

# **Österreich Dokumentationen**

**Kernenergie  
– ein Problem  
unserer Zeit**

**Was jeder davon wissen soll**

# **Kernenergie – ein Problem unserer Zeit**

**Was jeder davon wissen soll**

**Wien 1976**

**Herausgegeben vom Bundespressedienst**

### **Autorengemeinschaft:**

Univ.-Prof. Dr. Engelbert Broda  
Univ.-Prof. Dr. Hans Hinterhuber  
Dr. Helmut Hirsch  
Dr. Karl Musil  
Dr. Theodor Prager  
Univ.-Prof. Dr. Othmar Preining  
Univ.-Prof. Dr. Norbert Pucker  
Univ.-Prof. Dr. Helmut Rauch  
Univ.-Prof. Dr. Herbert Stimmer

*Die Mitglieder der Autorengemeinschaft haben zum Großteil schwerpunktmäßig an der Broschüre mitgearbeitet und tragen daher nur für die von ihnen bearbeiteten Kapitel die volle Verantwortung.*

© Copyright by Bundeskanzleramt - Bundespressedienst,  
Ballhausplatz 2, A-1014 Wien, Österreich  
Auszugsweiser Abdruck des Textes gestattet  
Graphiken: Robert Faustenhammer, Wien  
Druck: Österreichische Staatsdruckerei, Rennweg  
A-1030 Wien

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung .....	5
<b>1. Kapitel: Wirtschaft und Energie</b>	
1.1. Energie und Volkswirtschaft .....	7
1.1.1. Zur Beschreibung der wirtschaftlichen Entwicklung .....	7
1.1.2. Mensch und Wirtschaft .....	9
1.1.3. Die Rolle der technischen Neuerungen .....	10
1.2. Werkzeuge der Energiepolitik:	
Planung und Prognose .....	11
1.2.1. Planung .....	11
1.2.2. Prognose .....	13
1.3. Wirtschaftlichkeit der Kernenergie .....	17
1.3.1. Vergleich von Kernenergie mit herkömmlichen fossilen Brennstoffen .....	17
1.3.2. Wodurch wird Wirtschaftlichkeit bestimmt? ..	19
1.3.3. Der internationale Rahmen:	
Auslandsabhängigkeit .....	23
<b>2. Kapitel: Wie arbeitet ein Kernkraftwerk?</b>	
2.1. Allgemeine Grundlagen .....	24
2.1.1. Die kleinsten Teile der chemischen Elemente: Die Atome, die Isotope .....	24
2.1.2. Der Zusammenhalt der Atomkerne:	
Die Bindungsenergie .....	27
2.1.3. Die Spaltung von Atomkernen:	
Frei werdende Spaltungsenergie .....	28

2.1.4. Die Kettenreaktion:	
Das Prinzip des Kernspaltungsreaktors .....	30
2.2. Kraftwerke und Reaktoren .....	31
2.2.1. Kraftwerke .....	31
2.2.2. Reaktortypen .....	33
2.2.3. Radioaktivität der Spaltprodukte .....	43
2.2.4. Kernbrennstoffkreislauf:	
Erzeugung von Plutonium .....	46
2.2.5. Sicherheitsbetrachtungen .....	48
<b>3. Kapitel: Biologisch-medizinische Strahlenwirkungen</b>	
3.1. Allgemeine Grundlagen .....	55
3.2. Strahlenchemie und Strahlenbiologie .....	56
3.2.1. Wirkungsweise ionisierender Strahlen .....	57
3.2.2. Somatische und genetische Wirkungen .....	58
3.3. Grundprinzipien des Strahlenschutzes .....	61
3.3.1. Relative biologische Wirksamkeit und Strahlenbelastung .....	61
3.3.2. Toleranzgrenze .....	63
3.3.3. Besondere Belastung von Organen .....	65
3.4. Ausblick .....	67
<b>Schlußbetrachtung</b> .....	67
Sollen in Österreich Kernkraftwerke errichtet werden? .....	67
<b>Raum für Notizen</b> .....	69

## Einleitung

*Das erste Kernkraftwerk Österreichs soll bald in Betrieb gehen. Nicht alle sind damit einverstanden.*

*Das Kraftwerk wird Energie liefern. Hochwertige elektrische Energie, die alle gut verwenden können. Einmal für den persönlichen Gebrauch, für ein bequemeres Leben, zum anderen Mal zur Erhöhung der Produktivität, also zur Erhöhung des Volkseinkommens, dessen Zuwachs — in gerechter Verteilung — bei der Erhaltung des sozialen Friedens hilft.*

*Aber ist die Energie aus Kernkraftwerken wirklich notwendig, gibt es keine anderen Alternativen? Ist sie billiger und hinreichend sicher?*

*Es gibt Bürger, denen die Errichtung von Kernkraftwerken bedenklich erscheint; es gibt solche, die sie strikt ablehnen. Welche Gefahren bringt der Bau eines Kernkraftwerkes für die unmittelbare Umgebung und auch für alle, die nicht direkt neben dem Reaktor leben müssen? Welche Belastung wird der Betrieb des Kernkraftwerkes auch für die folgenden Generationen bringen?*

*Und schließlich: Wie wirtschaftlich ist Kernenergie überhaupt? Ist die Kritik unbegründet, bloß aus der Angst vor einer technischen Neuerung entstanden, oder ist sie sehr wohl begründet, und hetzt uns eine kleine Gruppe von Managern und Technokraten in eine für den Fortbestand der Menschheit gefährliche Entwicklung nach der Überlegung: Hauptsache ist der heutige Profit, die Schäden, den Raubbau an der Natur, das soll die nächste Generation meistern?*

*Auf diese und viele ähnliche Fragen soll die Informationskampagne Kernenergie, eine von der Österreichischen Bundesregierung im Sinne der Regierungserklärung vom 5. November 1975 initiierte Reihe von Diskussionsveranstaltungen, Antworten finden. Antworten, die so dargelegt sind, daß die Entscheidungsgrundlagen der Weichenstellung für die Zukunft möglichst vielen vermittelt werden. Diese Aufgabe ist nicht leicht, denn es gilt*

die Herausforderung einer noch nie dagewesenen Komplexität zu bewältigen und möglichst viele Einflußgrößen und Gesichtspunkte zu berücksichtigen. In vielen Bereichen werden Antworten heute noch nicht existieren; was dort geleistet werden kann, ist eine klarere und präzisere Formulierung der Fragen. Diese Situation muß dann im Hinblick darauf geprüft und bewertet werden, ob das Fehlen einer Antwort ein Hindernis für die Anwendung der technisch gebotenen Möglichkeiten darstellt.

Die Entscheidungen sind nicht allein aufgrund von naturwissenschaftlichen, speziell physikalischen, aber auch nicht nur durch Berücksichtigung von ökonomischen, sozialen oder biologisch-medizinischen Tatsachen zu treffen. Auch ideologische, weltanschauliche und religiöse Motive sollen nicht allein den Ausschlag geben. Die Entscheidungen haben alles in optimaler Form zu berücksichtigen. Es handelt sich also um politische Entscheidungen von größter Tragweite, die nach der Regierungserklärung vom 5. November 1975 letztlich von der Volksvertretung nach einem breit angelegten Klärungsprozeß der öffentlichen Meinung zu treffen sein werden.

In dieser Broschüre wird versucht, die wichtigsten Grundtatsachen aus den verschiedenen Wissensgebieten als Grundlage und Vorbereitung für die öffentliche Diskussion in einfacher Form darzustellen.

# 1. Wirtschaft und Energie

## 1.1. Energie und Volkswirtschaft

### 1.1.1. Zur Beschreibung der wirtschaftlichen Entwicklung

Der Energiewirtschaft kommt in der modernen Volkswirtschaft eine besondere Bedeutung zu, weil Energie insbesondere als Produktionsfaktor in jedem Produktionsprozeß notwendig ist. Da jede Änderung der Energiepreise und jede Versorgungsstörung unmittelbar Auswirkungen auf die Entwicklung des **Sozialproduktes** eines Landes haben können, reagieren die Industriestaaten darauf besonders empfindlich. Als Sozialprodukt bezeichnet man die im Lauf eines Jahres produzierte Menge von Gütern und Dienstleistungen. Da die Bewertung fast immer zu laufenden Preisen erfolgt, erfordert die Messung der realen Entwicklung die Berücksichtigung von Preisänderungen. Neben dem Begriff „Sozialprodukt“ werden in der „volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung“ ähnliche Begriffe, wie „Brutto-Nationaleinkommen“ oder „Brutto-Nationalprodukt“ (BNP; Wertschöpfung zuzüglich Gutmachung für Abnützung von Gebäuden und Maschinen) und „Netto-Nationalprodukt“ (echte zusätzliche Wertschöpfung), verwendet.

Unter **Wirtschaftswachstum** versteht man die Ausweitung oder Stärkung der Produktionsgrundlagen und die daraus resultierende Vergrößerung des produzierten Güter- und Leistungsstromes. Wirtschaftswachstum setzt die ausreichende Versorgung mit Energie voraus. Natürlich ist Energie nur eine der Quellen des Wirtschaftswachstums, zu denen auch die wachsende Zahl der Arbeitskräfte, die zunehmende Realkapitalausstattung, also die Ausstattung mit Maschinen und Verkehrsmitteln, sowie die größere Ergiebigkeit der Arbeit (eine höhere Produktivität kann

durch bessere Ausbildung, leistungsfähigere Maschinen, durch eine bessere Organisation oder aber durch die Um- schichtung der Produktion zu Produkten oder Bereichen mit höherer Ergiebigkeit erreicht werden) zählen. Wirtschaftswachstum gilt als das wichtigste Mittel, den materiellen Wohlstand und das Lebensniveau zu heben.

Vom Wirtschaftswachstum im herkömmlichen Sinne gehen allerdings auch andere Effekte aus. Dazu zählen insbesondere die zunehmende Umweltverschmutzung, der Raubbau an Mensch und Natur sowie die Probleme, die sich aus der zunehmenden Ballung, der Großtechnologie und der Monsteroorganisation ergeben. Das Brutto-Nationalprodukt enthält zwar alle entlohnnten oder bezahlten Aufwendungen, dagegen werden aber Schäden, die diese Aufwendungen verursachen, vom Brutto-Nationalprodukt nicht in Abzug gebracht. (Beispielsweise entstehen bei der Verwendung von Energie Umweltbelastungen durch schädigende Abgase, Geruch oder Staub. Im Brutto-Nationalprodukt sind nur die Aufwendungen zur Beseitigung dieser Belastungen als wertvermehrend berücksichtigt.)

Das „**Nullwachstum**“ wird von manchen als Alternative zum herkömmlichen Wirtschaftswachstum mit seinen schädlichen Effekten und dem rasant wachsenden Energiebedarf angesehen. Bei „Nullwachstum“ wächst die Wirtschaft nicht, die wirtschaftlichen Aktivitäten werden auf einem bestimmten Niveau „eingefroren“, allerdings ändert sich die Wirtschaftsstruktur. So soll insbesondere die Produktion materieller, energieaufwendiger Produkte (Kraftfahrzeuge, kurzlebige „Wegwerfprodukte“) zugunsten der Erweiterung öffentlicher Dienstleistungen, wie dem Bildungs- und Gesundheitswesen, dem Umweltschutz und dem öffentlichen Massenverkehr, eingeschränkt werden. Schwierigkeiten könnte das „Nullwachstum“ auf dem Arbeitsmarkt (durch den Verlust von Arbeitsplätzen) bringen, vor allem aber würde die Bekämpfung der Armut (in den Industrieländern, erst recht aber in den Entwicklungsländern) schwerfallen, weil sie nur noch durch Umverteilung möglich wäre.

Für die Wirtschaftsentwicklung moderner Industriestaaten ist auch die **internationale Wettbewerbsfähigkeit** von

großer Bedeutung. Ein wichtiger Faktor dafür ist (neben beispielsweise den Arbeitskosten oder der Produktivitätsentwicklung) der Kostenfaktor Energie. Länder mit vergleichsweise niedrigen Energiepreisen können erhebliche Wettbewerbsvorteile nutzen.

### 1.1.2. Mensch und Wirtschaft

Mit zunehmender Versorgung mit materiellen Gütern, insbesondere in den entwickelten Industriestaaten, nahm das Bedürfnis nach „mehr Lebensqualität“ zu. Die negativen Folgen der Industrialisierung, insbesondere die zunehmende Umweltverschmutzung, die wachsende Lärmbelästigung, die Probleme der Ballungszentren, die „Einsamkeit in der Masse“ und die Entpersönlichung der menschlichen Beziehungen werden immer deutlicher spürbar. Anstelle des rein quantitativen („eindimensionalen“) Wirtschaftswachstums tritt daher die Forderung nach besseren Gütern und Dienstleistungen, besseren Arbeitsbedingungen, mehr Bildung und mehr Kultur. Insbesondere die Forderung nach **Humanisierung der Arbeitswelt** kann aber wieder zu einer Vergrößerung der Energienachfrage führen. Energie ist eine der wichtigsten Voraussetzungen zur Erleichterung menschenunwürdiger Arbeiten durch Maschinen. Durch starke Mechanisierung der Arbeit können allerdings beschäftigungspolitische Probleme entstehen (Umschichtung in der Beschäftigungsstruktur und Steigerung der **Arbeitslosenrate**). Als Arbeitslosenrate bezeichnet man die Prozanzahl der Arbeitsuchenden im Verhältnis zur Zahl der Beschäftigten.

Zur Messung der Lebensqualität werden geeignete Verhältniszahlen, sogenannte **Umwelt- und Sozialindikatoren**, herangezogen. Sie dienen der Feststellung der Umweltbedingungen (z. B. des Verschmutzungsgrades), der Qualität der Nahrungsmittel (z. B. Nahrungsmittelzusätze und Verfälschung), der Qualität des Gesundheitswesens (z. B. Arzt- und Spitalbettendichte und -qualität), der Höhe der Kindersterblichkeit, der durchschnittlichen Lebenserwartung, der Wohnbedingungen (z. B. Ausstattung mit Energie, Heizung, Badezimmer, Wohnfläche

pro Person und Haushalt), der Kriminalität und des Alkoholismus. Dazu zählen aber auch Meßzahlen über Einkommens- und Vermögensverteilung, die materielle Versorgung der Alten und Hilflosen, Meßzahlen über Armut, Freizeitgestaltung und Zugang zu und Teilnahme an kulturellen Veranstaltungen.

### 1.1.3. Die Rolle der technischen Neuerungen

Technische Neuerungen sind besonders für die Energiewirtschaft von großer Bedeutung. **Forschung und Entwicklung** nennt man generell jenen Bereich, der sich mit der Erfindung, Entwicklung und Anwendung wissenschaftlich-technischer Neuerungen (Innovationen) in neuen Verfahren, Produkten und Dienstleistungen bemüht. Man unterscheidet zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung und Entwicklung oder auch zwischen „wissenschaftsbezogener“, „wirtschaftsbezogener“ und „gesellschaftsbezogener“ Forschung und Entwicklung — wobei aber die verschiedenen Bereiche des Neuerungsprozesses sich überschneiden und ineinander greifen. Zwischen Forschung und Entwicklung auf der einen Seite und dem Energiebedarf insgesamt bzw. dem Bedarf an bestimmten Energieträgern bestehen vielfältige Zusammenhänge. Technische Neuerungen können den Energiebedarf erhöhen (Ersatz der menschlichen Arbeitsleistung durch maschinelle Arbeit) oder dazu beitragen, Energie zu sparen (Entwicklung energiesparender Techniken; bessere Nutzung der Energie in Heizanlagen, thermischen Kraftwerken oder Kraftfahrzeugmotoren). Technische Neuerungen können die Substitution einzelner Energieträger durch andere erleichtern (Entwicklung von Brennern für verschiedene Energiearten) oder erschweren. (Elektrische Energie zum Schweißen, zur Aluminiumerzeugung oder Beleuchtung kann heute durch einen anderen Energieträger praktisch nicht ersetzt werden.) Forschung und Entwicklung sind Voraussetzung der wirtschaftlichen Nutzung alternativer Energieformen bei wachsender Energienachfrage und Verknappung des Energieangebotes (Entwicklung der Kernenergie, Sonnenenergie, Erdwärme und Windenergie).

## 1.2. Werkzeuge der Energiepolitik: Planung und Prognose

### 1.2.1. Planung

Der **Planung** kommt in der Energiewirtschaft große Bedeutung zu, weil Energie in jedem Produktionsprozeß benötigt wird und weil mit zunehmendem Energieverbrauch wachsende Umweltbelastungen verbunden sind. Auch in der Energiewirtschaft zeigt sich das Phänomen, daß beträchtliche Einsparungen erzielt werden können, wenn in großen Einheiten produziert wird (**Kostendegression**; z. B. können größere Kraftwerkseinheiten billiger Strom erzeugen als kleine). Das hat allerdings zur Folge, daß das Angebot an bestimmten Energiearten kurzfristig ziemlich starr ist und daß Investitionsvorhaben wegen des großen Kapitalbedarfes und der langen Bau-dauer (z. B. vergehen vom Baubeschluß bis zur Fertigstellung eines Kernkraftwerkes acht bis zehn Jahre) mit einem höheren Risiko für Fehlentscheidungen verbunden sind. Investitionsentscheidungen werden außerdem dadurch erschwert, daß einzelne Energieträger andere verdrängen (**Substitutionsprozeß**), was schwierige Anpassungsprobleme mit sich bringt (z. B. brachte die Schließung der Kohlenbergwerke in der Vergangenheit auch erhebliche beschäftigungspolitische und regionalpolitische Probleme mit sich).

Im Bereich der Planung eines Energieunternehmens ist der Absatzplan nur einer von vielen Plänen, die zur Sicherung der Unternehmensstabilität erforderlich sind (z. B. gibt es auch Investitions-, Finanz- und Personalpläne). Das Ausmaß der staatlichen Intervention und Planung in der Energiewirtschaft ist in den westlichen Industriestaaten unterschiedlich groß und umstritten. Im allgemeinen wird aber anerkannt, daß die staatliche Einflußnahme dringender als in anderen Wirtschaftszweigen erforderlich ist.

Zum energiepolitischen Instrumentarium zählen die Verstaatlichung von Energieunternehmungen, die direkte oder indirekte Einflußnahme auf die Investitionsentscheidungen und die Preisgestaltung, öffentliche Auflagen und die im folgenden kurz umrissene **indikative Planung**. In fast allen westlichen Staaten hat sich in der Energiewirt-

schaft eine gemischte Wirtschaftsform herausgebildet. Das gilt auch für Österreich, wo der überwiegende Teil des Energiesektors im öffentlichen Eigentum steht, dennoch aber zahlreiche Entscheidungsträger rechtliche oder tatsächliche Unabhängigkeit besitzen. Der „**Energieplan**“ der Bundesregierung geht von einer jährlich überprüften Prognose über die künftige Versorgungsentwicklung aus, untersucht diese im Lichte ihrer politischen Zielvorstellungen und bringt Vorschläge für staatliche Maßnahmen und Empfehlungen für Energieproduzenten und -konsumenten. Der „Energieplan“ hat nicht zum Ziel, Unternehmens- oder Konsumentenentscheidungen vorwegzunehmen, sondern gibt den politisch erwünschten Rahmen für solche Entscheidungen vor. Darin besteht das Wesensmerkmal der oben erwähnten indikativen Planung.

Jede längerfristige Planung in der Energiewirtschaft ist nur sinnvoll, wenn sie auf einer hinreichend gesicherten Schätzung der künftigen Entwicklung der für die Planung relevanten Daten aufbauen kann (z. B. Erstellung von Energieprognosen). Die Höhe der Energievorräte auf der Erde ist umstritten. Unbestritten ist die Tatsache, daß Länder mit geringen Energievorräten und damit hoher Auslandsabhängigkeit auf dem Brennstoffsektor zum **Energiesparen** gezwungen sind. Unter Energiesparen versteht man die Bemühungen, Energievergeudung zu vermeiden und bei gleichem Nutzeffekt den Wirkungsgrad der eingesetzten Energie zu verbessern (z. B. kann durch bessere Isolierung von Bauten mit weniger Energieaufwand die gleiche Raumtemperatur erreicht werden). Energieeinsparungen sind bei der Energiegewinnung, der Energieumwandlung, bei der Energieverteilung und bei der Energieumwandlung in Nutzenergie beim Verbraucher denkbar. Den schlechtesten Nutzungssgrad der Energie weist mit nur 20% der Verkehrssektor auf, bei den Haushalten beträgt er 45% und in der Industrie 56%. In thermischen Kraftwerken, soweit die Abwärme nicht zur Fernheizung oder in industriellen Prozessen genutzt wird, gehen bei der Stromerzeugung rund zwei Drittel der eingesetzten Rohenergie verloren (vgl. 2.2.1.), in Wasserkraftwerken rund 20%, in Raffinerien dagegen betragen die Verluste einschließlich des Eigenverbrauchs nur 4 bis 5%. Insgesamt geht gegenwärtig etwa die Hälfte der

eingesetzten Rohenergie bis zur Nutzanwendung verloren. Rund 39% des Endenergieverbrauches entfallen auf die Industrie, 25% auf den Verkehrssektor und 36% auf die Haushalte und die übrigen Kleinverbraucher. Dabei werden rund zwei Drittel zur Deckung des Wärmebedarfes, etwas weniger als ein Drittel für Transportzwecke und der Rest für ortsfeste Motoren und Beleuchtung benötigt. Im Haushaltssektor entfallen 77% des Energiebedarfes auf die Raumheizung, 12% auf die Warmwasserbereitung und 11% auf den Energiebedarf für Kochen, Haushaltsgeräte und Beleuchtung. Daraus kann man ersehen, daß die Energiesparmaßnahmen im Bereich der kalorischen Stromerzeugung (wegen der hohen Verluste) und der Raumheizung (wegen des hohen Verbrauchsanteiles) die größten Effekte erzielen würden. Zu den wichtigsten empfohlenen Energiesparmaßnahmen zählen daher auch die Nutzung der Abwärme von Wärmekraftwerken für Heizzwecke (Kraft-Wärme-Kupplung), die allerdings nicht in allen Fällen wirtschaftlich ist, und die Aufnahme von Wärmeschutzmaßnahmen bei Bauten in die einschlägigen Vorschriften.

### 1.2.2. Prognose

**Energieprognosen** sind insbesondere für die längerfristige Planung in der Energiewirtschaft notwendig. Natürlich wird die Qualität der Prognose von ihrer Treffsicherheit bestimmt. In der Regel wird der Beobachtungswert von der Prognose mehr oder weniger weit abweichen (soll die Prognose als Planungsgrundlage dienen, darf die Abweichung natürlich nur gering sein), da jedes Prognoseverfahren nur Schätzwerte für die zu prognostizierende Größe liefern kann. Strenggenommen sollte jede Prognose auch die Wahrscheinlichkeit enthalten, mit der ihr Zutreffen erwartet werden kann. (**Dispersionsgrenzen** oder **Streubereich** nennt man die Grenzen der Abweichungsmöglichkeiten bei einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. — Ob diese Forderung auch für Energieprognosen gilt, ist umstritten, weil in der Energiewirtschaft eine Wiederholung der Ereignisse unter gleichen Bedingungen nicht möglich ist und daher Kriterien fehlen, um die behauptete Wahrscheinlichkeit zu prüfen.)

Zu den wichtigsten Energieprognosen zählen die längerfristigen **Energiebedarfsprognosen**. (Prognosen mit einem

Vorhersagezeitraum von bis zu drei Jahren werden im allgemeinen als **kurzfristige** Prognosen bezeichnet, Prognosen mit einem Vorhersagezeitraum von drei bis zehn Jahren als **mittelfristige** und Prognosen mit einem Vorhersagezeitraum von mehr als zehn Jahren als **langfristige**.) Diese sollen Antwort auf die Frage geben, welches Energieangebot in zehn oder fünfzehn Jahren vorhanden sein muß, um die erwartete Nachfrage quantitativ und qualitativ zu befriedigen. Es gibt im wesentlichen zwei Arten von Energiebedarfsprognosen: Die **Globalprognose**, die unmittelbar die gesamte Entwicklung zu schätzen versucht, und die **Sektorprognose**, die auf Schätzungen für Teilbereiche aufbaut (z. B. Industriebranchen, Verkehr, Landwirtschaft). Als Nachteil der Globalprognose wird im allgemeinen angesehen, daß damit Strukturverschiebungen nicht ausreichend aufgedeckt werden (z. B. kann der Globalprognose nicht entnommen werden, in welchen Bereichen die Nachfrage langsamer oder rascher wachsen wird).

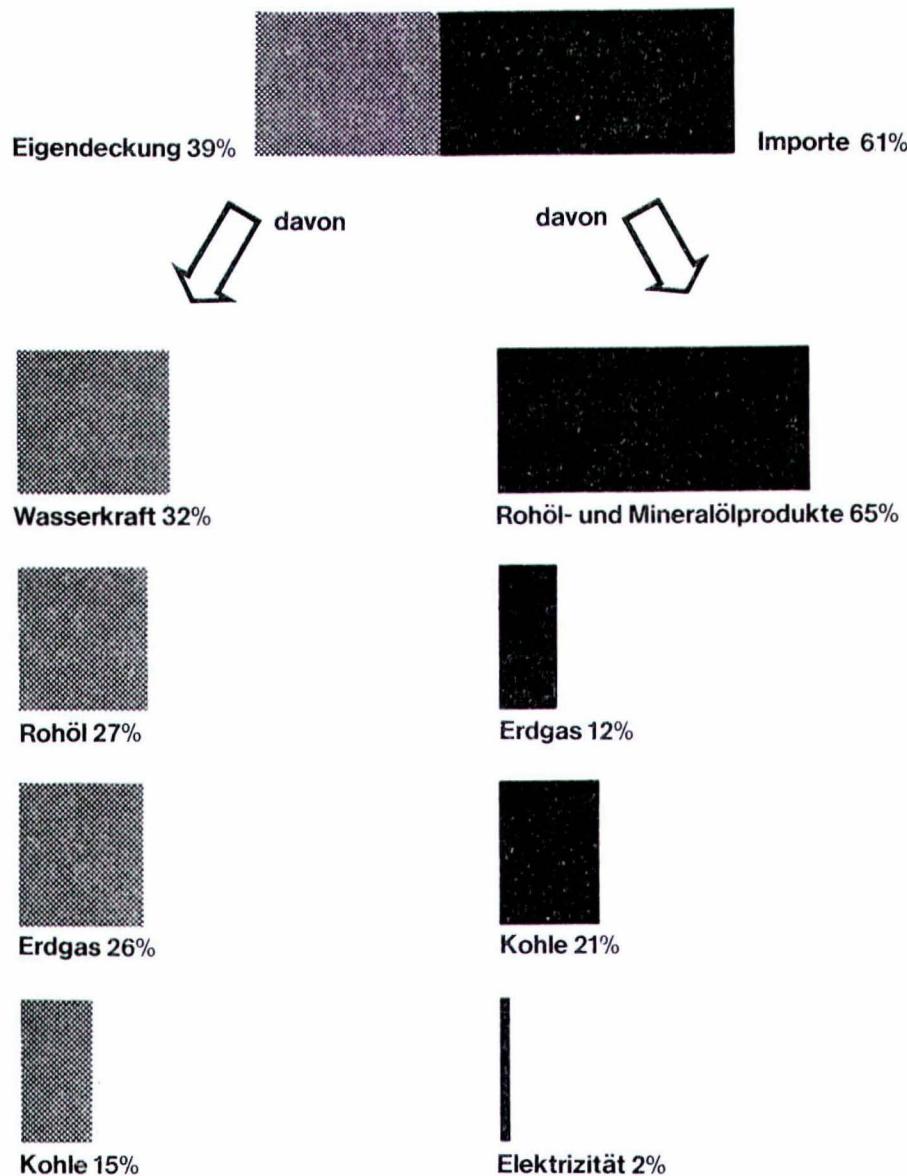
Jede Prognose stützt sich auf Daten der Vergangenheit. Um Gesetzmäßigkeiten im bisherigen Verlauf einer Zeitreihe zu erkennen, muß man die langfristige Entwicklung (**Trend**) von den übrigen Komponenten (Saisonbewegung, Zufallsschwankungen) trennen. Von den verschiedenen Prognoseverfahren wird die **Trendextrapolation** am häufigsten verwendet. Dabei wird die in der Vergangenheit festgestellte Entwicklung in gleicher oder aus anzugebenden Gründen geänderter Form fortgeschrieben. Zu den einfachsten Verfahren dieser Art zählen die Trendermittlung durch Kurvenglättung und Mittelwertbildung. Im Gegensatz zu diesen von den Einflußgrößen, die den Energieverbrauch bestimmen, unabhängigen Verfahren, berücksichtigen **Regressionsmodelle**, daß der Energieverbrauch von zahlreichen Faktoren abhängig ist. Je nachdem, ob mit Hilfe eines mathematischen Schätzverfahrens nur eine Größe den Energieverbrauch erklärt (z. B. die Entwicklung des Brutto-Nationalproduktes) oder mehrere (z. B. Temperatur, Bevölkerungsentwicklung, Einkommensentwicklung), spricht man von **Einfach-** oder **Mehrfachregressionen**. Neben den Extrapolationsverfahren gibt es Schätzverfahren mit Hilfe von **Input-Output-Analysen**. Deren Vorteile liegen vor allem in der Berücksichtigung der Wechselbeziehungen zwischen den

einzelnen Produktionssektoren einer Volkswirtschaft, nämlich zwischen deren Produktionsmitteleinsatz (Input) und dem Produktionsausstoß (Output).

Wesentlich für die Qualität der abhängigen bzw. bedingten Energieprognose sind die ausreichende Definition der **exogenen** (unabhängigen) Größen und die Annahmen über deren künftige Entwicklung (z. B. der Einfluß von Ausbauplänen der Aluminiumindustrie auf die Strombedarfsprognose, Annahmen über die künftige Entwicklung der Technologie in der Eisen- und Stahlindustrie, Veränderungen der absoluten und relativen Energiepreise). Dafür sind unter anderem internationale Querschnittsuntersuchungen wertvoll, insbesondere aber auch **Expertenmeinungen** und **Szenarien** (diese zeigen eine angenommene künftige Situation, bei der aber die dargestellten Gegebenheiten miteinander in logischer Beziehung stehen).

Die Struktur der österreichischen Energiewirtschaft zeigt, daß Österreich seinen Energiebedarf (laut Österreichischem Institut für Wirtschaftsforschung 1975 29 Mill. Tonnen Steinkohleneinheiten) gegenwärtig zu etwa 39% aus eigenen Vorkommen decken kann, der Anteil der Nettoimporte (Saldo aus Importen und Exporten) beträgt 61%. Vom heimischen Energieangebot entfallen 32% auf die Stromerzeugung aus Wasserkraft, 27% auf Rohöl, 26% auf Erdgas und 15% auf Braunkohle. An den Importen sind Rohöl und Mineralölprodukte mit 65%, feste Brennstoffe mit 21%, Gas mit 12% und Strom mit 2% beteiligt (Abb. 1). Feste Brennstoffe müssen zu 70%, Rohöl und Mineralölprodukte zu 80% und Gas zu 43% importiert werden. Nur bei elektrischem Strom besteht ein Ausfuhrüberschuß in der Höhe von rund 15% des Inlandverbrauchs.

Die Verbrauchsstruktur hat sich seit Mitte der fünfziger Jahre merklich geändert. Damals entfielen 63% des Rohenergieverbrauches auf feste Brennstoffe, 21% auf Rohöl, 9% auf Stromerzeugung aus Wasserkraft und nur 7% auf Erdgas. Der Anteil der festen Brennstoffe ging seither zurück und beträgt derzeit nur 18%. Der Anteil des Rohöls stieg dagegen auf 53%, der Erdgasanteil auf 18%. Die Stromerzeugung aus Wasserkraft trägt mit rund 11% zur Bedarfsdeckung bei.



*Abb. 1 : Die Deckung des österreichischen Energiebedarfes*

Folgt man einer **Energieprognose für Österreich** des Institutes für Wirtschaftsforschung, dann wird der Energieverbrauch künftig langsamer wachsen. Bisher betrug die jährliche Verbrauchszunahme etwa 5%, künftig soll sie nur etwa 4% betragen. Das bedeutet dennoch, daß der Energieverbrauch bis 1985 um mehr als die Hälfte zunehmen wird und sich bis 1990 nahezu verdoppeln könnte. Das Institut erwartet, daß der Verbrauchsanteil der Kohle weiter sinken wird, daß aber auch der Rohölanteil — allerdings geringe — Marktanteile verlieren wird. Mit einer starken Expansion wird beim Gas- und Stromverbrauch gerechnet.

## 1.3. Wirtschaftlichkeit der Kernenergie

### 1.3.1. Vergleich von Kernenergie mit herkömmlichen fossilen Brennstoffen

Die Wirtschaftlichkeit verschiedener Methoden der Energieerzeugung ist ein wichtiger Punkt bei deren Beurteilung. Dafür bieten sich vor allem zwei Wege an. Zum ersten kann man alle für die Energieerzeugung erbrachten Aufwendungen in Währungseinheiten bewerten und addieren und die Summe durch die gesamte erzeugte Energiemenge dividieren. So erhält man die Gestehungskosten der betreffenden Energie (etwa in Groschen je kWh) und eine in Geldwert ausdrückbare Vergleichsgröße zwischen verschiedenen Verfahren zur Erzeugung der gleichen Energieart.

Diese Gestehungskostenvergleiche werden aber durch stark schwankende Einflußgrößen, wie Höhe der Kapitalzinsen, Laufzeit von Anleihen, Wechselkurse von verschiedenen Währungen, Inflationsraten, Rohstoffpreise usw., in der Praxis erschwert. Diese Schwierigkeiten versucht man dadurch zu umgehen, daß man zweitens alle maßgeblichen Größen durch ihre zugeordneten Energiegrößen ausdrückt und Energiebilanzen bildet. Vor allem bei der Einschätzung der Kernenergie wird häufig die Methode der Energiebilanzen angewandt, mit der insbesondere geschätzt werden kann, inwieweit durch Einsatz von Kernkraftwerken fossile Energieträger — Kohle, Öl und Gas — eingespart werden können.

In einer Energiebilanz werden die gesamte Energie, die für den Bau und Betrieb eines Kraftwerkes aufgebracht werden muß, und die Energie, die dieses während seiner Lebensdauer liefert, gegenübergestellt. Dabei sind auf der Aufwandseite die Energiemengen für den Bau und die Brennstoffversorgung des Kraftwerkes zu berücksichtigen sowie die Energiemengen, die für die Entsorgung des verbrauchten Brennstoffes und die Stilllegung erforderlich sind. Bei Kernkraftwerken wird Energie — abgesehen von der Errichtung des Kraftwerkes selbst — beim Uranbergbau, bei Gewinnung des Urans aus den Erzen, der Anrei-

cherung durch Trennung der Isotope, der Herstellung und Wiederaufarbeitung der Brennelemente und bei der Abfallaufarbeitung und -lagerung verbraucht; zusätzlich ist noch der Energieaufwand für den Transport der Produkte zwischen den verschiedenen Anlagen und für die Bereitstellung der bei Störfällen erforderlichen Reservekapazitäten zu berücksichtigen. Man nimmt an, daß die aufzuwendende Energie primär durch fossile Brennstoffe geliefert wird, was jedenfalls in der Aufbauphase der Kernenergienutzung zutrifft.

Die produzierte Elektrizitätsmenge hängt von der Verfügbarkeit und dem Wirkungsgrad des Kraftwerkes ab (siehe 1.3.2.).

Stellt man nun, für gleiche Energielieferungen über die gleiche vorgesehene Lebensdauer der Anlagen, einerseits die Aufwendungen an Energie — ausgedrückt in Primäraufwand an fossilen Brennstoffen, wie oben beschrieben — für ein Kernkraftwerk, anderseits die gesamten Aufwendungen an Primärenergie für ein herkömmliches thermisches Kraftwerk einander gegenüber, so ergibt sich die durch die Kernenergie erzielbare Einsparung an fossilen Brennstoffen.

Verschiedene Berechnungen, die u. a. in der Bundesrepublik Deutschland angestellt wurden, haben auf dieser Grundlage zum Teil beträchtliche Einsparungen fossiler Energieträger bis zum Jahr 2000 bei Einsatz der Kernenergie ergeben; die Ungenauigkeit dieser Kalkulation ist jedoch sehr groß. Gewisse, wenn auch nicht grundlegende Änderungen der Resultate ergeben sich daraus, daß die Uranvorräte begrenzt sind und voraussichtlich noch in diesem Jahrhundert zunehmend uranarme Erze abgebaut werden müßten, womit ein höherer Energieaufwand verbunden wäre. Weiters ist zu berücksichtigen, daß verstärkte Sicherheitsmaßnahmen, wie sie von einem Teil der Experten für die Zukunft gefordert werden, gleichfalls zu erhöhten Aufwendungen führen würden. Erhöhte Maßnahmen für den Umweltschutz können sich freilich auch auf den Energieaufwand bei mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken auswirken.

Ein anderes Problem, das mit Hilfe der Energiebilanz untersucht wird, ist der Energieanteil, der auf den Bau und die Bereitstellung von Betriebsmitteln für neue Kraftwerks-

einheiten entfällt, und damit die Frage der maximal zulässigen Wachstumsgeschwindigkeit für den Ausbau der Kraftwerkskapazität.

Obwohl die Frage, in welchem Ausmaß die Kraftwerke bloß ihrer eigenen Vermehrung und in welchem der allgemeinen Versorgung dienen, grundsätzlich bei jeder Art von Kraftwerken gestellt werden kann, wurde sie bei Kernkraftwerken deshalb aufgeworfen, weil die Ausbaupläne sich in den meisten Industriestaaten in den nächsten Jahrzehnten ganz besonders auf die Kernenergie stützen.

Die Wachstumsgeschwindigkeit der installierten elektrizitätserzeugenden Kapazitäten wird, wie viele andere wirtschaftliche Größen, in Prozent pro Jahr angegeben. Besonders anschaulich ist aber die Angabe der Verdopplungszeit, d. h. der Zeitspanne, innerhalb derer bei entsprechender Wachstumsgeschwindigkeit die installierte Kapazität verdoppelt wird. Die Schätzungen der Fachleute, welche Verdopplungszeit gerade noch möglich wäre, ohne insgesamt mehr Energie für den Bau neuer Kraftwerke aufwenden zu müssen, als die gerade gebauten liefern, gehen auseinander; sie liegen aber meist zwischen weniger als einem Jahr und fünf Jahren. In den Plänen vieler westlicher Industriestaaten sind für den Ausbau der Kernenergie in den nächsten Jahren Verdoppelungszeiten von etwa fünf Jahren vorgesehen.

Beide Betrachtungsweisen — Kosten in Währungseinheiten und „Kosten“ in Energieeinheiten — führen aber bei den hier betrachteten Problemen durchwegs zu ähnlichen Ergebnissen, obgleich natürlich grundsätzlich der Faktor „menschliche Arbeitskraft“ bei den Energiebilanzen nicht entsprechend berücksichtigt werden kann.

### 1.3.2. Wodurch wird Wirtschaftlichkeit bestimmt?

**Größe der Kraftwerke:** Die Gestehungskosten der in einem Kraftwerk erzeugten elektrischen Energie hängen von den verschiedenen in 1.3.1. genannten Faktoren ab, wozu noch die in der Energiebilanz schwer fasslichen Ausgaben für Verwaltung, Steuer, Versicherung, Forschung und Entwicklung usw. kommen. Bei einer Vergrößerung der Kraftwerksleistung steigen die Baukosten nicht im

gleichen Ausmaß wie die Leistung, sondern weniger. Außerdem haben große Kraftwerke im allgemeinen einen besseren Wirkungsgrad, d. h. sie können z. B. aus der gleichen Menge Brennstoff mehr elektrische Energie erzeugen. Beides hat zur Folge, daß größere Kraftwerke billigere elektrische Energie erzeugen können als kleinere. Bei Wasserkraftwerken fällt die Kostenkomponente „Brennstoff“ weg, dafür sind aber die Baukosten im allgemeinen wesentlich höher als bei thermischen Kraftwerken, so daß sich im Preis der erzeugten elektrischen Energie kein grundsätzlicher Unterschied ergibt.

Die Kostenabnahme bei zunehmender Kraftwerksgröße hat dazu geführt, daß die Kraftwerksleistungen in den letzten Jahren ständig zunehmen. Während vor zehn oder fünfzehn Jahren thermische Kraftwerke mit Leistungen bis etwa 300 oder 400 MW (1 MW [Megawatt] = 1 Million Watt) gebaut wurden, werden jetzt Kraftwerke mit Leistungen von 1000 MW und darüber errichtet.

Der Ausfall eines großen Kraftwerkes mit einer Leistung von 1000 MW oder darüber stellt allerdings an die Reservehaltung in einem elektrischen Versorgungsnetz erhebliche Ansprüche.

**Reservehaltung:** In einem größeren elektrischen Versorgungsnetz, über das die unterschiedlichsten Arten von Verbrauchern versorgt werden — Industrie, Haushalt, Verkehr, Gewerbe, Landwirtschaft —, schwankt der Bedarf an elektrischer Energie zwischen Minimalwerten in den Nachtstunden und Spitzenwerten in den Morgen-, Mittags- und Abendstunden. Für Mittel- und Westeuropa liegt das Verhältnis zwischen Minimal- und Spitzenwert bei etwa 0,7 zu 1.

Die Anpassung der Erzeugung von elektrischer Energie an diesen stark schwankenden und sich rasch ändernden Bedarf erfolgt durch Kraftwerkstypen, die dafür besonders geeignet sind: Speicherkraftwerke, die mit Wasser betrieben werden, das in großen künstlichen Stauseen gespeichert und bei Bedarf abgearbeitet wird. In einem Gebirgsland wie Österreich bieten sich für die Anlegung solcher künstlicher Speicherseen besonders günstige Voraussetzungen.

Neben der Deckung dieser Belastungsschwankungen haben die Speicherkraftwerke aber noch eine andere, sehr wichtige

Aufgabe: Fällt ein größeres Kraftwerk wegen einer Störung — z. B. wegen eines Maschinen- oder Kesselschadens — aus, so muß die nun fehlende Leistung dieses Kraftwerkes von anderen Kraftwerken zusätzlich aufgebracht werden. Auch dafür sind Speicherkraftwerke besonders geeignet. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß immer eine entsprechende „Reserveleistung“ zum Ausgleich solcher Kraftwerksausfälle zur Verfügung steht. Je größer die Leistung des ausgefallenen Kraftwerkes ist, bezogen auf die Gesamtleistung aller eingesetzten Kraftwerke, desto schwieriger wird die Aufbringung dieser Reserveleistung. Es kann dann vorkommen, daß die verfügbare Reserveleistung in einem Netz nicht ausreicht, so daß auf Aushilfslieferungen aus benachbarten Netzen zurückgegriffen werden muß. In Fällen, in denen die Verbindungsleitungen zu den Nachbarnetzen oder einzelne interne Transportleitungen schon vor der Störung hoch belastet waren, kann der Transport dieser Aushilfsenergie zu Schwierigkeiten und zu einer Vergrößerung des Störungsumfanges führen.

Um diese Situation des Ausfalls eines großen Kraftwerkes zu beherrschen, ist notwendig

- a) Bereitstellung einer möglichst großen Reserveleistung im eigenen Netz,
- b) falls dies nicht ausreicht, Vereinbarungen mit Nachbarnetzen über die Bereitstellung von Aushilfslieferungen,
- c) entsprechende Übertragungskapazität der Verbindungsleitungen zu den Nachbarnetzen und der wichtigen internen Transportleitungen.

Neben diesen technischen Problemen ergeben sich natürlich auch entsprechende Kostenbelastungen durch die oben angeführten Maßnahmen, die bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen großer Kraftwerke zu berücksichtigen sind. Diese Überlegungen gelten übrigens grundsätzlich für alle großen Kraftwerke, sowohl solche konventioneller Bauweise als auch für Kernkraftwerke. Große Blockgrößen treten allerdings besonders bei Kernkraftwerken auf.

**Verfügbarkeit eines Kraftwerkes:** Unter der Verfügbarkeitszeit eines Kraftwerkes versteht man die Zeit während eines Jahres, in der das Kraftwerk in Betrieb oder betriebsbereit ist. Nicht enthalten ist darin die Zeit, wäh-

rend der das Kraftwerk sich in planmäßiger Revision befindet oder infolge einer Störung ausgefallen ist, also für den Betrieb nicht zur Verfügung steht. Die Verfügbarkeit wird zweckmäßigerweise in der Form angegeben, daß die in Stunden pro Jahr angegebene Verfügbarkeitszeit bezogen wird auf die Stundenzahl eines Jahres (8760). Damit erhält man dann die Verfügbarkeit in Prozent. Anzustreben ist eine Verfügbarkeit möglichst nahe 100%. Je öfter ein Kraftwerk wegen einer Störung ausfällt, desto geringer wird seine Verfügbarkeit, desto teurer wird die in diesem Kraftwerk erzeugte elektrische Energie und desto höhere Kosten müssen für die Bereitstellung entsprechender Reserveenergie berücksichtigt werden.

**Derzeit nicht exakt erfassbare Faktoren:** Beim Betrieb eines Kernkraftwerkes entstehen radioaktive Abfallprodukte, der „**Atommüll**“. Er besteht zu einem erheblichen Anteil aus kurzlebigem und nicht hochaktivem Material, das seine Gefährlichkeit in relativ kurzer Zeit verliert. Daneben fallen aber auch hochaktive Materialien an, die sehr langlebig sind, die also ihre Strahlungsfähigkeit durch mehrere tausend Jahre und länger behalten können, und zwar in einem Kernkraftwerk mit einer Leistung von 1000 MW pro Jahr etwa 15 bis 20 m<sup>3</sup>. Diese Stoffe müssen so aufbewahrt und gelagert werden, daß

- a) die beim radioaktiven Zerfall entstehende Wärme ohne Gefährdung abgeführt werden kann,
- b) niemand Unbefugter Zugriff hat,
- c) eine Freisetzung des gefährlichen Materials auch bei Erdbeben, Überschwemmungen und anderen Naturkatastrophen unmöglich ist.

Derzeit existiert noch keine kommerziell arbeitende Anlage zur Aufarbeitung undendlagerung hochaktiver Abfälle. Die ersten Pilotanlagen (d. h. Versuchsanlagen in großtechnischem, aber noch nicht kommerziellem Maßstab) werden voraussichtlich Mitte der achziger Jahre in Betrieb gehen. Dementsprechend können die daraus entstehenden Kosten nur annähernd geschätzt werden. Weiters ist es schwierig, derartige Schätzungen für die zum Teil sehr langen Zeitspannen (viele tausend Jahre), während derer eine Abfallbetreuung erforderlich ist, zu machen.

Auch bezüglich der Kosten für die **Stillegung** von Kernkraftwerken, die wegen der verbleibenden radioaktiven Sub-

stanzen nicht einfach stehengelassen, aber auch nicht ohne weiteres abgebaut werden können, hat man noch wenig Erfahrung. Kernkraftwerke haben eine Lebensdauer von etwa 20 bis 30 Jahren, das Problem hat sich daher noch nicht in großem Maßstab gestellt.

Ein weiteres sich auf die Kosten auswirkendes Problem bilden die Übernahme von **Forschungs- und Entwicklungsarbeiten** durch den Staat sowie sonstige staatliche Subventionen, die zu einer scheinbaren Verbilligung der nuklear erzeugten Elektrizität beigetragen haben. Hier müßten natürlich, um einen vernünftigen Vergleich zu ermöglichen, auch staatliche Ausgaben zugunsten anderer Sektoren der Energiewirtschaft, etwa des Kohlenbergbaues, berücksichtigt werden. Schon seit vielen Jahren erhält aber die Kernenergie in internationaler Sicht einen sehr großen Anteil an den öffentlichen Zuwendungen für Forschung und Entwicklung.

### 1.3.3. Der internationale Rahmen: Auslandsabhängigkeit

Das Problem der Wirtschaftlichkeit von Kernkraftwerken muß auch im internationalen Zusammenhang gesehen werden. Ein Land wie Österreich, das verhältnismäßig geringe eigene Brennstoffvorräte (Kohle, Öl, Gas, Uran) besitzt, muß diese aus dem Ausland einführen. Damit ergeben sich für die zur Ergänzung der Stromerzeugung aus inländischer Wasserkraft erforderliche thermische Stromerzeugung folgende Probleme:

- a) Eine Blockierung der Zulieferung von Brennstoffen aus dem Ausland kann die Elektrizitätsversorgung gefährden, umso mehr, je größer die Importabhängigkeit auf dem betreffenden Brennstoffsektor ist.
- b) Preisänderungen der importierten Brennstoffe wirken sich auf die Gestehungskosten der elektrischen Energie aus, und zwar umso stärker, je mehr die Kosten der erzeugten Kilowattstunde vom Brennstoffpreis abhängen.

Eine gewisse Entschärfung dieses Problems ergibt sich, wenn die nötigen Brennstoffe zu günstigen Preisen eingekauft und in entsprechend großer Menge im Inland gelagert werden können.

Unter diesem Gesichtspunkt ist vor allem jenen Brennstoffen der Vorzug zu geben, die in ausreichender Menge gelagert werden können und deren Einfluß auf die Gestaltungskosten der elektrischen Energie relativ gering ist.

Dies trifft auf Kernbrennstoff zu. Andere Aspekte verschlechtern aber dieses günstige Bild. Die Technologie zur Erzeugung und Wiederaufarbeitung von Kernbrennelementen sowie der Aufarbeitung und Lagerung von radioaktivem Abfall ist komplizierter und aufwendiger als entsprechende Technologien bei anderen Energieträgern. Nur große Staaten oder Staatengruppen können es sich leisten, solche Anlagen zu errichten und zu betreiben; sie sind für Österreich weder vorgesehen noch ökonomisch tragbar.

Auf diesem Sektor ist somit eine Abhängigkeit weniger von Schwankungen in den Rohstofflieferungen als vom technischen Know-how einiger weniger Großmächte oder wirtschaftlich starker Mächtigruppen gegeben. Wie weit dieser Aspekt zu berücksichtigen ist, hängt unter anderem von der Einschätzung der weltpolitischen Situation Österreichs ab.

## 2. Wie arbeitet ein Kernkraftwerk?

### 2.1. Allgemeine Grundlagen

#### 2.1.1. Die kleinsten Teile der chemischen Elemente: **Die Atome, die Isotope**

Wenn man einen gewissen Vorrat eines chemischen Elements, z. B. Eisen, in immer kleinere Eisenbestandteile zerteilt, gelangt man schließlich zum kleinsten „Eisenstückchen“, dem **Eisenatom**. Man kann auch dieses Eisenatom weiter zerteilen: Dann kommt man zu jenen elementaren Bausteinen, welche die Atome aufbauen, den

Elementarteilchen: Elektronen, Protonen und Neutronen. Aus diesen sind alle Atome aufgebaut. Protonen und Elektronen sind Träger elektrischer Ladung. Mit dem Proton ist eine positive elektrische Elementarladung verbunden, mit dem Elektron eine negative. (1 Elementarladung = 0,000 000 000 000 000 000 16 As, e = Zeichen für Elementarladung, As = Ampère × Sekunden, die Ladungseinheit.) Die Neutronen sind elektrisch neutrale Teilchen. Das Atom ist ebenfalls elektrisch neutral. Sein „schwerer“ Kern besteht aus Protonen und Neutronen und trägt daher eine positive Ladung, deren Größe durch die Zahl der Protonen gegeben ist. Um diesen elektrisch positiven Kern bewegen sich die Elektronen, deren Anzahl so groß ist wie die Zahl der Protonen im Kern. Abb. 2 gibt ein schematisches Bild dieses Sachverhalts.

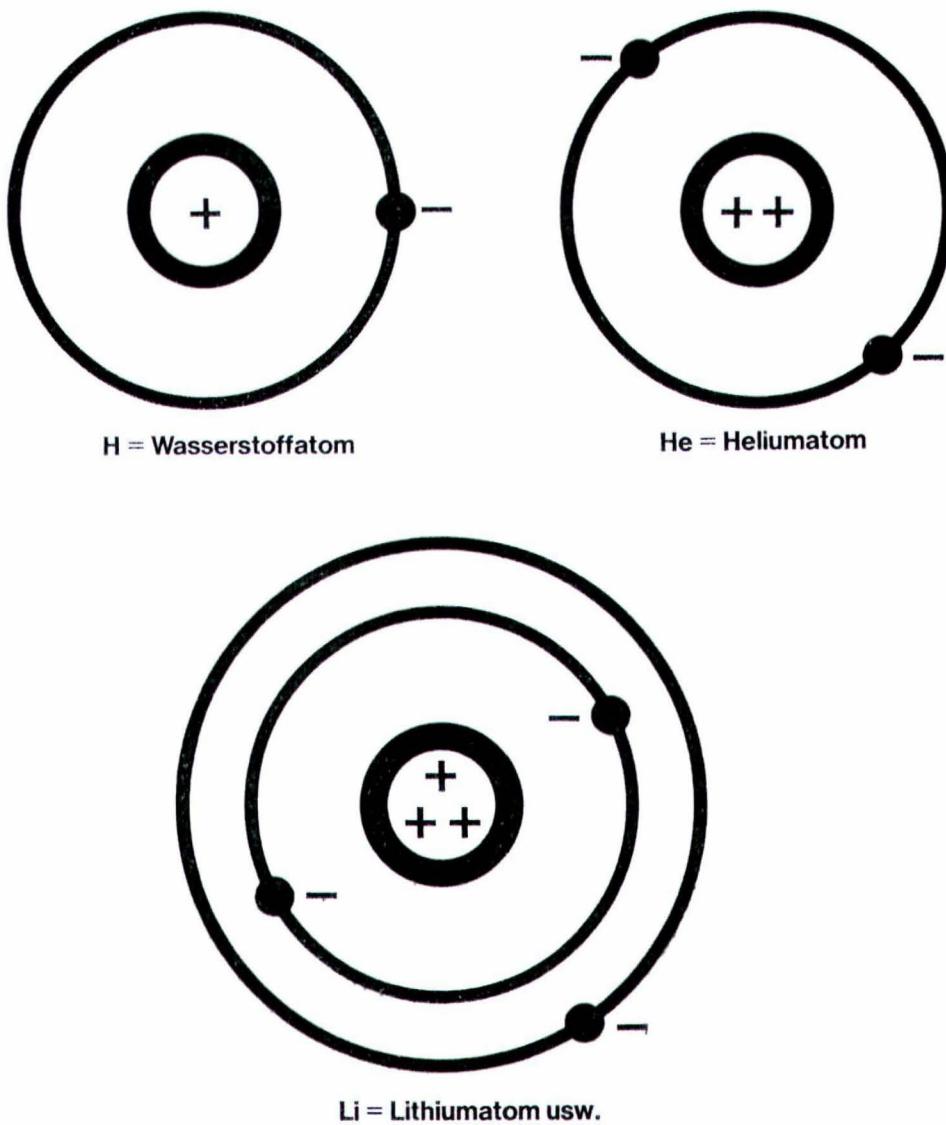


Abb. 2: Schematische Darstellung dreier Atome

Der chemische Charakter eines Atoms — ob es sich um Wasserstoff, Helium oder Lithium usw. handelt — wird durch die Zahl der Protonen im Atomkern festgelegt.

Ein chemisches Element kann aber verschieden schwere Atome haben. Man nennt diese Erscheinung **Isotopie** und die verschiedenen zu einem Element gehörigen Atome **Isotope**. Diese Isotope eines Elements unterscheiden sich dann durch die Zahl der Neutronen im Atomkern. Vom Wasserstoff, dem einfachsten Atom, kennt man drei Isotope, die man auch „einfach“-schweren, „zweifach“- und „dreifach“-schweren Wasserstoff nennt (siehe Abb. 3).

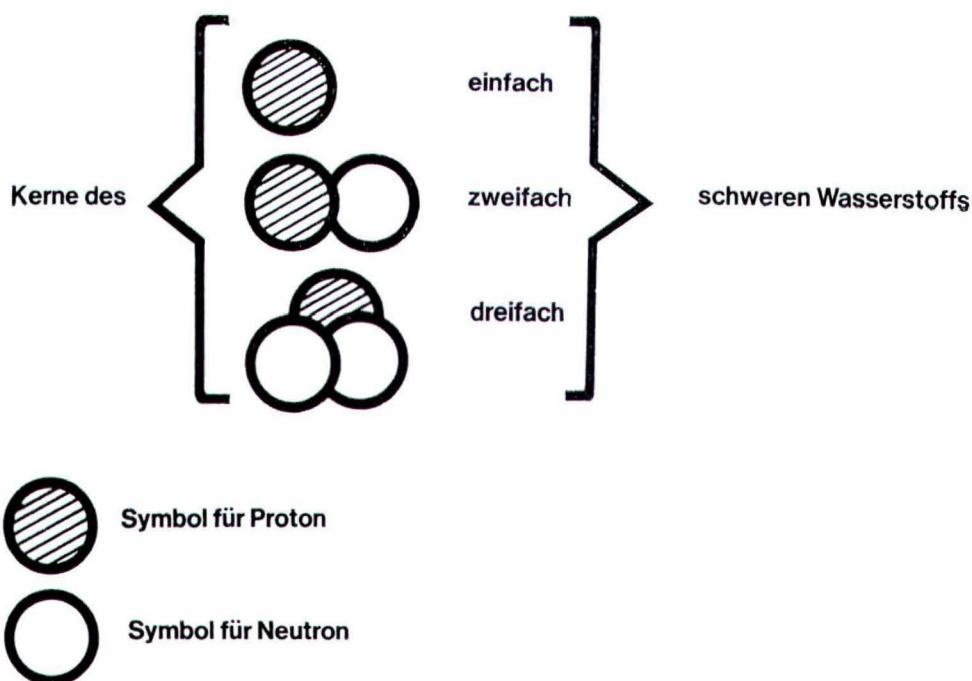


Abb. 3: Schematische Darstellung der Kerne der Wasserstoffisotope

Der einfach-schwere (normale) Wasserstoff hat als Kern ein Proton. Die anderen beiden Isotope haben im Kern noch ein bzw. zwei zusätzliche Neutronen.

Wichtig ist, daß zwar die chemischen Eigenschaften der Isotope gleich, die physikalischen aber verschieden sind. So kann z. B. ein Isotop stabil, ein anderes Isotop des gleichen Elements instabil oder „radioaktiv“ sein; d. h. das instabile Isotop verwandelt sich durch Aussen-dung von „Strahlen“ in ein Isotop des gleichen oder eines anderen chemischen Elements.

## 2.1.2. Der Zusammenhalt der Atomkerne: Die Bindungsenergie

Alle Atome mit Ausnahme derer des normalen Wasserstoffs bestehen aus Neutronen und Protonen. Zwischen diesen Teilchen wirken die **Kernkräfte**, die für den Zusammenhalt der Kerne verantwortlich sind. Diese Kernkräfte sind noch immer nicht in allen ihren Einzelheiten erforscht. Aber man weiß, wie stark die Kernteilchen in den jeweiligen Kernen gebunden sind. Man kennt nämlich die Masse eines freien Neutrons ( $m_n$ ) und die eines freien Protons ( $m_p$ ) sehr genau, sie sind

$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$10^{-27} = 0, \underbrace{0 \dots 0}_{26 \text{ Nullen}} 1$$

Da man auch die Masse der Atomkerne bestimmen kann, ist man in der Lage, die Masse eines gebundenen Kerns mit der Masse der ihm entsprechenden Anzahl von freien Protonen und Neutronen zu vergleichen (siehe Abb. 4). Diese Abbildung zeigt, daß ein Atomkern, der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, wie der des Helium 4, leichter als zwei einzelne Neutronen und zwei einzelne Protonen zusammen ist. Die Differenz heißt **Massendefekt**. Tatsächlich wurde dieser Fehlbetrag an Masse beim Zusammenbau des Kerns in Energie umgewandelt und als

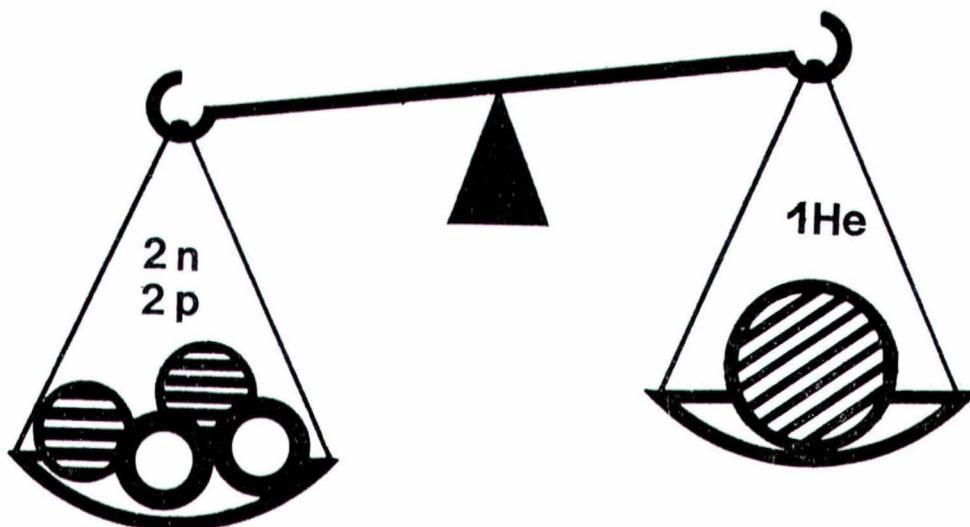


Abb. 4: Auf der linken Waagschale liegen symbolisch 2 Protonen und 2 Neutronen; auf der rechten Waagschale liegt der entsprechende Heliumkern: Er ist leichter!

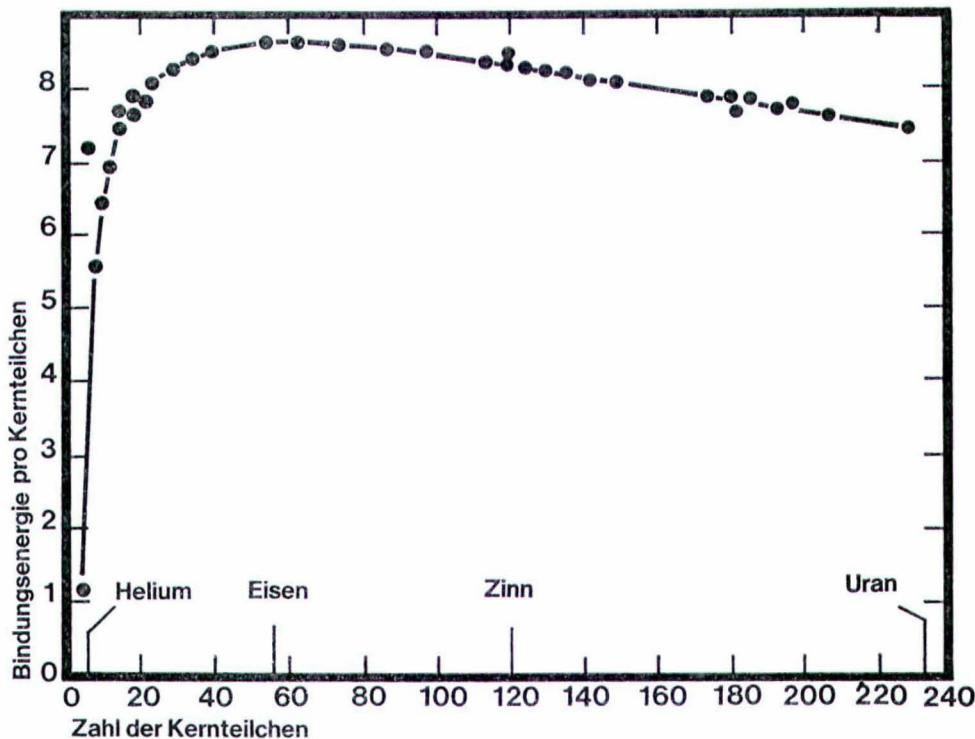


Abb. 5 : Bindungsenergie pro Kernteilchen

solche freigesetzt. Will man den Kern in seine elementaren Bausteine zerlegen, so muß man diese Energie, die als Bindungsenergie frei wurde, dem Kern wieder zuführen. Masse ist nämlich eine Erscheinungsform der Energie.

Betrachtet man die Bindungsenergie pro Kernteilchen und nicht ihren gesamten Betrag, so ergibt sich folgendes: Kerne mit einer großen Bindungsenergie pro Kernteilchen sind sehr stabil; Abb. 5 zeigt, daß unter den uns bekannten Kernen die mit etwa 40 bis 120 Kernteilchen am stabilsten sind.

Dabei verlangt die Natur auch ein „vernünftiges“ Verhältnis zwischen der Zahl der Protonen und Neutronen. In der Regel haben die Atomkerne immer etwas mehr Neutronen als Protonen, sie dürfen aber auch nicht zu viele Neutronen haben: Die Neutronen wirken als Bindemittel für die sich elektrisch abstoßenden Protonen.

### 2.1.3. Die Spaltung von Atomkernen: Frei werdende Spaltungsenergie

Aus dem bisher Gesagten ist klar, daß man durch Zuführen von Energie einen Atomkern auch wieder in kleinere Bruchstücke, ja bis in seine Bausteine, die Protonen und Neutronen, zerlegen kann. Dabei zeigt sich, daß die Kerne

der ganz schweren Atome am ehesten auseinanderbrechen. Die wichtigste Erkenntnis in diesem Zusammenhang geht auf **Otto Hahn** und **Fritz Straßmann** zurück, die im Jahre 1938 zeigen konnten, daß die Kerne der Atome des Uranisotops 235 (die Zahl gibt die Anzahl der Kernteilchen, 92 Protonen + 143 Neutronen, an) beim Einfang ganz langsamer, freier Neutronen soviel Energie gewinnen, daß der dabei entstehende Kern des Uran 236 praktisch sofort in zwei mittelschwere Atomkerne zerplatzt.

**Da die beiden entstehenden Kerne sehr viel fester gebunden sind, wird dabei Energie frei!** Abb. 6 zeigt die Spaltung von Uran 235 schematisch. Ebenso wichtig ist aber, daß im Durchschnitt auch noch 2 bis 3 Neutronen freigesetzt werden.

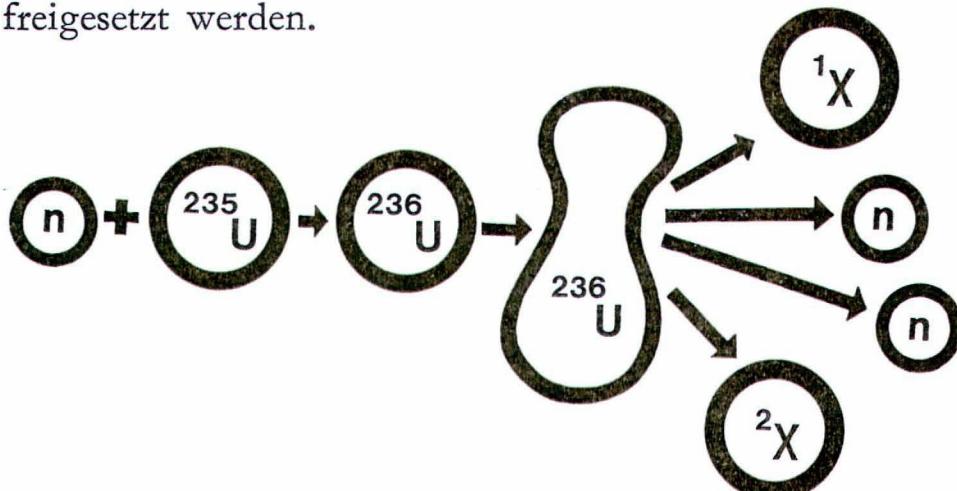


Abb. 6: Schematische Darstellung der Spaltung von  $^{235}U$  mit Hilfe eines Neutrons

Abb. 7 zeigt die Massenverhältnisse.

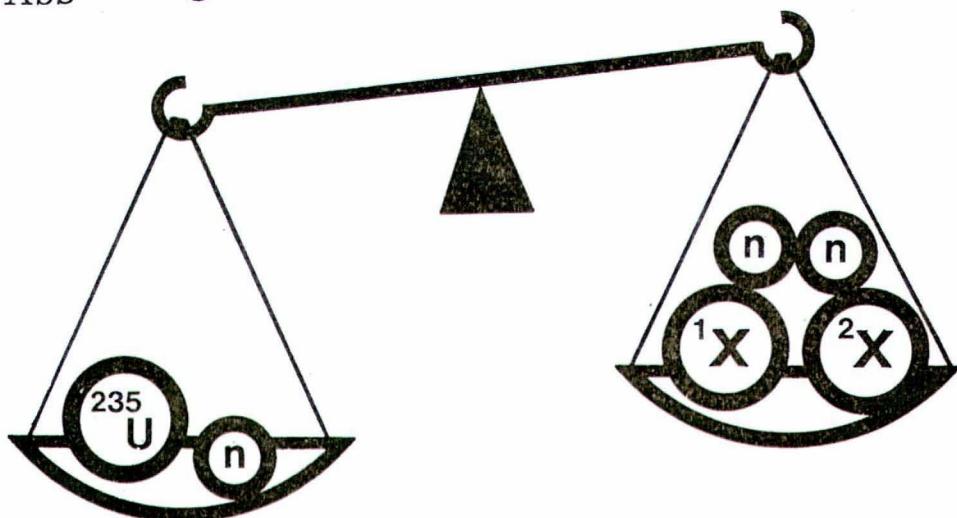


Abb. 7: Massenbilanz bei der Spaltung.  $^1X$ ,  $^2X$ =entstehende mittelschwere Kerne; n=Neutron

Die Massendifferenz wurde in Energie umgewandelt, die als Bewegungsenergie der entstehenden Neutronen und kleineren Kerne auftritt und sich letztlich als Erwärmung bemerkbar macht. Man nennt die kleineren Kerne auch **Spaltprodukte**.

Bei der Spaltung aller in 1 g Uran 235 enthaltenen Atomkerne wird eine Energie von 22 817 kWh frei. Man kann das auch so ausdrücken, daß pro Tag und pro 1 MW (1 Million Watt) Leistung eines Kernkraftwerkes etwa 1 g Uran 235 verbraucht wird. Rund **80% dieser Energie wird als Bewegungsenergie der Spaltprodukte**, d. h. als Wärme frei.

## 2.1.4. Die Kettenreaktion: Das Prinzip des Kernspaltungsreaktors

Für die technische Nutzung der bei der Spaltung frei werdenden Energie sind die während des Spaltprozesses freigesetzten Neutronen wesentlich. Dadurch kann der Spaltprozeß in Form einer Kette selbsterhaltend ablaufen. Das erste den Prozeß einleitende Neutron steht praktisch immer aus dem Weltraum oder aus radioaktiven Prozessen in der Erde zur Verfügung (Hintergrundstrahlung). Abb. 8 macht den Ablauf deutlich.

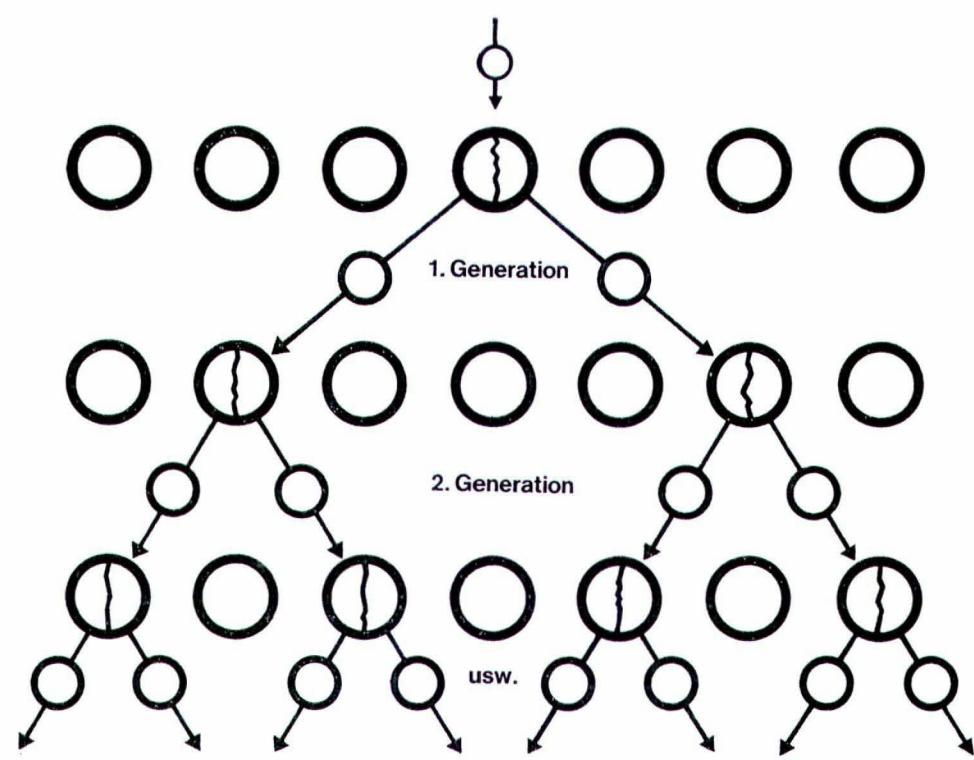


Abb. 8 : Veranschaulichung des Anwachsens der Kettenreaktion in reinem  $^{235}U$

In einem Atomreaktor kommt eine regelbare Kettenreaktion zur Anwendung. Man kann, je nach Bedarf, ein Anwachsen oder Abnehmen der Neutronenzahl in den aufeinanderfolgenden Generationen realisieren, bzw. man hat die Möglichkeit, sie auch konstant zu halten.

**Da die Zahl der gespaltenen Kerne direkt proportional zur Zahl der Neutronen ist, regelt man also mit der Regelung des Neutronenhaushaltes auch die Energieproduktion.**

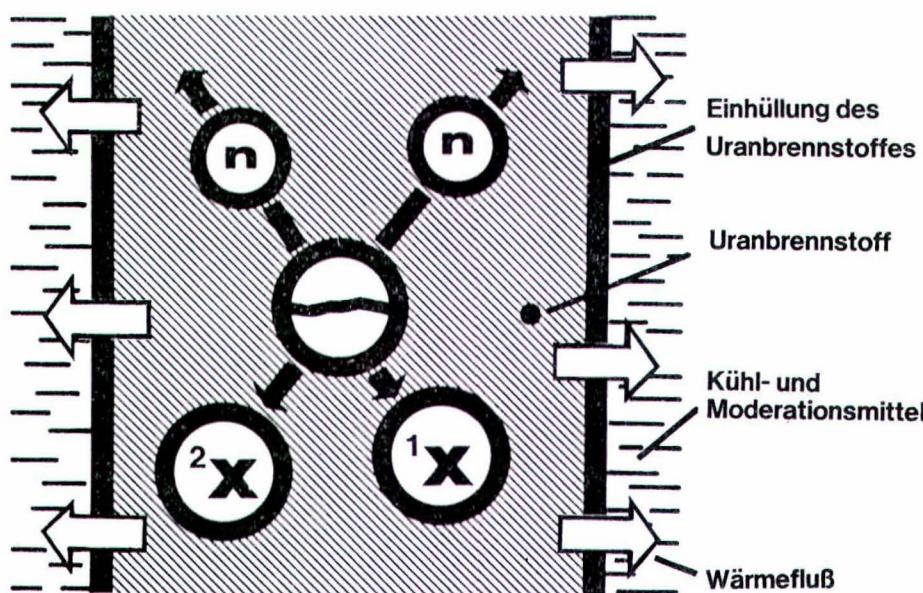
Die technische Realisierung einer regelbaren Maschine zur Nutzung der Atomenergie aufgrund der Spaltung war nicht ohne Schwierigkeiten. Eine solche wesentliche Schwierigkeit liegt am Uran selbst. Das chemische Element Uran kommt in der Natur zu 99,3% als das Uranisotop 238 vor, das für eine Kettenreaktion nicht geeignet ist. Das Uranisotop 235 ist dagegen nur mit 0,7% vertreten. Dieser geringe Anteil reicht allerdings schon aus, um mit Hilfe von Natururan einen Reaktor zu betreiben.

## 2.2. Kraftwerke und Reaktoren

### 2.2.1. Kraftwerke

Allgemein dienen Kraftwerke zur Erzeugung elektrischer Energie aus anderen Energieformen, insbesondere aus Wasserkraft und thermischer Energie. Man nennt letztere auch thermische Kraftwerke. Diesen ist gemeinsam, daß Wasserdampf hoher Temperatur erzeugt wird, der Turbinen treibt, die ihrerseits die Generatoren antreiben. In klassischen thermischen Kraftwerken erzeugt man den Wasserdampf in mit Gas, Öl oder Kohle beheizten Kesselanlagen, in Kernkraftwerken mit Hilfe eines Reaktors; der Reaktor dient also als Heizanlage. Ein Kernkraftwerk ist somit eine spezielle Form eines thermischen Kraftwerkes, die Energie fällt zunächst als „Wärme“ an. Sie entsteht hier aber nicht durch Verbrennung. Die bei der Spaltung entstehenden Spaltprodukte führen, wie bereits erwähnt, etwa 80% der frei werdenden Energie als Bewegungsenergie mit sich. Sie werden sehr schnell abgebremst und bleiben innerhalb des Brennelements „stecken“. Damit übertragen sie ihre Bewegungsenergie auf die Atome

des Brennelementmaterials, das sich sehr stark erwärmt (siehe Abb. 9).



*Abb. 9 : Schematische Darstellung des Spaltvorganges in einem Brennelement*

Diese Wärme **muß** durch ein Kühlmittel abgeführt werden, da die Brennelemente sonst schmelzen, was zu einem schweren Unfall mit Freisetzung radioaktiver Substanzen führen würde.

Es ist nicht möglich, Wärme restlos in elektrische Energie umzuwandeln, dies geht grundsätzlich nur zu einem gewissen Teil. Der in elektrische Energie umsetzbare Anteil der als Wärme erzeugten Gesamtenergie wird als Wirkungsgrad in Prozent angegeben; er hängt von der Temperatur des Dampfes **und** von der Temperatur des verfügbaren Kühlwassers ab. Je größer die Differenz dieser Temperaturen ist, umso günstiger ist der thermische Wirkungsgrad, der nie auch nur annähernd 100% erreichen kann (50% gilt schon als gut), d. h., daß mindestens die Hälfte der anfallenden Wärmeenergie an das Kühlwasser abgeführt werden muß. Bei vielen Kraftwerken an einem Fluß führt dies zu einer starken, unter Umständen unzulässigen Erwärmung des Flußwassers. In Zukunft wird man weitgehend gezwungen sein, die Wärme durch Kühltürme an die Atmosphäre abzugeben. Auch dies kann störende Einflüsse auf das lokale Klima haben. Man plant, nach Möglichkeit die Abwärme bei höherer Temperatur abzuführen und für Heizzwecke einzusetzen. Da Kernkraftwerke, wie sie heute gebaut wer-

den, Dampf erzeugen, dessen Temperatur niederer ist als bei konventionellen thermischen Kraftwerken, ist ihr thermischer Wirkungsgrad etwas schlechter. Außerdem werden Kernkraftwerke aus wirtschaftlichen und technischen Gründen für große Leistungen gebaut. Die über die Kühlung abzuführende Leistung ist daher auch sehr groß, was zu Abwärmeleistungsproblemen führen kann.

## 2.2.2. Reaktortypen

Bevor auf die einzelnen Reaktortypen eingegangen wird, sollen einige grundsätzliche Feststellungen getroffen werden.

Eine Anordnung, in der eine kontrollierte Kettenreaktion der Kernspaltung im Uran für längere Zeit aufrechterhalten werden kann, wird als Kernreaktor bezeichnet. Während des Betriebes laufen folgende Vorgänge ab:

1. Schnelle Neutronen rufen im Uran 238, Neutronen beliebiger Geschwindigkeit im Uran 235 Spaltungsprozesse hervor, bei denen wiederum Neutronen freigesetzt werden.
2. Neutronen bestimmter Geschwindigkeit werden von Uran 238 eingefangen; damit wird zunächst das Uranisotop 239 gebildet, das schließlich in Plutonium 239 übergeht. Dieses hat ähnliche Spaltbarkeitseigenschaften wie Uran 235.
3. Neutronen werden sowohl vom Uran als auch vor allem vom Konstruktionsmaterial des Reaktorkerns, vom Kühlmittel und, soweit vorhanden, vom Moderator (siehe unten) eingefangen, ohne eine Spaltung hervorzurufen oder neues spaltbares Material zu erzeugen.
4. Neutronen entweichen durch die Oberfläche des Reaktorkerns.

Zur Aufrechterhaltung einer Kettenreaktion ist es erforderlich, daß im Mittel je eines der aus einer Spaltungsreaktion entstandenen Neutronen wieder eine Spaltung hervorruft. Das bedeutet, daß die Verluste durch Entweichen aus der Oberfläche klein gehalten werden müssen, was bei gegebener Anordnung nur möglich ist, wenn das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen eine kritische Größe unterschreitet. Ferner dürfen bei der Konstruktion des Reaktorkernes, als Kühlmittel usw. nur Substanzen

verwendet werden, die möglichst wenige Neutronen absorbieren.

Soweit die Punkte, die bei jedem mit Uran betriebenen Reaktor zutreffen. Nun sei einiges zu den verschiedenen Formen der technischen Verwirklichung gesagt.

Man unterscheidet zwischen Natururan-Reaktoren und Reaktoren, die mit angereichertem Uran (das heißt mehr als 0,7% Uran 235) betrieben werden.

### a) Der Natururan-Reaktor:

Es handelt sich hier wie bei allen derzeit als Leistungs-Reaktoren in Betrieb stehenden Reaktoren um einen sogenannten „thermischen Reaktor“. Dabei bezieht sich das Wort „thermisch“ auf die Bewegungsenergie der Neutronen, die die Spaltung hervorrufen, und bedeutet, daß es sich um ganz langsame Neutronen handelt. **Je langsamer ein Neutron ist, umso leichter wird es von Uran 235 zur Einleitung einer Spaltung eingefangen.** Da aber die Neutronen beim Spaltprozeß mit einer Geschwindigkeit von etwa 20.000 km/s entstehen und die für die Spaltung günstigste Geschwindigkeit bei etwa 2 km/s liegt, müssen die Neutronen stark gebremst werden. (Solche Neutronen werden langsame oder thermische Neutronen genannt.) Dabei sollen natürlich möglichst wenige verlorengehen. Um dies zu erreichen, muß man ein spezielles **Bremsmittel, genannt Moderator,** verwenden. Die Neutronen stoßen mit den Atomen des Moderators zusammen und verlieren dabei Energie, ähnlich wie eine Billardkugel beim Stoß mit einer zweiten; die Energie wird am besten ausgetauscht, wenn beide Kugeln die gleiche Masse haben.

Stoßpartner gleicher Masse sind für die Bremsung am günstigsten. Daher würde ein Wasserstoffkern, der praktisch gleiche Masse wie das Neutron hat, der beste Stoßpartner sein. Allerdings reagiert der Wasserstoffkern mit dem Neutron gelegentlich unter der Bildung von zweifach schwerem Wasserstoff (Neutroneneinfangprozeß), wodurch das Neutron für die Uran 235-Spaltung verlorengeht. Wasser, dessen Wasserstoffanteil von zweifach schwerem Wasserstoff gestellt wird, ist daher ein besserer Moderator — man nennt es **schweres Wasser**, im Gegensatz zu **leichtem Wasser**. Einfangprozesse mit schwerem

Wasserstoff sind sehr selten. **Graphit** (Kohlenstoff) ist auch ein guter Moderator, kommt allerdings dem schweren Wasser nicht gleich.

Man erzielt einen besseren Neutronenhaushalt, wenn man das Uran in Form von Brennelementen in die Moderatorsubstanz einführt und nicht gleichförmig (homogen) mit dem Moderator z. B. mit Wasser, vermischt. Man nennt eine solche Anordnung eine **heterogene Brennelement-anordnung**. Sie kommt praktisch bei allen heute verwendeten Reaktoren zum Einsatz (s. Abb. 9).

Zur Spaltung trägt in erster Linie Uran 235 bei. Langsam Neutronen kommt, wie bereits gesagt, eine besonders große Wahrscheinlichkeit zu, einen Spaltvorgang beim Uran 235 einzuleiten. Verwendet man als Reaktorbrennstoff Natururan, so ist wegen der großen Zahl der Uran 238-Kerne die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, daß viele Neutronen auch mit diesen zusammenstoßen; ist die Geschwindigkeit der Neutronen hierbei groß, so kommt es auch mit Uran 238 vereinzelt zu Spaltungsreaktionen. In sehr vielen Fällen aber wird das Neutron vom Uran-238-Kern eingefangen. Diese Neutronen sind damit für die Einleitung eines Spaltvorganges beim Uran 235 verloren. Man erkennt daraus, daß eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion mit Hilfe von Natururan nur unter bestimmten Bedingungen erreicht werden kann. Man braucht hiezu einen Moderator, der die Neutronen abbremst und die Einfangverluste durch U 238 entscheidend vermindert und der fast keine Neutronen absorbiert. Die technische Realisierung gelang auf zwei verschiedenen Wegen, indem einmal Graphit (englische „Magnox“-Reaktoren) und einmal schweres Wasser (kanadische „Candu“-Reaktoren) verwendet wurde.

Das folgende Schema gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Neutronenbilanz in einem Reaktor:

- 100 langsame Neutronen werden durch Uran 235 absorbiert und verursachen Spaltungen, es entstehen neu  
↓  
250 Spaltneutronen, davon  
↓ entweichen 60 Neutronen während der Bremsung durch die Oberfläche, 30 Neutronen werden während der Bremsung durch Uran 238 absorbiert,

- 160 Neutronen werden gebremst, davon  
 ↓  
 entweichen 15 Neutronen als langsame Neutronen  
 durch die Oberfläche,
- 145 langsame Neutronen sind für die Absorption ver-  
 fügbar, davon werden 45 Neutronen durch den  
 Moderator, Uran 238 und andere Stoffe absorbiert,
- 100 langsame Neutronen werden durch Uran 235 absor-  
 biert und verursachen Spaltungen.
- ↓  
 Die Reaktion kann nach dem gleichen Schema weiter-  
 laufen.

Die Regelung eines Reaktors erfolgt über einen Eingriff in diese Kette von Ereignissen, indem man mit Neutronenabsorbern je nach Bedarf mehr oder weniger Neutronen zur Einleitung eines Spaltvorganges zuläßt (Regelstäbe, Absorberstäbe).

Wenn nun der Moderator, der ja die Brennelemente einschließt, eine Flüssigkeit ist, etwa schweres Wasser, so kann diese gleichzeitig als Kühlmittel dienen. Abb. 10a

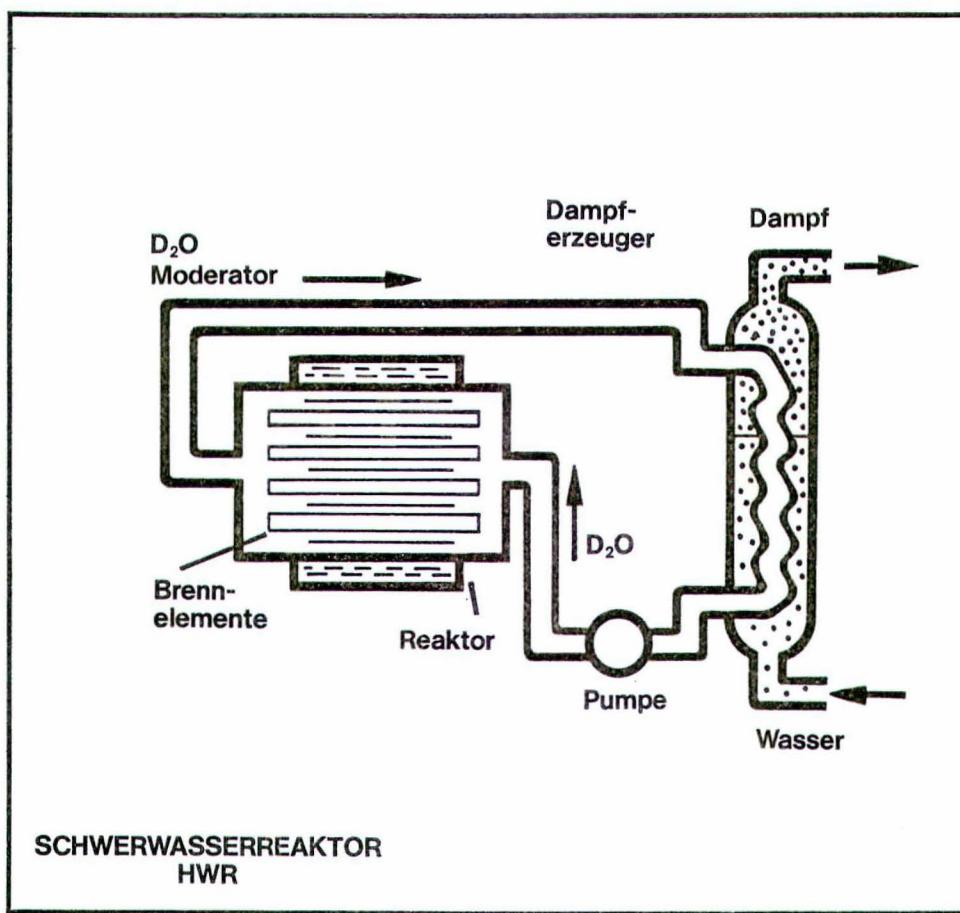


Abb. 10a: Funktionsschema des Schwerwasser-Reaktors. D<sub>2</sub>O = Schweres Wasser

zeigt die Verhältnisse für den Schwerwasser-Reaktor. Da schweres Wasser eine sehr teure Substanz ist, hält man es in einem geschlossenen Kühlkreis und erzeugt mit Hilfe eines Wärmetauschers normalen Wasserdampf für den Turbinenbetrieb. Abb. 10b zeigt die Situation bei einem

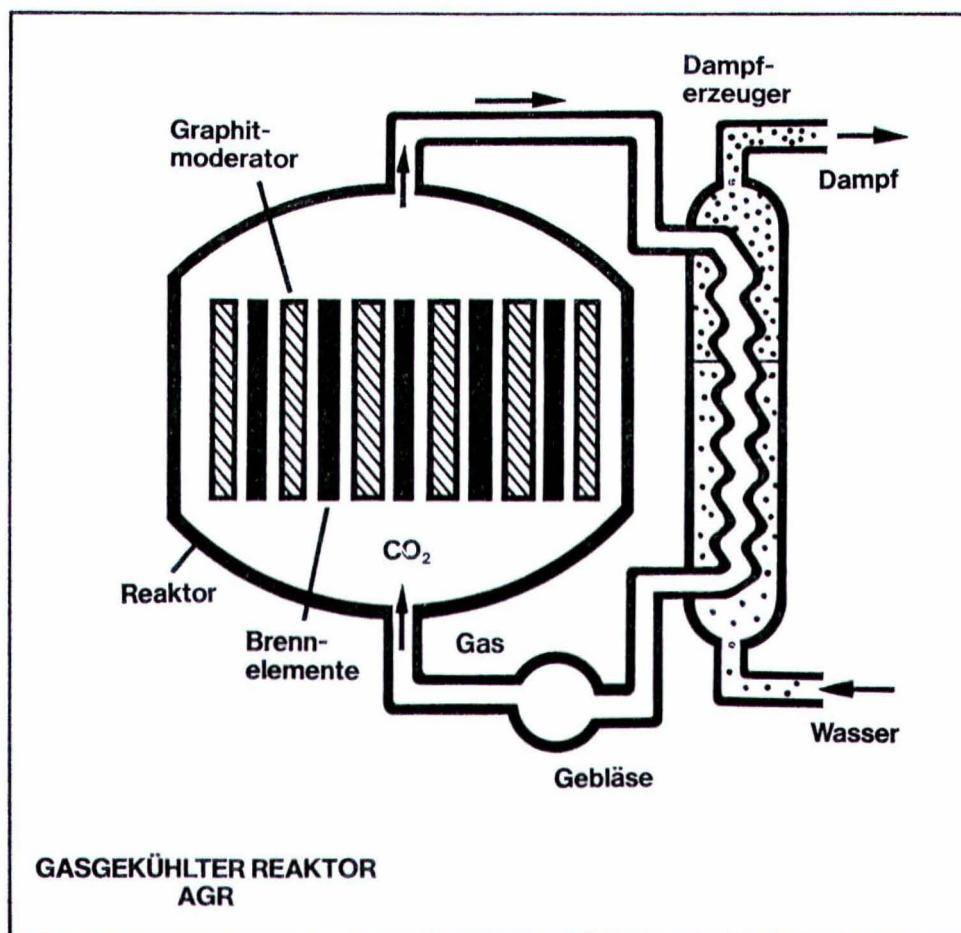


Abb. 10 b : Funktionsschema des Gasgekühlten Reaktors.  $CO_2$  = Kohlendioxid

graphitmoderierten Reaktor, der mit Kohlendioxidgas gekühlt wird. Auch hier ist ein als Dampferzeuger wirkender Wärmetauscher notwendig. Graphitmoderierte Natururan-Reaktoren werden heute allerdings nicht mehr gebaut.

### b) Der Leichtwasser-Reaktor:

Um in der Frage des Neutronenhaushaltes nicht so sorgfältig vorgehen zu müssen bzw. um auf schweres Wasser als Moderator verzichten zu können, erzeugt man Brennelemente, in denen der Anteil an Uran 235 gegenüber dem in Natururan erhöht ist. Man nennt eine solche Mischung

aus Uran 238 und Uran 235 **angereichertes Uran**. Meist werden Anreicherungen zwischen 2 und 4% verwendet. Man kann nun auch **leichtes Wasser** als Moderator und gleichzeitig als Kühlmittel verwenden. Die Leichtwasser-Reaktoren (LWR) sind die derzeit am häufigsten gebauten Leistungs-Reaktoren. Man unterscheidet zwei Ausführungen: Druckwasser-Reaktoren und Siedewasser-Reaktoren (Abb. 10c und 10d). Der Druckwasser-Reaktor ist ein

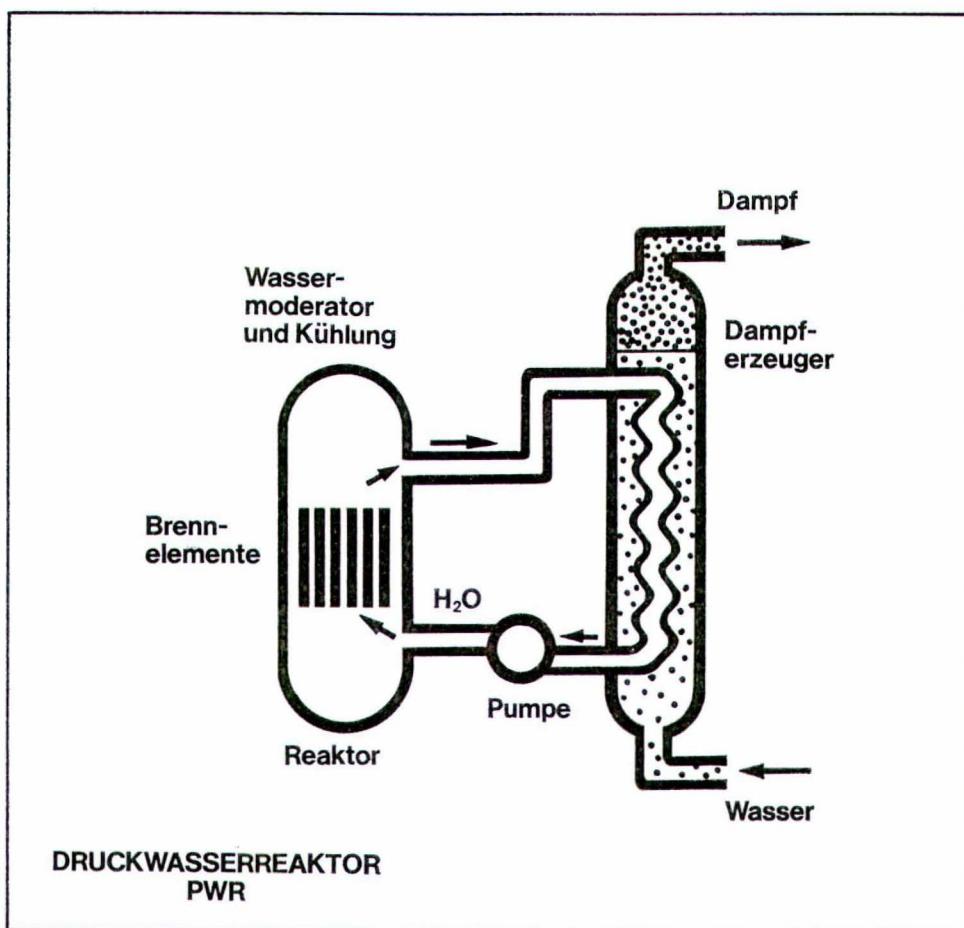


Abb. 10c: Druckwasser-Reaktor

Zweikreissystem mit Wärmetauschern zur Dampferzeugung im Sekundärkreislauf. Im Siedewasser-Reaktor wird im Primärkühlkreislauf Dampf erzeugt, der direkt auf die Turbine geführt werden kann.

### c) Weitere Kernkraftwerkskonzeptionen:

Gegenüber kohle- oder ölfeuerten Kraftwerken ist bei Kernkraftwerken mit Wasserkühlung die Austrittstemperatur des Kühlmittels wegen der beschränkten Belastbarkeit der in den Reaktor eingebauten Materialien relativ niedrig

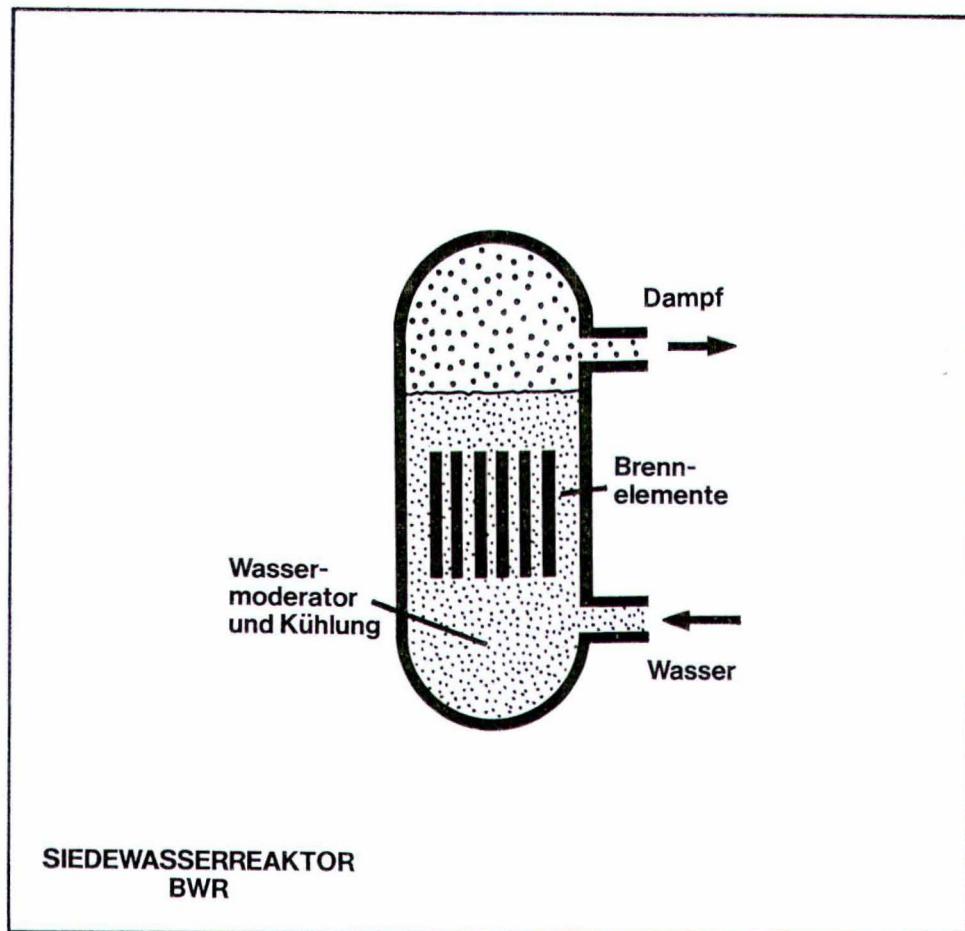


Abb. 10d: Siedewasser-Reaktor

(etwa 300 °C). Deshalb wurden **Hochtemperatur-Reaktoren** entwickelt, die Gasaustrittstemperaturen bis 900 °C liefern.

Eine weitere Entwicklung betrifft die schnellen **Brut-Reaktoren**. Bei diesem Reaktortyp werden die Neutronen nicht mehr mit einem Moderator abgebremst, sondern es wird die Kettenreaktion durch die schnellen Neutronen direkt aufrechterhalten. Das Kühlmittel dient hier somit nur mehr zur Wärmeabfuhr. Dabei muß man die Nachteile in Kauf nehmen, daß sehr hoch angereicherter Brennstoff zur Aufrechterhaltung der Reaktion erforderlich ist, und weiters, daß die Regelung komplizierter wird. Das entscheidende Motiv für die Entwicklung dieses Typs ist die Erwartung, daß in diesen Reaktoren, wie der Name andeutet, mehr Spaltstoff produziert als verbraucht wird, da je Spaltung von U 235 mehr als ein Neutron von Uran-238-Kernen eingefangen wird. Dieses nicht spaltbare Isotop wandelt sich nach dem Einfang eines Neutrons rasch durch

aufeinanderfolgende Isotopenumwandlungen in Plutonium 239 um, das wiederum ein Spaltstoff ähnlich wie Uran 235 ist. Das Uran 238 befindet sich sowohl in den Brennelementen, vermischt mit Uran 235, als auch rein in einem den Reaktorkern umgebenden Mantel, dem „Brutmantel“. Auch im Hochtemperatur-Reaktor kann während des Betriebes in erheblichem Ausmaß neuer Brennstoff erzeugt werden, allerdings hier etwas weniger, als verbraucht wird: Thorium 232 wird in spaltbares Uran 233 umgewandelt.

Das Prinzip des Hochtemperatur- und schnellen Brutreaktors ist in Abb. 11 dargestellt. Die Funktionsfähigkeit

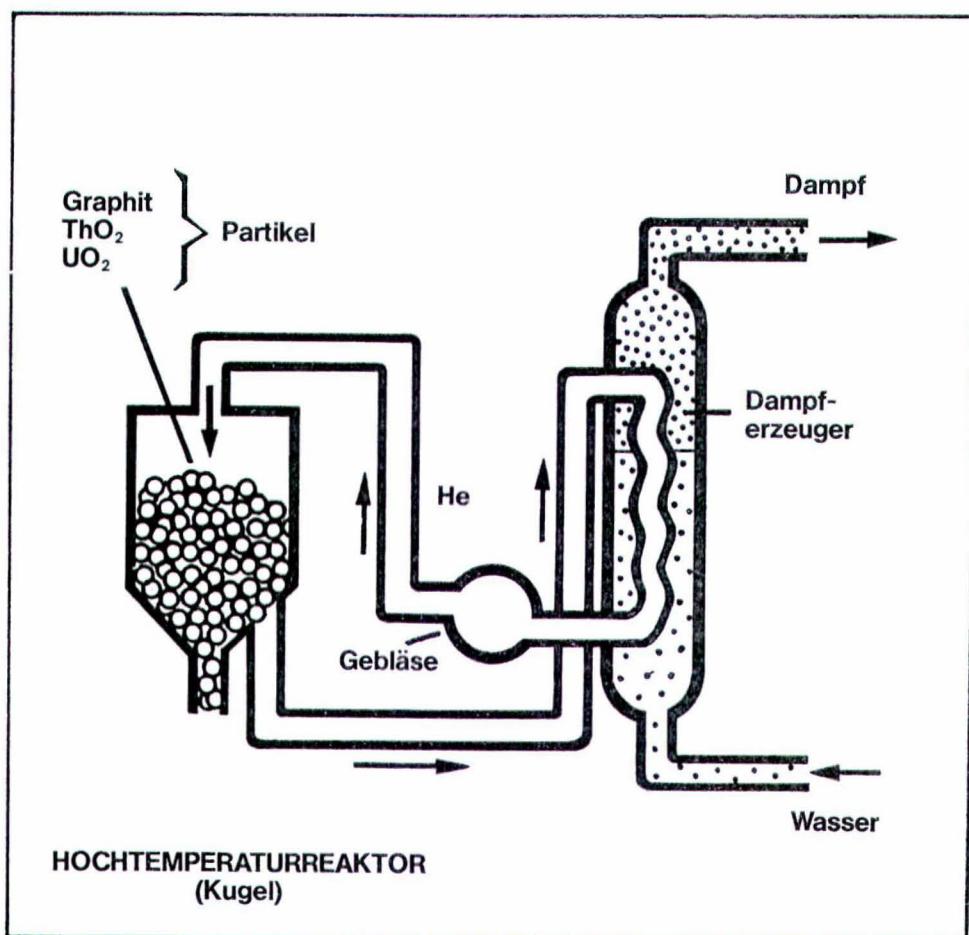
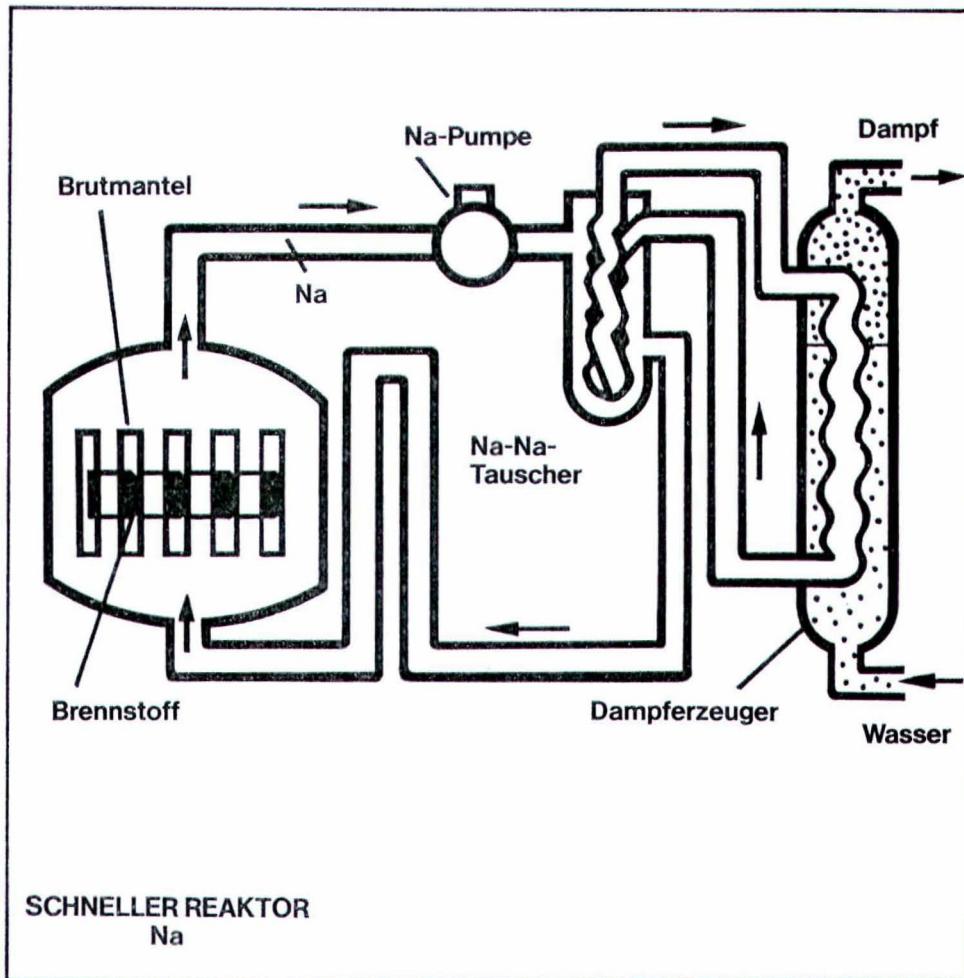
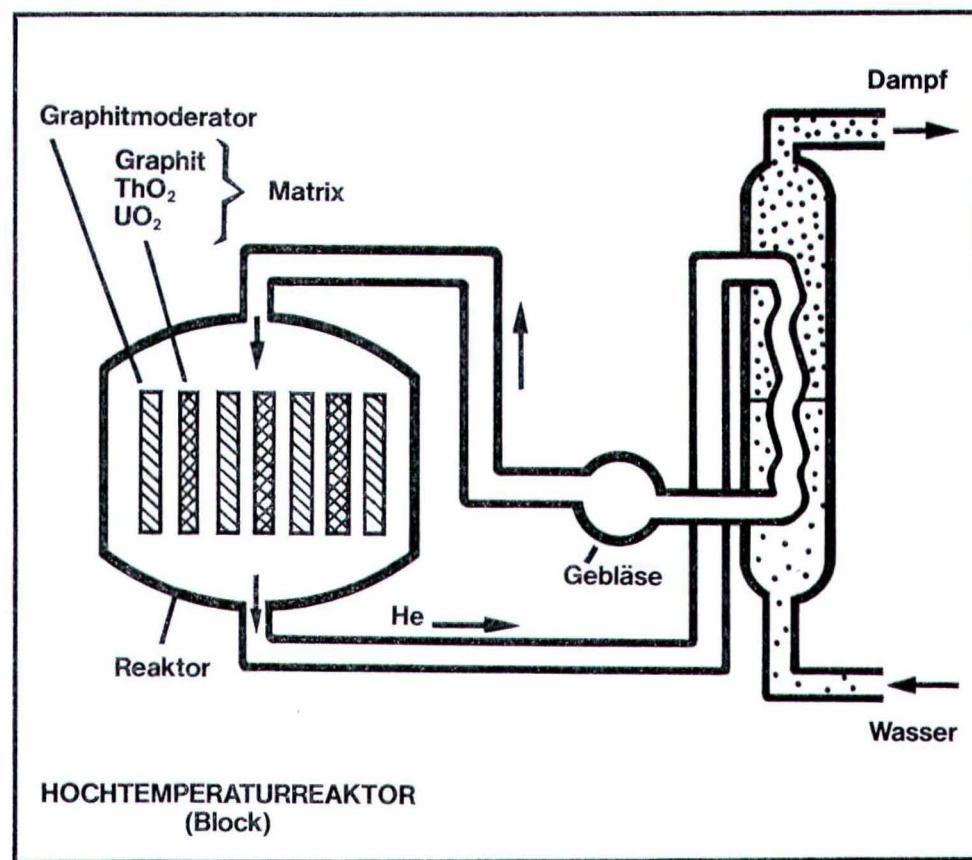
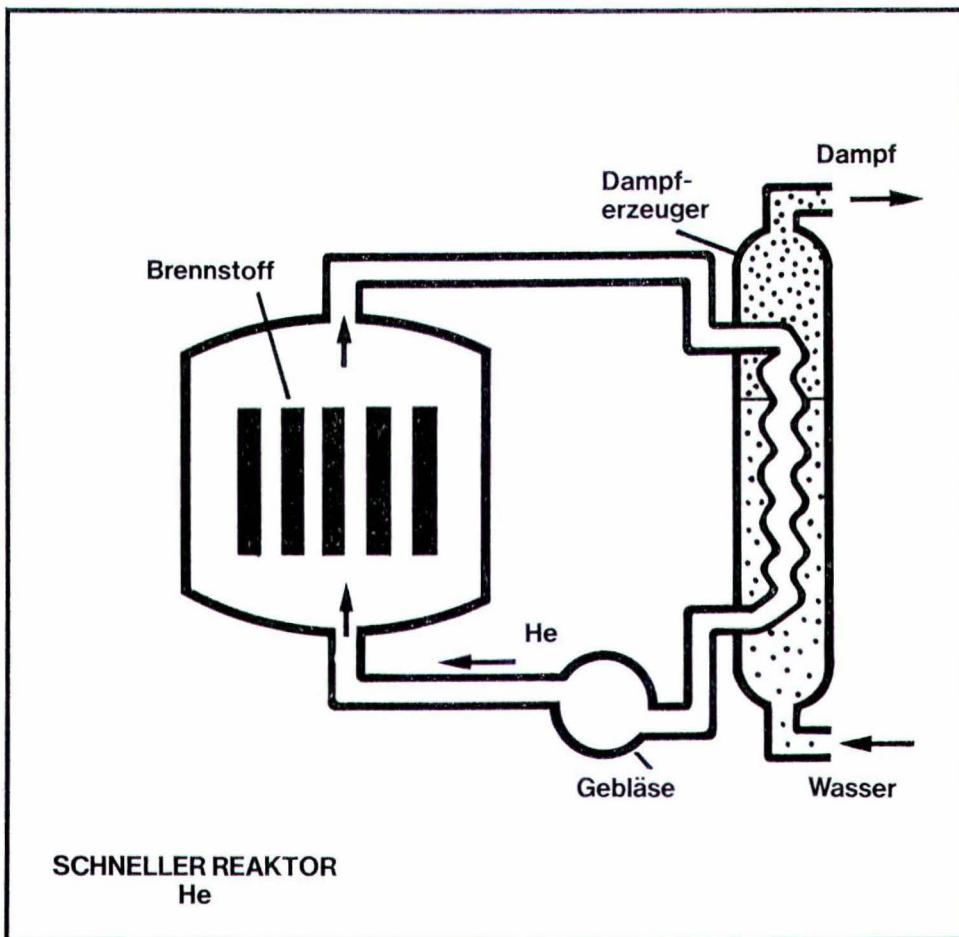


Abb. 11: Funktionsschema des Hochtemperatur-Reaktors (Kugelaufentyp Seite 40 und Blocktyp Seite 41) und des schnellen Brutreaktors (natrium- und heliumgekühlt, Seiten 41 und 42).  $\text{ThO}_2$  = Thoriumdioxid;  $\text{UO}_2$  = Urandioxid; He = Helium; Na = Natrium

dieser Reaktortypen wurde bereits großtechnisch erprobt, der kommerzielle Einsatz als Kernkraftwerk steht jedoch derzeit in Österreich nicht zur Debatte.





Es sei erwähnt, daß in der Natur Kernspaltungsreaktionen in ähnlicher Weise, wie sie in Reaktoren vorkommen, abgelaufen sind. Damals war der Gehalt der Erzlagerstätten an Uran 235 höher (etwa 3% gegenüber jetzt 0,7%). Als in diese Uranlagerstätten Wasser zutrat und als Moderatorsubstanz wirksam wurde, begann eine Kettenreaktion zu laufen. Ein solcher „fossiler“ Natur-Reaktor wurde in Gabun (Afrika) entdeckt; er „arbeitete“ vor etwa 1 Milliarde Jahren (im Präkambrium) etwa 1 Million Jahre lang und lieferte eine Energie von etwa 3000 Megawatt-Jahre.

### 2.2.3. Radioaktivität der Spaltprodukte

Als **Radioaktivität** bezeichnet man die Eigenschaft von Atomkernen, spontan, d. h. ohne Einfluß von außen, Strahlen auszusenden. Es gibt drei Arten radioaktiver Strahlen:

- Alpha-Strahlen; der Atomkern sendet ein Alphateilchen (= Kern des Atoms Helium 4) unter Umwandlung in einen anderen Atomkern aus.

- b) Beta-Strahlen; der Atomkern sendet ein Betateilchen (= Elektron oder Positron) unter Umwandlung in einen anderen Atomkern aus.
- c) Gamma-Strahlen; ein „angeregter Atomkern“, d. h. ein solcher, der überschüssige Energie besitzt, sendet die Energie in Form von Gamma-Strahlen (sehr kurzwelliges unsichtbares „Licht“) aus, er bleibt als Atomkern des gleichen Isotops erhalten.

Sehr oft haben die beim Alpha- und Beta-Zerfall neu entstehenden Kerne solche überschüssige Energie. Daher sind die Gamma-Strahlen meist Begleiterscheinungen der Alpha- und Beta-Zerfälle. Obwohl die Alpha-, Beta- und Gamma-Zerfälle von völlig verschiedener physikalischer Natur sind, sind sie in dem Sinn gleich, als sie alle drei dem sogenannten „radioaktiven Zerfallgesetz“ gehorchen.

Danach ist jeder instabile Kern durch eine für ihn charakteristische Halbwertszeit gekennzeichnet. Diese Zeit gibt an, in welchem Zeitraum von einer großen Anzahl von Atomkernen eines instabilen Isotops gerade die Hälfte zerfallen ist. Greift man allerdings aus den vielen Kernen einen bestimmten heraus, so weiß man nicht, wann gerade dieser zerfallen wird; der Zerfallsprozeß ist ein statistischer Vorgang, und die Halbwertszeit ist nur für eine große Zahl von Kernen eine sinnvolle Angabe; sie ist eine Eigenschaft der Atomkerne und von außen nicht beeinflußbar. Halbwertszeiten überdecken einen außerordentlich großen zeitlichen Bereich. Extreme Beispiele dafür sind Uran 238 als Alphastrahler mit einer Halbwertszeit von 4,5 Milliarden Jahren und Bor 13, ein Betastrahler mit 0,03 Sekunden.

Die radioaktiven Strahlen können, abhängig von den Eigenschaften der sie aussendenden Kerne, sehr energiereich sein. Energieriche geladene Teilchen vermögen aber in Wechselwirkung mit Molekülen und Atomen diese zu ionisieren, d. h. Elektronen freizusetzen, wodurch der Rest des Atoms bzw. Moleküls eine positive elektrische Ladung annimmt; es wird ein positives Ion. Ereignen sich solche Ionisationsprozesse in lebenden Zellen, so kann es zu Schädigungen von Molekülen kommen, die für die biologischen Vorgänge im Organismus wichtig sind (vgl. Kapitel 3). Je mehr Energie durch die Strahlung dem bestrahlten Material (dem Gewebe, der Zelle usw.) übertragen wird, umso größer ist die Gefahr einer Schädigung.

Aus diesem Grund kommt auch der Messung der Energiedosis eine besondere Bedeutung zu. Unter **Energiedosis** versteht man die absorbierte Energie pro Einheit der absorbierenden Masse. Die Einheit ist

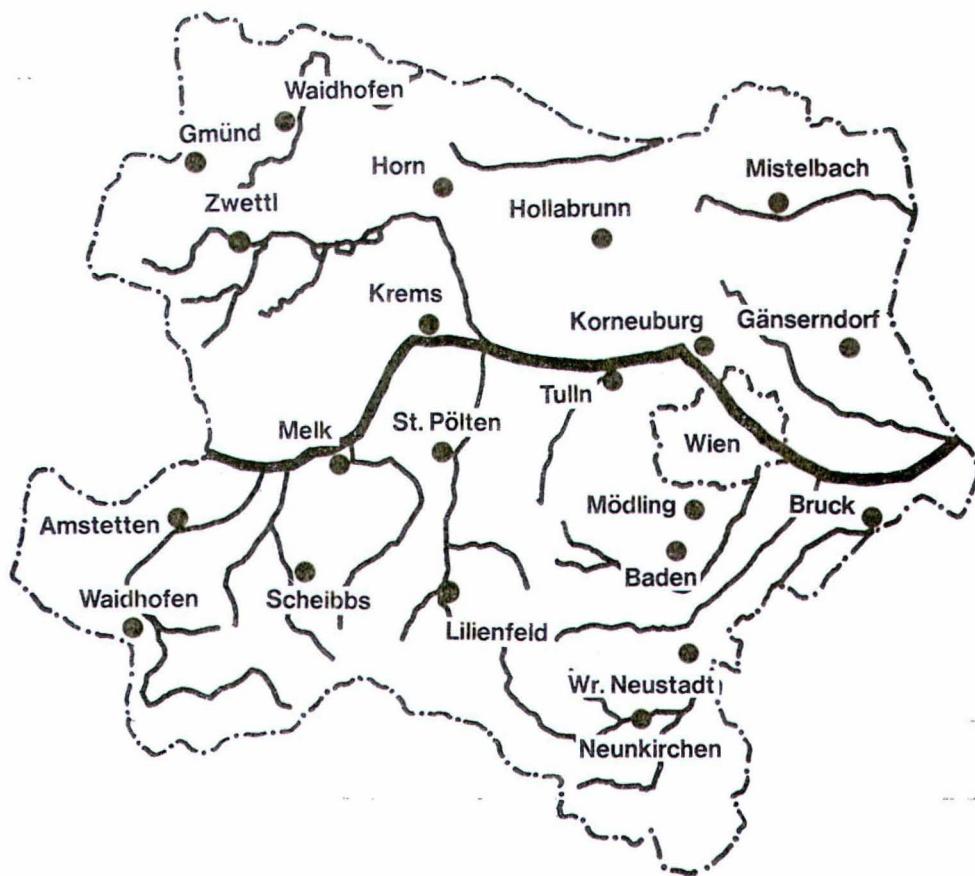
$$1 \text{ rad} = 0,01 \frac{\text{Wattsekunden absorbierter Strahlungsenergie}}{\text{Kilogramm Absorbermasse}}$$

Radioaktive Isotope sind auch in unserer natürlichen Umgebung vorhanden und verursachen eine **natürliche Strahlenbelastung** des Menschen und seiner Umwelt. Es handelt sich dabei vorwiegend um Kalium 40 und eine Reihe anderer Isotope, wie etwa Radium 226. Diese radioaktiven Substanzen sind seit dem Entstehen der Erde in den Gesteinen enthalten. Nachdem die chemischen Elemente in den verschiedensten Gesteinsformationen mit sehr unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden sind, ist auch bei den verschiedenen geologischen Formationen mit sehr unterschiedlicher natürlicher Strahlenbelastung zu rechnen. Charakteristische Werte für verschiedene Bezirke von Niederösterreich zeigt Abb. 12. In einigen Gebieten der Erde (Atlantikküste Brasiliens) werden Werte bis 8,7 rad/Jahr gemessen.

Einen wesentlichen Beitrag zur individuellen natürlichen Strahlenbelastung stellen auch die in den Baumaterialien von Gebäuden enthaltenen radioaktiven Substanzen dar. So treten z. B. in einem Ziegelhaus bis zu 0,2 rad/Jahr, in manchen Betonbauten nur etwa 0,05 rad/Jahr auf.

Auch aus dem Weltall werden die Menschen dauernd mit Strahlung belastet, deren Stärke mit zunehmender Seehöhe zunimmt. In 200 m Seehöhe tritt durch die kosmische Strahlung zusätzlich eine Belastung von etwa 0,03 rad/Jahr auf; in 2000 m Seehöhe beträgt dieser Anteil bereits 0,08 rad/Jahr.

Die Strahlenbelastung, welche durch Kernkraftwerke zusätzlich auftritt, wird man auch im Vergleich mit der immer vorhandenen natürlichen Strahlenbelastung betrachten müssen. Bei in Europa (Österreich) realisierten oder vor der Realisierung stehenden Kernkraftwerken sollen die zusätzlichen Belastungen selbst am Zaun des Kernkraftwerksgeländes höchstens 0,002 rad pro Jahr betragen; das wäre nur ein kleiner Bruchteil der natürlichen Strahlenbelastung. Dies versucht man durch Beschränkung der



*Abb. 12: Werte der natürlichen Strahlenbelastung in den verschiedenen Bezirken Niederösterreichs, angegeben in rad/Jahr*

Tulln	0,06	Mistelbach	0,08
Waidhofen/Ybbs	0,06	Korneuburg	0,08
Baden	0,065	St. Pölten	0,08
Bruck	0,065	Amstetten	0,08
Wien	0,065	Horn	0,09
Wr. Neustadt	0,07	Melk	0,1
Mödling	0,07	Krems	0,1
Gänserndorf	0,07	Hollabrunn	0,1
Lilienfeld	0,07	Waidhofen/Thaya	0,115
Scheibbs	0,075	Zwettl	0,12
Neunkirchen	0,075	Gmünd	0,162

zulässigen Konzentrationen von radioaktiven Stoffen in der Abluft und im Abwasser zu erreichen. In Österreich bestehen aufgrund des Strahlenschutzgesetzes sehr strenge Vorschriften.

Darüber hinaus wird man überlegen müssen, mit welcher Wahrscheinlichkeit es bei vorgeschriebenen Sicherheitsvorkehrungen zu einer größeren Belastung kommen kann. Solche Sicherheitsanalysen (siehe unten) sind in der Technik allgemein üblich. So fragt man z. B. beim Bau von Hochwasserschutzanlagen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein

Hochwasser bestimmter Wasserhöhe auftreten wird, etwa alle 10 Jahre, alle 100 Jahre oder alle 1 000 Jahre. Nach Abwägung von Kosten und Nutzen schreibt dann die Behörde dem Bauherrn vor, daß die Anlagen zum Beispiel einem 100jährigen Hochwasser standhalten müssen.

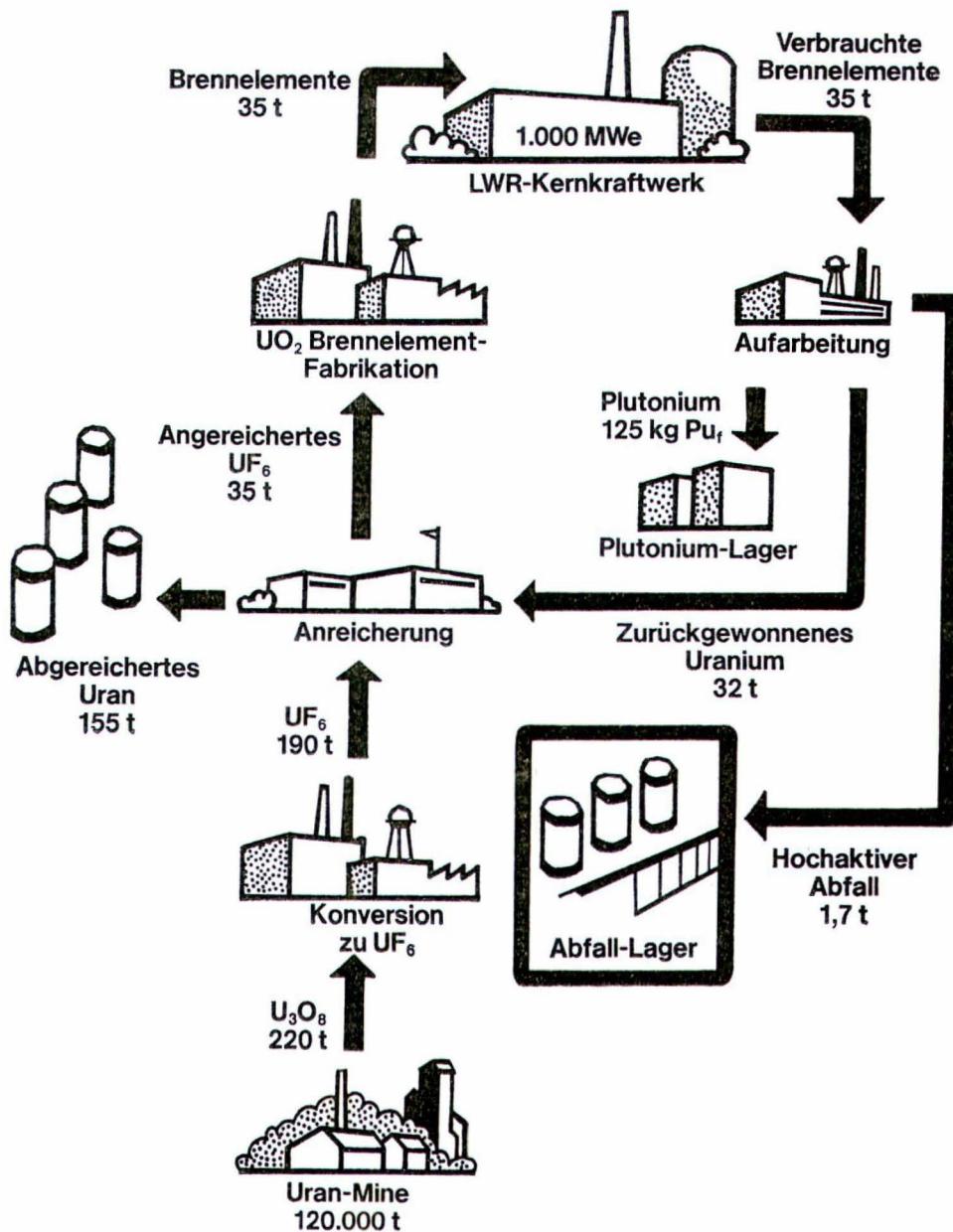
Die bei der Spaltung von Atomkernen entstehenden Spaltprodukte sind, wie bereits gesagt, meist radioaktiv und führen erst über eine Folge von Umwandlungen zu stabilen Endkernen. Da hiebei auch Isotope mit sehr langer Halbwertszeit vorkommen, werden in einem Reaktor große Mengen von radioaktivem Material erzeugt, dessen Strahlungspotential je nach der Halbwertszeit über Jahrhunderte, bei einigen Stoffen auch viele Jahrtausende erhalten bleibt. Beispiele für solche radioaktiven Folgeprodukte der Kernspaltung sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Isotop	Halbwertszeit
Strontium 90	28 Jahre
Zirkon 93	950 000 Jahre
Jod 131	8 Tage
Cäsium 135	2 600 000 Jahre
Cäsium 137	30 Jahre
Plutonium 239	24 300 Jahre

## 2.2.4. Kernbrennstoffkreislauf: Erzeugung von Plutonium

Wie jedes andere Kraftwerk benötigt auch ein Kernkraftwerk eine Versorgung mit Brennstoff — hier mit Uran — und eine Entsorgung des abgebrannten Brennstoffs. Nach dem Einsatz im Reaktor ist das zu handhabende Material stark radioaktiv; eine Wiederaufarbeitung und Lagerung dieses Materials ist nur unter besonderen Sicherheitsvorkehrungen möglich. Abb. 13 zeigt die Mengen, die bei einem 1000-Megawatt-Leichtwasserkernkraftwerk, also einem Kraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 1000 Millionen Watt, jährlich benötigt werden bzw. als Abfall anfallen.

Der schon erwähnte Einfang von Neutronen in Kernen des Uranisotops 238 führt zu einem wichtigen langlebigen radioaktiven Folgeprodukt, welches einer besonderen



*Abb. 13: Schema des Kernbrennstoffkreislaufes von der Uranerzgewinnung bis zur Lagerung des radioaktiven Abfalls. Die angegebenen Mengen entsprechen dem Betrieb eines 1000-MWe-Kernkraftwerkes. MWe = Megawatt (elektrisch); U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, UO<sub>2</sub> = Uranoxide; UF<sub>6</sub> = Uranhexafluorid; Pu = Plutonium*

Behandlung bedarf. Über den Zerfall des zuerst entstandenen Uran 239 bildet sich — mit dem Zwischenprodukt Neptunium — das **Plutoniumisotop 239**, das ein sehr langlebiger Alphastrahler ist und wegen seiner Verwendbarkeit sowohl als Kernbrennstoff als auch als mögliches Ausgangsmaterial für Atombomben von großer — auch politischer — Wichtigkeit ist. Nachdem Plutonium 239 ebenfalls ein guter Spaltstoff ist, tragen vor dem Entladen der Brennelemente die Spaltungen im Plutonium bereits

zu etwa 40% zur Energieerzeugung bei. Das Plutonium kann in einer Wiederaufarbeitungsanlage chemisch von Uran und den anderen Materialien der Brennelemente getrennt werden. Es kann dann in den Reaktor zurückgeführt werden (**Plutoniumrückführung**), wodurch weniger angereichertes Uran benötigt wird und gleichzeitig das gefährliche Plutonium wieder verbraucht wird, oder es kann für den Einsatz in schnellen Brut-Reaktoren gespeichert werden.

In der derzeitigen Situation bleibt das Plutonium jedoch in den Brennelementen, da die entsprechenden Wiederaufarbeitungsanlagen zumindest in Europa noch nicht verfügbar sind. In diesen Anlagen ist mit den hochradioaktiven Substanzen zu hantieren, und eine kommerziell vernünftige Größe einer derartigen, sehr kostspieligen Anlage verlangt, daß damit gleichzeitig mehrere Kernkraftwerke entsorgt werden.

Die Wiederaufarbeitung würde daher aller Voraussicht nach außerhalb Österreichs durchgeführt werden müssen, dieendlagerung der aktiven Abfälle jedoch innerhalb Österreichs zu erfolgen haben. Damit tritt unter anderem das Problem des Transportes hochaktiver Stoffe auf. Neben Plutonium werden noch eine Reihe anderer, sehr schwerer Isotope im Reaktor produziert, die neben der radioaktiven Strahlung auch sehr durchdringungsfähige Neutronen aussenden und damit gefährliche Strahler sind.

### 2.2.5. Sicherheitsbetrachtungen

Da in einem „thermischen“ Reaktor mit zunehmender Temperatur die Fähigkeit des Moderators, die Neutronen abzubremsen, geringer wird, besitzen solche Reaktoren eine natürliche Selbstregelung; eine erhöhte Energieerzeugung führt dadurch zu einer Abschwächung der Kettenreaktion und damit der Energieerzeugung; kurzzeitige starke Überhitzungen können allerdings auftreten. Auch ein schneller Reaktor kann sich durch seine konstruktive Anordnung, die Brennstoffzusammensetzung und das Vorhandensein von Uran 238 nie wie eine Atombombe verhalten. Dennoch sind Kernreaktoren große mögliche Gefahrenquellen. Sie müssen daher in dieser Hinsicht genau analysiert werden. Die nächstliegende Gefahr ist das Freisetzen von radioaktiven Stoffen.

Die verschiedenen Komponenten eines Kernkraftwerkes müssen deshalb so ausgelegt werden, daß die nach den Strahlenschutzgesetzen maximal zulässigen Strahlenbelastungen keinesfalls überschritten werden. Diese maximal zulässigen zusätzlichen Strahlenbelastungen sind zumindest außerhalb der Anlage wesentlich geringer als die natürliche Strahlenbelastung. Verschiedene Abschirm- und Rückhaltevorrichtungen innerhalb eines Kernkraftwerkes sollen gewährleisten, daß die zulässigen höchsten Strahlenbelastungen nirgends überschritten werden. Diese Vorrichtungen und ihre Wirksamkeit bestimmen die Sicherheit derartiger Anlagen:

1. Die Hüllrohre der Brennelemente dienen zum Festhalten der radioaktiven Spaltprodukte in den Brenn-elementen. Zu beachten ist, daß sich die Eigenschaften dieser Rohre durch die intensive Bestrahlung und durch die mechanische Beanspruchung verändern (sie versprüden). Mit einer geringen Leckrate ist schon im Normalbetrieb zu rechnen.
2. Das aus Beton und Wasser gebaute biologische Schild dient zur Abschirmung der intensiven Neutronen- und Gamma-Strahlung.
3. Ein Sicherheitsbehälter aus Stahl oder Spannbeton umschließt den Reaktor und alle anderen aktivitäts-führenden Systeme. Im Falle eines Unfalles von nicht allzu großem Ausmaß ist nur das Innere dieses Behälters von einer radioaktiven Verschmutzung betroffen.
4. Die im Wasser oder Dampf mitgeführten radioaktiven Gase, wie Stickstoff 16, Krypton, Xenon und dreifach-schwerer Wasserstoff, werden abgetrennt. Durch Verzögerungsleitungen wird ihre Verweilzeit im Reaktorgebäude auf bis zu 40 Tage verlängert, so daß der Großteil dieser Stoffe noch vor dem Verlassen durch den Kamin des Kernkraftwerkes in stabile Isotope zerfällt. Nach der Verzögerungszeit bleiben praktisch nur mehr das langlebige Krypton 85 (Halbwertszeit 10,4 Jahre) und der dreifach-schwere Wasserstoff (Halbwertszeit 12,3 Jahre) über.
5. Verschiedene Filter und Rückhaltevorrichtungen gewährleisten eine Reinigung der Abwässer von radioaktiven Spaltprodukten. Gemäß den Strahlenschutz-vorschriften hat die radiologische Qualität der Abwässer besser zu sein als die der meisten Trinkwässer.

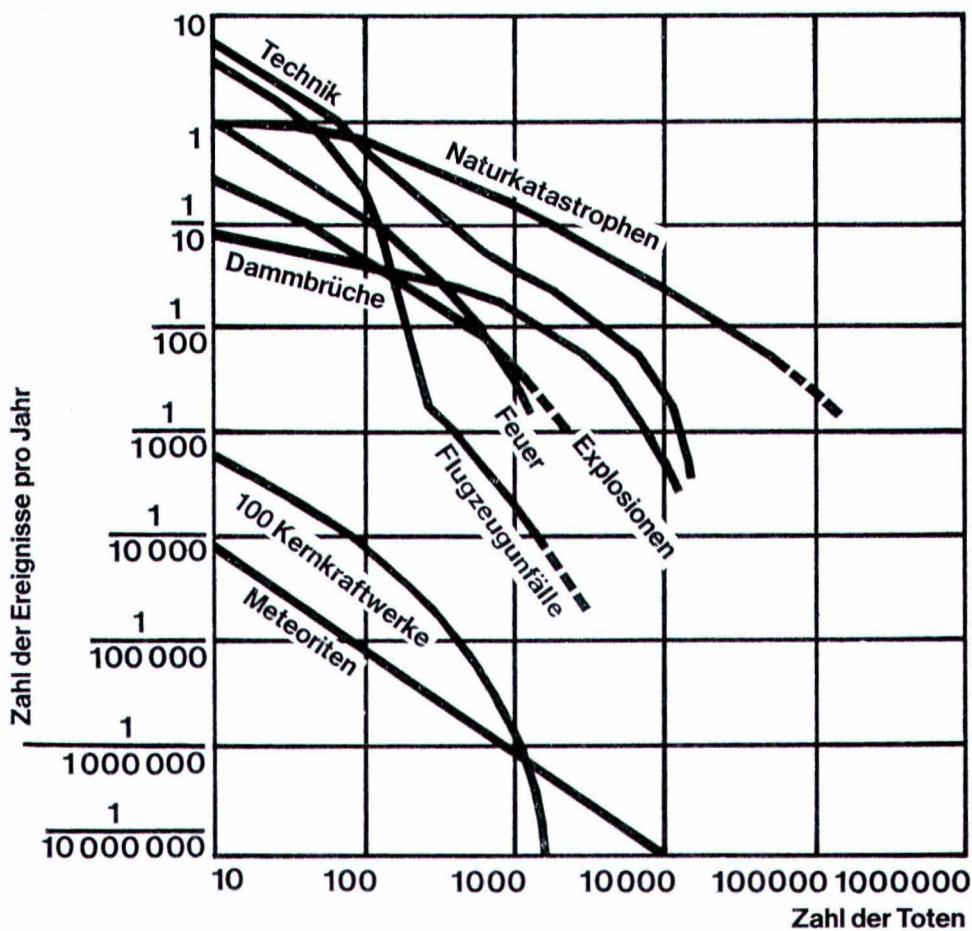
6. Die Regelstäbe und anderen Steuerelemente sollen lokale Überhitzung im Reaktor verhindern, indem sie Neutronen absorbieren und dadurch die Kettenreaktion abschwächen.
7. Verschiedene Notkühlvorrichtungen sollen gewährleisten, daß selbst im Fall eines Kühlmittelverlustes genügend Reservekühlmittel in den Reaktor gelangt, um eine Beschädigung der Brennelemente durch Überhitzung zu verhindern.
8. Notstromaggregate sollen ein sicheres Abschalten des Reaktors auch bei Ausfall der elektrischen Energieversorgung sichern.
9. Für die Aufbewahrung der abgebrannten Brennelemente sind verschiedene Lagerbecken am Kraftwerksgelände vorgesehen.

Die für die Sicherheit wesentlichen Teile sind immer in mehrfacher Ausführung gleichzeitig in Betrieb. Der Ausfall eines Teiles bewirkt noch keine Störung des Betriebes. Auch für die Messung wichtiger Größen verwendet man zumindest ein 2-von-3-System, d. h. von drei parallelen Meßkanälen müssen mindestens zwei den gleichen Wert anzeigen.

Bei der Behandlung der Störfälle muß beachtet werden, daß die einzelnen Komponenten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausfallen können. So können Steuerstäbe brechen, die Kühlung durch einen Bruch einer Rohrleitung unterbrochen werden, es können Gasexplosionen auftreten usw. In allen Fällen ist die Konstruktion so auszulegen, daß beim Eintritt eines Fehlers in einem Teil des Kernkraftwerkes ein anderer Teil die Funktion dieser Anlage übernimmt oder eine Notabschaltung erfolgt.

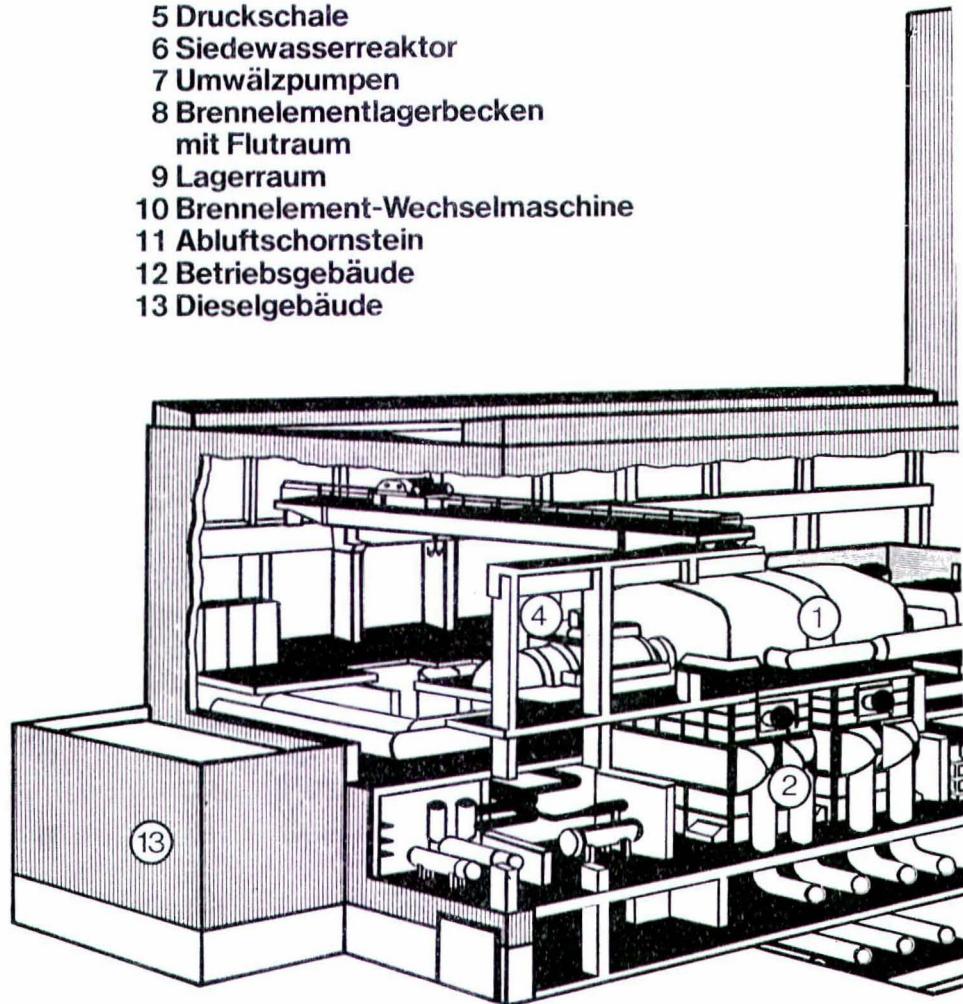
Mit wesentlich geringerer Wahrscheinlichkeit als das einzelne Bauelement können mehrere Bauelemente gleichzeitig versagen und damit einen größeren Unfall verursachen. Mit welcher Wahrscheinlichkeit ein solcher größerer Unfall eintritt, kann man mit Hilfe einer sogenannten Fehlerbaumanalyse abschätzen. Dabei wird verfolgt, wie sich ein Fehler in einem Teil der Anlage auf den Gesamtzustand auswirkt. Derartige Untersuchungen werden für viele großtechnische Anlagen durchgeführt.

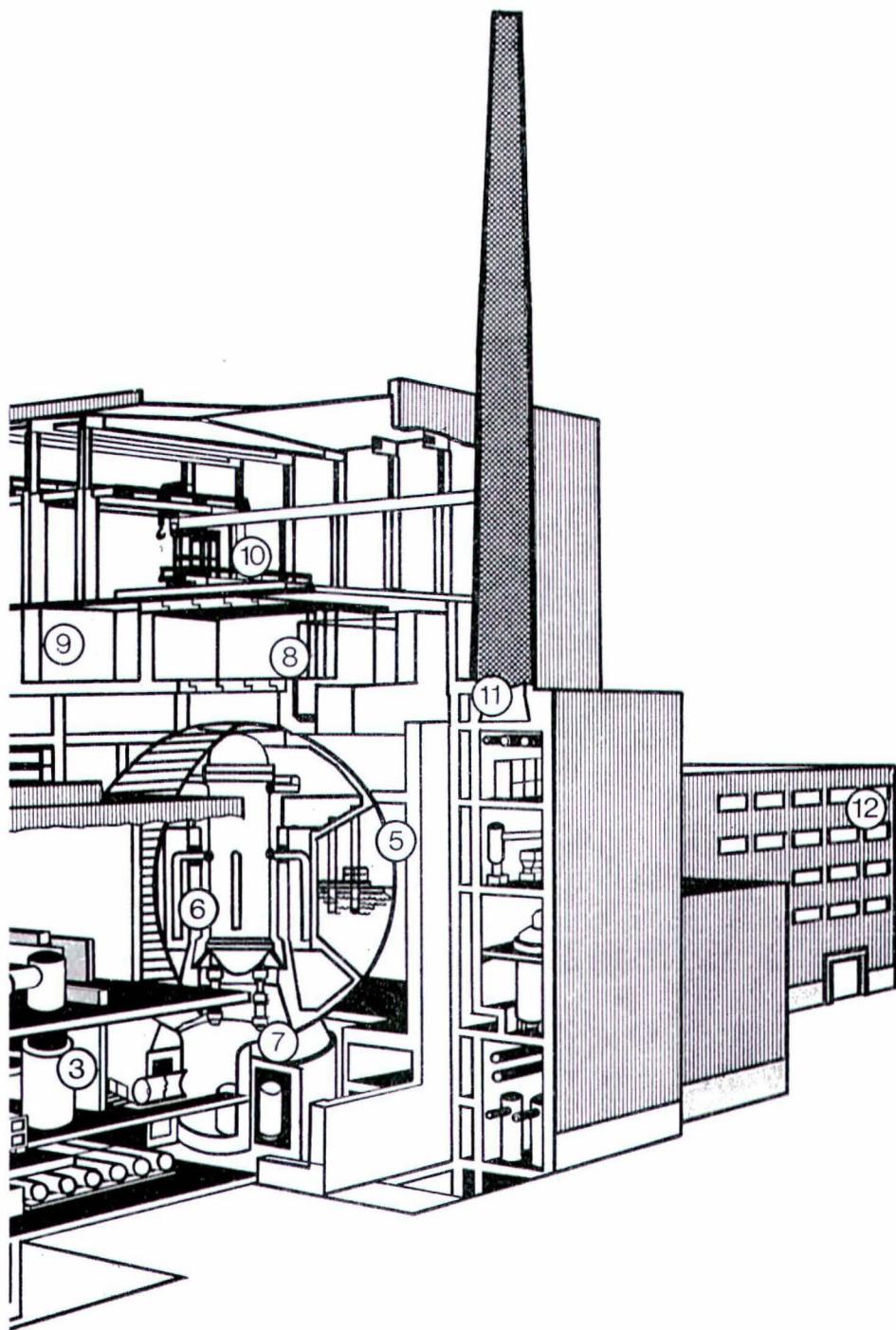
In den Vereinigten Staaten wurde eine umfangreiche Studie dieser Art für Kernkraftwerke durchgeführt, die sogenannte **Rasmussen-Studie**. Obwohl die Verhältnisse für amerikanische Reaktortypen und Standorte in den USA untersucht wurden, können die Ergebnisse zumindest qualitativ bis zum Vorliegen eigener europäischer Studien für unsere Verhältnisse als Diskussionsgrundlage benutzt werden. Es wurde angenommen, daß innerhalb der USA 100 Kernkraftwerke in Betrieb stehen. Dann wurde ausgerechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein Unfall ereignet, der 10, 100, 1 000 Tote fordert. Als tot wurden alle Personen gerechnet, die nicht nur unmittelbar durch den Unfall, sondern durch Nachwirkungen innerhalb eines Monats sterben. Zum Vergleich wurden die Unfallswahrscheinlichkeiten für andere Gefährdungen ebenfalls berechnet. Diese Unfallswahrscheinlichkeiten sind in der Abb. 14 zusammengestellt. Es zeigt sich, daß nach dieser Studie die Gefährdung durch Kernkraftwerke wesentlich geringer ist,



**Schnittbild durch ein Kernkraftwerk**

- 1 Turbine
- 2 Kondensator
- 3 Zwischenüberhitzer
- 4 Generator
- 5 Druckschale
- 6 Siedewasserreaktor
- 7 Umwälzpumpen
- 8 Brennelementlagerbecken mit Flutraum
- 9 Lagerraum
- 10 Brennelement-Wechselmaschine
- 11 Abluftschornstein
- 12 Betriebsgebäude
- 13 Dieselgebäude





als etwa die Gefährdung von Personen am Boden durch den Absturz eines Flugzeuges. Die Gefahr von großen Naturkatastrophen ist um viele Größenordnungen höher als die Gefährdung durch Kernkraftwerke. Allerdings muß man sagen, daß es sich bei diesen Gefährdungen nur um direkte Auswirkungen von Reaktorunfällen handelt und nicht um die genetische Gefährdung, die im nächsten Kapitel behandelt wird.

Weiters beschränkt sich die Rasmussen-Studie ausschließlich auf die Risiken, die der Betrieb von Kernkraftwerken selbst mit sich bringt. Die zusätzlichen Gefahren, die durch den gesamten nuklearen Brennstoffkreislauf — Uranbergbau, Herstellung von Brennelementen, Wiederaufarbeitung, Abfallbetreuung und -lagerung, Transport — erwachsen, sind nicht erfaßt. In jedem dieser Bereiche werden radioaktive Substanzen freigesetzt. Beim Transport bestehen die Möglichkeiten von Unfall und Sabotage, bei derendlagerung von Abfall die der unkontrollierten Freisetzung durch natürliche oder menschliche Einflüsse. Wiederaufarbeitungsanlagen, die jeweils mehrere Kernkraftwerke betreuen, bringen eine starke Ballung von radioaktivem Material an einem Ort mit sich. Alle diese Gefahren sind sorgfältig zu studieren.

Quantitative Analysen zur Risikoabschätzung sind prinzipiell auch hier möglich, doch sind etwa die Erfahrungen mit großen Wiederaufarbeitungsanlagen für verbrauchte Brennelemente noch nicht ausreichend, um die hiefür notwendigen Daten zu liefern. Diese werden wahrscheinlich erst in der Mitte der achtziger Jahre zur Verfügung stehen, wenn der Brennstoffkreislauf voll im Gange sein wird.

Trotz der vermutlich geringen direkten Gefährdung versucht man bei allen Reaktortypen die Sicherheitssysteme weiter zu verbessern, so daß Unfälle mit noch größerer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können. Es ist allerdings eine offene Frage, eine wie große Wahrscheinlichkeit groß genug ist. Die Frage nach der Größe des akzeptierbaren Risikos ist nicht nur eine naturwissenschaftliche oder ökonomische Frage, sondern eine politische Frage, die sich am Wertesystem der Gesellschaft orientiert. Das Risiko Null wird man selbstverständlich nie erreichen können,

## 3. Biologisch-medizinische Strahlenwirkungen

### 3.1. Allgemeine Grundlagen

Durch die Entwicklung von Wissenschaft und Technik wurde die Menschheit erstmalig mit ionisierenden Strahlen in nennenswertem Ausmaß konfrontiert. Seither bestehen Probleme des Strahlenschutzes. Zu den Quellen der Strahlung gehören radioaktive Gesteine im Bergbau, insbesondere im Uranbergbau, und radioaktive Stoffe, die in der Technik und Medizin angewendet werden, wie etwa das Radium. Auch können ionisierende Strahlen, insbesondere Röntgen-Strahlen, durch Geräte erzeugt werden. Durch fehlerhaftes oder sorgloses Verhalten hat die Strahlung aus solchen Quellen schon oft gesundheitliche Schäden, in vielen Fällen auch den Tod von Menschen herbeigeführt.

Ionisierende Strahlen entstehen im größten Ausmaß beim Einsatz von Atomwaffen (Kernwaffen), wie er 1945 gegen die Städte Hiroshima und Nagasaki stattgefunden hat. Die Zahl der Todesopfer des Atomkrieges gegen Japan wird auf 250 000 geschätzt, von denen ein Teil durch die Strahlung getötet wurde.

Beim Betrieb von Kernkraftwerken entstehen unvermeidlich ionisierende Strahlen. Im Kernbrennstoff (Spaltstoff) werden während des Betriebes außerordentlich große Mengen radioaktiver Stoffe — viele Millionen Curie — gebildet. 1 Curie, die Einheit der „Aktivität“, entspricht angenähert der Aktivität (Zahl der Zerfälle je Zeiteinheit) von 1 g Radium.

Im Hinblick auf den geplanten zunehmenden Einsatz von Kernkraftwerken ist die verlässliche Kenntnis der Strahlengefahren notwendig. Es liegen bereits viele Ergebnisse vor. Diese wurden zum Teil durch die Untersuchung von Strahlenopfern erhalten. Außerdem wurden schon viele Tierexperimente durchgeführt. Versuche an Insekten, die leicht in großer Zahl zu züchten sind und nur eine kurze Generationsdauer haben, dienen dem Studium der Veränderung der Erbmasse. Für die meisten Zwecke aber müssen

Organismen herangezogen werden, die dem Menschen möglichst ähnlich sind, also Säugetiere. Immerhin muß auch bei der Übertragung von Erkenntnissen vom Versuchs-Säugetier (Maus, Ratte, Hund, Schwein usw.) auf den Menschen Vorsicht geübt werden, da es doch erhebliche physiologische Unterschiede gibt. Insbesondere ist die Lebensdauer aller Versuchstiere viel kürzer als die des Menschen, so daß bei ihnen Wirkungen, die erst nach besonders langer Zeit offenkundig werden, nicht beobachtet werden können. Zum Beispiel tritt bei den Opfern von Hiroshima als Folge der Bestrahlung vor mehr als 30 Jahren noch jetzt Krebs auf.

Bei höheren Lebewesen, also auch bei Menschen, ist zwischen somatischen und genetischen Wirkungen zu unterscheiden. Die somatischen Wirkungen äußern sich im bestrahlten Individuum selbst. Es kann sich dabei auch um ungeborene Kinder handeln. Die genetische Wirkung (Wirkung auf die Erbmasse) hingegen betrifft die Keimzellen, aus denen nach der Befruchtung neue Individuen entstehen. Genetische Wirkungen müssen nicht einmal in der nächsten Generation erkennbar sein, sondern sie können über viele Generationen verborgen bleiben und erst bei Auftreten einer bestimmten Konstellation innerhalb der Erbmasse eines Individuums zum Ausdruck kommen.

### **3.2. Strahlenchemie und Strahlenbiologie**

Im Folgenden werden zuerst die somatischen und dann die genetischen Wirkungen besprochen; vorher ist jedoch eine kurze Diskussion des allgemeinen Mechanismus der Strahlenwirkung notwendig. Die Wissenschaft von den Wirkungen der ionisierenden Strahlen auf Lebewesen heißt Strahlenbiologie. Alle strahlenbiologischen Wirkungen sind letzten Endes in chemischen Veränderungen des bestrahlten Systems begründet. Diese primären chemischen („strahlenchemischen“) Wirkungen führen zu den biologischen Veränderungen.

Da alle Lebewesen aus Zellen bestehen, muß man annehmen, daß auch die strahlenchemischen und strahlenbiologischen Wirkungen zunächst die einzelnen Zellen, u. zw.

unter Umständen eine große Zahl von Zellen gleichzeitig, betreffen. Der Mensch z. B. besteht aus vielen Billionen Zellen. Soweit bekannt, führt Bestrahlung, wenn sie überhaupt wirksam ist, immer zu einer Schädigung der betreffenden Zellen. Nach Ansicht der überwältigenden Mehrheit der Strahlenbiologen gibt es eine günstige Beeinflussung von Zellen (sogenannte biopositive Wirkungen) nicht. Damit ist natürlich nicht ausgeschlossen, daß eine Schädigung einzelner oder auch vieler Zellen sich auf einen Organismus insgesamt günstig auswirken kann. Ein klarer Fall dieser Art liegt bei der Strahlenbehandlung von Krebs vor, wo ja durch die Zerstörung von Krebszellen dem Körper als Ganzem genutzt wird.

### 3.2.1. Wirkungsweise ionisierender Strahlen

Die ionisierenden Strahlen können aus schnell bewegten Teilchen („Korpuskeln“) bestehen, die viel kleiner als Atome sind und aus den Atomkernen stammen. Zu nennen sind zunächst die Alpha-Teilchen, die mit Helium 4-Kernen identisch sind, sodann die Beta-Teilchen, die (meist besonders schnell bewegte) Elektronen sind; die Beta-Teilchen sind etwa 7000mal leichter als die Alpha-Teilchen. Bei ihrer Bremsung beim Durchgang durch Stoffe verlieren alle diese Teilchen schließlich ihre Wirksamkeit.

Zu den Korpuskeln gehören weiter die Neutronen, die ebenfalls aus den Atomkernen stammen. Auch sie verlassen die Atomkerne mit großer Geschwindigkeit. Bei der Bremsung dieser schnellen Neutronen verwandeln sie sich in langsame Neutronen, die noch immer zu physikalischen, chemischen und biologischen Wirkungen befähigt sind.

Außer den korpuskulären Strahlen gibt es die Gamma- und Röntgen-Strahlen, die wie das sichtbare Licht aus Paketen („Quanten“) elektromagnetischer Energie bestehen. Ihre Quanten enthalten allerdings viel mehr Energie als die des Lichtes. Ihrer Natur nach unterscheiden sich Gamma- und Röntgen-Strahlen voneinander überhaupt nicht. Der Name zeigt nur an, auf welche Weise im gegebenen Fall die Strahlung entstanden ist.

Für die strahlenchemische und -biologische Wirkung von Strahlen jeder Art ist ihre Durchdringungsfähigkeit maßgebend. Die Alpha-Strahlen haben sehr geringe Reich-

weite. Sie beträgt in der Luft nur einige Zentimeter und im Wasser (oder auch in lebendem Gewebe, das ja vorwiegend aus Wasser besteht) nur einige Hundertstel eines Millimeters. Die Reichweite von Beta-Strahlen innerhalb von Luft beträgt in typischen Fällen einige Meter, in Gewebe einige Millimeter.

Bei Neutronen- sowie bei elektromagnetischer (Gamma- oder Röntgen-)Strahlung kann man exakt von bestimmten Reichweiten überhaupt nicht sprechen, da diese Strahlen nach einem sogenannten Exponentialgesetz absorbiert (verschluckt) werden. Dies bedeutet, daß innerhalb einer bestimmten Weglänge in einem Stoff ein bestimmter Bruchteil der ursprünglich vorhandenen Strahlung absorbiert wird, innerhalb einer weiteren, ebenso großen Weglänge der gleiche Bruchteil der verbliebenen Strahlung — usw. usw. Daher findet, theoretisch gesprochen, eine vollständige, also 100%ige Absorption in einem solchen Fall überhaupt nicht statt, sondern es tritt immer noch eine restliche Strahlenmenge („Intensität“) durch den Absorber, wobei aber natürlich diese Strahlenmenge umso kleiner wird, je dicker der Absorber ist. Praktisch kann man aber sagen, daß in vielen Fällen die elektromagnetische oder Neutronenstrahlung innerhalb von festen Körpern oder Flüssigkeiten von mehreren Dezimetern Dicke weitgehend verschluckt wird. Besonders wirksame Absorber von Gamma-Strahlen sind schwere Metalle, z. B. Stahl oder Blei, gute Absorber schneller Neutronen sind wasserstoffhaltige Stoffe, insbesondere Wasser. Durch den Wasserstoff werden die Neutronen zuerst verlangsamt. Dabei wird ihre Bewegungsenergie auf die Kerne der Wasserstoffatome („Protonen“) übertragen, so daß diese Kerne sich ihrerseits schnell bewegen. Diese schnellen Teilchen rufen dann ähnliche Wirkungen wie Alpha-Teilchen hervor. Die langsamen Neutronen selbst werden schließlich vom Bremsmittel, oft Wasser, verschluckt (Neutroneneinfang, vgl. 2.2.2.), wobei meist Gamma-Strahlung entsteht.

### **3.2.2. Somatische und genetische Wirkungen**

Entlang der Bahnen von Strahlen finden innerhalb jeder getroffenen Zelle chemische Umsetzungen statt. Man kann den Vergleich mit einer Gewehrkugel ziehen, die eine

Menschenmenge trifft. Ob nun im gegebenen Fall eine merkliche Schädigung einer getroffenen Zelle eintritt, hängt natürlich davon ab, welcher Teil der Zelle beschädigt wird. Das sogenannte Grundplasma der Zelle, eine gelatinöse Substanz, in der die Hauptbestandteile der Zelle schwelen, ist von geringer Bedeutung, entscheidend ist dagegen der Zellkern. Darin wieder sind es die langen, fadenförmigen Moleküle der Desoxyribonukleinsäure (DNS oder DNA), deren Beschädigung bedenklich ist. Die DNS lenkt die Funktionen der Zelle. Die DNS kann so stark verletzt werden, daß die Zelle überhaupt zugrunde geht. Es ist aber auch möglich, daß die DNS zwar beschädigt wird, die Zelle aber weiterlebt und unter Umständen auch zur Teilung befähigt bleibt. Dann sind die Eigenschaften einer solchen Zelle und daher auch die ihrer Nachkommenschaft verändert, z. B. kann aus einer normalen Zelle eine Krebszelle geworden sein. Natürlich erfordert dann die Ausbildung einer Krebsgeschwulst noch viel Zeit, nämlich Jahre oder sogar Jahrzehnte.

Offenbar ist es besonders wichtig, daß jene Zellen nicht beschädigt werden, die sich teilen müssen, um ihre Funktion zu erfüllen. Dies gilt natürlich für die Zellen von ungeborenen und auch bereits geborenen Kindern, aus denen ja erst durch vielfache Zellteilung erwachsene Organismen werden. So erklärt sich die besondere Strahlengefährdung der Kinder. Aber auch innerhalb des Erwachsenen gibt es bestimmte Zellarten, die ständig in Teilung begriffen sind. Dies gilt z. B. für die Zellen des Knochenmarkes, die auf diese Weise neue Blutkörperchen produzieren. Daher gehört zu den wichtigsten Symptomen von Strahlenschädigung Anämie, also allmähliches Absinken der Zahl der roten Blutkörperchen. Zwar sind die reifen Blutkörperchen nicht besonders strahlenempfindlich, doch wird ihre Zahl nach Bestrahlung nicht mehr vom Knochenmark ergänzt. Ein weiteres Beispiel sind die Zellen der Darmoberfläche, also des „Darmepithels“. Da diese Zellen durch die Bewegung des Darminhaltes ständig beansprucht sind, müssen sie ebenfalls durch Teilung ergänzt werden; daher gehört auch Unfähigkeit zur normalen Verdauung der Nahrung zu den prominenten Symptomen von „Strahlenkrankheit“.

Wichtig ist schließlich die Zerstörung jener Stammzellen, die Tochterzellen ergeben, welche Antikörper produ-

zieren. Durch die aus Eiweiß bestehenden Antikörper werden Antigene unschädlich gemacht, also physiologisch wirksame Fremdstoffe, die in den Kreislauf der Organismen geraten, z. B. Krankheitserreger oder von ihnen freigesetzte Produkte. Die Bekämpfung von Antigenen durch Antikörper ist das Prinzip des „Immunsystems“, durch das sich Säugetiere und auch der Mensch gegen Bakterien und Viren verteidigen. Nach hinreichender Bestrahlung versagt das Immunsystem. Derart geschädigte Menschen fallen dann schon leichten Infektionen, z. B. durch das Grippevirus, zum Opfer.

Zu den wichtigsten schädlichen Folgen einer Bestrahlung gehört die Entstehung von Krebszellen. Hier wurde, wie erwähnt, die betroffene Zelle zwar nicht abgetötet, jedoch verändert, und sie gibt ihre veränderten Eigenschaften bei der Zellteilung weiter. Die Veränderung („Mutation“) besteht hier darin, daß Regelungen, die normalerweise das Auftreten von Krebszellen verhindern, außer Kraft gesetzt werden. Der Krebs kann je nach dem Ort der Strahlenwirkung in den verschiedensten Organen auftreten. So entsteht er bei Uranbergarbeitern, die das radioaktive Gas „Radium-Emanation“ einatmen, meist in der Lunge. Die amerikanischen Arbeiterinnen, die (um 1920) angehalten worden waren, die zum Malen von Zifferblättern mit radiumhältiger Leuchtfarbe verwendeten Pinsel mit ihren Lippen zu befeuchten, starben an Knochenkrebs, da sich das Radium in den Knochen ablagert. Durch Röntgen-Strahlen verursachter Krebs kann in verschiedenen Organen, u. a. in der Haut, auftreten. Eine besondere Form des Krebses ist die Leukämie, bei der nach Bestrahlung des Knochenmarks funktionsuntüchtige weiße Blutkörperchen ungehemmt erzeugt werden.

Schließlich sind die genetischen Schäden zu nennen, bei denen Keimzellen mutiert werden. Solche Mutationen sind meistens „rezessiv“, d. h. sie kommen in dem bei der Befruchtung entstehenden Organismus erst dann zum Ausdruck, wenn zufällig von beiden Eltern her die gleiche veränderte Erbanlage empfangen wurde. Wann dies im einzelnen Fall zutreffen wird, ist natürlich nicht vorherzusehen. Jedoch ist mit Sicherheit zu erwarten, daß solche zufällige Begegnungen auch noch nach Jahrtausenden stattfinden werden. Demnach werden auch bei den fernen Nachkommen der Opfer von Hiroshima zu einem be-

stimmten Teil genetisch bedingte Defekte auftreten. Genetisch bedingte Schädigungen können von hunderterlei Natur sein. Häufig sind z. B. Störungen des Stoffwechsels, die Entstehung der Bluterkrankheit und Anomalien bei der Ausbildung von Gliedmaßen.

### **3.3. Grundprinzipien des Strahlenschutzes**

#### **3.3.1. Relative biologische Wirksamkeit und Strahlenbelastung**

Ihrer Natur nach, also qualitativ, sind die Strahlenschäden, die durch die verschiedenen Arten von ionisierender Strahlung gesetzt werden, im wesentlichen identisch. Allerdings ist die quantitative Wirkung in dem Sinn verschieden, daß jene Strahlen, die innerhalb einer kurzen Weglänge absorbiert werden, also ihre Energie in konzentrierter Form auf das Gewebe übertragen, wirksamer sind, und zwar — wohlgemerkt! — auch bezogen auf gleiche übertragene Energie. Wenn also einem Organ die gleiche Energie je Gramm („Dosis“) einerseits in Form von Alpha-Strahlung (geringer Reichweite) und anderseits in Form von Beta-Strahlung (größerer Reichweite) zugeführt wird, so ist die Wirkung im ersten Fall größer. Diese „relative biologische Wirksamkeit“ (RBW), häufig als Qualitätsfaktor bezeichnet, kann z. B. für Alpha-Strahlen 10 betragen und auch bei schnellen Neutronen hohe Werte aufweisen. Dabei dient die RBW von Beta-, Gamma- oder Röntgen-Strahlen, die gleich ist, als Bezugspunkt, d. h. die RBW dieser Strahlen wird gleich 1 gesetzt. Mit Hilfe der RBW können also die biologischen Wirkungen der Dosen verschiedener Strahlenarten miteinander in Beziehung gesetzt werden. Da die Dosis in der Einheit „rad“ gemessen wird (s. 2.2.3.), gibt das Produkt rad mal RBW das Maß der gesamten örtlichen Wirkung und wird als „rem“ bezeichnet. In der Gesetzgebung der Staaten, darunter auch Österreichs, werden daher zulässige Grenzbelastungen durch Bestrahlung in der Einheit „rem“ angegeben. Das „rem“ ist ein Maß des „Dosis-Äquivalents“.

Die Grundprinzipien der Strahlenschutzgesetzgebung sind, daß die Belastungen des Einzelmenschen wie auch der Gesamtbevölkerung auf das geringste mögliche Maß herabzusetzen sind, welches mit den Zwecken von Medizin und Technik vereinbar ist, und daß gewisse Grenzen keinesfalls überschritten werden dürfen. Es sind z. B. Röntgen-Strahlen in der Medizin unentbehrlich, und man muß daher eine gewisse Belastung der Röntgenärzte und Röntgenschwestern in Kauf nehmen; allerdings soll diese Belastung möglichst stark herabgedrückt werden. Die wissenschaftlich begründeten Empfehlungen, auf deren Grundlage die Strahlenschutzgesetzgebung die Normen erstellt, stammen von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (International Commission for Radiation Protection, ICRP). Nochmals sei betont, daß die Strahlenbelastung immer als ein Übel betrachtet wird und daß in keinem Dokument der ICRP von irgendwelchen biopositiven Wirkungen die Rede ist. Eine absichtliche Exposition von Menschen durch Strahlen ist ausschließlich für medizinische Zwecke zulässig. Beispielsweise sind die völlig überflüssigen, lediglich dem privaten Profit dienenden Schuh-Röntgen-Apparate nicht mehr erlaubt.

Die Bestrahlung von Patienten ist zwar für Diagnostik und Therapie unentbehrlich; da jedoch viele Ärzte über Strahlenwirkung und Strahlenschutz keine ausreichenden Kenntnisse haben, kommt es nicht selten zu unnötiger Belastung von Patienten. In krassen Fällen wurde durch verfehlte medizinische Maßnahmen auch schon bei Patienten Krebs erzeugt. Jedenfalls ist gegenwärtig die medizinische Praxis die Hauptquelle von „künstlicher“ Strahlenbelastung, so daß eine Begrenzung auf das notwendige Maß besonders dringend wäre. Die durchschnittliche Belastung der Bevölkerung durch Röntgen-Strahlen nähert sich bereits jetzt der Belastung durch natürliche radioaktive Stoffe in der Umwelt und aus der kosmischen Höhenstrahlung, d. h. es besteht die Gefahr einer Verdoppelung der natürlichen Strahlenbelastung. Die Gesetzgebung überläßt die Dosierung bei Diagnostik und Therapie dem Urteil des Arztes. Unter diesen Umständen wäre eine bessere Ausbildung aller Ärzte in Radiologie und Strahlenschutz eine dringende Notwendigkeit.

### 3.3.2. Toleranzgrenze

Durch die Gesetzgebung (Österreichisches Strahlenschutzgesetz vom Jahre 1969, Strahlenschutzverordnung vom Jahre 1972) sind aufgrund der Daten der ICRP sogenannte Toleranzwerte für Dosen (außerhalb der medizinischen Anwendung) festgelegt worden. Diese Werte beziehen sich zunächst auf Menschen, die beruflich strahlenexponiert sind, etwa Röntgen-Personal oder Beschäftigte in Kernkraftwerken. Für gleichmäßige Bestrahlung des Gesamtkörpers, wie sie praktisch nur durch die durchdringenden Strahlen (Röntgen-, Gamma- und Neutronen-Strahlen) erfolgen kann, gilt eine Grenze von 5 rem pro Jahr. Dies betrifft nur Erwachsene, da Jugendliche in Strahlenbereichen überhaupt nicht beschäftigt werden dürfen.

Zur Veranschaulichung sei erwähnt, daß z. B. die Gamma-Strahlung von 1 Gramm Radium, für diesen Stoff eine große Menge, in einer Entfernung von 1 Meter 0,84 rem je Stunde liefert; diese Dosisleistung nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Die Dosen aus Röntgen-Geräten sind in manchen Fällen sehr groß. Während eine Schirmbildaufnahme der Lunge nur eine minimale Belastung in der Größenordnung von Millirem, das sind tausendstel rem, ergibt, kann eine Durchleuchtung bestimmter Organe fast auf einen Schlag mehrere rem liefern. Allgemein ist die Belastung bei Durchleuchtungen viel größer als bei Photoaufnahmen.

Interessant ist auch der Vergleich mit der tödlichen Dosis bei plötzlicher Applikation. Nach der Erfahrung von Hiroshima wirken etwa 400 bis 500 rem tödlich, und zwar innerhalb von Tagen oder Wochen. Die tödliche Dosis wäre allerdings bei Verabreichung der Strahlung in Teilen über einen längeren Zeitraum sehr viel höher. Darin drückt sich die wichtige Tatsache aus, daß Zellen und Gewebe Strahlenschäden, wenn man ihnen Zeit gibt, teilweise reparieren können, so daß der Organismus einer zweiten und dritten Teilbestrahlung zu einem gewissen Ausmaß erholt begegnet.

Die Toleranzgrenze wurde aufgrund zweier ganz verschiedener Erwägungen festgesetzt: Einerseits soll sie hinreichend niedrig liegen, so daß im bestrahlten Individuum keine somatischen Schädigungen, etwa im Blut-

bild, festgestellt werden können. Anderseits soll die Erzeugung von Mutationen (genetische Schädigungen) innerhalb von Grenzen gehalten werden, die man verantworten zu können glaubt. Solche Grenzen findet man durch Bezugnahme auf die natürliche Rate der Mutationen, die nur zum Teil durch die Umgebungsstrahlung, zum Teil aber auch durch chemische Stoffe in der Umwelt bedingt sind oder überhaupt spontan erfolgen. Die Umgebungsstrahlung liefert eine Dosis von etwa 0,1 rem/Jahr, doch hängt der genaue Wert von den Umständen (Art des Gesteins und der Baustoffe der Häuser, Höhenlage) ab.

Die natürliche Rate der Mutationen soll (immer für beruflich strahlenexponierte Personen) nur um einen Faktor der Größenordnung 2 gesteigert werden, der aber freilich nur willkürlich festgesetzt werden kann. Leider ist auch die Wirksamkeit der Erzeugung von Mutationen beim Menschen nicht direkt bekannt, und es müssen Daten aus Tierversuchen verwendet werden. Jedenfalls muß auch die geringste zusätzliche Strahlenbelastung eine Zunahme der Mutationsrate nach sich ziehen. Die Zahl der Mutationen ist vermutlich im Bereich niedriger Dosen der Dosis proportional.

Ob eine solche lineare Beziehung auch für die (somatische) Krebserzeugung durch Strahlung gilt, ist strittig. Linearität wäre theoretisch zu erwarten, wenn eine Krebszelle durch eine Veränderung der DNS dieser Zelle, also durch eine „somatische Mutation“, gebildet wird. Vorläufig erstellt die ICRP ihre Normen unter Annahme der Linearität. Insofern, als demnach auch geringste Dosen noch (selten) somatische Schäden setzen können, stellt die Möglichkeit der Krebserzeugung eine Ausnahme von der Forderung dar, daß innerhalb der Toleranzgrenze überhaupt keine somatischen Wirkungen auftreten dürfen. Ähnliche Überlegungen wie für die Krebserzeugung gelten auch für die Erzeugung von Schäden bei der Organentwicklung von Embryonen.

Allgemein werden Theorien, nach denen Veränderungen an Zellen und Geweben darauf beruhen, daß einzelne Zellen durch die Strahlen „getroffen“ und dabei verändert werden, als Treffertheorien bezeichnet. Die Häufigkeit solcher Veränderungen ist der Dosis proportional,

Für Angehörige der Gesamtbevölkerung, also für nicht beruflich belastete Personen, hat man Grenzwerte festgesetzt, die 30mal niedriger liegen. Damit soll einerseits dem Umstand Rechnung getragen werden, daß die gesamte Bevölkerung auch schwächere Personen enthält, insbesondere die besonders strahlenempfindlichen Kinder. Anderseits soll durch die Erniedrigung der zulässigen Exposition die zusätzliche Mutationsrate gesenkt werden, die ja durch die Belastung der Gesamtbevölkerung bestimmt ist. Damit soll die Schädigung künftiger Generationen auf ein möglichst niedriges Maß herabgesetzt werden.

### **3.3.3. Besondere Belastung von Organen**

Neben der Belastung des gesamten Körpers kann auch eine mehr oder weniger selektive Belastung einzelner Organe auftreten. Dies trifft insbesondere bei Aufnahmen radioaktiver Stoffe durch Luft, Wasser oder Nahrung in den Organismus zu. Die Stoffe sind alpha- oder betaaktiv; die Gamma-Strahlung, weil durchdringend, spielt für eine selektive Belastung nur eine untergeordnete Rolle. Die radioaktiven Stoffe können sich innerhalb des menschlichen Organismus in Organen ablagern, die einerseits durch den Weg der Zufuhr, anderseits durch die Natur des Stoffes bestimmt sind. Eine Beschleunigung des Austritts, also eine Entstrahlung eines Organismus durch Behandlung mit Chemikalien, ist schwierig und nur begrenzt möglich.

Natürlich verhalten sich die radioaktiven Formen der Elemente (Radioisotope) innerhalb der Organismen ebenso wie die inaktiven Formen. Z. B. findet sich radioaktives Natrium aufgrund seiner chemischen Natur (Neigung zur Bildung löslicher Salze) vorwiegend in den Körperflüssigkeiten und wird bei deren Erneuerung auch rasch wieder abgegeben. Daher ist das Radionatrium, auf gleiche Aktivität (gemessen in Curie) bezogen, relativ wenig gefährlich. Bedenklicher ist das Radiostrontium, ein besonders häufiges Produkt der Kernspaltung des Urans, da es dem Kalzium ähnlich ist, daher in den Knochen abgelagert wird und dort ebenso wie das Kalzium sehr lange verbleibt. Noch gefährlicher ist das Jod 131 (auf gleiche Energie bezogen), ebenfalls ein häufiges Spaltprodukt, das spezifisch von der Schilddrüse aufgenommen wird und dieses Organ besonders wirksam von innen bestrahlt.

Von großer Bedeutung ist schließlich das Plutonium 239, das in jedem Kernkraftwerk mittlerer Größe in Mengen von Hunderten Kilogramm pro Jahr entsteht. Dieser alpha-strahlende Stoff hat eine besondere Neigung zur Ablagerung an Zellengrenzflächen und bestrahlt dann wirkungsvoll das Zellinnere. Bei Zufuhr durch den Verdauungstrakt oder (im Versuch) durch intravenöse Injektionen sind die meistbetroffenen Organe Knochen und Leber; allerdings verläßt bei Zufuhr mit der Nahrung der größte Teil des Plutoniums den Körper wieder, ohne durch die Darmwand aufgenommen zu werden. Gefährlicher ist die Aufnahme von feinverteiltem staubförmigem Plutoniumoxid, wie es bei der Verarbeitung von Plutoniumverbindungen leicht entsteht, durch die Lunge; dort lagern sich die Plutoniumoxidteilchen ab und können Lungenkrebs erzeugen. Einmal abgelagertes Plutonium wird nur sehr langsam und unvollständig wieder ausgeschieden. Dies würde besonders innerhalb einer „Plutoniumökonomie“, in der vorwiegend oder sogar ausschließlich Plutonium als Kernbrennstoff verwendet wird, ein ernstes Problem darstellen.

Auf Grund der Betrachtung der Wirkungsweise der verschiedenen Radioisotope wurden „maximal zulässige Konzentrationen“ für den Gehalt von Wasser und Atemluft an den verschiedenen radioaktiven Stoffen festgesetzt. Damit soll erreicht werden, daß selbst im sogenannten kritischen Organ die zulässige Belastung nicht überschritten wird. Die Auswahl der kritischen Organe für die verschiedenen radioaktiven Stoffe erfolgt unter Berücksichtigung einerseits ihrer Fähigkeiten zur Konzentrierung dieser Stoffe und anderseits der spezifischen Strahlenempfindlichkeiten der Organe. Für verschiedene Elemente können daher verschiedene Organe kritisch sein.

Radioaktive Stoffe, die mit Nahrungsmitteln aufgenommen werden, sind vom Standpunkt der maximal zulässigen Konzentrationen wie in Wasser gelöste Stoffe zu behandeln, da sie ja ebenfalls durch den Verdauungskanal eintreten. Man beobachtet nun oft, daß Stoffe, daher auch radioaktive Stoffe, die in Gewässern nur in geringster Menge vorkommen, durch die dortigen Lebewesen in hohem Maße konzentriert werden. So kann der Gehalt an bestimmten nicht radioaktiven oder radioaktiven Stoffen in Algen je Gramm Hunderte und Tausende Male größer sein als im umgeben-

den Wasser. Die Algen können nun Krebsen, Fischen, Vögeln usw. zur Nahrung dienen, so daß sie auf dem Weg über diese sogenannte Nahrungskette auch in den Menschen eintreten. In welchem Ausmaß dies zutrifft, hängt wieder von der chemischen Natur der Stoffe und anderen Umständen ab. Der Weg durch die Nahrungskette ist auch zu Lande zu bedenken. So kann das Gras Stoffe aus dem Boden aufnehmen und die Kuh, die dieses Gras frißt, die Stoffe in konzentrierter Form an die Milch abgeben. Daher ist eine Kontrolle der Umwelt einschließlich der Nahrungsmittel auf Radioaktivität in unserem Zeitalter notwendig.

## 4. Ausblick

Obwohl jedwede Strahlenbelastung biomedizinisch zu bestimmten Nachteilen führt, kann sie doch in bestimmten Fällen notwendig oder empfehlenswert sein. Beispielsweise kann an dem Wert eines sachgemäßen Einsatzes von Röntgen-Strahlung in der Medizin kein Zweifel bestehen. Ähnlich kann man auch argumentieren, daß begrenzte Strahlenschäden in Kauf zu nehmen sind, um bestimmte technisch-wirtschaftliche Vorteile zu erlangen. Solche Vorteile bringt nach Ansicht ihrer Befürworter die Kernenergie mit sich. Im Rahmen der biomedizinischen Fragestellung ist nun zu klären, wie groß die somatischen und genetischen Schäden aufgrund eines Einsatzes von Kernenergie sind, so daß eine Wertung erfolgen kann.

## Schlußbetrachtung

# Sollen in Österreich Kernkraftwerke errichtet werden?

Diese Frage sollte hier nicht beantwortet werden. Vielmehr ist es das Ziel der Verfasser, in den vorhergegangenen Kapiteln die Grundlagen für ein besseres Verständnis der Problematik, aber nicht eine bestimmte festgelegte Einschätzung zu vermitteln.

Die Entscheidung, in welchem Maße künftig Kernenergie in Österreich zur Energieversorgung herangezogen werden soll, wird, wie in der Einleitung bereits ausgeführt, letztlich der Nationalrat zu fällen haben. Die Grundlagen dafür sollen in öffentlichen Diskussionen von Experten, unter Teilnahme des Publikums, geschaffen werden. Alle einschlägigen Fragen, die auf den Veranstaltungen gestellt werden, werden behandelt und in den Entscheidungsprozeß einfließen.

Die Informationskampagne Kernenergie hat nicht das Ziel, eine vorherbestimmte Linie zu propagieren. Ihr Hauptzweck ist es, die Orientierung zur Bildung einer fundierten eigenen Meinung zu ermöglichen, ein Problembewußtsein zu schaffen. Gerade deshalb ist es von besonderer Wichtigkeit, daß an den öffentlichen Diskussionen sowohl skeptische Experten als auch solche, die die Nutzung der Kernenergie befürworten, teilnehmen werden. Soweit Antworten auf offene Fragen in den Diskussionen gefunden werden, wird dies nur durch Übereinstimmung beider Seiten möglich sein.

Der Prozeß der Auseinandersetzung mit dem Zeithema Kernenergie wird im Rahmen der Informationskampagne Kernenergie in einer möglichst umfassenden Weise durchgeführt, wobei die folgenden öffentlich zugänglichen Veranstaltungen vorgesehen sind:

14. 10. 1976, 18.30 Uhr, Wien, Technische Universität: Gesellschaftliche und wirtschaftliche Fragen
28. 10. 1976, 19.00 Uhr, Linz, Bruckner-Haus: Energiepolitische Fragen
11. 11. 1976, 19.00 Uhr, Innsbruck, Kongreßhaus: Wirtschaftlichkeit von Kernkraftwerken
24. 11. 1976, 19.30 Uhr, Feldkirch, Stadthalle: Energiewirtschaftliche Fragen der Kernenergie in Österreich
9. 12. 1976, 19.00 Uhr, Salzburg, Kongreßhaus: Beurteilung des Risikos bei Kernkraftwerken
13. 1. 1977, 19.00 Uhr, Graz, Arbeiterkammer: Technische und betriebliche Sicherheitsfragen
27. 1. 1977, 18.30 Uhr, Wien, Technische Universität: Gesellschaftliche Auswirkungen und Kontrolle des Betriebes von Kernkraftwerken

17. 2. 1977, 19.30 Uhr, Leoben, Montanuniversität:  
Belastungen aus Reaktorbetrieb und Brennstoffzyklus

10. 3. 1977, 19.30 Uhr, Klagenfurt, Konzerthaus: Abwärme problematik

24. 3. 1977, 18.30 Uhr, Wien, Technische Universität:  
Biologisch-medizinische Fragen

Jede Veranstaltung beginnt mit einer Podiumsdiskussion einer Expertengruppe; im Anschluß werden auch die Besucher Gelegenheit haben, Fragen an die Expertengruppe zu stellen. Die Dauer der Veranstaltungen ist mit etwa vier Stunden angesetzt.

### Raum für Notizen





