auf die Energie aus der Kernspaltung (mit einem Anteil aus Brutreaktoren).*

### *3.6 Szenarium eines bescheidenen Einsatzes von Kernenergie*

Wenn man die Idee zugrunde legt, dass beim heutigen politischen Umfeld der Anteil der Kernenergie bescheiden bleiben wird, so kommt man unweigerlich auf ein ähnliches Szenarium wie das in Figur 18 dargestellte. Aus diesem ist ersichtlich, dass der kumulierte Verbrauch an fossilen Brennstoffen zwischen 1980 und 2040 in der Grössenordnung von 25 000 bis 30 000 EJ liegen dürfte. Dies stellt, wie bereits erwähnt, von der Ressourcenseite her gesehen keine Probleme.

**Fig. 18**
**Deckung des Welt-Primärenergiebedarfs bei einer geringen Abstützung auf die Kernspaltungsenergie**



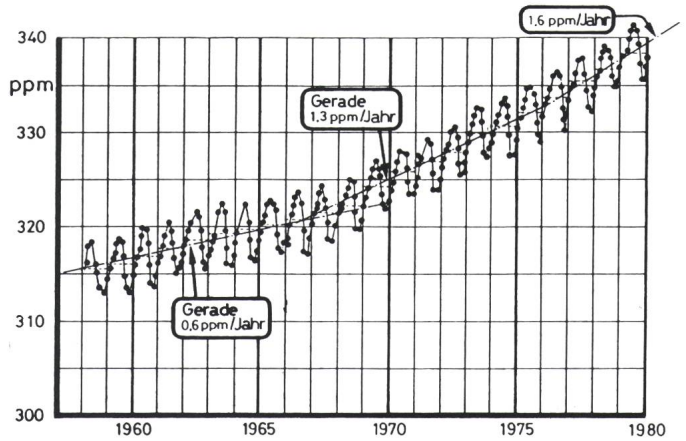

Hingegen entsteht in bezug auf die Luftverschmutzung ein ernstzunehmendes Problem. Man kann zwar davon ausgehen, dass im Verlaufe der nächsten Jahrzehnte die Feuerungsbedingungen für die fossilen Brennstoffe soweit verbessert werden, dass Schadstoffemissionen, seien es nun Schwefeloxide, Stickstoffverbindungen oder andere umweltbelastende Stoffe, völlig vermieden oder zumindest auf ein akzeptables Niveau heruntergedrückt werden können. Allerdings lässt sich die Produktion von Kohlendioxid $CO_2$ nicht verhindern, weil gerade durch diese die Nutzwärme freigesetzt wird. Dieses $CO_2$ wird in die Atmosphäre abgegeben, wo es sich mit der Luft vermischt und nicht mehr zurückgeholt werden kann; es handelt sich hier um einen irreversiblen Prozess.

Die emittierten $CO_2$-Mengen sind relativ gut bekannt (ungefähr 22 Milliarden Tonnen im Jahr 1985). Bei gleichmässiger Verteilung in der ganzen Erdatmosphäre ergäbe sich bei den heutigen Ausstossmengen eine jährliche Zunahme des $CO_2$-Gehaltes der Luft um 2,5 Millionstel (2,5 ppm). Wie die Figur 19 zeigt, wird der $CO_2$-Gehalt der Luft bereits seit mehreren Jahrzehnten gemessen; er beträgt heute 350 ppm und steigt langsam und stetig um 1,6% pro Jahr an. Die Differenz von 0,9 ppm entspricht dem von den Pflanzen assimilierten sowie dem vom Wasser an der Meeresoberfläche aufgenommenen Anteil.

Man weiss schon lange, dass das $CO_2$ in der Luft einen Treibhauseffekt bewirkt (wie auch das Glas unserer Fenster). Das sichtbare Licht durchdringt, zumindest der grösste Anteil davon, die Atmosphäre, währenddem die Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) der Erdoberfläche am Durchtritt gehindert wird[22]. Die Sonnenstrahlung

[22] Der Physiker möge diese sehr simplifizierende Darstellung verzeihen! Um genauer zu sein kann man davon ausgehen, dass 49% der Sonneneinstrahlung den Boden erreichen, von denen 6% reflektiert werden. Der Rest von 43% wird auf der Oberfläche absorbiert. Diese 43% werden zurückgestrahlt, aber damit sie die Atmosphäre durchdringen können, muss die Temperatur des Bodens auf 288 K ansteigen.

**Fig. 19**
**Schwankungen des $CO_2$-Gehaltes der Luft in Hawaii**
(nach C.D. Keeling, 1982)



bringt eine beträchtliche Energiemenge auf unsere Erde. Damit die Temperatur am Boden konstant bleibt, ist es erforderlich, dass die Erde genausoviel Energie zurückstrahlt wie sie erhält. Unter diesen Bedingungen stellt sich diese Temperatur im Mittel auf ungefähr 288 K (15 °C) ein.

Mit zunehmendem $CO_2$-Gehalt der Luft wird die von der Erdoberfläche abgestrahlte Energie nur bei erhöhter Wellenlänge durchgelassen, d.h. wenn sich die Temperatur der Erdoberfläche erhöht.

Es scheint, dass die Temperatur gegenwärtig bereits 0,3 bis 0,7 °C höher ist als diejenige, die sich ohne die seit Beginn des Jahrhunderts vom Menschen bewirkte Abgabe von $CO_2$ in die Atmosphäre eingestellt hätte.

Dieser Treibhauseffekt wird sich bei zunehmendem $CO_2$-Gehalt der Luft noch verstärken, und dieser Aspekt wird seit vielen Jahren in zunehmendem Ausmass untersucht. Durch andere Ursachen wird diese Entwicklung noch beschleunigt, so z.B. durch andere Schadstoffemissionen in die Luft, Erhöhung der Luftfeuchtigkeit, Rückgang der schneebedeckten und abstrahlenden Erdoberfläche usw.

Es wird heute allgemein angenommen, dass bei einer Erhöhung des $CO_2$-Gehaltes der Luft auf 500 ppm die Temperatur an der Erdoberfläche in unseren Regionen um etwa 1,5 bis 4,5 °C ansteigen würde (noch mehr in höheren Breitengraden infolge anderer, bereits erwähnter Effekte). Eine solche Situation könnte sich einstellen, wenn einmal 20 000 bis 40 000 EJ Brennstoffe verfeuert worden sind. Diese Lage ist in einem Szenarium in der Figur 18 für das Jahr 2040 aufgezeichnet.

Die Folgen einer solchen Erwärmung sind selbstverständlich nur sehr schwer abzuschätzen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass damit schwerwiegende klimatische Änderungen verbunden sein könnten, mit starken Veränderungen des Wasserhaushalts und der Notwendigkeit, die landwirtschaftliche Nutzung ausgedehnter Gebiete (in der Grössenordnung eines Kontinents) zu ändern. Der Meeresspiegel würde sich anheben (0,2 bis 1,2 m), und sehr schwerwiegende Versteppungen würden auftreten.

Beim heutigen Stand der noch ungenügenden und vor allem ungenügend genauen Erkenntnisse ist doch zu erkennen, dass die Auswirkungen ein unvorhersehbares Ausmass erreichen können und irreversibel sind. Schon vor der Mitte des nächsten Jahrhunderts könnten sich katastrophale Konsequenzen ergeben. Die Untersuchungen der möglichen Auswirkungen müssen vorangetrieben und vertieft werden, damit die Folgen besser überblickt werden können[23].

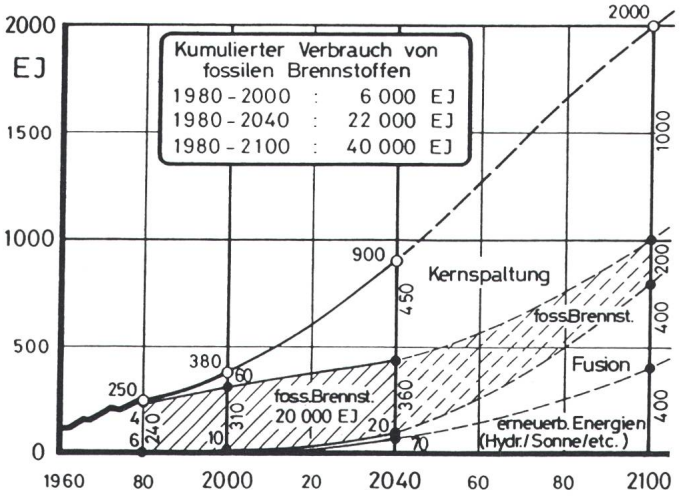



**Fig. 20**
**Deckung des Welt-Primärenergieverbrauchs bei einer Abstützung auf fossile Brennstoffe, limitiert durch den $CO_2$-Gehalt der Luft**

Angesichts solcher Perspektiven kann es nicht darum gehen, passiv zu bleiben und zu warten, bis die Katastrophe sich bestätigt, um dann zu handeln anzufangen, um so mehr, als dieses Phänomen nur deshalb nicht reversibel ist, weil der Einsatz fossiler Brennstoffe nicht von heute auf morgen eingestellt werden kann.

Wenn man in den Jahren 2030 oder 2040 nicht in eine katastrophale Lage hineinschlittern will, müssen wahrscheinlich bereits in rund 10 Jahren Massnahmen zur Stabilisierung des Verbrauches fossiler Brennstoffe ergriffen werden. Man muss sich auch nolens volens davon überzeugen lassen, dass bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts als einzige Möglichkeit zur Beschränkung der zunehmende Einsatz, ein wesentlicher Einsatz sogar, von Kernspaltungsenergie nötig sein wird.

Je früher die zuständigen Instanzen auf allen Entscheidungsstufen davon überzeugt sind und die Öffentlichkeit informiert und überzeugt ist, desto besser.

In der Figur 20 ist ein solches Szenarium mit einem Nullwachstum der fossilen Brennstoffe, einem möglichst grossen Beitrag von Sonnen- und Fusionsenergie sowie einem zusätzlichen Einsatz von Kernspaltungsenergie dargestellt. Es ist selbstverständlich, dass in dieser Figur die Kurve, die den Einsatz der fossilen Brennstoffe kennzeichnet, nicht zufällig gezeichnet wurde: Sie entspricht dem Szenarium einer möglichen Entwicklung der Kernenergie unter Berücksichtigung der industriellen und finanziellen Randbedingungen. Dieses Szenarium beinhaltet insbesondere auch die Errichtung bedeutender Fernwärmenetze auf der Basis von Kernreaktoren.

### *3.7 Schlussfolgerungen aus Abschnitt 3*

- Gegen das Jahr 2040 wird die Weltbevölkerung auf 9 bis 10 Milliarden Menschen ansteigen (1986: 4,9 Milliarden).
- Angesichts der nicht zu vermeidenden Notwendigkeit, den Lebensstandard anzuheben, dürfte der Welt-Primärenergieverbrauch dann etwa 800 bis 1000 EJ pro Jahr erreichen (1986: etwa 300 EJ).
- Dieser Bedarf kann von den erneuerbaren Energiequellen (hauptsächlich Wasserkraft) und von der Kernfusion (am Beginn ihrer Entwicklung) nur in der Grössenordnung von einem Zehntel gedeckt werden.
- Die nur beschränkt mögliche Abstützung auf Kernenergie in ihrer derzeitigen Form (Kernspaltung) wird weiterhin eine intensive Nutzung der fossilen Brennstoffe zur Folge haben, von denen ausreichende Ressourcen zur Verfügung stehen.
- Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist jedoch damit zu rechnen, dass die Abgabe der so produzier-

[23] Die Teilnehmer am Internationalen Kongress von Villach im Oktober 1985 haben einen dringenden Appell an alle Regierungen gerichtet, sich der Bedeutung dieses Problems bewusst zu werden.

ten, enormen Mengen an Kohlendioxid (durch den Treibhauseffekt) zu sehr schwerwiegenden Klimaveränderungen mit katastrophalen Folgen führen wird.

- Das einzige Mittel, um dies zu verhindern, ist die Stabilisierung und später die Beschränkung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe, was nur mit einem verstärkten Rückgriff auf die Kernenergie möglich ist.
- Daher kann es nicht um die Frage gehen, ob man aus der Kernenergie aussteigen könne, wie gewisse Kreise anpreisen, sondern wie man es anpacken muss, um sie weiterhin benützen zu können.

Diese Schlussfolgerungen führen zu der Frage, welche Haltung angesichts des schweren Unfalls im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl einzunehmen ist. Nachfolgend wird versucht, hierauf skizzenhaft eine Antwort zu geben.

## 4. Der Unfall von Tschernobyl und seine Folgen

Zu Beginn unserer Ausführungen möchten wir denjenigen, die sich in Tschernobyl mit viel Mut und Opfergeist zur Begrenzung der Unfallfolgen eingesetzt haben, unsere Anerkennung aussprechen; viele mussten dort ihr Leben lassen oder werden es in den kommenden Monaten noch verlieren. Vor der Erörterung von technischen Aspekten ist es deshalb wohl angebracht, unseren Blick auf die Tausende von Menschen zu richten, die heute die Konsequenzen dieses Unfalls zu tragen haben, und sei es auch nur deshalb, weil sie ihre Wohnstätten überstürzt für eine unbestimmte Zeitdauer verlassen mussten.

Nach diesen Vorbemerkungen wollen wir uns nun den Hauptfragen im Rahmen dieser Ausführungen zuwenden, nämlich ob dieser Unfall durch seine Natur und seinen Umfang Anlass gibt, die Nutzung der Kernenergie ganz allgemein in Frage zu stellen oder ob es sich um ein besonderes Ereignis mit begrenzten Auswirkungen – wie schwerwiegend sie auch immer sein mögen – handelt und nur einen bestimmten Kraftwerktyp und seine Betriebsweise betrifft.

Die technischen Eigenschaften der sowjetischen RBMK-Kraftwerke und mittlerweile auch der Unfallablauf sind relativ gut bekannt. Aus der gegenwärtig laufenden, detaillierten Analyse des Unfalls werden sich entsprechende Lehren ziehen lassen, vor allem für die Russen, aber auch international für unsere gesamte technische Gemeinschaft.

### *4.1 Die sowjetischen RBMK-Kernkraftwerke*

Bei den RBMK-Kernkraftwerken handelt es sich um graphitmoderierte Siedewasserreaktoren, bei denen Zirkaloy-Brennstabhüllrohre den bei uns üblichen Reaktor-Druckbehälter aus Stahl ersetzen. Im übrigen verfügt das Reaktorgebäude auch über keine druckfeste Sicherheitshülle.

Diese kurz aufgezählten Eigenschaften führen dazu, dass die RBMK-Kraftwerke einen geringeren Sicherheitsstandard als westliche Reaktoren aufweisen. Eine solche Konstruktionsweise würde übrigens in westlichen Ländern gar nicht zugelassen.

Dies ist z.B. dadurch bedingt, dass eine Erhöhung der Verdampfung des Kühlwassers zu einer Dichteverminderung des Wasser–Dampf-Gemisches und damit zu einer niedrigeren Neutronenabsorptionsrate führt, während das Moderationsvermögen des Graphites unverändert bleibt. Man spricht dabei von einem positiven Blasenkoeffizienten; die Reaktivitätsbedingungen verbessern sich, was sich in einer höheren Leistungsabgabe niederschlägt.

Dieser Reaktortyp ist deshalb nicht selbststabilisierend, wie das bei westlichen Siedewasser-Reaktoren der Fall ist (bei denen Wasser als Moderator dient und eine Dichteverminderung automatisch zu einer Reaktivitätsabschwächung führt). Auf diesen Effekt ist vermutlich der abrupte Leistungsanstieg während des Unfalls zurückzuführen (wobei infolge der Ausserbetriebsetzung des automatischen Schutzsystems die Leistungssteuerung ausser Kontrolle geriet). Man spricht von einer kurzzeitig aufgetretenen Leistungsspitze im Ausmass der rund 100fachen Nennleistung (d.h. etwa 300 000 MWth), welche zu einer mindestens teilweisen mechanischen Zerstörung des Reaktors geführt hat.

Auch die Verwendung von Zirkaloy für die Druckrohre vermindert die Reaktorsicherheit (Zirkonium wird wegen seiner geringen Neutronen-Absorptionsfähigkeit gewählt, wodurch Uran mit geringerer Anreicherung verwendet werden kann). Wenn nun in einem Störfall die Wassertemperatur in den Bereich von 1000 °C gelangt (im Normalbetrieb rund 300 °C), so setzt eine chemische Reaktion mit dem Zirkonium unter Wasserstoffbildung ein. Dieses Gas kann dann mit Luft ein explosives Gemisch bilden. Die Zerstörung des Reaktorgebäudes ist vermutlich auf eine solche Explosion zurückzuführen.

Die geringere Sicherheit manifestiert sich auch im Fehlen einer dichten und druckfesten Gebäude-Sicherheitshülle, dem Containment. Diese Sicherheitshülle – in schweizerischen Kernkraftwerken in doppelter Ausführung vorhanden – hat beim Unfall im amerikanischen Kraftwerk von Three Mile Island II im Jahre 1979 fast die gesamte freigesetzte Radioaktivität zurückgehalten[24].

Zu erwähnen ist auch die relativ grosse Länge der Druck-Hüllrohre, die leicht zu hydrodynamischen Instabilitäten des durchfliessenden Wasser-Dampf-Gemisches führen kann. Auch die grosse Graphitmasse (ungefähr 1000 Tonnen reiner Kohlenstoff) kann einen entstehenden Brand nähren[25], was zu einer Wasserzersetzung und damit zu einer Sauerstoffversorgung des Feuers führen kann.

### *4.2 Die Rolle des RBMK-Reaktors in der UdSSR*

So fragwürdig uns auch dieser Kraftwerktyp in seiner technischen Auslegung erscheinen mag, er wurde immerhin durch die Russen – und durch sie allein – seit 30 Jahren weiterentwickelt. In dieser Periode wurden 23 Reaktoren dieses Typs, mit Nennleistungen, die stufenweise von 100 bis 1500 MWe erhöht wurden, in Betrieb genommen (Leibstadt: 990 MWe); 6 weitere waren zum Unfallzeitpunkt in Bau, und es bestehen zurzeit zudem weitere Bauprojekte für solche Kraftwerkanlagen, mit Einheitsleistungen bis 2400 MWe.

Die Russen waren demzufolge von der Zweckmässigkeit dieser Reaktorlinie überzeugt. Die Gründe dafür scheinen vor allem bei den günstigen Kosten zu liegen (was nicht weiter erstaunt, da man ja weiss, wie kostspielig Sicherheit erkauft werden muss), an-

[24] Wie auch beim in bezug auf seine Schwere vergleichbaren Unfall im kleinen Versuchskraftwerk von Lucens im Jahr 1969.

[25] Wie dies 1957 in Windscale geschehen ist; allerdings war dieser ältere Reaktortyp noch luftgekühlt (die westlichen graphitmoderierten Reaktoren werden mit $CO_2$ gekühlt).

dererseits erlaubt die Anwendung des Druckröhren-Systems anstelle eines Druckgefässes eine Leistungssteigerung durch einfache Erhöhung der Kühlkanäle (eingebaute, parallelgeschaltete Druckröhren). Das Fehlen einer Sicherheitshülle hat diese Entwicklung ebenfalls gefördert.

Die diesem Reaktortyp inhärente, relativ ungünstige Neutronenökonomie erfordert eine laufende Auswechslung der Brennstoffstäbe. Anders ausgedrückt müssen also dauernd Brennstoffstäbe (mehrere Male pro Tag?) in die Druckrohre eingebracht beziehungsweise daraus entfernt werden (ein 1000-MWe-Reaktor enthält insgesamt 1700 Druckröhren).

Die älteren französischen Graphitreaktoren wie auch die ähnlich ausgelegten englischen Anlagen befinden sich in der gleichen Situation. Es handelt sich bei diesem Verfahren selbstverständlich um recht subtile Eingriffe in die Kernzone eines in Betrieb befindlichen, also unter Druck (etwa 60 atm) stehenden Reaktors. Die Inkaufnahme dieser Inkonvenienz ist aber aus einem anderen Grund von erheblichem Interesse: sie erlaubt nämlich die regelmässige Gewinnung von Plutonium 239, das infolge des dauernden Neutronenbeschusses aus Uran 238 entsteht (Uran 238 ist selbst nicht spaltbar, ist aber im verwendeten Brennstoff des Tschernobyl-Reaktors mit einem Anteil von 98% enthalten). Damit lässt sich auf wirtschaftliche Weise spaltbares Material für militärische Zwecke gewinnen. Jetzt wird auch verständlich, wieso die Sowjets diesen Reaktortyp weder zum Export angeboten noch Inspektionen der Internationalen Atomenergie-Agentur zulassen wollten.

Diese zur Erinnerung kurz skizzierten technischen Dispositionen sind nicht die unmittelbare Ursache des eingetretenen Unfalls, aber sie tragen zum Verständnis seines aussergewöhnlichen Ausmasses bei. Die Unfallursachen sind also auf ganz spezifische Umstände zurückzuführen und nur für diesen sowjetischen RBMK-Typ charakteristisch: «positiver Blasenkoeffizient» (auch Void-Koeffizient genannt), Reaktion Zirkaloy–Wasser, keine Sicherheitshülle, daher unkontrollierte Leistungsexkursion, Explosion, Freisetzung von Radioaktivität.

### *4.3 Direkte Unfallursachen*

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Anlass zum Unfall auf ein Experimentierprogramm zur Untersuchung ganz spezieller Betriebsverhältnisse zurückzuführen ist. Es ist hier nicht der Ort, um über den Sinn dieser Versuche zu diskutieren, aber tatsächlich hat die Durchführung dieses Programms zur Ausserbetriebnahme von wesentlichen Teilen des Schutzsystems Anlass gegeben (bei einem Kraftwerk mit bereits allgemein unzureichendem Sicherheitsstandard). Das Versuchsprogramm von Ende April 1986 ist zudem nicht wie vorgesehen abgelaufen, und der Operateur hat mit unvorhergesehenen Eingriffen die Sachlage noch verschlimmert (gemäss Aussagen der sowjetischen Regierung). Bei diesem Vorgehen erfolgte keine Notabschaltung des Reaktors (automatisches Einfahren der neutronenabsorbierenden Abschaltstäbe), und der Operateur war nicht mehr in der Lage, eine solche (verspätet?) einzuleiten. Dies ist nach unseren Kenntnissen das erste und einzige Mal, dass solche Zustände in einem Kernkraftwerk geherrscht haben.

### *4.4 Stellenwert dieses Unfalles*

Es scheint klar, dass man nun nicht die gesamte Nutzung der Kernenergie verdammen kann, nur weil ein Land einen Kraftwerktyp mit einem offensichtlich unzulänglichen Sicherheitsstandard entwickelt hat und man dort das Wagnis zur Durchführung von ungenügend durchdachten und obendrein gefährlichen Experimenten eingegangen ist. Dies würde ja sonst bedeuten, dass die gesamte Zivilluftfahrt verboten werden müsste, nur weil ein Flugzeugtyp eine unzureichende Sicherheit aufweist (z.B. der Konstruktionsmangel im Heckteil der Boeing 747, der den Unfall der Japan Air Lines mit mehr als 500 Opfern verursachte). Allerdings ist diese Schlussfolgerung nur unter der Voraussetzung einer ausreichenden Kenntnis des Sicherheitsstandards und der Betriebsweise anderer Kraftwerktypen – vor allem solcher westlicher Bauart – zwingend. Diese Beurteilung ist für unsere Behörden und (noch mehr?) für die Massenmedien schwierig; im übrigen sind letztere oft (zu oft?) auf solche sensationellen Ereignisse sensibilisiert und haben Mühe, sie nicht noch weiter aufzublähen. Und so ist der Mann der Strasse zumindest ratlos, wenn nicht gar verunsichert oder sogar verängstigt; eine Angst, die durch das offensichtliche Unvermögen von Regierungen zur Beschränkung der Nuklearwaffenproduktion noch genährt wird.

Eine korrekte Betrachtungsweise verlangt vorerst nach unserem Ermessen einen festen Willen von Behörden und Medien und schliesslich von jedem einzelnen zum Verstehen dieser Ereignisse. Es fehlt sicher nicht an Information; zahlreiche unabhängige Organisationen bemühen sich ständig um verständliche und leicht zugängliche Orientierungshilfen. Auch den nationalen und internationalen Gremien (wie z.B. die IAEO), die über kompetente und verantwortungsbewusste Fachleute verfügen, sollte ein gewisses Vertrauen entgegengebracht werden.

### *4.5 Unfallfolgen*

Um den Rahmen dieser Ausführungen nicht zu sprengen, verzichten wir hier auf die Erörterung der Unfallfolgen auf die Bevölkerung, auf Tiere und auf Pflanzen in der näheren und weiteren Umgebung von Tschernobyl. Ohne Zweifel wurde eine erhebliche Radioaktivitätsmenge freigesetzt (man spricht von 50 Millionen Curie, was etwa dem Äquivalent von 50 Tonnen Radium entsprechen dürfte), auch wenn es sich dabei tatsächlich nur um rund 3 bis 4% des zur Zeit des Unfalls im Reaktorkern vorhandenen totalen Aktivitätsinventars handelt. Es dürfte für eine genauere Abschätzung der eingetretenen Unfallfolgen heute noch verfrüht sein, aber es ist anzunehmen, dass die unmittelbare Umgebung des Kraftwerks stark (innerhalb eines Radius von 10 bis 30 km um den Reaktor), das anschliessende Gebiet einigermassen begrenzt und das restliche Europa (einige lokale Gebiete ausgeschlossen) nur sehr schwach – wenn nicht sogar unbedeutend – betroffen worden ist.

Es wäre sicher unklug, über die möglicherweise zu erwartenden Todesfälle als Nachwirkungen des Unfalls zu philosophieren; solche Spekulationen – nach denen die Massenmedien offenbar lechzen – sind immer äusserst komplex (auch bei einem viel besseren Informationsstand), diskutabel und oft auch tendenziös. Fehlschlüsse werden meist erst viel später erkannt und dann auch kaum mehr zur Kenntnis genommen. Als Beispiel sei die kurz nach dem Unfall von amerikanischer Seite herausgegebene Nachricht erwähnt, nach der im Unglücksgebiet von Tschernobyl rund 1000 bis 2000 Tote zu beklagen seien. Man weiss heute, dass es zu diesem Zeitpunkt in

der Tat nur 2 waren. Auch an das Märchen von einem Brand in einem zweiten Tschernobyl-Reaktor wäre zu erinnern, das aufgrund einer Fehlinterpretation einer Satellitenaufnahme entstanden ist. Dazumal haben die Medien aber solche Informationen breitgewalzt.

Andererseits sollte sich der gewöhnliche Bürger mit dem Phänomen der – allgegenwärtigen – Radioaktivität intensiver befassen, um selbst beurteilen zu können, was effektiv eine Strahlenbelastung von z.B. 50 Millirem für ihn bedeutet (dies entspricht etwa der zusätzlichen Strahlendosis, der ein Schweizer im Mittel im Jahr nach dem Unfall ausgesetzt ist), da er im gleichen Zeitraum aus anderen Quellen bedeutend mehr, z.B. 200 bis 500 Millirem, aufnimmt[26]. Im übrigen wirkt sich diese geringe Radioaktivität nicht negativ aus und zudem scheinen sich neuerdings sogar die guten Seiten immer mehr herauszuschälen.

### *4.6 Weitere Nutzung oder Ausstieg aus der Kernenergie?*

Hinsichtlich der Forderung nach einem Moratorium, das gewisse Kreise aufgrund ihrer eigenen Aussagen als Denkpause verstehen, dürfte der eingereichte Initiativtext nun genügend Anlass zur Diskussion geben. Die angestellten Überlegungen zu Beginn unserer Ausführungen haben gezeigt, dass uns solche Hindernisse auf dem Weg zur weiteren Nutzung der Kernenergie sehr teuer zu stehen kommen könnten – ganz unbesehen davon, ob es sich nun um einen Ausstieg der Schweiz bis zur Jahrhundertwende mit den damit verbundenen wirtschaftlichen, politischen und ökologischen Auswirkungen oder um einen solchen im weltweiten Massstab im Laufe des nächsten Jahrhunderts mit der Möglichkeit von dramatischen klimatischen Folgeerscheinungen in einem Ausmass handelt, das überhaupt nicht mehr mit dem Unfall von Tschernobyl vergleichbar ist.

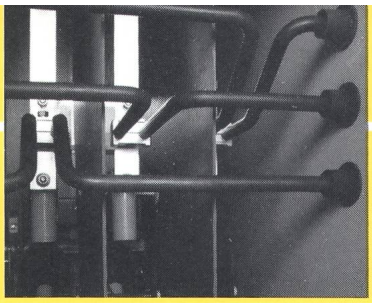
Eventuell erfolgversprechender wären Bemühungen (Forderungen?) auf internationaler Ebene für ein Moratorium des Weiterbetriebs der 22 sowjetischen RBMK-Reaktoren. Auch wenn die sowjetische Berichterstattung an die IAEO die Betriebsverantwortlichen des Unfallreaktors von Tschernobyl stark rügt und wenn in Zukunft die entsprechenden Massnahmen zur Vermeidung eines solchen betrieblichen Fehlverhaltens ergriffen werden, so sind damit die vorhandenen Sicherheitsmängel dieser Kraftwerke noch nicht einmal anerkannt. Sollten sich nicht diejenigen, die ein Kernenergie-Moratorium in der Schweiz anpreisen, über die Absicht der UdSSR, die RBMK-Reaktoren weiterzubetreiben, alarmiert fühlen? Wie dem auch immer sei, die sowjetische Regierung hat erklärt, dass sie sich weiterhin auf die Kernenergie abstützen werde, ja sie sogar beschleunigt ausbauen wolle in der Absicht, bis zur Jahrhundertwende die installierte Kapazität um das 5- bis 7fache zu steigern (also eine Erhöhung von 17 auf 100 GWe; in der Schweiz sind zurzeit weniger als 3 GWe installiert, die nach dem im 2. Kapitel erwähnten mittleren Szenarium bis zur Jahrhundertwende auf 5 GWe erhöht werden sollen).

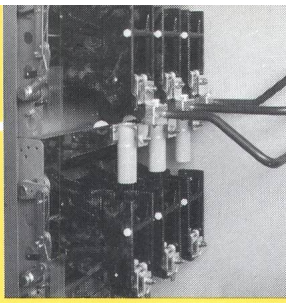
### *4.7 Schlussfolgerungen aus Abschnitt 4*

- Die sowjetische Reaktorlinie des Typs RBMK ist durch spezielle Eigenschaften gekennzeichnet. Diese Reaktoren weisen, gemessen an den im Westen geltenden Kriterien, unakzeptierbare Mängel auf.
- Der Unfall und seine Auswirkungen können direkt auf ein besonderes Experimentierprogramm zurückgeführt werden, das nicht nur unbedachte Risiken beinhaltete, sondern auch noch in unverantwortlicher Weise abgewickelt wurde.
- Das aussergewöhnliche Unfallausmass ist unbestrittenerweise dem Zusammentreffen von groben Programmfehlern sowie, nicht minder gravierend, der Art der Durchführung mit den diesem Kraftwerktyp inhärenten Schwachstellen zuzuschreiben.
- Es handelt sich in mehrfacher Hinsicht um einen Spezialfall, der keinesfalls eine allgemeine Infragestellung der weiteren friedlichen Nutzung der Kernenergie rechtfertigt.
- Da auch in Zukunft eine breite internationale Abstützung auf die Kernenergie unverzichtbar sein dürfte, müsste das einzig vernünftige Vorgehen in einer behutsamen Weiterentwicklung der Kernenergieproduktion, unter Berücksichtigung von laufend zu überprüfenden und zu vervollkommnenden Sicherheitsanforderungen, liegen.
- Zudem ist zu wünschen, dass sich der gewöhnliche Bürger mit Unterstützung der Medien intensiver mit der überall präsenten Radioaktivität und mit der unentbehrlichen Kernenergie befasst und sich auch entsprechend informiert. Die Diskussionen könnten dadurch den subjektiven oder sogar emotionalisierten Charakter verlieren, was sonst nur zu Fehleinschätzungen führt (aus Unwissenheit und Angst).

[26] Das Krebsrisiko einer 20mal höheren Strahlenexposition von 1 rem = 1000 mrem entspricht dem Konsum von monatlich 2 Zigaretten!

# HUSER

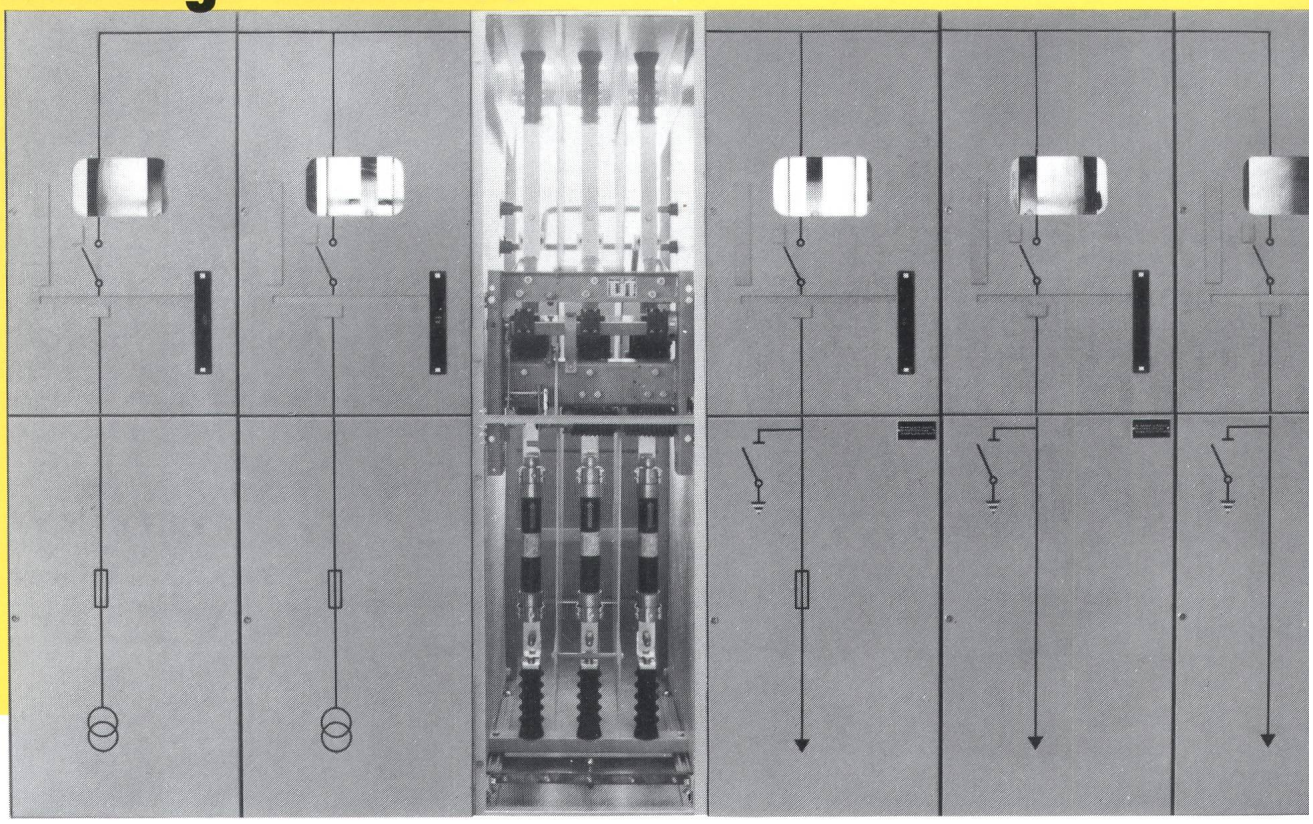




# LA NOUVELLE

# REFERENCE DE QUALITE

## Cellules étroites 24 kV avec sectionneurs à coupure en charge modernes



Composants de réseau à blindage métallique 600/800 x 1000 x 2100 mm (larg. x prof. x haut.) pour stations de transformateurs et installations de commutation préfabriquées et conventionnelles.

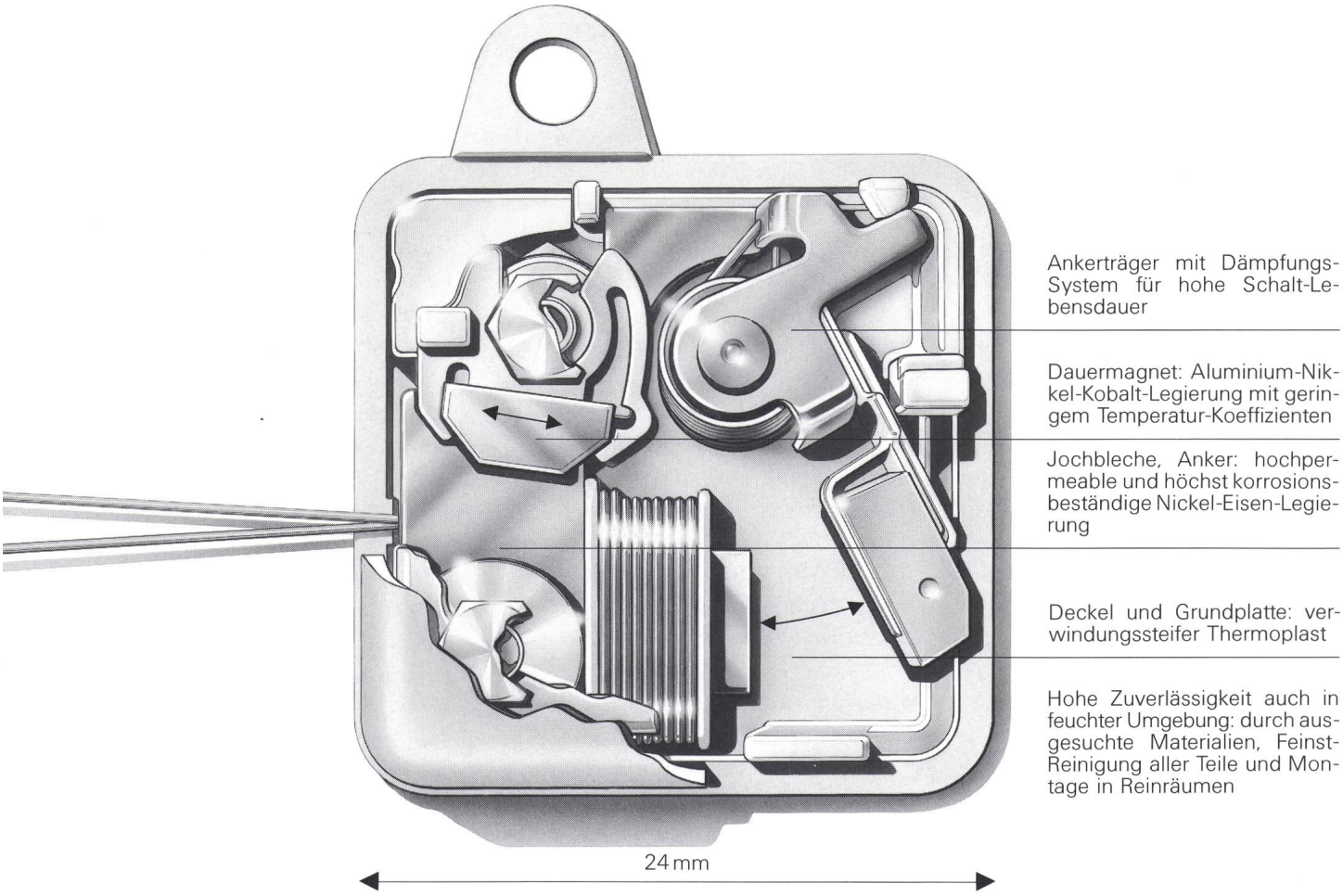
Testées selon les normes CEI et la directive PEHLA No 3 pour 24 kV, 630 A, 500 MVA.

Sans contacts de commutation ouverts, avec barres collectrices isolées, appropriées pour l'adjonction de mises à la terre rapides et d'entraînements par moteur.

Brefs délais de livraison pris sur stock. Documentation, conseils et démonstrations: 073-23 46 46.

**Elektrobau I. Huser AG 9572 Busswil Tel. 073-23 46 4**

# Sicherheit, die Sie nur hier sehen können: FI-Magnetauslöser von CMC




Das Herz eines jeden CMC Fehlerstrom (FI)-Schutzapparates ist der Magnetauslöser (MA). Diese werden in Schaffhausen in Reinraumtechnik produziert und feuchtigkeitssicher verschlossen; 15mal getestet, registriert und erst jetzt für die FI-Apparateproduktion freigegeben. Damit die überzeugenden Eigenschaften des MA auch wirklich immer voll zur Anwendung kommen, werden die kritischen Teile aller FI-Apparate von CMC aus rostfreien Materialien hergestellt. Durch diesen garantierten Korrosionsschutz und die kontinuierliche Qualitätskontrolle jedes einzelnen FI-Apparates ist die sichere Funktion aller FI-Apparate auf Jahre hinaus gewährleistet – also bei jedem FI-Schalter, jeder FI-Steckdose SIDOS® und jedem FI-Relais.

CMC Fehlerstrom-Schutzschalter sind sicher.

Daher empfehlen wir für Installationen nicht nur den obligatorischen FI-Minimalschutz lt. HV 41 255, sondern den voll ausgebauten FI-Schutz sämtlicher Verbraucher.

Senden Sie mir bitte Ihre Übersicht ‹Das grosse FI-Sortiment›.

CMC

**CMC Carl Maier+Cie AG,** Elektrische Schaltapparate und Steuerungen, CH-8201 Schaffhausen/Schweiz

Telefon 053 816 66, Telex 76 486