

## Kernenergie-Reserven und langfristiger Energiebedarf<sup>[\*\*]</sup>

Von K. E. Zimen<sup>[\*]</sup>

*Es werden die globalen, potentiellen Energiereserven anhand der neuesten zugänglichen Schätzungen zusammengestellt, und es wird der zukünftige Energieverbrauch mit Hilfe einer Arbeitshypothese über die Entwicklung der Weltbevölkerung ( $P$ ) und des Energieverbrauchs pro Kopf ( $\gamma$ ) abgeschätzt. Danach wäre der Energiebedarf in 30 Jahren etwa siebenmal, in 80 Jahren etwa fünfzigmal höher als heute, und die Zeitspanne bis zum Verbrauch aller in angereicherter Form vorhandenen Energieträger betrüge etwa 120 bis 160 Jahre. Der Energiebedarf im stationären Zustand ( $P \cdot \gamma = \text{konst.}$ ) könnte von der Größenordnung  $10^{13}$  MWh pro Jahr sein und aus dem magmatischen Gestein ( $U, Th$ ) und dem Meerwasser ( $U, D$ ) gedeckt werden. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über die Realisierung und Sicherheit von Brut- und Fusionsreaktoren, die chemische Behandlung und Endlagerung radioaktiver Rückstände, die Gewinnung von Uran, Thorium und Deuterium aus den „Ur-Rohstoffen“, über alle relevanten Umweltschutz-Probleme und über weltweite Begrenzung der Geburtenüberschüßziffern sollten hohe Priorität erhalten.*

### 1. Fragestellung

Der Mensch benötigt zum Leben viele Güter und Dienstleistungen. Diese Bedürfnisse erfordern zu ihrer Befriedigung Energie in irgendeiner Form, teils als maschinelle Energie, teils als menschliche Arbeitskraft, und lassen sich daher letzten Endes als ein Bedarf an Energie ausdrücken (auch Geld ist eine Art von leicht konvertierbarer Energie<sup>[1]</sup>). Der Energieverbrauch pro Kopf ist ein Maß der Industrialisierung und damit des zivilisatorischen Lebensstandards. Um die kerntechnischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der richtigen Perspektive zu sehen, erscheint es nützlich, zu fragen, wie lange die Vorräte an den verschiedenen Energieträgern den Bedarf der schnell wachsenden Menschheit werden decken können. Zur Beantwortung dieser Frage

müssen die potentiellen Vorräte an Energie-Rohstoffen mit dem bisherigen und zukünftigen Energieverbrauch verglichen werden. Letzterer wird davon abhängen, wie sich die Menschheit vermehrt und wie der Energieverbrauch pro Kopf anwächst.

Bei den Energievorräten ist zu unterscheiden zwischen den *angereicherten* Rohstoff-Vorkommen, die noch für einige Zeit verfügbar sind, und den sogenannten *Ur-Rohstoffen*, die für den Langzeitbedarf der Menschheit in Frage kommen, nämlich Uran und Thorium im magmatischen Gestein, Uran und Deuterium im Meerwasser und die regenerativen Energiequellen aufgrund der Sonneneinstrahlung. Es wird hier zunächst gefragt, wie lange die Vorräte an angereicherten Energie-Rohstoffen den Bedarf werden decken können. Dabei wird sich ergeben, daß die Menschheit schnell einem stationären Zustand entgegengeht, dadurch gekennzeichnet, daß das Produkt aus Population und Energieverbrauch pro Kopf konstant ist. Für den Energiebedarf in diesem stationären Zustand verbleiben der Menschheit die Ur-Rohstoffe, worauf in Abschnitt 5 eingegangen wird.

[\*] Prof. Dr. K. E. Zimen  
Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung  
1 Berlin 39, Glienicker Straße 100

[\*\*] Revidierte Fassung eines Vortrages am 5. Juni 1970  
in der Kernforschungsanlage Jülich.

[1] Vgl. R. Auerbach, Chemiker-Ztg. 82, 863 (1958); 91, 3 (1967).

Es gilt:

$$c = \gamma \cdot P \quad (1)$$

und

$$C_T = \sum^{\Delta T} \gamma(t) \cdot P(t) \quad (2)$$

Gesucht ist  $\Delta T$  für  $C_T = R$ .

R: Energiereserven (MWh); c: Energieverbrauch pro Jahr (MWh/a);  $\gamma$ : Energieverbrauch pro Kopf und Jahr ( $\text{MWh} \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $C_T$ : kumulierter Energieverbrauch (Consumption) bis zum Jahre T (MWh);  $P_T$ : Population Anno T (Jahresmitte); T: Jahreszahl (A.D.);  $\Delta T$ : Zeitdauer in Jahren ab 1970, für welche die Reserven den Bedarf decken; t: Zeit.

## 2. Vorräte an angereicherten Energie-Rohstoffen

### 2.1. Förderfaktor und Wirkungsgrad

Bei den Angaben über Energievorräte muß man unterscheiden zwischen den aufgrund von Untersuchungen gesicherten Vorräten  $R_{\text{ass}}$  (reasonably assured resources) und den aufgrund dieser einigermaßen gesicherten Tatsachen sowie allgemeiner geologischer und geochemischer Erfahrungen vermuteten zusätzlichen Vorräten  $R_{\text{add}}$  (estimated additional resources); die Unsicherheit bei den letzteren ist naturgemäß wesentlich größer. – Von den vorhandenen Vorräten kann immer nur ein Teil gefördert werden. Den förderbaren Bruchteil der gesicherten und vermuteten Vorräte bezeichnen wir als potentiellen Vorrat R (estimated ultimate recovery, EUR), den entsprechenden Faktor r

$$R = r(R_{\text{ass}} + R_{\text{add}})$$

als Förderfaktor. Dieser Faktor und damit die Größe des potentiellen Vorrats ist abhängig vom Preis, den man zahlen kann. So fragt es sich z.B. bei der Kohle, wie tiefe und schmale Flöze man noch abbauen, oder bei Uran und Thorium, wie arme Erze man noch aufbereiten kann. Rein *technisch* gesehen gibt es kaum eine Grenze für die Gewinnung eines Rohstoffes aus ärmsten Vorkommen. Ein extremes Beispiel hierfür bietet das Plutonium, das anfangs in unwägbaren Submikromengen aus Uran abgetrennt wurde. *Wirtschaftlich* gesehen werden zunächst immer die hochwertigsten Rohstoffe ausgenutzt werden, weil ihre Aufarbeitung am billigsten ist. Erst wenn diese Vorkommen erschöpft sind, wird es sich lohnen, immer ärmere Vorkommen auszubeuten, da dann höhere, kostendeckende Preise erzielt werden können. Entscheidend dafür ist die Konkurrenzsituation zwischen den Energie-Rohstoffen auf dem Markt. *Theoretisch* gesehen wird natürlich die Grenze dann erreicht, wenn der Energiebedarf für die Gewinnung des Brennstoffs, d. h. für Prospektierung, Förderung, Transport und Bearbeitung der Rohstoffe bis zum fertigen Brennstoff, und dessen Transport zum Nutzungsort, zuzüglich dem Energieäquivalent der Gesamtkosten des Kraftwerks, ebenso groß wird wie die damit erzeugbare Nutzenergie. Die Bilanz zwischen Energieaufwand bei der Produktion und Energiegewinn bei der Nutzung un-

ter Berücksichtigung aller Verluste muß positiv bleiben. Für den vorliegenden Zweck interessiert letztlich dieser theoretische Grenzwert des Förderfaktors ( $r_{\text{lim}}$ ), der immer  $< 1$  sein muß und je nach Energieträger und Lagerstätte sehr verschieden sein kann.

Für die Gewinnung von Kohle wird heute im Mittel mit  $r \approx 0.5$ , für Erdöl mit  $r \approx 0.4$  gerechnet. Das Verhältnis  $r_{\text{lim}}/r$  ist daher bei diesen Rohstoffen sicher  $< 2$ . Die Vorräte an Uran-Erzen werden im allgemeinen eingeteilt in drei Preisklassen:  $< 25$ , 25–40 und 40–80 \$/kg U (entsprechend etwa  $< 10$ , 10–15 und 15–30 \$/lb  $\text{U}_3\text{O}_8$ ). Wirtschaftlich tragbar ist heute in Konkurrenz zu den fossilen Brennstoffen nur die erstgenannte Preisklasse. Zukünftig werden es auch die teureren Erze sein, so daß wir hier alle drei Gruppen zusammenfassen. Vorkommen mit höheren Gewinnungskosten werden in Abschnitt 5 behandelt, wobei auch die Abschätzung des Grenzwertes  $r_{\text{lim}}$  von Interesse sein wird.

Bekanntlich kann stets nur ein Teil des Energieinhalts der Energieträger ausgenutzt werden:

$$\text{Nutzenergie} = \eta \times \text{Primärenergie}$$

wobei  $\eta$  der totale Wirkungsgrad (efficiency) ist. Auch der Wirkungsgrad variiert je nach Energieträger und Art ihrer Nutzung. Wird die Verbrennungswärme von Kohle oder Öl ausgenutzt, kann man Wirkungsgrade bis zu 80 % erreichen, für die Erzeugung von elektrischem Strom durch Wasserkraft sogar über 90%. Bei der Umwandlung von Verbrennungswärme in Strom ist  $\eta$  im wesentlichen gegeben durch den thermischen Wirkungsgrad von etwa 35%. Wenn Kernenergie für die Stromerzeugung dient, geht in den Wirkungsgrad zusätzlich der Konversionsfaktor ein. In den derzeitig dominierenden Kernkraftwerken mit Leichtwasser-Reaktoren wird im wesentlichen nur das Uranisotop U-235 (rel. Häufigkeit 0.72 %) ausgenutzt; der totale Wirkungsgrad, bezogen auf das Gesamturan, liegt bei etwa 1 %. Die Entwicklung von Brutreaktoren, mit denen auch die Hauptmenge Uran (U-238, 99.28%) sowie alles Thorium (Th-232, 100 %) nutzbar gemacht werden können, ist daher eine notwendige Voraussetzung für die Zukunft der Kernenergie. In Brutreaktoren ist der Konversionsfaktor

$$K = Q/Q_0 > 1$$

$Q_0$  = Anfangsinventar an Spaltstoff (U-235, Pu-239, U-233) im Reaktor und der Wiederaufbereitungs-Anlage,  
 $Q$  = restliches Spaltstoffinventar nach einem Zyklus, bei dem einmal die Menge  $Q_0$  verbraucht worden ist,

d. h., alles Uran bzw. Thorium kann genutzt werden. Für die Zeit, in der die Hauptmenge der (U, Th)-Erze zum Einsatz kommt, rechnen wir mit einer Ausnutzung des Brutprozesses, so daß der totale Wirkungsgrad wie bei konventionellen Kraftwerken im wesentlichen durch den thermischen Wirkungsgrad gegeben sein wird. (Der Energiebedarf der Wiederaufbereitungs-Anlagen wird  $\eta$  etwas verringern, aber  $\eta_{\text{therm}}$  wird sich mit der Zeit etwas vergrößern lassen.)

Der Wirkungsgrad ist im Laufe der Zeit wesentlich verbessert worden. Als mittleren, globalen Wirkungsgrad

für alle Arten von Energiequellen gibt *Putnam*<sup>[2]</sup> für das Jahr 1900 einen Wert von 0.12, für 1947 den Wert 0.22 an; heute beträgt er nach *Mandel*<sup>[3]</sup> 0.30. Das bedeutet, daß der Verbrauch an Nutzenergie in den letzten 70 Jahren noch 2.5-mal stärker angewachsen ist als die Primärenergie-Produktion.

Für den Vergleich der potentiellen Energiereserven mit dem Energiebedarf werden hier beide Größen in Primärenergie-Einheiten gerechnet, also Veränderungen von  $\eta$  nicht berücksichtigt, da eine Verbesserung des heutigen Mittelwertes von 0.3 – in für unsere Zwecke erheblichem Ausmaß (Faktor 2) – nicht zu erwarten ist. Der thermische Wirkungsgrad kann aus thermodynamischen Gründen nicht wesentlich verbessert werden, und der

Realisierung des Brutprozesses, ziehen also die damit verbundene erhebliche Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Kernenergie bereits in Betracht (*Putnam*<sup>[2]</sup> rechnet für A. D. 2050 mit  $\eta \approx 0.36$ ).

Als Energieeinheit wird im folgenden durchgehend die Megawattstunde benutzt. Da in der Literatur vielfach andere Einheiten vorkommen, sind in Tabelle 1 die entsprechenden Umrechnungsfaktoren zusammengestellt, ebenso für einige andere relevante Umrechnungen.

## 2.2. Schätzungen der Energievorräte

In Tabelle 2 sind die neusten zugänglichen Schätzungen über die Energiereserven zusammengestellt.

Tabelle 2. Schätzungen der globalen potentiellen Vorräte an Energieträgern.  $R_{ass}$  = gesicherter Vorrat; R = potentieller Vorrat; r = Förderfaktor.

Rohstoff	Vorräte			Primärenergie ( $10^{12}$ MWh)	Lit.	Anmerkungen
	Einheit	$R_{ass}$	R			
Erdöl	$10^9$ t	46	850	13	[6]	mit Ölsand u. Ölschiefer; r = ?
		73			[7]	
		82	360		[8,9]	R ohne Ölsand u. Ölschiefer; r = 0.4
			430		[8,9]	R mit Ölsand u. Ölschiefer; r = 0.4
			1200		[10]	davon 600 Ölsand u. Ölschiefer; r = $r_{lim}$
Erdgas	$10^{12}$ m <sup>3</sup>	38	230	3	[7]	R, niedrig geschätzt R, hoch geschätzt
			340		[8,9]	
					[8,9]	
Kohle	$10^9$ t SKE	8600	7600	62	[8,9,11]	r = 0.5
Summe				78		
U-Erze	$10^6$ t U	2.3	5.0	113	[12-14]	< 80 \$/kg U
Th-Erze	$10^6$ t Th	0.5	1.2	35	[12]	< 25 \$/kg Th
		0.5	1.5		[13]	< 25 \$/kg Th
Summe				148		

Anteil der durch Wärmekraftwerke gewonnenen Elektrizität am Energieverbrauch wächst schnell an. Zudem rechnen wir für Uran und Thorium, wie gesagt, mit der

Tabelle 1. Energie-Äquivalente und andere Umrechnungsfaktoren.

Einheit	Äquivalent	Anmerkungen
1 kcal	$\sim 1.162 \cdot 10^{-6}$ MWh	
1 PSh	$7.355 \cdot 10^{-4}$ MWh	
1 B.T.U. (Btu)	$\sim 0.293 \cdot 10^{-6}$ MWh	British Thermal Unit
1 Q	$\sim 0.293 \cdot 10^{12}$ MWh	1 Q = $10^{18}$ B.T.U. [2]
1 t SKE	$\sim 8.134$ MWh	1 kg Steinkohleneinheit = 7000 kcal
1 t Erdölprodukte	$\Delta 11$ MWh	Variabel mit Art des Rohstoffs [4]
$10^3$ m <sup>3</sup> Erdgas	$\Delta 10$ MWh	Variabel mit Art des Rohstoffs [4]
1 t U	$\Delta 2.25 \cdot 10^7$ MWh	200 MeV/U-Atom
1 t Th	$\Delta 2.30 \cdot 10^7$ MWh	200 MeV/Th-Atom
1 t D	$\Delta 6.69 \cdot 10^7$ MWh	5 MeV/D-Atom
1 short ton U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	$\Delta 0.7693$ t U	
1 kg U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	$\Delta 0.8480$ kg U	
1 lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	$\Delta 0.3847$ kg U	
1 short ton ThO <sub>2</sub>	$\Delta 0.7972$ t Th	
1 kg ThO <sub>2</sub>	$\Delta 0.8788$ kg Th	
1 lb ThO <sub>2</sub>	$\Delta 0.3986$ kg Th	
1 lb	$\Delta 0.4536$ kg	
1 short ton	$\Delta 0.9072$ t	
1 U.S. barrel (petrol.)	$\Delta 0.1590$ m <sup>3</sup>	

[2] P. C. Putnam: Energy in the Future. Van Nostrand, New York 1953.

[3] H. Mandel, Atomwirtschaft 15, 220 (1970).

[4] E. Ayres u. C. H. Scarlott: Energy Sources – the Wealth of the World. McGraw-Hill, New York 1952.

Die unterschiedlichen Schätzungen über die Höhe der Erdölreserven finden ihre Erklärung in erster Linie durch verschiedene Annahmen über den Förderfaktor, der bei veränderter Marktsituation höher getrieben werden kann als 0.4. Insbesondere die zukünftige Gewinnung von Öl aus Ölsand und Ölschiefer ist in erster Linie eine Frage der Kostensituation. Im Sinne einer Abschätzung mit  $r_{lim}$  wählen wir – auch beim Erdgas und der Kohle – jeweils die höchsten der zugänglichen Schätzungen für die Umrechnung in Primärenergie.

Die potentiellen Vorräte an Uran und Thorium sind noch ungenügend erforscht und alle Angaben sehr unsicher, besonders beim Thorium. Für eine Reihe von Ländern,

[5] How Many People Have Ever Lived on Earth? Popul. Bull. (Washington, D.C.) 18, Nr. 1 (1952).

[6] Sonderbeilage zum Bulletin 7-1966 der EWG.

[7] Esso-Magazin 1970, Nr. 1.

[8] M. K. Hubbert: Resources and Man. Freeman, San Francisco 1969, Kap. 8.

[9] M. K. Hubbert, Energy Resources for Power Production. IAEA Conference Paper SM-146/1, Aug. 1970.

[10] G. Bischoff, Die Erde 1968, Nr. 2, S. 115.

[11] P. Averitt, U.S. Geol. Survey Bull. 1969, 1275.

[12] World Uranium and Thorium Resources, Paris (ENEA) 1965.

[13] Uranium Resources, Revised Estimates, Paris, Wien (ENEA/IAEA) Dez. 1967.

[14] ENEA/IAEA Joint Working Party Report on U Resources, im Druck; vgl. IAEA Bull. 12, Nr. 3, S. 7 (1970).

darunter China, die zusammen 44% der Erdoberfläche bedecken, fehlen in der Literatur jegliche Daten. Die tatsächlichen Vorräte, besonders der hohen Kostenkategorie, könnten daher vielleicht zwei- bis dreimal größer sein.

### 3. Verbrauch an Energie-Rohstoffen

Der zukünftige Energiebedarf ergibt sich aus der Zunahme der Weltbevölkerung  $P(t)$  und aus der Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs pro Kopf  $\gamma(t)$ .

#### 3.1. Entwicklung der Weltbevölkerung

Das bisherige Anwachsen der Weltbevölkerung ist in Abbildung 1 dargestellt. Man erkennt den gewaltigen Anstieg in den letzten 300 Jahren, oft als Bevölkerungsexplosion bezeichnet, die mit der Entwicklung von Wissenschaft und Technik zusammenfällt. In jeder Woche wächst die Menschheit zur Zeit um 1.4 Millionen, pro Jahr um rund 70 Millionen. Für eine Extrapolation in die

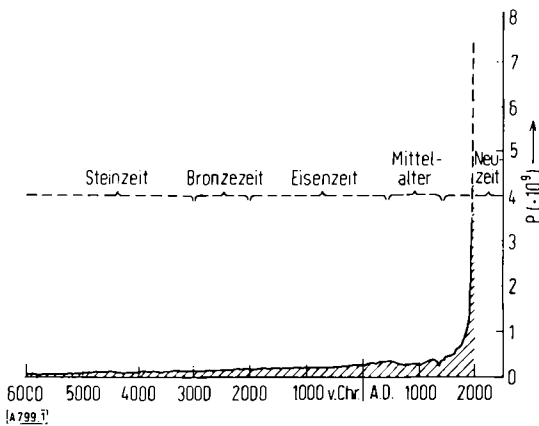


Abb. 1. Anwachsen der Weltbevölkerung  $P$  seit 6000 v. Chr. [5].

Zukunft eignet sich Abbildung 1 nicht; eine nähere Betrachtung der Bevölkerungsdynamik ist erforderlich.

Die Veränderung von  $P$  (Population) mit der Zeit ist gegeben durch

$$\frac{\Delta P/P}{\Delta t} = n - m = \epsilon$$

$n$ : Natalität (Geburtenziffer);  $m$ : Mortalität (Sterbeziffer);  $\epsilon$ : Geburtenüberschußziffer.

$\epsilon$  variiert mit der Zeit, somit gilt

$$dP/P = \epsilon(t)dt$$

oder

$$P_t = P_0 \cdot e^s \tag{4}$$

$$s = \int_{\Delta t} \epsilon(t)dt$$

$s$  = Fläche unter der  $\epsilon$ -Kurve im betrachteten Zeitintervall  $\Delta t$  (dimensionslose Zahl).

Für Zeitintervalle mit  $\epsilon = \text{konst.}$  gilt

$$P_t = P_0 \cdot e^{\epsilon t} \tag{5}$$

Als Beispiel der Bevölkerungsdynamik sind in Abbildung 2 die Geburten- und Sterbeziffern von Schweden, einem heute industrialisierten Land (I-Land) dargestellt. Schon seit etwa 1750 fällt die Sterbeziffer, etwas

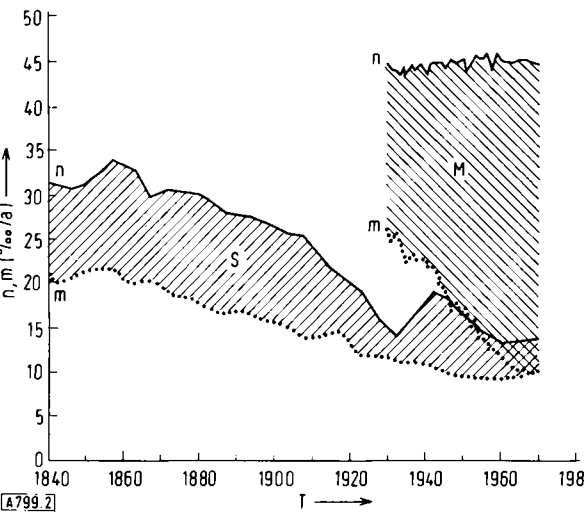


Abb. 2. Natalität  $n$  (—) und Mortalität  $m$  (---) in S=Schweden (1840–1968) und in M=Mexiko (1930–1968) [15].

später nahm auch die Geburtenziffer ab. Ähnliches gilt für andere westeuropäische Länder. Daneben sind die entsprechenden Kurven von Mexiko eingetragen. Der Beginn des Mortalitäts-Rückganges liegt viel später, aber die Sterbeziffern sind heute – dank der importierten „hygienischen Revolution“ und dem niedrigen Durchschnittsalter – auf den gleichen niedrigen Wert wie in Schweden gesunken, während die Geburtenziffern unverändert hoch liegen. Alle typischen Entwicklungsländer (E-Länder) befinden sich seit etwa 50 Jahren in dieser Phase mit der Bevölkerungsexplosion als Folge.

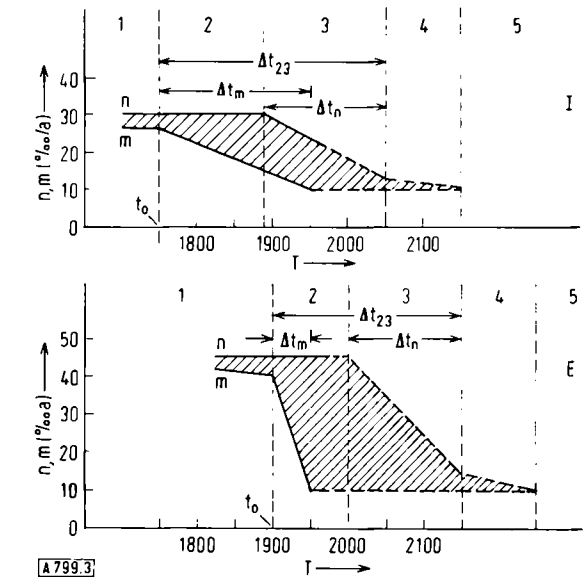


Abb. 3. Die Phasen der Bevölkerungsdynamik (schematisch). I: Typ eines Industrielandes; E: Typ eines Entwicklungslandes; Natalität  $n$ , Mortalität  $m$ ; siehe dazu Tabelle 3.

[15] Population Reference Bureau, Washington D.C.: Population Profile, Juli 1968.

Schematisch ergibt sich – im großen gesehen – ein Verlauf der Bevölkerungsbewegung in fünf Phasen. Diese Phasen sind in Abbildung 3 dargestellt und in Tabelle 3 charakterisiert.

Tabelle 3. Charakterisierung der Phasen der Bevölkerungsdynamik; siehe dazu Abb. 3.

Phase Nr.	Bezeichnung	Natalität n	Mortalität m	Geburtenüberschußziffer E
1	primitiv	hoch	hoch	niedrig
2	expansiv [a]	hoch	stark fallend	stark steigend
3	rekursiv [a]	fallend	fallend oder niedrig	hoch und fallend
4	vorstationär	niedrig u. fallend	niedrig	niedrig und fallend
5	stationär	konst.	konst.	konst.

[a] Die Phasen 2 und 3 werden zusammengefaßt auch als Rationalisierungsphase bezeichnet.

Für eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung ist zunächst folgendes festzustellen: Die Bevölkerungsexplosion muß sehr bald zum Stillstand kommen. Mit dem heutigen  $\epsilon = 2\%/a$  gäbe es in nur 250 Jahren 540 Milliarden Menschen oder global 4 000 Einwohner pro  $km^2$ , in nur 500 Jahren einen Menschen auf jedem  $m^2$  der festen Erdoberfläche. Es ist offenbar, daß die Weltbevölkerung stationär werden muß, auf welchem Wege auch immer. Die  $P(t)$ -Kurve wird also, übereinstimmend mit allen Wachstumskurven in der Natur, als S-förmige logistische Kurve verlaufen:

$$y = a / (b + e^{-cx})$$

Um eine Prognose für die Zukunft zu machen, ist es offenbar notwendig, die I- und E-Gebiete getrennt zu betrachten. Der Beginn der expansiven Phase (Zeitpunkt  $t_0$ ) liegt bei den E-Gebieten um etwa 150 Jahre später als bei den I-Gebieten; der Zeitraum der Mortalitätssenkung ( $\Delta t_m$ ) ist aber von rund 200 auf etwa 50 Jahre verkürzt. Offen ist die Frage, ob und wie stark auch die Rationalisierungsphase  $\Delta t_{23}$  verkürzt wird.

Eine Arbeitshypothese, die quantitative Voraussagen ermöglicht, stammt von Fucks<sup>[16]</sup>. Um die Geburtenüberschuß-Kurven der E-Länder in die Zukunft extrapolieren zu können, nimmt Fucks an, daß die Fläche  $s$  unter der  $\epsilon(t)$ -Kurve der E-Länder gleich der Fläche unter der  $\epsilon(t)$ -Kurve der europäischen Länder sein werde. (In der schematischen Abb. 3 ist dies offensichtlich nicht der Fall, sondern die Fläche zwischen  $n$ - und  $m$ -Kurven ist bei den E-Gebieten wesentlich größer als bei den I-Gebieten; rechnet man mit der Fucks-Hypothese, so müßte die Zeitspanne der Natalitätssenkung  $\Delta t_n$  bei den E-Gebieten sehr viel kürzer sein.) Für die Fläche unter der  $\epsilon$ -Kurve Europas zwischen A. D. 1740 und 2020 erhält Fucks  $s = 1.85$ , nach Gl.(4) somit  $P_1/P_0 = 6.4$ . Multipliziert man die Bevölkerungszahl der übrigen Länder zum Zeitpunkt  $t_0$  mit dem gleichen Faktor, so folgt für die Weltbevölkerung nach dieser „Hypothese gleicher Flächen“ nach Fucks:  $P_{2000} = 6.6 \cdot 10^9$  und  $P_{2050} = 9.5 \cdot 10^9$ .

Die Hypothese von W. Fucks erscheint allzu optimistisch. Es ist offenbar richtig, daß die Existenz der alten Industriestaaten und die effektive Kommunikation zwi-

[16] W. Fucks: Formeln zur Macht. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1965.

schen allen Teilen der Erde die Zeitspanne  $\Delta t_m$  der Mortalitätssenkung sehr verkürzt hat. Es dürfte jedoch unwahrscheinlich sein, daß die expansive und die rekursive Phase, also die Zeitspanne  $\Delta t_{23}$ , in ähnlicher Weise verkürzt wird. Bildung ist schwieriger zu importieren als Hygiene, und der extrem schnell wachsende Geburtenüberschuß in der expansiven Phase der E-Länder hindert durch einen Rückkopplungseffekt sowohl die Industrialisierung als auch die Information und die Erziehung zur Familienplanung.

Wegen dieser Bedenken soll im folgenden eine andere Arbeitshypothese benutzt werden, um die Bevölkerungsentwicklung für die nächsten 130 Jahre abzuschätzen. Dabei wird nicht die  $\epsilon$ -Kurve für Europa als Ausgangspunkt genommen, sondern es werden als I-Gebiete Europa, asiatisches Rußland, Nord-Amerika und Ozeanien zusammengefaßt. Da Nord-Amerika, Australien und Neuseeland hauptsächlich durch europäische Emigranten besiedelt wurden, muß man Europa und diese Länder zusammen betrachten, um die Entwicklung der I-Gebiete zu übersehen. Als E-Gebiet zählen somit Asien ohne UdSSR, Afrika und Latein-Amerika.

Tabelle 4. Population (P) und mittlerer Geburtenüberschuß ( $\epsilon$ ) von 1650 bis 1970 in der Welt und Aufteilung nach E-Gebieten (Asien, Afrika, Latein-Amerika) und I-Gebieten (Europa, asiatisches Rußland, Nord-Amerika, Ozeanien); siehe dazu Abb. 4.

A.D.	Welt		E-Gebiete		I-Gebiete		Anm. / Lit.
	P [a] ( $\cdot 10^6$ )	$\bar{\epsilon}$ (%/a)	P [a] ( $\cdot 10^6$ )	$\bar{\epsilon}$ (%/a)	P [a] ( $\cdot 10^6$ )	$\bar{\epsilon}$ (%/a)	
1650	499	0.296	402	0.296	106	0.248	[b]
1700	(580)	0.391	(460)	0.407	(120)	0.405	
1750	705	0.481	564	0.471	147	0.625	[b]
1800	897	0.421	714	0.234	201	0.715	[b]
1820	(980)	0.481	(748)	0.336	(232)	0.848	
1840	(1075)	0.548	(800)	0.389	(275)	0.985	
1860	(1200)	0.663	(865)	0.503	(335)	1.05	
1880	(1370)	0.737	(957)	0.604	(413)	1.05	
1900	1588	0.741	1080	0.629	510	0.934	[b]
1910	(1710)	0.843	(1150)	0.806	(560)	1.01	
1920	1860	1.07	1247	1.10	613	0.906	[18]
1930	2070	1.03	1392	1.17	678	0.741	[18,19]
1940	2295	0.925	1565	1.20	730	0.741	[18,19]
1950	2517	1.77	1766	1.96	751	1.28	[18,19]
1960	3005	1.86	2151	2.15	854	1.08	[18,19]
1970	3620		2660		960		[c]

[a] Zahlen in Klammern: interpoliert unter Benutzung der zugänglichen Zahlen für 1850: 1136 (Welt), 829 (E), 302 (I); vgl. Abb. 5.

[b] Mittelwerte von [2,20–22].

[c] Zahlen für 1969 aus [19] um  $69 \cdot 10^6$  (Welt),  $50 \cdot 10^6$  (E) und  $19 \cdot 10^6$  (I) erhöht.

Einige Länder in den hier als E-Gebiete bezeichneten Teilen der Welt, z. B. Japan, gehören nicht oder heute nicht mehr zu den Entwicklungsländern. Genaugenommen wären aber auch einige Länder, die heute zu den I-Gebieten zählen, vor nicht langer Zeit noch zu den E-Gebieten zu rechnen gewesen. Um das demographisch-statistische Material in vorliegender Form benutzen zu können, werden diese Details nicht berücksich-

[17] Population Reference Bureau, Washington D.C.: Population Data Sheets, 1964, 1966, 1969.

[18] Statistical Yearbooks 1962 und 1969. United Nations, New York 1963 bzw. 1970.

[19] Demographic Yearbook 1967. United Nations, New York 1968.

[20] A. M. Carr-Saunders: World Population (Past Growth and Present Trend). Clarendon Press, Oxford 1936.

[21] W. F. Willcox: Studies in American Demography. Cornell University Press, Ithaca, N.Y. 1940.

[22] A. Landry: Traité de Démographie. Payot, Paris 1949.

tigt, da die Ergebnisse dadurch nicht wesentlich beeinflußt werden. Die dementsprechende Aufteilung der globalen Bevölkerungszahlen von 1650–1970 gibt Tabelle 4, ebenso die resultierenden mittleren Geburtenüberschüßziffern, deren zeitliche Änderungen in Abbildung 4 dargestellt sind.

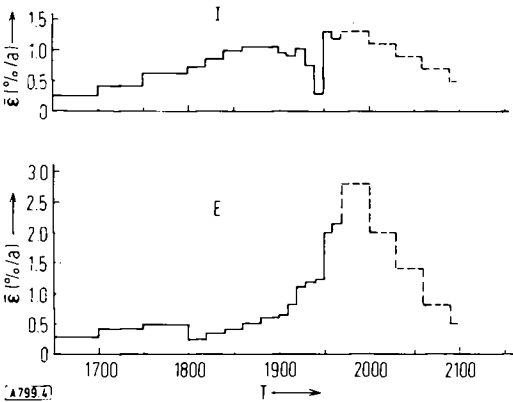


Abb. 4. Mittlere Geburtenüberschüßziffern  $\bar{\epsilon}=n-m$  für I- und E-Gebiete von 1650 bis 1970 und hypothetische Extrapolationen (vgl. Text; siehe auch Tabelle 4).

Wie man erkennt, hat – anders als bei *Fucks* – die  $\bar{\epsilon}(I)$ -Kurve ihr Maximum bis heute nicht eindeutig überschritten, so daß auch der entsprechende  $s(I)$ -Wert nicht ohne Willkür erhalten werden kann. Für die Extrapolation in die Zukunft soll daher folgender Ansatz gemacht werden (vgl. Tabelle 5):

Tabelle 5. Hypothetische Werte für  $\epsilon$  zwischen 1970 und 2120 für I- und E-Gebiete sowie resultierende Bevölkerungszahlen  $P$  (siehe auch Abb. 5).

A.D.	I-Gebiete		E-Gebiete		Welt $P$ ( $\cdot 10^9$ )	Anm.
	$\epsilon$ (%/a)	$P$ ( $\cdot 10^9$ )	$\epsilon$ (%/a)	$P$ ( $\cdot 10^9$ )		
1970	1.3	0.960	2.8	2.660	3.620	vgl. Tab. 4 nach [19] berechnet mit den angenommenen $\epsilon$ -Werten, vgl. Text
2000	1.1	1.4	2.0	6.1	7.5	
2030	0.9	2.0	1.4	11.0	13.0	
2060	0.7	2.6	0.8	16.7	19.3	
2090	0.5	3.2	0.5	21.3	24.5	
2120		3.7		24.7	28.4	

1. Für die Zeit bis zum Jahre 2000 werden die neuesten Schätzungen des demographischen Zentrums der Vereinten Nationen<sup>[17]</sup> benutzt („high estimate“).

2. Für die Zeit nach dem Jahre 2000 soll die Annahme gelten, daß die Geburtenüberschüßkurven sowohl der I- als auch der E-Gebiete stark fallen, und zwar von ihrem Maximum gegen Ende dieses Jahrhunderts *in der gleichen Zeit* von etwa 100 Jahren auf  $\bar{\epsilon} \approx 0.5\%$  (vgl. Abb. 4, in der dieser Abfall der Einfachheit halber treppenförmig in äquidistanten Stufen angesetzt ist).

Im Hinblick auf die angeführten Bedenken gegen die „Hypothese gleicher Flächen“ erscheint uns diese „Hypothese gleicher Zeiten“ (vom Maximum der  $\bar{\epsilon}(t)$ -Kurven bis zum Beginn der vorstationären vierten Phase) plausibler. Der resultierende Abfall der  $\bar{\epsilon}(E)$ -Kurve nach Anno 2000 ist sehr steil, aber doch wesentlich weniger stark – und damit realistischer –, als es bei Annahme gleicher Flächen unter beiden  $\bar{\epsilon}$ -Kurven erfor-

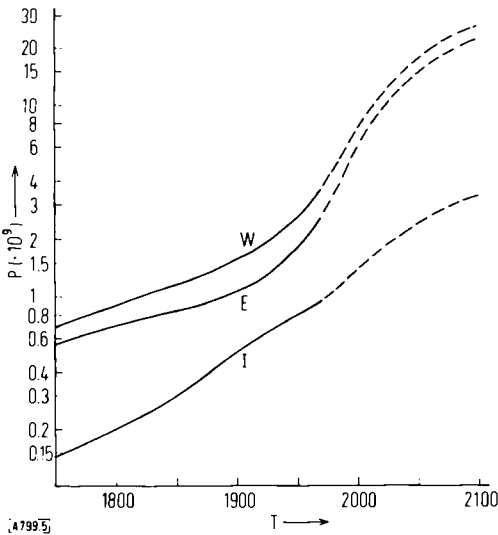


Abb. 5. Zunahme der Bevölkerung  $P$  für Welt (W) sowie I- und E-Gebiete von 1750 bis 1970 und hypothetische Extrapolationen (vgl. Text).

derlich wäre. Als rationale, wenn auch nur qualitative Basis der „Hypothese gleicher Zeiten“ wäre die immer stärkere weltweite Kommunikation anzuführen, die zwangsläufig zu einem Ausgleich der Unterschiede führen muß. Weiterhin: Die zur Verfügung stehende Zeit für diese Angleichung kann wahrscheinlich nicht viel weniger, aber auch nicht mehr als ein Jahrhundert betragen. Als Weltbevölkerung resultieren für die Mitte des nächsten Jahrhunderts 18 Milliarden und für sein Ende 26 Milliarden Menschen (Tabelle 5 und Abbildung 5). Diese Zahlen sind wahrscheinlich eher zu niedrig als zu hoch. Die enorme Vermehrung der Menschheit auf die doppelte Zahl in den nächsten 30 Jahren bedeutet, daß auch nach dem Jahre 2000 noch mit einem schnellen Wachstum gerechnet werden muß, denn die ab A. D. 2000 sich im fruchtbaren Alter befindenden Menschen werden bereits in den 30 Jahren bis zur Jahrhundertwende in mit Sicherheit schnell wachsender Anzahl geboren. Zudem steigt bei schnell wachsenden Populationen auch die relative Anzahl der Frauen im gebärfähigen Alter. Zur Zeit beträgt z. B. der Prozentsatz der Bevölkerung unter 15 Jahren in Europa 25%, in Asien dagegen 35%, in Afrika und Latein-Amerika sogar 43%. Betrachtet man frühere Schätzungen über die Be-

Tabelle 6. Schätzungen der Bevölkerungsentwicklung (in Milliarden).

Literatur	A.D. 1950	A.D. 2000	A.D. 2050
<i>Pearl und Reed</i> 1924 [23]	1.8	1.9	2.0
<i>Pearl und Gould</i> 1936 [24]	2.1	2.5	2.6
<i>Carr-Saunders</i> 1936 [20]	2.4	3.7	6.0
<i>Willcox</i> 1940 [21]	2.4	4.0	8.0
<i>Putnam</i> 1953 [2]	-	3.7 $\pm$ 0.5	6.3
U. N. 1957 [25]	-	5.9 $\pm$ 1.0	-
U. N. 1964 [25]	-	6.4 $\pm$ 1.0	-
<i>Fucks</i> 1965 [16]	-	6.6	9.5
U. N. 1969 [18]	-	6.5 $\pm$ 1.0	-
hier benutzt (Abb. 5)	2.5	7.5	18
de facto	2.5	?	?

[23] R. Pearl u. L. J. Reed in R. Pearl: Studies in Human Biology. Williams and Wilkins, Baltimore 1924.

[24] R. Pearl u. S. A. Gould, Human Biol. 8, 406 (1936).

[25] World Population Projections 1965–2000. Popul. Bull. (Washington, D. C.) 21, Nr. 4 (1965).

völkerungsentwicklung (Tabelle 6), so stellt man fest, daß die Entwicklung stets mehr oder weniger unterschätzt worden ist.

### 3.2. Entwicklung des Energieverbrauchs pro Kopf

Zwischen dem jährlichen Energieverbrauch pro Kopf ( $\gamma$ ) und dem Bruttosozialprodukt besteht ein enger Zusammenhang, wie Abbildung 6 zeigt. Man erkennt den großen Unterschied zwischen den I- und E-Ländern. In den USA verbrauchte im Jahre 1961 jeder Mensch an kommerzieller Energie im Durchschnitt 70 MWh, das ist 100- bis 200mal mehr als in den Gebieten mit geringstem per-capita-Verbrauch (0.4 bis 0.8 MWh). Der Nachholbedarf der E-Länder ist also sehr groß. Im Weltmittel werden heute rund 14 MWh pro Kopf und Jahr verbraucht<sup>[18]</sup>.

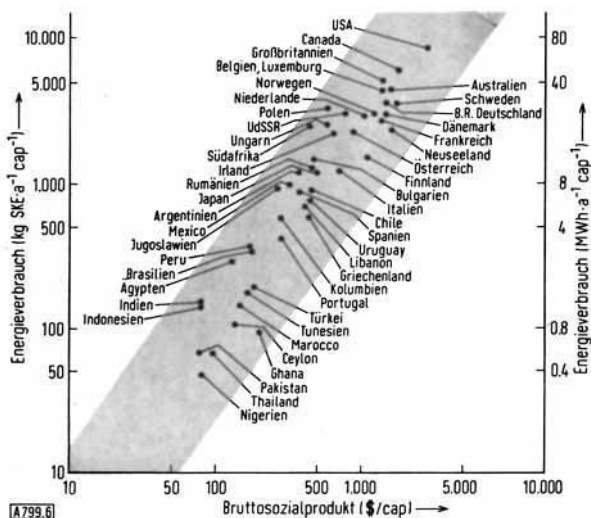


Abb. 6. Verbrauch an kommerzieller Energie pro Kopf, verglichen mit dem Bruttosozialprodukt im Jahre 1961 (nach [26], ergänzt durch rechte Ordinate in abgerundeten Werten).

Die Zuwachsrate  $\delta = \Delta\gamma/\Delta t$  der globalen Energieproduktion von 1947–1968 betrug 5.1% pro Jahr, während der Energieverbrauch pro Kopf zwischen 1953 und 1968 um 3.0% im Jahr zunahm<sup>[18]</sup>.

Für die Zukunft ist vorauszusehen, daß ähnliche Zuwachsraten nur noch relativ kurze Zeit beibehalten werden können. Mit dem jetzigen  $\delta = 3\%/a$  ergäbe sich (bei einem Bevölkerungszuwachs von 2%/a) in nur 100 Jahren ein Verbrauch von  $10^{13}$  MWh pro Jahr, in 150 Jahren über  $10^{14}$  MWh/a. Die gesamten in Tabelle 2 aufgeführten Energiereserven würden dann gerade einen Jahresbedarf decken. Es ist offensichtlich, daß die Zuwachsrate für den Energieverbrauch pro Kopf zukünftig verringert werden muß, ebenso wie oben für das Wachstum der Bevölkerung gezeigt. Als Arbeitshypothese für die Abschätzung dieser zwangsläufigen Entwicklung soll hier angenommen werden, daß auch die Zuwachsrate  $\delta$  – wie die Zuwachsrate  $\epsilon$  der Bevölkerung nach der „Hypothese gleicher Zeiten“ – im Laufe des nächsten Jahrhunderts sukzessive bis unter 1%/a absinkt und damit die vorstationäre Phase er-

reicht wird. Für die restlichen 30 Jahre des 20. Jahrhunderts dürften die  $\delta$ -Werte allerdings noch ansteigen. Die infolge des großen Nachholbedarfs hohen Zuwachsraten der E-Länder (s. o.) müssen die globale Zuwachsrate stark beeinflussen, da diese Länder einen hohen Anteil an der Weltbevölkerung ausmachen, nämlich 72% im Jahre 1963 und wahrscheinlich über 80% im Jahre 2000.

Die in Tabelle 7 angeführten  $\delta$ -Werte stellen eine plausible Version dieser Arbeitshypothese dar. Für A. D. 2000 ergibt sich ein globaler Energieverbrauch pro Kopf und Jahr von 45 MWh. Frühere Schätzungen für das Jahr 2000 wurden bisher schon nach oben kor-

Tabelle 7. Hypothetische Werte für die mittleren globalen Zuwachsraten des Energieverbrauchs pro Kopf und Jahr,  $\delta$  von 1970 bis 2120 und resultierender Energieverbrauch  $\gamma$ ,  $c$  und  $C_T$ .

A. D.	$\delta$ (%/a)	$\gamma$ (MWh·cap <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	$c$ (10 <sup>9</sup> MWh/a)	$C_T$ (10 <sup>12</sup> MWh)
1970		14	50	4.3
2000	3.9	45	340	10
2030	2.7	100	1300	35
2060	1.8	170	3300	100
2090	1.3	240	5900	240
2120	0.7	300	8500	460

rigiert: Searl<sup>[27]</sup> rechnete mit 27, Bhabha<sup>[28]</sup> mit 35, Mandel<sup>[3]</sup> mit 43 MWh·cap<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>. Für die USA rechnet man im Jahre 2000 mit 175 MWh pro Kopf und Jahr. Die angenommenen  $\delta$ -Werte nach der Jahrhundertwende werden dann schrittweise niedriger und bedeuten eine ganz erhebliche Verringerung der Zuwachsrate des Energieverbrauchs und damit der Industrialisierung. Die resultierenden  $\gamma$ -Werte sind in Abbildung 7 dargestellt.

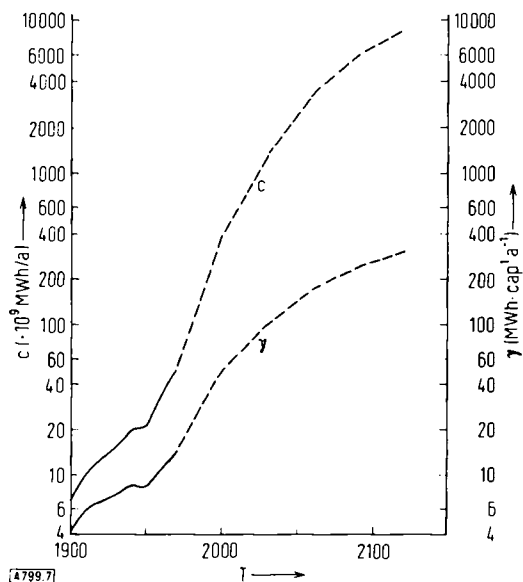


Abb. 7. Energieverbrauch pro Kopf und Jahr,  $\gamma$ , und globaler jährlicher Energieverbrauch,  $c$ , von 1900 bis 1970, mit Extrapolationen (vgl. Text).

Aus  $P(t)$  nach Abbildung 5 und  $\gamma(t)$  nach Abbildung 7 ergibt sich schließlich das Anwachsen des globalen jährlichen Energieverbrauchs  $c(t)$ , wie in Tabelle 7 und Abbildung 7 angegeben.

[27] M. F. Searl: Fossile Fuels in the Future. TID-8209, Okt. 1960.  
[28] H. J. Bhabha u. M. Dayal, 3. Internat. Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Genf, 28/P/741, 1964.

#### 4. Vergleich von Energievorräten und Energiebedarf

In Abbildung 8 sind zunächst die Vorräte an Nutzenergie der verschiedenen Energieträger nach Tabelle 2 aufgetragen. In dieses Diagramm ist der kumulierte Energieverbrauch  $C_T$  als Funktion der Zeit eingezeichnet, wie er sich aus  $c(t)$  nach Gl. (2) ergibt. Zur Normierung der

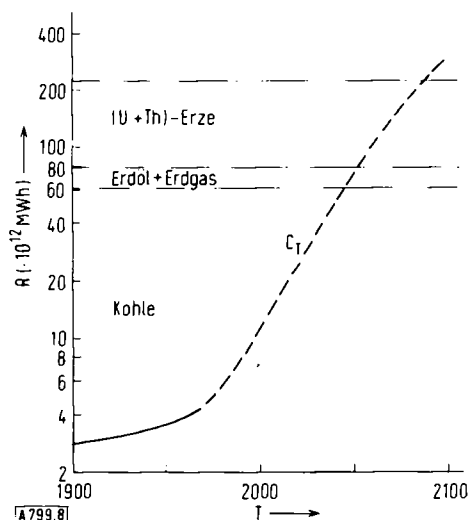


Abb. 8. Potentielle Energievorräte  $R$  und kumulierter Energieverbrauch  $C_T$  (Daten über globalen Energieverbrauch: 1900–1950: [2]; 1950–1968: [18]; ab 1970 nach Tabelle 7).

Kurve wurde der Wert von  $3,8 \cdot 10^{12}$  MWh gewählt, entsprechend der Energiemenge, die nach Mandel<sup>[3]</sup> bis zum Jahre 1960 insgesamt verbraucht worden ist. (Putnam<sup>[2]</sup> hat einen Wert von 6–9 Q abgeschätzt, das sind  $[1,8\text{--}2,6] \cdot 10^{12}$  MWh für die Zeit von A.D. 0 bis 1860 und weitere  $4 Q = 1,2 \cdot 10^{12}$  MWh bis 1950. Beim Verbrauch bis 1860 handelt es sich allerdings vor allem um Holz und landwirtschaftliche Abfälle, also regenerative Energiequellen.)

Der Vergleich von Vorräten und Bedarf auf der Basis von Abbildung 8 führt zu folgenden Schlußfolgerungen:

Die Menschheit wird in den nächsten 30 Jahren mehr Energie verbrauchen als in der ganzen bisherigen Menschheitsgeschichte. Die Vorräte an fossilen Brennstoffen reichen – falls sie allein genutzt würden – bis 2050, d. h. für etwa 80 Jahre.

Die heute vermuteten potentiellen Reserven an Uran- und Thorium-Erzen verlängern diese Zeitspanne bis etwa 2090, d. h. nur um etwa weitere 40 Jahre. Für die gesuchte Zeitspanne  $\Delta T$  resultiert also ein Zeitraum von rund 120 Jahren.

Damit ist die in Abschnitt 1 gestellte Frage beantwortet. Es liegt nahe zu fragen: Wie groß ist die Fehlergrenze dieser Abschätzung?

Zunächst ist festzustellen, daß jede Abschätzung von  $\Delta T$  nur Sinn haben kann auf der Basis einer einigermaßen stetigen Weiterentwicklung der Menschheit. Globale Katastrophen mußten hier also außer Betracht bleiben, auch wenn man sie für wahrscheinlich hält. Aber auch ohne Hunger und Nuklearkrieg müssen alle Voraussagen

für die Zukunft – hier also die vorliegenden Schätzungen über die Rohstoff-Vorräte und unsere Hypothesen über  $P(t)$  und  $\gamma(t)$  – naturgemäß mit großen Unsicherheitsfaktoren behaftet sein; es kann sich immer nur um einen „informed guess“ handeln. Das Ergebnis in Abbildung 8 zeigt jedoch, daß die gestellte Frage nach der Zeitdauer bis zum Verbrauch der angereicherten Vorräte trotz dieser Unsicherheiten wahrscheinlich genauer als größenordnungsmäßig beantwortet werden kann. Wegen der Steilheit der Kurve  $C(t)$  ändert nämlich eine Fehleinschätzung der Vorräte die Zeitspanne  $\Delta T$  nur relativ wenig. Angenommen, es könnte mit maximalem Förderfaktor schließlich doppelt so viel an Energieträgern gewonnen werden, also  $450 \cdot 10^{12}$  MWh Primärenergie, so würde  $\Delta T$  dadurch nur um 40 Jahre, von 120 auf 160 Jahre, verlängert werden. Nur falls die tatsächlichen Vorräte die hier benutzten Werte für die potentiellen Reserven um eine Größenordnung übersteigen sollten, würde auch  $\Delta T$  sich wesentlich ändern.

Weiterhin ist zu betonen, daß bei den Abschätzungen aller drei Faktoren optimistisch gerechnet wurde, im Gegensatz zum normalen physikalischen Verfahren bei Fehlerfortpflanzung. Bei den Vorräten wurden jeweils die höchsten Schätzungen der potentiellen Vorräte angesetzt, und die wahrscheinlich zu erwartende Korrektur der Werte für die Reserven an Uran und Thorium nach oben ändert das Bild nicht wesentlich. Bei  $P(t)$  wurde die Zeitdauer für die Rationalisierungsphase bei den E-Ländern wahrscheinlich optimistisch beurteilt. Die angenommene Verringerung der Geburtenüberschüßziffern nach der nächsten Jahrhundertwende setzen intensive Aufklärung und rigorose Maßnahmen voraus, und zwar in einem Umfang, der heute kaum realisierbar erscheint angesichts aller entgegenwirkenden Faktoren religiöser, machtpolitischer und wirtschaftlicher Natur sowie der weltweiten Ignorierung des Problems infolge mangelnder Information. Nur falls der Rationalisierungsprozeß in den nächsten Jahrzehnten gelingen sollte, kann man für die zweite Hälfte des neuen Jahrhunderts mit dem Erreichen der vorstationären Phase rechnen, so daß in diesem Zeitraum nicht nochmals eine Verdoppelung der Weltbevölkerung eintritt.

Auch die Prognose über den Energieverbrauch pro Kopf dürfte ausgesprochen konservativ sein. Sie setzt eine ganz erhebliche Verlangsamung der Zuwachsrates des Energieverbrauchs pro Kopf und damit des Lebensstandards ab A.D. 2000 voraus, während zur Zeit ein immer schneller gesteigerter Konsumtions- und Produktionsprozeß vorherrscht, sowohl im Marktwirtschafts- als auch im Planwirtschafts-System. Im übrigen ändert ein Faktor 2 oder 3 beim Verbrauch an der Zeitspanne  $\Delta T$  nur relativ wenig, ebenso wie bei den Vorräten.

Die Größenordnung von  $\Delta T$  bleibt somit, falls die verwendeten Werte für die Energievorräte und den Energieverbrauch sich nicht als größenordnungsmäßig falsch erweisen, die von 100 Jahren. Die Nichtbeachtung der gewaltigen Zunahme des Energiebedarfs infolge der Bevölkerungsexplosion und infolge des zur Zeit noch schnelleren Anwachsens des Energiebedarfs pro Kopf ist



offenbar der Grund, warum vielfach für  $\Delta T$  Zeiträume von Tausenden oder Zehntausenden von Jahren genannt werden, die Energiesituation also unrealistisch beurteilt wird.

5. Energiebedarf und Energiereserven im stationären Zustand

Wie oben dargelegt, muß sich die derzeitige explosive Entwicklung der Weltbevölkerung und des globalen Energieverbrauchs nach der Jahrhundertwende drastisch ändern und im Laufe des 21. Jahrhunderts die vorstationäre Phase erreichen. Die Schätzungen über die Weltbevölkerung im stationären Zustand liegen alle nahe beieinander. So rechnet z. B. *Watson-Watt*<sup>[29]</sup> damit, daß 27 Milliarden, *Clark*<sup>[30]</sup>, daß 45 Milliarden erreicht werden können. Eine Extrapolation der  $P(t)$ -Kurve in Abbildung 5 deutet auf 30 bis 40 Milliarden.

Für die Abschätzung des Energiebedarfes pro Kopf der stationären Weltbevölkerung ist zu bedenken, daß zu diesem Zeitpunkt sämtliche angereicherten Rohstofflager der meisten Metalle erschöpft sein werden. In der

Tabelle 8. Abschätzungen über die Ausnutzung der Sonneneinstrahlung.

		Lit.
Leistung im Jahresmittel global	0.24 kW/m <sup>2</sup> 3.4 · 10 <sup>10</sup> MW/Erdkugel-querschnitt	[38] [38]
Energiezufuhr global	2.7 · 10 <sup>14</sup> MWh/a	
Potentielle Nutzenergie:		
Sonneneinstrahlung direkt (v. a. für Raumheizung)	127 · 10 <sup>9</sup> MWh/a	[39]
Hydro-Elektrizität (2.9 · 10 <sup>6</sup> MW)	25 · 10 <sup>9</sup> MWh/a	[39]
Holz u. ä.	41 · 10 <sup>9</sup> MWh/a	[39]
Gezeiten (6.4 · 10 <sup>4</sup> MW)	0.6 · 10 <sup>9</sup> MWh/a	[8,9]
geothermisch (6 · 10 <sup>4</sup> MW)	0.5 · 10 <sup>9</sup> MWh/a	[8,9]
Summe	~ 200 · 10 <sup>9</sup> MWh/a	
Nach anderer Schätzung	30 · 10 <sup>9</sup> MWh/a	[2]

Die regenerativen Energiequellen aufgrund der Sonneneinstrahlung können nach vorliegenden Schätzungen (vgl. Tabelle 8) einige 10<sup>11</sup> MWh/a Nutzenergie liefern, was einigen Prozenten des Bedarfs im stationären Zustand entspräche.

Als Elemente der Restkristallisation finden sich Uran und Thorium in ziemlich homogener Verteilung in Graniten und Pegmatiten in einer Konzentration von 2.7 ppm (U) und 9.6 ppm (Th)<sup>[31]</sup>, also rund 12 g U + Th je Tonne Gestein. Als Rechenbeispiel ergibt sich in einer 1 km dicken Schicht der festen Erdkruste eine Menge von

Tabelle 9. Vorräte an „Ur-Rohstoffen“ für die Energiegewinnung.

Energiequelle	Leistung/m <sup>2</sup> bzw. Konzentration	Gesamt-vorrat (t)	entsprechender Energievorrat (MWh)	maximaler Förderfaktor (Rechenbeispiel)	potentieller Vorrat an Nutzenergie (MWh)
Sonneneinstrahlung	0.24 kW/m <sup>2</sup>	-	2.7 · 10 <sup>14</sup> p.a.		10 <sup>11</sup> p.a.
U + Th in 1 km der festen Erdkruste	12 ppm	4 · 10 <sup>12</sup>	1 · 10 <sup>20</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>15</sup>
U im Meer	3 ppb	4 · 10 <sup>9</sup>	1 · 10 <sup>17</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>13</sup>
D im Meer	156 ppm	1.9 · 10 <sup>14</sup>	1.3 · 10 <sup>22</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>18</sup>

Zeitskala der menschlichen Evolution und zukünftigen Existenzmöglichkeit ist der Verbrauch aller in Erzen angereicherten Rohstoffe durch die Menschen nur eine kurze Episode. Danach muß man auf die sehr großen Vorkommen im Meer und im Urgestein zurückgreifen, in denen die Metalle stark verdünnt vorliegen. Ebenso wird man für die Wasserversorgung weitgehend auf entsalztes Meerwasser angewiesen sein, für die Ernährung auf maximale Nutzung des Bodens und der Meere. Der Energiebedarf muß daher noch weiter ansteigen. Nach Tabelle 7 wären in etwa 100 Jahren 200, in etwa 150 Jahren 300 MWh · cap<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> erreicht. Mit  $\gamma_{\text{stat}} = 400$  MWh · cap<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> und mit  $P_{\text{stat}} = 35 \cdot 10^9$  resultiert ein Energiebedarf von größenordnungsmäßig

$c_{\text{stat}} = 10^{13}$  MWh/a

Zum Vergleich: die globale Energiezufuhr durch die Sonnenstrahlung beträgt 27 · 10<sup>13</sup> MWh/a.

Zur Deckung des stationären Energiebedarfs verbleiben der Menschheit nach Verbrauch der fossilen und der spaltbaren Rohstoffe in ihren angereicherten Vorkommen die schon eingangs genannten „Ur-Rohstoffe“.

[29] R. Watson-Watt, zit. nach Internat. Sci. Technol. 1963, Nr. 23, S. 98.

[30] C. Clark in: Man and His Future. Ciba Found. Sympos., Churchill, London 1963.

4.3 · 10<sup>12</sup> t (U + Th). Förderbar (für <1000 \$/kg U) sind davon nach *Mandel*<sup>[32]</sup> etwa 30 · 10<sup>6</sup> t U und 40 · 10<sup>6</sup> t Th, zusammen rund 10<sup>8</sup> t U + Th. Dies entspräche im Rechenbeispiel einem Förderfaktor von 10<sup>-5</sup>. Als Primärenergie-Vorrat resultieren größenordnungsmäßig 10<sup>15</sup> MWh (Tabelle 9).

Die Uran-Konzentration im Meerwasser beträgt nach den Messungen von *Wilson*<sup>[33]</sup> 3.3 µg/l (3.3 ppb), unabhängig von der Tiefe. Örtliche Variationen sind bekannt, und die Gesamtzahl der Messungen ist gering, doch dürfte die Größenordnung 1–10 ppb heute als beste Annahme für die mittlere Konzentration gelten. Mit einem Volumen der Weltmeere von 1.2 · 10<sup>18</sup> m<sup>3</sup><sup>[34]</sup> folgt daraus der in Tabelle 9 angegebene Gesamt-vorrat an Uran

[31] S. R. Taylor, Geochim. Cosmochim. Acta 28, 1273 (1964).  
[32] H. Mandel, persönliche Mitteilung, Juli 1970.  
[33] J. B. Wilson, Anal. Chim. Acta 23, 505 (1960).  
[34] F. F. Koczy in: Nuclear Geology. Chapman and Hall, London 1954.  
[35] D. Gupta in H. Grumm et al.: KFK 466 (Kernforschungszentrum Karlsruhe), Sept. 1966.  
[36] R. Spence et al., Nature 203, 1110 (1964).  
[37] H. J. M. Bowen: Trace Elements in Biochemistry. Academic Press, London 1966.  
[38] F. Daniels: Direct Use of the Sun's Energy. Yale University Press, New Haven 1964.  
[39] H. Brown, J. Bonner u. J. Weiz: The Next Hundred Years. Weidenfeld und Nicolson, London 1957.

im Weltmeer. Der Thorium-Gehalt ist dagegen vernachlässigbar. Nach Gupta<sup>[35]</sup> kann man hoffen, daß sich auch das Uran aus dem Meer relativ wirtschaftlich (<200 \$/kg) gewinnen läßt, etwa auf dem von Spence et al.<sup>[36]</sup> vorgeschlagenen Wege. Mit den als Rechenbeispiel angenommenen Werten für den Förderfaktor in Tabelle 9 resultieren dann größenordnungsmäßig  $10^{13}$  MWh Primärenergie.

Schließlich folgt aus der sehr genau bekannten Konzentration von Deuterium im Meerwasser von 156 ppm<sup>[37]</sup> der Gesamtgehalt und mit dem angegebenen sehr hypothetischen Wert für  $r$  ein Wert von  $10^{18}$  MWh für die potentielle Primärenergie (Tabelle 9).

Aus den Daten von Tabelle 9 folgt, daß die größte Reserve für den Langzeitbedarf der Menschheit im Uran und Thorium des Urgesteins und vor allem im Deuterium des Meerwassers liegt. Verglichen mit dem antizipierten Bedarf im stationären Zustand von  $10^{13}$  MWh/a, könnten diese Reserven in der Tat hinreichend für Jahrtausende sein. Dabei sind allerdings einige wesentliche Einschränkungen zu machen:

Erstens ist es fraglich, ob die angenommenen Förderfaktoren realistische Werte darstellen. Beim Deuterium ist zudem der totale Wirkungsgrad noch nicht einmal größenordnungsmäßig abzuschätzen, da die Frage der technischen Realisierung von Fusionsreaktoren noch offen ist.

Zweitens ist zu bedenken, daß der Abbau des Urgesteins und die Deuterium-Extraktion aus dem Meer im erforderlichen Ausmaß eine noch unübersehbare Veränderung der ökologischen Systeme unserer Umwelt bedeuten müssen. Hinzu kommt das Abfallproblem. Es erscheint möglich, daß die Erwärmung durch die aus thermodynamischen Gründen als Wärme anfallenden rund  $\frac{2}{3}$  der  $10^{13}$  MWh/a oder Umwelteffekte durch die Spaltprodukte ( $10^5$  t/a bei  $10^{13}$  MWh/a) der Verwendung der Kernenergie bei einem wesentlich niedrigeren Wert von  $c_{\text{stat}}$  eine Grenze setzen.

Drittens und vor allem muß der stationäre Zustand, gekennzeichnet durch  $P \cdot \gamma = \text{konst.}$ , eingestellt bleiben. Würden  $P$  oder  $\gamma$  auch nur geringfügig zunehmen, könnten selbst diese enormen Reserven an Uran, Thorium und Deuterium den Energiebedarf der Menschheit nicht langfristig decken.

Die Einstellung des stationären Zustands mit konstanter Population und konstantem Lebensstandard wird somit auch von der Energiesituation her gesehen unausweichlich sein. Ein höherer Energiebedarf infolge erhöhter Schwierigkeiten bei der Gewinnung der Rohstoffe oder zwecks Erhöhung des Lebensstandards wird nur möglich, falls er durch eine Verringerung der Weltbevölkerung kompensiert wird.

## 6. Schlußfolgerungen

Der Energiebedarf in 30 Jahren wird etwa das Siebenfache, in 80 Jahren etwa das Fünzigfache des heutigen betragen. Die potentiellen Vorräte an fossilen Energieträgern reichen – falls allein genutzt – für etwa 80 Jahre, die potentiellen Vorräte an angereichertem Uran und

Thorium ungefähr für weitere 40–80 Jahre. Auch optimistische Annahmen über die potentiellen Vorräte und konservative Abschätzungen des Energieverbrauchs ändern nichts an der Größenordnung von 100 Jahren für die Zeitspanne bis zum Verbrauch der Vorräte an angereicherten Energie-Rohstoffen.

Die Menschheit geht offenbar schnell einem stationären Zustand entgegen, gekennzeichnet dadurch, daß die Population durch den Zugang an Nahrungsmitteln und andere Faktoren und der Lebensstandard durch die verfügbare Energie begrenzt werden. Der Energiebedarf in diesem stationären Zustand könnte in der Größenordnung von  $10^{13}$  MWh pro Jahr liegen; für seine langfristige Deckung müssen die Ur-Rohstoffe herangezogen werden: die Sonnenenergie, die Spaltstoffe aus dem Meer und dem magmatischen Gestein, und vor allem das Deuterium aus dem Meer.

Die diesen Schlußfolgerungen zugrunde liegenden Annahmen über die potentiellen Energiereserven, die Bevölkerungsentwicklung und die Entwicklung des Energieverbrauchs pro Kopf sind naturgemäß mit aller gebotenen Vorsicht zu betrachten und sollen Kritik herausfordern. Neue Daten über diese Größen und verbesserte Methoden der Extrapolation (vgl. etwa<sup>[40]</sup>) werden von Zeit zu Zeit verbesserte Voraussagen ermöglichen.

Diese Überlegungen führen bis in eine Zukunft, die – gemessen an unserer eigenen Lebenserwartung – fern liegt. De facto ergeben sich jedoch aus den Abschätzungen wichtige Konsequenzen für die Gegenwart: Die Vorräte an fossilen Brennstoffen sollten baldmöglichst nicht länger für Wärme- und Stromerzeugung eingesetzt werden, da eine Verbrennung von Kohle und Öl im erforderlichen Ausmaß das Problem des Umweltschutzes na-

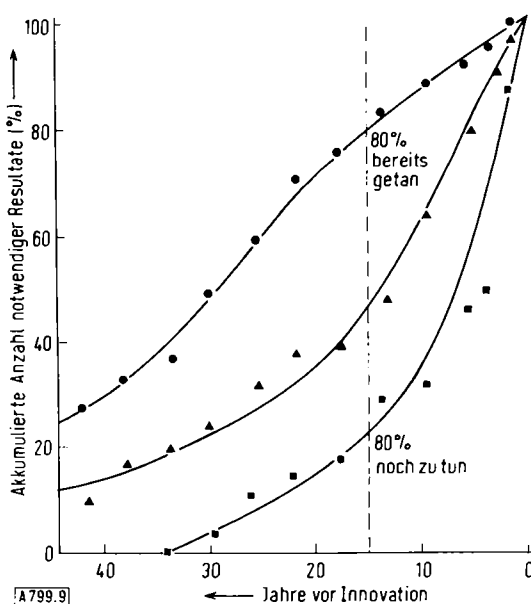


Abb. 9. Zahl der Jahre von Grundlagenforschung (●), Angewandter Forschung (▲) und Entwicklung (■) bis zur Realisierung von Innovationen (nach [41]).

[40] United Nations: Future World Energy Needs. IAEA Conference Paper SM-146/40, Aug. 1970.

[41] G. Friberg. Forskning och Framsteg (Stockholm) 1969, Nr. 3, S. 2.

hezu unlösbar machen und wahrscheinlich prohibitive ökologische Konsequenzen haben würde; zudem sind diese Vorräte für andere Zwecke (z. B. Herstellung von Chemikalien und Pharmaka, Betrieb von Flugzeugen und Autos) wertvoller, z. T. unentbehrlich.

Die Entwicklung von Brutreaktoren ist eine unerläßliche Vorbedingung für die Nutzung der Kernspaltung im erforderlichen Ausmaß, ebenso die Lösung der Reaktorsicherheits-Probleme für den wirtschaftlichen Betrieb von Kernkraftwerken in dichtbesiedelten Gebieten und der chemischen Probleme für die Behandlung und Endlagerung der enormen Quantitäten von radioaktiven Rückständen.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über die Gewinnung von Uran, Thorium und Deuterium aus den Urrohstoffen und für die Realisierung von Fusionsreaktoren sind dringend erforderlich. Die für grundlegende In-

novationen, z. B. die Fusion, erforderliche Zeitspanne bis zum technisch und wirtschaftlich reifen Prozeß beträgt viele Jahrzehnte (vgl. Abb. 9).

Alle relevanten Probleme des Umweltschutzes, die wahrscheinlich die begrenzenden Faktoren für die zukünftige Energieproduktion sein werden, sollten hohe Priorität erhalten. – Vor allem: Der Wendepunkt der logistischen Populationskurve muß in den nächsten Jahrzehnten erreicht werden, was mit allen Implikationen heute noch kaum zu übersehen ist.

Bevölkerungs- und Energieproblem müssen schneller gelöst werden als gemeinhin angenommen wird. Ob eine rationale Lösung möglich ist, hängt entscheidend davon ab, was die jetzt lebenden Generationen in den nächsten Jahrzehnten tun und lassen werden.

Eingegangen am 22. September 1970,  
ergänzt am 21. Oktober 1970 [A 799]

## Valenzisomerisierungen ausgewählter Heterocyclen

Von Leo A. Paquette<sup>[\*]</sup>

*In diesem Aufsatz werden Valenzisomerisierungen und die phänomenologisch verwandten Valenztautomerisierungen einiger Stickstoffheterocyclen diskutiert. 1H-Azepine lagern sich nur in Ausnahmefällen in Azanorcaradiene um; Homo-1H-azepine existieren dagegen als Bicyclen mit dem Stickstoffatom im siebengliedrigen Ring. Azocine (Azacyclooctatetraene) sind deshalb interessant, weil sich das Gleichgewicht je nach Art der Substitution von der Seite der monocyclischen Verbindung praktisch vollständig auf die Seite der bicyclischen Form verschiebt. Der Fähigkeit der Azabullvalene zur entarteten Valenzisomerisierung werden die Eigenschaften der Benzazabullvalene und eines Azasemibullvalen-Derivats gegenübergestellt.*

### 1. Einleitung

Valenzisomerisierungen, d. h. Vielzentrenreaktionen, die über eine synchrone (oder wenigstens nahezu simultane) Verschiebung von  $\sigma$ - und/oder  $\pi$ -Elektronen ablaufen, ohne daß dabei ionische oder radikalische Zwischenstufen auftreten oder Atome oder Molekülgruppen wandern, spielen in der Organischen Chemie eine besondere Rolle. Schon aufgrund ihrer Natur sind solche Um-

wandlungen empfindlich gegen Temperaturänderungen, nicht aber gegen Katalysatoren oder gegen weitgehende Struktur- oder Polaritätsänderungen des Lösungsmittels. Wenn die Isomeren sich durch Überwinden einer relativ niedrigen Energieschwelle ineinander umwandeln können, spricht man besser von Valenztautomerisierungen. Da in cyclischen Polyenen die geometrischen Faktoren für die Bindungsumordnungen besonders günstig sind, zeigen solche Systeme im allgemeinen eine faszinierende Neigung zur Valenztautomerisierung. Von theoretischer Bedeutung ist die Frage nach den Faktoren, welche die Lage des Gleichgewichts bestimmen, wenn die Struktur eines gegebenen Moleküls stufenweise verändert wird. Gewöhnlich lassen sich strukturelle, elektronische und sterische Einflüsse jedoch schwer voneinander trennen; daraus folgt, daß noch mehr quantitative Daten für eine noch größere Vielfalt von Molekülstrukturen gesammelt werden müssen, damit sich aus den so gewonnenen Informationen schließlich fundierte theoretische Gesetzmäßigkeiten entwickeln lassen<sup>[1]</sup>.

[\*] Prof. Dr. L. A. Paquette  
Department of Chemistry, The Ohio State University  
Columbus, Ohio 43210 (USA)

[1] Neuere Übersichten über Valenzisomerisierungen siehe: a) E. Vogel, Angew. Chem. 74, 829 (1962); Angew. Chem. internat. Edit. 2, 1 (1963); b) W. von E. Doering u. W. R. Roth, Angew. Chem. 75, 27 (1963); Angew. Chem. internat. Edit. 2, 115 (1963); c) S. J. Rhoads in P. de Mayo: Molecular Rearrangements. Teil I. Wiley, New York 1963, S. 655; d) E. Vogel u. H. Günther, Angew. Chem. 79, 429 (1967); Angew. Chem. internat. Edit. 6, 385 (1967); e) G. Maier, Angew. Chem. 79, 446 (1967); Angew. Chem. internat. Edit. 6, 402 (1967); f) L. A. Paquette in J. Snyder: Nonbenzenoid Aromatics, Bd. I, Academic Press, New York 1969, S. 249–310.