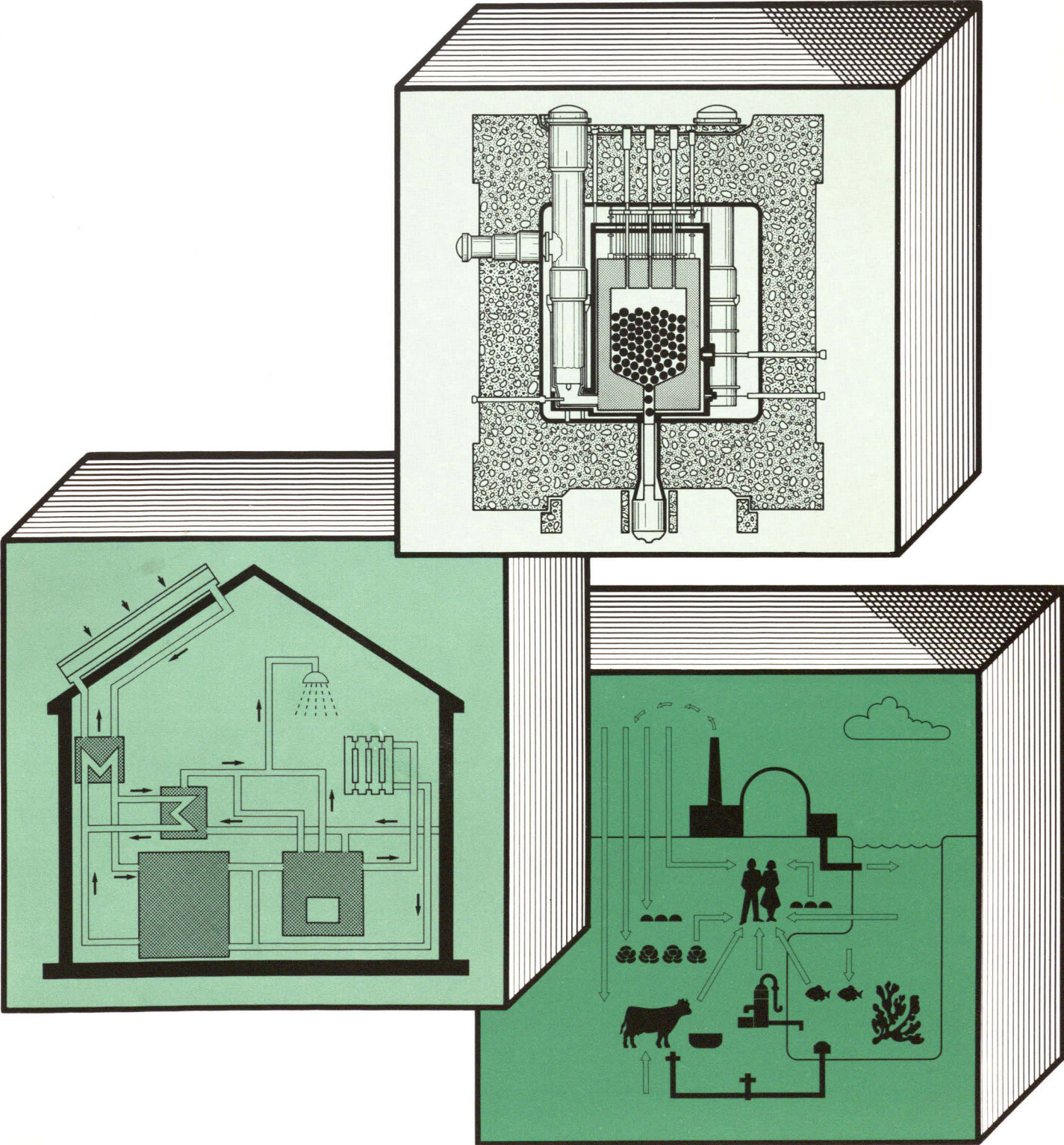




KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH



Perspektiven der Kernenergie

Veröffentlicht in der Reihe der Berichte der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Jül-Conf-32
2. überarbeitete Auflage
Februar 1984
ISSN 0344 - 5798
Titelgestaltung: Helga Schunck
Titelgrafik: Eva Heuter, Düren 4

Perspektiven der Kernenergie

Vorträge eines Seminars
veranstaltet von der
Programmgruppe Technik und Gesellschaft
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

H. Barnert, P. Borsch, J. Eidens,
G. Fuchs, H. Geiß, G. Heusener,
R. Hüper, M. Kleemann, M. Meliß,
M. Paschke, R. Schulten, H.-J. Wagner

Redaktion: Peter Borsch, Waltraud Freier, Erwin Münch

Inhalt

E. Münch: Vorwort	5	2.4 Die wichtigsten Pfade für Ingestionsbelastung	43
H. Barnert und R. Schulten:		2.5 Faktoren, die die Wanderung der Radionuklide beeinflussen	43
Der Hochtemperaturreaktor	7	2.6 Der Transferfaktor – Produkt aus ökologischen Gegebenheiten und der Physiologie des Organismus	43
1. Einleitung	7	2.7 Von der Aktivität zur Organdosis	44
2. Funktionsweise des Hochtemperaturreaktors	7	2.8 Das Konzept der Folgedosis	44
2.1 Physikalische Prinzipien und Konstruktionsmerkmale	7	2.9 Die relevanten Nuklide und ihre kritischen Belastungspfade	45
2.2 Allgemeine Sicherheitseigenschaften des HTR	8	Zusammenfassung	46
3. Prototypen und Demonstrationsanlagen	9	P. Borsch und H.-J. Wagner:	
3.1 Übersicht zur bisherigen Entwicklung	9	Energie und Umwelt	49
3.2 Der AVR	9	1. Einleitung	49
3.2 Der THTR-300	11	2. Schadstoffbelastung der Gewässer	50
4. Weiterentwicklung der HTR-Anlagen	13	3. Schadstoffbelastung der Luft	50
4.1 Internationale Entwicklungen	13	3.1 Luftschadstoffe und ihre Wirkungen	51
4.2 Der HTR-500	13	3.2 Übersicht über emittierte chemische Schadstoffe	53
4.3 Der HTR-Modul	13	3.3 Folgen der großräumigen Verteilung der Emissionen	54
5. Entwicklung zur HTR-Prozeßwärmenutzung	15	3.4 Immissionsgrenzwerte	55
5.1 Der Wärmemarkt	15	3.5 Vergleich der Schadstoffbelastung bei verschiedenen Methoden der Energieerzeugung	55
5.2 Kraft/Wärme-Kopplung	15	4. Die Risiken verschiedener Energietechnologien	57
5.3 Nukleare Kohleveredlung	16	4.1 Ein Risikovergleich Kohle-Kernenergie	57
5.4 Nukleare Fernenergie	18	4.2 Risikovergleich alternativer Energieerzeugungstechnologien	58
5.5 Nukleare Wasserspaltung	18	5. Die Wärmebelastung der Atmosphäre	59
6. Schlußbetrachtung	19	6. Zusammenfassung	60
G. Heusener und R. Hüper:		M. Kleemann und M. Meliß:	
Schnelle Brutreaktoren	21	Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland	63
1. Einleitung	21	1. Einleitung	63
2. Die energiewirtschaftliche Bedeutung des SBR	21	2. Die drei regenerativen Energiequellen und die Energiebilanz der Erde	63
2.1 Uranausnutzung beim LWR und beim SBR	21	3. Nutzungstechnologien in der Bundesrepublik Deutschland	66
2.2 Energiewirtschaftliche Konsequenzen	22	3.1 Direkte Nutzung solarer Strahlungsenergie	66
3. Technisches Konzept der Brüter-Kraftwerke	24	3.2 Nutzung der Umweltwärme durch Wärmepumpen	67
3.1 Energieerzeugung und Brutprozeß	24	3.3 Wasserkraft	69
3.2 Wärmeübertragung	24	3.4 Windenergie	69
4. Das Kühlmittel Natrium	25	3.5 Energie aus Biomasse	70
4.1 Betriebseigenschaften	25	3.6 Geothermie	71
4.2 Verhalten bei Störfällen	26	4. Beurteilung der Einsatzchancen	72
5. Die nukleare Sicherheit Schneller Brutreaktoren	27	4.1 Wirtschaftlichkeit	72
5.1 Das Barrierenprinzip	27	4.2 Möglicher Beitrag im Jahr 2000	73
5.2 Sicherheitsmaßnahmen	27	5. Zusammenfassung	76
5.3 Präventive Maßnahmen beim SNR-300	28	J. Eidsens und G. Fuchs :	
5.4 Containmentmaßnahmen beim SNR-300	29	Kontrollierte Kernfusion – eine Alternative der künftigen langfristigen Energieversorgung	79
5.5 Vergleich mit der Sicherheit eines deutschen Druckwasserreaktors	30	1. Einleitung	79
6. Bau- und Betriebserfahrungen	31	2. Bedingungen für die Freisetzung der Fusionsenergie	80
7. Zusammenfassung	31	3. Der Tokamak	81
H. Geiß und M. Paschke:		3.1 Plasmaeinschluß	81
Radioökologie – Die Emission von Radionukliden und ihr Verhalten in der Nahrungskette und im menschlichen Körper	35	3.2 Heizung	82
Einleitung	35	3.3 Weitere Entwicklung	83
1. Abgabe und Ausbreitung von Radionukliden	35	4. Der technische Weg zum Reaktor	84
1.1 Betriebliche Freisetzung	35	4.1 Tritium und Blanket	84
1.2 Gasförmige radioaktive Stoffe (atmosphärische Ausbreitung)	36	4.2 Materialfragen	85
1.3 Flüssige radioaktive Ableitungen	40	4.3 Nukleare Sicherheitsfragen	86
2. Radionuklide im Ökosystem	40	5. Zusammenfassung	87
2.1 Das Verhalten im lebendigen Organismus	40		
2.2 Die möglichen Wege der Strahlenbelastung für den Menschen	43		
2.3 Der Begriff der Nahrungskette	43		

Vorwort

Die Auseinandersetzung um die Einführung und den weiteren Ausbau der Kernenergie besteht in der Bundesrepublik Deutschland mit wechselnder Intensität und in den unterschiedlichen Erscheinungsformen seit mehreren Jahren. Die Argumente und Thesen der Diskussion drehen sich um die verschiedenen Wechselbeziehungen zwischen der Energie, speziell der Kernenergie, und unserer Umwelt. In der Kontroverse, in der häufig emotionelle Aussagen anstelle eines sachlichen Abwägens des Für und Wider vorgebracht werden, stehen sich die unterschiedlichen sozialen, politischen und wirtschaftlichen Gruppierungen unserer Gesellschaft gegenüber. Die Skala der Wertung reicht von höchster Zustimmung bis zu tiefster Verdammung einer Technologie, die eine wesentliche Option zur Deckung des Energiebedarfs der Zukunft darstellen kann.

Mit dem Seminarbericht „Nutzen und Risiko der Kernenergie“, der die wirtschaftliche Bedeutung der Kernenergie, ihre technische Realisierung, die Probleme des Brennstoffkreislaufs, die Wirkung ionisierender Strahlung und die Sicherheit von Kernkraftwerken zum Inhalt hatte, versuchte die Kernforschungsanlage Jülich bereits einen sachlichen Beitrag zur Information der Öffentlichkeit über Fragen der Kernenergie zu leisten. Ein weiterer Seminarbericht „Aktuelle Themen der Kernenergie“ behandelte Fragen der Wiederaufarbeitung und Endlagerung, der Klimabeeinflussung, der Sicherung kerntechnischer Anlagen und spaltbarer Materialien sowie die Eigenschaften und Möglichkeiten des Plutoniums. Der vorliegende Bericht betrachtet nunmehr weiterführende Aspekte einer zukünftigen Energiebereitstellung. Dazu werden die fortgeschrittenen Reaktortypen Hochtemperaturreaktor und Schneller Brüter dargestellt, radioökologische Fragen behandelt sowie die Umweltbelastungen verschiedener Methoden der Energieerzeugung, einschließlich der Kernenergie, erörtert; schließlich werden die Möglichkeiten alternativer Energiequellen aufgezeigt und der Stand der Energieerzeugung durch Kernfusion beschrieben. Für die zweite Auflage wurden alle Beiträge gründlich überarbeitet und auf den neuesten Stand gebracht.

Die Autoren, die meist seit Jahren in dem von ihnen dargestellten Sachgebiet arbeiten, waren bemüht, ihr fachliches Wissen allgemeinverständlich darzustellen. Die jeweiligen Hinweise auf weiterführende Literatur machen die Angaben nachprüfbar und eröffnen darüber hinaus die Möglichkeit zu einer vertieften Beschäftigung mit dem jeweiligen Thema.

Der vorliegende Bericht soll zur Klärung der komplexen Zusammenhänge der Energieversorgung im Allgemeinen und der Kernenergie im Besonderen sachlich-fachlich beitragen und dem an Fragen der Energiedarbietung Interessierten bei seiner persönlichen Entscheidungsfindung behilflich sein.

Jülich, im März 1984

Erwin Münch

Der Hochtemperaturreaktor

Heiko Barnert und Rudolf Schulten

Institut für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

1. Einleitung

Der Hochtemperaturreaktor (HTR) ist – wie der Schnelle Brutreaktor – im Vergleich zum Leichtwasserreaktor ein fortgeschrittenes Reaktorsystem. Die Entwicklung der fortgeschrittenen Reaktorsysteme erfolgt unter dem Aspekt der Vorsorge in der Energiepolitik.

Die Entwicklung des HTR verspricht eine Reihe von Technologien verfügbar zu machen, die in verschiedenen Bereichen der Energieversorgung eingesetzt werden können. Neben dem Einsatz des HTR zur Stromerzeugung zielt die Nutzung der HTR-Wärme auf die Herstellung neuer Energieträger, die der Substitution von Erdöl und Erdgas dienen können. Von besonderer Bedeutung ist dabei, daß die heimischen Kohlevorräte durch Kohleveredlungsverfahren zur Deckung des Bedarfs an umweltschonenden und anwendungsfreundlichen Energieträgern herangezogen werden können^[1,2,3].

Besondere Merkmale der Nutzung der Kernenergie mittels HTR sind die folgenden: die Wärmeproduktion bei hohen Temperaturen bis zu 1000 °C (gegenüber 300 °C beim Leichtwasserreaktor), das hohe Sicherheitspotential, die erhöhte Flexibilität im Hinblick auf den Standort, der Einsatz zur nuklearen Kohleveredlung und der sparsame Uranverbrauch. Insbesondere in der Vielseitigkeit seiner Einsatzmöglichkeiten zur Produktion von Strom und zur Produktion von Energieträgern für den Wärmemarkt werden die volkswirtschaftlichen Vorteile des HTR für die zukünftige Energiewirtschaft und die Sicherung der Energieversorgung in der Bundesrepublik Deutschland gesehen.

2. Funktionsweise des Hochtemperaturreaktors

2.1 Physikalische Prinzipien und Konstruktionsmerkmale

Im Hochtemperaturreaktor wird, wie im Leichtwasserreaktor und im Schnellen Brutreaktor, die Energie durch

Spaltung von schweren Atomkernen mit Hilfe von Neutronen freigesetzt. Die Neutronen werden durch die Kernspaltung selbst erzeugt. Der primäre Kernbrennstoff ist das Uranisotop Uran-235, das im natürlich vorkommenden Uran zu 0,7 % enthalten ist. Daneben tragen zur Energieerzeugung erbrütete Spaltstoffe bei, die aus Brutstoffen mit Hilfe von Überschußneutronen erbrütet werden.

Der HTR ist ein gasgekühlter, graphitmoderierter, thermischer Reaktor, d.h. die bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen werden durch den Moderatorgraphit gebremst, bis sie thermische Energien erreicht haben. Die durch die Kernspaltung freiwerdende Energie wird durch das gasförmige Kühlmedium Helium abgeführt. Der Reaktor trägt das Attribut „Hochtemperatur“, weil er Wärmeenergie in einer im Vergleich zu anderen Reaktoren hohen Nutzungstemperatur im Bereich von 300 bis 1000 °C produziert.

Das HTR-Core – das ist der Bereich der nuklearen Energiefreisetzung – besteht aus einer Schüttung einer großen Anzahl von kugelförmigen Brennelementen (daher auch der Name „Kugelhaufen“-Reaktor), die von Coreinbauten gehalten und geführt werden^[4]. Die kugelförmigen Brennelemente und die Corewandungen bestehen im wesentlichen aus Graphit. Graphit ist ein guter Wärmeleiter, es hat eine hohe Druckfestigkeit und ist bis zu sehr hohen Temperaturen ohne Strukturänderung von fester Konsistenz. Formänderungen, wie sie durch die Neutronenbestrahlung eintreten, stellen kein Problem dar.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Brennelement-Konzepts besteht darin, daß die Beladung mit frischen Brennelementen und die Entladung abgebrannter Brennelemente kontinuierlich, d.h. ohne Unterbrechung des Betriebs des Kernkraftwerks erfolgt.

Das kugelförmige Brennelement hat einen Durchmesser von 6 cm (etwa so groß wie ein Tennisball) und enthält im inneren Teil in einer festen Matrix aus Graphit eine große Anzahl beschichteter Partikel. In Abbildung 1 ist die äußere Ansicht der kugelförmigen Brennelemente sowie ein Schnitt durch ein solches Brennelement mit einem

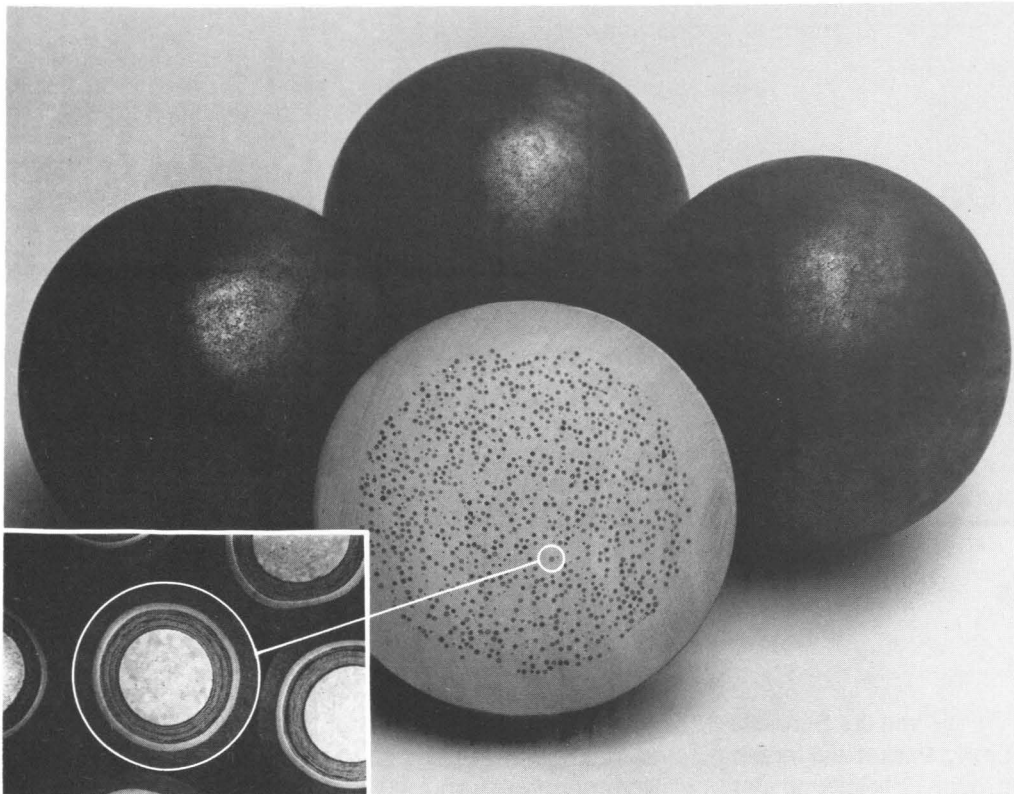


Abb. 1:
Kugelbrennelement und darin
enthaltene „Coated Particles“
für den Hochtemperaturreak-
tor

Vergrößerungsausschnitt dargestellt. Neben dem kugelförmigen Brennelement ist auch ein blockförmiges Brennelement entwickelt worden, und zwar in den USA.

Die beschichteten Partikel, sogenannte „coated particles“ mit einem Außendurchmesser von etwa 0,5 mm, enthalten im Kern den nuklearen Brennstoff in der Form von z.B. Uran-Thorium-Oxid. Dieser Kern wird von mehreren dünnen Schichten aus pyrolytischem Kohlenstoff dicht und druckfest umschlossen. Diese Beschichtungen stellen die wichtigste Barriere gegen das Entweichen von Spaltprodukten dar. Die bisher mit diesen kugelförmigen Brennelementen im Betrieb des Versuchskernkraftwerks AVR in Jülich gewonnenen Erfahrungen sind sehr gut.

Zur Kühlung des Cores des HTR wird das gasförmige Kühlmittel Helium verwendet. Helium wird durch Neutronen nicht aktiviert. Es ist chemisch inert und hat eine gute Wärmeleitfähigkeit. Es wird bei einem Druck von ca. 40 bar eingesetzt, was die Anwendung von Druckbehältern erfordert. Das gasförmige Kühlmittel Helium strömt durch die Zwischenräume zwischen den kugelförmigen Brennelementen der Kugelhaufenschüttung, erwärmt sich dabei und transportiert auf diese Weise die Wärmeenergie mit einer Temperatur bis zu 1000 °C zu wärmeverbrauchenden Apparaten (Dampferzeuger, Röhrenspaltöfen, Wärmetauscher) innerhalb des nuklearen Systems, mit denen die Energie weiter umgewandelt wird. Diese Umwandlung beinhaltet wegen des hohen Temperaturniveaus die Möglichkeit zu einer vielfältigen Anwendung der Wärmeenergie^[5,6]. Dies stellt einen maßgeblichen Vorteil des Hochtemperaturreaktors dar.

Der HTR zeichnet sich durch eine große Flexibilität bezüglich des Brennstoffkreislaufes aus. Er kann sowohl mit dem Uran/Plutonium-Brennstoffkreislauf, wie auch mit dem Thorium/Uran-Brennstoffkreislauf mit unterschied-

licher Urananreicherung betrieben werden^[7]. Der Vorteil des Thorium/Uran-Brennstoffkreislaufs besteht darin, daß der HTR im Vergleich zum Leichtwasserreaktor „Uran-sparend“ gefahren werden kann. Dazu ist dann allerdings Wiederaufarbeitung nötig. Derzeitig wird davon ausgegangen, daß Wiederaufarbeitung in den nächsten Jahrzehnten nicht lohnend ist.

Für die nächsten HTR-Anlagen ist die Verwendung des Uran/Plutonium-Brennstoffkreislaufs geplant, und zwar mit niedrig angereichertem Uran. Für die Entsorgung der abgebrannten Brennelemente sind derzeitige Konzepte in Arbeit, die an die Entsorgung der Leichtwasserreaktoren anschließen. Bisherige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben ergeben, daß der Graphit und die Beschichtungen des Brennelements einen guten Einschluß des abgebrannten Kernbrennstoffs für längerfristige Einlagerungen in den Untergrund darstellen. Der Grund dafür ist die nach Zwischenlagerung geringe Aktivität und die Beständigkeit gegen Auslaugung. Dies ist durch eine Genehmigung für eine Versuchs-Einlagerung, die allerdings aus anderen Gründen nicht benutzt wurde, bestätigt^[8].

2.2 Allgemeine Sicherheitseigenschaften des HTR

Mit der Erfüllung der sicherheitstechnischen Anforderungen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens haben alle Reaktortypen einen vergleichbaren Sicherheitsstandard. Dieser wird jedoch bei den verschiedenen Reaktortypen mit unterschiedlichem Aufwand, entsprechend ihren sicherheitstechnischen Besonderheiten, erreicht.

Der HTR ist allgemein dadurch gekennzeichnet, daß durch seine technischen Merkmale ein hohes Maß an dem System innewohnender (inhärenter) Sicherheit realisiert ist.

Die dem HTR innewohnenden Sicherheitseigenschaften sind die folgenden^[9]:

- niedrige Leistungsdichte und hohe Wärmekapazität im HTR-Core, d.h. langsame Temperaturänderung bei einer Störung des Gleichgewichts zwischen Wärmeproduktion und Kühlung,
- hohe Temperaturbeständigkeit der Brennelemente und Strukturmaterialien mit vernachlässigbarer Spaltproduktfreisetzung bis zu Temperaturen von etwa 1600 °C,
- negativer Temperatur- und Leistungs-Koeffizient der Reaktivität bei allen Betriebszuständen, d.h. Selbststabilisierung und Limitierung der nuklearen Leistung und Temperatur unterhalb von Schadensgrenzen durch negative Rückkopplung auf den Neutronenfluß,
- mehrfache Barrieren im Brennelement zur Spaltprodukt-rückhaltung mit nicht spontanem, sondern langsam sich entwickelndem Schadensverlauf,
- inertes, phasenstabiles, neutronen-physikalisch neutrales Kühlmittel Helium, d.h. keine Beeinflussung der Reaktivität, kein totaler Kühlmittelverlust, sondern lediglich Verminderung der Dichte und damit Kühlfähigkeit auf 1 bis 2 % der Vollastwerte.

Die Wirksamkeit dieser dem HTR innewohnenden Sicherheitseigenschaften ist in umfangreichen Studien untersucht und bestätigt worden^[10,11,12]. Insbesondere beim HTR-Modul kommen die günstigen Sicherheitseigenschaften kleiner Reaktoren und die HTR-spezifischen Eigenschaften voll zum Tragen.

Der HTR kennt keine Kernschmelzunfälle. Bei Ausfall oder Kühlung steigen die Kerntemperaturen solange an (anfangs ca. 100 °C/Stunde), bis die Nachwärmeproduktion und die Speicherung sowie die Abfuhr von Wärme zu stabilen Verhältnissen führen. Derartige Störfälle bestimmen bei großen und mittleren Anlagen das Risiko. Ein spezifischer Störfall für den HTR ist der Druckverlust des Kühlmittels, der Eintritt von Wasser oder von Luft oder – bei Prozeßwärmereaktoren – von Prozeßgas, sowie deren Kombinationen. Gegen diese Störfälle wird das Gesamtsystem durch passive und aktive Sicherheitsmaßnahmen ausgelegt. Beispielhaft sei im folgenden der Störfall „Wassereintritt“ aus einem Dampferzeuger beim Modul-Reaktor beschrieben. Über Feuchtefühler wird der Störfall erkannt und die Isolierung und Entlastung des defekten Dampferzeugers vorgenommen, so daß die Menge des in den Primärkreis eintretenden Wassers begrenzt ist. Gleichzeitig wird der Reaktor automatisch abgeschaltet. Die im heißen Zustand durch eingetretenen Wasserdampf verursachte Korrosion an den Graphitoberflächen ist vernachlässigbar gering. Das Sicherheitskonzept sieht vor, daß derartige Störfälle im Leben eines Reaktors vorkommen dürfen, ohne daß die Betriebssicherheit des Reaktors beeinträchtigt wird.

Auch gegen die Auswirkungen anderer Störfälle und Störfall-Kombinationen sind beim HTR ausreichende Schadens- und Risikovorsorgen getroffen.

3. Prototypen und Demonstationsanlagen

3.1. Übersicht zur bisherigen Entwicklung

Die Entwicklung des HTR als eines gasgekühlten Reaktors baut auf den Erfahrungen aus dem langjährigen Betrieb von weltweit etwa 40 Gas-Graphit-Reaktoren auf. Insgesamt liegen für diese bis heute 680 Reaktorbetriebsjahre als Betriebserfahrungen vor. Diese sind vergleichbar mit denen des Druckwasserreaktors (700 Betriebsjahre) und höher als beim Siedewasserreaktor (500 Betriebsjahre). Rund 20 % der weltweit bisher durch Kernkraftwerke erzeugten Elektrizität wurden von gasgekühlten Reaktoren bereitgestellt.

Der HTR ist unter den Gas-Graphit-Reaktoren der fortgeschrittenste Reaktor. Bisher sind in der Welt vier HTR in Betrieb gegangen: zwei in den USA, einer in Großbritannien und der AVR-Reaktor in der Bundesrepublik Deutschland. Diese Reaktoren haben bisher sehr gute Betriebsergebnisse gezeigt.

Ein weiterer Reaktor, nämlich der THTR-300, ist in der Bundesrepublik Deutschland derzeit in Bau. Am 13. September 1983 wurde der THTR-300 erstmals kritisch.

Über diese fünf Reaktoren und weiterführende Projekte in der Bundesrepublik Deutschland gibt Tabelle 1 eine Übersicht.

Land	Reaktor	Leistung MW _{th} MW _e		Betrieb Jahr	Bemerkg.
1) GB	Dragon	20	0	1964*-76	planmäßig außer Betrieb
2) USA	Peach Bottom	115	40	1966*-74	
3)	Fort St. Vrain	837	330	seit 1977	
4) Bundes-	AVR	46	15	seit 1967	
5) republik	THTR-300	750	300	1983*/84	in Bau
6) Deutsch-	HTR-500	1250	500		Plan
7) land	HTR-Modul	200	80		Plan

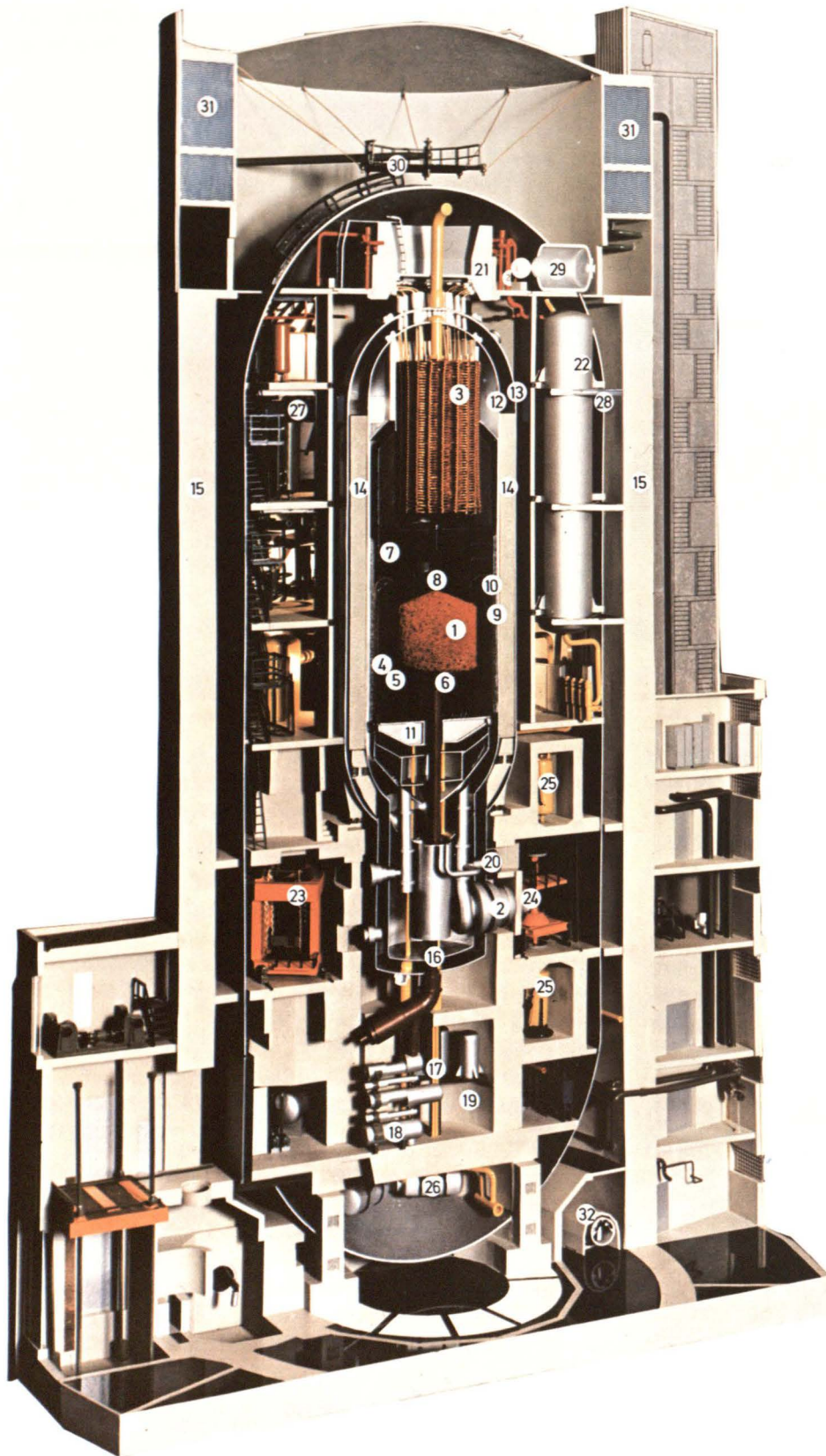
* erste Kritikalität des Reaktors

Tab. 1:
Hochtemperatur-Reaktoren HTR in verschiedenen Ländern. In Betrieb gewesene, in Betrieb und in Bau befindliche sowie in der Bundesrepublik Deutschland geplante Anlagen.

Die beiden deutschen Reaktoren AVR und THTR-300 werden im folgenden ausführlicher beschrieben.

3.2. Der AVR

Das Versuchskraftwerk der AVR-GmbH (AVR: Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, eine Vereinigung von 16



- 1 Core
- 2 Kühlgasgebläse
- 3 Dampferzeuger
- 4 Kohlesteineinbauten
- 5 Reflektormantel
- 6 Reflektorboden
- 7 Reflektordecke
- 8 Graphitsäulen für Abschaltstäbe
- 9 Thermisches Schild
- 10 Kugelzugaberohr
- 11 Tragstern
- 12 Innerer Reaktorbehälter
- 13 Äußerer Reaktorbehälter
- 14 Biologischer Schild 1
- 15 Biologischer Schild 2
- 16 Kugelabzugrohr
- 17 Abschaltstäbe
- 18 Bauteile der Beschickungsanlage
- 19 Beschickungsraum
- 20 Hauptpaßklappen
- 21 Dampfsammler
- 22 Mischkühler
- 23 Montagegerät
- 24 Deckelheber
- 25 Gasreinigungsanlagen
- 26 Wasserauffangbehälter
- 27 Umluftanlage
- 28 Schutzbehälter
- 29 Personenschleuse
- 30 Sprinkleranlage
- 31 Wasserhochbehälter
- 32 Ringkanal

Abb. 2:
Modell des Reaktorteils des Versuchs-Kernkraftwerks der Arbeitsgemeinschaft-Versuchsreaktor AVR in Jülich

Elektrizitätsversorgungsunternehmen) in Jülich läuft seit 1967 und hat mit seinem bisherigen Betrieb^[13] wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Erkenntnisse und Erfahrungen erbracht, die von großer Bedeutung für die laufenden Entwicklungsarbeiten sind. Der Reaktor dieses Versuchskernkraftwerkes ist ein HTR mit

Kugelhaufencore. Seit 1974 wird dieser Reaktor – als einziger Reaktor auf der Welt – mit einer erhöhten mittleren Gasaustrittstemperatur von 950 °C betrieben. Damit wurde demonstriert, daß der HTR zur Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozeßwärme eingesetzt werden kann.

1. Elektrische Leistung des Kernkraftwerks	15 MW _e
2. Thermische Leistung des Reaktors	46 MW _{th}
3. Anzahl der kugelförmigen Brennelemente im Core	ca. 80000 Stück
4. Anzahl der beschichteten Partikeln im Brennelement	bis 40000 Stück
5. Masse Uran im Brennelement	1 g U-235
6. Masse Thorium im Brennelement	5 g Th-232
7. Gesamtmasse an Uran-235	ca. 40 kg U-235
8. Druck des Kühlmittels Helium im Primärkreis	10,8 bar
9. Mittlere Kühlgastemperatur am Coreaustritt	950°C
10. Frischdampf Temperatur	505°C
11. Beginn des Betriebs	Dezember 1976
12. Umbau geplant für	1986/89

Tab. 2:
Technische Daten des Versuchskernkraftwerkes AVR^[1]

Eine Übersicht der technischen Daten des Versuchskernkraftwerkes AVR sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Abbildung 2 zeigt das Modell dieser Anlage im Vertikalschnitt.

Das Core des AVR-Reaktors besteht aus einer Schüttung von etwa 80000 kugelförmigen Brennelementen, es produziert eine thermische Leistung von 46 Mega-Watt. Das gasförmige Kühlmittel Helium wird mit zwei Gebläsen durch das Core gefördert und transportiert damit die im Core produzierte Wärme in den über dem Core angeordneten Dampferzeuger. Die mittlere Kühlgastemperatur am Coreaustritt beträgt 950 °C. Im Dampferzeuger wird Dampf erzeugt, der ähnliche Qualität wie derjenige konventioneller Kraftwerke hat und der in einer nachgeschalteten Turbine die elektrische Leistung von 15 Mega-Watt erzeugt.

Die mit dem AVR im Leistungsbetrieb und bei der Durchführung von Experimenten gewonnen sehr guten Erfahrungen betreffen insbesondere die hohe Verfügbarkeit in Zeit und Arbeit, die Produktion von Wärme auf hohem Temperaturniveau, die Demonstration der sehr guten Sicherheitseigenschaften, ein fehlerfreies Betriebsverhalten der Gebläse und anderer Einrichtungen sowie insbesondere die geringe Strahlenbelastung für das Personal und die Umgebung.

Die guten Sicherheitseigenschaften wurden durch viele grundsätzliche Experimente bestätigt. Beispielhaft sei der „Vierstab-Klemm-Versuch“ beschrieben. Dieser Versuch stellt ein großes Experiment dar, das der Genehmigung durch die Aufsichtsbehörde bedurfte. Bei diesem Experiment wurden im Vollastbetrieb zwei gravierende Maßnahmen von außen vorgenommen, nämlich

- 1) es wurde die Kühlung des Cores durch Abstellen der Gebläse unterbunden und
- 2) es wurde die sonst automatisch erfolgende Abschaltung des Reaktors durch „Klemmen“ der vier Abschaltstäbe des Reaktors unterbunden.

Das Ergebnis dieses Experiments war, daß die nukleare Wärmeproduktion sozusagen augenblicklich erlosch und sich die Temperaturen im Core nach einem geringen Überschlag in der Nähe der Betriebstemperaturen stabilisierten. Dieser Befund ist wie folgt zu interpretieren:

ren: der große negative Temperatur-Koeffizient der Reaktivität hat die Abschaltung der nuklearen Wärmeproduktion bewirkt, und die thermischen Eigenschaften des Cores haben die Temperaturstabilisierung hervorgerufen. Nach etwa einem Tag wurde der Reaktor wegen der bis dahin eingetretenen Abkühlung (durch Wärmeverluste über den über dem Kern hängenden Dampferzeuger) wieder kritisch und stabilisierte die Wärmeproduktion auf einem sehr niedrigen Niveau.

Mit den Resultaten aus solchen Experimenten konnten die inhärenten Sicherheitseigenschaften des AVR speziell und die sicherheitstechnischen Gegebenheiten des HTR im allgemeinen auch experimentell demonstriert werden.

Wegen einer Leckage des Dampferzeugers mußte der AVR-Reaktor 1978 seinen Betrieb unterbrechen. Bei diesem Störfall ist eine große Menge von Wasser aus dem Dampferzeuger in den Primärkreis eingetreten. Die bei diesem Störfall gewonnenen Erfahrungen zeigen, daß zukünftige HTR über geeignete Methoden und Vorrichtungen verfügen müssen, um beschädigte Dampferzeuger oder Wärmeübertrager schneller inspizieren und reparieren zu können. Im August 1979 hat der AVR seinen Betrieb wieder aufgenommen. Inzwischen läuft der Betrieb wieder bei einer mittleren Austrittstemperatur des Kühlmittels Helium von 950 °C.

Seit Beginn des Jahres 1983 wird ein Konzept zum Umbau des AVR erarbeitet. Das Ziel dieser Überlegungen ist es, mit dem AVR die nukleare Methanreformierung zu demonstrieren^[14]. Die nukleare Methanreformierung ist ein fundamentaler technologischer Schritt auf dem Wege zur großindustriellen Nutzung der nuklearen Prozesswärme.

3.2. Der THTR-300

Das Prototyp-Kernkraftwerk THTR-300 (THTR: Thorium-Hochtemperaturreaktor, 300:300 Mega-Watt elektrische Leistung) der Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH, Uentrop bei Hamm, befindet sich seit einigen Jahren im Bau^[15]. Wegen seines immer wieder verlängerten Terminplans und wegen seiner laufend gestiegenen Kosten hat der Bau des THTR-300 in den letzten Jahren immer wieder zu Sorgen Anlaß gegeben^[16]. Seit dem Frühjahr 1983 ist nunmehr aber die Finanzierung gesichert und die Beendigung des Baus absehbar. Nach der Beladung des Cores des THTR-300 mit Brennelementen ist der Reaktor am 13. September 1983 erstmals kritisch geworden. Damit ist ein wesentliches Ziel der nuklearen Auslegungsarbeit erreicht. Die Inbetriebnahme des Reaktors im Leistungsbetrieb wird für das Jahr 1984 erwartet.

Der THTR-300 wird das erste kommerzielle Kernkraftwerk mit HTR in der Bundesrepublik Deutschland sein; er ist vergleichbar mit dem Fort St. Vrain-Reaktor in den USA.

Der THTR-300 besitzt einen HTR mit Kugelhaufencore und ist in integrierter Spannbetonbehältertechnik ausgeführt. Die thermische Leistung des Reaktors von 750

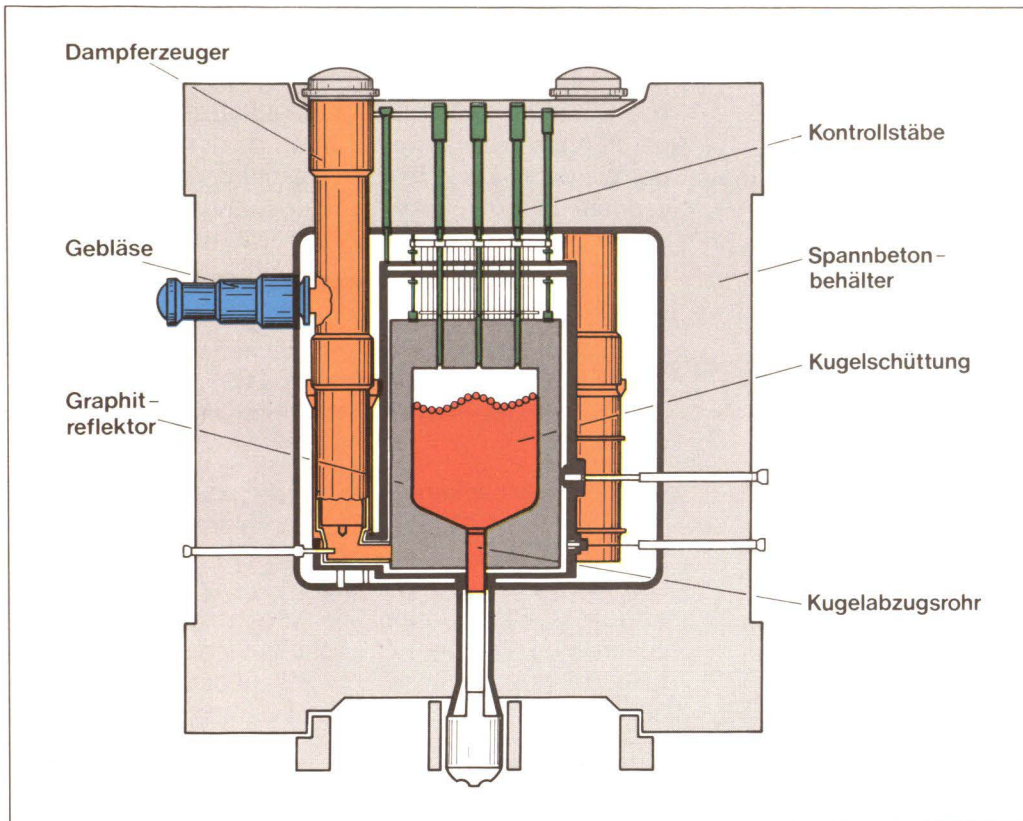


Abb. 3:
Querschnitt durch den Kugelhaufenreaktor THTR-300

Mega-Watt wird dazu benutzt, über eine Dampf-Turbinenanlage eine elektrische Leistung von 300 Mega-Watt zu produzieren. Die Abwärme aus dem Kraftwerksprozeß wird mit Hilfe eines Trockenkühlturms abgeführt; diese umweltfreundliche Technik kommt erstmals in der Bundesrepublik Deutschland großtechnisch zum Einsatz.

Einen Überblick über die technischen Daten des THTR-300 gibt Tabelle 3. Abbildung 3 zeigt ein Schema des Reaktorbereichs des THTR-300 im Vertikalschnitt, bestehend aus dem Core, den Dampferzeugern und dem Spannbetonbehälter.

Der Druckbehälter des THTR-300 ist ein Spannbetonbehälter. Dieser ist innen mit einer Stahlhaut heliumdicht ausgekleidet. Die durch den Innendruck auftretenden Kräfte werden von horizontalen und vertikalen Stahlkabeln aufgenommen, mit denen der Betonkörper vorge-

spannt wird. Im Innern dieses massiven Behälters ist der gesamte Primärkreislauf untergebracht.

Im Zentrum des Spannbetonbehälters befindet sich das Kugelhaufencore, das aus einer Schüttung von ca. 670 000 Brennelementen besteht. Die maximale thermische Leistung eines Brennelements beträgt etwa 3,9 Kilo-Watt. Die Kugelhaufenschüttung wird durch ein aus Graphitblöcken aufgebautes Gefäß zusammengehalten, das gleichzeitig die Funktion des Reflektors für Neutronen erfüllt. Ein Teil der zur Steuerung des Reaktors benötigten Absorberstäbe taucht direkt in den Kugelhaufen ein. Die restlichen Stäbe bewegen sich in Bohrungen des seitlichen Reflektors.

Im Außenraum zwischen dem Core und der Innenseite des Spannbetonbehälters befinden sich die sechs Dampferzeuger. Das Kühlmittel Helium wird durch die Gebläse, die seitlich in der Spannbetonbehälterwand angeordnet sind, von oben durch das Core gefördert und gelangt mit einer Temperatur von 750 °C in die Dampferzeuger. Hier gibt es seine Wärme an den sekundären Wasser/Wasserdampf-Kreislauf ab. Das auf 250 °C abgekühlte Helium wird von den Gebläsen angesaugt und zur oberen Kaltgaskammer am Coreintritt zurückgefördert. Mit den hohen Temperaturen des Primärkreislaufs lassen sich Dampfzustände wie bei konventionellen Kraftwerken erreichen. Die Folge ist ein sehr hoher Wirkungsgrad, der selbst bei Verwendung eines Trockenkühlturmes etwa 40 % beträgt.

Die kugelförmigen Brennelemente werden kontinuierlich oben auf die Kugelschüttung aufgegeben und im gleichen Maße unten durch das Kugelabzugsrohr abgezogen. Dadurch laufen die Brennelementekugeln langsam durch das Core. Durch eine Meßvorrichtung am Kugelabzugsrohr wird der Abbrand der Kugeln gemessen. Ist

1. Elektrische Nettoleistung des Kernkraftwerks	307 MW _e
2. Thermische Leistung des Reaktors	750 MW _{th}
3. Anzahl der kugelförmigen Brennelemente im Core	ca. 670 000 Stück
4. Maximalleistung pro Brennelementkugel	3,9 kW
5. Masse Uran pro Kugel	1,11 g U-235
6. Masse an Thorium pro Kugel	10,3 g Th-232
7. Druck des Kühlmittels Helium im Core	40 bar
8. Mittlere Kühlgastemperatur am Coreaustritt	750°C
9. Anzahl der Dampferzeuger	6 Stück
10. Frischdampf Temperatur	535°C
11. Erste Kritikalität	13.9.1983
12. Geplanter Betrieb	1984

Tab. 3:
Technische Daten des Prototyp-Kernkraftwerkes THTR-300^[15]

der Zielabbrand erreicht, so werden die Kugeln ausgeschieden, anderenfalls werden sie mittels einer „Rohrpostanlage“ in das Core zurückgefördert. Ausgeschiedene Kugeln werden durch frische ersetzt.

Wegen der Vorteile des Thorium/Uran-Brennstoffkreislaufs wird dieser Reaktor mit Brennelementen betrieben, die neben etwa 1 g Uran-235 ca. 10 g Thorium-232 pro Brennelementkugel enthalten. Diese Vorteile werden allerdings beim THTR-300 nicht genutzt werden, weil eine Wiederaufarbeitung nicht vorgesehen ist.

Die Errichtung und der Betrieb des THTR-300 dient den Zielen der Gewinnung von Erfahrungen bei Planung, Auslegung und Bau sowie der Genehmigung und der Demonstration der Betriebsweise sowie dem Nachweis, daß ein Kernkraftwerk dieser Bauart und Größenordnung kommerziell verwendbare elektrische Energie erzeugen kann.

4. Weiterentwicklung der HTR-Anlagen

4.1. Internationale Entwicklungen

Neben der Entwicklungsarbeit in der Bundesrepublik Deutschland werden Entwicklungsarbeiten für den HTR im wesentlichen in den USA, in Japan und in der UdSSR durchgeführt. Mit den USA und Japan besteht seit langem Zusammenarbeit. Das Ziel der Entwicklungsarbeit ist, den HTR zur Stromerzeugung und zur Prozeßwärmenutzung in den Energiemarkt einzuführen. Die Entwicklungsarbeiten in den USA und in Japan sind in der Hauptsache auf Konzepte mit blockförmigen Brennelementen ausgerichtet, während in der UdSSR das kugelförmige Brennelement zugrunde gelegt wird.

In der Bundesrepublik Deutschland sind in der Weiterentwicklung des HTR mit kugelförmigen Brennelementen die folgenden beiden Reaktorkonzepte von Bedeutung: der HTR-500 und der HTR-Modul. Diese werden im folgenden näher erläutert.

4.2. Der HTR-500

Als Nachfolge-Anlage für den THTR-300 wurde im Jahre 1982 von der Firmengruppe Brown, Boveri & Cie/Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH das Konzept des HTR-500 vorgelegt^[17].

Für dessen technisches Konzept werden die für den THTR-300 entwickelten und nach dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik genehmigten Bauelemente- und Komponenten-Konzeptionen überwiegend übernommen. Die beim Bau gewonnenen Erfahrungen werden voll genutzt und führen teilweise zu Vereinfachungen und Optimierungen. Die Anlagen- und Sicherheitskonzeption geht von umfangreichen Störfallanalysen^[18] aus und nutzt die im THTR-300-Genehmigungsverfahren erzielten Ergebnisse und gewonnenen Erfahrungen. Diese Erkenntnisse werden konsequent zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitig hohem Sicherheitsstandard genutzt.

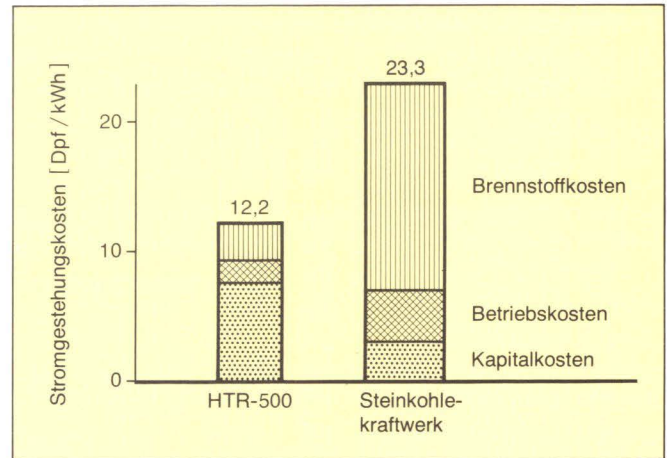


Abb. 4:
Vergleich der Stromgestehungskosten

Die thermische Leistung des HTR-500 beträgt 1250 Mega-Watt, die elektrische Nettoleistung ist 500 Mega-Watt. Für die Erzeugung von Elektrizität ist eine Heißgastemperatur von 700 °C ausreichend. Es wird hochgespannter Dampf produziert, dessen Eigenschaften den Einsatz moderner Dampfturbinenanlagen wie bei fossilbeheizten Kraftwerken erlauben.

Der HTR-500 ist grundsätzlich als Verbundkraftwerk zur öffentlichen Stromversorgung und gleichzeitig zur Prozeßdampfversorgung industrieller Verbraucher konzipiert. Für eine Anwendung des HTR-500 als Stromerzeuger wurden Wirtschaftlichkeitsrechnungen anhand von Stromgestehungskosten im Vergleich zu einem Steinkohlekraftwerk der Standardgröße 625 Mega-Watt sowie zum Konvoi-Druckwasserreaktor von 1240 Mega-Watt durchgeführt. Die Ermittlung der Stromgestehungskosten erfolgte hierbei einheitlich auf der Basis der dynamischen Kostenrechnung für eine Inbetriebnahme im Jahre 1993, es sind über der Abschreibungsdauer gemittelte finanzmathematische Durchschnittskosten. Das Ergebnis dieser Rechnungen zeigt, daß der HTR-500 zu annähernd gleichen Stromgestehungskosten wie große Druckwasserreaktoren kommt, die erheblich unter denen aus kohlegefeuerten Kraftwerken liegen.

Die Kostenstruktur ist in Abbildung 4 dargestellt^[17].

Mit der Realisierung des HTR-500 nach dieser Vorgabe wäre die Wirtschaftlichkeit der Nutzung des HTR im Vergleich zum Druckwasserreaktor erreicht. Von Bedeutung ist dabei, daß deutsche Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen erstmals ihre Bereitschaft erklärt haben, den Bau des HTR-500 völlig mit eigenen Mitteln zu finanzieren^[5].

4.3 Der HTR-Modul

Für die Realisierung zukünftiger Hochtemperaturreaktoren hat die Firmengruppe Kraftwerk-Union/Gesellschaft für Hochtemperatur-Reaktorbau mbH im Jahre 1981 das Konzept des HTR-Modul vorgeschlagen. Ausgangspunkt dabei war die Übertragung von Kriterien aus der langjährigen Erfahrung beim Bau von Druckwasserreaktoren auf die Realisierung zukünftiger HTR^[19].

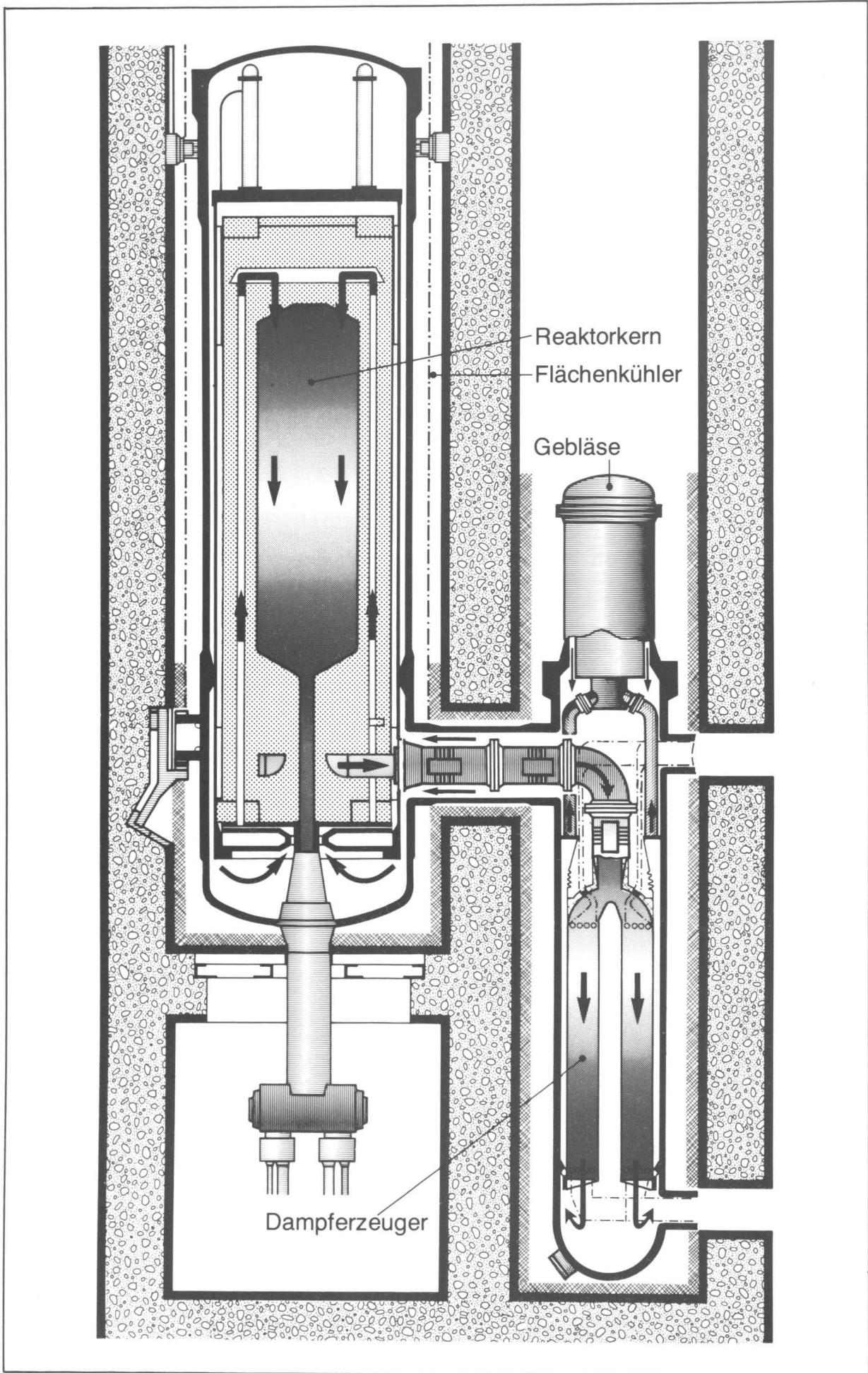


Abb. 5:
 HTR-Modul mit Dampferzeuger

Das Konzept des HTR-Moduls ist neuartig in der Reaktortechnik. Der grundlegende Gedanke ist der Aufbau größerer Einheiten durch die Zusammenführung mehrerer Module kleiner Leistungseinheit^[20,21]. Das HTR-Modul-Konzept ist dadurch gekennzeichnet, daß sich standardisierte Reaktoreinheiten kleiner Leistung zu Anlagen in einem weiten Leistungsbereich zusammenschalten lassen.

Die thermische Leistung des HTR-Moduls beträgt für die Dampferzeugung 200 Mega-Watt. Für größere thermische Leistungen werden 2,4 oder 8 Module zusammengestellt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Bedarfs dürften Anlagen mit 8 Modulen eine obere Grenze darstellen.

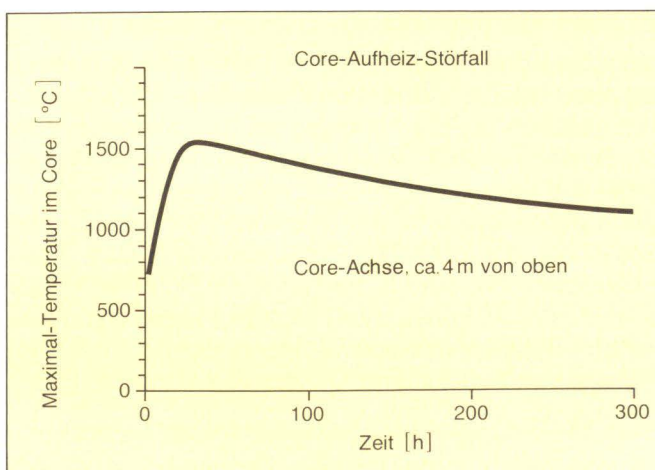
Das Core des HTR-Moduls ist gekennzeichnet durch seine schlanke Bauart. Die Schlankheit hat den Zweck der erleichterten Wärmeabfuhr über die Mantelfläche des Reaktors an außenliegende Systeme beim Aufheiz-Störfall.

In Abbildung 5 ist das technische Konzept des HTR-Moduls mit Dampferzeuger dargestellt.

Der HTR-Modul ist ein System, bei dem die günstigen Sicherheitseigenschaften kleiner Reaktoren und insbesondere die HTR-spezifischen Eigenschaften voll zum Tragen kommen. Einen hohen Grad dem System inwohnender Sicherheit liefern neben der Beschränkung der Anlagengröße die geringe Leistungsdichte und die schlanke Konstruktion des Reaktorkerns, die eine Nachwärmeabfuhr allein durch Wärmeleitungs- und Naturkonvektionsvorgänge nach außen hin ermöglicht. Dies führt dazu, daß bei sogenannten Aufheiz-Störfällen die Temperaturen der Brennelemente im Reaktorcore zwar ansteigen, aber an keiner Stelle die Grenze von 1600 °C überschreiten und im weiteren Zeitverlauf sogar langsam absinken. Dieses Temperatur-Verhalten des Cores des HTR-Moduls ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die temperaturbedingte Spaltproduktfreisetzung ist so gering, daß in der Umgebung die Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung in keinem Fall überschritten werden.

Abb. 6:
Temperatur-Verhalten des Cores des HTR-Moduls



In umfangreichen Untersuchungen zum Störfallverhalten des HTR-Moduls konnte selbst bei extremen Störfallkombinationen nachgewiesen werden, daß gravierende Schäden in der Umgebung ausgeschlossen werden können^[22].

Mit dieser Eigenschaft des HTR-Moduls ist das Prinzip der Schadensbegrenzung neben dem Prinzip der Risikobegrenzung realisierbar.

Der HTR-Modul läßt sich sowohl zur Stromerzeugung wie auch zur Prozeßwärme-Nutzung einsetzen. Von anderen Reaktorherstellern wurden ebenfalls HTR-Modul-Konzepte vorgelegt. Die technische Realisierung des HTR-Moduls baut maßgeblich auf den guten Erfahrungen des AVR in Jülich auf.

5. Entwicklung zur HTR-Prozeßwärmenutzung

5.1 Der Wärmemarkt

Die Struktur des Verbrauchs von Endenergie ist heute und in Zukunft dadurch gekennzeichnet, daß nur ein Teilbereich des Gesamtbedarfs durch Elektrizität (zur Erzeugung von Licht und Kraft) abgedeckt wird, während ein sehr viel größerer Teil der Deckung des Wärmeenergiebedarfs dient. Dieser Wärmemarkt wird derzeit vorwiegend von Erdölprodukten und Erdgas versorgt, welche langfristig nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen und deshalb ersetzt werden müssen. Bei dieser langfristig notwendigen Substitution kann Kernenergie, insbesondere im Verbund mit der Veredlung von Kohle, einen erheblichen Beitrag zur Sicherung der zukünftigen Energieversorgung leisten^[21].

Der Wärmemarkt ist bezüglich der Produktion von Sekundärenergieträgern, des Transports, der Verteilung, der Speicherung und schließlich der Anwendung, sowie im Hinblick auf die Auslastung und die Leistungsgrößen stark strukturiert und bietet damit auf vielfältige Art und Weise Substitutionsmöglichkeiten. Die absehbar technisch realisierbaren Verfahren zur Erzeugung von Sekundärenergieträgern aus Kernenergie für den Wärmemarkt sind zahlreich, und es kann schließlich für alle möglichen Anwender passende Nutzformen geben. Die Verfahren der Erzeugung von Sekundärenergieträgern mit Hilfe des HTR werden im folgenden erläutert.

5.2 Kraft/Wärme-Kopplung

Bei der Produktion von Elektrizität entsteht im allgemeinen niedertemperaturige Abwärme. Dieser physikalisch begründete Sachverhalt legt es nahe, diese Abwärme für den Wärmemarkt zu nutzen. Dies ist der Gegenstand der Kraft/Wärme-Kopplung.

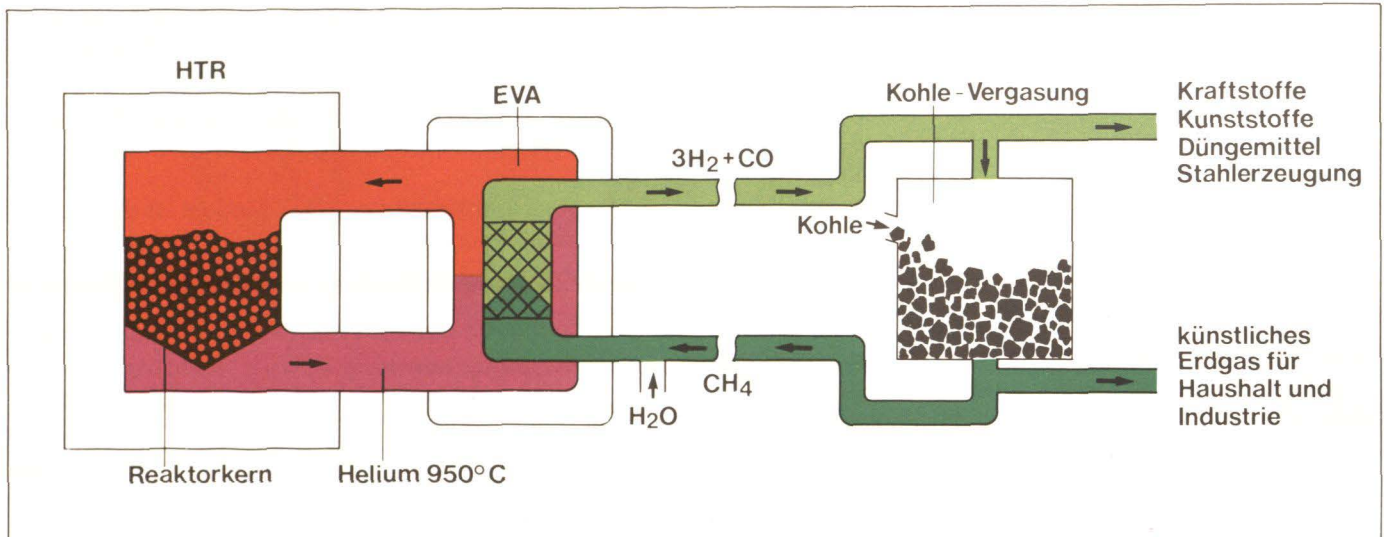


Abb. 7:
Schematische Darstellung des Verfahrens der „Hydrierenden Kohlevergasung“ mit der Einkopplung von Wärme aus dem Hochtemperaturreaktor (HTR) über den Röhrenspaltöfen (Kurzzeichen EVA von Einzelrohr-Versuchsanlage). Die Vergasungsreaktion lautet: Kohle + Wasserstoff = Methan

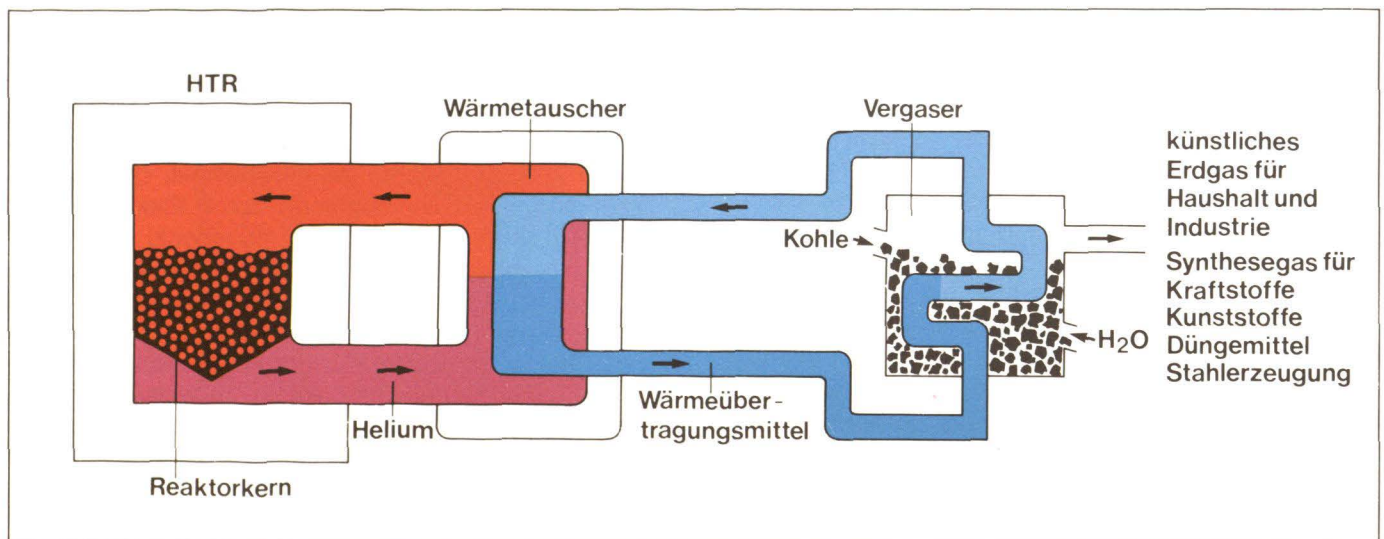


Abb. 8:
Schematische Darstellung des Verfahrens der „Wasserdampf-Kohlevergasung“ mit der Einkopplung von Wärme aus dem Hochtemperaturreaktor (HTR) über einen Wärmetauscher und ein Wärmeübertragungsmittel. Die Vergasungsreaktion lautet: Kohle + Wasserdampf = Wasserstoff + Kohlenmonoxid

Die in der Kraft/Wärme-Kopplung produzierte Wärmeenergie kann in der Form von Fernwärme für die Heizung von Gebäuden und in der Form von Prozeßdampf für die industrielle Nutzung eingesetzt werden. Der Prozeßdampf wird in der Industrie zur Beheizung von Prozessen als Reaktionsdampf und z.B. für die Veredlung fossiler Rohstoffe benötigt. Das Marktpotential für Fernwärme und Prozeßdampf ist sehr groß.

In der langfristigen Anwendung ist die Wirtschaftlichkeit der Kraft/Wärme-Kopplung mit dem HTR gegeben. Konzepte für HTR-Fernwärme und -Prozeßdampf-Anlagen sind ausgearbeitet^[23,24,25].

5.3 Nukleare Kohleveredlung

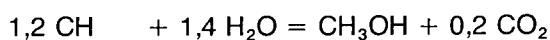
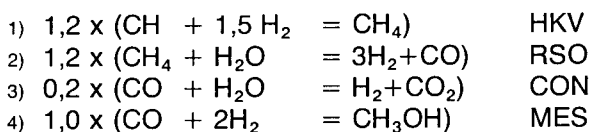
Nukleare Kohleveredlung ist von Bedeutung, weil damit auf der Basis der heimischen Kohlevorräte die Möglichkeit gegeben ist, die Abhängigkeit der Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland von den Importen an Erdöl und Erdgas langfristig zu reduzieren. Die Einsatzstoffe der nuklearen Kohleveredlung sind Kernenergie und Kohle, die möglichen Produkte sind flüssige Kohlenwasserstoffe, wie z.B. Methanol, als Substitut-Heizöl bzw. -Kraftstoff, künstliches Erdgas für Haushalt und Industrie, Synthesegas und Wasserstoffgas für die Herstellung von Kunststoffen, Düngemitteln und zur Stahlerzeugung.

Bei den Verfahren der nuklearen Kohlevergasung wird

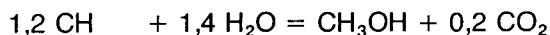
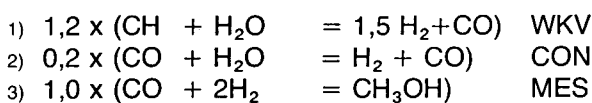
die für den Prozeß der Umwandlung der Kohle in Gase benötigte Prozeßwärme als Kernenergiewärme aus dem HTR in einem Temperaturbereich bis zu 950 °C eingekoppelt. Für diese Einkopplung werden grundsätzlich zwei Prozeßvarianten unterschieden, nämlich die hydrierende Kohlevergasung und die Wasserdampf-Kohlevergasung^[26,27]. Die beiden Verfahren sind in Abbildung 7 und 8 schematisch dargestellt. Abbildung 9 führt die chemischen Reaktionsgleichungen in vereinfachter Form für die Produktion von Methanol auf. Methanol CH₃OH dient hierbei als Repräsentant für flüssige Kohlenwasserstoffe.

Bei der hydrierenden Kohlevergasung (HKV) wird aus Kohle CH und Wasserstoff H₂ in einer wärmeabgebenden chemischen Reaktion Methan CH₄ erzeugt. Ein Teil dieses Methans wird im nachgeschalteten Schritt der Methan-Reformierung in einem Röhrenspaltofen (RSO) in Wasserstoff H₂ und Kohlenmonoxid CO umgewandelt. Ein Teil des erzeugten Wasserstoffs wird zur hydrierenden Kohlevergasung verwendet, der Rest bildet zusammen mit Kohlenmonoxid Synthesegas. Nach einer Konvertierung (CON) ist das Synthesegas richtig eingestellt und wird in einer Methanolsynthese (MES) in Methanol umgewandelt. Die Summe der Einzelschritte ist die Umwandlung von Kohle und Wasser in Methanol (und Kohlendioxid). Die wärmeaufnehmende chemische Reaktion ist die der Methan-Reformierung im Röhrenspaltofen (RSO). Der RSO (auch genannt EVA, von Einzelrohr-Versuchsanlage) wird mit 950-grädigem Helium aus dem HTR beheizt.

Hydrierende Kohlevergasung



Wasserdampf-Kohlevergasung



RSO: Röhrenspaltofen

HKV: Hydrierende Kohlevergasung

WKV: Wasserdampf-Kohlevergasung

CON: Konvertierung

MES: Methanolsynthese

Abb. 9:
Chemische Reaktionsgleichungen für die Nukleare Kohlevererdung

Bei der Wasserdampf-Kohlevergasung wird Kohle CH mit Wasserdampf H₂O in einer wärmeverbrauchenden chemischen Reaktion im wesentlichen zu Wasserstoff H₂ und Kohlenmonoxid CO umgesetzt. Mit der nachfolgenden Konvertierung (CON) wird das Synthesegas eingestellt und nachfolgend dieses in der Methanolsynthese (MES) in Methanol umgewandelt. Die Summe der Reaktionsschritte ist (wie oben bei der hydrierenden Kohlevergasung) die Umwandlung von Kohle und Wasser in Methanol (und Kohlendioxid). Die wärmeaufnehmende Reaktion ist hier die Wasserdampf-Kohlevergasung (WKV). Diese wird mit 900-grädigem Helium beheizt, das seinerseits in einem Helium/Helium-Wärmetauscher mit 950-grädigem Helium aus dem HTR beheizt wird.

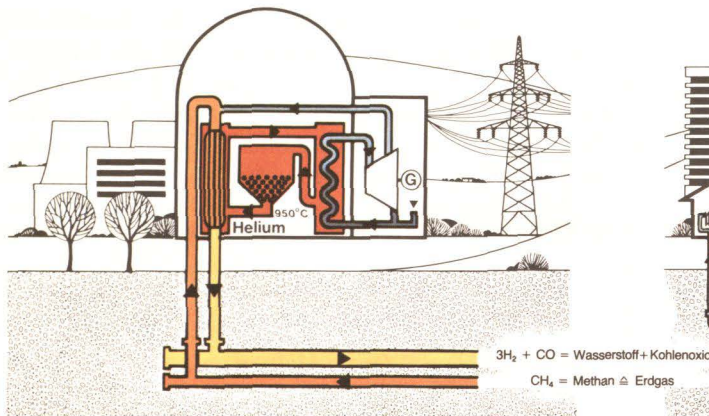
Die Verfahrensabfolge ist durch das gewünschte Endprodukt bestimmt. Als Ergänzung zu den oben angeführten Schemata ist anzufügen, daß bei der hydrierenden Kohlevergasung ein Restkoks gebildet wird und bei der Wasserdampf-Kohlevergasung auch Methan entsteht. Von großer Bedeutung für die Kohlevererdung ist, daß die Zerlegung der Kohle CH in den Vergasungsschritten die Abtrennung von Schadstoffen wie Schwefel-, Stickstoff-, Chlor- und vielen anderen Verbindungen in einfacher und preiswerter Form ermöglicht. Diese Schadstoffe erscheinen bei der offenen Verbrennung von Kohle in der derzeitigen Kohleverstromung als Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, organische Gase und Dämpfe, Staub und viele andere Formen von Emissionen.

Die Vorteile der nuklearen Kohlevergasung gegenüber konventionellen Verfahren bestehen in der Erhöhung des Produktertrags, der Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads, der Vermeidung von Schadstoff-Emissionen und der angestrebten Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Die Erhöhung des Produktertrags bedeutet, daß im nuklearen Verfahren aus einer Energieeinheit Kohle im Prinzip eine Energieeinheit Methanol produziert werden kann anstelle von etwa einer halben Energieeinheit Methanol in konventionellen Verfahren.

Die einzelnen Verfahrensschritte für die nukleare Kohlevergasung werden im Projekt „Prototypanlage Nukleare Prozeßwärme (PNP)“ entwickelt^[28]. Die Methan-Reformierung in einem Röhrenspaltofen (RSO) ist mit elektrisch-beheiztem Helium in der Kernforschungsanlage Jülich im Pilotmaßstab in mehrjähriger Betriebsdauer demonstriert. Der nächste Entwicklungsschritt ist hier die Beheizung eines RSO mit AVR-Helium. Der Helium/Helium-Wärmetauscher wird bei der Firma Interatom im Pilotmaßstab getestet und weiterentwickelt. Die hydrierende Kohlevergasung (HKV) ist in einer halbtechnischen Anlage mit mehrjährigem Betrieb und in einer Pilotanlage seit Anfang 1983 bei der Firma Rheinbraun in der Erprobung. Für die Wasserdampf-Kohlevergasung ist eine halbtechnische Anlage bei der Firma Bergbau-Forschung seit mehreren Jahren in Betrieb. Für dieses Verfahren ist der Einsatz von Katalysatoren besonders vorteilhaft.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Planungsarbeiten für die nukleare Kohlevergasung werden noch einige Jahre beanspruchen. Danach ist der Bau und Betrieb einer Prototypanlage mit einer thermischen

Hochtemperatur-Reaktor
mit EVA (Methanreformierung)



ADAM (Methanisierung)

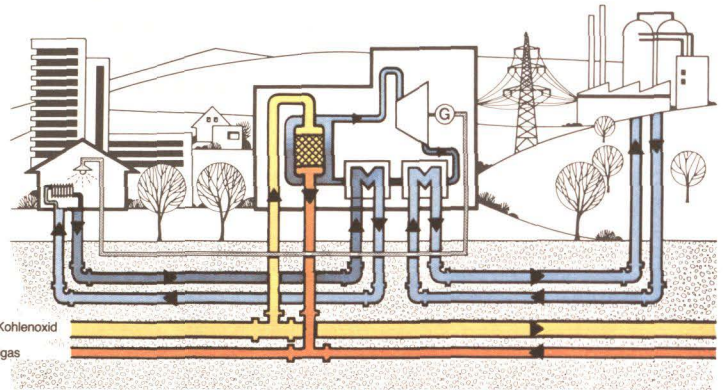
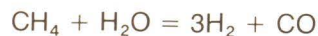


Abb. 10:
Nukleare Fernenergie

Leistung von z.B. 500 Mega-Watt vorgesehen und schließlich die großindustrielle kommerzielle Nutzung angestrebt.

5.4 Nukleare Fernenergie

Eine weitere Möglichkeit der Bedienung des Wärmemarkts besteht in dem Einsatz von Wärme aus dem HTR zusammen mit dem Übertragungssystem „Nukleare Fernenergie (NFE)“^[29]. Das Problem des Transports von Wärme von einer zentralen Anlage über eine Entfernung von z.B. 100 km zum Verbraucher wird in diesem Konzept durch den Transport eines chemisch reagierenden Systems gelöst. Das chemische System ist ein Gemisch aus Methan und Wasserdampf einerseits und Wasserstoff und Kohlenmonoxid andererseits. Die zugrundeliegende chemische Reaktion ist die der Methan-Reformierung bzw. der Methanisierung:



Wärmeenergie aus dem HTR wird in einem mit heißem Helium beheizten Röhrenspaltöfen in die chemische Energie der wärmeaufnehmenden chemischen Reaktion von Methan und Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid überführt. Die beiden letzteren Gase werden im kalten Zustand zum Verbraucher transportiert, wo die Rückwärts-Reaktion des chemischen Systems abläuft und unter Bildung von Methan und Wasserdampf Wärmeenergie freigesetzt wird. Mit dem Rücktransport der Reaktionsprodukte zur zentralen Anlage ist der Kreislauf des Übertragungssystems geschlossen. Die freigesetzte Wärme wird zur Erzeugung von Prozessdampf für den industriellen Wärmeverbrauch, von Heizwasser für den Haushaltswärmeverbrauch sowie für die verbrauchsnahe Erzeugung von Elektrizität verwendet.

Das Energieversorgungssystem der nuklearen Fernenergie ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Der HTR mit einem Röhrenspaltöfen (RSO), genannt EVA, koppelt Wärmeenergie in das chemisch reagierende Sy-

stem ein und die verbrauchsnahe Umwandlungsstation mit der Methanisierung, genannt ADAM, koppelt diese Wärmeenergie zur Verwendung aus.

Die Vorteile der nuklearen Fernenergie gegenüber konkurrierenden Systemen, insbesondere der konventionellen Fernwärme, bestehen darin, daß Energieübertragung über größere Entfernungen wirtschaftlich möglich ist, daß der Einsatz von fossilen Primärenergieträgern entfällt und die Energieerzeugung mit hohem Wirkungsgrad und umweltfreundlich geschieht.

Die nukleare Fernenergie ist im Rahmen des Projekts „Nukleare Fernenergie (NFE)“ durch eine Anlage im Pilotmaßstab, genannt ADAM/EVA-Anlage, in der Kernforschungsanlage Jülich mit mehrjährigem Betrieb demonstriert.

5.5 Nukleare Wasserspaltung

Eine weitere Möglichkeit der Nutzung von Kernenergie zur Erzeugung von Sekundärenergieträgern für den Wärmemarkt ist die Produktion von Wasserstoff und Sauerstoff durch die Spaltung von Wasser mittels Hochtemperatur-Wärmeenergie aus dem HTR. Das Hauptprodukt Wasserstoff ist kostensparend transportierbar (auch über größte Entfernungen), preiswert speicherbar (auch über größere Zeiträume), umweltfreundlich (da als Verbrennungsprodukt Wasser entsteht) und anwendungsorientiert. Die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff im Energiemarkt sind vielfältig. Wasserstoff kann eingesetzt werden für die verbrauchsnahe Produktion von Elektrizität und Fernwärme, zur Heizung in Industrie und Haushalt, als Kraftstoff, insbesondere für den Flugverkehr, als chemischer Rohstoff für die Industrie (Kunststoffe, Düngemittel), als Reduktionsstoff für die metallherstellende Industrie, als Hydrierstoff und für viele andere Einsatzzwecke mehr. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt. Das Nebenprodukt Sauerstoff kann für viele industrielle Prozesse und für Verfahren der Umweltverbesserung eingesetzt werden.

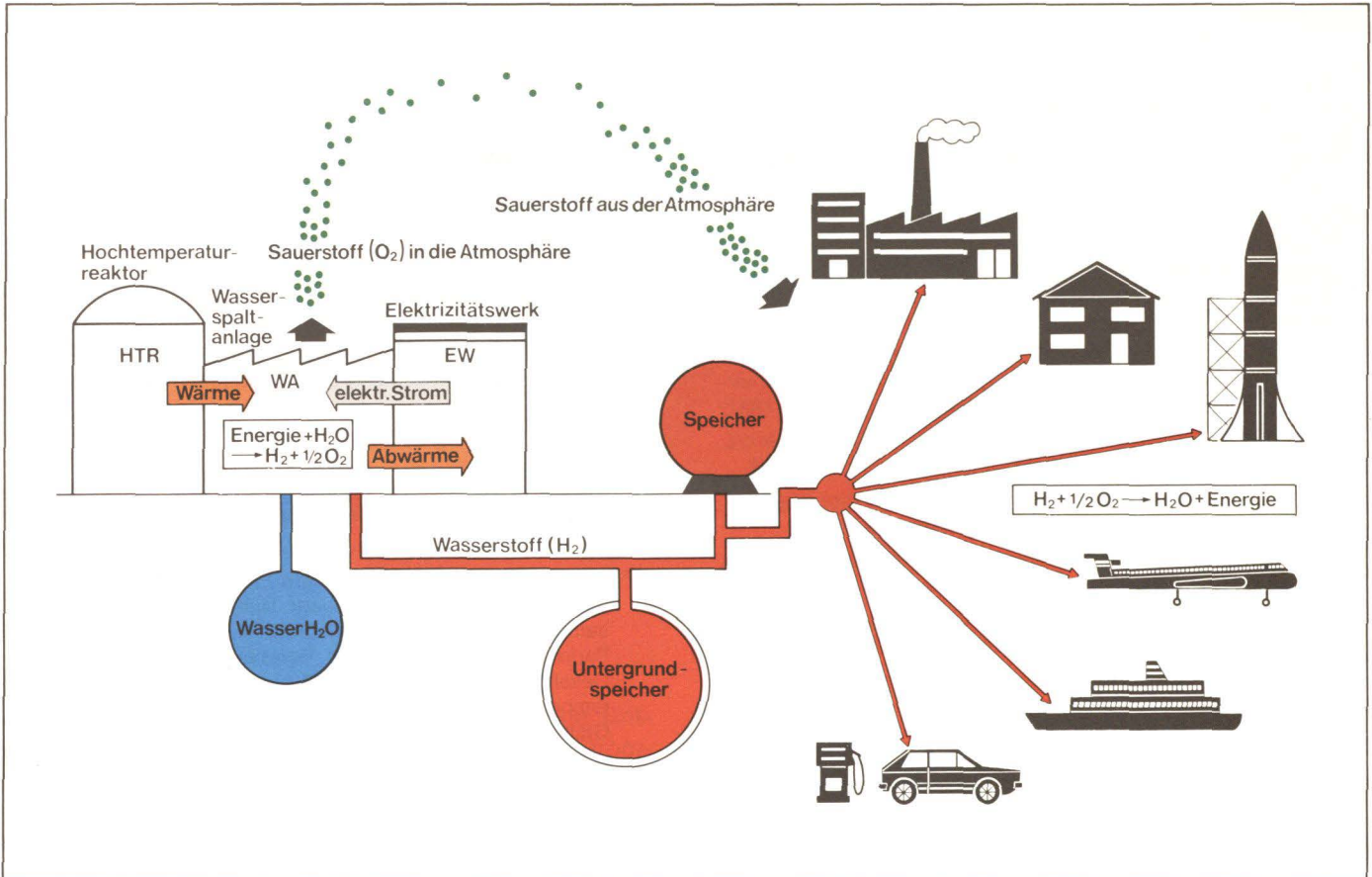


Abb. 11:
Schematische Darstellung der Energie- und Rohstoffversorgung mit dem Sekundärenergieträger Wasserstoff aus der nuklearen Wasserspaltung durch Einsatz von Hochtemperatur-Wärme aus dem Hochtemperaturreaktor

Das Verfahren zur Umwandlung von Wärmeenergie aus dem HTR in chemische Energie in der Form von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser ist der thermochemische (bzw. thermochemisch-elektrochemische) Kreisprozeß. Ein solcher Prozeß besteht aus einer Folge von chemischen Reaktionen, deren Summenreaktion die der Wasserspaltung ist. Die Reaktionsteilnehmer, außer Wasser, Wasserstoff und Sauerstoff, werden weder verbraucht noch erzeugt, sondern im Kreise geführt.

Ein typisches Beispiel für einen thermochemischen Kreisprozeß ist der „Schwefelsäure-Hybrid-Prozeß“:

- 1) $2 H_2O + SO_2 = H_2SO_4 + H_2$
- 2) $H_2SO_4 = H_2O + SO_2 + 1/2 O_2$
 $H_2O = H_2 + 1/2 O_2$

Die Reaktion 1) ist eine elektrochemische Reaktion, die Reaktion 2) läuft ab bei hohen Temperaturen und nimmt Wärmeenergie auf, z.B. aus dem HTR.

Für die Entwicklung thermochemischer Kreisprozesse sind in der Kernforschungsanlage Jülich^[30,31] und in vielen Forschungsinstituten der Welt seit einigen Jahren Arbeiten im Gange. Der Stand der Entwicklung befindet sich noch im Laborstadium. Bei gutem Erfolg der Entwicklungsarbeiten kann der großtechnische Einsatz für die Zeit nach der Jahrhundertwende erwartet werden.

6. Schlußbetrachtung

Der Hochtemperaturreaktor ist heute als fortgeschrittenes Reaktorsystem zur Elektrizitätserzeugung anwendbar. Aufgrund seiner technischen Eigenschaften ist er außerdem in der Lage, zusätzlich eine Reihe von Technologien verfügbar zu machen, die in vielen Bereichen der Energieversorgung von Bedeutung sind. Neben der Stromerzeugung ist hier die Veredlung fossiler Energieträger sowie die Herstellung neuartiger Energieträger zu nennen, die zur Substitution von Erdöl und Erdgas geeignet sind.

Die mit Hilfe des Hochtemperaturreaktors möglichen Verfahren zur Nutzung der nuklearen Prozeßwärme für die Veredlung der heimischen Kohlevorräte sind insbesondere für die langfristig gesicherte und umweltschonende Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland von Bedeutung.

Literatur

- [1] RIESENHUBER, H.: Bundesminister Dr. Heinz Riesenhuber besucht die Baustelle des Hochtemperaturreaktors THTR-300 in Hamm-Uentrop, Pressemitteilung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie aus Anlaß der ersten Kritikalität des THTR-300, 27. September 1983
- [2] JOCHIMSEN, R.: Einsatzmöglichkeiten von Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung, Symposium. Der Minister für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr des Landes NRW im Einvernehmen mit dem Bundesminister für Forschung und Technologie. Düsseldorf, 13. November 1981
- [3] SCHULTEN, R.: Verbund von Kohle, Stahl und Kernenergie, Referat anläßl. der öffentlichen Anhörung zu dem Thema: „Energieversorgung in Nordrhein-Westfalen“. Düsseldorf, 1. September 1982
- [4] SCHULTEN, R.: Entwicklungsziele des Hochtemperaturreaktors. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 32. Jahrg., Heft 10, 1982
- [5] KNIZIA, K.: Das Marktpotential des Hochtemperaturreaktors. HTR-Tagung in Schmehausen, 19. Oktober 1982
- [6] BARNERT, H.: Die nukleare Wärmeenergie – ein flexibler Partner der Kohle. Sonderdruck aus KFA-intern, Januar 1980
- [7] TEUCHERT, E., Schulten, R.: Flexibilität und Urannutzung des Kugelhaufenreaktors. Jahresbericht 1978/79 der KFA Jülich
- [8] WOLF, J.: Endlagerung verbrauchter Brennelemente aus dem AVR-Versuchskernkraftwerk im Salzbergwerk ASSE. JÜL-1163, Februar 1975
- [9] MATTICK, W.: Technischer Status und Entwicklungsperspektiven des Hochtemperaturreaktors. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 32. Jahrg., Heft 10, 1982
- [10] Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH: Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte unter deutschen Standortbedingungen, Hauptband zur Phase IB. Jül-Spez-136/Bd. 1-6, Dezember 1981
- [11] KRÖGER, W., BONGARTZ, R.: Vorgehen und Ergebnisse der probabilistischen Sicherheitsstudie für die HTR-1160-Anlage. Atomwirtschaft, Nr. 10, 1981, S. 542
- [12] EHRHARDT, J., BAYER, A., KRÖGER, W., SCHWARZER, K.: Unfallfolgen- und Risikoabschätzungen für die probabilistische HTR-1160-Sicherheitsstudie. Atomwirtschaft, 27, Nr. 9, Oktober 1982
- [13] Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor GmbH, Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH: 10 Jahre Stromerzeugung mit dem Kugelhaufen-Reaktor der AVR. 17. Dezember 1977
- [14] HÄFELE, W.: Grußworte zum HTR-Festkolloquium aus Anlaß des 60. Geburtstags von R. Schulten, 26. August 1983
- [15] HARDER, H., OEHME, H., SCHÖNING, J., TURNHERR, K.: Das 300-MW-Thorium-Hochtemperatur-Kernkraftwerk (THTR), sowie einige weitere Aufsätze zum THTR-300. Atomwirtschaft, 16. Jahrg., Nr. 5, Mai 1971
- [16] HIRSCHFELDER, G.: Das 300-MW-THTR-Kernkraftwerk, Baufortschritt, Termine und Kosten. HTR-Tagung in Schmehausen, 19. Oktober 1982
- [17] BAUST, E.: Strom und Prozeßdampf aus einem 500-MW-Hochtemperaturreaktor, die optimale Nutzung der Erfahrung mit dem THTR-300. VGB Kraftwerkstechnik Jahrg. 62, Heft 12, Dezember 1982
- [18] KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH, INSTITUT FÜR NUKLEARE SICHERHEITSFORSCHUNG: Zum Störfallverhalten des HTR-500 - Eine Trendanalyse. Jül-Spez-220, September 1983
- [19] FREWER, H.: Das Hochtemperaturreaktor-Modul-Konzept der KWU-Gruppe. Symposium: „Einsatzmöglichkeiten von Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung“, 13. November 1981
- [20] WEISBRODT, I.: Das Hochtemperaturreaktor-Modul-Konzept der KWU-Gruppe für den Wärmemarkt. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 32. Jahrg., Heft 10, 1982
- [21] LOHNERT, G.H., REUTLER, H.: The Modular HTR, a New Design of High-Temperature Pebble-Bed-Reactor. BNES-Conference, Bristol, 20-24 September 1982
- [22] KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH, INSTITUT FÜR NUKLEARE SICHERHEITSFORSCHUNG: Zum Störfallverhalten des HTR-Modul - Eine Trendanalyse. Jül-Spez-260, Juni 1984
- [23] BARNERT, H.: Künftige Möglichkeiten der Wärmeversorgung durch Kernenergie. Atomwirtschaft, Band 23, Oktober 1978
- [24] SCHROEDER, G., WISCHNEWSKI, R., BARNERT, H.: Nukleares Fernwärmesystem mit Hochtemperaturreaktor. Studiengesellschaft für Nukleare Fernwärme mbH, Tätigkeitsbericht, September 1976
- [25] KRAFTWERK-UNION AG/INTERATOM: Hochtemperatur-Modul zur Strom- und Prozeßdampf- und/oder Fernwärmeerzeugung. Bericht 78.10108. 1, August 1983
- [26] BROWN, BOVERI & CIE/HOCHTEMPERATUR-REAKTORBAU GmbH: Kernkraftwerk mit Hochtemperatur HTR-500. Mannheim, 7. Dezember 1982
- [27] ACHENBACH, E., BARNERT, H., FEDDERS, H., HÖHLEIN, B., KNOCHKE, K.F., RINTSCHE, E., SCHRÖTER, H.J., STRAUSS, W., WEISBRODT, I.: Anwendung von Hochtemperaturreaktoren zur Erzeugung von Prozeßwärme. Atomkernenergie/Kerntechnik, Band 38, Lfg. 2, 1981
- [28] Projekt „Prototypanlage Nukleare Prozeßwärme (PNP)“, Referenz-Konzept der Prototypanlage Nukleare Prozeßwärme, Gesamtanlage und Kraftwerk. Februar 1981. Partner des Projekts PNP sind: Bergbau-Forschung GmbH, GHT Gesellschaft für Hochtemperaturreaktor-Technik mbH, Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Rheinische Braunkohlewerte AG
- [29] Projekt „Nukleare Fernenergie (NFE)“, Planstudie über eine halb-offene Fernenergie-Versorgung, insbesondere für den Raum Frankfurt a.M. mit Heißwasser-Fernwärmeversorgung für den Raum Köln. Studie im Auftrag des BMFT. Jül-Spez-95, Dez. 1980. Partner des Projekts NFE sind: Rheinische Braunkohlenwerke AG und Kernforschungsanlage Jülich GmbH
- [30] STRUCK, B.D., NEUMEISTER, H., DUJKA, B., SIEBERT, U., TRIEFENBACH, D.: Developments on an electrolytic cell for the anodic oxidation of sulfur-dioxide and cathodic production of hydrogen for the sulfuric acid hybrid cycle. EUR 8300, 1983
- [31] BARNERT, H.: Anmerkungen zur thermochemischen Produktion von Wasserstoff aus Wasser mittels Hochtemperaturreaktor-Wärme. Jül-1660, Juni 1980

Schnelle Brutreaktoren*

Gerhard Heusener und Rolf Hüper

Projekt Schneller Brüter des Kernforschungszentrums Karlsruhe

1. Einleitung

Leichtwasserreaktoren (LWR) haben heute eine Entwicklungsstufe erreicht, die eine wirtschaftliche Stromerzeugung erlaubt. Andere Reaktorkonzepte, wie der Hochtemperaturreaktor (HTR) und der Schnelle Brutreaktor (SBR), werden noch einen beträchtlichen Entwicklungsaufwand benötigen, bevor auch sie dieses Ziel erreicht haben.

Wegen der hohen Kosten müssen sie sich die Frage gefallen lassen, was diesen Entwicklungsaufwand rechtfertigt. Welche Vorteile haben diese Konzepte; wie funktionieren sie, und sind sie ebenso sicher wie die etablierten Leichtwasserreaktoren?

Diese Fragen sollen im folgenden für den natriumgekühlten Schnellen Brutreaktor beantwortet werden.

2. Die energiewirtschaftliche Bedeutung des SBR

2.1 Uranausnutzung beim LWR und beim SBR

Sowohl der LWR als auch der SBR benötigen als Brennstoff Uran. Natururan besteht zu 99,3 % aus dem nur schwer spaltbaren Uran-238 und zu 0,7 % aus dem leicht spaltbaren Uran-235. Der LWR kann unmittelbar nur diesen geringen Anteil an leicht spaltbarem Uran-235 ausnutzen. Die Umwandlung von Uran-238 in spaltbares Plutonium, die in geringem Maße auch im LWR stattfindet, erhöht die Ausnutzung um ca. 0,3 %. Insgesamt bleibt jedoch die Ausnutzung der Uranvorräte beim LWR auf ca. 1 % beschränkt.

Anders ist die Situation beim SBR. Er verwendet zur Auslösung der Kernspaltungen nicht abgebremste, sondern schnelle Neutronen. Das hier verwendete Spaltmaterial ist Plutonium. Durch den Brutprozeß wird aus dem schwer spaltbaren Uran-238 mehr Spaltstoff (Pluto-

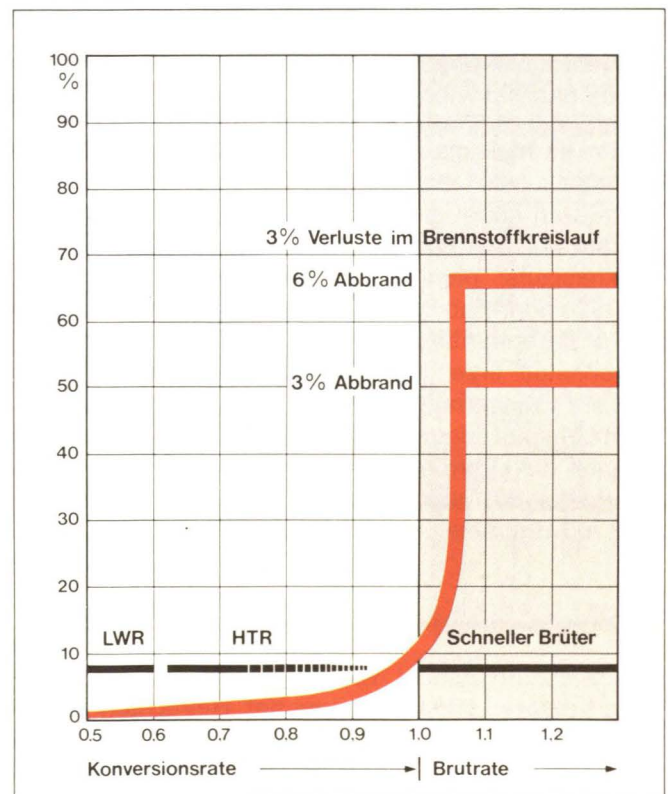


Abb. 1: Mögliche Ausnutzung des Natururans

nium) erzeugt, als in der gleichen Zeit verbraucht wird. Damit wäre der SBR theoretisch in der Lage, Uran vollständig zu verbrennen und in Energie umzuwandeln. Durch unvermeidbare Verluste bei der Brennelementfertigung und der Wiederaufarbeitung wird diese vollständige Nutzung auf ca. 60 % beschränkt.

Die Wiederaufarbeitung dient der chemischen Abtrennung des im Reaktor „erbrüteten“ Plutoniums, damit es zusammen mit den Uranbestandteilen des ausgedienten Kernbrennstoffs rezykliert werden kann. Die Wiederaufarbeitung ist somit integrierender Bestandteil eines Brütlersystems.

Der Zusammenhang zwischen Natururanausnutzung

* Dieser Beitrag ist die Kurzfassung einer vom Kernforschungszentrum Karlsruhe herausgegebenen Broschüre „Wie sicher ist der Schnelle Brüter“

und Konversions- bzw. Brutrate ist in Abbildung 1 quantitativ dargestellt.

Die Konversions- bzw. Brutrate ist das Verhältnis der im Reaktorbetrieb neu entstandenen spaltbaren Kerne zu den jeweils verbrauchten spaltbaren Kernen. Ist dieses Verhältnis kleiner als 1, so spricht man von Konversion, bei einem Verhältnis größer als 1 von Brüten. Der Leichtwasserreaktor hat eine Konversionsrate zwischen 0,5 und 0,6 und damit 1 % Natururanausnutzung, der Hochtemperaturreaktor mit Uran-Thorium-Brennstoff, Wiederaufarbeitung und Rückführung des im Reaktor (aus Thorium-232) erzeugten Uran-233 liegt mit der Konversionsrate zwischen 0,65 und 0,85 und erreicht damit einen mehrfach höheren Ausnutzungsgrad.

Mit geänderten Brennstoffkreislaufkonzepten läßt sich beim Hochtemperaturreaktor (wie übrigens auch beim Leichtwasserreaktor) die Konversationsrate grundsätzlich noch bis auf 1,0 anheben („Hochkonverter“), und man erreicht damit eine Ausnutzung von einigen Prozenten. Erst bei Überschreiten des Wertes von 1, was im Schnellen Brüter erreicht wird, wird die Situation qualitativ anders – bei einem Wert der Brutrate von 1,06 in Abbildung 1 nimmt die Natururanausnutzung sprunghaft zu (theoretisch würde dazu die Brutrate 1,0 ausreichen, in der Praxis muß man die Plutoniumverluste im Brennstoffkreislauf einkalkulieren). Von diesem Grenzwert der Brutrate an hängt die Ausnutzung nicht mehr von der Brutrate ab, sondern von den Parametern des Brennstoffkreislaufs: nämlich von den Verlusten bei der Brennelement-Fabrikation und bei der Wiederaufarbeitung sowie vom Abbrand, d.h. von der pro Tonne Reaktorbrennstoff erzeugten Energiemenge. Im Vergleich von Leichtwasserreaktoren und Schnellen Brütern ergibt sich insgesamt folgende Feststellung: Der Schnelle Brüter nutzt die Uranvorräte wesentlich besser (etwa um den Faktor 60) und verbreitert die Brennstoff-Versorgung auf Uranbasis erheblich.

2.2 Energiewirtschaftliche Konsequenzen

Es soll jetzt untersucht werden, welche Konsequenzen diese bessere Uranausnutzung hat. Betrachten wir die Bedeutung für die weltweite Energieversorgung und für die Versorgung der Bundesrepublik Deutschland.

Der Weltenergieverbrauch liegt heute bei 9 Mrd. Tonnen Steinkohleeinheiten pro Jahr, davon werden etwa 20 % zur Stromerzeugung eingesetzt. Die Frage ist: Wie wird sich der Energieverbrauch und insbesondere der Stromverbrauch in Zukunft entwickeln?

Weltenergieprognosen, wie sie z.B. aus den Fachberichten der 12. Weltenergiekonferenz 1983 hervorgehen, weisen für das Jahr 2000 einen geschätzten Weltenergiebedarf um 15 Mrd. Tonnen Steinkohleeinheiten pro Jahr aus, davon 1,2 bis 1,4 Mrd. Tonnen für den Anteil der Kernenergie, was einer Kernkraftwerks-Kapazität von etwa 550 GW_e entspricht. Der wachsende Bedarf an Kernenergie wird dabei nicht nur durch Energieverbrauchszuwachs und durch Substitutionsprozesse im Energieeinsatz in den hochindustrialisierten Ländern, sondern vor allem durch den notwendigen Energieverbrauchszuwachs in den Entwicklungsländern bestimmt.

Wie sehen demgegenüber die Energiereserven der Erde aus? Die insgesamt vorhandenen fossilen Energievorkommen der Erde werden auf ca. 12000 Mrd. Tonnen SKE geschätzt. Von diesen Reserven kann jedoch ein großer Teil aus technischen Gründen kaum genutzt werden. Schätzungen sprechen davon, daß nur ca. 1/4 dieser Energievorräte gewinnbar ist. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit ist das Verhältnis noch schlechter. So sind von geschätzten 10000 Mrd. Tonnen Steinkohle-Vorkommen nur ca. 500 Mrd. Tonnen in die Kategorie „bekannt, wirtschaftlich abbaubar“ einzustufen.

Die „bekannt, wirtschaftlich abbaubaren“ Mineralöl-Reserven werden heute auf ca. 100 Mrd. Tonnen (\cong 140 Mrd. t SKE) geschätzt. Etwa noch einmal die gleiche Menge kann mit verbesserten Fördermethoden und entsprechend mit höheren Kosten gefördert werden. Ein Abbau der sogenannten unkonventionellen Mineralöl-Ressourcen, wie z.B. Ölsande oder Ölschiefer, ist in der Entwicklung.

Die kostengünstigen Uranvorräte werden heute auf insgesamt etwa 4 bis 6 Mio. Tonnen geschätzt, was bei der Nutzung in Leichtwasserreaktoren bei Wiederaufarbeitung und Rückführung von Plutonium und Resturan etwa 120 bis 180 Mrd. Tonnen SKE entspricht. Dieselbe Menge im Schnellen Brüter genutzt ergibt einen Wert von 7000 bis 10000 Mrd. Tonnen SKE. Uran der nächsthöheren Kostenkategorie ist im Schnellen Brüter ebenfalls wirtschaftlich ausnutzbar und ergibt Werte in der Größenordnung von 100000 Mrd. Tonnen SKE.

Eine Grenze für den wirtschaftlichen Einsatz von Uran im Schnellen Brüter ist auch damit noch nicht erreicht – der Schnelle Brüter kann wegen der hohen Uranausnutzung sehr hohe Urankosten in Kauf nehmen. Dies führt zu einem wesentlichen Argument für die Brüterentwicklung: Die Kernenergie erweitert die begrenzten Vorräte fossiler Energieträger; ihr Beitrag wäre jedoch relativ klein, wenn nur nichtbrütende Systeme eingesetzt würden. Dagegen vergrößern Brutreaktoren die Energievorräte der Erde um ein bis zwei Größenordnungen.

Betrachten wir als nächstes die Situation in der Bundesrepublik Deutschland: Hier beträgt der Energieverbrauch derzeit fast 400 Mio. Tonnen SKE pro Jahr (d.h. rund 4 % des Weltenergieverbrauchs). Die Bundesrepublik Deutschland hat außer der Kohle nur sehr geringe Energiereserven. Kohle wird heute in der Bundesrepublik Deutschland zu einem Großteil zur Stromerzeugung genutzt. Die heutige Kohleförderung – Steinkohle und Braunkohle zusammen – liegt bei 130 Mio. Tonnen SKE pro Jahr. Eine Steigerung der Förderung ist nur in sehr begrenztem Umfang möglich. Soweit der künftige Stromverbrauch von der Kernenergie getragen wird, werden zunächst Leichtwasserreaktoren eingesetzt. Für diese muß die Bundesrepublik Deutschland das Natururan auf dem Weltmarkt kaufen.

Hieraus folgt, das man bei einer realistischen Einschätzung der Situation davon ausgehen muß, daß der Bundesrepublik Deutschland nicht mehr als einige hunderttausend Tonnen Natururan zur Verfügung stehen werden. Würde diese Menge Uran ausschließlich im LWR genutzt, so wäre sie in der ersten Hälfte des nächsten

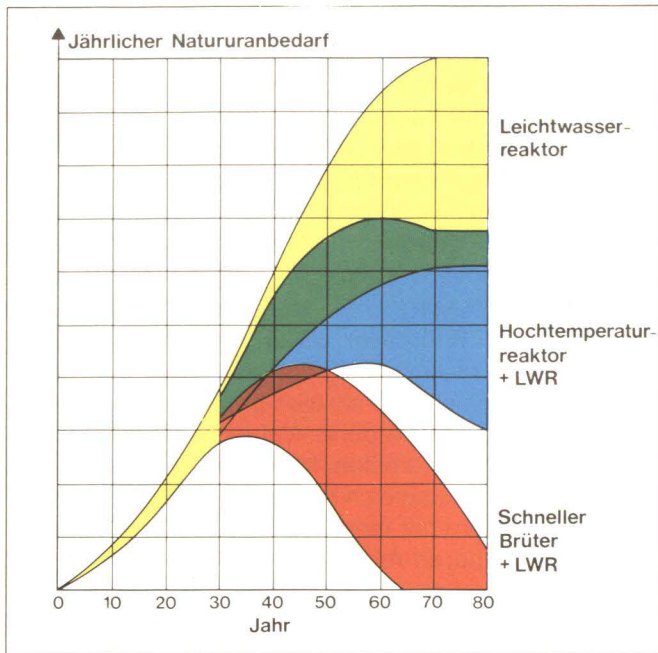


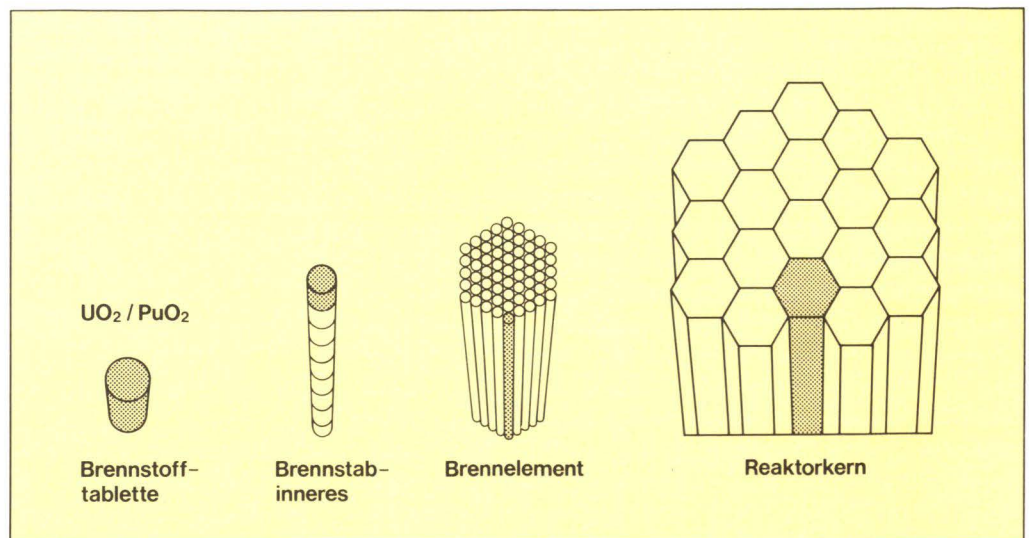
Abb. 2: Vergleich des Natururanbedarfs bei verschiedenen Reaktorstrategien

Grenzkurve den Fall mit Wiederaufarbeitung und vollständigem Rezyklieren von Plutonium und Resturan. Bei der kombinierten Strategie von Leichtwasserreaktoren und Schnellen Brütern (unteres Band) übernimmt zunächst der Leichtwasserreaktor die nukleare Energieerzeugung: von einem bestimmten Zeitpunkt an wird der Schnelle Brüter eingesetzt – er wird entsprechend dem vorhandenen Plutonium zugebaut und löst so in zunehmendem Maße die Leichtwasserreaktoren ab. Der jährliche Natururan-Bedarf geht durch den Brütereinsatz zurück und schließlich gegen Null. Von da an erlaubt es diese Strategie, ausschließlich das Abfalluran der Leichtwasserreaktoren (U-238) als Brennstoff zu verwenden, und zwar über viele Jahrhunderte.

Abbildung 2 zeigt noch eine weitere Reaktorstrategie, nämlich von Leichtwasserreaktoren und Hochtemperaturreaktoren (mittleres Band). Der Hochtemperaturreaktor gehört in die Kategorie der fortgeschrittenen thermischen Reaktoren und ist insbesondere wegen seiner hohen Kühlmittelaustrittstemperatur (über 900°C) energiewirtschaftlich von Interesse.

Auch hier übernimmt der Leichtwasserreaktor zunächst die nukleare Energieerzeugung und wird dann zunehmend von fortgeschrittenen Hochtemperaturreaktoren

Abb. 3: Brüter-Brennelemente



Jahrhunderts verbraucht. Die Kernenergie hätte dann in Deutschland nur einen kurzfristigen und relativ unwesentlichen Beitrag zur Energieversorgung geleistet.

Nach Abbildung 2 ist die Situation bei der Verwendung von Schnellen Brutreaktoren anders: Modellartig gezeigt wird der jährliche Natururanverbrauch bei Verwendung verschiedener Reaktorstrategien. Da einerseits der Natururanverbrauch in t/a in starkem Maße von Energieprognosen abhängt, die ihrerseits häufig umstritten sind, andererseits aber die wesentliche Aussage des Bildes von diesen Prognosen nur wenig beeinflusst wird, werden bewußt keine quantitativen Angaben zum Natururanverbrauch gemacht.

Bei einer reinen Leichtwasserreaktorstrategie (oberes Band) steigt der jährliche Natururan-Bedarf proportional zum Kernenergiebedarf. Die obere Grenzkurve zeigt den Fall ohne jegliche Wiederaufarbeitung, die untere

abgelöst. Abbildung 2 zeigt, daß eine solche Strategie von Leichtwasserreaktoren und Hochtemperaturreaktoren im Uranverbrauch zwischen der reinen Leichtwasserreaktor-Strategie und der Leichtwasserreaktor-Brüter-Strategie liegt. Der Hochtemperaturreaktor in der heutigen Konzeption verwendet als Ausgangsspaltstoff angereichertes Uran-235, und er ist deshalb ebenso wie der LWR auf eine Anreicherungsanlage angewiesen. Der Hochtemperaturreaktor kann höhere Konversionsraten als der Leichtwasserreaktor und damit eine bessere Natururanausnutzung erreichen. Aber er benötigt – im Gegensatz zum Schnellen Brüter – fortlaufend Natururan, genauer gesagt, den im Natururan enthaltenen Spaltstoff Uran-235.

Somit ist die wesentliche Aussage der Abbildung 2, daß der Brüter als einziges Reaktorkonzept das Potential hat, ca. 50 Jahre nach seiner Einführung eine vollständige Unabhängigkeit vom Uranmarkt herbeizuführen.

3. Technisches Konzept der Brüter-Kraftwerke

3.1 Energieerzeugung und Brutprozess

Brüter sind ebenso wie andere Kernkraftwerke Wärme-kraftwerke. Durch kontrollierte Kernspaltung im Kernbrennstoff wird Wärme erzeugt, die von einem Wärmeübertragungsmittel abgeführt und zur Dampferzeugung für die Turbogeneratoren verwendet wird. Der Spaltstoff besteht aus Plutonium in der Form von Plutoniumoxid (PuO_2). Es ist etwa im Verhältnis 1:5 mit Uranoxid (UO_2) vermischt. Dieses Mischoxid bildet in Tablettenform etwa bleistiftdicke Säulen in sehr dünnwandigen Hüllrohren aus austenitischem Stahl. Derart aufgebaute Brennstäbe werden zu sechseckigen Bündeln zusammengefaßt. In diesen Brennelementen wird der Hauptteil der Wärmeenergie erzeugt. Die Brennelemente werden zur Spaltzone des Reaktorkerns zusammengefaßt, wie es in Abbildung 3 schematisch dargestellt ist. Die Spaltzone des Reaktors ist von einem sogenannten Brutmantel umgeben. Er enthält bei Betriebsbeginn keinen Spaltstoff, sondern allein UO_2 , das Oxid von angereichertem oder natürlichem Uran. Das UO_2 ist ebenfalls in der Form von Tablettsäulen in Hüllrohren enthalten. Die Brutstäbe haben einen größeren Durchmesser als die Brennstäbe. Sie bilden bündelweise, ähnlich wie die Brennelemente, die Brutelemente. Im Laufe des Reaktorbetriebs führt der hohe Fluß von schnellen (nicht gebremsten) Neutronen zur Umwandlung eines Teils des Urans in Plutonium. Insgesamt entsteht mehr Plutonium, als jeweils durch Spaltung verbraucht wird. Der Brutpro-

zeß vollzieht sich zum Teil im Uran der Spaltzone, vor allem aber im Uran des Brutmantels (Abbildung 4 rechts). Die Menge des jeweils erbrüteten Plutoniums hängt u.a. von der gewählten Menge des eingesetzten Brutstoffes ab. Nach Entladung des Reaktors und etwa einem halben Jahr Abklingzeit wird das Plutonium in einer Wiederaufarbeitungsanlage chemisch vom Uran und von den Spaltprodukten getrennt und zur Herstellung neuer Brennelemente verwendet. Die unmittelbare Verwendung schneller Neutronen in Brütern hat den Vorteil, daß sehr viel mehr Plutonium als im Leichtwasserreaktor (LWR) erzeugt werden kann. Schnelle Neutronen haben jedoch den Nachteil, daß sie die Spaltung eines Pu-Kernes mit wesentlich geringerer Wahrscheinlichkeit auslösen als die abgebremsten Neutronen herkömmlicher Reaktoren. Zum Ausgleich braucht man einen kompakteren Reaktorkern mit einer sehr viel höheren Konzentration an spaltbaren Atomkernen als bei den LWR.

Abbildung 4 zeigt die Größenverhältnisse von LWR- und Brüterkernen von Anlagen gleicher elektrischer Leistung im Längsschnitt. Die pro Volumeneinheit der Spaltzone erzeugte Leistung ist bei einem Brüter drei- bis fünfmal höher als bei einem Leichtwasserreaktor.

3.2 Wärmeübertragung

Die hohe Volumenleistung im Brüterreaktorkern muß durch ein geeignetes Wärmeübertragungsmittel aus dem Reaktor in die Dampferzeuger abgeführt werden. In sämtlichen bisher gebauten Brutreaktoren der Welt wird

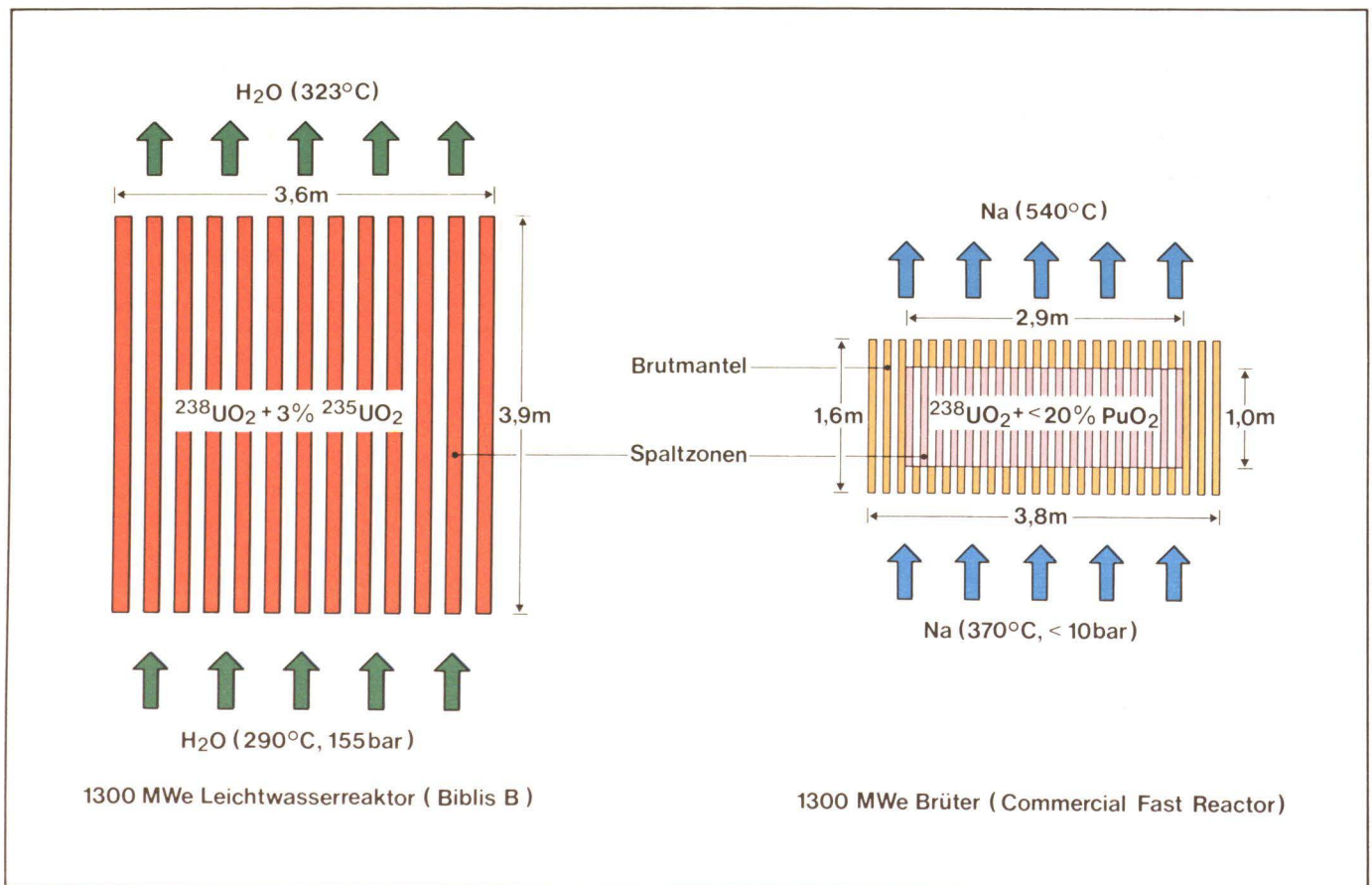


Abb. 4: Reaktorkerne im Längsschnitt (schematisch)

als Wärmeübertragungsmittel (Kühlmittel) flüssiges Natrium benutzt. Natrium hat hervorragende Wärmeübertragungseigenschaften und erfordert keinen wesentlichen Betriebsdruck. Seine wichtigsten Eigenschaften werden weiter unten ausführlich diskutiert. Es wird beim Durchströmen eines Brutreaktors von etwa 370°C auf etwa 540°C aufgeheizt. Diese relativ hohe Temperatur ermöglicht einen thermodynamischen Wirkungsgrad der Anlage von etwa 40 %, damit kann ein ähnlich hoher Anteil der erzeugten Wärme in elektrische Energie umgewandelt werden wie in einem modernen Kohlekraftwerk. Das „primäre“ Natrium, das sich im Reaktorkern zwischen den Brenn- und Brutstäben aufgeheizt hat, gibt seine Wärme zunächst über sogenannte Zwischenwärmetauscher an Natrium in „sekundären“ Kreisläufen, den Zwischenkreisläufen, ab, und erst das sekundäre Natrium heizt die Dampferzeuger (Abbildung 5). Dieses Konzept mit Zwischenkreisläufen ist im Vergleich zu einem LWR aufwendiger. Es wird aus Sicherheitsgründen gewählt:

- Störungen im Dampferzeuger, z.B. bei Natrium-Wasser-Reaktionen infolge auftretender Undichtigkeiten innerhalb eines Dampferzeugers, können nicht unmittelbar auf den Reaktorkern zurückwirken.
- Das durch die Dampferzeuger strömende Natrium ist im Gegensatz zum Primär-Natrium nicht radioaktiv.

Das in Abbildung 5 dargestellte Wärmeübertragungssystem ist in Schnellbrüter-Kernkraftwerken in Parallelschaltung mehrfach vorhanden, so daß auch bei Ausfall eines solchen Systems die Nachwärmeleistung aus dem Reaktorkern sicher abgeführt werden kann. Das im Bau befindliche 300-MW_e-Kernkraftwerk Kalkar mit dem Schnellen Natriumgekühlten Prototypreaktor SNR 300 hat z.B. drei parallele Wärmeübertragungssysteme, die aus Sicherheitsgründen räumlich voneinander getrennt sind.

In den französischen, britischen und sowjetischen Brüter-Kernkraftwerken hat sich ein etwas anderes Wärme-

übertragungssystem als im SNR 300 (und in den bisherigen amerikanischen und japanischen Anlagen) durchgesetzt. Es verwendet zwar auch Zwischenkreisläufe. Das Primärsystem ist jedoch kompakter zusammengefaßt: Reaktor, Primär-Natriumpumpen und Na-Na-Wärmetauscher sind gemeinsam in einem Natriumtank („Pool“) untergebracht.

4. Das Kühlmittel Natrium

4.1 Betriebseigenschaften

Seit einem halben Jahrhundert wird Natrium großtechnisch eingesetzt, insbesondere in der Chemie, z.B. zur Herstellung von Antiklopfmittel als Benzinzusatz und von Natronlauge sowie als Bestandteil anderer Chemikalien, so auch in den Waschmitteln. In Europa werden heute pro Jahr etwa 40 000 Tonnen an Natriummetall gewonnen, davon allein in der Bundesrepublik etwa 20 000 Tonnen. Für die Hersteller ist der Umgang mit Natrium, das in heißer, flüssiger Form anfällt, eine gewohnte Technik. Natrium schmilzt bei etwa 110°C.

Es wird in flüssigem Zustand als Kühlmittel verwendet, weil es ausgezeichnete Kühleigenschaften hat. Große Wärmemengen, die konzentriert auf kleinem Raum freigesetzt werden, können durch Natrium bei hohen Temperaturen praktisch drucklos abgeführt werden. Diese Bedingung der konzentrierten Wärmefreisetzung in einem verhältnismäßig kleinen Raum liegt beim Reaktorkern eines Schnellen Brutreaktors vor. Im folgenden sei zunächst auf die wichtigsten Eigenschaften des Natriums als Kühlmittel im Normalbetrieb eingegangen, später sollen diejenigen Eigenschaften des Natriums erörtert werden, die bei Auftreten eines Störfalls wichtig sind. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Betriebseigenschaften – teilweise verglichen mit Wasser – zusammengestellt. Das spezifische Gewicht ist mit dem des Wassers vergleichbar. Eine wichtige Eigenschaft ist die

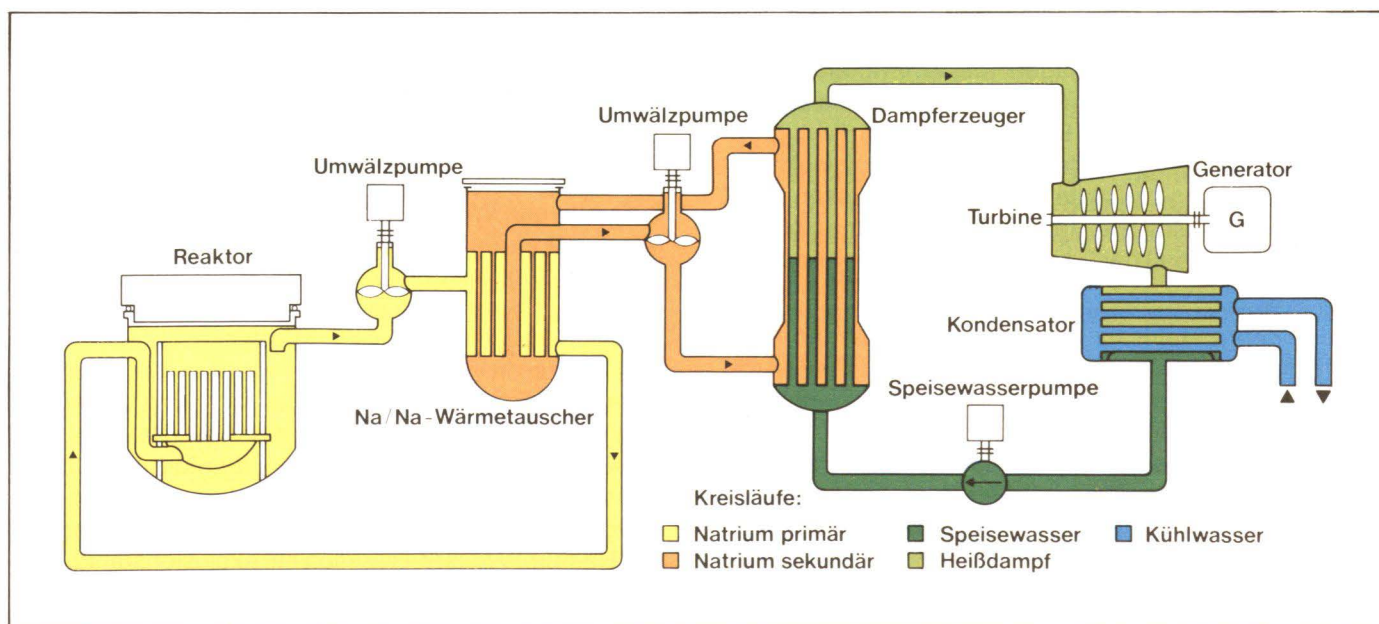


Abb. 5: Wärmeübertragung im Kernkraftwerk Kalkar

Wärmeleitfähigkeit, die bestimmend für den Wärmeübergang ist. Die Wärmeleitfähigkeit des Natriums ist etwa hundertmal größer als die des Wassers. Die Wärmekapazität beträgt etwa ein Drittel der des Wassers.

Spez. Gewicht	0,7 ... 0,9 kg/l	etwas leichter als Wasser
Wärmeleitfähigkeit	60 kcal/mh grad 250 kJ/mh grad	ca. 100 mal größer als bei Wasser
Wärmekapazität	0,3 kcal/kg grad 1,25kJ/kg grad	etwa 1/3 der von Wasser
Siedepunkt bei Reaktordruck	1000°C	Abstand zwischen Arbeitstemperatur und Siedepunkt ca. 400°C
Korrosion (Stahl)	1 ... 5 µm/Jahr	hängt vom Material, der Reinheit und anderen Betriebsdaten des Natriums ab

Tab. 1:
Wichtige Betriebseigenschaften des Natriums

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Natriums für die technische Seite des Einsatzes ist der sehr hohe Siedepunkt, der unter Atmosphärendruck bei 880°C liegt, beim Einsatz in Kreislaufsystemen mit einigen bar Überdruck sogar bei 1000°C. Im Vergleich dazu hat Wasser von 340°C bereits einen Siededruck von 150 bar, was den primärseitigen Betriebsbedingungen eines normalen Druckwasserreaktors entspricht.

Da im Betrieb eines Schnellen Brutreaktors zum Abtransport der Wärme maximal etwa 600°C genügen, ergibt sich ein Sicherheitsabstand zwischen dem eigentlichen Betriebspunkt und dem Sieden von etwa 400°C. Die Bedeutung des hohen Siedepunktes und – damit in engem Zusammenhang – der relativen Drucklosigkeit des Primärkreises kann nicht stark genug betont werden: Ein plötzliches Versagen dieser Primärkreissysteme ist ausgeschlossen. Tritt dennoch ein Leck auf, so führt die entsprechende Druckabsenkung nicht zum Verdampfen des Kühlmittels. Das Natrium läuft vielmehr entsprechend den hydrostatischen Verhältnissen aus. Durch die geometrische Gestaltung des Primärkreises ist dafür gesorgt, daß der Reaktorkern immer mit Natrium bedeckt ist.

Für den Langzeiteinsatz des Kühlmittels Natrium muß noch eine sehr wichtige Voraussetzung erfüllt sein, nämlich eine hohe Korrosionsbeständigkeit der Werkstoffe, die mit diesem Kühlmittel in Berührung gelangen. Hierfür kommen überwiegend nichtrostende Stähle in Betracht, vorzugsweise austenitische Stähle, und an manchen Stellen auch warmfeste ferritische Stähle. Unter technisch leicht erreichbaren Reinheitsbedingungen ist Natrium gut verträglich mit den Werkstoffen, aus denen die Wärmeübertragungssysteme gefertigt werden. Die übliche Korrosionsrate liegt zwischen 1 und 5 µm/Jahr (1 µm = 1/1000 mm).

4.2 Verhalten bei Störfällen

Damit die Maßnahmen gegen denkbare Störfälle erläutert werden können, sind die wichtigsten sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Natriums in Tabelle 2 zusammengestellt. Von besonderer Bedeutung sind die Reaktionen von Natrium mit Luft und mit Wasser.

Reaktionswärme	2500 kcal/kg 10500 kJ/kg	Bei der gleichen Menge Benzin wird etwa die 4fache Wärmemenge frei
Siedepunkt	850 ... 1000°C	Bei Benzin liegt der Siedepunkt bei 80°C
Verdampfungswärme	1000 kcal/kg 4180 kJ/kg	Verd.-Wärme bei Natrium 12 mal höher als bei Benzin
Reaktion Na-Wasser	1500 kcal/kg 6100 kJ/kg	Es entsteht Wasserstoff ca. 500 ml/kg Natrium
Sonstige Reaktionen	–	Na reagiert mit verschiedenen Betonsorten

Tab. 2:
Natriumeigenschaften in Störfallsituationen

Am Beispiel der Versuchsanlagen im Kernforschungszentrum Karlsruhe sei dargelegt, wie Natriumanlagen gegen mögliche Natriumbrände an Luft geschützt werden. Der Boden unter Natrium-Versuchsanlagen ist durchgehend mit Auffangwannen bedeckt. Die Auffangwannen werden mit perforierten Abdeckblechen abgedeckt, deren Wirksamkeit anhand eines Versuches demonstriert wurde. 200 kg Natrium von 600°C wurden auf die Abdeckbleche geschüttet. Das Natrium floß sofort in die Wannen ab, nur der anhaftende Rest verbrannte. Durch den geringen Zutritt von Luft in die Wannen verlief die Reaktion unter der Abdeckung so schwach – was auch an der geringen Rauchentwicklung erkennbar war –, daß das Natrium nach einiger Zeit in der Wanne erstarrte. Es konnte dann in fester Form entfernt werden. Das System arbeitet ohne aktiven Eingriff von außen.

Mit Wasser reagiert Natrium recht heftig. Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt, ähnlich wie bei anderen chemischen Reaktionen, von der Geschwindigkeit der Vermischung des Natriums mit dem Wasser ab. Die Wärme freisetzung erreicht etwa zwei Drittel der des Natriumbrandes an Luft. Entscheidend ist jedoch nicht die dabei freiwerdende Wärme, sondern vielmehr die Bildung von Wasserstoff. So werden bei einer Natrium-Wasser-Reaktion je Kilogramm Natrium ca. 500 Normliter Wasserstoff frei. Ein bekanntes Schulexperiment demonstriert die Natrium-Wasser-Reaktion, indem ein Stückchen festes Natrium in Wasser geworfen wird. Bei diesem Schulexperiment kann sich, im Gegensatz zu den Verhältnissen in der Reaktortechnik, der durch die Natrium-Wasser-Reaktion gebildete Wasserstoff sofort mit Luft vermischen und ein Knallgasgemisch bilden, das sich nach einiger Zeit selbst entzündet. Dies erweckt den Eindruck, die Natrium-Wasser-Reaktion sei explosionsfähig, während in Wirklichkeit das Knallgasgemisch die Explosionsfähigkeit bedingt. In Natrium-Kühlsystemen ist Luft grundsätzlich nicht vorhanden, so daß der Wasserstoff unschädlich bleibt.

Bei einem Leck der Wasserdampfrohre im Dampferzeuger oder Überhitzer können Wasser bzw. Wasserdampf ins Sekundärnatrium fließen. Bei einem größeren Leck würde die Natrium-Wasser-Reaktion in dem betroffenen Sekundärsystem durch den dabei entstehenden Wasserstoff bzw. Wasserdampf zu einem schnellen Druckaufbau führen. Das Natriumsekundärsystem ist für diesen Störfall ausgelegt, es hält einem kurzzeitigen Druckaufbau stand. Ein längerfristiger Druckaufbau wird durch das Druckentlastungssystem verhindert: auf der Natriumseite der Verdampfer bzw. Überhitzer sind in den Rohrleitungen Berstscheiben in Rohrleitungen zur Druckentlastung angebracht, die bei Erreichen eines bestimmten Druckes die Rohrleitungen freigeben. Diese Berstscheiben sind in der chemischen Industrie seit Jahrzehnten erprobte Sicherheitselemente. Die Rohrleitungen führen die Reaktionsprodukte der Natrium-Wasser-Reaktion, ein Gemisch aus Natrium, Wasser und Wasserstoff, in einen unter Schutzgas stehenden Abscheider ein. Dort werden im wesentlichen Natriumreste und der Wasserstoff abgeschieden und der Wasserstoff nach außen abgeblasen, wo er verbrennt. Die Dampferzeugungsleistung eines jeden Systems ist aufgeteilt auf drei parallele Verdampfer und drei parallele Erhitzer.

5. Die nukleare Sicherheit Schneller Brutreaktoren

5.1 Das Barrierenprinzip

Bei der Auslegung von Kernkraftwerken ist zu gewährleisten, daß radioaktive Substanzen, die sich im Innern der Anlage befinden, auch bei Störfällen weder in unkontrollierter Weise noch in unzulässigen Mengen in die Außenwelt gelangen. Zur Lösung dieser Aufgabe wird eine in der Technik häufig benutzte Methode angewendet: das Radioaktivitäts-Inventar wird durch mehrere hintereinanderliegende „Barrieren“ im Kraftwerk eingeschlossen.

Das Barrierenprinzip wird in Abbildung 6 am Beispiel des SNR 300 gezeigt. Spaltprodukte und Actiniden entstehen im Kernbrennstoff, der selbst ein beträchtliches Rückhaltevermögen besitzt. Der Kernbrennstoff ist in Hüllrohre eingeschweißt, die eine erste gasdichte Barriere gegen das Entweichen der radioaktiven Stoffe bilden. Eine zweite, ebenfalls gasdichte Barriere wird durch den Reaktortank und das primäre Kühlsystem sowie das in ihnen befindliche Natrium gebildet, das einen großen Teil der durch eventuelle Lecks aus dem Kernbrennstoff in das Natrium entwichenen Spaltprodukte chemisch bindet. Weitere Barrieren sind die sogenannten inneren und äußeren Containments, also die Betonwände des Reaktorgebäudes, die mit Stahlblechen gasdicht ausgekleidet sind.

Eine letzte Barriere bildet der Luftspalt zwischen der Betonwand des äußeren Containments und dem gasdichten Stahlblechbehälter, der diese umgibt. Gebläse, die die Luft ständig absaugen, halten den Luftspalt auf Unterdruck.

Diese mehrfachen Barrieren garantieren, daß weder im Normalbetrieb noch unter Störfallbedingungen unkontrollierte oder unzulässige Aktivitätsfreisetzungen möglich sind. Zur Vermeidung von Störfällen sind darüberhinaus besondere Sicherheitsmaßnahmen vorgesehen.

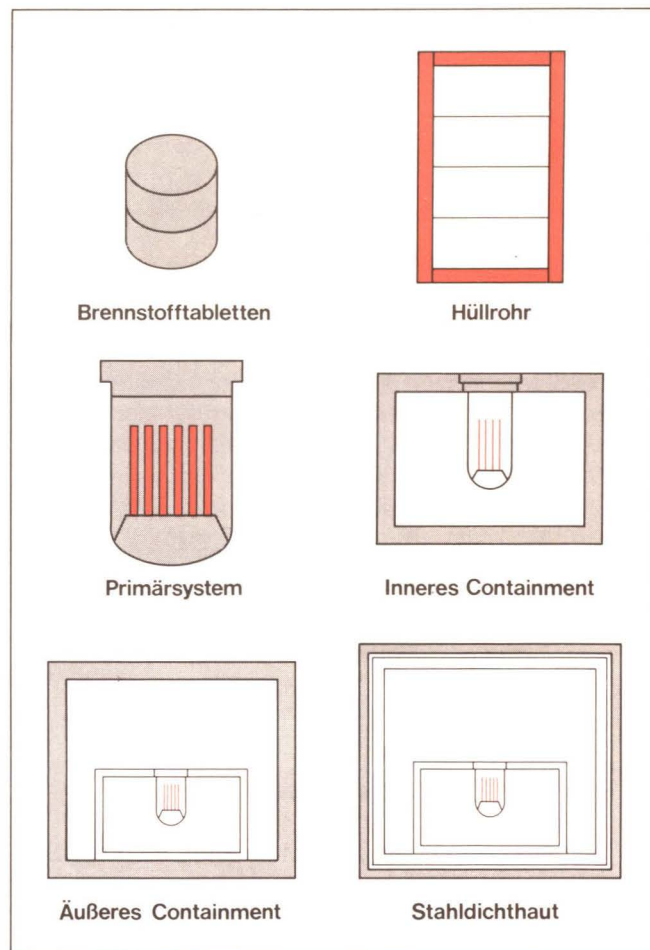


Abb. 6: Sicherheitsbarrieren eines Natriumbrüters

5.2 Sicherheitsmaßnahmen

Sicherheitsmaßnahmen lassen sich allgemein in zwei Kategorien aufteilen: in präventive, das heißt vorbeugende Maßnahmen und in Containmentmaßnahmen, das heißt Maßnahmen zum Einschluß radioaktiver Stoffe innerhalb des Kraftwerks nach einem Störfall.

Präventive Maßnahmen sind Maßnahmen und Einrichtungen, die verhindern, daß sich eine auftretende Betriebsstörung zu einem größeren Störfall entwickelt und damit zur Gefährdung einer Barriere führt. Dafür sind vor allem zwei Bedingungen zu erfüllen:

- Der Reaktor muß jederzeit und aus jeder Situation heraus sicher und zuverlässig abzuschalten sein;
- Die sichere Nachwärmeabfuhr aus dem Reaktorkern muß auch nach der Abschaltung jederzeit gewährleistet sein.

Containmentmaßnahmen sind aktive und passive Maßnahmen, die die Folgen von Störfällen mildern oder auf das Innere des Reaktors begrenzen. Im wesentlichen bestehen sie darin, daß die Barrieren aufgrund ihrer Konstruktion den Störfallfolgen standhalten. Es handelt sich somit um passive Maßnahmen. Wie später noch dargelegt wird, werden jedoch auch aktive Maßnahmen zur Beherrschung von Störfällen getroffen.

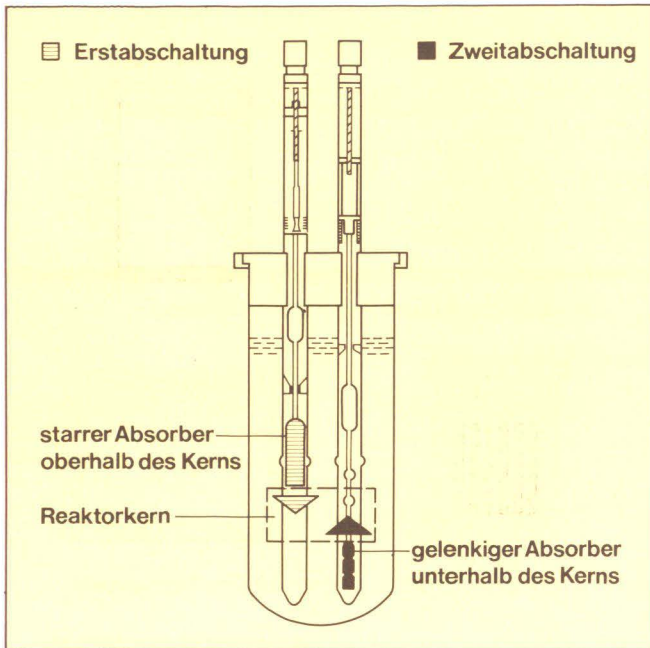


Abb. 7: SNR-Abschaltsysteme

5.3 Präventive Maßnahmen beim SNR 300

Die Aufgabe der präventiven Maßnahmen ist es, Störfälle in einem möglichst frühen Stadium zu entdecken und so zu beenden, daß keine wesentliche Belastung des Containmentsystems auftritt. Zur Erfüllung dieser Aufgabe dient eine Vielzahl von Sicherheitseinrichtungen, deren Beschreibung im einzelnen hier allerdings zu weit führt.

Die beiden oben genannten Forderungen a) und b) sind besonders wichtig und werden hier am Beispiel des SNR 300 detailliert diskutiert. Aus diesen Forderungen folgen als wichtigste Präventivmaßnahmen:

- Die Abschaltssysteme und
- die Nachwärmeabfuhrsysteme.

Abschaltsysteme

Abbildung 7 zeigt, daß der SNR 300 zwei völlig getrennte

und in ihrem Aufbau unterschiedliche Abschaltssysteme besitzt. Die Absorberstäbe des sogenannten Erstabschaltsystems befinden sich oberhalb des Reaktorkerns. Sie fallen bei Bedarf allein durch Schwerkraft in den Reaktorkern. Falls dieses System versagt, was sehr unwahrscheinlich ist, wird das sogenannte Zweitabschaltsystem angeregt. Die Absorberstäbe dieses Systems befinden sich unterhalb des Reaktorkerns und werden durch vorgespannte Federn in den Kern hineingezogen. Die Absorberstäbe des Zweitabschaltsystems sind gelenkig ausgeführt, um auch noch in einen eventuell verformten Reaktorkern eingezogen werden zu können. Jedes Abschaltssystem ist in der Lage, den Reaktor allein abzuschalten. Man bezeichnet dies als Prinzip der Redundanz. Die Systeme sind, wie erläutert, auch in ihrem Aufbau unterschiedlich. Dies wird als Prinzip der Diversität bezeichnet.

Für die Gewährleistung der Abschaltsicherheit wurde ein beträchtlicher Aufwand getrieben. Zum Versuchsumfang für den SNR 300 gehörten unter anderem mehr als 10 000 Abschaltungen und 3 bis 4 Millionen Regelspiele. Zur Abschaltung aus jedem beliebigen Betriebszustand genügt das Hereinfallen eines der insgesamt zwölf Abschalteteile. Ein vollständiges Versagen der Abschaltung muß daher als eine gedankliche Hypothese angesehen werden, der jede technische Glaubwürdigkeit fehlt.

Nachwärmeabfuhrsysteme

Abbildung 8 zeigt die zwei Vorrichtungen der Nachwärmeabfuhr (NWA), die in die Hauptkreisläufe für die normale Wärmeabfuhr eingebaut sind. Zunächst kann die Nachwärme über die im Normalbetrieb verwendeten Pumpen, Rohrleitungen und Wärmetauscher abgeführt werden. Die Nachwärme wird im Wasser/Dampf-System unter Umgehung der Turbine direkt in den Hauptkondensator abgeführt. Eine sichere Nachwärmeabfuhr ist gewährleistet, wenn dieses System in einem der drei parallelen Hauptkreise zur Verfügung steht. Sollten diese Systeme aller 3 Hauptkreise ausfallen – dies ist denkbar, wenn zum Beispiel die externe Versorgung mit Kühlwasser unterbrochen würde, was jedoch extrem unwahrscheinlich ist – so steht für die Nachwärmeabfuhr

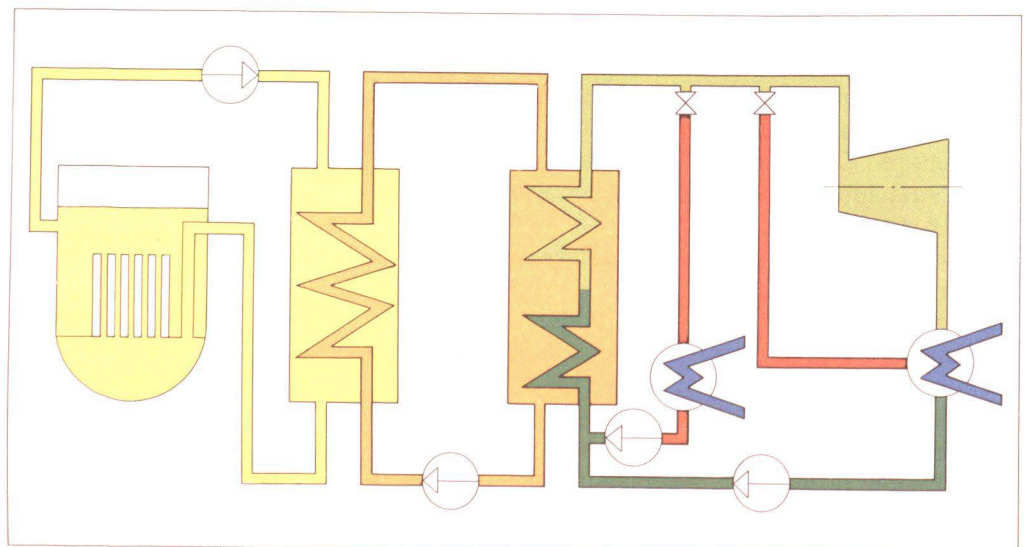


Abb. 8: Nachwärmeabfuhr beim SNR 300

über die Hauptkreise ein spezielles NWA-System mit eigenem Kondensator und eigener interner Kühlwasserversorgung zur Verfügung.

Eine dritte Möglichkeit – nur für den Notkühlfall gedacht – ist durch ein direkt in den Reaktortank eingebautes Tauchkühlersystem gegeben, das die Nachwärme über einen eigenen Natriumkreislauf und mittels eines Luftkühlers an die Umgebung gibt. Abbildung 9 zeigt diese Tauchkühlvorrichtung. Dieses Kühlsystem ist auch dann noch funktionsfähig, wenn aus irgendeinem Grund der Natriumspiegel im Reaktortank so weit abgesunken sein sollte, daß die Hauptkreise nicht mehr funktionsfähig sind. Auch hier sind die Prinzipien der Redundanz und der Diversität zugrunde gelegt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit liegt bei einem statistischen Wert von kleiner als 10^{-6} (das heißt, im Mittel ein einmaliges Versagen bei mehr als einer Million Anforderungen).

Eine erst kürzlich durchgeführte Studie zeigt darüber hinaus, daß selbst bei dem Ausfall der aktiven Komponenten sämtlicher Wärmeübertragungssysteme noch so viel Wärme durch Natrium-Naturumlauf in den Hauptkreisen abgeführt wird, daß die Sicherheitsbarrieren intakt bleiben. Der Reaktorkern kann nach Beheben der Störung wieder in Betrieb genommen werden.

gen für alle Kernkraftwerkstypen zur Auflage gemacht wird. So sind alle modernen Kernkraftwerke der Bundesrepublik – also auch Schnelle Natriumgekühlte Brüter – unter anderem gegen den Absturz von Flugzeugen und gegen Erdbeben auszulegen. Die dafür verwendeten Sicherheitsvorkehrungen sind bei dem Schnellen Brüter in Kalkar den bei anderen Kernkraftwerken verwendeten recht ähnlich.

Ein schwerwiegender Störfall aus dem Innern der Anlage, der zu einer ersten Belastung des Containmentsystems führte, könnte nur dann auftreten, wenn mit einer Störung auch die präventiven Maßnahmen versagen. Da die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Störfall extrem klein ist, wird ein derartiger Störfall gewöhnlich als „hypothetisch“ bezeichnet. Für die Auslegung des Containmentsystems wird im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens das Auftreten eines Störfalls dieser Art einfach unterstellt, und es wird gefordert, daß seine Folgen sicher innerhalb der Reaktoranlage beherrscht werden.

Zur Veranschaulichung des extremsten Störfallablaufes, der als sogenannter Bethe-Tait-Störfall bekannt ist, geht man zunächst von der Annahme aus, daß sämtliche Hauptkühlmittelpumpen gleichzeitig ausfallen und beide

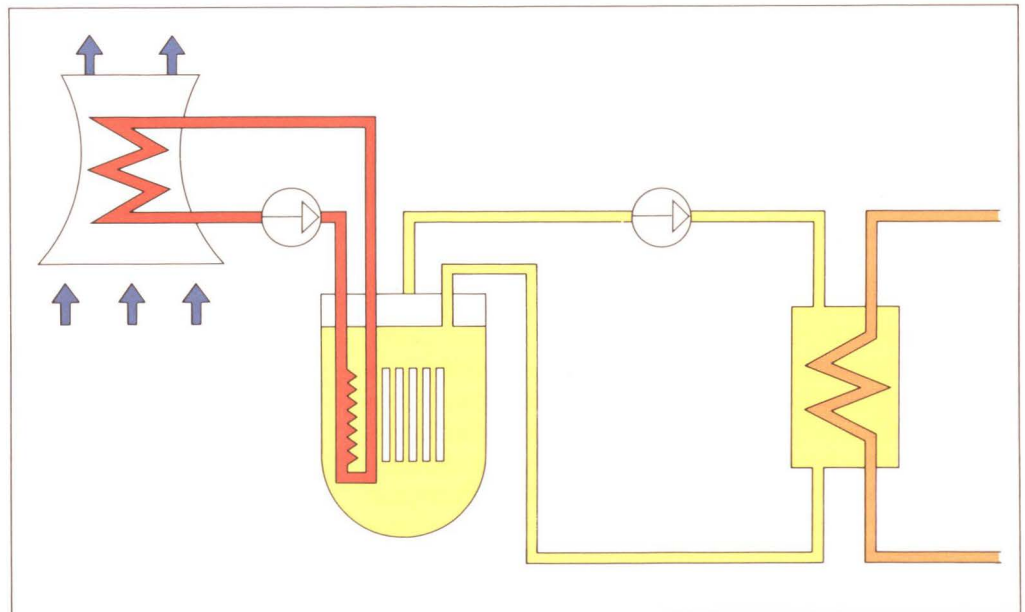


Abb. 9:
Notkühlung beim SNR 300

5.4 Containmentmaßnahmen beim SNR 300

Wie bereits gesagt, hat der Schnelle Natriumgekühlte Brüter ein Natrium-Niederdruckkühlsystem mit sehr guten Kühleigenschaften. Das Containmentsystem ist dadurch in der Lage, Störfälle aus dem Innern der Reaktoranlage zu beherrschen, auch solche, die gravierend sind (aber eine extrem geringe Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen). Zu einer mechanischen Belastung des Containmentsystems kann es durch gewaltsame Einwirkung von außen oder im Verlauf eines schwerwiegenden Störfalles aus dem Innern der Reaktoranlage kommen. Die Problematik der Einwirkung von außen soll hier nicht diskutiert werden, da die Beherrschung solcher Einwirkun-

Abschaltvorrichtungen gleichzeitig versagen. Da dann der Kühlmitteldurchsatz im Reaktorkern nicht mehr ausreicht, die entstehende Wärme abzuführen, käme es im Reaktorkern zu Temperatursteigerungen und örtlich schließlich zum Sieden des Natriums. Das Natriumsieden bewirkt über den ‚Void-Effekt‘ (Blasen-Effekt) eine Reaktivitäts- und damit eine Leistungssteigerung. Letztlich ist eine Leistungsexkursion denkbar, in deren Verlauf der Reaktorkern teilweise oder ganz zerstört würde. Die vom Containmentsystem zu beherrschenden Folgen eines solchen Störfalles sind

- die freigesetzte thermische und mechanische Energie,
- große Mengen geschmolzenen Kernbrennstoffs, der auch weiterhin Wärme erzeugt, sowie

- im Containmentsystem freigesetzte Spaltprodukte und Aerosole, die die eigentliche radiologische Gefahr darstellen.

Der Reaktortank und der Primärkreis des SNR 300 sind so konstruiert, daß sie der freigesetzten mechanischen Energie mit Sicherheit standhalten. Grundlage der Auslegung ist eine mechanische Belastung von 370 Megawattsekunden (MWs). Die als wahrscheinlich berechnete Energie liegt jedoch unterhalb dieses Auslegungswertes. Nur bei Verwendung extrem pessimistischer Annahmen lassen sich 370 MWs errechnen.

Ein intakter Reaktortank und Primärkreis bedeuten aber auch, daß der geschmolzene Brennstoff im Reaktortank weiterhin gekühlt werden kann. Die bereits erwähnten Tauchkühler des Notkühlsystems sind so ausgelegt, daß sie auch nach einem Bethe-Tait-Störfall funktionsfähig bleiben.

gase sicherzustellen. Im bisherigen Verlauf des Störfalls wurde angenommen, daß die beiden ersten gasdichten Barrieren – das sind die Hüllrohre der Brennstäbe im Reaktorkern und das Primärsystem – zerstört werden. Es bleiben als Barrieren die Betonwände des inneren und äußeren Containments sowie der alles umgebende gasdichte Stahlmantel mit dem Unterdruckspalt (siehe Abbildung 6).

Der Spalt zwischen äußerem Containment und dem Stahlmantel wird auf Unterdruck gehalten, um Leckagen von außen wie Leckagen durch die äußere Betonwand des äußeren Containments aufzufangen und in das Reaktorgebäude zurückzuführen. Dadurch wird sichergestellt, daß radioaktive Stoffe, die bis in den Spalt gelangt sind, nicht unkontrolliert in die Umgebung der Reaktoranlage gelangen können. Erst nach etwa zehn Tagen

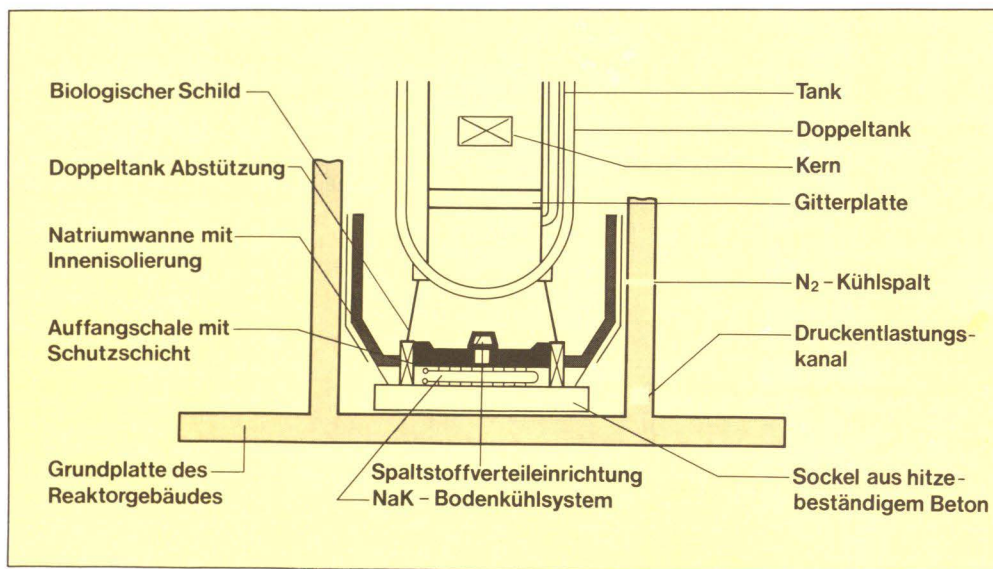


Abb. 10:
SNR Core Catcher
(Bodenkühleinrichtung)

Da aufgrund des Wissenstandes bei Baubeginn des SNR 300 noch nicht mit letzter Sicherheit auszuschließen war, daß geschmolzener Kernbrennstoff den Reaktortank durchschmilzt und damit die Primärkreis-Integrität zerstört, hat der SNR 300 eine letzte Möglichkeit zur Kühlung des Kernbrennstoffes in Form einer dicht unterhalb des Reaktortanks liegenden Kühleinrichtung erhalten. Abbildung 10 zeigt diese Konstruktion; sie wird als core catcher (Bodenkühleinrichtung) bezeichnet. Diese Kühleinrichtung soll den geschmolzenen Reaktorkern auffangen und bis zum Erkalten kühlen. Sie ist wie ein Behälter ausgeführt; die Wände sind mit natriumbeständigem Isoliermaterial ausgekleidet, ihre Außenseiten werden mit Stickstoff gekühlt. Der Boden des Behälters ist mit einer Schutzschicht aus einem extrem temperaturbeständigen Material bedeckt, das den hohen Temperaturen des geschmolzenen Kernbrennstoffes standhält. Zusätzlich wird der Boden durch eingebaute Kühlschlangen mit Natrium/Kalium gekühlt, so daß der Kernbrennstoff auch über längere Zeit sicher gekühlt werden kann. Ein Durchschmelzen durch das Bodenfundament des Reaktorgebäudes in die umgebende Erde ist ausgeschlossen.

Das unter 5.1 beschriebene Containmentsystem hat die Rückhaltung der Aerosole und der radioaktiven Edel-

Unterdruckspalt-Betrieb wird es wegen des damit verursachten Druckaufbaus innerhalb des Reaktorgebäudes notwendig, das Zurückpumpen einzustellen und die Luft im Reaktorgebäude über Filter kontrolliert an die Außenwelt abzugeben. Infolge der bis dahin durch Abkling- und Ablagerungsvorgänge sowie durch die Rückhalte-techniken stark verringerten Radioaktivität in der Abluft liegt selbst in diesem extremen Fall die radiologische Belastung unter den gesetzlich zugelassenen Werten.

5.5 Vergleich mit der Sicherheit eines deutschen Druckwasserreaktors

Über die Sicherheit eines Brüters, etwa des SNR 300, lassen sich zum heutigen Zeitpunkt noch nicht Risikostudien in ähnlichem Umfang ausarbeiten, wie dies bei der Rasmussen-Studie über Leichtwasserreaktoren in den USA um 1975 geschah, und wie es seit 1978 für deutsche Druckwasserreaktoren (DWR) durchgeführt wird. Für DWR liegen viel mehr empirische Eingangsdaten als für Brüter vor, weil die Gesamtzahl der DWR-Betriebsjahre in der Welt weit höher ist. Jedoch wurde 1980-82 aufgrund einer Empfehlung der Enquete-

Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ des Deutschen Bundestages eine „Risikoorientierte Analyse zum SNR 300“ ausgearbeitet, die sich auf die Erfahrungen aus etwa 130 Betriebsjahren der bereits laufenden schnellen Leistungsreaktoren der Welt sowie auf theoretische Berechnungen abstützt. Die Gesellschaft für Reaktorsicherheit ist dabei u.a. zu folgenden Ergebnissen gekommen:

- Wegen der sicherheitstechnischen Eigenschaften des SNR 300 und der besonderen Sicherheitsvorkehrungen ist die Wahrscheinlichkeit für einen Störfallablauf, bei dem der Kern des Reaktors zerstört wird, deutlich kleiner als die Wahrscheinlichkeit, daß der Reaktorkern eines DWR schmilzt.
- Selbst bei einer Zerstörung des SNR-Reaktorkerns kann das Kerninventar mit großer Wahrscheinlichkeit im Reaktortank bzw. im Sicherheitseinschluß zurückgehalten werden.
- Ein relativ schnelles Versagen des Sicherheitseinschlusses – das heißt des Reaktortanks, des inneren und des äußeren Containments – könnte nur dann eintreten, wenn dabei der Auslegungswert von 370 MJ mechanisch wirksamer Energie überschritten würde. Die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Vorkommnisses ist extrem klein.
- Der Beitrag des Bethe-Tait-Störfalls zu dem sehr niedrigen Risiko des SNR 300 ist klein.

Trotz unterschiedlicher Sicherheitsaspekte liegt das durch den SNR 300 verursachte Risiko in derselben Bandbreite wie dasjenige eines DWR. Dem SNR-Nachteil des „Void-Effekts“, der erhöhte Zuverlässigkeit der Abschaltvorrichtungen erfordert, steht der SNR-Vorteil einer inhärent sicheren Nachwärmeabfuhr gegenüber, während für die sichere Nachwärmeabfuhr aus einem DWR aktiv eingreifende Einspeisesysteme nötig sind.

6. Bau- und Betriebserfahrungen

Zum Schluß sei ein Überblick über den bisher erreichten Stand der Schnellbrüterentwicklung gegeben. An dieser Entwicklung beteiligen sich zahlreiche Industriestaaten seit vielen Jahren, die Bundesrepublik Deutschland seit 1960. Die Bundesrepublik Deutschland führt ihr Projekt seit 1967 gemeinsam mit Belgien und den Niederlanden durch.

Im Jahre 1978 ging das erste deutsche Versuchs-Kernkraftwerk mit natriumgekühltem schnellen Reaktor in Karlsruhe auf dem Gelände des Kernforschungszentrums in Betrieb: die KNK II mit 20 MW elektrischer Leistung. Diese Anlage hatte nach verschiedenen Umbauarbeiten eine zentrale Kernzone mit Schnellneutronenspektrum erhalten und dient vor allem der Erprobung von Schnellbrüterreaktor-Brennelementen, Natriumkreislaufkomponenten und Instrumentierung.

1973 hat in Kalkar der Bau des schon erwähnten Brüter-Prototyp-Kraftwerks SNR 300 von 300 MW elektrischer Leistung begonnen. Die Übergabe an den Betreiber der Anlage ist für 1987 vorgesehen. In der Sowjetunion,

England und Frankreich erzeugen Prototyp-Reaktoren dieser Größenordnung, aber etwas anderer Bauart, bereits seit einigen Jahren Energie. Allgemein zeigen bisherige Betriebserfahrungen im Prototypmaßstab, daß natriumgekühlte Brüter technisch realisierbar sind.

Weit über 100 000 Brüterbrennstäbe haben sich im Reaktorbetrieb international hervorragend bewährt. Schwierigkeiten sind in den letzten Jahren fast nur außerhalb des Reaktorkerns im nicht-nuklearen Anlagenbereich – insbesondere an Na/Na-Zwischenwärmetauschern und Dampferzeugern – aufgetreten und haben sich als überwindbar erwiesen. Erfahrungsgemäß lassen sich Schäden beim Kraftwerksbetrieb weitgehend vermeiden, wenn man Großkomponenten vor der eigentlichen Inbetriebnahme zunächst außerhalb des Kernkraftwerks testet. Hierzu liefern die großen industriellen Versuchsstände, z.B. in Bensberg bei Köln, wesentliche Beiträge, wo solche Komponenten in voller Größe durch Dauertests mit Natrium erprobt werden. Diese Testserien haben z.B. gezeigt, wie wichtig strenge Qualitätskontrollen für die Tausende von Schweißstellen an Dampferzeugern sind, damit Na-Wasser-Reaktionen in ihnen vermieden werden.

In der Sowjetunion und Frankreich sind derzeit nicht nur Prototypanlagen in Betrieb. In der UdSSR liefert seit 1980 ein Brüter mit 600 MW_e Strom ins Netz, in Frankreich ab 1985 ein noch größerer Brüter: Der französische Demonstrationsbrüter Super-Phénix von 1 200 MW Leistung ist gemeinsam von Elektrizitätsversorgungsunternehmen Frankreichs, Italiens, Deutschlands, Belgiens und Hollands in Auftrag gegeben worden und seit 1977/78 im Bau. In Japan ist der Beschluß zum Bau eines Brüterprototyp-Kraftwerkes von 300 MW_e gefaßt worden. Hier dient der deutsche SNR 300 als Vorbild.

Im Jahre 1977 wurden Verträge abgeschlossen, die zu einer weitgehenden Integration der deutschen und der französischen Schnellbrüterarbeiten führen – sowohl auf der Ebene der Kernforschungszentren und der Herstellerindustrie als auch der Stromversorgungsunternehmen. Anfang 1984 haben die Regierungen der Bundesrepublik Deutschland, Großbritanniens, Frankreichs, Italiens und Belgiens einen Zusammenschluß ihrer Brüteraktivitäten vereinbart. Detaillierte Verträge zwischen den Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen dieser Länder sind bereits unterzeichnet bzw. in Vorbereitung. Niederländische Partner behalten die Möglichkeit zum Beitritt.

7. Zusammenfassung

Schnelle Brutreaktoren bieten die Möglichkeit, die Energievorräte der Erde um ein bis zwei Größenordnungen zu vermehren. Brutreaktoren sind bis jetzt die einzige Technologie, die sich bereits in der großtechnischen Erprobung befindet und das Potential besitzt, langfristig große Energiemengen bereitzustellen. Ein ähnlich hohes Potential ergibt sich bei der Kernfusion, deren prinzipielle Machbarkeit aber noch bewiesen werden muß.

Die Erreichbarkeit von Brutraten um den Wert von 1,2 bereits in heutigen Anlagen ist durch Messungen bestä-

Land	Reaktor	Leistung	Jahr der Inbetriebnahme
Frankreich	Rapsodie	40 MW _{th} ¹	1967 ²
	Phénix	250 MW _e ¹	1974
	Super Phénix	1200 MW _e	1985
Großbritannien	DFR	15 MW _e	1959 ³
	PFR	250 MW _e	1975
UdSSR	BR-5/BR-10	5 MW _{th}	1960
	BOR 60	45-60 MW _{th}	1970
	BN 350	140 MW _e ⁴	1974
	BN 600	600 MW _e	1980
USA	EBR I	0,2 MW _e	1951 ⁵
	EBR II	20 MW _e	1964
	FFTF	400 MW _{th}	1980
Bundesrepublik Deutschland	KNK II	20 MW _e	1979
Bundesrepublik / Belgien / Niederlande	SNR 300	300 MW _e	1987
Japan	Joyo	100 MW _{th}	1978
	Monju	300 MW _e	1991
Indien	FBTR	15 MW _e	1984
Italien	PEC	118 MW _{th}	1987

Tab. 3:
Schnelle Brüter im internationalen Vergleich

¹ MW_{th} = Megawatt thermischer Leistung.
MW_e = Megawatt elektrischer Leistung.

² Stillgelegt: 1983

³ Stillgelegt: 1977

⁴ Zusätzlich wird ein Teil der erzeugten Wärmeleistung unmittelbar zur Destillation von 80000 t/Tag Frischwasser durch Meerwasserentsalzung verwendet.

⁵ Stillgelegt: 1963

tigt, in guter Übereinstimmung mit theoretischen Vor- ausberechnungen.

Brüterbrennstoff läßt sich wiederaufarbeiten. In Frank- reich und Großbritannien wurden bzw. werden pro Jahr mehrere Tonnen Brüterbrennstoff der Reaktoren RAP- SODIE, Phénix, DFR und PFR wiederaufgearbeitet. Man stützt sich dabei auf das bekannte PUREX-Verfah- ren; brüterspezifische Zusatzprobleme erwiesen sich hierbei als lösbar.

Die Sicherheit von Brüterkraftwerken läßt sich minde- stens in demselben Maße gewährleisten wie bei LWR- Anlagen. Ein Vorteil des Kühlmittels Natrium liegt in der Drucklosigkeit des Systems und besonders unproble- matischer Notkühlung. Eine weitreichende internatio- nale Zusammenarbeit auf dem Brütergebiet, mit bereits 10 in Betrieb befindlichen Leistungsreaktoren, führt be- reits jetzt zu einem beachtlichen Erfahrungsschatz, der eine gegenseitige Absicherung der Ergebnisse möglich macht.

Wegen der vorläufig noch hohen Kosten von Brüter- kraftwerken liegt deren wirtschaftliche Bedeutung in der Zukunft, denn mit erheblicher Uranverteuerung und Ver- knappung auf dem Weltmarkt ist längerfristig zu rech- nen. Im nationalen Bereich bietet das Brüterkonzept die Chance, in etwa 50-70 Jahren unabhängig von fremden Uranlieferungen zu werden. Für die Senkung der Anla- ge- und Betriebskosten der Brüter zeichnet sich eine An- zahl konkreter Möglichkeiten ab, die bei der laufenden Weiterentwicklung dieser Reaktorlinie ausgenutzt wer- den.

Literatur

- 11th World Energy Conf., 8.-12. Sept. 1980 München, Vol. 4A, p. 453 ff
- MICHAELIS, H.: Einige Beobachtungen zur 12. Weltenergiekonferenz in New Dehli. *Energiewirtschaftl. Tagesfragen*, Dez. 1983, S. 915-920
- Energy in a Finite World: A Global Systems Analysis Report by the Energy Systems Program Group of IIASA, W. Häfele (Prog. Leader) Ballinger Publ. Co., Cambridge, Mass., USA 1981
- BAUER, G.S., Mc DONALD, A. (Ed.): Nuclear Technologies in a Sustainable Energy System. J. Springer, Heidelberg 1983
- GRATHWOHL, M.: World Energy Supply – Resources, Technologies, Perspectives. W. de Gruyter, Berlin 1982
- Global 2000. Verlag 2001, Frankfurt 1981
- MARTH, W.: Das Projekt Schneller Brüter – Stand und Zielsetzung. *KfK-Nachr. Jahrg. 15, 2/83*
- Wie sicher ist der Schnelle Brüter? (Red. H. Grupe) Kernforschungszentrum Karlsruhe 1981
- Zur Technik der Schnellen Brutreaktoren. Sammlung von Beiträgen in: *Atomkernenergie Kerntechnik 36* (1980), 241-291
- VOSSEBRECKER, H.: Besondere sicherheitsrelevante wärmetechnische und neutronenphysikalische Merkmale von Schnellen Natriumgekühlten Brutreaktoren. *Wärme 86/1* (1980) 6-11
- SBK und INB Internationaler Brüterreport 1981, *Energiewirtschaftl. Tagesfragen* (1981), 831-867
- KÖBERLEIN, K.: Risikoorientierte Analyse zum SNR 300 atw XXVII (1982), S. 429-435
- Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting. Lyon, July 19-23, 1982
- HÜPER, R.: Hindernisse der deutschen Brüterentwicklung überwunden. *Atom + Strom, Jg. 29.* (1983) 103-111
- Status of the DeBeNe Fast Breeder Reactor Development. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Febr. 1984
- MARTH, W.: Zur Geschichte des Projekts Schneller Brüter, *KfK-Bericht 3111* (Juli 1981)
- Ursachen der Kostensteigerungen und Verzögerungen beim SNR 300. Aus der Kearney-Motor Columbus-Studie für das BMFT. atw XXVII (1982), 576-580
- Der Schnelle Brüter in Kalkar – Beschluß des Bundestages zur Inbetriebnahme. *Zur Sache 2/83*, Hrsg. Deutscher Bundestag
- BRANDSTETTER, A.: Die Pool- und Loopbauweise als Primärkreis-Anordnung bei natriumgekühlten Schnellbrütern. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Heft 11/12 (1981), 898-903
- RAPIN, M.: Fast breeder fuel cycle, worldwide and French prospects. Vortrag: BNES Conference, 9-12 Nov. 1981, London
- LAUER, H., PLESSA, A.: Der größte Schnelle Brüter der Welt – SUPER-PHENIX. *Bild der Wissenschaft*, 6-1981, S. 38-48
- ZALESKI, C.P.: Breeder Reactors in France. *Science Vol. 208* (1980), S. 137
- MICHAELIS, H.: Handbuch der Kernenergie, Bd. 1 u. 2, dtv 4367, München 1982
- KOCH, G.: Entwicklungsstand der Wiederaufarbeitung von Schnellbrüter-Brennelementen: Ein internationaler Vergleich. *Jahrbuch der „Atomwirtschaft“* 1983, A 25 – A 37
- MICHAELIS, H.: Der SNR 300 in der Kritik. *Energiewirtsch. Tagesfragen*, Heft 5 (Mai 1983) S. 292-302
- WALTAR, A.E., REYNOLDS, A.B.: Fast Reactors Pergamon Press, New York 1982
- Zusammenfassung von Karlsruher Beiträgen über Forschungsergebnisse des Projektes Schneller Brüter in den Heften: *KfK-Nachrichten*, Jg. 10 (1978), 3-4/78, Jg. 15 (1983), 2/83, Jg. 15 (1983), 3/83.
- HÜPER, R.: Der Schnelle Brüter. *Bild der Wissenschaft*, 2-1979, S. 70-85

Radioökologie – Die Emission von Radionukliden und ihr Verhalten in der Nahrungskette und im menschlichen Körper

Heiner Geiß¹⁾ und Manfred Paschke²⁾

¹⁾ Abteilung Sicherheit und Strahlenschutz der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

²⁾ Programmgruppe Technik und Gesellschaft der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Einleitung

Bei keinem technologischen Prozeß können die entstehenden und zum Teil giftigen Abfallprodukte vollständig zurückgehalten werden. So ist auch beim Betrieb kerntechnischer Anlagen eine Abgabe geringer Mengen radioaktiver Stoffe – Radionuklide, wie sie bei der Spaltung des Urans oder durch Aktivierung infolge Neutroneneinfangs entstehen – unvermeidlich. Die höchstzulässige Abgaberate wird durch die Genehmigungsbehörde festgesetzt, die dabei an die Forderung der Strahlenschutzverordnung vom 13.10.1976 gebunden ist, daß „die durch Ableitung radioaktiver Stoffe aus diesen Anlagen oder Einrichtungen mit Luft oder Wasser bedingte Strahlenexposition des Menschen so gering wie möglich gehalten wird“ (Minimal-Prinzip). Als Höchstwert wird dabei die 50-Jahre-Folgedosis von 0,3 mSv (30 mrem) pro Jahr für den Ganzkörper an der ungünstigsten Einwirkungsstelle – auf die Definition dieser Begriffe wird später noch eingegangen – getrennt über Abluft und Abwasser festgelegt. Für jede kerntechnische Anlage muß für das Genehmigungsverfahren in detaillierten Gutachten durch neutrale Stellen der Nachweis erbracht werden, daß diese Forderung erfüllt ist.

1. Abgabe und Ausbreitung von Radionukliden

1.1 Betriebliche Freisetzung

Radioaktivität wird in kerntechnischen Anlagen über Abluft und Abwasser abgegeben. Das Maß für die freigesetzte Aktivität ist die Zahl der Zerfälle in der Sekunde, das Becquerel (Bq). Alte, aber immer noch gebräuchliche Einheit ist das Curie (Ci). 1 Ci entspricht $37 \cdot 10^9$ Zerfällen pro Sekunde, also $37 \cdot 10^9$ Bq. Die in der Radioökologie vorkommenden Aktivitäten werden in Nanocurie ($1\text{nCi} = 10^{-9}$ Ci = 37 Bq) oder Picocurie ($1\text{pCi} = 10^{-12}$ Ci = 0,037 Bq) gemessen.

Die Praxis hat gezeigt, daß die Genehmigungswerte im Betrieb teilweise erheblich unterschritten werden. In der Tabelle 1 sind die zu erwartenden Abgabewerte mit der

Abluft für zwei verschiedenen Reaktortypen von je 1000 MW_e dargestellt, Tabelle 2 zeigt einen Vergleich von Genehmigungs- und Abgabewerten für Biblis A im Jahre 1975. Diese im Vergleich zum Antrag günstigen Werte sind durch ein ausgeklügeltes System von Filtereinrich-

Nuklidgruppe	Nuklid	Freisetzung in Ci/a	
		Siedewasserreaktor	Druckwasserreaktor
Edelgase	Kr 85	700	700
	Xe 133	2 500	2 500
Jod-131	J 131	0,1	0,05
Kurzlebige Aerosole	Co 58	0,001	0,001
	Sr 89	0,001	0,001
	J 133	0,5	0,2
Langlebige Aerosole	Co 60	0,001	0,001
	Sr 90	0,0001	0,0001
	Cs 134	0,0001	0,0001
	Cs 137	0,0002	0,0002
Sonstige Gase	H 3	30	20
	C 14	10	10

Tab. 1:

Zu erwartende jährliche Aktivitätsfreisetzungen für die Abluft, Siedewasser-, Druckwasserreaktor für 1000 MW_e

Nuklidgruppe	Abgabewert 1975 Ci/a	Genehmigungswert Ci/a	Abgabewert in % des Genehmigungswertes
Edelgase	1682	89500	1,9
Jod-131	0,0049	0,695	0,7
Aerosole	– kurzlebig	115	0,04
	– langlebig	0,0061	3,25

Tab. 2:

Genehmigungswerte und tatsächliche Jahresabgaben über den Kamin; Biblis Block A

tungen und Verzögerungsstrecken zum Abklingen der Aktivität kurzlebiger Nuklide möglich. Wie effektiv diese Filter arbeiten, zeigt das Beispiel J-131. Die in Tabelle 2 erwähnte Jahresabgabe von 0,0049 Ci entspricht nur Bruchteilen eines Milligramms.

1.2 Gasförmige radioaktive Stoffe (atmosphärische Ausbreitung)

1.2.1 Meteorologische und nicht meteorologische Parameter, die die Ausbreitung beeinflussen

Die Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre wird von vielen und zum Teil sehr komplexen Parametern beeinflusst. Man kann im wesentlichen zwei Gruppen unterscheiden, die dabei eine Rolle spielen. Die erste Gruppe von Parametern, die die Verwirbelung der Luft (Turbulenz) beschreiben, hängt von der Struktur des Untergrundes ab, zum Beispiel von Art und Höhe des Bewuchses oder Art und Höhe der Bebauung. Die Turbu-

lenz ist umso größer, je höher die „Rauhigkeit“ der Erdoberfläche ist. Der Begriff „Rauhigkeit“ hat dabei durchaus die in der Umgangssprache übliche Bedeutung. So ist zum Beispiel die Oberfläche des Meeres bei Windstille glatt im meteorologischen Sinn, während andererseits das durch Bäume und Gebäude stark strukturierte Gelände eine große Rauhigkeit besitzt.

Die zweite Gruppe besteht aus meteorologischen Größen, der Wetterlage, die ebenfalls durch viele schwankende Einzelgrößen gekennzeichnet ist, zum Beispiel Windgeschwindigkeit, Stabilität der Luftschichtung oder Niederschlag. Die Stabilität der Luftschichtung läßt sich durch den Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Höhe über dem Erdboden beschreiben. In Abbildung 1 sind einige typische Fälle dargestellt. Man teilt dabei die Wetterlagen in 6 Klassen A-F (Diffusionskategorien) ein, in denen die Fähigkeit, in die Atmosphäre abgegebene Schadstoffe schnell zu verdünnen, von A nach F abnimmt. Fall A, B zeigt labile Schichtung. Die Temperatur nimmt mit zunehmender Höhe schnell ab. Das führt zu starker Turbulenz, die auch für die Entstehung von Gewitterwolken verantwortlich ist. Die Durchmischung der Atmosphäre und damit die Verdünnung der Schadstoffe ist gut (hohe Verdünnungseffektivität). Der andere Extremfall ist die sogenannte stabile Schichtung, besser unter dem Begriff Inversion bekannt. In diesem Fall (E, F) nimmt die Temperatur mit der Höhe zu. Der Austausch zwischen den unteren und den oberen Luftschichten wird nahezu völlig unterbunden. Zusammen mit geringen Windgeschwindigkeiten in Bodennähe kann es zur Smoglage kommen. In der Mitte dieser Extreme liegen die neutralen Schichtungen (C, D). Zwischen allen diesen Lagen gibt es kontinuierliche Übergänge. Die ursprüngliche Einteilung dieser Klassen geht auf F. Pasquill zurück und beruht auf Beobachtungen von Rauchfahnen, die je nach Wetterlage charakteristische Formen zeigen (Abbildung 1). So erhält man bei geringer Turbulenz (stabile Schichtung) nur eine geringe Auffächerung der Fahne, während bei hoher Turbulenz (labile Schichtung) eine starke Auffächerung zu beobachten ist. Die Haupttypen sind mit den 6 Klassen relativ gut repräsentiert.

Für die Bestimmung der Diffusionskategorie können alle die meteorologischen Größen und Parameter herangezogen werden, die die Turbulenz der atmosphärischen Schichtung und damit die Verdünnungseffektivität der Atmosphäre bei den einzelnen Wetterlagen beschreiben. Besonders geeignet sind dafür die Messungen, mit denen man die horizontale und vertikale Turbulenz direkt erfassen kann. Diese Messungen sind jedoch technisch aufwendig und zeitraubend. Deshalb ermittelt man unter Inkaufnahme geringerer Vorhersagegenauigkeit die Diffusionskategorie aus leicht zugänglichen meteorologischen Daten. Hierzu gehören Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes, bei denen neben der bodennahen Windgeschwindigkeit auch die Bewölkung angegeben wird. Unter Berücksichtigung des Sonnenstandes läßt sich daraus die Stabilität der Schichtung ermitteln.

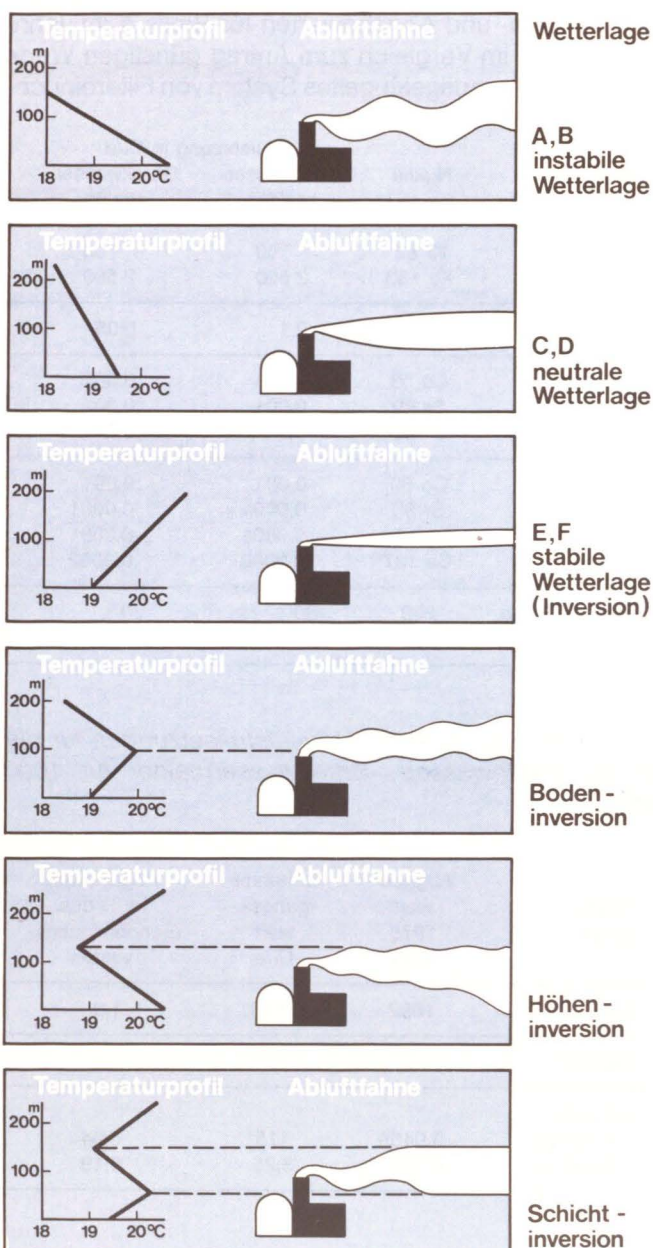


Abb. 1: Luftschichtungen und zugehörige Rauchfahnen

1.2.2 Mathematische Beschreibung der Ausbreitung von Schadstoffen

Man kann nun unter geeigneten Bedingungen mathematische Formeln angeben, mit deren Hilfe die Konzentrationsverteilung auf der dem Wind abgewandten Seite eines Abluftkamins für die weiteren Anwendungen hinreichend genau beschrieben werden kann, insbesondere für die später zu diskutierenden Langzeituntersuchungen. Die Konzentration der abgegebenen Stoffe in der Abluffahne ist eindeutig bestimmt durch die Menge der abgegebenen Schadstoffe in der Zeiteinheit (Quellstärke, gemessen in Bq/s oder g/s), die mittlere Windgeschwindigkeit, die Höhe des Abluftkamins (Emissionshöhe) und die Werte für horizontale und vertikale Ausbreitung der Schadstoffe in der Abluffahne (Ausbreitungsparameter, Diffusionskonstanten).

Quellstärke sowie die Emissionshöhe sind für die Anlage charakteristisch. Ausbreitungsparameter und Windgeschwindigkeit werden durch die meteorologischen Verhältnisse festgelegt.

Ein Hauptproblem der Ausbreitungsrechnung ist die Bereitstellung geeigneter Zahlenwerte für die Ausbreitungsparameter in den jeweiligen Diffusionskategorien. Diese Parameter sollten sowohl die mechanische als auch die durch Wärmeströmung erzeugte Turbulenz hinreichend genau beschreiben. Zu ihrer Bestimmung sind Ausbreitungsexperimente in möglichst großer Zahl an möglichst vielen Stellen notwendig. Da die vor 1970

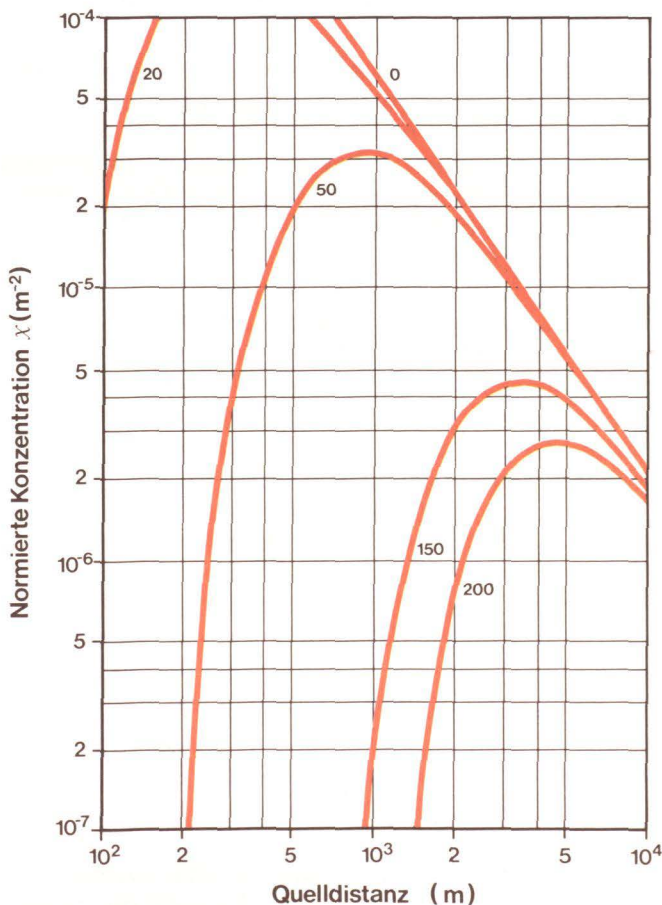
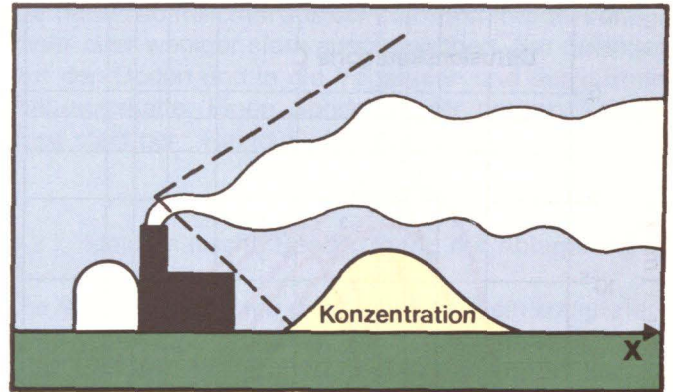
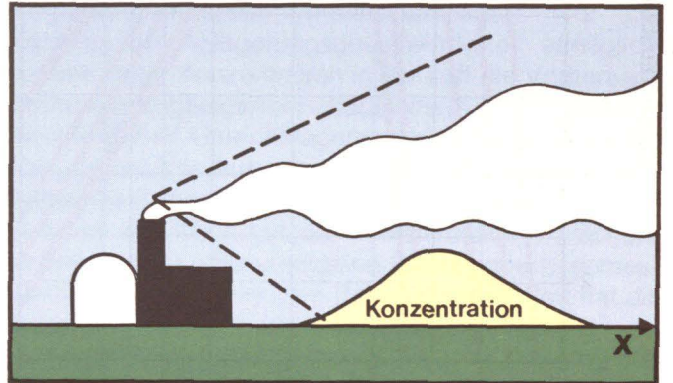


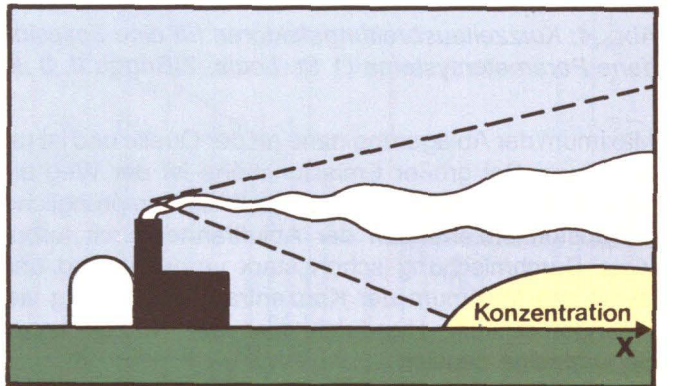
Abb. 2: Schnitt durch die Konzentrationsverteilung längs der Hauptausbreitungsrichtung für verschiedene Emissionshöhen (m) für die Diffusionskategorie E



starke Turbulenz (instabil)



mittlere Turbulenz (neutral)



schwache Turbulenz (stabil)

Abb. 3: Abhängigkeit der Lage des Ablagerungsmaximums von der Wetterkategorie

verwendeten Werte aus der Literatur in der Regel die wirklichen Verhältnisse nur unzureichend wiedergeben, wurden seit dem Jahre 1970 von der Zentralabteilung Strahlenschutz in der KFA Feldexperimente mit markierten Abluffahnen durchgeführt, um für die Anwendung über Gelände mit mittlerer bis höherer Rauigkeit geeignete Ausbreitungsparametersätze zu ermitteln.

1.2.3 Experimentelle Ergebnisse

Einige wichtige Ergebnisse der Ausbreitungsversuche lassen sich anhand der Abbildungen 2-4 erläutern, in denen die Konzentration der atmosphärischen Schadstoffe in der bodennahen Luft unter der Abluffahne dargestellt ist. Bei konstanter Wettersituation läßt sich der Einfluß unterschiedlicher Emissionshöhen (H) erkennen (Abbildung 2.). Bei geringer Emissionshöhe liegt das

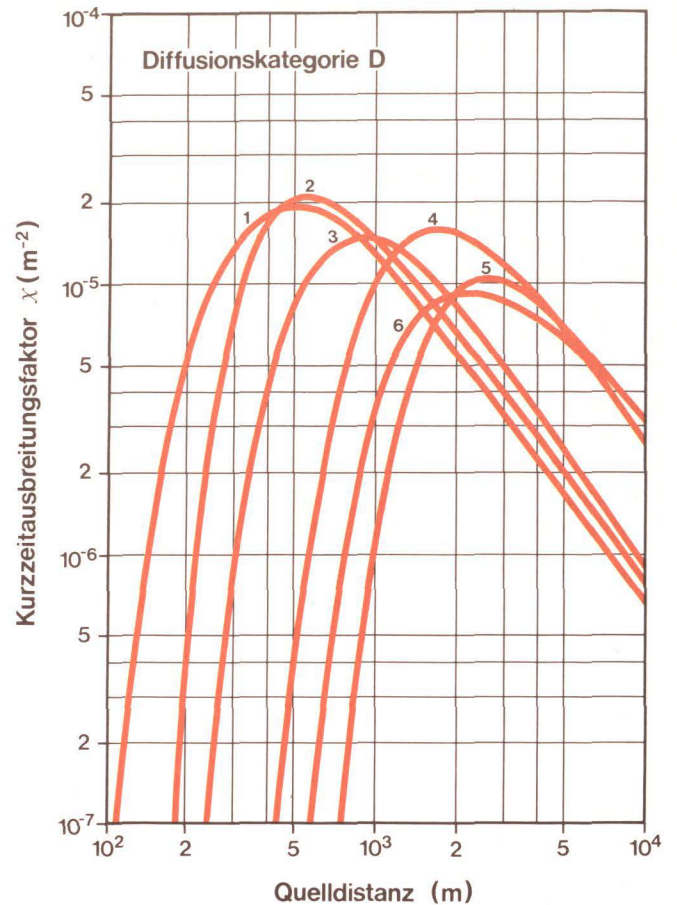
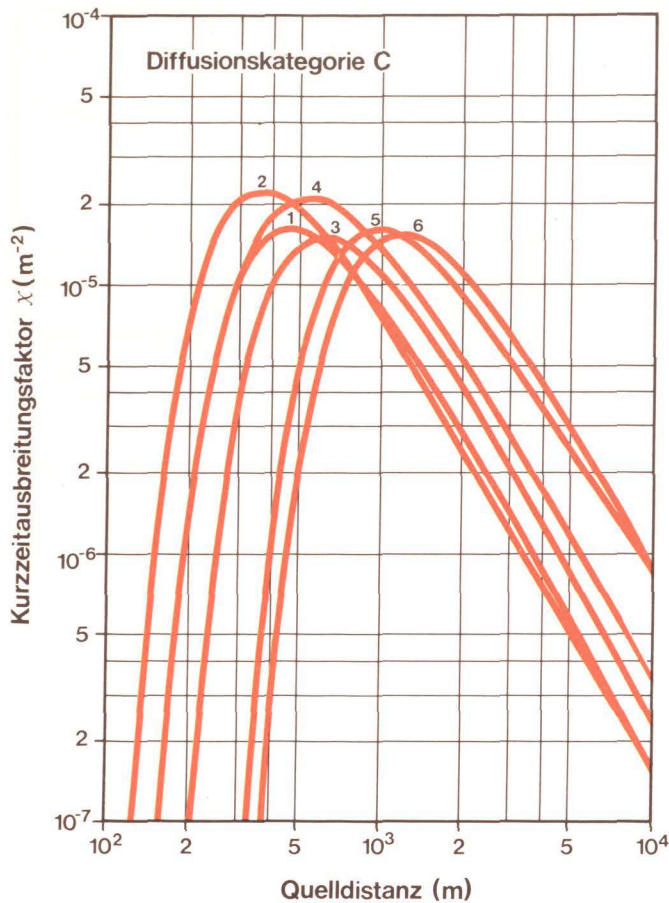


Abb. 4: Kurzzeitausbreitungsfaktoren für eine Emissionshöhe von 100 m als Funktion der Quelldistanz für verschiedene Parametersysteme (1 St. Louis, 2 Briggs II, 3 Jülich 100 m-Kamin, 4 Brookhaven, 5 Briggs I, 6 Pasquill)

Maximum der Ablagerung nahe an der Quelle und ist relativ hoch. Bei großer Emissionshöhe ist der Weg bis zum Boden bereits so groß, daß die ursprüngliche Schadstoffkonzentration der Abluffahne durch turbulente Durchmischung schon stark verdünnt wird und damit das Maximum der Konzentrationsverteilung viel niedriger ausfällt. Hierdurch wird der Nutzen hoher Schornsteine deutlich.

Bei fester Emissionshöhe zeigt sich der Einfluß der Wetersituation (Diffusionskategorie) auf die Ausbreitungsverhältnisse (Abbildung 3). Die Diffusionskategorie A liefert Maxima in geringer Entfernung von der Quelle, die Kurve der Konzentrationsverteilung fällt dann aber am stärksten mit zunehmender Entfernung zu kleineren Konzentrationen hin ab. Die Kategorie F hat ein niedrigeres Maximum in bedeutend größerer Entfernung, dabei aber auch den schwächsten Abfall der Konzentration mit wachsender Entfernung, so daß unter ihrem Einfluß auch in größerer Distanz von der Quelle noch relativ hohe Konzentrationen auftreten.

Unterschiedliche Strukturen der Erdoberfläche (Bebauung, Bewuchs) führen, wie schon erwähnt, ebenfalls zu unterschiedlichen Ausbreitungsverhältnissen. Während die früher meist benutzten Ausbreitungsparameter nach Pasquill auf Meßergebnissen über flachem Präriegelände basieren, sind die Jülicher Werte über einem Gelände mit Waldbestand und aufgelockerter Bebauung gewonnen worden (Abbildung 4). Sie werden in den vom Bundesminister des Inneren herausgegebenen Berechnungsgrundlagen verwendet.

1.2.4 Anwendung der Ausbreitungsrechnung: Kurzzeit- und Langzeitausbreitungsfaktoren

Mit den theoretischen und experimentellen Ergebnissen ist man nun in der Lage, Aussagen über die Konzentrationsverteilung in der Umgebung eines Emittenten sowohl für kurzzeitige Emissionen von wenigen Stunden Dauer als auch für Langzeitmittelwerte zu machen. Hierzu werden Kurzzeit- und Langzeitausbreitungsfaktoren definiert. Der erste gibt aktuelle Werte für eine bestimmte Wetterlage, während der Langzeitausbreitungsfaktor Aussagen über Jahresmittelwerte liefert. Die Fehler, die man bei der Bestimmung der Konzentrationsverteilung macht, sind für Kurzzeit- und Langzeitfaktoren unterschiedlich. Für die Kurzzeitfaktoren muß man in der Nähe des Maximums mit einem mittleren Fehler von 40 % rechnen, wobei im Einzelfall höhere Abweichungen möglich sind. Die Mittelwertbildung beim Langzeitausbreitungsfaktor führt dagegen zu erheblich sichereren Prognosen. Vergleiche mit Immissionsmessungen zeigen mittlere Abweichungen von maximal 20 %.

1.2.5 Atmosphärische Ablagerungen (Abbildung 5)

Für die Berechnung der Ablagerung unterscheidet man zwei Gruppen von Schadstoffen: Aerosole und Gase.

Aerosole sind kleine feste Teilchen oder Tröpfchen, die durch die Turbulenz an Vegetation und Bodenhindernissen abgelagert werden können. Sie lagern sich dabei in

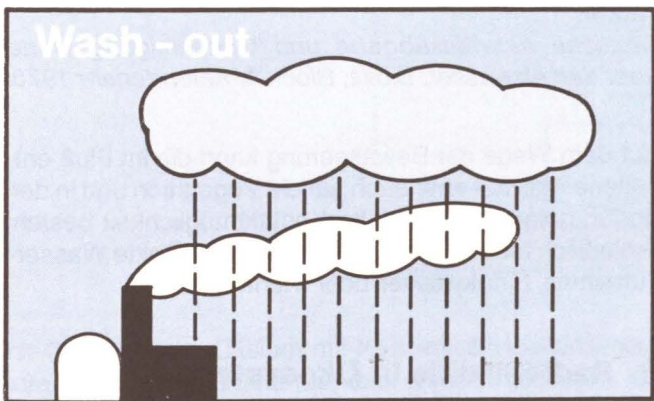
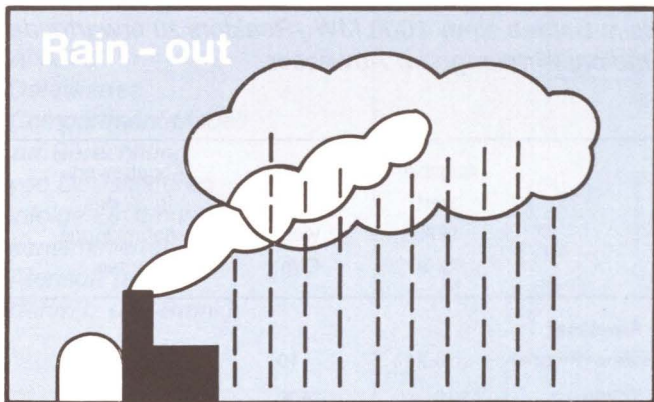
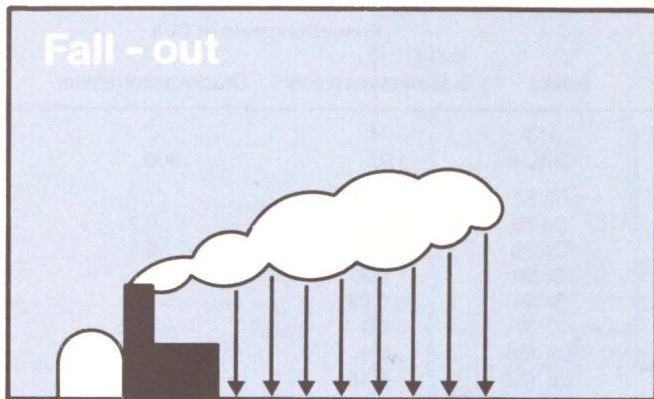


Abb. 5: Möglichkeiten der Ablagerung radioaktiver Stoffe aus der Abluftfahne

der Regel nur auf der Oberfläche der Vegetation ab und können von dort durch Niederschläge zu einem großen Teil wieder abgewaschen werden, besonders wenn die Blätter der Pflanzen mit einer natürlichen Wachsschicht bedeckt sind. Größere Partikel fallen aufgrund ihres Gewichtes auf den Boden.

Bei den Gasen müssen wir zwischen Edelgasen und reaktionsfähigen Gasen unterscheiden. Edelgase besitzen wie die Aerosole eine schlechte Haftfähigkeit auf Pflanzen. Reaktionsfähige Gase können dagegen an der Blattoberfläche festgehalten werden. Durch biochemische Reaktionen kann diese Haftung zum Teil noch erheblich verstärkt werden.

Neben der trockenen Ablagerung (Fallout) spielt die nasse Ablagerung (Washout) für einzelne Radionuklide, wie Tritium, eine wichtige Rolle. Beim Washout werden

die Schadstoffteilchen aus der Luft durch Niederschläge mehr oder weniger stark ausgewaschen. Sie gelangen auf den Boden und in die Vegetation und damit in die Nahrungskette. Einen Sonderfall der nassen Ablagerung stellt der „Rainout“ dar (Abbildung 5).

1.2.6 Mathematische Beschreibung der Ablagerung

Die Ablagerung, ist wie die Ausbreitung, ein komplizierter physikalischer Vorgang. Um zu einigermaßen handhabbaren und mit nicht zu großen Fehlern behafteten Aussagen zu kommen, müssen die Modelle stark vereinfacht werden. Hierzu führt man den Begriff der „Ablagerungsgeschwindigkeit“ (Falloutkonstante) ein. Die Kenntnis der Ablagerungsgeschwindigkeit ermöglicht bei bekannter Konzentration in der Luft die Vorhersage der Menge abgelagerter Schadstoffe (Kontamination) je Flächeneinheit. Unter Ablagerungsgeschwindigkeit oder Falloutkonstante darf man nicht etwa die Sinkgeschwindigkeit der Schadstoffe verstehen. Es handelt sich vielmehr um das Verhältnis der Kontamination je Flächeneinheit zu der Luftkonzentration (zeitintegriert), gemessen in 1 m Höhe über dem Boden. Dieser Wert hat die Dimension m/s, also die einer Geschwindigkeit.

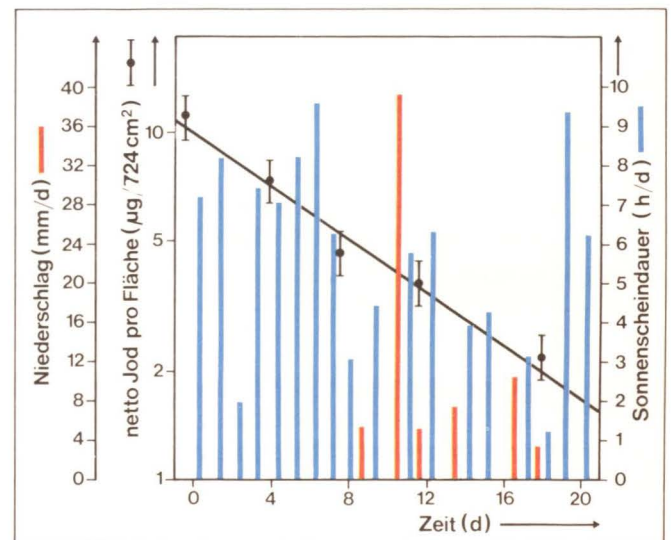


Abb. 6: Biologische Halbwertszeit von Jod auf Gras. Der Jodgehalt des Grases wird in 4-8 Tagen auf die Hälfte abgebaut. Sonnenschein und Regen beeinflussen diesen Prozeß nicht.

Das Modell für den Washout ist in Anlehnung an das für den Fallout entwickelt worden. Die Washoutkonstante ist allerdings experimentell weitaus schwerer zu bestimmen als die Falloutkonstante. Da fast alle Experimente unter nicht realen Bedingungen durchgeführt wurden, muß mit erheblichen Fehlern von einigen 100 % gerechnet werden. Je nach Niederschlagshäufigkeit und Intensität ist deshalb eine beträchtliche Unter- oder Überschätzung der Menge ausgewaschener Schadstoffe möglich.

Als Beispiel für die trockene Ablagerung wurden in der KFA Jülich die Ablagerung und das Verweilen von ele-

mentarem Jod auf Gras und Klee untersucht. Die Ablagerung von Jod auf der Vegetation hängt hauptsächlich von drei Parametern ab:

1. Von der Trockenmasse der Vegetation pro Flächeneinheit, die ein Maß für die zur Ablagerung zur Verfügung stehende Oberfläche ist,
2. von einem Parameter, der die Absorption und die biochemische Bindung des elementaren Jods durch die Vegetation erfaßt und
3. von einem meteorologischen Parameter, der den Transport aus der Abluffahne zur Vegetation beschreibt.

Die Ablagerung wird stark durch meteorologische Größen beeinflusst. Deshalb wurden auf dem Versuchsfeld in verschiedenen Höhen die Windgeschwindigkeit und am meteorologischen Turm weitere Daten gemessen.

Um das Verweilen von Jod auf Gras und Klee zu studieren, wurden von einer kontaminierten Fläche in Zeitabständen von einigen Tagen Proben entnommen. Eine solche Meßreihe ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Meßreihen zeigen, daß der Jodgehalt des Grases wie auch des Klees in 4 bis 8 Tagen zur Hälfte abgebaut war. Im Gegensatz dazu zeigen Messungen, bei denen das Gras nach der Kontamination abgeschnitten wurde, keine Abnahme des Jodgehaltes der Vegetation. Da, wie aus Abbildung 6 zu ersehen ist, die Geschwindigkeit, mit der die Kontamination abnimmt, nicht durch Sonnenschein oder Regen beeinflusst wird, kann man folgern, daß die Jodabnahme nicht durch äußere meteorologische Einflüsse bewirkt wird, sondern daß sie mit den Vorgängen in der lebenden Pflanze zusammenhängt, z.B. mit dem Stoffwechsel oder dem Gasaustausch. Dieses Ergebnis erlaubt die Definition der „biologischen Verweilkonstante“.

1.3 Flüssige radioaktive Ableitungen

Auch mit dem Abwasser gibt eine kerntechnische Anlage Radioaktivität an die Umwelt ab, dabei spielen teilweise andere Nuklide als bei der Abluft eine wichtige Rolle.

Typische Erwartungswerte für zwei verschiedene Reaktortypen von 1000 MW_e zeigt Tabelle 3, in Tabelle 4 ist wieder ein Vergleich zwischen Genehmigungs- und Abgabewerten für Biblis A im Jahre 1975 dargestellt.

Grundsätzlich gelten für die Ausbreitungsvorgänge in Fließgewässern die gleichen Überlegungen wie für die atmosphärische Ausbreitung. Die mathematische Berechnung wird jedoch durch die enge Begrenzung der Strömung im Flußbett und die Krümmung des Flußlaufs sehr erschwert. Die für die Verdünnung der Einleitung wichtigsten Parameter sind Wasserführung, Fließgeschwindigkeit und Sedimentationsvorgänge.

Die eingeleitete Aktivität kann entweder im Fluß selbst abgelagert werden (Sedimentation) und führt damit zu einer äußeren Strahlenbelastung bei Personen, die sich im Sediment aufhalten (z.B. Angler) oder die auf Booten den Fluß befahren.

Nuklid	Freisetzungsrate in Ci/a	
	Siedewasserreaktor	Druckwasserreaktor
H3 Tritium	150	900
Fe 55	0,03	
Co 58	0,02	0,2
Co 60	0,15	0,1
Sr 89	0,3	
Sr 90	0,03	
J 131	0,1	0,15
Cs 134	0,1	0,1
Cs 137	0,15	0,2

Tab. 3:
Beim Betrieb eines 1000 MW_e-Reaktors zu erwartende Radionuklidmenge im Abwasser.

	Abgabewert 1975 Ci/a	Genehmigungswert Ci/a	Abgabewert in % des Genehmigungswertes
Abwasser ohne Tritium	0,74	10	7,4
Tritium	110	1600	6,9

Tab. 4:
Jährliche Aktivitätsabgabe und Genehmigungswerte über das Abwasser; Biblis, Block A, Kalenderjahr 1975.

Auf dem Wege der Bewässerung kann die im Fluß enthaltene Aktivität aber auch auf die Vegetation und in den Boden gelangen. Die dritte Kontaktmöglichkeit besteht schließlich für Mensch und Tier über die direkte Wasseraufnahme (Trinkwasser oder Viehtränke).

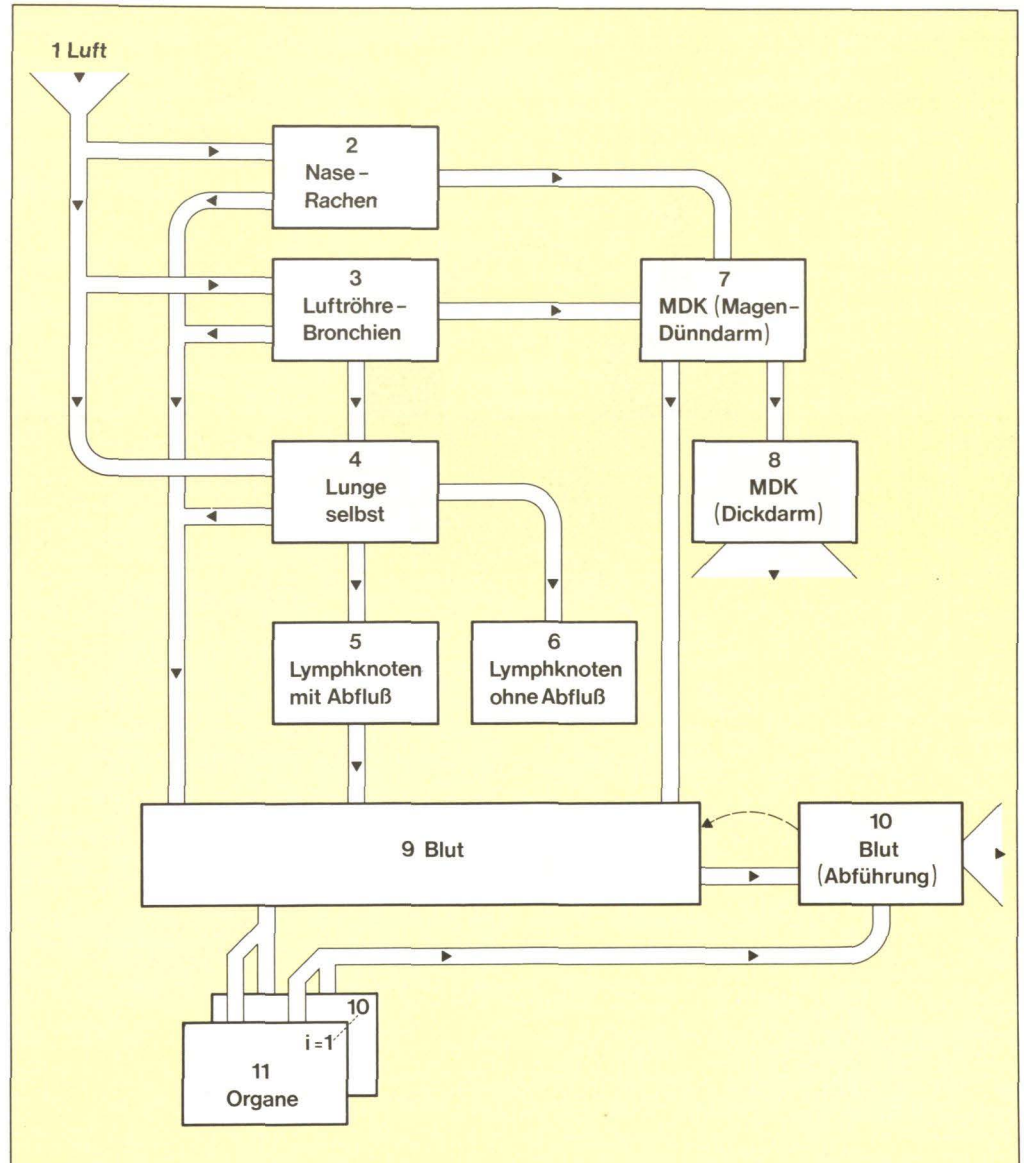
2. Radionuklide in Ökosystemen

2.1 Das Verhalten im lebendigen Organismus

Der Begriff Ökosystem beschreibt eine Lebensgemeinschaft mit allen das Zusammenleben beeinflussenden Faktoren wie Bodenbeschaffenheit, Pflanzengesellschaft, Tiergesellschaft, Klima usw.. Damit ist nicht gesagt, daß ein gesundes Ökosystem eine Urlandschaft sein muß. Auch eine vom Menschen geschaffene Kulturlandschaft kann durchaus im „ökologischen Gleichgewicht“, also „ökologisch gesund“ sein.

Der Eintritt der Radionuklide in Ökosysteme erfolgt über Abluft und Abwasser. Ihr Verhalten in den Organismen selbst ist sehr unterschiedlich und auf der einen Seite von der chemischen Form abhängig, auf der anderen Seite aber auch von chemischen Prozessen in der lebenden Zelle selbst. Von besonderer Bedeutung sind naturgemäß Isotope von Elementen, die entweder selbst im Stoffwechsel eine wichtige Rolle spielen (z.B. Tritium, Kohlenstoff-14, Jodisotope) oder wegen chemischer Ähnlichkeit mit für den Organismus wichtigen Elementen mit diesen in Konkurrenz treten können (z.B. Strontium

Abb. 7:
 Detailliertes
 Compartment-Modell
 zur Berechnung
 von Dosisfaktoren
 infolge Einatmung
 kontaminierter
 Atemluft (aus
 Nehmitz und Brenk)



mit Calcium oder Cäsium mit Kalium). Anreicherungen kommen dadurch zustande, daß die lebende Zelle für alle benötigten Elemente aktive Transportsysteme besitzt, die es ihr ermöglichen, diese lebensnotwendigen Stoffe auch entgegen einem Konzentrationsgefälle aufzunehmen und in der Zelle anzureichern. Dabei kann der Anreicherungsfaktor beachtliche Größenordnungen (zwischen 1 und 100000) erreichen. In gleicher Weise werden nicht benötigte Stoffe ausgeschieden. In einigen Fällen erfolgen auf diese Weise auch für den Organismus sinnlose Anreicherungen in bestimmten Organen (z.B. Plutonium in Lymphknoten). Aufgrund räumlicher Ähnlichkeit und gleicher elektrischer Ladung können nämlich bei diesen Transportvorgängen auch für die Zelle vollkommen unwichtige, unter Umständen sogar giftige Elemente in die Zelle „einreisen“ und sich dort anreichern. Die aktive Stoffaufnahme ist bei den einzelnen Organen je nach ihrer Funktion sehr unterschiedlich, so reichert z.B. die Schilddrüse selektiv Jod an, die Knochen enthalten große Mengen an Calcium. Es gibt für sehr viele Elemente und damit natürlich auch für deren radioaktive Isotope solche „kritischen Organe“, in denen sie besonders hohe Konzentrationen erreichen können. Die Verteilung eines aufgenommenen Radionuklids im

Organismus wird durch Compartment-Modelle beschrieben, in denen die möglichen Wege des betreffenden Elements, die Bruchteile der Gesamtmenge, die auf diesen Wegen verlagert werden und die Anreicherung in bestimmten Organen berücksichtigt und damit auch berechnet werden können. Ein Beispiel für ein Compartment-Modell ist für den Inhalationsweg in Abbildung 7 dargestellt. Über den Pfeilen sind die für das betrachtete Isotop charakteristischen Bruchteile der Gesamtmenge, in den Organkästchen die Anreicherungsfaktoren einzusetzen. Ähnliche Modelle lassen sich für alle anderen Aufnahmewege (z.B. Aufnahme mit der Nahrung) erstellen. Die Höhe der Anreicherung ist von einer wichtigen Größe, der effektiven Halbwertszeit des betrachteten Radionuklids in einem bestimmten Organ, abhängig. Sie wird auf folgendem Wege ermittelt:

Die physikalische Halbwertszeit gibt an, nach welcher Zeit von einer gegebenen Menge eines radioaktiven Isotopes noch genau die Hälfte vorhanden ist; ihren Kehrwert nennt man physikalische Zerfallskonstante λ_p . Unter biologischer Halbwertszeit versteht man den Zeitraum, nach dem von einer einmaligen Gabe eines bestimmten Stoffes oder eines stabilen Elements durch Stoffwechselprozesse die Hälfte wieder aus dem Körper ausge-

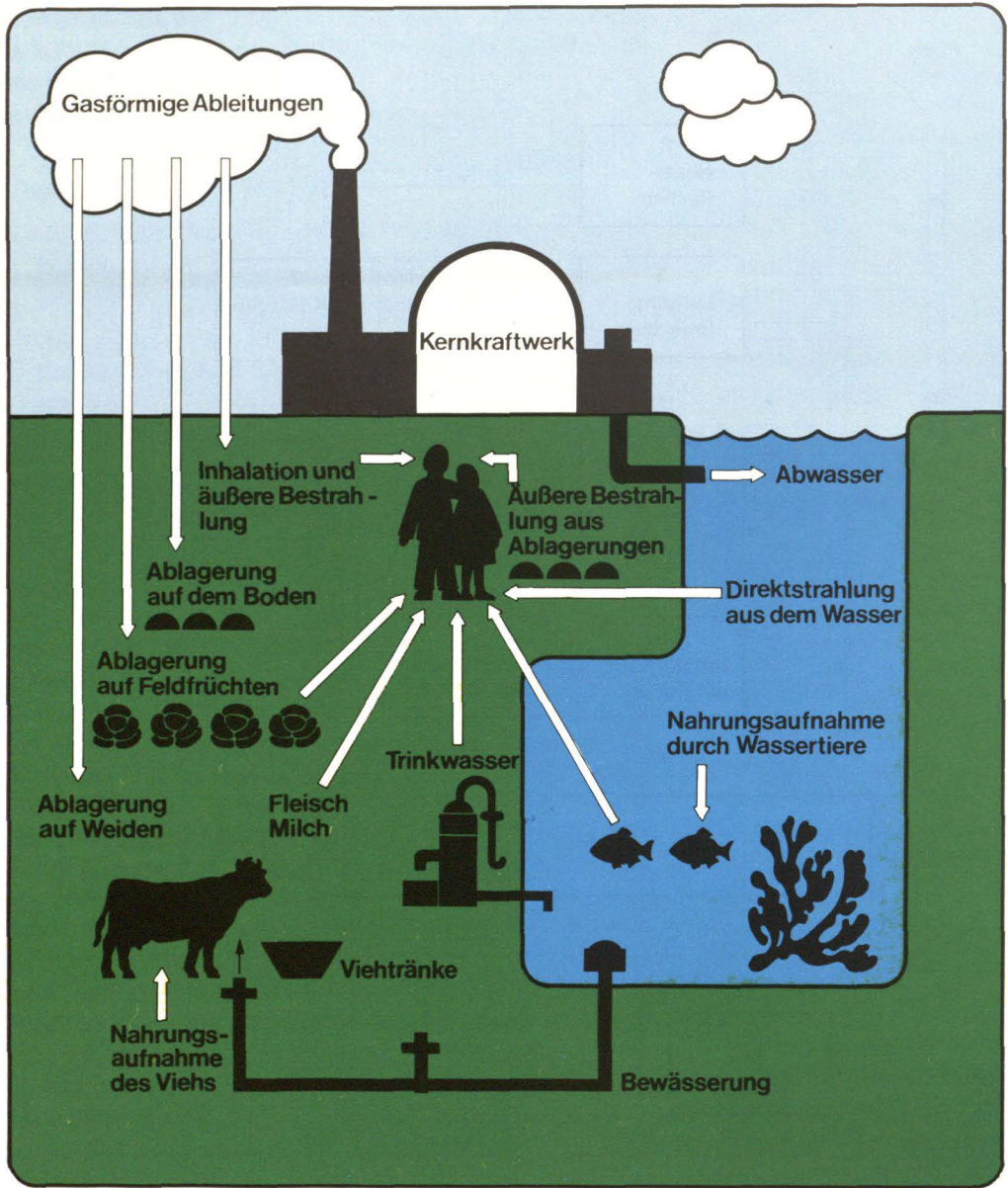


Abb. 8: Die Möglichkeiten der Einwirkung radioaktiver Emissionen auf den Menschen

schieden ist. Ihren Kehrwert nennt man biologische Verweilkonstante λ_{bi} . Sie ist stark von Temperatur und Stoffwechselaktivität abhängig und kann daher von Organ zu Organ sehr unterschiedlich sein. Die Summe von λ_p und λ_{bi} ergibt die effektive Verweilkonstante in dem betreffenden Organ, λ_{eff} , ihr Kehrwert ist die „effektive Halbwertszeit“*

* Genaue Definition $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,69}{t_{1/2}}$ also: $t_{1/2\text{ eff}} = \frac{0,69}{\lambda_{eff}}$

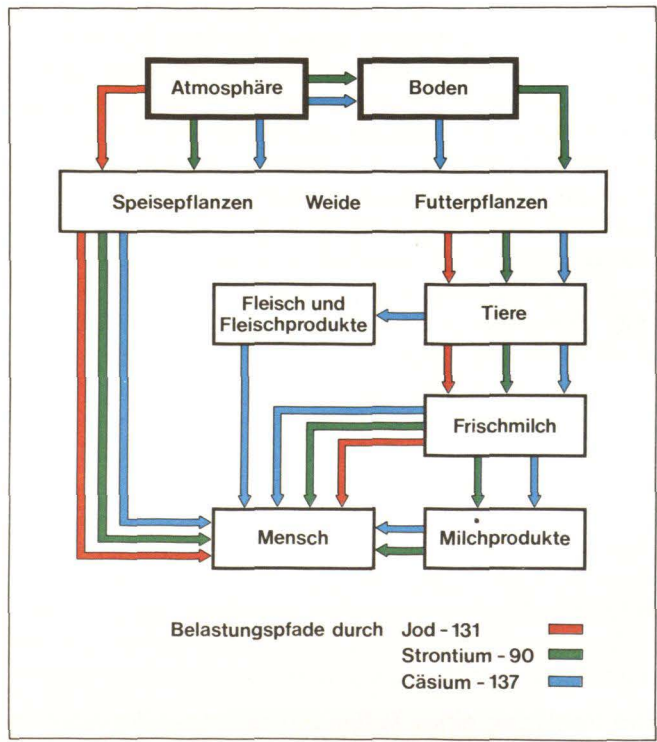


Abb. 9: Übersicht über die kritischen Pfade

2.2 Die möglichen Wege der Strahlenbelastung für den Menschen (Abbildung 8)

Externe Bestrahlung

Die durch den Kamin entweichende Abluft und das Abwasser stellen „Strahlenquellen“ dar und führen zu einer äußeren Bestrahlung. Die β -Strahlen besitzen nur eine geringe Eindringtiefe und belasten vornehmlich die Haut, die γ -Strahlen führen zu einer Ganzkörperbelastung. Ein Sonderfall ist die äußere Kontamination, die Ablagerung radioaktiver Stoffe auf der Körperoberfläche.

Inhalation und Ingestion

Als Inhalation bezeichnet man die Aufnahme von gasförmigen Stoffen oder Aerosolen über die Atemwege. Dabei kann es zu einer Inkorporation kommen, einer Aufnahme der eingeatmeten Stoffe in den Körper selbst und der bereits vorher beschriebenen Verlagerung in einzelne Organe. Auch bereits auf dem Boden abgelagerte Feststoffteilchen können nach Aufwirbelung durch Inhalation in den Körper gelangen.

Bei der Ingestion erfolgt die Aufnahme der Radionuklide über den Magen-Darm-Trakt mit der Nahrung. Wie im Falle der Inhalation erfolgt also eine Inkorporation der Radionuklide mit anschließender Verlagerung im Körper. In beiden Fällen erfolgt die Strahlenbelastung von innen her.

2.3 Der Begriff der Nahrungskette

Wie bereits erwähnt, kommt es im lebenden Organismus zu Anreicherungsvorgängen. Diese Anreicherung kann umso stärker werden, je mehr Zwischenschritte eingeschaltet sind. Am Anfang der Nahrungskette stehen immer die Produzenten, also die Pflanzen. In ihnen findet der erste Anreicherungsschritt statt. Sie dienen dem Menschen entweder selbst als Nahrung, oder sie werden von „Konsumenten 1. Ordnung“ gefressen. Dieser Konsument 1. Ordnung kann nun seinerseits von einem Konsumenten 2. Ordnung gefressen werden, z.B. ein Kleinkrebs oder ein kleiner Fisch von einem Raubfisch. Am Ende einer solchen Kette von Räuber-Beute-Beziehungen steht der Mensch. Die Anreicherungsvorgänge in den einzelnen Gliedern der Nahrungskette können bedeutungslos sein, wenn sie Organe betreffen, die der Mensch üblicherweise nicht verzehrt, z.B. Knochen, und auf der anderen Seite große Wichtigkeit erlangen, wenn sie in pflanzlichen oder tierischen Produkten stattfinden, die der Mensch zu seiner Ernährung in großem Maße verwendet, z.B. Muskelfleisch. Aufgrund dieser Tatsache kann man einige wichtige Belastungspfade formulieren, auf denen der weitaus überwiegende Teil der Radioaktivität zum Menschen gelangt.

2.4 Die wichtigsten Pfade für Ingestionsbelastung

Die wichtigsten Belastungspfade für Jod, Cäsium und Strontium sind in Abbildung 9 dargestellt.

Der Weide-Kuh-Milch-Pfad.

Dieser Pfad ist, besonders für Kleinkinder wegen ihres

hohen Milchverbrauchs, einer der wichtigsten Belastungspfade für den Menschen. Die von der weidenden Kuh mit dem kontaminierten Futter aufgenommene Aktivität gelangt zu einem bestimmten Prozentsatz in die Milch und von dort aus weiter zum Menschen. Da Milch zu einem großen Teil in frischem Zustand verwendet wird, sind über diesen Belastungspfad auch relativ kurzlebige Radionuklide von Bedeutung. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch noch ein erheblicher Konzentrationsfaktor in der Milch. In der Tagesmilchmenge finden sich je nach Nuklid zwischen 1 % und 15 % der gesamten täglich aufgenommenen Aktivität wieder, bei einem Verhältnis von ca. 10 kg Milch zum Körpergewicht der Kuh eine beachtliche Menge.

Der Pflanze-Mensch-Pfad

Der Genuß kontaminierter pflanzlicher Produkte führt zu einer weiteren Belastungsmöglichkeit. Für diesen Belastungspfad ist die direkte Ablagerung auf die Pflanzen aus der Luft oder künstliche Beregnung mit Flußwasser von hauptsächlichlicher Bedeutung.

Der Futter-Fleisch (Fisch)-Mensch-Pfad

Auf diesem Belastungspfad kann es zu mehreren aufeinander folgenden Anreicherungsvorgängen kommen, entsprechend müssen auf diesem Weg alle Radionuklide als kritisch bezeichnet werden, die sich im Fleisch oder anderen üblicherweise vom Menschen verzehrten Organen, z.B. in der Leber, anreichern.

2.5 Faktoren, die die Wanderung der Radionuklide beeinflussen

Bei einer gegebenen Aktivitätskonzentration an einer bestimmten Stelle im Ökosystem kann die Verlagerung der Radionuklide nicht durch einen konstanten Wert beschrieben werden, sondern sie ist von einer ganzen Reihe von Faktoren abhängig, von denen hier nur einige erwähnt werden sollen: Die Aufnahme der auf dem Boden abgelagerten Radioaktivität durch die Pflanzen ist abhängig von Pflanzenart, Alter der Pflanze, Bodenart, Bodenstruktur, Feuchtigkeit, Temperatur, Nährstoffgehalt und Nährstoffzusammensetzung. Bei guter Calcium-Versorgung ist die Aufnahme des konkurrierenden Strontiums z.B. erheblich geringer. In ähnlicher Weise ist auch die Verlagerung im tierischen und menschlichen Organismus stark abhängig von Art, Alter, Ernährungszustand, Vitaminversorgung, Spurenelementversorgung, Klima und vielen anderen Faktoren. Die Aufnahme von radioaktivem Jod kann z.B. stark herabgesetzt werden durch gute Versorgung mit inaktivem Jod, der Einbau von Strontium in den Knochen kann durch gute Calcium-Versorgung weitgehend verhindert werden.

2.6 Der Transferfaktor – Produkt aus ökologischen Gegebenheiten und der Physiologie des Organismus

Der Übergang eines Radionuklids vom Boden in die Pflanze, von der Pflanze ins Tier und vom Tier oder Tierprodukt in den Menschen läßt sich nicht ohne Schwierig-

keit vorraussagen und berechnen. Die diese Übergänge beschreibenden Faktoren werden Transferfaktoren genannt, die folgendermaßen definiert sind:

Transferfaktor Futter-Milch: Aktivität je Liter Milch bezogen auf die Aktivität einer Tagesration Futter.

Transferfaktor Futter-Fleisch: Aktivität je Kilogramm Muskelfleisch oder anderes Organ bezogen auf Aktivität einer Tagesration Futter.

Transferfaktor Boden-Pflanze: Aktivität je Kilogramm frische Pflanzenmasse bezogen auf Aktivität je kg trockener Boden in Pflugschartiefe (25 cm).

Die Transferfaktoren Futter-Fleisch und Futter-Milch sind noch verhältnismäßig gut standardisierbar, da man allein schon aus wirtschaftlichen Überlegungen für einen guten Ernährungs- und Gesundheitszustand des Viehs sorgt, und damit die wichtigsten, im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnten Parameter in einem einigermaßen konstanten Bereich liegen.

Die größten Schwierigkeiten ergeben sich bei der Ermittlung des Transferfaktors Boden-Pflanze. Es ist ohne weiteres klar, daß es „den“ Transferfaktor Boden-Pflanze für ein bestimmtes Nuklid nicht gibt und auch nicht geben kann, man muß mit einer ganzen Schar solcher Faktoren für die wichtigsten Pflanzen- und Bodenarten rechnen. Die Fülle von Transferfaktoren, die der Literatur zu entnehmen ist, ist wegen unterschiedlicher Versuchsparameter nur schwer vergleichbar. Fast alle dort vorkommenden Transferfaktoren beziehen sich auf eine einmal dem Boden zugesetzte Aktivität, auf Versuche in kleinen Gefäßen und vor allem eine Ernte, die häufig nicht in dem Stadium erfolgte, in dem die Pflanze real verbraucht wird. Im Gegensatz dazu wird bei der Berechnung nach den vom Bundesminister des Inneren herausgegebenen Berechnungsgrundlagen für radioökologische Gutachten nach folgendem Prinzip verfahren:

Es wird postuliert

- daß das Kernkraftwerk die genehmigten Aktivitätswerte abgibt,
- daß sich ein Mensch während der gesamten Reaktorbetriebszeit von 50 Jahren an dem Punkt größtmöglicher Aktivitätskonzentration („ungünstigste Einwirkungsstelle“, „maximaler Aufpunkt“) aufhält und ausserdem
- seine gesamte pflanzliche und tierische Nahrung von diesem Punkt bezieht, wobei angenommen wird, daß auch die Tiere ihr Futter nur von dieser Stelle beziehen.

Solche Forderungen bezeichnet man als konservativ, weil sie vom ungünstigsten denkbaren Fall ausgehen. Es wird weiterhin angenommen, daß die gesamte Aktivitätsablagerung von 50 Jahren Betrieb den Boden erreicht und dort verbleibt. Diese Annahme führt jedoch dann zu unrealistischen Überschätzungen, wenn man hohe Transferfaktoren verwendet. Bei einem Transferfaktor von z.B. 15 würden allein infolge der Anreicherung durch die Pflanze in den vorausgegangenen 49 Jahren bei einem Ertrag von 4 kg/m² nach 50 Jahren nur knapp

7 % der theoretisch auf den Boden gebrachten Aktivität wirklich noch vorhanden sein können.

Es ist nun die Frage, welcher Transferfaktor aus der Vielzahl der in der Literatur veröffentlichten Werte in einer solchen Berechnung zu verwenden ist. Die Berechnung als Ganzes soll konservativ sein, das bedeutet jedoch nicht, daß dazu auch alle in die Rechnung einfließenden Werte für sich konservativ sein müssen. Es leuchtet ein, daß die Verwendung jeweils der ungünstigsten Werte gerade bei Faktoren mit sehr großer Schwankungsbreite, wie bei dem Transferfaktor der Fall, zu Überschätzungen der Strahlenbelastung führen muß. In den Berechnungsgrundlagen hat man diese Tatsache berücksichtigt und Transferfaktoren festgeschrieben, die nicht konservativ sind, sondern eher realistischen Mittelwerten entsprechen. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß mit Hilfe dieser festgeschriebenen Transferfaktoren aus bekannten Bodenaktivitäten errechnete Radionuklidgehalte in Pflanzen und Tieren eine recht gute Übereinstimmung mit der Wirklichkeit hatten. Durch die übrigen vorher erwähnten konservativen Annahmen des Rechenmodells bleibt auch das Gesamtergebnis konservativ und erfüllt damit die Anforderungen.

2.7 Von der Aktivität zur Organdosis

Mit Hilfe von Compartment-Modellen und den Aktivitätswerten aus der Nahrung läßt sich der maximale Aktivitätsgehalt eines Organs errechnen. Da Zerfallsenergie und Zerfallsart der Radioisotope bekannt sind, kann man auch die pro Gewichtseinheit des Organs aufgenommene Zerfallsenergie, die Energiedosis berechnen. Die Maßeinheit ist das Gray (Gy): 1 Gy = 1J/kg. Alte Einheit ist das Rad (rd): 1 Gy = 100 rd.

Die biologischen Wirkungen im Organ hängen aber nicht nur von der absorbierten Energie ab, sondern auch von dem Weg, auf dem diese Energie absorbiert wird und damit von der Dichte, mit der die Schadensereignisse in der Zelle aufeinander folgen. Je kürzer die Abstände, desto größer ist bei gleicher absorbierter Energie der Schaden. Die einzelnen Strahlenarten haben daher eine unterschiedliche relative biologische Wirksamkeit. Bezieht man die Dosis nicht auf gleiche absorbierte Energie je Gewichtseinheit, sondern auf gleiche biologische Wirkung, so erhält man die Äquivalenzdosis, die mit einem „Qualitätsfaktor“ q die unterschiedliche biologische Wirkung berücksichtigt. Maßeinheit ist das Sievert (Sv): 1 Sv = $q \cdot 1$ J/kg. Es ist diejenige Dosis, die die gleiche biologische Wirksamkeit besitzt wie 1 Gy Röntgenstrahlung bei 200 kV Röhrenspannung. Alte Einheit ist das „rem“: 1 Sv = 100 rem.

Mit Hilfe von tabellierten „Dosisfaktoren“ kann der Aktivitätsgehalt eines Organs oder des ganzen Körpers direkt in die Äquivalenzdosis umgerechnet werden.

2.8 Das Konzept der Folgedosis

Bei der Festlegung von maximalen Emissionswerten muß sichergestellt werden, daß auch nach eventuell

über Jahrzehnte gehender Anreicherung von Radionukliden im kritischen Organ der Grenzwert nicht überschritten wird. Das führte zur Definition der „50-Jahre-Folgedosis“, d.h. der Dosis, die als maximale Folge 50 Jahre langer Emission in Höhe der Genehmigungswerte errechenbar ist. Berücksichtigt man die Anreicherungseffekte im Dosisfaktor mit, so erhält man die sogenannten „Dose-Commitment-Faktoren“ für das entsprechende Organ bzw. den Ganzkörper. Die Multiplikation dieses Faktors mit der maximal errechenbaren Jahresaufnahme eines Nuklids in den Körper führt direkt zur 50-Jahre-Folgedosis durch dieses Nuklid.

2.9 Die relevanten Nuklide und ihre kritischen Belastungspfade

Aus der Anreicherung und der daraus resultierenden Organdosis ergibt sich ein Maß für die Gefährlichkeit eines Radionuklids, das heißt für seine Radiotoxizität.

Die Radionuklide mit der höchsten Radiotoxizität sind α -Strahler, z.B. Polonium-210, die Radiumisotope Ra-226, Ra-228, Plutonium-239, Americium-241 und Curium-242. Wegen der hohen Qualitätsfaktoren für α -Strahlen ergibt sich schon für geringe Aktivitäten eine hohe Äquivalenzdosis.

Aufgrund von Radiotoxizität einerseits sowie Abgabemengen und Anreicherungseffekten in Nahrungsketten auf der anderen Seite ergibt sich die Tatsache, daß für die Strahlenbelastung des Menschen nur eine begrenzte Zahl von Radioisotopen von Bedeutung ist. Sie sind im Folgenden mit ihren wichtigsten radioökologischen Daten aufgeführt.

- Tritium (H-3) ist ein β -Strahler und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Seine radioökologische Bedeutung ergibt sich aus der Tatsache, daß es anstelle von normalem Wasserstoff in Wasser und organische Verbindungen eingebaut wird und damit bei allen Stoffwechselvorgängen eine Rolle spielt. Die wichtigsten Belastungspfade sind die Inhalation tritiumhaltiger Atemluft und die Ingestion von kontaminiertem Trinkwasser. Eine gewisse Rolle kann auch noch die Beregnung von Gemüse- oder Weidepflanzen spielen. Über die biologische Halbwertszeit gibt es stark differierende Angaben, je nachdem an welchem Objekt diese gemessen wurde. Im Mittel darf man von etwa 10-20 Tagen ausgehen.
- Kohlenstoff (C-14) entsteht im Reaktor durch Kernreaktionen aus C-13, Stickstoff-14 und Sauerstoff-17. Er ist ein β -Strahler mit einer Halbwertszeit von ca. 5600 Jahren. C-14 wird in alle Teile der lebenden Zelle anstelle des normalen Kohlenstoffs eingebaut. Die mittlere biologische Halbwertszeit beträgt etwa 12 Tage, in einzelnen Teilen der Zelle liegt der Wert unter Umständen beträchtlich höher. Auch hier schwanken die Angaben sehr stark. Der Eintritt des C-14 in die Biosphäre erfolgt hauptsächlich als Kohlendioxid (CO₂), in geringerem Umfang als Methan (CH₄) über Abluft und Abwasser.
- Die Edelgasisotope Krypton-85 und Xenon-133 machen neben Tritium den bei weitem größten Anteil der

Radioaktivitätsabgabe einer kerntechnischen Anlage aus. Sie entstehen in großer Menge im Reaktor als Produkte der Spaltung des eingesetzten Brennstoffs. Beide sind β - und γ -Strahler. Kr-85 hat eine Halbwertszeit von 10,7 Jahren, Xe-133 ist bereits nach 5,27 Tagen zur Hälfte zerfallen. Ihre Radiotoxizität ist verhältnismäßig gering. Der wichtigste Belastungspfad für den Menschen ist die Submersion, das heißt die Bestrahlung von außen; kritisches Organ ist die Hautoberfläche. Die Ganzkörperbelastung ist deutlich niedriger als die Hautdosis. Die Dosisbelastung durch inhalierte oder im Blut gelöste Edelgase ist demgegenüber von untergeordneter Bedeutung. In den letzten Jahren sind für Edelgase wirksame Rückhaltetechniken entwickelt worden.

- Die Jodisotope, J-131 und aus Wiederaufarbeitungsanlagen J-129, sind Spaltprodukte. Wegen ihrer starken Flüchtigkeit ist trotz ausgefeilter Rückhaltetechniken eine gewisse Abgabe an die Umgebung unvermeidlich. Ihre große radioökologische Bedeutung ergibt sich aus der starken Anreicherung in der Schilddrüse. Kleinkinder stellen wegen der sehr geringen Masse ihrer Schilddrüse und der höheren Strahlenempfindlichkeit die potentiell am stärksten gefährdete Gruppe („kritische Bevölkerungsgruppe“) dar. J-131 hat eine physikalische Halbwertszeit von ca. 8 Tagen, das langlebige Isotop J-129 eine von 17 Millionen Jahren. Die biologische Halbwertszeit liegt bei 139 Tagen in der Schilddrüse und im übrigen Körper des Menschen. Kritische Pfade für die Jodisotope sind hauptsächlich der Weide-Kuh-Milchpfad und der Verzehr von Gemüse. Im Falle des J-129 ist auch noch der Fleischgenuß von Bedeutung.
- Cäsium ist ebenfalls ein Spaltprodukt. Das wichtigste Isotop ist Cs-137, ein β -Strahler mit einer Halbwertszeit von etwa 30 Jahren. Die γ -Strahlung stammt von dem extrem kurzlebigen Tochternuklid Barium-137^m. Die Cäsiumisotope sind ausschließlich auf dem Ingestionsweg von Bedeutung, sie gelangen über Milch, Fleisch und Pflanzen zum Menschen. Kritische Organe sind Muskel und Leber, mit einem gewissen Abstand auch der gesamte Körper. Aufgenommenes Cäsium hat im Muskel eine biologische Halbwertszeit von etwa 140 Tagen, im übrigen Körper von etwa 70 Tagen.
- Ein weiteres nennenswertes Spaltprodukt ist Strontium, seine wichtigsten Isotope sind Sr-89 und Sr-90. Sr-90 hat eine Halbwertszeit von etwa 28 Jahren. Es zerfällt unter β -Strahlung in das ebenfalls radioaktive Yttrium-90, auch ein β -Strahler, das aber nur eine Halbwertszeit von 65 Stunden besitzt. Der Eintritt in den menschlichen Körper erfolgt über den Ingestionspfad durch pflanzliche Produkte und Milch. Etwa 90 % des gesamten Strontiumgehaltes des Körpers sind in den Knochen zu finden. Das Skelett ist daher auch das kritische Organsystem für Strontium. Es besitzt dort eine biologische Halbwertszeit von etwa 50 Jahren. Das bedeutet, einmal aufgenommenes Strontium verläßt den Körper nicht mehr vollständig. Das Tochternuklid Y-90 kann auch in den Keimdrüsen angereichert werden. Wegen der sehr kurzen Halb-

wertszeit findet jedoch eine nennenswerte Verlagerung nicht statt.

- Von geringer Bedeutung, aber noch getrennt zu beachten, sind die Rutheniumisotope Ru-103 (Halbwertszeit ca. 40 d) und Ru-106 (Halbwertszeit ca. 370 d), letzteres besonders bei Wiederaufarbeitungsanlagen.
- Ebenfalls aus Wiederaufarbeitungsanlagen gelangen die Technetiumisotope in die Umwelt. Wichtigstes ist Tc-99^m mit einer Halbwertszeit von 0,25 Tagen. Es geht in das langlebige und daher auch spezifisch um Größenordnungen weniger aktive Tc-99 über. Kritische Organe sind Knochen (biologische Halbwertszeit 25 Tage), Leber (30 Tage) und Nieren (20 Tage). Die Aufnahme erfolgt hauptsächlich durch Ingestion über Frischgemüse und Milch.
- Wie am Anfang dieses Kapitels schon erwähnt, besitzen Radium, Polonium und die Transurane (besonders Plutonium-239) die höchste Radiotoxizität. Das kommt einmal durch die hohe Äquivalenzdosis der α -Strahlen, aber auch durch die langen biologischen Halbwertszeiten. Da viele Isotope der genannten Elemente auch lange physikalische Halbwertszeiten besitzen, verschwinden diese Elemente, einmal aufgenommen, nur sehr langsam oder fast überhaupt nicht mehr aus dem Körper. Kritische Organe sind für Pu-239 auf dem Inhalationswege Lunge und Lymphknoten, auf dem Ingestionswege Knochen, Leber und Lymphknoten.
- Alle anderen Isotope tragen zur Strahlenbelastung der Bevölkerung durch kerntechnische Anlagen in der Regel weniger als 1 % bei. Sie sind also nur in Sonderfällen von radioökologischer Bedeutung. Als wichtigste weitere Isotope seien genannt: Chrom-51, Mangan-54, Cobalt-58 und 60, Zirkonium-95, Niob-95, Cer-141 und 144, Silber-110^m und 111, Antimon-124 und 125, sowie Selen 75 und 79.

Zusammenfassung

Zweifellos kann das radioaktive Inventar eines Kernreaktors ein ganz beträchtliches Gefährdungspotential für die Umwelt darstellen. Die Kenntnis davon zwingt zu erheblichen Vorsorge- und Sicherheitsmaßnahmen, die verhindern müssen, daß Radioaktivität in größerem Maße in die Umwelt gelangen kann. Ein modernes Kernkraftwerk trägt diesen Anforderungen in hohem Maße Rechnung.

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, daß die Berechnungen in radioökologischen Gutachten auf der Basis zahlreicher Untersuchungen und vieler Meßwerte stehen, wobei versucht wird, nach dem Stand der Wissenschaft derzeit durch Messung schwer oder nicht erfaßbare Parameter durch konservative, das heißt auf der sicheren Seite liegenden Annahmen anzunähern. Damit ist eine vereinfachte Berechnungsmöglichkeit für die Kontamination von Luft, Wasser und Nahrungsmitteln und die daraus resultierende Strahlenbelastung des Menschen gegeben, die auch seltene und ungünstige Fälle berücksichtigt. Alle radioökologischen Gutachten

für kerntechnische Anlagen gehen von der Aktivität an der ungünstigsten Einwirkungsstelle und den genehmigten Abgabewerten aus, die bisher noch von keinem Kernkraftwerk im Normalbetrieb erreicht wurden. Aus diesem Grunde liegt die tatsächliche zur Zeit meßtechnisch erfaßbare Belastung der Bevölkerung durch Radionuklide in der Umgebung kerntechnischer Anlagen um mehr als eine Größenordnung unter solchen Rechenwerten.

Keine Art der Energiegewinnung ist gefahrlos und ohne Einfluß auf die Umwelt, die Kernenergie macht von dieser Regel keine Ausnahme. Entscheidend ist, in welchem Verhältnis Umweltbelastung und Gefahren zum Nutzeffekt stehen und wie sie im Verhältnis zu anderen Möglichkeiten der Energiegewinnung einzuordnen sind. Unter diesem Gesichtspunkt steht die Kernenergie derzeit nicht schlechter da als die realisierbaren alternativen Möglichkeiten.

Literatur

ALBERG, B., HUNGATE, F.P.: (Edts): Radioecological Concentration Process. Pergamon Press, Oxford und London, 1966

AURAND, K.: Kernenergie und Umwelt. E. Schmidt, Berlin, 1976

BRENK, H.B.: Ein anwendungsbezogenes Konzept zur Berechnung der Umweltbelastung durch Abluftemissionen kerntechnischer Anlagen für Standorte in der Bundesrepublik Deutschland. Jül-Bericht 1485, Jülich, 1978

BRENK, H.D., VOGT, K.J.: Dosisfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition durch radioaktive Abluft kerntechnischer Anlagen. Jül-Bericht 1381, Jülich, 1977

Bundesministerium des Inneren: Allgemeine Berechnungsgrundlagen für die Bestimmung der Strahlenexposition durch Emission radioaktiver Stoffe, I. Fließgewässer (1977), II. Abluft (1978)

Bundesministerium des Inneren: Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresberichte 1974-1981

COMAR, C.L.: Radiosotopes in Biology and Agriculture. McGraw-Hill, New York, 1955

Deutsches Atomforum, Fachtagung Radioökologie. Bonn 2.-3.10.1979

GEISS, H., VOGT, K.J., EHRLICH H.G., POLSTER, G.: Neuere Ergebnisse von Ausbreitungsexperimenten mit 50 und 100 m Emissionshöhe. Vortrag anläßlich der Jahrestagung 1978 des Fachverbandes Strahlenschutz, Norderney, Oktober 1978

GIFFORT, F.A.: Turbulent Dispersion Study, Vol. II Analysis. US Dep. of Health, Education and Welfare, Nat. Air Poll. Control Admin., Arlington (1968)

GIFFORT, F.A.: Uses of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion. Nucl. Safety 1 (1960)

HEINEMANN, K., VOGT, K.J., ANGELETTI, L.: Deposition and Biological Half-Life of Elemental Iodine on Grass Clover. ZST-Bericht Nr. 199, Jülich, 1974

International Atomic Energy Agency: Environmental Aspects of Nuclear Power Stations. IAEA STI/PUB/261, Wien 1971

International Atomic Energy Agency: Environmental Behaviour of Radionuclides Released in the Nuclear Industry. IAEA STI/PUB/345, Wien 1973

International Atomic Energy Agency: Population Dose Evaluation and Standards for Man and his Environment. IAEA STI/PUB/375, Wien 1974

International Atomic Energy Agency: Impacts of Nuclear Releases into the Aquatic Environment. IAEA STI/PUB/406, Wien 1976

- International Atomic Energy Agency: Transuranium Nuclides in the Environment. IAEA STI/PUB/410, Wien 1976
- International Atomic Energy Agency: Biological Implications of Radionuclides Releases from Nuclear Industries. IAEA Wien, Symposium 26.-30.3.1979
- International Commission on Radiological Protection, Publ. 30 (in 8 Teilen) Annals of the ICRP. Pergamon Press, 1979-1982
- Modellstudie Radioökologie Biblis, Bände 1-10. Der Hessische Minister für Wirtschaft und Technik, 1980
- McELROY, J.L., POOLER, F. jr.: St. Louis Dispersion Study, Vol. II Analysis. US Dep. of Health, Education and Welfare, Nat. Air Poll. Control Admin. Arlington (1968)
- NEHMITZ, G., BRENK, H.D.: Berechnung organspezifischer Inhalationsdosisfaktoren mit Hilfe von Mehrcompartment Modellen. ZST-Bericht 241, Jülich 1976
- PASQUILL, F.: The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. Met. Mag. 90, 1961, S. 33-49
- Radiological Health Handbook. US. Dept. of Health, Education and Welfare, Rockville, Maryland 1970
- Radioökologiesymposium Stuttgart, Berichtsband. Der Bundesminister des Inneren, Bonn, 1982
- RUSSEL, R.Sc.: Radioactivity and Human Diet. Pergamon Press, 1966
- SINGER, I.A., SMITH, M.E.: Atmospheric Dispersion at Brookhaven National Laboratory. Air & Water Poll. Int. J. 10 (1966)
- SOMAN, S.D.: Background Radioactivity in the Monazite Areas of Kerala, India. Spezielle Berichte der KFA, Jülich, Jül-Spez-161, Jülich 1982
- UN-Report: Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR-Report to the General Assembly, with Annexes, New York, 1977
- VOGT, K.J. et al.: Ausbreitung und Ablagerung. Jül-807-ST, Jülich 1971
- VOGT, K.J. et al.: Untersuchungen zur Ausbreitung von Abluffahnen in der Atmosphäre. Jül-998-ST, Jülich 1973
- VOGT, K.J. et al.: Untersuchungen zur Ausbreitung von Abluffahnen in der Atmosphäre. Jül-1143-ST, Jülich 1974
- VOGT, K.J., GEISS, H.: Tracer Experiments on the Dispersion of Plumes over Terrain of Major Surface Roughness. Jül-1131-ST, Jülich 1974
- VOGT, K.J.: Empirical Investigations of the Diffusion of Waste Air Plumes in the Atmosphere. Nucl. Techn. 34, 1977

Energie und Umwelt

Peter Borsch¹⁾ und Hermann-Josef Wagner²⁾

¹⁾Programmgruppe Technik und Gesellschaft
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

²⁾Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

1. Einleitung

Die Menschen haben von Beginn an versucht, sich von den stets wechselnden Umweltbedingungen, die z.B. durch das Wetter gegeben sind, unabhängiger zu machen, und dazu haben sie Energie gebraucht. Die Nutzung des Feuers ist das wichtigste Beispiel, und mit Hilfe der Nutzung dieser Energiequelle und anderer Energiequellen wurde schließlich die moderne Technik geschaffen. Von Anfang an hat der Mensch dabei auch seine Umwelt verändert, z.B. durch die Rodung von Wäldern zur Nutzholzgewinnung und zur Gewinnung von Ackerbauflächen. Wenn man sich vergegenwärtigt, daß die verkarsteten südeuropäischen Küsten früher bewaldet waren, oder daß Karthago, die ehemalige Kornkammer Roms, durch Menschenhand zur Wüste wurde, so sieht man, daß solche Veränderungen ganz erheblich waren und bis heute kaum rückgängig gemacht worden sind.

Mit den ersten Feuern haben auch die Umweltbelastungen und Risiken begonnen, wie wir sie heute im Zusammenhang mit der Energieerzeugung sehen: mit den Rauchgasen – die unter anderem karzinogene Stoffe enthalten – wurde die Luft verschmutzt; die Feuerstätten stellten gleichzeitig ein Unfallrisiko dar, es konnten z.B. Waldbrände entstehen.

Die heutigen Techniken verwenden verschiedene Energieträger: inzwischen weniger Holz, dafür mehr Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran. Unterschiedliche Energieumwandlungsverfahren – z.B. Zentralheizung, Hochofen, Kraftfahrzeug, Küchenherd, Kraftwerk – werden genutzt, und entsprechend vielfältig sind die Umweltbelastungen, die dabei auftreten können. In diesem Beitrag soll zunächst versucht werden, eine Übersicht über diese Umweltbelastungen zu geben und den gegenwärtigen – relativ bescheidenen – Stand der Kenntnisse zu erläutern. Anschließend wird ein spezieller Bereich herausgegriffen, bei dem ungefähre quantitative Vergleiche möglich sind: Die gesundheitlichen Schädigungen von Menschen durch den Betrieb von Kraftwerken und allen zugehörigen Einrichtungen des Brennstoffkreislaufs bei der Erzeugung elektrischer Energie. Im letzten Teil wird in einer knappen Betrachtung gezeigt, wie sich die Nutzung

von nichterneuerbaren Energiequellen langfristig auf das globale Klima auswirken könnte.

Zunächst lassen sich grob verschiedene Arten der Belastung unterscheiden, bei denen auch unterschiedliche Medien die Belastung übertragen:

- **Verschmutzung von Luft durch Schadstoffe**
- Verschmutzung von Wasser durch Schadstoffe
- Belastung von Wasser durch Abwärme
- Belastung der Atmosphäre durch Abwärme
- Lärm
- Flächenbedarf
- Ästhetische Aspekte: Landschaftsverunstaltung

Da es nicht möglich ist, hier alle diese verschiedenen Belastungen zu diskutieren, sind die, die im folgenden erörtert werden sollen, gesperrt gedruckt. Fett gedruckt wurden die Stichworte, die auch im zweiten Teil, beim quantitativen Vergleich, Berücksichtigung finden.

Weiter ist wichtig zu wissen, in welchen Bereichen unserer Gesellschaft sich die Quellen dieser Belastungen befinden, und hier wird üblicherweise nach den Sektoren

- Industrie
- **Kraftwerke**
- Haushalte und Kleinverbraucher
- Verkehr

unterschieden. Von Bedeutung ist außerdem, durch welche Primärenergiequellen die Belastung verursacht wird, und dabei können

- Kohle
- Erdöl
- Erdgas
- **Kernenergie**
- **Sonnenergie**
- Wasser (Laufwasser, Stauseen)
- Windenergie

berücksichtigt werden. Schließlich können Wirkungen in verschiedenen Bereichen beobachtet werden, und zwar

- auf Sachgüter, wie z.B. Bauwerke
- auf Pflanzen
- auf Tiere
- auf Menschen.

Ein Beispiel für die Einwirkung auf Bauwerke ist die Beobachtung, daß saure Verbrennungsprodukte in der Bundesrepublik Deutschland jährliche Schäden in Milliardenhöhe verursachen. Allein für die Renovierungsarbeiten am Kölner Dom werden jedes Jahr 3 Mio. DM aufgewendet. Über die Wirkungen verschiedener Umweltbelastungen auf die Pflanzen- und Tierwelt ist einiges bekannt. Spezielle Pflanzen kann man sogar für bestimmte Schadstoffe in der Luft als Indikatoren benutzen^[1]. Dieses Thema ist aber so umfangreich, daß es an dieser Stelle ausgeklammert werden soll. Im folgenden sollen im wesentlichen die unmittelbaren Wirkungen auf die Menschen betrachtet werden.

2. Schadstoffbelastung der Gewässer

Die Verschmutzung des Wassers in unserer Zivilisation spielt eine große Rolle, sie erfolgt vorwiegend durch Abwässer aus der Industrieproduktion und aus Haushalten; bei übermäßiger Verwendung von Kunstdünger kann auch die Landwirtschaft dazu beitragen. Verschmutzungen im Zusammenhang mit Energieerzeugung sind demgegenüber von weniger großer Bedeutung.

Von Zeit zu Zeit gibt es Schäden durch Öl, das bei Transportunfällen zu Lande das Grundwasser verseuchen kann und bei Transportunfällen auf See den Menschen unmittelbar trifft, wenn der dabei austretende Ölteppich Küstenbereiche verunreinigt.

In gewissem Umfang tritt eine Belastung des Wassers beim Waschen der Kohle (4,5 m³ Wasser für 1 t Steinkohle^[2], sowie bei der Erdölverarbeitung durch chemische Schadstoffe auf^[2,3]. Die Grubenwässer des Kohlenbergbaus können mit natürlichen radioaktiven Stoffen belastet sein^[4]. Die Abwässer fossiler Kraftwerke fallen dagegen nicht ins Gewicht. Bei kerntechnischen Anlagen enthält das Abwasser radioaktive Stoffe. Bei Energieerzeugung, -umwandlung und -verbrauch sind jedoch im Vergleich zu den Schadstoffbelastungen der Atmosphäre die Belastungen der Gewässer gering, so daß sie hier nicht weiter betrachtet werden sollen.

3. Schadstoffbelastung der Luft

Die wichtigste Art von Umweltbelastung bei der Energieerzeugung stellen die Schadstoffemissionen dar. Hier treten beim Erdgas – um bei einem „sauberen“ Primärenergieträger zu beginnen – Kohlenmonoxid und Stickoxide als Verbrennungsprodukte auf, die aus dem Kamin entweichen (Abbildung 1). Bei Erdöl und Erdölprodukten wie Heizöl oder Benzin kommen dazu noch Schwefelverbindungen, Kohlenwasserstoffe und Feststoffe, bei der Verbrennung von Kohle sind die Staubmengen größer und enthalten auch radioaktive Anteile. Bei Kernenergieanlagen entfallen die chemischen Schadstoffe, hier müssen wir aber grundsätzlich mit der

Primärenergieträger	Schadstoffe					
	SO ₂	Staub	No _x	CO	C _m H _n	Radioaktivität
Kohle	■	■	■	■	■	■
Erdöl	■	■	■	■	■	■
Erdgas	■	■	■	■	■	■
Kernenergie	■	■	■	■	■	■
Sonne, Wind, Laufwasser	■	■	■	■	■	■

Abb. 1: Luftverunreinigungen bei der Energieerzeugung

Abgabe radioaktiver Stoffe rechnen. Beim Betrieb von Sonnen-, Wind- und Laufwasser-Energieanlagen treten keine Emissionen auf.

Die bei der Verbrennung fossiler Primärenergieträger freigesetzten Schadstoffe kommen auch in der Natur vor, z.B. im Auswurf von Vulkanen oder als Abbauprodukte von organischem Material. Sie werden, sofern es chemische Verbindungen wie SO₂ oder Kohlenwasserstoffe sind, auch durch natürliche Vorgänge im Laufe der Zeit wieder abgebaut.

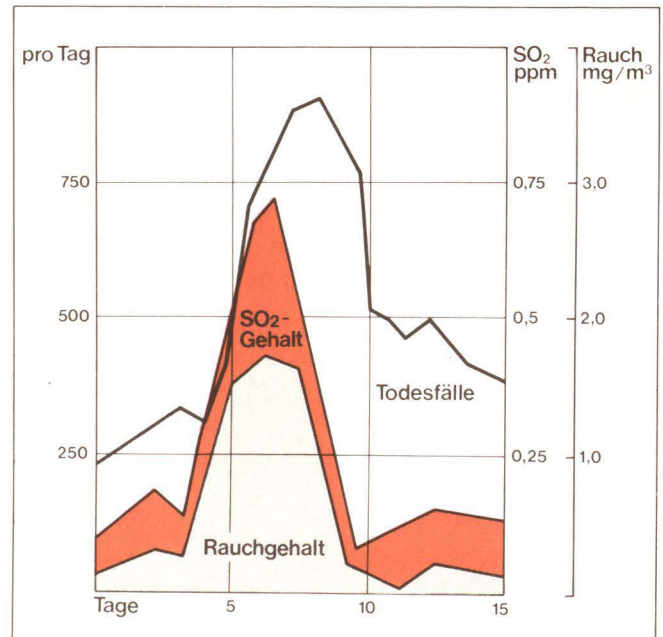


Abb. 2: Smog im Dezember 1952 in London, nach^[7]. Die obere Kurve zeigt die Zahl der Todesfälle pro Tag (linke Skala), darunter sind SO₂-Gehalt und Rauchgehalt der Luft angegeben (rechte Skalen). 1 ppm SO₂ entspricht etwa 2,8 mg SO₂/m³.

Die durch die Verbrennung von Kohle verursachte Luftverschmutzung ist übrigens schon lange als lästig und gesundheitsschädlich empfunden worden. In London wurde z.B. bereits im Mittelalter – mit wechselndem Erfolg – versucht, die Verbrennung von Kohle einzuschränken und die Handwerker zu zwingen, stattdessen das teurere Holz oder Holzkohle zu verwenden^[5].

Anhaltspunkte für die quantitativen Wirkungen dieser Schadstoffe haben vor allem mehrere Smog¹⁾-Katastrophen geliefert^[6], wenn sich bei ungünstigen Inversionswetterlagen über mehrere Tage hindurch die Verbrennungsprodukte in der Luft ansammelten: Ärzte und Krankenhäuser stellten daraufhin deutlich erhöhte Zahlen von Erkrankungs- und Todesfällen fest, zum erstem Mal 1930 im belgischen Maastal, dann 1948 in der Innenstadt von Donora in Pennsylvanien (USA). Die größte bekannte Smogkatastrophe ist die von London im Dezember 1952, wo innerhalb von 2 Wochen nach Eintritt der Smog-Bedingungen etwa 4 000 Menschen mehr starben als sonst in dieser Jahreszeit (Abbildung 2). Weitere Smogzwischenfälle in London in den Jahren 1956-1963 forderten ca. 3 200 Todesopfer. Diese Ereignisse lösten intensive Gegenmaßnahmen aus. (Änderung der Heiztechnik, Anforderungen an die Brennstoffe), so daß zumindest in den westlichen Industrieländern solche Katastrophen heute nicht mehr befürchtet werden müssen. Weitere Smogzwischenfälle sind auch an anderen Stellen, z. B. in Los Angeles oder im Dezember 1962 im Ruhrgebiet aufgetreten.

Neben den giftigen Schadstoffen wird als unvermeidliches Verbrennungsprodukt auch Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt. CO₂ ist zwar nicht giftig, es hat jedoch eine erhebliche Bedeutung für das Klima der Erde. Darauf wird in Kapitel 5 im Zusammenhang mit der Abwärme eingegangen.

3.1 Luftschadstoffe und ihre Wirkungen

3.1.1 Schwefeldioxid (SO₂)

Kohle und Erdöl enthalten bis zu 4 % Schwefel, der bei der Steinkohle durch Naßverfahren (Flotation) auf 1-1,25% reduziert wird. Bei der Verbrennung wird Schwefel weitgehend zu gasförmigem SO₂ oxidiert, das als wichtigster Luftschadstoff angesehen wird. Dabei ist, wie medizinische Untersuchungen erwiesen haben, in trockener Atemluft enthaltenes SO₂ erst bei recht hohen Konzentrationen wirksam – es führt dann zu einer Reizung der Bronchien und der Lunge^[8]. Bei Gegenwart von Sonnenlicht und Luftfeuchtigkeit wird SO₂ zu schwefeliger Säure H₂SO₃ und Schwefelsäure H₂SO₄ oxidiert.

Schwefeldioxid spielt eine wesentliche Rolle beim sogenannten „London-Smog“, der in der kalten Jahreszeit entsteht, wobei es in Verbindung mit Mineralien des Feinstaubes sowie flüchtigen organischen Verbindungen luftchemische Reaktionen eingeht, in deren Verlauf SO₂ in Aerosol – d.h. feinste feste oder flüssige Teilchen – umgewandelt wird.

In Kraftwerken besteht prinzipiell die Möglichkeit, durch technische Maßnahmen SO₂ weitgehend (bis etwa 95%) aus dem Rauchgas zu entfernen. Die Verfahren sind allerdings aufwendig und brauchen relativ viel Energie. Es gibt mehr als 100 verschiedene Verfahren, vor allem in Japan und in USA^[9]. In der Bundesrepublik

Deutschland wurden 4 Varianten zur Betriebsreife entwickelt, die als Endprodukt Gips oder Ammoniumsulfat liefern^[10]. Neben Schwefeldioxid werden in den Entschwefelungsanlagen auch Chlor- und Fluorverbindungen in hohem Maße abgeschieden. Seit 1974 ist in der Bundesrepublik für neue Steinkohlenkraftwerke die Rauchgasentschwefelung vorgeschrieben; die Großfeuerungsanlagen-Verordnung vom Juni 1983 verlangt auch (mit gewissen Übergangsfristen) die Nachrüstung oder Stilllegung alter Anlagen. Bei Braunkohlenkraftwerken war zunächst eine Verminderung der SO₂-Emissionen durch Kalkzugabe zur Rohbraunkohle vorgesehen, (Trocken-Additivverfahren) was wesentlich billiger gewesen wäre als die konventionelle Abgasentschwefelung. Inzwischen sollen auch bei diesen Kraftwerken die Rauchgase entschwefelt werden. Anfang 1983 waren 6% der Kohle- und Ölkraftwerke entschwefelt, für 23% der Kraftwerke waren Entschwefelungsanlagen im Bau oder geplant^[11]. Gegenwärtig bereitet der Absatz der Rückstände noch keine besonderen Probleme. Bei Ausrüstung aller fossiler Kraftwerke in der Bundesrepublik mit Rauchgasentschwefelungsanlagen, die das Endprodukt Gips liefern, würde die Gipsproduktion von jährlich 25 Mio. t das Zehnfache des Bedarfs ergeben^[12].

Für kleine Anlagen ist eine Rauchgasentschwefelung zu aufwendig, so daß dort nur die Entschwefelung des Brennstoffs infrage kommt. Deshalb ist für Haushaltsheizungen das schwefelarme leichte Heizöl vorgeschrieben. Eine weitgehende Entschwefelung ist auch bei anderen Ölsorten und bei Kohle im Prinzip möglich, bisher aber nur in begrenztem Umfang durchgeführt.

3.1.2 Staub

Stäube entstehen in Industriebetrieben (z.B. Zementfabriken) und vor allem bei Verbrennungsprozessen, nicht nur bei der Verbrennung fester Brennstoffe. In der Industrie und in Kraftwerken werden heute etwa 99% der Grobstäube mit Elektrofiltern abgeschieden. Feinste Staubpartikel unter 3µ passieren die Filter jedoch weitgehend. Im Gegensatz zum Grobstaub kann dieser Feinstaub über die Atemwege bis in die Lunge gelangen. Die toxikologische Wirkung beruht vor allem auf dem Gehalt an Stoffen wie Blei, Vanadium, Beryllium, Quecksilber, von denen einige die Entstehung von Krebs fördern^[12, 13]. Zudem lagern sich an der Oberfläche der feinen unsichtbaren Staubeilchen andere Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe, Schwefel- oder Stickstoffverbindungen an, so daß deren Wirkung bei gleichzeitiger Anwesenheit von Staub verstärkt wird. Allgemein erzeugt Staub eine Erhöhung der Zahl von Erkrankungen der Atmungsorgane, wie Grippe, Lungenentzündung und Asthma.

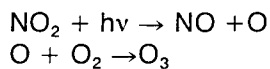
3.1.3 Stickoxide (NO_x)

Stickoxide entstehen als Reaktion des Luftstickstoffs mit dem Luftsauerstoff überall dort, wo Verbrennungen mit hoher Temperatur ablaufen: in fossilen Kraftwerken (ca. 1800°C), in Kraftfahrzeugmotoren und in geringerem Umfang bei Haushaltsheizungen; außerdem werden die

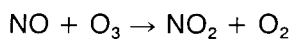
¹⁾ Das Wort „Smog“ ist ein Kunstwort: es ist aus den englischen Wörtern „Smoke“ (Rauch) und „Fog“ (Nebel) gebildet.

in Brennstoffen (bis 2%) enthaltenen Stickstoffverbindungen zu Stickoxiden umgesetzt. Bei diesen Prozessen entsteht in erster Linie Stickstoffmonoxid (NO), das in der Atmosphäre relativ schnell zu dem gesundheitsschädlicheren Stickstoffdioxid (NO₂) umgesetzt wird^[10]. Stickoxide greifen die Schleimhäute der Atmungsorgane an und begünstigen dort Katarrhe und Infektionen (Bronchitis, Lungenentzündung). Sie verstärken die Wirkung von SO₂^[14].

Die Stickoxide spielen eine wichtige Rolle beim sogenannten „Los-Angeles-Smog“, auch „Photochemischer Smog“ genannt, der vorwiegend im Sommer bei sonniger Wetterlage auftritt. Durch ultraviolettes Licht wird die Reaktion



ausgelöst, die allerdings mit der Rückreaktion



– in Abhängigkeit vom Strahlenniveau – im Gleichgewicht ist. In Gegenwart von reaktiven Kohlenwasserstoffen entstehen jedoch über komplexe Reaktionsketten freie Radikale (HO, HO₂, NO₂), die das entstandene NO wieder zu NO₂ oxidieren, so daß bei jedem Durchlauf der Reaktionskette die Anzahl der NO₂-Moleküle erhöht und O₃ erzeugt wird sowie zusätzlich weitere Radikale gebildet werden. Diese Prozesse sind erst dann beendet, wenn die Intensivität des Sonnenlichtes zu gering geworden ist; das gebildete Ozon wird dann durch Reaktion mit NO wieder zerstört. Ozon und andere Oxidanten können bis über 100 km transportiert werden^[10].

Die Reaktion von Stickoxiden mit freien Radikalen führt zu salpetriger Säure und Salpetersäure (HNO₃), die ähnlich wie die Schwefelsäure in Form von Aerosolen vorliegen.

Durch geeignete Führung der Verbrennung kann die NO_x-Entstehung minimiert werden, ganz zu vermeiden ist sie nicht. Verfahren zur Abscheidung aus den Rauchgasen sind in Japan erprobt und teilweise schon eingeführt worden^[10]. Eine Versuchsanlage ist in Heilbronn vorgesehen.

Seit etwa 10 Jahren werden verstärkte Bemühungen unternommen, die Reduzierung von SO₂- und NO₂-Emissionen durch die Wirbelschichtfeuerung zu erreichen^[15]. Mit diesem Verfahren, das auch die Nutzung von schlechten Kohlesorten (Ballastkohlen) ermöglicht, wird die Entstehung von Stickoxiden durch niedrige Verbrennungstemperaturen (800-900°C) weitgehend vermieden. Der Schwefelgehalt der Kohle wird durch die Zugabe von Kalkstein bereits in der Feuerung gebunden, so daß die Rauchgase nahezu schwefelfrei sind. Ende 1983 waren in der Bundesrepublik ca. 10 Anlagen mit thermischen Leistungen bis 100 MW im Betrieb und weitere Anlagen bis 208 MW im Bau. Für Großanlagen ist jedoch noch einige Entwicklung zu leisten. Bisher ist nicht geklärt, wieweit die Emission von lungengängigen Feinstäuben bei diesem Verfahren gegenüber modernen Großfeuerungsanlagen erhöht wird.

3.1.4 Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid entsteht bei unvollständiger Verbrennung, vor allem beim Betrieb von Kraftfahrzeugen sowie bei Haushaltsheizungen. Seine Giftigkeit beruht darauf, daß es sich an Stelle des Sauerstoffs mit dem roten Blutfarbstoff Hämoglobin sehr fest verbindet (200-300 mal stärker als Sauerstoff), nur sehr langsam wieder abgegeben wird und damit den Sauerstofftransport im Blut behindert. In größeren Konzentrationen führt es zum Tod durch Blockade der Zellatmung.

Durch technische Maßnahmen kann die CO-Entstehung in großen Feuerungsanlagen praktisch verhindert werden; bei Kraftfahrzeugen sorgt der TÜV dafür, daß der CO-Anteil im Auspuffgas bestimmte Grenzwerte nicht überschreitet. Beim Otto-Motor ist aber ein gewisser CO-Anteil anscheinend nicht zu vermeiden, erst eine Nachverbrennung könnte hier Abhilfe schaffen. Gerade wegen seines wesentlich geringeren CO-Ausstoßes steht der Dieselmotor im Ruf geringer Umweltbelastung.

3.1.5 Kohlenwasserstoffe (C_mH_n)

Unter diesem Begriff versteht man alle organischen Verbindungen, die aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Sie sind technisch als Kraftstoffe (Benzin, Benzol, Erdgas, Propan usw.) von großer Bedeutung und werden vor allem von der erdölverarbeitenden Industrie sowie vom Straßenverkehr an die Luft abgegeben. Einige Kohlenwasserstoffe sind krebserregend, z.B. Benzol und Benzpyren, Bestandteil von Autoabgasen und von Abgasen aus Öl- und Kohlefeuerungen. Auch beim Einatmen sehr geringer Konzentrationen von karzinogenen Stoffen ist langfristig mit einer Erhöhung des Krebsrisikos zu rechnen.

3.1.6 Radioaktivität

Da in der Erde radioaktive Substanzen als Spurenelemente weit verbreitet sind, enthält Kohle auch geringe Mengen an radioaktiven Stoffen aus den in der Natur vorkommenden Zerfallsreihen von Uran und Thorium, und ein Teil dieser Stoffe wird mit den Feinstäuben über den Kraftwerkskamin in der Umgebung verteilt. Mit dem Staub eingeatmet können diese radioaktiven Stoffe – Schwermetalle wie Radium und radioaktives Blei – in die Blutbahn gelangen; sie werden vor allen Dingen in den Knochen abgelagert und führen dort zu einer Strahlenbelastung^[16]. Radioaktive Stoffe werden auch über den Abluftkamin von Kernkraftwerken emittiert; hier sind es vor allem radioaktive Spalt- und Aktivierungsprodukte wie Jod-131, Krypton-85, Strontium-90, Tritium, die unterschiedlich vom menschlichen Körper aufgenommen werden: Jod konzentriert sich vorzugsweise in der Schilddrüse, Strontium in den Knochen, während ein Edelgas wie Krypton, da es keine chemischen Verbindungen eingeht, im Körper auch nicht eingebaut werden kann.

Die Emissionen der Kernkraftwerke werden recht genau gemessen; die dadurch erzeugte Strahlenbelastung liegt im ungünstigen Fall – mit Ausnahme der Schilddrü-

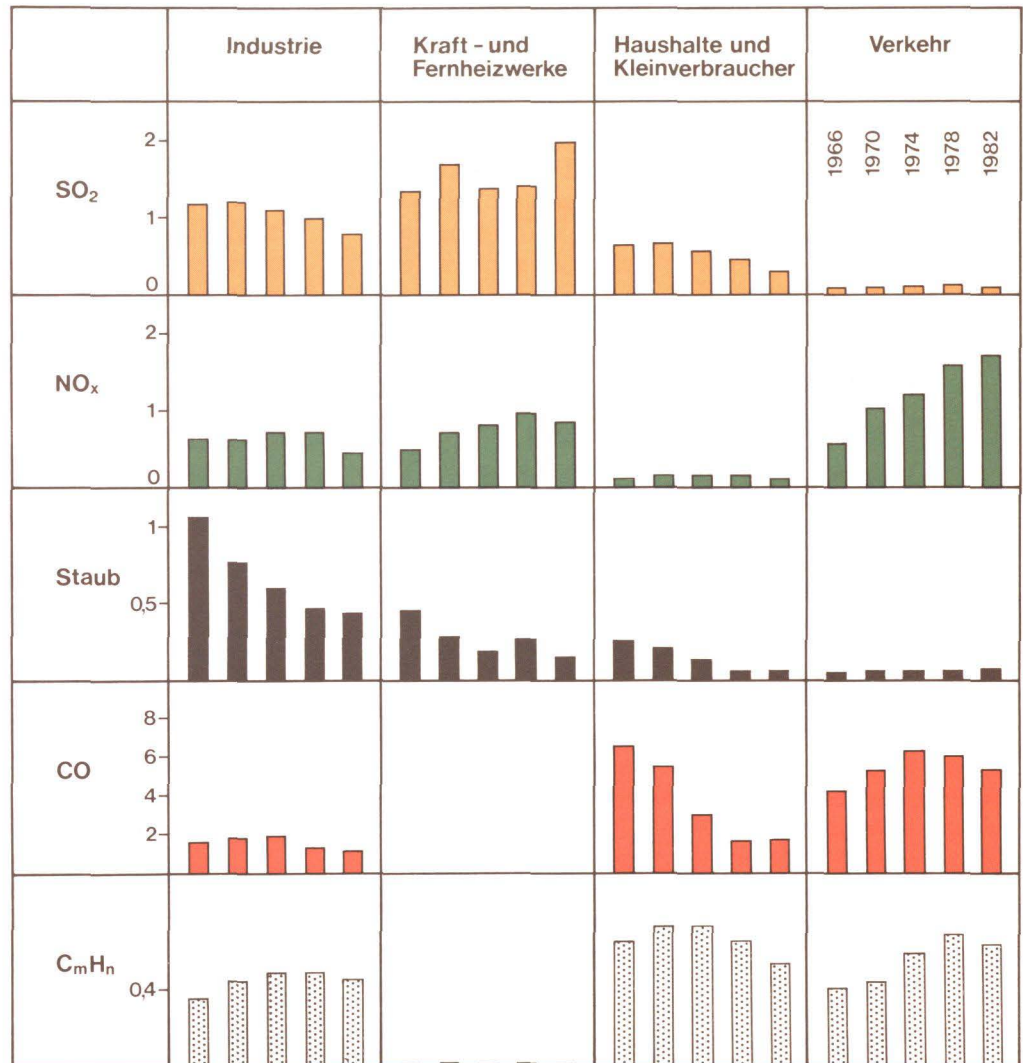


Abb. 3:
Schadstoffemissionen
in der Bundesrepublik
Deutschland aus
Feuerungsanlagen und
Kraftfahrzeugen (in Mio. t)

senbelastung durch Jod – deutlich unter 10 Mikrosievert (1 Millirem) pro Jahr^[17]. Bei Wiederaufarbeitungsanlagen ist sie höher und der Strahlenbelastung, die in ungünstigen Fällen in der Umgebung von Kohlekraftwerken erreicht werden kann, vergleichbar^[18, 19].

Radioaktive Stoffe erhöhen durch ihre Strahlung das Krebsrisiko, sie wirken – obwohl der biophysikalische und biochemische Primärvorgang ein anderer ist – also ähnlich wie gewisse Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle.

3.2 Übersicht über emittierte chemische Schadstoffe

Die Abbildung 3 zeigt die Emission von Schadstoffen von 1966 bis 1982 in den einzelnen Verbrauchssektoren^[20]. Hauptemittenten von SO₂ und Stäuben sind die Kraftwerke und die Industrie, während die größten Anteile bei Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen aus dem Verkehrssektor stammen. Die Darstellung zeigt, daß trotz Erhöhung des Brennstoffverbrauchs – vor allem beim Staub – durch geeignete Rückhaltungsmethoden eine Emissionsminderung erzielt werden konnte.

Einige spezifische Emissionswerte zeigt die Abbildung 4. Innerhalb der Sektoren wird der Unterschied der

Brennstoffe deutlich, z.B. die geringeren Staub- und höheren Kohlenwasserstoffemissionen von Heizöl gegenüber Kohle und die insgesamt sehr geringen Emissionen von Gasfeuerungen. Der Vergleich der Sektoren untereinander belegt die unterschiedliche Qualität der Verbrennungsvorgänge, etwa beim Vergleich der Haushalte oder des Verkehrs mit der Industrie.

	Emissionen		Immissionen	
	t/a	%	µg/m ³	%
Industrie	33482	95.4	19-47	24-49
Haushalte	1465	4.2	46	51-76
Verkehr	142	0.4	4	

Tab. 1:
SO₂-Emissionen und Immissionen in Ludwigshafen^[21]

Für die Beurteilung der tatsächlichen gesundheitsschädigenden Wirkungen sind aber letzten Endes nicht die emittierten Mengen verantwortlich, sondern das, was davon auf den Menschen einwirkt, also die sogenannten Immissionen. Das sind Konzentrationswerte, etwa in Mil-

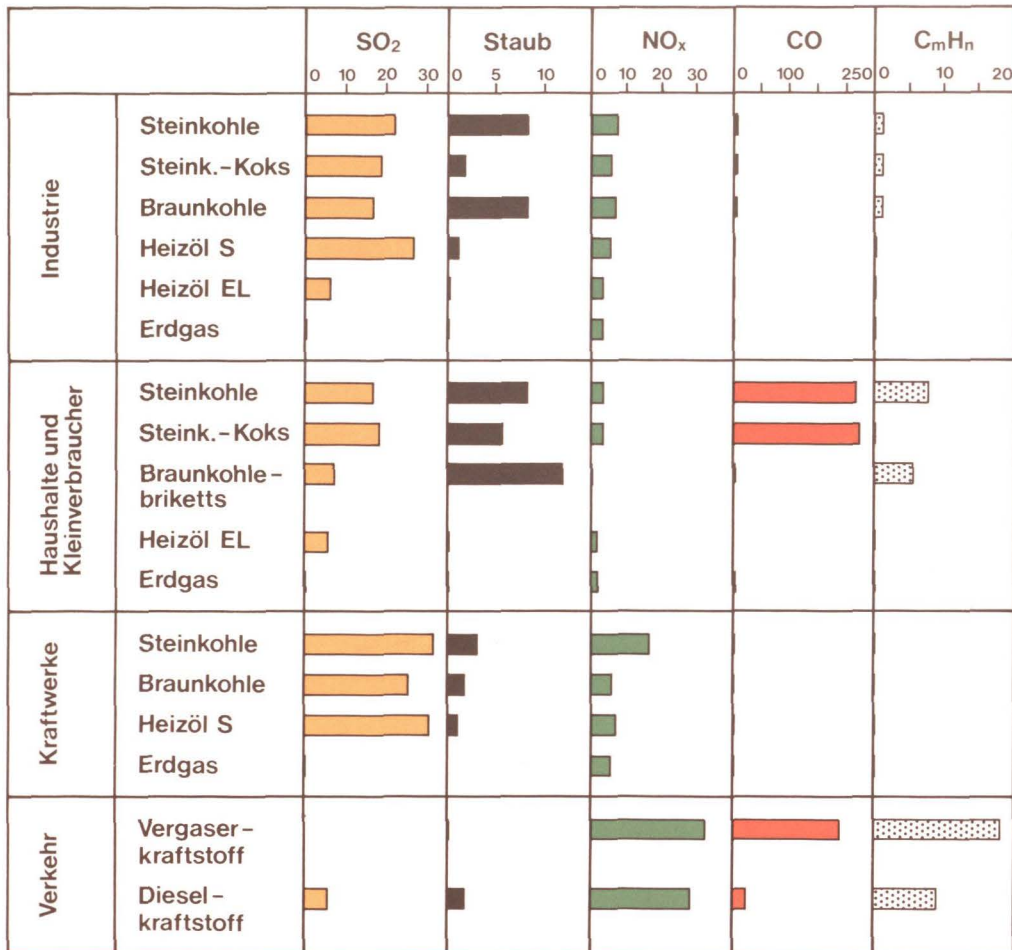


Abb. 4.:
Spezifische Emissionen in kg
Schadstoff je t SKE^[10]

ligramm Schadstoff pro Kubikmeter Luft angegeben. Die von den Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher sowie Verkehr freigesetzten Schadstoffe tragen wegen der geringen Freisetzungshöhe und der Freisetzung unmittelbar in den Ballungsgebieten relativ stärker zur Immission bei als die aus hohen Kaminen und häufig am Rande von Ballungszentren freigesetzten Schadstoffen der Industrie und der Kraftwerke. In Tabelle 1 ist am Beispiel Ludwigshafen dargestellt, daß z.B. die Haushalte und Kleinverbraucher sowie der Verkehr dort nur mit 5% zu den SO₂-Emissionen beitragen, an den Immissionen jedoch – abhängig von der Nähe industrieller Emittenten – zu 50-75% beteiligt sind. Dabei ist berücksichtigt, daß zu den Immissionsbelastungen auch Industrie und Kraftwerke aus der Nachbarstadt Mannheim beitragen^[21]. Man kann ungefähr von folgenden Verdünnungsverhältnissen ausgehen: Kraftfahrzeugverkehr 1:1000, Haushaltsfeuerungen 1:50000, Industrie- und Kraftwerkskamine 1:1000000. Die vom Kraftverkehr ausgehenden Belastungen werden in den Innenstädten bei CO auf 94-99%, bei Kohlenwasserstoffen auf 76-89% und bei Stickoxiden auf 83-93% der jeweiligen Gesamtkonzentration geschätzt^[22].

3.3 Folgen der großräumigen Verteilung der Emissionen

Die Freisetzung aus hohen Schornsteinen, die die nähere Umgebung entlastet, wirkt sich jedoch weiträumig ungünstig aus. Schwefel- und Stickoxide sowie deren

Oxidationsprodukte Schwefelsäure und Salpetersäure können viele hundert Kilometer von den Emissionsquellen entfernt die Niederschläge ansäuern. Dies zeigte sich schon vor Jahren in Skandinavien, wo in Flüssen und Seen die Biotope derart verändert waren, daß Fische in diesen sauren Gewässern nicht mehr existieren konnten. So sind Südnorwegen, Schweden und Teile Finnlands von den Emissionen aus Großbritannien und Mitteleuropa betroffen^[23].

In den letzten Jahren sind in Mitteleuropa Waldschäden aufgetreten, deren Ausmaß inzwischen einen alarmierenden Umfang erreicht hat und bei denen die Emissionen aus fossilen Feuerungen eine wichtige Rolle als Verursacher spielen.

Während reines Wasser, das im Säuregleichgewicht mit dem atmosphärischen Kohlendioxid steht, einen pH-Wert*) von 5.6 aufweist, wurde in der Bundesrepublik Deutschland bereits 1980 für Niederschläge ein durchschnittlicher pH-Wert von 4 ermittelt, so daß man tatsächlich von „Saurem Regen“ (und saurem Schnee, saurem Nebel) sprechen kann. Für diese Ansäuerung sind SO₂ und Stickoxide verantwortlich.

Neuere Erkenntnisse deuten darauf hin, daß das aus Stickoxiden entstehende Ozon (zusammen mit anderen Photooxidantien) als Mitverursacher der Waldschäden an manchen Stellen größere Bedeutung haben könnte als der saure Niederschlag. Eine weitere Rolle bei den

*) pH-Wert: Kennzahl für den Säuregrad einer Flüssigkeit. Der Neutralpunkt liegt bei 7; kleinere Werte bedeuten saure Reaktion, größere Werte basische Reaktion.

Waldschäden dürften forstbauliche Maßnahmen und zeitweilige ungünstige klimatische Bedingungen (z.B. Trockenheit) spielen.

Nach einer Erfassung der Waldschäden Mitte 1983 ist der Schadensumfang in der Bundesrepublik Deutschland schon erheblich, rund 34 % (25000 km²) der Waldflächen müssen als geschädigt gelten. Die Schädigungen beim Tannenbestand sind am weitesten fortgeschritten, aber auch Fichten, Kiefern, Buchen und Eichen wurden bereits in Mitleidenschaft gezogen.

Nach heutigem Kenntnisstand können für das Waldsterben prinzipiell zwei unterschiedliche Wirkungsketten verantwortlich gemacht werden.

- Schädigung der Assimilationsorgane an der Blattoberfläche durch Luftschadstoffe (SO₂, Ozon). Durch eine Vorschädigung der Kutikula, einem Schutzhäutchen, das die Außenhaut grüner Pflanzenteile überzieht und letztendlich gegen zu hohe Wasserverluste durch Verdunstung schützen soll, sowie durch eine Schädigung der Stomata, winzige Öffnungen in der Außenhaut des Blattes, die dem Gasaustausch und der Abgabe von Wasserdampf dienen, kommt es zu Auswascheffekten und über eine gestörte Photosynthese zu Wachstumsdefiziten und Wurzelrückbildungen.
- Schädigung des Feinwurzelsystems durch Bodenversauerung. Entsprechend dem Ausstoß von Schadstoffen durch Energienutzung in Kraftwerken, Industrie und Verkehr sowie den Ausbreitungsbedingungen findet ein Eintrag von Säure in Böden durch Depositionen statt. Nach einer Phase vorübergehender Wachstumsförderung durch Akkumulation von Nährstoffen, besonders Stickstoff aus Luftverunreinigungen, kann nachfolgend eine Akkumulation von Säuren und in geringerem Umfang von Schwermetallen beobachtet werden. Weiter sinkender pH-Wert des Bodens führt zum Verlust von Nährstoffen und zu einer gestörten Magnesium- und Kalzium-Aufnahme. Ob auch toxische Effekte bei Erreichen des Aluminium-Pufferbereiches durch Freisetzung von Aluminium- und Schwermetallionen eine Rolle spielen, konnte bisher noch nicht geklärt werden. Die in der Folge auftretenden Wurzelschädigungen, durch Sekundäreffekte wie Schwächeparasiten (Pilze) verstärkt, führen zu einer Vitalitätsschwächung und im Zusammenhang mit anderen Faktoren (Klima) zum Absterben der Bäume. Die durch die Forstbewirtschaftung bedingte interne Selbstversauerung (Reinbau von Baumarten mit schwer zuersetzlicher Streu bei Fichte, Kiefer, Lärche; Gewinnung von Blattheu, Streusamtversauerung) wird auf etwa 1/4 geschätzt [24, 25, 26, 27].

Eine endgültige Klärung aller Ursachen und Zusammenhänge liegt noch nicht vor, jedoch spricht vieles dafür, daß Schwefeldioxid und Stickoxide wichtige Faktoren für das Baumsterben sind.

3.4 Immissionsgrenzwerte

Auf der Basis des Bundes-Immissionsschutzgesetzes wurde 1974 die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) als Verordnung erlassen, die Grenzwerte für die wichtigsten Schadstoffe angibt. Bei der Novellierung 1983 wurden Grenzwerte z.T. verschärft, Verfahren zur Ermittlung der Immissionen wurden präzisiert und für einige Schadstoffe wie z.B. Blei und Cadmium wurden erstmalig Grenzwerte festgesetzt. Einige Immissionsgrenzwerte zeigt die Tabelle 2. Aufgrund der TA Luft und der ebenfalls 1983 novellierten Verordnung über Großfeuerungsanlagen werden für neue Kraftwerke und Industrieanlagen entsprechende Grenzwerte für die Emissionen festgelegt.

Bei ungünstigen Wetterlagen kann es dennoch in Ballungszentren zu Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte kommen. Dann kann die zuständige Behörde Smog-Alarm auslösen, der zur Beschränkung des Kraftverkehrs und des Betriebes von Industrieanlagen führen kann. Ein solcher Smog-Alarm – allerdings erst Voralarm der Stufe 1 – erfolgte erstmals für Teile des Ruhrgebietes am 17.1.1979.

Ähnliche Bedeutung wie die Immissionsgrenzwerte der TA Luft haben die Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung (Strl.Sch.V.) für die Strahlenbelastung aus kerntechnischen Anlagen. Sie betragen für den „Ganzkörper“, das Knochenmark und die Keimdrüsen 0,3 mSv (30 mrem), für die Knochen und die Haut 1,8 mSv (180 mrem) und für die Schilddrüse 0,9 mSv (90 mrem) pro Jahr.

Stoff	Einheit	TA Luft		Smog-Verordnung NRW		
		Langzeit-einwirkung	Kurzzeit-einwirkung	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Staubniederschlag	g/m ² /Tag	0,35	0,65			
Staubkonzentration	mg/m ³	0,15	0,30			
Schwefeldioxid SO ₂	mg/m ³	0,14	0,40	0,8	1,6	2,4
Stickstoffdioxid NO ₂	mg/m ³	0,08	0,30	0,6	1,2	1,8
Kohlenmonoxid CO	mg/m ³	10,0	30,0	30,0	60	90

Tab. 2:
Emissionsgrenzwerte für Luftverunreinigungen
 Smogalarm Stufe 1 bedeutet „Vorwarnung“, d.h. Vorbereitung auf Stufe 2.
 Bei Stufe 2 wird der Kraftfahrzeugverkehr zwischen 6.00-10.00 und 15.00-20.00 Uhr eingeschränkt, der Einsatz schwefelhaltiger Kohle- und Ölsorten ist verboten.
 Bei Stufe 3 wird der Kraftfahrzeugverkehr eingestellt, dazu kommen weitere Einschränkungen für Feuerungsanlagen.

3.5 Vergleich der Schadstoffbelastung bei verschiedenen Methoden der Energieerzeugung

Für eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Arten der Energieerzeugung wäre ein einheitlicher Maßstab erforderlich. Dieser existiert nicht, da er auch den

KKW Kernkraftwerk
 SKW Steinkohlekraftwerk
 BKW Braunkohlekraftwerk
 OKW Ölkraftwerk
 E Emissionen
 MI Maximale
 Immissionskonzentrationen an der
 ungünstigsten Stelle
 in der Umgebung des
 Kraftwerks
 (berechnet)

Grenzwert TA Luft bzw. Strl.Sch.V.	Kraftwerkstyp	KKW (Stade1974)	SKW	BKW	ÖKW	GKW
	Lastfaktor	0,92	0,44	0,83	0,75	0,75
140	SO ₂ E [1000 t/a] MI [µg/m ³]		21 230	36 130	22 120	0,3 ~0
2	F E [t/a] MI [µg/m ³]		130 1,5	480 1,8	13 0,07	—
100	NO _x E [1000 t/a] NO ₂ MI [µg/m ³]		5 60	15 60	9 50	7 50
30 180	Radioaktive Gase / Aerosole/ Tritium E [mCi/a] MI [$\frac{\text{mrem}}{\text{a}}$]	900/0,2/11 0,01	0,057 38			
90	Jod E [mCi/a] MI [$\frac{\text{mrem}}{\text{a}}$]	11 0,4				

Tab. 3:
 Schadstoffbelastung bei verschiedenen Kraftwerkstypen (Leistung 600 MW) nach^{[29], [16] und [17]}
 Die Balken geben die jeweilige maximale Immissionskonzentration MI im Vergleich zu den Grenzwerten der TA Luft bzw. der Strahlenschutzverordnung (Strl.Sch.V) an. Die maximale Strahlenbelastung in der Umgebung des KKW von 0,01 mrem/a ist als Ganzkörperbelastung auf den Grenzwert von 30 mrem/a zu beziehen; die Strahlenbelastung neben dem SKW von 38 mrem/a betrifft die Knochen und ist deshalb mit dem Grenzwert 180 mrem/a zu vergleichen.

Nutzen mit berücksichtigen müßte, und bereits in dieser Hinsicht sind etwa Heizungsanlagen, Kraftfahrzeuge und Kraftwerke nicht auf eine Nutzengröße zu reduzieren. Es ist aber möglich, etwa Otto- und Dieselmotoren zu vergleichen, wenn sie dem gleichen Zweck als Fahrzeugantrieb dienen. Ebenso kann man verschiedene Methoden der Stromerzeugung hinsichtlich ihrer Umweltbelastungen vergleichen.

In seinem Sondergutachten „Energie und Umwelt“ kam der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, der die Bundesregierung berät, im März 1982 zu folgenden Schlußfolgerungen^[28]:

- Unter umweltpolitischen Gesichtspunkten kann weder der Nutzung der Kohle noch der Kernenergie eine eindeutige Präferenz eingeräumt werden.
- Da jede der beiden Energiequellen Umweltbelastun-

gen oder -gefährdungen mit sich bringen kann, eignet sich keine von ihnen zur massiven Ausdehnung des Energieangebots.

- Auch die regenerativen Energiequellen sind nach dem derzeitigen Stand des Wissens ohne große Umweltbelastungen nicht in der Lage, Träger einer expansiven Angebotsstrategie zu werden.

Eine Übersicht über die Schadstoffbelastungen verschiedener Arten von Kraftwerken zeigt die Tabelle 3. Dort sind neben den emittierten Mengen die daraus resultierenden maximalen Konzentrationswerte (Immissionen) angegeben und zum Vergleich die Grenzwerte der TA Luft bzw. der Strahlenschutzverordnung. Für diese Zahlen könnte ein gemeinsamer Maßstab gebildet werden, wenn man annimmt, daß die Grenzwerte der TA Luft bzw. der Strahlenschutzverordnung die gleiche ge-

sundheitliche Bedeutung haben; d.h. beim Einwirken einer SO_2 -Konzentration von $0,14 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft über ein Jahr treten annähernd vergleichbare Gesundheitsschäden auf wie bei einer Strahlenbelastung von 30 mrem für ein Jahr. Diese Annahme berücksichtigt also nicht die unterschiedliche Art der Gesundheitsschäden. Ein Vergleich der in Tabelle 3 angegebenen SO_2 -Konzentration für ein Braunkohlekraftwerk ($130 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mit dem Grenzwert ($140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sowie der Strahlenbelastung durch das Kernkraftwerk Stade 1974 ($0,01 \text{ mrem}/\text{a}$) mit dem entsprechenden Grenzwert ($30 \text{ mrem}/\text{a}$) ergibt eine etwa 3000-fach höhere Belastung durch das Kohlekraftwerk. Zu einem ähnlichen Ergebnis (Kernkraftwerk etwa 1000-fach günstiger als ein Kohlekraftwerk) kommt man, wenn man untersucht, mit wieviel Kubikmetern reiner Luft man die Emissionen verdünnen muß, um die genannten Grenzwerte zu erreichen^[30]. Mit ähnlichen Methoden haben andere Autoren ähnlich große Unterschiede erhalten^[31, 32, 33].

Die Grundannahme für diesen Vergleich, nämlich die auch quantitativ vergleichbare Bedeutung der verschiedenen Immissionsgrenzwerte, ist nicht gesichert. Zudem reicht es nicht aus, nur die Kraftwerke zu berücksichtigen. Dabei wird die Kernenergie begünstigt, da beispielsweise die Wiederaufarbeitungsanlagen bei der Kernenergie ebenfalls zur Umweltbelastung beitragen.

	Todesfälle	Erkrankungen
Kohle	10 – 200	300 – 500
Öl	3 – 51	150 – 300
Gas	0 – 2	20
Uran	1 – 3	8 – 30

(10^{10} kWh ist etwa die jährliche Stromerzeugung einer Kraftwerkskapazität von 1400 MW)

Tab. 4:
Gesundheitsschäden durch eine Stromerzeugung von 10^{10} kWh bei verschiedenen Primärenergien in den USA, 1975^[34]. (Die Zahlen für Todesfälle enthalten auch tödliche Erkrankungen, vgl. Tab. 5).

In verschiedenen Studien, die vergleichende Untersuchungen zum Ziel hatten, wurde versucht, als Endergebnis nicht nur Immissionswerte mit Immissionsgrenzwerten zu vergleichen, sondern Zahlenwerte für Gesundheitsschäden zu erhalten. Dazu wurden die verfügbaren Kenntnisse aus zahlreichen epidemiologischen Studien und experimentellen Untersuchungen ausgewertet. Das Ergebnis einer Studie aus dem Brookhaven National Laboratory zeigt die Tabelle 4. Die Unterschiede sind hier nicht mehr so groß, weil die Emissionen aus den Brennstoffkreisläufen berücksichtigt sind (z.B. Wiederaufarbeitungsanlagen bei der Kernenergie, Raffinerien bei Öl), aber sie sind beachtlich. Gas zeigt sich neben der Kernenergie als ein sehr umweltfreundlicher Primärenergieträger.

Bei den Zahlen fällt auf, daß die Schwankungsbreite bei Kohle und Öl viel größer ist als bei Gas und Kernenergie. Dies liegt vor allem daran, daß die Kenntnisse über die tatsächlichen gesundheitlichen Auswirkungen der

Schadstoffe aus der fossilen Verbrennung wesentlich geringer sind als über die Wirkungen ionisierender Strahlung, die in den letzten Jahrzehnten außerordentlich intensiv untersucht worden sind.

4. Die Risiken verschiedener Energietechnologien

Bei einem Vergleich verschiedener Primärenergieträger, bei deren Nutzung zum Teil unterschiedliche Technologien angewandt werden, sind aber noch weitere Faktoren zu berücksichtigen, wenn man die gesundheitsschädlichen Auswirkungen umfassend darstellen will. Wenn man z.B. die Möglichkeit von Unfällen mit berücksichtigt, erhält man einen Risikovergleich.

4.1 Ein Risikovergleich Kohle-Kernenergie

Die Studie der Ford-Stiftung^[35], die die Kernenergiepolitik der Regierung Carter in den USA stark beeinflusst hat, untersucht im Kapitel 5 „Auswirkungen auf die Gesundheit“ die Gesundheitsrisiken durch Kernenergie und kohlebetriebene Stromerzeugung. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefaßt. Die einzelnen Zahlen beruhen zum Teil auf statistischen Erfahrungen (z.B. Unfälle im Bergbau, Kraftwerksbau und bei Transporten), zum anderen Teil auf Risikostudien (z.B. Schäden durch Kernkraftwerksunfälle) sowie auf epidemiologischen Studien (Gesundheitsschäden durch den Betrieb von Kohlekraftwerken).

	Kernenergie		Kohle	
	Tod. d. Unfall	tödliche Erkrankung	Tod d. Unfall	tödliche Erkrankung
Bergbau: Unfälle	0,20		0,50	
Bergbau: Bestrahlung		0,06 Beschäftigte 0,08 Umgebung		
Erzaufbereitung		0,03 Beschäftigte 0,02 Umgebung		
Erzrückstände in 100 Jahren		0,20 (reduzierbar) (0,01)		
Transporte	0,01	0,01	0,55-1,3	
Kraftwerksbau		0,10		0,05
Kraftwerksbetrieb		0,09 Umgebung 0,15 Beschäftigte		18-50 (1,8-5 mit Entschwefelg.)
Kraftwerk, Unfälle	0,002 (1)*	0,021 (10)*		
Wiederaufarbeitung		0,004 Beschäftigte 0,02 Umgebung 0,08 global (Kr-85)		
Summe	0,31	0,75	1,1-1,85	18-50

*extrem pessimistische Werte, vgl. Text

Tab. 5:
Vergleich der Risiken von Kern- und Kohlekraftwerken in den USA. Leistung der Anlagen 1000 MW_e , Lastfaktor 70%, Gesundheitsschäden in einem Jahr.

Bei der Kernenergie stammen die Zahlen in der Zeile „Kraftwerke, Unfälle“ aus der Rasmussen-Studie^[36] zum Vergleich sind in^[35] außerdem extrem pessimistische Werte angegeben, die mit Sicherheit unrealistisch hoch sind. (Wären sie richtig, müßte es bereits bei der gegenwärtigen Zahl von ca. 300 Kernkraftwerken jedes Jahr etwa 7 Kernschmelzunfälle geben). Ein großer Anteil an Gesundheitsschäden wird durch die Erzurückstände verursacht, die auf Halden gekippt werden und aus denen durch Erosion insbesondere Radon in die Umgebung getragen wird. Durch Abdecken der Halden läßt sich dieser Wert leicht und ohne großen Kosten reduzieren.

Bei den Gesundheitsschäden durch Kohlekraftwerke wirkt sich zunächst einmal bei den Unfällen im Bergbau und beim Brennstofftransport die große Menge an Kohle (2 Mio. t Steinkohle gegenüber 30 t Kernbrennstoff) aus. Die Auswirkungen des Kraftwerksbetriebes lassen sich durch Rauchgasentschwefelung verringern.

Leider gibt es bisher keine vergleichbare Studie für die Bundesrepublik Deutschland. Eine solche Studie müßte z.B. berücksichtigen, daß das bei uns eingesetzte Uran aus verschiedenen Ländern importiert wird, daß Transportrisiken hier evtl. eine andere Größe haben, daß für eine deutsche Wiederaufarbeitungsanlage andere Emissionsbegrenzungen gelten als in den USA und vor allem die Tatsache, daß in den USA Steinkohle weitgehend im Tagebau abgebaut wird und nicht im Untertage-Bergbau. Allein dieser letzte Unterschied ändert die Risikozahlen bereits erheblich: Für ein 1000-MW_e-Kraftwerk, das mit deutscher Steinkohle gefeuert wird, muß (bei einem Lastfaktor von 70%) jährlich mit zwei tödlichen Unfällen im Bergbau gerechnet werden^[37].

4.2 Risikovergleich alternativer Energieerzeugungstechnologien

Bisherige Betrachtungen beschränkten sich auf den Vergleich von fossilen Primärenergien mit Kernenergie, wobei auf die Frage des Materialbedarfs für die Anlagen selbst und der damit verbundenen Risiken nicht eingegangen wurde. Dies erklärt sich daraus, daß sich der Materialbedarf für fossile Kraftwerke und für Kernkraftwerke nicht so wesentlich unterscheidet.

Einen Schritt weiter ging eine Untersuchung, die im Jahre 1978 von H. INHABER, Mitarbeiter des kanadischen AECB (Atomic Energy Control Board)^[38] veröffentlicht wurde. Die Studie erfaßte zum ersten Male auch neue Energietechniken, wie Sonnen- und Windkraftwerke. Ebenso werden die Risiken beim Bau der Anlagen selbst und bei der Herstellung der erforderlichen Materialien mit in die Betrachtung einbezogen.

Die Ergebnisse der INHABER-Studie fanden auf der einen Seite in der Öffentlichkeit große Beachtung; auf der anderen Seite wurden sie jedoch auch einer ausführlichen Kritik unterzogen und insbesondere von HOLDREN^[39] scharf angegriffen. Im Verlauf der Auseinandersetzung wurden von INHABER einzelne Aussagen, die er als Fehler anerkannt hat korrigiert^[40, 41]; die Risikowerte der untersuchten Techniken änderten sich dabei

bis um das Achtfache. Seine grundsätzliche Aussage über die Reihenfolge der einzelnen Techniken bei der Risikobewertung wurde dadurch jedoch nicht berührt.

Im folgenden soll die Vorgehensweise derartiger umfassender Risikountersuchungen am Beispiel einer neueren Arbeit aus dem Jahre 1980 von BLACK und NIEHAUS^[42] aufgezeigt werden. Dieser Risikovergleich basiert zwar auf der INHABER-Studie, die Autoren nahmen jedoch einige wesentliche Änderungen bei den Annahmen vor.

Kurzbezeichnung	Stromerzeugungssystem*)
Kohle	Steinkohlekraftwerk (USA-Bauweise); schwefelarme Kohle (0,5% S) oder entsprechende Rauchgasentschwefelung
Öl	Ölkraftwerk (USA-Bauweise; Öl mit 0,2% Schwefelgehalt bzw. Rauchgasentschwefelung)
Erdgas	Erdgaskraftwerk (USA-Bauweise)
Kernenergie	Kraftwerk mit Leichtwasserreaktor (USA-Bauweise)
Sonne	Solar-Tower-Kraftwerk (Standort: Südwesten USA)

*) Angenommene Lebensdauer aller Anlagen: 30 a

Tab. 6: Zusammenstellung der in^[42] betrachteten Stromerzeugungssysteme

Betrachtet wurden von ihnen fünf Energietechniken (Tabelle 6). Bei den ersten drei Techniken handelt es sich um fossil gefeuerte Kraftwerke in der in den USA derzeit üblichen Bauweise. Daneben steht ein Kraftwerk mit einem Leichtwasserreaktor, dessen Bauart und Daten ebenfalls dem derzeitigen Stand der Technik in den USA entsprechen. Zum Vergleich dient ein Solarkraftwerk nach dem Solar-Tower-Konzept. Als Standort der Solaranlage wurde der Südwesten der USA gewählt. Gegenüber der INHABER-Studie veränderten BLACK und NIEHAUS in ihrer Analyse die Lebensdauer der Energiesysteme, die sie alle gleich lang ansetzten, sowie die Wahl des Standortes der Solaranlage und ihre Einbindung in das öffentliche Netz. Im Gegensatz zu INHABER wurde nämlich nicht unterstellt, daß für die Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen konventionelle Back-Up-Systeme erforderlich sind, die die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen des Energieangebots ausgleichen und deshalb mit in die Risikobetrachtung einbezogen werden müssen.

Die Risiken der Energieversorgungsanlagen bestehen darin, daß beim Bau und beim Betrieb beteiligte Personen und auch Dritte Schaden erleiden können. Unterschieden wird dabei zwischen dem Risiko zu erkranken und dem Risiko getötet zu werden. Dritte kommen im wesentlichen infolge der Emissionen der Energietechniken und der Emissionen bei den Prozessen zur Herstellung der benötigten Baustoffe für die Energieanlagen zu Schaden.

Die Risikobetrachtung schließt alle diese Stationen des Baus und des Betriebes ein; ausgehend von der Gewinnung der Rohstoffe, der Fertigung der Bauteile, der Anlagenmontage, den Betriebs- und Wartungsarbeiten,

der Gewinnung und Bereitstellung des Brennstoffes bis hin zur Entsorgung der Kernkraftwerke. Die Produktions- und Unfallstatistiken weisen für fast jeden dieser Arbeitsschritte Erkrankungen und Todesopfer aus, so daß darüber das statische Risiko einer Energieversorgungstechnik bestimmt werden kann. Mangelndes Wissen besteht jedoch in der Abschätzung der gesundheitlichen Folgewirkungen der Emissionen der einzelnen Anlagen, die bisher noch nicht ausreichend erfaßt und bekannt sind.

Als gemeinsamer Maßstab für alle diese Risiken wird die Einheit „ausgefallene Arbeitstage“ gewählt. Während die Erkrankungen statistisch so ausgewiesen sind, wurde die Anzahl der Todesopfer auf den gleichen Maßstab umgerechnet, indem sie mit der restlichen Lebensarbeitszeit eines 35-jährigen (6000 Arbeitstage) bewertet wurden.

Soweit verfügbar, berücksichtigen BLACK und NIEHAUS auch deutsche Statistiken über Arbeitsunfälle. Das Ergebnis ihrer Untersuchung ist in Abbildung 5 dargestellt. Von der Reihenfolge her werden Erdgas- und Kernkraftwerke als die Techniken mit den niedrigsten Risiken ausgewiesen, während Kohle- und Ölkraftwerke ein wesentlich höheres Risiko bedingen. Das relativ hohe Risiko der Sonnenenergienutzung liegt im Unfallrisiko bei Bau und Wartung der Anlagen und im Materialeinsatz für den Bau. Der spezifische Materialbedarf (t/kWh) ist im Vergleich zu Wärmekraftwerken wegen der kleineren Einheitsgrößen der Sonnenanlagen um ein mehrfaches größer, und die Risiken bei Gewinnung und Transport dieser Materialien (Stahl, Zement usw.) tragen zum Gesamtrisiko der einzelnen Technologien bei.

Die in Abbildung 5 gezeigten Ergebnisse können nicht als endgültig gesichert gelten. Immerhin sind sie in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen eines internationalen Symposiums aus dem Jahr 1981^[43]. Die Wissenslücken über die gesundheitlichen Folgen der verschiedenen Emissionen und die Schwierigkeiten beim Finden eines gemeinsamen Maßstabes für alle Risiken sind so groß, daß die in der Abbildung gezeigten Werte trotzdem nur als Zwischenergebnis derartiger Untersuchungen gelten können. Deshalb erscheint es auch nicht verwunderlich, daß eine weitere im Jahre 1980 durchgeführte Untersuchung^[44] zu einer anderen Bewertung der Risiken von Kohle- und Ölkraftwerken sowie von Kernkraftwerken kommt. Darin wird – im Gegensatz zur überwiegenden Mehrheit sonstiger Studien zu diesem Thema – die Kernenergie relativ pessimistisch beurteilt, während bei den fossilen Energietechnologien optimistische Werte in die Berechnung eingehen. Bei Kohle- und Ölkraftwerken ergibt sich gegenüber den in Abbildung 5 gezeigten Werten eine Reduktion durch die veränderte Berechnung des SO₂-Risikos und durch die Annahme einer geringeren Bevölkerungsdichte an den Kraftwerkstandorten. Die Risikoerhöhung bei den Kernkraftwerken dagegen resultiert aus der doppelt so hohen Bewertung der Todesfälle mit „ausgefallenen Arbeitstagen“ sowie der willkürlichen Annahme von vierfach höheren Risikofaktoren der radioaktiven Emissionen.

Obwohl ein vollständiger Risikovergleich der Energiesysteme noch für kein Land existiert, machen die ersten hier vorgestellten Untersuchungen deutlich, daß letzt-

endlich jede Technik mit Risiken sowohl für den einzelnen als auch für die Allgemeinheit behaftet ist. Ein Vergleich enthält dabei immer gewisse Bewertungen – z.B. beim Vergleich tödlicher Unfälle mit tödlichen Erkrankungen oder bei der Umrechnung in ausgefallene Arbeitstage – die nicht allein durch die Wissenschaft entschieden werden können. Für die Beurteilung und Entscheidung ist schließlich die Abwägung von Risiko und Nutzen erforderlich.

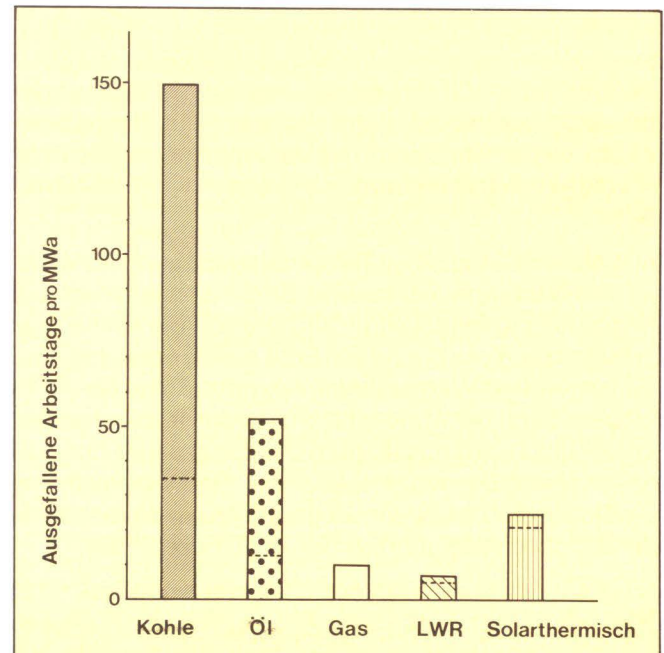


Abb. 5: Risikowerte verschiedener Stromerzeugungstechniken nach ^[42]

5. Die Wärmebelastung der Atmosphäre

Bei Energieumwandlungsprozessen sind technische Verluste nicht zu vermeiden, vor allem aber ist aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik die Umwandlung von Wärmeenergie in andere Energieformen grundsätzlich nur teilweise möglich. Letzten Endes wird auch jede Nutzenergie in Wärme umgesetzt.

Die Abwärme von Kraftwerken wird entweder direkt in Flüsse oder über Kühltürme in die Atmosphäre eingeleitet. Für die (wirtschaftlichere) Flußwasserkühlung gelten relativ enge Grenzen für die Wärmebelastung der Fließgewässer, die in der Bundesrepublik Deutschland weitgehend ausgeschöpft sind, so daß Wärmekraftwerke heute in der Regel mit Kühltürmen ausgestattet werden müssen. Deren Wirkung auf die Umwelt ist gering und allenfalls in nächster Umgebung gerade noch nachweisbar^[45]. Gesundheitsschäden aus dieser Ursache können ausgeschlossen werden.

Eine andere Frage ist die nach der längerfristigen Wirkung auf das Klima der Erde, insbesondere, wenn man an das Wachstum der Weltbevölkerung und den daraus resultierenden wachsenden globalen Energiebedarf denkt. Gegenwärtig ist die von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Energie etwa 10 000 mal so groß wie der Energieverbrauch. Lokal wird jedoch von Großstädten

pro km² schon ebenso viel Energie abgegeben, wie von der Sonne eingestrahlt wird; im Ruhrgebiet beträgt die anthropogene Energiefreisetzung ca. 1/10 der Sonneneinstrahlung, und das führt bereits zu lokalen oder regionalen Änderungen.

Eine globale starke Zunahme des Energieverbrauchs könnte zu globalen Klimaänderungen mit unabsehbaren Folgen führen. Die mittleren Temperaturen in Mitteleuropa sind heute nur etwa 4° höher als während der letzten großen Eiszeit. Man schätzt, daß bei einer globalen anthropogenen Energiefreisetzung bis zu 1 % der Sonneneinstrahlung noch keine klimatischen Effekte auftreten. Das wäre 100 mal so viel, wie die Menschheit gegenwärtig verbraucht. Falls der weltweite Energieverbrauch weiter wie bisher mit Verdoppelungszeiten von 14 Jahren wächst, würde diese Grenze in 100 Jahren erreicht.

Im gleichen Sinne einer Temperaturerhöhung wirkt das bei der Verbrennung fossiler Stoffe entstehende und freigesetzte Kohlendioxid (CO₂). Es läßt die kurzwellige Lichtstrahlung der Sonne zur Erde durch, behindert aber die langwellige Wärmeabstrahlung der Erde. Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre ist in den letzten hundert Jahren um 10 % angestiegen. Dazu trug außer der Nutzung fossiler Brennstoffe auch die Rodung tropischer Urwälder bei. Die gegenwärtige CO₂-Konzentration von ca. 330 ppm steigt jährlich um etwa 1 ppm¹⁾ an^[46].

Die genaue Auswirkung des „Treibhauseffektes“, d.h. der Erwärmung der irdischen Atmosphäre durch Anstieg der CO₂-Konzentration, ist nicht bekannt. Bei einer zukünftig weitgehend auf fossile Brennstoffe (d.h. Kohle) gestützten globalen Energiewirtschaft könnte – auch bei einer nur mäßigen Zunahme des Verbrauchs von 2,8 % pro Jahr – eine Verdoppelung des CO₂-Gehalts um die Mitte des nächsten Jahrhunderts erreicht werden und dies könnte nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnisse zu einer mittleren globalen Temperaturerhöhung von 3°C führen. Die Temperaturerhöhung würde allerdings nicht gleichmäßig erfolgen: an den Polen wäre sie am größten (+ 9°C am Nordpol), am Äquator am geringsten (+ 1,5°C)^[47]. Dies würde mindestens teilweise zum Abschmelzen der arktischen Eismassen führen und damit zu einer Erhöhung des Meeresspiegels um mehrere Meter. Die Folgen der Klimaänderung allein für die Welt ernährung sind bisher nicht abzusehen^[48]; wenn solche Entwicklungen innerhalb von Jahrzehnten stattfinden, haben die Ökosysteme keine Zeit, sich entsprechend anzupassen.

Der Wärmehaushalt der Erde könnte also eher durch die ausgedehnte Nutzung von Kohle und das damit freigesetzte CO₂ als durch anthropogene Freisetzung von Wärmeenergie beeinflusst werden.

6. Zusammenfassung

Die Beurteilung von Umweltbelastungen, die beim Menschen Gesundheitsschäden hervorrufen, ist nicht ganz einfach, weil die Kenntnisse über die gesundheitsschädlichen Auswirkungen der verschiedenen Schadstoffe teilweise mangelhaft sind. Am besten bekannt sind die Wirkungen ionisierender Strahlung, während die Wirkung der chemischen Schadstoffe aus fossiler Verbrennung bisher weniger erforscht sind. Auch bei Berücksichtigung dieser Unsicherheiten läßt sich jedoch feststellen, daß – zumindest bei gegenwärtigen modernen Feuerungsanlagen – Kohle und Öl recht große Belastungen hervorrufen, während Gas und Kernenergie sehr gut abschneiden; Sonnen- und Windenergie liegen wegen ihres großen Materialbedarfs dazwischen.

Betrachtet man die einzelnen Verbrauchssektoren, so stellt man fest, daß Haushalte und Kleinverbraucher sowie vor allem der Verkehr einen wahrscheinlich vergleichbaren Anteil zur Umweltbelastung liefern wie die großen Emittenten Industrie und Kraftwerke.

Gemessen am Kriterium „Beeinflussung des Klimas“ sind am besten die regenerativen Energiequellen Sonne und Wind, weil sie keine zusätzlichen Beiträge zur Wärmebelastung der Atmosphäre liefern. Die Kernenergie ist mittelmäßig, während die fossilen Energieträger wegen der CO₂-Emission sich am stärksten auswirken.

Für Entscheidungen, welche Primärenergieträger und Technologien für die Energieerzeugung eingesetzt werden sollen, ist deren Umweltbelastung oder Risiko ein wichtiges Kriterium; es kann aber nicht das einzige sein. Rohstoffvorräte, technischer Entwicklungsstand, Wirtschaftlichkeit und – wie die z.T. erregte Diskussion um die Kernenergie zeigt – soziale und politische Nebenwirkungen müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Es gibt keine Patentlösungen; alle Technologien und Primärenergieträger haben Vor- und Nachteile. Wichtig ist eine möglichst günstige Kombination, um Versorgungssicherheit, Umweltfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit so weit wie möglich sicherzustellen.

Literatur

- [1] CLAUSSEN, T.: Die Bedeutung biologischer Indikatoren für die Luftreinhaltung. Umwelt, 1980, Nr. 6, S. 601-606
- [2] OBERBACHER, B., GÜNTHER, R., HARTWIG, S.: Untersuchungen über technische, organisatorische und gesellschaftliche Voraussetzungen für Risikostrategien im Bereich technologischer Entwicklungen. Zwischenbericht 300/1. Umweltbelastung durch die Stromerzeugung auf Basis Kohle, Heizöl und Kernenergie. Bafelle-Institut e.V., Frankfurt 1976
- [3] DOLINSKI, U., ZIESING, H.-J.: Sicherheits-, Preis- und Umweltaspekte der Energieversorgung. Hrsg. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Duncker & Humblot, Berlin 1976
- [4] Jahresbericht 1977 der Landesanstalt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1978
- [5] BRIMBLECOMBE, P.: ...von den spitzen Ecken der Atome. Umwelt, 1979. Nr. 1, S. 38-41
- [6] Air Pollution and Health. Summary and Report on Air Pollution and its Effect on Health by the Committee of the Royal College of Physicians of London on Smoking and Atmospheric Pollution. London, Pitman Medical and Scientific Publishing Co. Ltd. 1970

¹⁾ ppm = ein Teil auf eine Million (part per million)

- [7] WILKENS, E.T.: Air Pollution and the London Fog of December 1952. *Journal of the Royal Sanitary Institute*, London. Vol. 74 (1953), S. 1-15
- [8] ULMER, W.T.: Wirkung von SO₂ in der Atemluft. In: *Kraftwerk und Umwelt*, 1977, S. 43-50. VGB-Dampftechnik GmbH, Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften. Essen 1977
- [9] FORCK, B.: Stand der Rauchgasentschwefelung – Trend der Entwicklung. In: *Kraftwerk und Umwelt* 1981, VGB-Dampftechnik GmbH, Essen 1981, S. 75-81
- [10] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Luftreinhaltung '81. Entwicklungs – Stand – Tendenzen*. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1981
- [11] Bundesministerium des Innern (Hrsg.): *Was Sie schon immer über Luftreinhaltung wissen wollten*. W. Kohlhammer, Stuttgart 1983
- [12] *Frankfurter Rundschau*, 12. Juli 1983
- [13] SCHLIPKÖTER, H.-W.: Bewertung der Grenzwerte von Immissionen aus medizinischer Sicht. Kongreß „Energie und Umwelt“ 1977 in Düsseldorf. Kongreßbericht S. 100-105. Vulkan Verlag, Essen 1977
- [14] Stickstoffdioxid potenziert SO₂-Schäden. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Bd. 31 (1978), S.25
- [15] SCHILLING, H.-D. Die Wirbelschichtfeuerung in der Feuerungstechnik – Stand und Aussichten. *Chemie-Ingenieur-Technik*, Bd. 5 (1983), Nr. 3, S. 185-194
- [16] Bewertung der Strahlenexposition in der Umgebung von Steinkohlekraftwerken und Vergleich mit der Strahlenexposition durch Kernkraftwerke. Unterrichtung des Deutschen Bundestages durch die Bundesregierung vom 22.12.1981. Bundestags-Drucksache Nr. 9/1247
- [17] *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Jahresbericht 1980*. Bundesministerium des Innern, Bonn. Ebenso frühere Ausgaben des jährlich erscheinenden Berichts.
- [18] BONKA, H. et al.: Zukünftige radioaktive Umweltbelastung in der Bundesrepublik Deutschland durch Radionuklide aus kerntechnischen Anlagen im Normalbetrieb. Bericht Jül-1220, Kerforschungsanlage Jülich 1975
- [19] BRÄUTIGAM, K.-R., HALBRITTER, G.: Radiological Impact from Model Coal-Fired Power Plants and from Nuclear Systems. *European Nuclear Conference* 1979. Vol. 31 of the *American Nuclear Society Transactions*. La Grange Park, Illinois, 1979
- [20] Mitteilung des Umweltbundesamtes 1984
- [21] HERRMANN, K.: Immissionsminderungsmaßnahmen und ihre Effektivität. *Umwelt*, 1979, Nr. 2, S. 118-121
- [22] Was Sie schon immer über Auto und Umwelt wissen wollten. Umweltbundesamt. Berlin 1980, S.37
- [23] LIKENS G., WRIGHT, R.f., GALLOWAY, J.N., BUTLER, TH.J.: Saurer Regen. *Spektrum der Wissenschaft*. Dezember 1979, S.72-78
- [24] Saurer Regen und Forstschaden. Eine Dokumentation des Gesamtverbandes des Deutschen Steinkohlenbergbaus, Februar 1982
- [25] Immissionsbelastungen von Waldökosystemen. Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen, Frühjahr 1982
- [26] PRINZ, B.; KRAUSE, G.H.M. und STRATMANN, H.: Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. LIS-Bericht Nr. 28. Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Essen 1982
- [27] BIEHL, H.M., FÜHR, F., HUBER, W., PAPKE, H.: Symposium „Saurer Regen – Waldschäden“. Tagungsbericht, Kernforschungsanlage Jülich, Projektträgerschaft für Umweltchemikalien, April 1983
- [28] *Energie und Umwelt. Schlußfolgerungen und Empfehlungen des Sondergutachtens des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen*, März 1981. Umweltbrief 23, Bundesminister des Innern, Bonn 1981
- [29] MÜLLER, A. Umweltbeeinflussung durch Kraftwerke. Vortrag beim Journalisten-Seminar am 5.7.1977 im GKSS- Forschungszentrum. Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt GmbH. Geesthacht 1977
- [30] SCHIKARSKI, W.: Konventionelle und nukleare Energiewandlung – Auswirkungen auf die Umwelt. *Atomwirtschaft*, Bd. 23, Heft 12 (1978), S. 524-532
- [31] LAVE L.B.: Health Effects of Electricity Generation from Coal, Oil and Nuclear Fuel. In: *Energy and the Environment, a Risk-Benefit Approach*. Hrsg. Ashley H., Rudman, R.L. Whipple, C., Pergamon Press. New York 1976
- [32] COMAR, C.L., SAGAN, L.A.: Health Effects of Energy Production and Conversion. *American Review of Energy*. 1976, S. 581-600
- [33] SAUERMAN, P.F.: Fossile und nukleare Stromerzeugung – Vergleich der Umweltbelastung durch Ableitung von Schadstoffen mit der Abluft. Interner Bericht. Kernforschungsanlage Jülich 1979
- [34] HAMILTON, L.D., MANNE, A.S.: Health and economic costs of alternative energy sources. In: *Nuclear Power and its Fuel Cycle, Proceedings of an International Conference*, Salzburg 2-13 May 1977. Vol. 7, S. 73-93. IAEA, Wien 1977
- [35] *Nuclear Power. Issues and Choices*. Hrsg. Keeny. S.M. et al., Ballinger Publishing Company, Cambridge, Mass. 1977 Deutsche Ausgabe: *Das Veto. Der Atombericht der Ford-Foundation*. Frankfurt am Main. Umschau Verlag 1977
- [36] (Nureg 75/014). *Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in US Commercial Power Plants*. Report WASH-1400, U.S. Nuclear Regulatory Commission 1975
- [37] Ruhrkohle AG, persönliche Mitteilung
- [38] INHABER, H.: *Risk of Energy Production*. Atomic Energy Control Board, Ottawa, Ontario, 1978
- [39] HOLDREN, J.P. et al.: *Risk of Renewable Energy Sources: A Critique of the Inhaber-Report*. Energy and Resources Group. University of California, Berkely, Juni 1979
- [40] INHABER, H.: *Nuclear News*, Vol. 22. Mai 1979, S. 26-28
- [41] INHABER, H.: Risiken der konventionellen und nichtkonventionellen Energiequellen. Vortrag anlässlich der „Energiekonferenz 1979“ der Landesregierung Baden-Württemberg. Stuttgart, 5.12.1979
- [42] BLACK, S.C., NIEHAUS, F.: Comparison of risks and benefits among different energy systems. *Proceedings of the International Workshop on „Energy/Climate Interactions“*, Münster, März 1980. In: Bach, W., Pankrath, J., Williams, J. (Editors): *Interactions of Energy and Climate*, Reidel Publishing Co., Dordrecht, Boston
- [43] *Health Impacts of different Sources of Energy*, *Proceedings of a Symposium organized by WHO, UNEP and IAEA at Nashville, Tenn., 22-26 June 1981*. Wien, IAEA 1982
- [44] TEUFEL, D., LEOBEN, S., SCHOFF, W.: Vergleichende Abschätzung der Risiken bei der Erzeugung von Strom aus verschiedenen Primärenergieträgern. Vorstudie: Analyse der Inhaber-Studie. IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Heidelberg, 1980
- [45] SCHNEIDER, W.: Die Beeinflussung von Wetter und Klima durch Wärmekraftwerke. In: *Aktuelle Themen der Kernenergie*. Bericht Jül-Conf-24. Kernforschungsanlage Jülich 1981
- [46] BACH, W.: Gefahr für unser Klima – Wege aus der CO₂-Bedrohung durch sinnvollen Energieeinsatz. C.F. Müller, Karlsruhe 1982
- [47] MANABE, S., STOUFFER, R.J.: Sensivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 85 (C 10) (1980), p. 5529-5554
- [48] A. VOLZ (Ed.): Studie über die Auswirkungen von Kohlendioxidemissionen. Bericht Jül-1877. Kernforschungsanlage Jülich 1983

Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland

Manfred Kleemann und Michael Meliß

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

1. Einleitung

Neben den fossilen und nuklearen Energieträgern Kohle, Öl, Gas, Uran und Thorium stehen für die Energieversorgung der Welt sogenannte „regenerative“, d.h. erneuerbare Energieströme zur Verfügung^[1]. Der Begriff der Unerschöpflichkeit gilt zwar nicht im streng physikalischen Sinn, wohl aber gemessen an menschlichen Zeitmaßstäben. Diese anthropogen nutzbaren Energieströme entspringen drei grundsätzlich unterschiedlichen Primärquellen: dem Isotopenzerfall im Erdinneren, der Planetenbewegung und der thermonuklearen Umwandlung in der Sonne. Versuche, die regenerativen Energiequellen zu erschließen, gibt es seit Menschengedenken, aber nur eine der Quellen trägt heute in nennenswertem Umfang zu Energiebedarfsdeckung der Bundesrepublik Deutschland bei: die Wasserkraft. Andere, wie z.B. Windenergie oder biochemische Energie in Form von Brennholz haben ihre frühere Bedeutung eingebüßt.

Die Diskussionen um die Begrenztheit fossiler und nuklearer Energievorräte und die Umweltauswirkungen der zu ihrer Nutzung erforderlichen Technologien haben das Interesse an den unerschöpflichen Energiequellen wieder verstärkt. Für die Bundesrepublik Deutschland eröffnet die weltweite Nutzung regenerativer Energiequellen dreierlei Möglichkeiten:

- Ergänzende Energiebereitstellung im eigenen Land
- Energieimport aus der EG und Drittländern
- Technologieexport.

2. Die drei regenerativen Energiequellen und die Energiebilanz der Erde

Die drei primären Quellen

Abbildung 1 zeigt die nutzbaren regenerativen Energieströme und die sie hauptsächlich bestimmenden drei Primärquellen. Eine eindeutige Zuordnung ist jedoch nicht immer möglich, da die dem Menschen zugänglichen Energieströme u.U. aus mehreren primären Quel-

len gespeist werden. Dies mag das Beispiel der oberflächennahen Wärme der Erdkruste verdeutlichen, die teils aus dem durch Temperaturdifferenzen im Erdinneren hervorgerufenen Energiestrom, zum überwiegenden Teil jedoch aus der Energieeinstrahlung von der Sonne auf die Erdoberfläche resultiert.

Die Energieströme der Sonnenenergie

Wie ein Blick auf das Energieflußbild der Erde (Abbildung 2) zeigt, ist von den primären Quellen die Strahlung aus dem Weltall, die nahezu vollständig aus solarer Strahlung besteht, die weitaus größte: Ihr Energiestrom beträgt $1,9 \times 10^{14}$ (bzw. 190 Billionen) t SKE/a* und überwiegt damit die geothermische Energie um fast den Faktor 10000, die aus der Planetenbewegung resultierende Gezeitenenergie sogar fast um den Faktor 100000. Aus diesem Grunde sind im Energieflußbild der Erde die von der Solarstrahlung hervorgerufenen Energieströme jeweils auf die solare Einstrahlung bezogen.

Ein recht großer Teil der Strahlung wird im kurzwelligen Bereich unmittelbar an der Atmosphäre oder aber der Erdoberfläche reflektiert. Etwa 30 % der solaren Einstrahlung gehen als sogenannte Albedo damit der terrestrischen Nutzung verloren.

Etwa 22 % der Einstrahlung werden benötigt, um die Prozesse der Verdunstung von Wasser aufrechtzuerhalten. Durch die regional unterschiedliche Einstrahlung auf die Erdoberfläche bilden sich globale Temperaturunterschiede aus, die teilweise durch entsprechende Bewegungen der Atmosphäre und der Hydrosphäre ausgeglichen werden. Etwa 2,5 % der solaren Einstrahlung halten diese Ausgleichsprozesse aufrecht und speisen damit Wind, Wellen und Meereströmungen. Die Installation von Meereswellenkraftwerken wäre bei uns zwar prinzipiell möglich, könnte jedoch auf der gesamten Küstenlänge des Landes von etwa 250 km nur ein theoretisches Leistungspotential von 3,6 GW*) bereitstellen. Ange-

*) 1 t SKE entspricht dem Energieinhalt von 1 t Steinkohle

* 1 GW = 1 Mio kW
* 1 MW = 1000 kW

sichts der mehr als 80 GW derzeit installierten Kraftwerksleistung in der Bundesrepublik und den mit der Meereswellennutzung verbundenen Umwelteinflüssen, Energiespeicherungs- und -transportproblemen ist ein nennenswerter Beitrag zur Energieversorgung aus dieser Energiequelle nicht zu erwarten.

Nur etwa 0,003 % der solaren Einstrahlung sind im Energiepotential des Laufwassers enthalten und können hier mit Hilfe von Wasserkraftwerken genutzt werden. Eine Spezialform solcher Kraftwerke sind die sogenannten Gletschereiskraftwerke, die am Fuße von Gletschern gelegen aus deren Schmelzwasser gespeist werden sollen. Auch solche Gletschereiskraftwerke sind in der Bundesrepublik Deutschland nicht einsetzbar.

0,1 % der solaren Einstrahlung dient auf dem Wege der Photosynthese der Kohlenstofffixierung in Pflanzen. Diese Biomasse kann mit verschiedenen Konversionstechnologien in Sekundärenergie umgewandelt werden. Nur eine Kumulation dieses Biomassenproduktionsprozesses über Millionen von Jahren hat die fossilen Energievorräte der Erde entstehen lassen, von denen die Menschheit heute zum überwiegenden Teil abhängt. Wie Abbildung 2 zeigt, strahlt die Sonne der Erde allerdings Jahr für Jahr mehr als das 10-fache an Energie zu, als diese selbst in Form von Öl-, Kohle- und Gasressourcen enthält.

Der überwiegende Teil der solaren Einstrahlung, nämlich 45%, wird in Form von Niedertemperaturwärme (Umweltwärme) in der Atmosphäre und der Erdoberfläche gespeichert. In den äquatornahen warmen Ozeanen könnte diese Energie beispielsweise mit Hilfe von Meereswärmekraftwerken in elektrische Energie umgewandelt werden. Auch diese Technologie entfällt allerdings für eine Nutzung in unserem eigenen Lande. Hier kann die Umweltwärme nur mit Hilfe von Wärmepumpen genutzt werden.

Die natürlichen Vorgänge der Umwandlung solarer Strahlung und Speicherung in Form von Wärme können

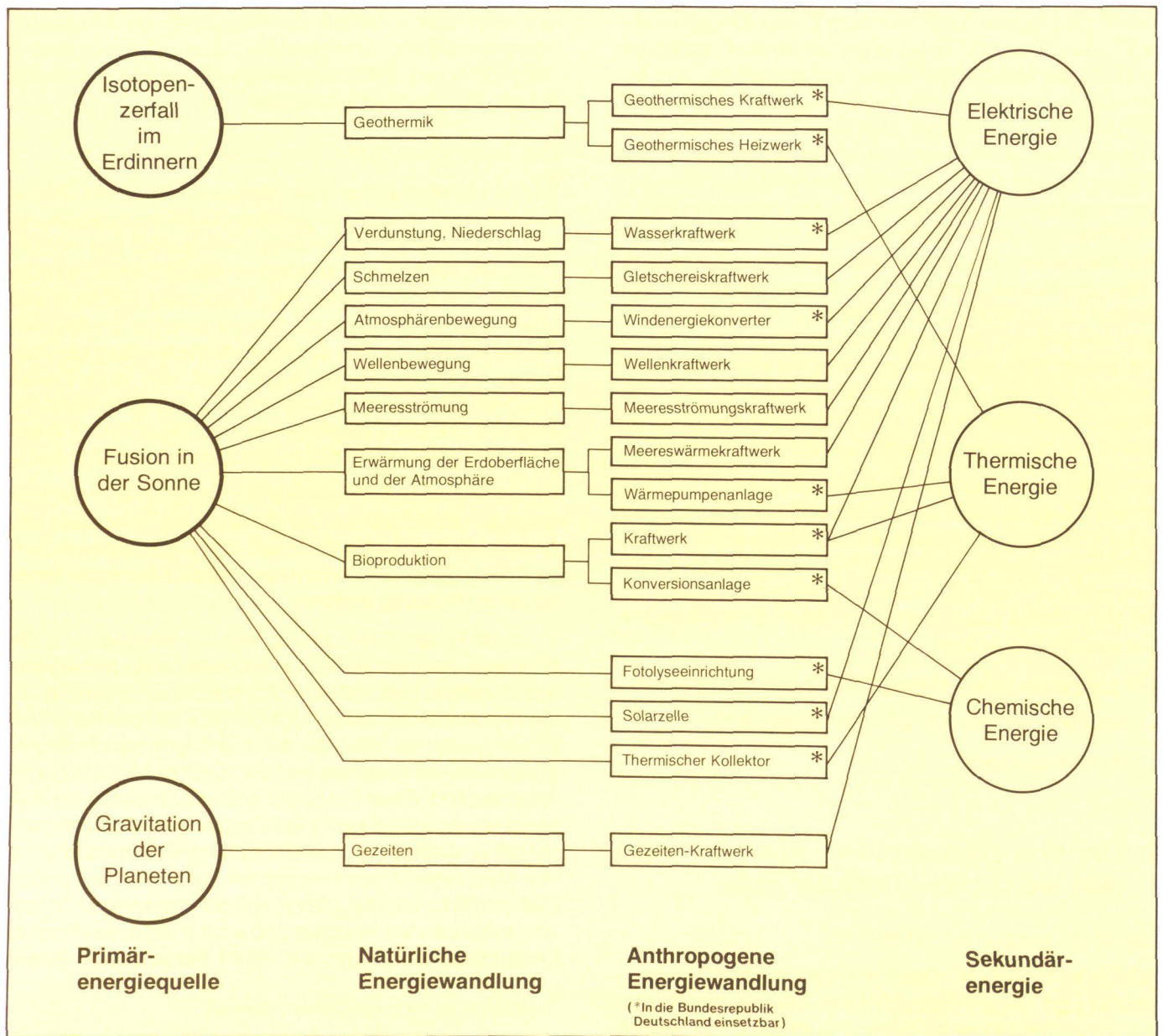


Abb. 1: Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energiequellen

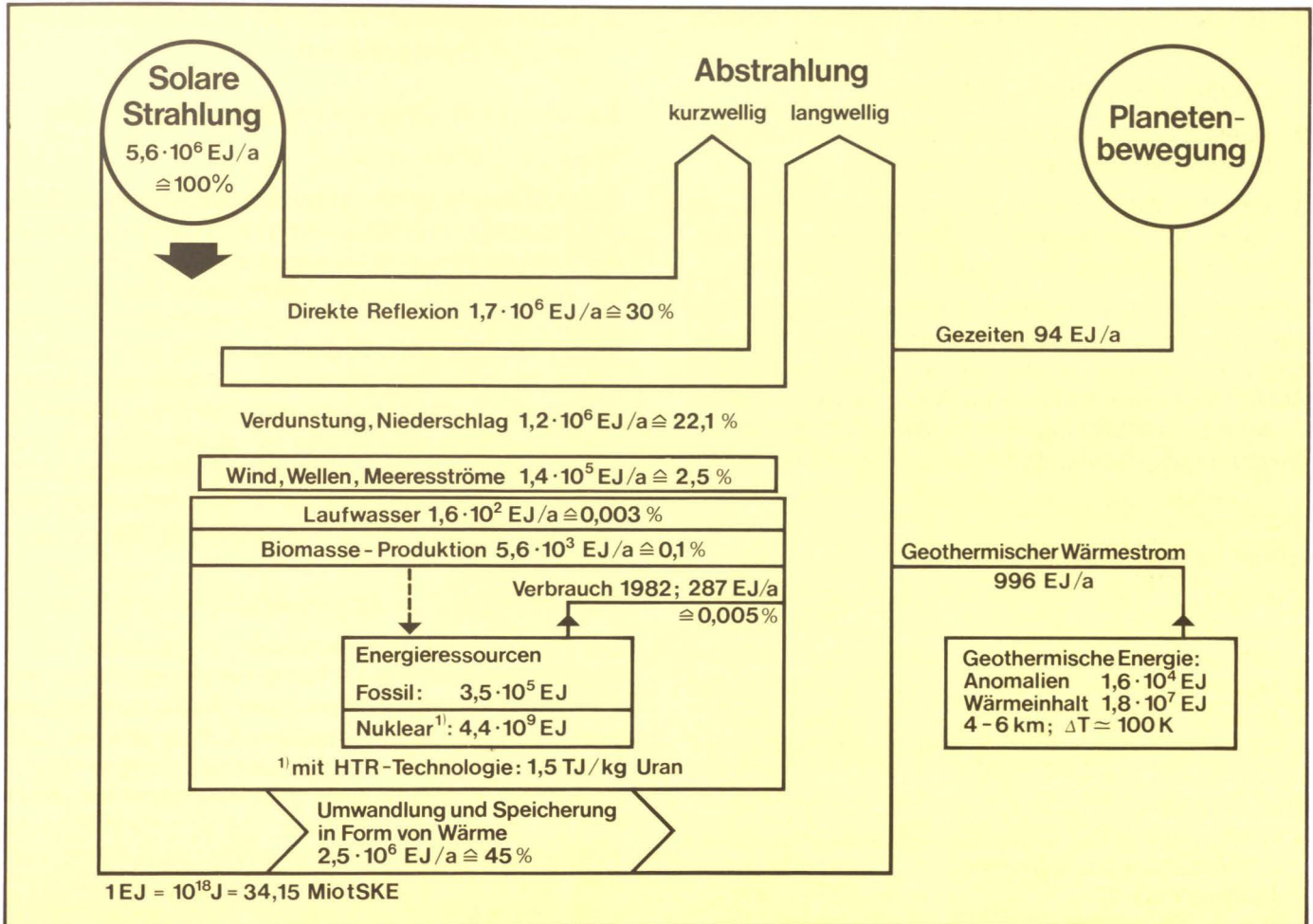


Abb. 2: Energieflußbild der Erde

auch unmittelbar durch technische Einrichtungen vorgenommen werden. Solche thermischen Kollektoren können in sehr einfacher Form Niedertemperaturwärme für viele Anwendungszwecke bereitstellen. Durch entsprechende Konzentration der Solarstrahlung sind sie darüber hinaus in der Lage, auch Hochtemperaturwärme bis zu mehreren 1000 °C anzubieten. Damit wird ihr Einsatz auch als Wärmeerzeuger in Kraftwerken möglich. Ein wirtschaftlicher Einsatz solcher Solarkraftwerke ist in unserem Lande jedoch wegen der geringen Verfügbarkeit direkter Solarstrahlung nicht zu erwarten.

Die auf die Erde treffende Strahlung kann jedoch auch mit Hilfe von photovoltaischen Energiewandlern unmittelbar in elektrische Energie überführt werden. Derartige Solarzellen finden bereits seit vielen Jahren in der Welt- raumforschung ihr Einsatzgebiet. Da sie sowohl direkte als auch diffuse Strahlung nutzen können, sind sie technisch gesehen auch in der Bundesrepublik einsetzbar.

Die künstliche Zerlegung von Wasser durch Sonneneinstrahlung mit Hilfe technischer Photolyseeinrichtungen befindet sich noch derart im Stadium der Grundlagenforschung, daß nicht erwartet werden kann, daß diese Technologie bis zum Ende des Jahrhunderts einen nennenswerten Beitrag zur Energieversorgung unseres Landes leisten wird.

Der Erdwärmestrom

Zerfallsprozesse im Erdinnern führen dort zu Tempera-

turen von einigen tausend Grad. Auf Grund der Temperaturdifferenz zur Erdoberfläche ergibt sich ein ständiger Wärmestrom, der im Mittel 63 kW/km^2 beträgt. Für die Bundesrepublik Deutschland ergibt sich daraus ein Geothermie-Potential von 17 Mio. t SKE/a. Weitaus größer ist der nichtregenerative Vorrat geothermischer Energie in Form von in der Erde gespeicherter Wärme. Würde man nur die Wärme der ersten 7 km dicken Erdschicht in unserem Lande bis auf 80 °C nutzen können, so entspräche dies einem Energieäquivalent von 3400 Mrd. t SKE.

Die Gezeitenenergie

Die Massenanziehungskraft und die Bewegung der Planeten führt auf der Erde zu periodischen Änderungen der Meeresoberflächen, den sogenannten Gezeiten. Wegen der geringeren zur Verfügung stehenden Tidenhöhen (im Mittel 2,7 m) ist diese Energiequelle für die Bundesrepublik Deutschland nicht nutzbar. Weltweit bestehen Installationsmöglichkeiten für Gezeitenkraftwerke in der Größenordnung von weniger als 200 GW_e.

Nutzungsmöglichkeiten für die Bundesrepublik Deutschland

Von den in Abbildung 2 größenordnungsmäßig dargestellten drei regenerativen Energiequellen, deren Technologien in Abbildung 1 aufgelistet sind, erscheinen für

die Bundesrepublik Deutschland nur folgende einsetzbar:

1. Geothermische Kraft- und Heizwerke
2. Direkte Nutzung der solaren Strahlung durch Niedertemperaturkollektoren und Solarzellen
3. Indirekte Nutzungsmöglichkeiten der Sonnenenergie durch Wasserkraftwerke, Wärmepumpen, Windenergiekonverter und Biokonversionsanlagen.

Allen diesen Technologien, bis auf die Wasserkraft, ist ein Charakteristikum eigen, das ihren Einsatz außerordentlich erschwert: Die niedrige Energiedichte. Wie aus Abbildung 3 ersichtlich wird, erreichen die regenerativen Energiequellen Leistungsdichten, die nur Bruchteile derjenigen Energieträger, die heute zu unserer Energiever-

Niedrige Energiedichte

- | | | |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| • Wellen | ≤ 100 | kW/m^2 |
| • Solarstrahlung | $\leq 1,35$ | kW/m^2 |
| • Windenergie | ≤ 3 | kW/m^2 |
| • Gezeitenenergie | $\approx 0,002$ | kW/m^2 |
| • Biomassenproduktion | $\approx 0,0002$ | kW/m^2 |
| • Geothermischer Wärmestrom | $\approx 0,00006$ | kW/m^2 |

Zum Vergleich:

- | | | |
|--|---------------|-----------------|
| • Kohle
(im Verbrennungsraum eines Kraftwerkes) | ≈ 500 | kW/m^2 |
| • Kernenergie
(im Brennelement eines Kraftwerkes) | ≈ 650 | kW/m^2 |

Abb. 3: Vergleich der Energiedichten regenerativer Energiequellen mit konventionellen Energieträgern

sorgung eingesetzt werden, ausmachen. Die Konsequenz aus einer geringen Energiedichte liegt in der Notwendigkeit großer Einrichtungen zur Sammlung und zur Umwandlung der Energie. Derartige Anlagen erfordern daher in der Regel hohe Investitionskosten, was die Wettbewerbssituation der regenerativen Energiequellen entscheidend beeinflusst.

Bis auf die geothermische Energie zeichnen sich darüber hinaus alle regenerativen Energiequellen durch ein weiteres gemeinsames Merkmal aus: die zeitliche Schwankung des Energieangebots. Derartige zeitabhängige Schwankungen machen bei der Nutzung von regenerativen Energiequellen den Einsatz von Speichersystemen und/oder Zusatzenergiesystemen notwendig, was sich ebenfalls negativ auf die Wirtschaftlichkeitssituation niederschlägt.

3. Nutzungstechnologien in der Bundesrepublik Deutschland

3.1 Direkte Nutzung solarer Strahlungsenergie

Passive Solarnutzung

Unter diesem Schlagwort versteht man architektonische und bautechnische Maßnahmen im Wohnungsbau, die die Energiebilanz des Hauses durch stärkere Nutzung der Solarstrahlung positiv beeinflussen. Solche in der Regel von verstärkten Wärmedämmmaßnahmen begleiteten Techniken sind z.B. die Ausrichtung des Gebäudes mit der Hauptfensterfront nach Süden oder aber die Umgestaltung der Häuser zu sogenannten „Wohn-Gewächshäusern“, die mit Hilfe von außerordentlich großen Glasflächen dem eigentlichen Wohnhaus eine künstliche Umgebung verschaffen. Die dadurch gewonnenen Energiebeiträge können erheblich sein.

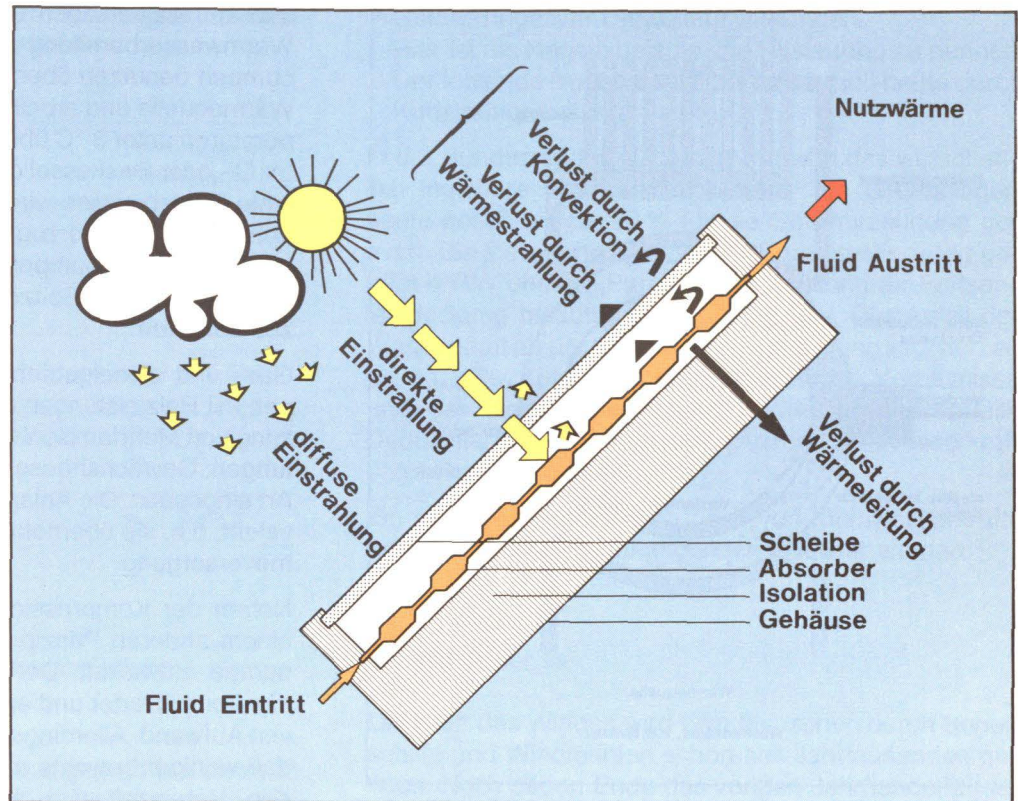
Thermische Niedertemperaturkollektoren

Die heute in der Bundesrepublik eingesetzten solarthermischen Systeme zur Niedertemperaturwärme-Bereitstellung werden im allgemeinen als Flachkollektoren ausgeführt. Abbildung 4 zeigt den Aufbau eines solchen Kollektors, der direkte und diffuse Strahlung in Wärme umwandelt. Dies geschieht durch Aufnahme der Strahlung im sogenannten Absorber, von dem die Wärme mit Hilfe eines Wärmeleitmediums abtransportiert wird. Verluste des Absorbers auf der Vorderseite werden durch eine oder mehrere transparente Abdeckungen verringert. Verluste der Rückseiten und Seitenteile werden durch entsprechend dicke Isolation praktisch verhindert. Die Ausgestaltung von Flachkollektoren variiert in weiten Grenzen und beeinflusst den Wirkungsgrad erheblich. Die vom Niedertemperaturkollektor bereitgestellte Nutzwärme wird darüber hinaus von meteorologischen Einflüssen und der Art der Kollektorverwendung wesentlich beeinflusst. Während sorgfältig ausgelegte Kollektoren Wirkungsgrade von mehr als 70 % erreichen können, fällt der Systemwirkungsgrad als mittlerer Jahreswirkungsgrad z.B. beim Einsatz zu Heizzwecken in der Bundesrepublik leicht weit unter 10 %, wenn die Systeme nicht sorgfältig optimiert werden.

Die meisten der heute in der Bundesrepublik Deutschland installierten Solaranlagen dienen der Bereitstellung von Brauchwasser und der Erwärmung von Schwimmbädern. Nur vereinzelt werden Anlagen auch zu Heizzwecken in den Übergangszeiten eingesetzt. Die technische Entwicklung ist hier jedoch noch nicht abgeschlossen. Sogenannte hocheffiziente Kollektoren, die speziell für den Einsatz in weniger sonnenbegünstigten Ländern entwickelt werden, könnten neben den Brauchwasserbereichen verstärkt auch im Heizungsbereich oder bei der Bereitstellung niedertemperaturiger Prozeßwärme eingesetzt werden.

Obwohl heute allein in der Bundesrepublik Deutschland mehr als 100 Unternehmen Kollektoranlagen auslegen, bauen und vertreiben und obwohl erhebliche öffentliche Mittel in die Erforschung und Erprobung von Solaranlagen zur Wärmebereitstellung geflossen sind, gibt es praktisch keine Anlagen zur Schwimmbaderwärmung,

Abb. 4: Aufbau und Funktionsweise eines typischen Sonnenkollektors für solare Warmwasseranlagen



Brauchwasserbereitstellung oder Heizung, die nach strengen betriebswirtschaftlichen Maßstäben mit den herkömmlichen Wärmebereitstellungsanlagen konkurrieren können.

Solarzellen (Photovoltaische Wandler)

In Solarzellen erfolgt eine direkte Umwandlung der solaren Strahlung in elektrischen Strom. Für die Ausgestaltung dieses nahezu idealen Energiewandlers kommen viele Materialien, Aufbauformen und Herstellungsarten in Betracht. Die heute überwiegend eingesetzten Solarzellen sind die aus einheitlichem Basismaterial bestehenden einkristallinen und polykristallinen Siliziumzellen. Unter hohem Energieaufwand wird bei der Herstellung der Einkristall aus der Schmelze gezogen (ca. 1400 °C), zersägt und weiterbearbeitet. Die ursprünglich ausschließlich in der Weltraumforschung eingesetzte Zelle konnte daher wegen der hohen Qualitätsanforderungen im Laufe ihres „Lebens“ nicht die Energiemenge bereitstellen, die man zu ihrer Produktion aufwenden mußte. Für terrestrische Anwendungen ist diese Energiebilanz mittlerweile allerdings längst positiv. Dies gilt insbesondere für die weiterentwickelten Zellen aus multikristallinem oder amorphem Silizium, die weniger aufwendige Herstellverfahren erfordern.

Solarzellengeneratoren weisen aber relativ geringe Wirkungsgrade von weniger als 10 % auf. Die Herstellungskosten entsprechend großer Sammlerflächen sind heute noch so hoch, daß für übliche Einsatzzwecke konventionelle Energiesysteme um den Faktor 10 bis 20 billiger sind als Solarzellengeneratoren. Lediglich für Sonderzwecke, wie das Versorgen abgelegener Meßstationen, Leuchtbojen etc., sind kleinere Anlagen schon sinnvoll einsetzbar.

3.2 Nutzung der Umweltwärme durch Wärmepumpen

Solare Umweltwärme ist in großen Mengen mit allerdings geringem Temperaturniveau in folgenden Medien gespeichert:

- Umgebungsluft
- Erdreich
- Grundwasser
- Flüssen und Seen.

Die Umgebungsluft ist generell verfügbar, allerdings sinkt im Winter die Temperatur so tief, daß eine Nutzung nicht mehr möglich ist. Das Erdreich kann dagegen ganzjährig Wärmeenergie abgeben. Die Nutzungsmöglichkeiten der Erdreichwärme sind allerdings eingeschränkt, weil die notwendigen Grundstücksflächen nicht überall vorhanden sind. Die Wärme des Grundwassers kann zwar ganzjährig genutzt werden, aber es tritt nicht überall in der gewünschten Menge auf, und darüber hinaus sind von Seiten der Wasserschutzbehörden rechtliche Restriktionen zu erwarten. Die Nutzung der Umweltwärme in Flüssen und Seen ist geographischen und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Neben der Umweltwärme wird auch versucht, Abwärme aus industriellen Prozessen mit Hilfe von Wärmepumpen zu nutzen.

Eine Wärmepumpe hat die Aufgabe, das für die Raumheizung zu niedrige Temperaturniveau der Umweltwärme anzuheben. Wie eine Kompressionswärmepumpe funktioniert, zeigt die Abbildung 5.

Die Kompressionswärmepumpe besitzt einen thermodynamischen Kreislauf, der aus Verdampfer, Verdichter, Kondensator und Drossel besteht. Im Kreislauf zirkuliert

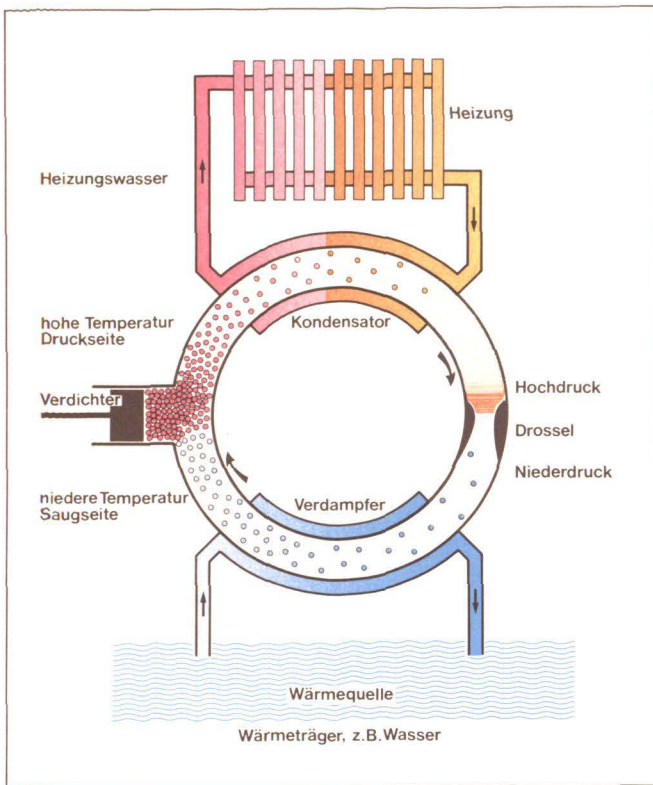


Abb. 5: Prinzipskizze einer Wärmepumpe

ein spezielles Fluid, ein Kältemittel, das die Eigenschaft hat, bei sehr niedrigen Temperaturen zu verdampfen.

Die Umweltwärme wird der Umgebung durch den Verdampfer entnommen, wobei das Kältemittel verdampft. Der mit der Umweltwärme beladene Kältemitteldampf wird dann im Verdichter auf das gewünschte Temperaturniveau angehoben, indem elektrische Antriebsenergie in Wärme umgewandelt und an den Dampf übertragen wird. Der Wärmeinhalt des Dampfes, bestehend aus Umweltwärme und umgewandelter Antriebsenergie, wird im Kondensator an das Heizungswasser abgegeben. Der Dampf kondensiert dabei zu flüssigem Kältemittel. In der Drossel wird dann der vom Verdichter erzeugte Druck abgebaut, so daß der Anfangszustand im Kältemittel wieder erreicht ist und der Kreislauf wieder von neuem beginnen kann.

Die Entnahme der Umweltwärme erfolgt über einen Wärmetauscher, der entweder gleichzeitig der Verdampfer ist, oder der über einen Zwischenkreislauf den Verdampfer mit Wärme versorgt. Eine interessante Form des Luftwärmetauschers stellt das sogenannte Energiedach dar. Hier bildet der Wärmetauscher gleichzeitig das Dach des Hauses. Dies kann architektonisch sehr gut gelöst werden. Der Vorteil des Energiedaches ist, daß der Wärmeinhalt der Luft und des Regens genutzt werden können und darüber hinaus noch die Energie der Sonnenstrahlen.

Elektromotorisch betriebene Kompressionswärmepumpen werden derzeit überwiegend in privaten Haushalten zur Raumheizung und zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Die ca. 30 Hersteller von Wärmepumpen in der Bundesrepublik konzentrieren sich auf den Leistungsbe- reich von 8 bis 20 kW Heizleistung für Einfamilienhäuser

und auf Kleinanlagen unter 5 kW Heizleistung für die Warmwasserbereitung. Die Raumheizungs-Wärmepumpen benutzen überwiegend die Umgebungsluft als Wärmequelle und arbeiten bivalent, d.h. bei Außentemperaturen unter 3 °C übernimmt ein zusätzlich installierter Öl- oder Gaskessel die Wärmeversorgung. Die bivalente Betriebsweise wird vom Elektrizitätsversorgungsunternehmen bevorzugt, weil hierbei die Stromversorgung der Wärmepumpen so gesteuert werden kann, daß keine zusätzliche Spitzenbelastungen des Gesamtnetzes auftreten.

Gas- und dieselgetriebene Kompressionswärmepumpen mit Heizleistungen über 100 kW werden zur Beheizung von Mehrfamilienhäusern, Bädern, Freizeiteinrichtungen, Gewächshäusern und größeren Gebäuden aller Art eingesetzt. Die Anlagen arbeiten in der Regel monovalent, d.h. sie übernehmen allein die ganzjährige Wärmeversorgung.

Neben der Kompressionswärmepumpe wird die nach einem anderen Prinzip arbeitende Absorptionswärmepumpe entwickelt. Der thermodynamische Prozeß ist hier komplizierter und erfordert einen höheren apparativen Aufwand. Allerdings ist als großer Vorteil zu nennen, daß weniger bewegte mechanische Teile benötigt werden. Vereinzelt wird die Absorptionswärmepumpe für kleine Heizleistungen bereits am Markt angeboten.

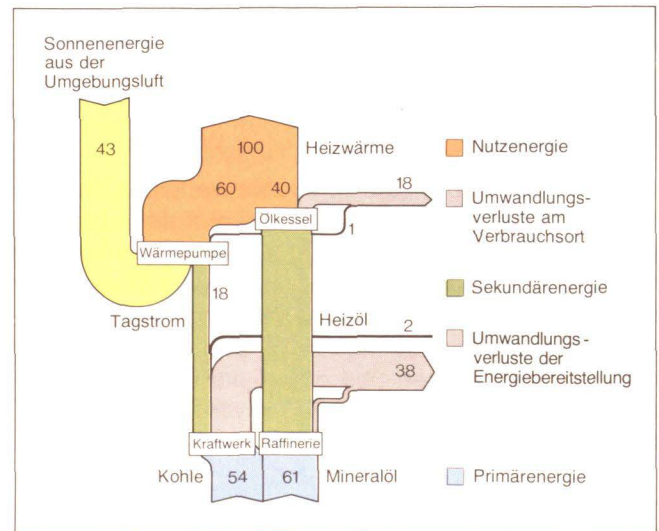


Abb. 6: Jahresenergiebilanz einer stromversorgten Luft-Wärmepumpe mit Ölzusatzheizung. (Die Heizwärme entspricht 100 %.)

Die Abbildung 6 zeigt die Jahresenergiebilanz für eine elektromotorisch betriebene Kompressionswärmepumpe. Die Umwandlungsketten von der Primärenergie bis zur Nutzenergie beim Endverbrauch sind hier mit berücksichtigt.

Die Abbildung zeigt, daß für eine Einheit bereitgestellter Wärme 1,05 Einheiten Primärenergie eingesetzt werden müssen. Das Verhältnis von Nutzenergie zu Primärenergie beträgt also 0,95. Man bezeichnet dieses Verhältnis als Primärenergienutzungsgrad.

Die folgende Tabelle zeigt den Primärenergienutzungsgrad für verschiedene Heizsysteme.

Heizungssysteme	Primärenergie-Nutzungsgrad
Elektrische Widerstandsheizung*	$\eta_p = 0,32$
Öl- oder Gasheizung	$\eta_p = 0,6-0,8$
Elektrisch betriebene Wärmepumpe*	$\eta_p = 0,85-0,95$
Öl- oder gasbetriebene Wärmepumpe	$\eta_p = 1,3$
Absorptionswärmepumpe	$\eta_p = 0,9-1,1$

* Kraftwerkswirkungsgrad von 32%

Tab. 1:
Primärenergienutzungsgrad verschiedener Heizsysteme

Der sehr gute Primärenergienutzungsgrad bei öl- oder gasgetriebenen Wärmepumpen ergibt sich durch die Abwärmenutzung.

Entscheidend für die Markteinführung der Wärmepumpe sind neben der Energieeinsparung die Kosten. Darauf wird in Kap. 4 noch eingegangen.

3.3 Wasserkraft

Die Wasserkraft ist die problemloseste und günstigste regenerative Energiequelle. Sie wird wie die Windenergie schon seit langem von der Menschheit genutzt. Im alten Ägypten waren Wasserräder und Schöpfräder bekannt und bei uns wurden Mühlen und Hammerwerke jahrhundertlang mit Wasserkraft betrieben.

Die besonderen Vorteile der Wasserkraft sind:

- niedrige Energiekosten
- ausgereifte Technologie
- für alle Leistungsbereiche gut geeignet
- lange Lebensdauer (bis 60 Jahre)
- leichte Speicherbarkeit durch Staudämme und Pumpspeicher
- Verbesserung der Wasserwirtschaft durch Staudämme
- sehr gut für Spitzenlast geeignet
- Schiffbarkeit der Flüsse durch Staustufen verbessert
- keine Schadstoffemission.

Der Vielzahl von Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile gegenüber:

- hohe Investitionen für bauliche Anlagenteile (Dämme, Schleusen, Stollen etc.)

- Gefahr negativer Umweltauswirkungen.
Hier ist als Negativbeispiel die Nilstauung zu nennen. Der fehlende fruchtbare Nilschlamm muß heute durch Kunstdünger ersetzt werden.

In der Bundesrepublik Deutschland wird das wirtschaftlich nutzbare Wasserkraftpotential für Großanlagen heute schon zu ca. 90 % für die Stromerzeugung genutzt. Die installierte Leistung für Grundlastdeckung beträgt 4 GW und die Pumpspeicherleistung für Spitzenlastdeckung beläuft sich auf ca. 5 GW. Der Anteil der Wasserkraft an der Gesamtstromerzeugung liegt derzeit bei ca. 4 %. Aufgrund der topografischen Verhältnisse und der dichten Besiedlung in der Bundesrepublik Deutschland sind dem weiteren Ausbau der Wasserkraft enge Grenzen gesetzt.

Ein gewisser Beitrag kann noch von Kleinwasserkraft-Anlagen im kW-Leistungsbereich erwartet werden.

3.4 Windenergie

Die Kraft des Windes wird vom Menschen durch Segelschiffe und Windmühlen schon seit Jahrtausenden genutzt. Noch gegen Ende des vorigen Jahrhunderts gab es z.B. in Norddeutschland ca. 15000 Windmühlen. Durch die Entwicklung des Verbrennungs- und des Elektromotors verlor der Wind als Antriebsenergie schnell an Bedeutung. Heute, im Zeichen steigender Energiepreise setzt wieder eine Rückbesinnung auf die Windenergie ein.

Eine sinnvolle Windenergienutzung ist nur dort möglich, wo die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit mindestens 4–5 m/s beträgt. Das ist besonders an der Nordseeküste der Fall, weil dort der Wind von der Seeseite her ungehindert anströmen kann. In küstenfernen Bereichen nimmt der Einfluß der Bodenreibung erheblich zu, so daß im Landesinneren nur noch exponierte Lagen der deutschen Mittel- und Hochgebirge eine ausreichende mittlere Windgeschwindigkeit aufweisen. Die windgünstigsten Flächen umfassen ca. 30000 km², also 12 % der Fläche der Bundesrepublik Deutschland.

Zur Beurteilung der Energieausbeute an einem bestimmten Standort sind darüber hinaus die Jahresenergie und die Flauten, das sind Windgeschwindigkeiten von weniger als 3 m/s, von Interesse. Für die mechanische Beanspruchung eines Windrades sind die turbulenten Spitzenböen maßgebend. Sie betragen eine Vielfache der Jahresmittelgeschwindigkeit. Die Tabelle 2 zeigt die Kenngrößen für einige Standorte^[7].

Die modernen Windenergiekonverter haben nur noch eine sehr geringe Ähnlichkeit mit den historischen Windmühlen. Abbildung 7 zeigt drei typische Bauformen der Leistungsklasse von 5-10 kW.

Die linke Anlage in der Abbildung 7 ist ein Vielflügler. Sie kann schon bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten anlaufen. Dieser Typ wird hauptsächlich zum Wasserpumpen in der Landwirtschaft eingesetzt. Die mittlere Anlage erzeugt Strom, was insbesondere im Falle von Wechselstrom eine genaue Regelung der Drehzahl



Abb. 7: Heute übliche Windenergiekonverter-Bauweisen

Standorte	Jahresmittelwert m/s	Maximalwert m/s	Flautendauer h/a	Jahresenergie kWh/m ² a
Norderney	7,1	45	2190	3500
Sylt	7,0	45	2450	3200
Hannover	3,9	40	6130	800
Kahler Asten	5,7	42	3850	1400
Gießen	2,2	33	8230	180
Karlsruhe	2,4	30	7790	280
Passau	1,9	33	8410	150

Tab. 2:
Kenndaten des Windenergieangebotes für ausgesuchte Standorte (Die Flautendauer gibt hier die Zeit an, in der die Windgeschwindigkeit kleiner als 5 m/s ist.)

durch Verstellung der Flügel erfordert. Damit dies bei allen Windgeschwindigkeiten auf effiziente Weise möglich ist, sind die Flügel wie Turbinenschaufeln nach modernen aerodynamischen Erkenntnissen gestaltet. Windenergiekonverter dieser Bauweise können noch bei wesentlichen höheren Windgeschwindigkeiten arbeiten als Vielflügler.

Auf der rechten Seite der Abbildung 7 ist eine Sonderbauform – ein sogenannter Vertikalachsenrotor – zu sehen. Der Vorteil dieser Bauweise ist, daß sie nicht in die Windrichtung gedreht werden muß wie die beiden anderen. Dieser Anlagentyp befindet sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium^[6].

Bemerkenswert ist noch die Größe der Windenergiekonverter. In der Leistungsklasse von 5 kW bis 10 kW erreichen sie Höhen von 10 bis 15 m.

Das zur Zeit wichtigste Projekt im Bereich der Windenergienutzung ist die im Versuchsbetrieb befindliche große Windenergieanlage GROWIAN an der Elbemündung^[11]. In der Abbildung 8 ist diese Maschine dargestellt. Die

Anlage hat bei einer Nabenhöhe von 100 m einen Rotor-durchmesser von 100 m mit einer Nennleistung von 3MW_e.

Windenergieanlagen dieser Größenordnung speisen in das elektrische Netz ein. Um aber z.B. die Jahresarbeit eines modernen Großkraftwerks zu ersetzen, sind ca. 600 Windenergiekonverter der GROWIAN-Klasse notwendig. Setzt man alle Anlagen nebeneinander, dann ergibt sich eine Kette von mindestens 60 km Länge.

Bei der Einspeisung von Elektrizität aus Windkraftanlagen muß entweder ein Speichersystem oder eine konventionelle Reserveleistung vorhanden sein. Speichersysteme für die hier in Frage kommenden Leistungen sind groß und teuer und können, wenn überhaupt, nur als Kurzzeitspeicher für wenige Stunden dienen. Diese Speicher werden bei überschüssigem Windangebot aufgeladen. Flauten kommen jedoch häufig großflächig und über Zeiträume von Tagen vor. In diesen Fällen müssen dann konventionelle Reservekraftwerke zugeschaltet werden, um die Stromversorgung aufrechtzuhalten.

3.5. Energie aus Biomasse

Man unterscheidet zwei wesentliche Verfahren zur Umwandlung von Biomasse in Nutzenergie oder Sekundärenergieträger. Die erste Gruppe umfaßt die thermochemischen Verfahren, die durch Hitzeeinwirkung umwandeln, und die zweite Gruppe enthält die biologischen Verfahren, die eine Umwandlung mit Hilfe von Mikroorganismen durchführen. Die Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Verfahren.

Holz, Stroh, Müll:

Eine Nutzung von Abfallbiomasse aus der Land- und



Abb. 8: GROWIAN (Großversuchsanlage)

Installierte elektrische Leistung	3 MW
Mittlere Jahresenergieausbeute	12 GWh
Spezifische Flächenleistung	380 W/m ²
Nenngeschwindigkeit	11,8 m/s
Anfahrgeschwindigkeit	6,3 m/s
Maximale Betriebsgeschwindigkeit	24 m/s
Nennrotordrehzahl	18,5 min ⁻¹
Rotordurchmesser	100,4 m
Nabenhöhe über Grund	100 m
Maschinenhausmasse mit Rotor	240 t
Betriebsgrundstück	ca. 800 m ²

Forstwirtschaft oder von Hausmüll ist in vielen Fällen sinnvoll, weil damit gleichzeitig das Abfallproblem gemindert wird. Aus wirtschaftlicher Sicht ist dabei wichtig, daß der Bergungs- und Transportaufwand nicht zu groß

Prozesse	Biomasse	Produkte
Thermochemisch		
Verbrennen	Holz, Stroh	Wärme
Vergasen	Holzrückstände	Schwachgas
Pyrolyse	Holz, Müll, Abfälle	Öl, Holzkohle
Biologisch		
Äthanol-Gärung	Zuckerrüben	Äthanol
Biogas-Fermentation	Tierdung, Abfälle	Biogas

Tab. 3:
Die wichtigsten Biokonversionsverfahren

werden. Besonders Holz und Stroh müssen in der Nähe des Standortes verarbeitet werden, weil sonst die Energiekosten zu hoch werden.

Die energetische Nutzung von Holz beträgt in der Bundesrepublik Deutschland heute ca. 3 Mio. m³/a (1982: 1,9 Mio. t/a). Dies entspricht etwa 0,2 % des Primärenergiebedarfs.

Äthanol

Die Produktion von Äthanol als Kraftstoffzusatz durch alkoholische Vergärung von Zuckerrüben, Kartoffeln und Weizen ist für die Bundesrepublik Deutschland kein gangbarer Weg. Für eine Produktion im großen Stil mit sogenannten Energieplantagen ist nicht genügend Land verfügbar. Darüber hinaus sind die Kosten voraussichtlich zu hoch.

Biogas

Aus Tierdung läßt sich durch anaerobe Fermentation in einem geschlossenen Behälter (Reaktor) Biogas gewinnen, das etwa den halben Heizwert des Erdgases hat. Dieses Biogas kann zum Heizen und Kochen verwendet werden. Das verbleibende Substrat ist ein hochwertiger geruchfreier Dünger.

In letzter Zeit wurden in der Bundesrepublik Deutschland auf Bauernhöfen und Großviehmästereien eine Reihe von Biogasanlagen installiert. Als Mindestgröße werden 25 Großvieheinheiten angegeben, weil der Energiepreis sehr stark mit sinkender Viehzahl steigt. Wirtschaftlichkeit wird erst oberhalb von 75 Großvieheinheiten erreicht.

Es bleibt abzuwarten, ob sich diese Technologie in der Bundesrepublik Deutschland bewährt.

3.6 Geothermie

Der geothermische Energiestrom, der aus der Temperaturdifferenz zwischen dem Erdinnern und der Erdoberfläche resultiert, liegt im Promillebereich dessen, was an solarer Strahlung im Jahresmittel die Bundesrepublik Deutschland erreicht: 63 kW je km² an geothermischem Wärmestrom verglichen mit 120 MW je km². Ein weitaus größeres, wenn auch nicht regeneratives Potential an Geothermie stellt der Wärmeinhalt der äußeren Lithosphäre dar: die Abkühlung der Gesteinsschicht zwischen 4 km und 6 km auf 130°C würde einem Äquivalent von weltweit 6,1 x 10¹⁴ t Steinkohleinheiten entsprechen.

Allein in der Bundesrepublik ist das entsprechende Energieäquivalent mehr als 2800 mal so groß wie der gesamte Primärenergiebedarf (360 Mio. t SKE). Eine Technologie, die mindestens einen Teil dieser geothermischen Energie zu nutzen gestattet, wird zur Zeit in den USA entwickelt (Hot-Dry-Rock Technologie). Eine Anwendung dieser Technologie zur Erzeugung von elektrischer Energie dürfte in unserem Lande jedoch aus wirtschaftlichkeitsgründen nicht möglich sein. Die mit öffentlichen Mitteln geförderten Forschungsbohrungen und

Explorationsvorhaben haben gezeigt^[2], daß die Bundesrepublik Deutschland eine Region ohne starke geothermische Anomalien ist. Als geothermische Anomalien bezeichnet man Regionen, die eine wesentlich höhere Temperatur haben, als der Durchschnittswert in der normalen Erdkruste. Meist handelt es sich hier um seismisch aktive Gebiete. Lediglich im Oberrheintalgraben und bei Urach/Württemberg weist unser Land geothermische Vorkommen auf, die eventuell zu Heizwärmezwecken genutzt werden können. Weltweit dürfte die derzeit installierte Kraftwerkskapazität von etwa 2600 MW_e in den bekannten Anomalien-Regionen (USA, Mexico, Italien, Neuseeland etc.) weiter ausgebaut werden. Auch die nicht elektrische Nutzung von heute etwa 8000 MW_{th} ist im Verhältnis zum Potential dieser Energiequelle verschwindend gering, sie wird jedoch ebenfalls weiter ausgebaut werden^[3]. Restriktionen ergeben sich bei der Nutzung geothermischer Energie jedoch stets aus den relativ kleinen nutzbaren Temperaturdifferenzen, die neben den Umweltbelastungen geothermischer Fluide durch feste, flüssige und gasförmige Beimengungen auch erhebliche Abwärmebelastungen der Umwelt hervorrufen.

4. Beurteilung der Einsatzchancen

4.1 Wirtschaftlichkeit

Vergleich mit konventionellen Technologien

Die regenerativen Energiequellen haben mit Ausnahme der Wasserkraft eine sehr geringe Energiedichte. Um nennenswerte Energiemengen nutzbar zu machen, ist ein großer flächendeckender Materialeinsatz notwendig. So muß man z.B. bei der Nutzung der Windenergie und der solaren Strahlung von einem 15 bis 25 mal größeren Materialeinsatz je erzeugter Energieeinheit im Vergleich zu den bisher eingesetzten fossilen und nuklearen Energietechnologien ausgehen. Die Unregelmäßigkeiten im Energieangebot (Flauten, fehlender Sonnenschein, saisonales Angebot von Abfallbiomasse etc.) führen dazu, daß man zur Erzielung einer kontinuierlichen Energieversorgung Speicher einsetzen oder Reservesysteme auf nichtregenerativer Basis vorhalten muß. Dies erhöht ebenfalls die Energiekosten.

Die Tabelle 4 vergleicht die Energiekosten für Biogas und Äthanol mit denjenigen für die heute gebräuchlichen Energieträger Erdgas und leichtes Heizöl^[13].

Energieträger	Kosten (DM/kWh)
Biogas (25 Großvieheinheiten)	0,17
Äthanol (aus Zuckerrüben, Kartoffeln, Weizen)	0,28
Erdgas	0,07
Heizöl	0,075

Tab. 4:
Kostenvergleich für regenerative und konventionelle Energieträger (Preisbasis 1983)

Im Bereich der Haustechnik führt der Einsatz regenerativer Energiequellen derzeit ebenfalls noch zu sehr hohen Kosten. Die Tabelle 5 zeigt die Kosten für die Warmwasserbereitung in einem Einfamilienhaushalt.

Warmwasserbereiter	Kosten (DM/kWh)*
Solaranlage mit 6 m ² Kollektorfläche und elektrischem Zusatzheizter	0,51
Kleinwärmepumpe (3 kW Heizleistung)	0,22
Konventioneller Gas-Durchlauferhitzer	0,09

* bezogen auf die Nutzenergie

Tab. 5:
Kostenvergleich für die Warmwasserbereitung in einem Einfamilienhaushalt (Preisbasis 1983)

Raumwärme im Haushaltssektor wird derzeit ebenfalls noch kostengünstiger mit konventionellen Technologien bereitgestellt, wie Tabelle 6 zeigt^[8,9,10].

Art der Bereitstellung	Kosten (DM/kWh)*
Bivalente Wärmepumpenheizung (9,5 kW) Ölheizung	0,21
	0,15

* bezogen auf die Nutzenergie

Tab. 6:
Kostenvergleich Wärmepumpe/Ölheizung ohne Verteilung für ein gut wärmegeprägtes Einfamilienhaus (Preisbasis 1983)

Hier bleibt noch anzumerken, daß die Wärmepumpe unter bestimmten Voraussetzungen nicht so ungünstig abschneidet wie in dem ausgewählten Beispiel. Sie kann in Einzelfällen durchaus an die Grenze der Wirtschaftlichkeit stoßen^[2]. Die Wärmepumpe ist gegenüber konventionellen Systemen umso mehr konkurrenzfähig, je höher der Raumwärmebedarf ist (z.B. schlecht isolierte Häuser, Mehrfamilienhäuser, große Nutzgebäude) und je günstiger die Umweltwärme entnommen werden kann.

Unter der Voraussetzung, daß man ein genügend großes Erdwärme-Reservoir zur Verfügung hat, lassen sich die Heizwärmekosten folgendermaßen abschätzen (Tabelle 7):

Art der Wärme	Kosten (DM/kWh)*
Geothermische Heizwärme	0,067
Fernwärme (Kohle)	0,045

* bezogen auf Nutzwärme

Tab. 7:
Kostenvergleich für Fernwärme aus Kohle und Erdwärme ohne Verteilung (Preisbasis 1983)

Interessant ist ein Vergleich der verschiedenen Stromerzeugungstechnologien auf der Basis regenerativer und konventioneller Energiequellen^[12,13].

Technologien	Kosten (DM/kWh)*
Solarzellen	6,00
Kleine Windkraftanlagen (10 kW)	0,50
Große Windkraftanlagen (MW-Bereich)	0,40
Wasserkraft (Grundlast)	0,06
Wasserkraft (Spitzenlast)	0,18
Geothermisches Kraftwerk	0,51
Holzvergaser	0,40
Heutige Großkraftwerke (1000 MW)	0,12
Dieselstation (0,5 MW)	0,25

* bezogen auf Strom am Kraftwerkszaun

Tab. 8:
Vergleich der Stromgestehungskosten (Preisbasis 1983)

Der Energiekostenvergleich in Tabelle 8 zeigt, daß beim heutigen Stand der Technik die regenerativen Energiequellen mit Ausnahme von Sonderfällen nicht wirtschaftlich sind. Dieser Zustand ist jedoch nicht für alle Zeiten festgeschrieben. Durch die zu erwartende Verknappung der konventionellen Energieträger wird sich die Kostensituation zugunsten der regenerativen Energietechnologien verschieben. Dazu kommen Serien- und Massenfertigungsvorteile bei einem größeren Markt, die sich günstig auf die Anlagenkosten auswirken werden. Insbesondere ist bei einigen Technologien durch Einführung neuer Materialien und Herstellungsverfahren eine Kostenreduktion zu erwarten. Damit ist klar, daß die regenerativen Energiequellen durchaus eine gewisse Chance für die Zukunft haben.

4.2 Möglicher Beitrag im Jahr 2000

Versucht man, die in der Bundesrepublik Deutschland einsetzbaren Technologien in Bezug auf ihre zukünftige Bedeutung zu analysieren, kann man aus der Verfügbarkeit der drei regenerativen Energiequellen ihr theoretisches Energiepotential bestimmen^[5]. Dies ist beispielsweise in Abbildung 2 für die ganze Welt geschehen. Aus dem theoretischen Potential kann unter Berücksichtigung von Wirkungsgraden der in Abbildung 1 aufgelisteten Technologien ein technisches Potential bestimmt werden. Die Einbeziehung der Kosten der regenerativen Energiesysteme und der Vergleich mit herkömmlichen Systemen läßt schließlich Aussagen zum wirtschaftlichen Potential zu. Da jedoch für viele regenerative Systeme genauere Angaben über ihre zukünftige Kostenentwicklung nicht möglich sind und auch die Zukunftsentwicklung von Kosten und Preisen konventioneller Energieträger mit großen Unsicherheiten behaftet sind, sind konkrete Angaben zum wirtschaftlichen Potential in der Regel nicht möglich. Anstelle einer Abschätzung des wirtschaftlichen Potentials kann man deshalb für Systeme, die nach allgemeiner Ansicht eine Chance haben, in den nächsten zwei Jahrzehnten in

größerer Zahl eingesetzt zu werden, ein sogenanntes Erwartungspotential angeben. Dieses Potential, das z.B. Markteinführungsgeschwindigkeiten und andere Restriktionen berücksichtigt, stellt die erwartete Ausschöpfung des wirtschaftlichen Potentials dar, die sich einstellen könnte, wenn die Systeme innerhalb des betrachteten Zeitraums wirtschaftlich konkurrenzfähig würden.

Abbildung 9 zeigt die so abgeschätzten Erwartungswerte für den Zeitraum um das Jahr 2000.

Für die jeweiligen Technologien sind dabei im oberen Balken die Art und Höhe der bereitgestellten Endenergie aufgeführt. Um diese unterschiedlichen Energien einheitlich zu bewerten, werden sie an Endenergieträgern gemessen, die sie hauptsächlich ersetzen (substituieren). Art und Höhe der Endenergiesubstitution ist im mittleren Balken angegeben. Trifft man Annahmen über Wirkungsgrad und Verluste von konventionellen Technologien, die eingesetzt werden müßten, wenn die regenerativen nicht zur Verfügung stünden, so läßt sich die Primärenergiesubstitution bestimmen (unterer Balken).

Die wesentlichen Annahmen und Randbedingungen, die zu den Zahlenwerten in Abbildung 9 führen, seien nachfolgend kurz erläutert.

Biokonversion

Das Erwartungspotential von 10 Mio. t SKE Primärenergieäquivalent umfaßt nur die Nutzung von Abfall- und Rückstandsbiomasse, die über einen heute schon existierenden statistisch weitgehend nicht erfaßten Beitrag zur Energieversorgung hinausgeht. Die wesentlichen Restriktionen für die energetische Nutzung von Holzabfällen, Überschußstroh, tierischen Exkrementen und Müllabfällen ergeben sich aus dem zu betreibenden Sammlungsaufwand und den damit verbundenen Kosten, sowie aus anderweitigen Nutzungsmöglichkeiten, z.B. der Verwendung von Stroh als Viehfutter und als organischem Dünger. Es wurde bewußt darauf verzichtet, die Arten und Mengen an Sekundärenergieträgern auszuweisen, da durch unterschiedliche Verfahren verschiedene Sekundärenergieträger erzeugt werden können. Lediglich die Nutzung von Tiermist und pflanzlichen Feuchtabfällen ist auf eine Vergärung zu Biogas beschränkt.

Ein Erwartungspotential von Biomasse aus Energieplantagen in Form von Wäldern, Ölpflanzen oder vergärbaren Früchten wurde nicht ausgewiesen, weil

- bisher nur in Brasilien Energieplantagen existieren (nicht übertragbare Bedingungen für die Bundesrepublik Deutschland),
- selbst dünn besiedelte Flächenstaaten wie USA, Kanada oder Schweden zunächst in Testplantagen Erfahrungen über ökologische Konsequenzen von großflächigen Monokulturen sammeln wollen,
- entsprechende Konversionstechnologien noch nicht großtechnisch erprobt sind,
- die Wirtschaftlichkeit unter den gegebenen Restriktionen und der geringen jahreszeitlichen Anlagenlastung zur Zeit in der Bundesrepublik Deutschland nicht gegeben erscheint,

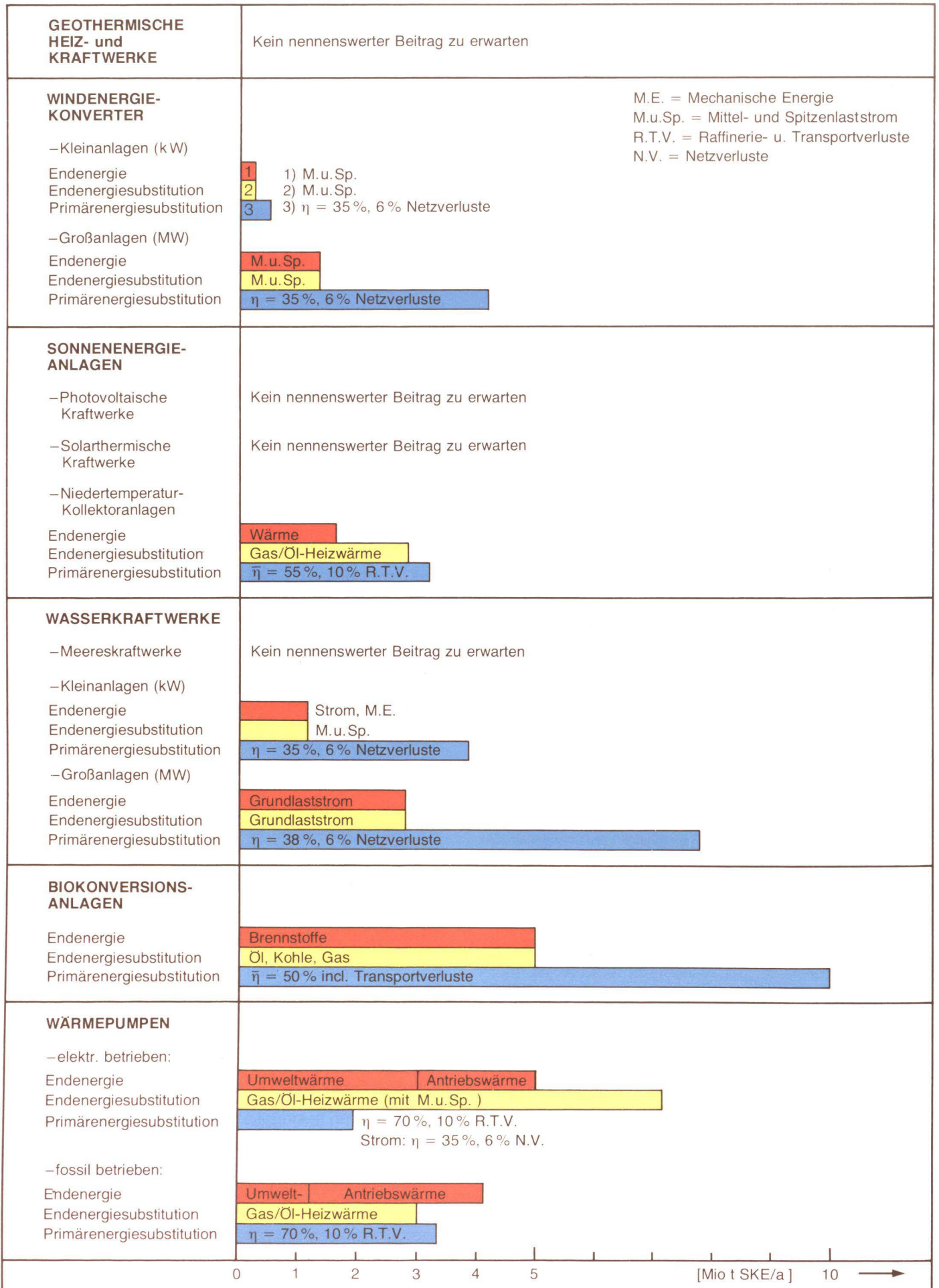


Abb. 9: Erwartungspotentiale der Systeme zur Nutzung regenerativer Energiequellen für die Bundesrepublik Deutschland um das Jahr 2000 (gerundete Werte)

- die benötigten Landflächen für einen großtechnischen Einsatz nicht zur Verfügung stehen,
- eine anderweitige Verwendung (z.B. Nahrungsmittel, Tierfutter, chemische Produkte) höhere Wertschöpfungen erwarten läßt als die energetische Nutzung von Biomasse.

Gemessen an den Abschätzungen mancher landwirtschaftlicher Institute muß der genannte Erwartungswert von 10 Mio. t SKE/a als optimistisch angesehen werden, zumal auch bei Stroh die Herstellung höherwertiger Produkte (Tierfutter, Single Cell Protein) ernsthaft untersucht wird.

Die Angabe des erwarteten Sekundärenergieträger-Potentials von 5 Mio. t SKE beruht auf der Annahme eines mittleren Biokonversionswirkungsgrades von $\eta = 50\%$. Beide Erwartungswerte müßten durch detaillierte Analysen der Einzeltechnologien untermauert werden.

Wasser- und Meereskraftwerke

Derzeit betriebene größere Wasserkraftanlagen erzeugen heute etwa 19 TWh/a elektrische Energie. Der maximale technische Ausbau auf ca. 23 TWh/a wird voraussichtlich in wenigen Jahren abgeschlossen sein. Diese Elektrizitätsmenge wird mit dem mittleren Jahreswirkungsgrad von Kohlekraftwerken im Grundlastbereich (38 %) bewertet. Daraus ergeben sich 7,44 Mio. t SKE/a. Berücksichtigt werden ferner 6 % Leitungsverluste, so daß die gesamte Entlastung der Primärenergie-Bilanz durch große Wasserkraftwerke 7,91 Mio. t SKE/a beträgt.

Etwa 10 000 Klein- und Kleinstwasseranlagen im kW-Leistungsbereich werden zur Zeit statistisch bezüglich ihrer Energiebereitstellung nicht erfaßt. Würde man dies tun und gleichzeitig eine große Zahl der heute nicht mehr benutzten Kraftanlagen wieder in Betrieb nehmen, so könnte unter günstigen Bedingungen ein Beitrag in Höhe von 10 TWh/a in Form von mechanischer und/oder elektrischer Energie geleistet werden.

Dieses Potential wird mit dem mittleren Jahreswirkungsgrad von Mittel- und Spitzenlastwerken (35 %) bewertet, obwohl nicht alle kleinen Wasserkraftanlagen ausschließlich zur Stromerzeugung herangezogen werden. Es liegt jedoch nahe, davon auszugehen, daß die mechanische Energie, die kleine Wasseranlagen liefern, sonst durch elektrische Antriebe geliefert würde. Die Bewertung führt zu einem Wert von 3,51 Mio. t SKE/a. Berücksichtigt man auch hier 6 % Leitungsverluste, so ergibt sich eine Entlastung der Primärenergie-Bilanz in Höhe von 3,73 Mio. t SKE/a.

Wellenkraftwerke, Gezeitenkraftwerke und Meereswärmekraftwerke sind aus meteorologischen, klimatologischen oder technischen Gründen nicht oder in nicht nennenswertem Umfang einsetzbar, so daß für sie in Abbildung 9 kein Beitrag ausgewiesen wird.

Windenergiekonverter

Kleine Windenergiekonverter werden heute auf dem Markt angeboten, Großanlagen im Megawatt-Bereich sind im Bau und in der Erprobung. Die Gesamtfläche der

Gebiete in der Bundesrepublik mit einer hohen mittleren Windgeschwindigkeit von mindestens 4-5 m/s liegt bei etwa 30 000 km². Von dieser Fläche, die wie schon erwähnt im wesentlichen im norddeutschen Küstengebiet liegt, kann aber wegen anderweitiger Nutzung, z.B. als Siedlungs- und Naturschutzgebiete, nur ein Teil als Standort für Windenergiekonverter genutzt werden. Die Ungleichförmigkeit des Windenergieangebots, die entweder eine Speicherung der erzeugten Energie oder aber den Aufbau von Back-up-Systemen notwendig macht, damit der Energiebedarf jederzeit gedeckt werden kann, stellt eine der wesentlichen Restriktionen für die wirtschaftliche Nutzung der Windenergie dar.

Die Abschätzung eines Erwartungspotentials der Windenergie ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Unterstellt man, daß nach einem erfolgreichen Abschluß der Arbeiten zur Prototyp-Anlage GROWIAN I in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre mit der Produktion von Windenergiekonvertern der Leistungsgröße 3 MW begonnen wird, und daß bis zur Jahrhundertwende 1 500–1 600 Anlagen (Zubau im Mittel 100 Anlagen/a) installiert sind, so könnten damit etwa 11 TWh/a Strom erzeugt werden, eine Bewertung dieser Strommenge mit dem durchschnittlichen Jahreswirkungsgrad der Mittel- und Spitzenlastkraftwerke (35 %) ergibt einen Beitrag von 3,87 Mio. t SKE/a. Unter Berücksichtigung von 6 % Netzleitungsverlusten führt sie zu einer Entlastung der Primärenergie-Bilanz in Höhe von 4,1 Mio. t SKE/a

Eine Nutzung von kleinen Windkonvertern kommt sicher nur für ländliche Gebiete mit geringer Bebauung in Betracht. Würden etwa 25 % der in windgünstigen Gebieten liegenden geeigneten Anwesen mit kleinen Windkonvertern ausgestattet (75 000 Anlagen), so ließen sich etwa 1,25 TWh/a Strom für die Versorgung der Landwirtschaft und von Haushalten bereitstellen.

Eine gleiche Bewertung wie bei den großen Windenergiekonvertern führt zu einer Substitution von 0,44 t SKE/a, die unter Berücksichtigung von wiederum 6 % Leitungsverlusten, eine Entlastung der Primärenergie-Bilanz von 0,47 t SKE/a führen.

Sonnenergieanlagen

Bei der Abschätzung des Erwartungspotentials für Niedertemperatur-Kollektoranlagen wurde vom Gebäudebestand, den erwarteten jährlichen Abriß- und Zubauzahlen, sowie stetig steigenden Einbauraten für Solaranlagen bis zum Jahr 2000 ausgegangen. Die Einbauraten wurden den verschiedenen Anwendungsfällen angepaßt, wobei Wirtschaftlichkeit, Konkurrenz zu anderen Wärmeerzeugungssystemen, technische Lücken und andere Restriktionen in grober Näherung berücksichtigt wurden. Hieraus resultiert, daß die überwiegende Zahl der solaren Niedertemperatur-Kollektoranlagen für die Beheizung von Schwimmbädern und die Warmwasserbereitung eingesetzt werden.

Mit den angenommenen Zahlenwerten ergibt sich für die Zeit um die Jahrhundertwende ein Bestand von knapp 3 Mio. Niedertemperatur-Kollektoranlagen unterschiedlichster Nutzungsart. Die durch diese Anlagen erzeugte Wärme wurde je nach Einsatzbereich mit unterschiedlichen Wirkungsgraden konventioneller Systeme auf die

Primärenergie-Bilanz umgerechnet. Im Mittel beträgt der Umwandlungswirkungsgrad dabei 55 %. Dies führt zu einer Substitution in Höhe von 2,91 Mio. t SKE/a, sowie unter Berücksichtigung von Transport- und Raffinerieverlusten in Höhe von 10 %, zu einer Entlastung der Primärenergie-Bilanz in Höhe von 3,23 Mio. t SKE/a.

Es ist nicht zu erwarten, daß solarthermische Kraftwerke im betrachteten Zeitraum konkurrenzfähig gegenüber fossilen oder nuklearen Stromerzeugungsanlagen werden. Im wesentlichen sind hierfür die in der Bundesrepublik vorliegenden meteorologischen Bedingungen ausschlaggebend. Bei nur etwa 1600 Stunden/a mit direkter Sonneneinstrahlung, die für die maximale Verfügbarkeit bestimmend sind, kann mit einem wirtschaftlichen Einsatz thermischer Solarkraftwerke in der Bundesrepublik auf absehbare Zeit nicht gerechnet werden.

Photovoltaische Stromerzeugungsanlagen

Derartige Anlagen könnten auch in der Bundesrepublik Deutschland für eine große Anzahl von Anwendungsfällen mit geringem Leistungsbedarf und fernab vom elektrischen Netz eingesetzt werden. Anlagen im Leistungsbereich von mehreren kW sind in Einzelfällen bereits in Betrieb. Die Anstrengungen für Forschung und Entwicklung sind erheblich. Dennoch ist im betrachteten Zeitraum nicht zu erwarten, daß die Stromerzeugungskosten von Solarzellen-Generatoren von derzeit 6,00 DM/kWh (kW-Leistungsbereich) soweit reduziert werden können, daß die Konkurrenzfähigkeit mit fossilen oder nuklearen Stromerzeugungsanlagen erreicht werden kann. Obwohl im Jahre 2000 mit Sicherheit photovoltaische Energiewandler im Einsatz sein werden, bleibt ihr Beitrag damit ohne nennenswerten Einfluß auf unsere Energie-Bilanz.

Wärmepumpen

Ende des Jahres 1983 gab es in der Bundesrepublik einen Bestand von etwa 77 000 elektrischen Heizungs-wärmepumpen und ca. 135 000 Warmwasserwärmepumpen. Wesentlich geringer war die Zahl der fossil angetriebenen Wärmepumpen, die zudem in der Mehrzahl Anlagen mit größerer Leistung waren (ca. 600 Stück). Da die Investitionskosten zum Einbau einer Wärmepumpenanlage im Ein- und Zweifamilienhausbereich, verglichen mit einer konventionellen Heizungsanlage, relativ hoch sind, ist zu erwarten, daß zunächst eine erhebliche Verbesserung des Wärmedämmstandards der Gebäude eintritt, bevor Anlagen zur Nutzung regenerativer Energiequellen installiert werden. Hinzu kommt eine stetige Verbesserung der Energieumwandlung in konventionellen Heizungsanlagen, die ebenfalls dazu beiträgt, das Potential der regenerativen Heizungstechniken zu verringern, da diese meist im Vergleich gegen konventionelle Heizungsanlagen bewertet werden.

Wichtig ist, festzuhalten, daß eine Verbesserung der Wärmedämmung der Gebäude und der konventionellen Heizungsanlagen sich in erster Linie auf eine Reduktion des Potentials der Wärmepumpen auswirkt, da diese die prädestinierte Technik für eine weitverbreitete Anwendung regenerativer Energiequellen zur Gebäudeheizung darstellen.

Das Erwartungspotential setzt deshalb eine nachträgliche Wärmedämmung in Altbauten bis zum Niveau der derzeit für Neubauten geltenden Wärmeschutz-Verordnung und für Neubauten ein erhebliches Ansteigen des derzeit üblichen Wärmestandards voraus. Ausgehend von einer Steigerung der Höchstlast im öffentlichen Netz bis zu 100 GW um das Jahr 2000 ergibt sich dann die Anzahl der elektrischen Wärmepumpen, die maximal in die Elektrizitätsversorgung integrierbar sind. Dies entspricht rund 3,5 Mio. Anlagen, wovon die überwiegende Mehrzahl als bivalente Anlagen in Einfamilienhäusern steht. Der Einsatz der elektromotorisch angetriebenen Wärmepumpe stellt etwa 3,0 Mio. t SKE/a aus Umweltwärme zuzüglich 2,0 Mio. t SKE/a aus Antriebsenergie bereit. Bewertet man diese Energie mit dem durchschnittlichen Wirkungsgrad konventioneller Wärmezeugungsanlagen (70 %), so führt dies zu einer Substitution von 7,17 Mio. t SKE/a. Unter Berücksichtigung von Transportverlusten in Höhe von 10 % ergibt dies eine Auswirkung auf die Primärenergie-Bilanz in Höhe von 7,89 Mio. t SKE/a. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß die zum Antrieb der Wärmepumpen benötigte elektrische Energie ja aus konventionellen Kraftwerken bereitgestellt werden muß. Bewertet man diesen Antriebsanteil mit dem mittleren Jahreswirkungsgrad der Mittel- und Spitzenlastkraftwerke (35 %) und berücksichtigt wiederum Netzleitungsverluste in Höhe von 6 %, so ergibt sich ein Betrag von 5,99 Mio. t SKE/a. Nur die Differenz der beiden Zahlen, nämlich 1,90 Mio. t SKE/a, stellen die eigentliche Einsparung auf Seiten der Primärenergie-Bilanz dar. Dies bedeutet, daß der wesentliche Effekt des Einsatzes von elektromotorisch-betriebenen Wärmepumpenanlagen weniger in der Primärenergie-Einsparung von rund 2 Mio. t SKE/a, als vielmehr in der Substitution der kritischen Energieträger Öl und Gas durch elektrischen Strom (rund 6 Mio. t SKE) liegt.

Die etwa 1,5 Mio. fossil angetriebenen Wärmepumpen-Anlagen stellen dagegen 4,2 Mio. t SKE Wärme aus der Umwelt und der Antriebsleistung bereit. Müßte diese Wärme durch konventionelle Anlagen mit einem Wirkungsgrad von 70 % erzeugt werden, wären dazu 6 Mio. t SKE Sekundärenergie notwendig. Zieht man von dieser Zahl die erforderliche Antriebsenergie in Höhe von 3 Mio. t SKE ab und berücksichtigt für die verbleibende Restgröße wiederum die erforderlichen Raffinerie- und Transportverluste in Höhe von 10 %, so ergibt sich die in Abbildung 9 genannte Primärenergieentlastung in Höhe von 3,3 Mio. t SKE/a.

5. Zusammenfassung

Man unterscheidet drei voneinander unabhängige regenerative Energiequellen, die Sonne, die Wärme im Erdinnern und die Gezeitenenergie. Weltweit hat die Sonne die größte Bedeutung. Ihre Strahlungsenergie wandelt sich in Umweltwärme, Windenergie, Laufwasserenergie und biochemische Energie um. In der Bundesrepublik Deutschland ist das Solarenergieangebot mit 1600 Sonnenscheinstunden relativ bescheiden. Die Nutzung konzentriert sich auf solare Brauchwassererwärmung, Schwimmbadbeheizung und den Einsatz von Wärmepumpen für die Raumheizung. Daneben wird der solaren

Stromerzeugung durch thermische Umwandlung und direkte Umwandlung mittels photovoltaischer Zellen große Aufmerksamkeit gewidmet. Beim derzeitigen Stand der Technik ist hierfür in der Bundesrepublik Deutschland keine breite Einsatzmöglichkeit erkennbar. Es handelt sich eher um Exporttechnologien.

Bei der Weiterentwicklung der Windenergie stehen in der Bundesrepublik Deutschland die beginnende Kommerzialisierung kleiner Anlagen mit 10 kW Leistung und die Erprobung einer Großanlage, genannt GROWIAN, mit 3 MW Leistung im Vordergrund. Die Wasserkraft ist bei uns weitgehend ausgebaut, so daß hier keine nennenswerten neuen Beiträge zu erwarten sind, wenn man von einem Restpotential von ca. 4 TWh_e für Großanlagen und einem Potential von ca. 10 TWh_e für Kleinanlagen absieht. Bei der Biomassenutzung sind in sehr geringem Umfang die Verbrennung von Holz und Müll und die Biogasherstellung an der Energiebereitstellung beteiligt. Die Vorhaben zur Nutzung der geothermischen Energie beschränken sich derzeit nur auf die Exploration von Erdwärmefeldern. Die Gezeitenenergie hat keine Bedeutung für die Bundesrepublik Deutschland.

Die besonderen Kennzeichen der regenerativen Energiequellen mit Ausnahme der Wasserkraft sind die sehr geringe Leistungsdichte und das unregelmäßige Angebot. Dies erfordert einen hohen Materialaufwand, um nennenswerte Energiebeiträge einzusammeln, und Speicher oder Back-up-Systeme, um Zeiten fehlenden Energieangebots zu überbrücken. Dies alles verteuert diese Technologien, so daß beim heutigen Stand der Technik eine Wirtschaftlichkeit nur in Sonderfällen gegeben ist.

Der Beitrag der regenerativen Energiequellen zur Gesamtenergiebilanz der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2000 wird deshalb deutlich unter 10 % liegen. Trotzdem müssen wir uns die regenerativen Energiequellen schon heute durch verstärkte Anstrengungen im Bereich von Forschung und Entwicklung als eine Option für die langfristige Zukunft offenhalten.

6. Literatur

- [1] Programmgruppe Angewandte Systemanalyse der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie: Energiequellen für morgen? Nichtfossile und Nichtnukleare Primärenergiequellen. Programmstudie in 7 Bänden, Umschau Verlag, Frankfurt/M., 1976
- [2] Zweites Programm Energieforschung und Energietechnologien, Jahresbericht 1981/82 über neue Energiequellen, Nutzung der Sonnenenergie in bundeseigenen Gebäuden, vorgelegt vom Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik im Auftrag des BMFT, Karlsruhe 1983
- [3] MELISS, M.: Regenerative Energiequellen. BWK, 36, 1984, Nr. 4, April 1984
- [4] STOY, B.: Wunschenergie Sonne, Energie Verlag, Nov. 1980
- [5] BOSTEL, J. et. al.: Möglicher zukünftiger Beitrag regenerativer Energiequellen zur Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland. Aktuelle Beiträge zur Energiediskussion Nr. 6, Jül Spez 156, Kernforschungsanlage Jülich, Juni 1982
- [6] LE FOURIERES, D.: Wind Power Plants. Theory and Design. Pergamon Press, 1982
- [7] JARRAS, L.: Windenergie, Springer Verlag 1981
- [8] PICKEN, G., STOY, B.: Wirtschaftlichkeitsanalyse von Elektro-Wärmepumpen zur Hausheizung. RWE informiert, 191, Essen 1983
- [9] HUBER, W., PLEWNIA, M., SCHMITZ, J.: Vergleich ausgewählter Heizungssysteme unter energetischem, ökonomischem und ökologischem Gesichtspunkt. Kernforschungsanlage Jülich, STE, Sept. 1983
- [10] KOLLMANN, H.: Vergleich von Heizsystemen aus betriebs- und volkswirtschaftlicher Sicht. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 6, Juli 1983
- [11] WINDHEIM, R.: Wind – Energiequelle für morgen? Ein Überblick über den Stand von Forschung und Entwicklung, 2. Auflage. Jülich, Juli 1983
- [12] KÖPPEL, W., KALLE, W.: Wirtschaftlichkeit und Marktaussichten für solare Prozeßwärme- und Stromerzeugungsanlagen. MAN, Neue Technologie, München, Okt. 1980
- [13] KLEEMANN, M.: Regenerative Energiequellen. Potentiale und Nutzungsmöglichkeiten für die Bundesrepublik Deutschland. Vortragspapier. Kernforschungsanlage Jülich/STE 1982

Kontrollierte Kernfusion: eine Alternative der künftigen langfristigen Energieversorgung

Jochem Eidens¹⁾ und Gerhard Fuchs²⁾

¹⁾ Projektleitung Kernfusion der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

²⁾ Institut für Plasmaphysik der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Assoziation EURATOM/KFA

1. Einleitung

Die kontrollierte Kernfusion soll die bei der Verschmelzung leichter Atomkerne freiwerdende Energie zur friedlichen Nutzung verfügbar machen. Kernverschmelzungsprozesse sind die Energiequellen der meisten Sterne und der Sonne; da die Sonne die Energie für die Photosynthese der Pflanzen liefert, ist die Kernfusion daher letztlich auch Grundlage für die Entstehung der organischen und der fossilen Brennstoffe (wie z.B. Holz und Erdöl).

Ähnlich wie bei chemischen Reaktionen der Energieumsatz durch die Bindungsenergie der Elektronen der Atomhülle bestimmt ist, hängt er bei Kernreaktionen von der Bindungsenergie der Atomkernbausteine (Nukleonen) ab, wobei freilich wegen der viel größeren Bindungsenergie die pro Kernreaktion umgesetzte Energie um 1 Million mal höher ist. Die Bindungsenergie pro Kernbaustein nimmt zunächst mit steigender Kernmasse A zu – bis etwa $A = 56$ (Eisen) – und dann wieder

ab. Daher läßt sich Energie gewinnen, wenn man leichte Kerne miteinander verschmilzt ebenso als wenn man schwere Kerne spaltet (Abbildung 1). Diese Energie wird wesentlich als kinetische Energie der Endprodukte frei; aus Energie- und Impuls-Erhaltungsgründen muß das Endprodukt aus mindestens zwei Teilchen bestehen.

Von den zahlreichen Kernverschmelzungsreaktionen^[1,2] sind in den oberen drei Zeilen der Tabelle 1 die für eine mögliche technische Nutzung der Fusionsenergie wichtigsten Prozesse zusammengestellt, nämlich die Verschmelzungsprozesse der schweren Isotope des Wasserstoffs, Deuterium (D) und Tritium (T). (Beim Deuterium, dem „schweren Wasserstoff“, enthält der Kern neben dem Proton noch ein Neutron, beim Tritium, dem „überschweren Wasserstoff“ noch zwei Neutronen). Dabei ist die Verschmelzung von Deuterium mit Tritium wegen der größeren Reaktionswahrscheinlichkeit am leichtesten zu realisieren; beim Deuterium-Deuterium-Prozeß sind bezüglich der zu erreichenden Parameter (s. Kapitel 2.) um bis zu zwei Größenordnungen höhere Anforderungen zu erfüllen.

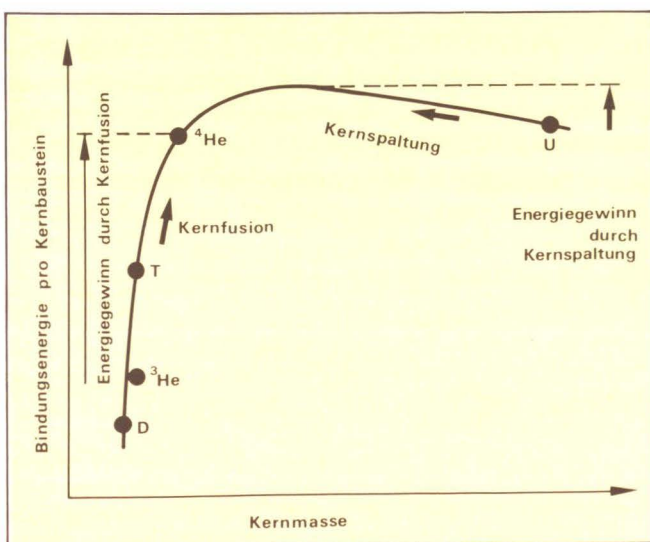


Abb. 1: Energiefreisetzung durch Kernreaktionen. Bindungsenergie pro Kernbaustein in Abhängigkeit von der Kernmasse

Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium kommt in der Natur nicht vor, es kann jedoch mittels der in den Zeilen 3a) und 3b) der Tabelle 1 angegebenen Reaktionsprozesse aus Lithium erbrütet werden. Die dazu benötigten Neutronen liefert die D-T-Reaktion selbst, so daß in einem zukünftigen Fusionsreaktor der Brennstoff Tritium in einem geschlossenen Brennstoffkreislauf benutzt werden wird. Tabelle 1 zeigt in der letzten Zeile zum Vergleich die erheblich geringere Reaktionsenergie bei einer chemischen Verbrennung (Feuer).

1a)	D	+ D	→ ³ He + n	+ 3,25 MeV
1b)	D	+ D	→ T + p	+ 4,0 MeV
2)	T	+ D	→ ⁴ He + n	+17,6 MeV
3a)	⁶ Li	+ n	→ ⁴ He + T	+ 4,8 MeV
3b)	⁷ Li	+ n	→ ⁴ He + T + n	- 2,5 MeV
4)	C	+ O ₂	→ CO ₂	+ 4,2 eV

1 MeV = 1000000 eV

Tab. 1: Wichtige Fusionsreaktionen

Das Deuterium ist als Bestandteil des schweren Wassers (DHO) mit 0.015 % Gewichtsanteilen in natürlichem Wasser enthalten und bildet daher, wenn wir die – im Vergleich zu einer chemischen Reaktion millionenfach höhere – Energiefreisetzung bei Fusionsreaktionen berücksichtigen, einen der größten Energievorräte, der der Menschheit zur Verfügung steht. Der erforderliche Brutstoff Lithium ist ebenfalls in großen Mengen vorhanden. Genaue Angaben über die tatsächlichen Lithium-Reserven sind derzeit nicht möglich, da dieses leichte Metall bislang nur geringfügig Verwendung findet und deshalb so gut wie gar nicht prospektiert worden ist; es gibt jedoch aus mehreren unabhängigen Quellen Schätzwerte für die Lithium-Vorräte zu Land, die bei rund 100 Millionen Tonnen liegen, und das Wasser der Weltmeere enthält zusätzlich etwa die tausendfache Menge. Der jährliche Verbrauch an Primärrohstoffen der Kernfusion, Deuterium und Lithium, berechnet sich für ein Kraftwerk mit 5000 MW thermischer Leistung zu ca. 160 kg Deuterium und ca. 5 Tonnen Lithium, wobei die genaue Lithium-Menge noch von der gewählten Isotopenzusammensetzung und vom gewählten Brutkonzept abhängt.

Die Kernfusion gehört zu den wenigen Optionen für eine allen Kontinenten und Ländern gleichermaßen zugute kommende langfristige und ausreichende Energieversorgung. Diese Tatsache begründet die großen Anstrengungen, die weltweit von allen Industrienationen – von einigen nunmehr seit über 25 Jahren – gemacht werden, um schrittweise wissenschaftlich-technische Lösungen zu finden, die in ihrem Zusammenwirken eine praktische Nutzung dieser Energiequelle ermöglichen. Derzeit beläuft sich der finanzielle Aufwand für Fusionsforschung weltweit auf schätzungsweise 3 Mrd. DM jährlich, davon ca. 0,7 Mrd. DM in der Europäischen Gemeinschaft ¹⁾. Daß trotz dieses Aufwandes an Zeit und Mitteln und den schon gemachten Fortschritten das endgültige Ziel erst im nächsten Jahrhundert erreichbar scheint, liegt an der Vielzahl schwieriger und neuartiger Aufgaben, die zur Verwirklichung der kontrollierten thermonuklearen Fusion noch gelöst werden müssen.

2. Bedingungen für die Freisetzung der Fusionsenergie

Ein wesentliches Problem auf dem Weg zur Kernfusion besteht in der Tatsache, daß die zu Fusionsreaktionen führenden sehr starken Bindungskräfte zwischen den Atomkernen nur über äußerst kurze Entfernungen wirksam werden, während bei größeren Abständen der Kerne die abstoßende Wirkung der elektrischen Ladungen überwiegt. Um diese elektrische Abstoßung zu überwinden, müssen die zu fusionierenden Kerne mit großer Geschwindigkeit aufeinanderfliegen. Solche Geschwindigkeiten treten auf, wenn das Reaktionsgemisch auf eine hohe Temperatur aufgeheizt wird: Es werden etwa 100 Mio. K²⁾ benötigt. Bei diesen Temperaturen zerfallen die Atome in ihre Bestandteile, den Atomkern und die Elektronen. Diesen Zustand der Materie nennt man ein Plasma. Die Kerne fliegen dabei regellos durcheinander, wobei es immer wieder zu Stößen kommt, die zur Fusion führen können, siehe Abbildung 2. Die Fusions-Wahrscheinlichkeit eines einzigen Kerns ist dabei

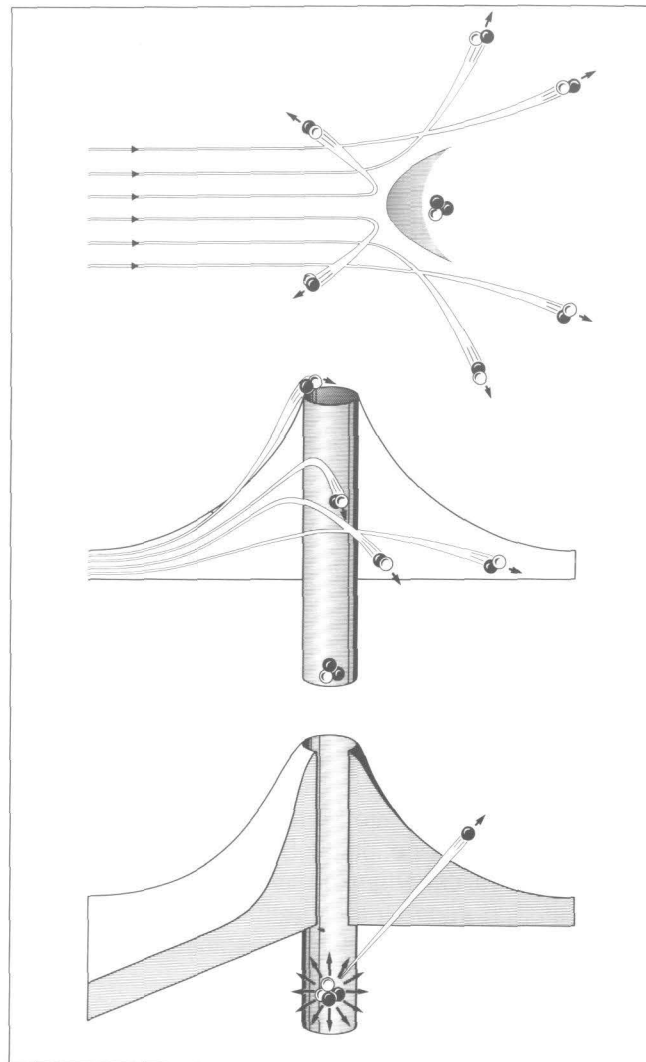


Abb. 2: Prinzip der Kernfusion. Damit ein Stoß zweier leichter Atomkerne zur Fusion führt, muß das Projektil genügend kinetische Energie haben, um den Potentialberg zu überwinden, und es muß in das Loch auf dem Gipfel treffen. Ein Energiegewinn kommt dadurch zustande, daß der Boden des Schachtes tiefer liegt als das Grundniveau außen.

proportional der Dichte n seiner möglichen Reaktionspartner, die Reaktionsrate des Gemischs ist dann proportional n^2 .

Damit die Reaktion in Gang gehalten wird, muß die erzeugte Reaktionsleistung mindestens gerade die von der Temperatur T abhängigen Leistungsverluste decken, die z.B. durch Strahlung entstehen. Diese Verluste sind außerdem proportional der Dichte und umgekehrt proportional der Energieeinschließungszeit (τ_E ³⁾). Aus diesen Überlegungen erhält man eine Zündbedingung, die besagt, daß das Produkt an Dichte und Einschlußzeit

¹⁾ Dies entspricht ziemlich genau den Kosten für importierte fossile Brennstoffe in der Europäischen Gemeinschaft für einen einzigen Tag.

²⁾ 100 Mio. K ist praktisch gleich 100 Mio. °C.

³⁾ τ_E ist in etwa die Zeit, in der bei abgeschalteter Reaktionsleistung der Energiegehalt im Reaktionsvolumen um den Faktor $e = 2,72$ abnimmt; genaue Definition: Energieinhalt/Leistung.

für die Zündung einen Minimalwert übersteigen muß, der seinerseits eine Funktion der Temperatur ist:

$$n \tau_E \geq f(T)$$

Für das Gemisch D+T beträgt der minimale Wert von $n\tau_E = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ bei $T = 200 \text{ Mio. K}$; unterhalb von 50 Mio. K ist keine Zündung möglich; vgl. Abbildung 6. (Für die Reaktion D+D liegen die Minimalwerte für die Zündtemperatur und $n\tau_E$ beträchtlich höher, so daß die Zündung viel schwieriger ist.)

Wird das Fusionsplasma – z.B. durch zerstäubtes Wandmaterial – verunreinigt, so steigt die Verlustleistung stark an, und gleichzeitig wird der Brennstoff verdünnt. In Abhängigkeit von der Kernladung der Verunreinigung ist oberhalb einer bestimmten Verunreinigungskonzentration eine Zündung nicht mehr möglich. Für Schwermetalle beträgt dieser zulässige Anteil nur einige 10^{-4} (Zehntausendstel); dies stellt eine harte Bedingung an die Reinhaltung des Plasmas ^[3,4].

Bei den Sternen erfolgt die Aufheizung bis zur Zündung durch Kompressionen infolge der eigenen Schwerkraft. Im gezündeten Zustand halten sich der Gasdruck des Plasmas und die Anziehungskraft, die für den Einschluß der Teilchen sorgt, die Waage.

Die Bedingungen für das Erreichen der Kernfusion sind somit:

1. Stationärer oder quasi-stationärer Einschluß
2. Aufheizung bis zur Zündung
3. Wärmedämmung

Diese Bedingungen sind die gleichen wie bei einem chemischen Feuer, nur die Größen der Parameter unterscheiden sich beträchtlich.

Die Schwierigkeit, die kontrollierte Kernfusion bei irdischen Bedingungen zu erreichen, besteht nun darin, daß der Einschluß nicht durch die Schwerkraft erfolgen kann. (Sie ist nicht auf das Zentrum eines Reaktionsgefäßes gerichtet und wäre auch zu klein). Es ist daher das Bestreben, die Schwerkraft durch andere physikalische Einschlußprinzipien zu ersetzen. Dafür gibt es zwei Alternativen: die Massenträgheit und die Kraft auf elektrisch geladene Teilchen im Magnetfeld.

Beim Trägheitseinschluß versucht man, ein kleines Kügelchen mit dem Reaktionsgemisch (Durchmesser ca. 0,2 mm) z.B. durch Hochleistungslaser zu komprimieren und zu zünden. Die Reaktion muß erfolgen, bevor das Kügelchen infolge des immensen Drucks wieder zerplatzt.

Beim magnetischen Einschluß erzeugt man Magnetfelder, die das Plasma von den materiellen Wänden möglichst fernhalten, wir erläutern dies an Hand des Tokamak-Prinzips ⁴⁾.

3. Der Tokamak

3.1 Plasmaeinschluß

Die Kraft auf ein elektrisch geladenes Teilchen im Magnetfeld wirkt senkrecht zur Richtung seiner Geschwindigkeit und senkrecht zur Richtung der Magnetfeldlinien. Die Teilchenbahn wird zu einer Schraubenlinie, deren Achse dem Magnetfeld folgt. Stellt man ein Magnetfeld her, dessen Linien die Gefäßwände nicht schneiden, so sollten die elektrisch geladenen Teilchen im Innern eingeschlossen sein. Die einfachste Konfiguration eines solchen Feldes erreicht man, wenn man eine Anordnung von Magnetspulen zu einem Torus biegt (Abbildung 3).

Der gewünschte Einschluß stellt sich aber in dieser Anordnung noch nicht ein, da die stromführenden Leiter der Spulen außen weiter voneinander entfernt sind als innen und somit auch das Magnetfeld nach außen abnimmt. Die Krümmung der Teilchenbahnen wird innen enger als außen, und dies führt zu einer Ladungstrennung, da rechtsschraubende negative Teilchen (Elektronen) und linksschraubende positive Teilchen (Ionen) in verschiedene Richtungen abgelenkt werden (Abbildung 3). Durch die Ladungstrennung entsteht ein elektrisches Feld, das in Zusammenwirken mit dem Magnetfeld das Plasma senkrecht zu beiden Feldrichtungen (nach außen) herauswirft.

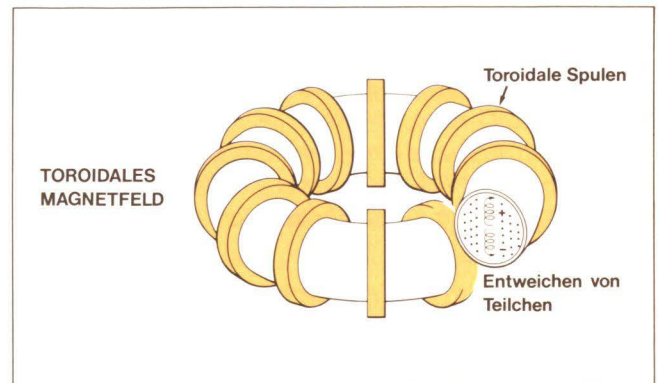


Abb. 3: Einfachste Form eines toroidalen Magnetfeldes. Teilchen werden nicht stabil eingeschlossen, da die magnetische Feldstärke ortsabhängig ist. Dies führt zu Driftbewegungen der Teilchen.

Um die Ladungstrennung zu verhindern, verschraubt man die Magnetfeldlinien durch ein zusätzliches Feld, das durch einen Strom im Plasma innerhalb des Torus erzeugt werden kann. Eine magnetische Feldlinie schließt sich dann nach einem Umlauf im Torus nicht mehr, bleibt aber auf einer schlauchartigen Fläche (Abbildung 4) und kann nach einer genügenden Anzahl von Umläufen um die Torusachse jedem Punkt auf der Fläche beliebig nahekommen. Die Ladungsträger und insbesondere die Elektronen können sich sehr schnell längs der Magnetfeldlinien auf diesen sogenannten Flußflächen bewegen und eine Ladungstrennung ausgleichen.

Beim Umlauf eines Teilchens um den Torus wirkt eine Zentrifugalkraft, die ebenfalls zu einem Teilchenverlust

⁴⁾ Das Wort stammt aus dem Russischen und bedeutet „Großer Strom“.

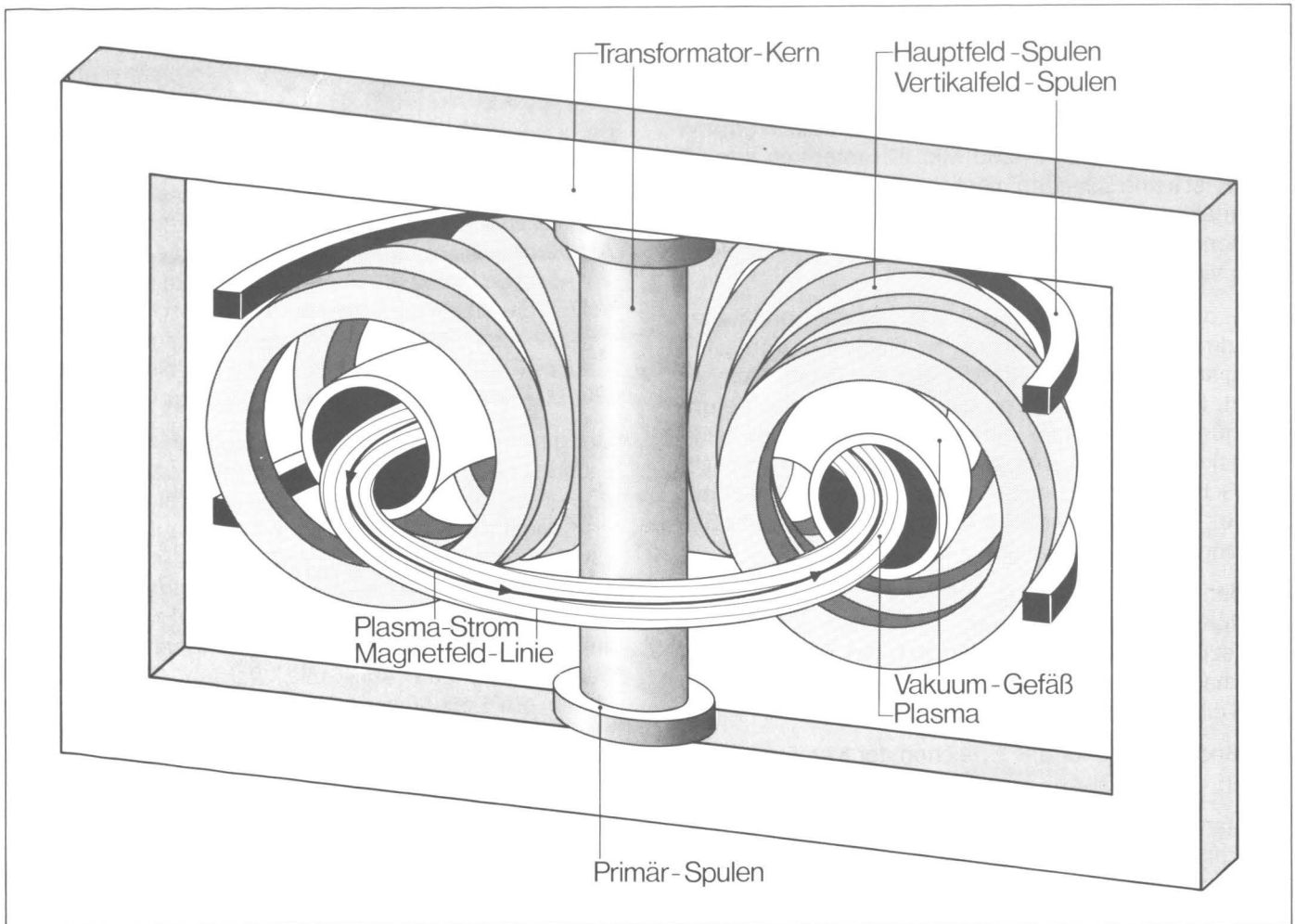


Abb. 4: Prinzipskizze einer Tokamakanordnung. Das einschließende Magnetfeld wird durch die Hauptfeld-Spulen, den im Plasma nach dem Transformatorprinzip induzierten Strom und die Vertikalfeldspulen erzeugt.

führen würde. Um die Zentrifugalkraft zu kompensieren, legt man mittels der Vertikalfeldspulen (Abbildung 4) ein vertikales Magnetfeld an; die Flußflächen sind dann konzentrisch.

Den Plasmastrom erzeugt man nach dem Transformator-Prinzip mit Hilfe der Primär-Spulen. Anders als gewöhnlich in einem Transformator fließt kein sinusförmiger Strom, sondern ein zeitlich linear ansteigender (Sägezahn-) Strom in der Primärspule. Da dies nicht unbegrenzt lange geschehen kann, muß eine solche Maschine repetierend betrieben werden.

3.2 Heizung

Eine Voraussetzung für die Zündung der thermonuklearen Reaktion ist die Aufheizung des Reaktionsgemisches bei etwa 100 Mio. K; die dazu benötigte Energie muß zunächst von außen zugeführt werden. Einen Beitrag dazu kann der Plasmastrom im Torus leisten. Dieser Strom ist allerdings begrenzt; denn proportional zum Strom wächst das von ihm erzeugte Magnetfeld, das die Verschraubung der Feldlinien erzeugt, und diese Verschraubung darf aus Stabilitätsgründen nicht zu stark werden. (Eine Feldlinie darf den Plasmaschlauch nicht

öfter als die Torusachse umkreisen). Mit dem Strom ist auch die Heizleistung begrenzt. Da außerdem der Plasma-Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt, läßt sich mit den technisch erreichbaren Magnetfeldern so keine Zündung erreichen. Man wendet daher zusätzliche Heizverfahren an.

Die bisher erfolgreichste Methode ist der Einschub von Strahlen hochenergetischer neutraler Deuteriumatome, die das Magnetfeld ungehindert passieren können (Abbildung 5). Im Plasma werden diese Teilchen ionisiert, sind somit eingefangen und geben ihre Energie an das Plasma ab. Am Tokamak PLT in Princeton wurden so Temperaturen bis 70 Mio. K erzeugt^[5]; die Zündtemperatur ist also praktisch erreicht. Der Wert für $n \cdot \tau_E$ lag allerdings noch weit unter dem Wert von $2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}$ (Abbildung 6). Eine andere mit Erfolg praktizierte Heizmethode ist die Einkopplung von Radiowellen hoher Leistung mittels geeigneter Antennen.

Zur Messung sehr hoher Temperaturen gibt es verschiedene Methoden, z.B. Linienverbreiterung von gestreutem Laser-Licht (aus der Energieverteilung der emittierten Röntgenstrahlung läßt sich wie aus der Farbe eines glühenden Körpers die Temperatur bestimmen) oder Energie-Analyse an durch Rekombination entstandenen neutralen Atomen, die das Magnetfeld verlassen.

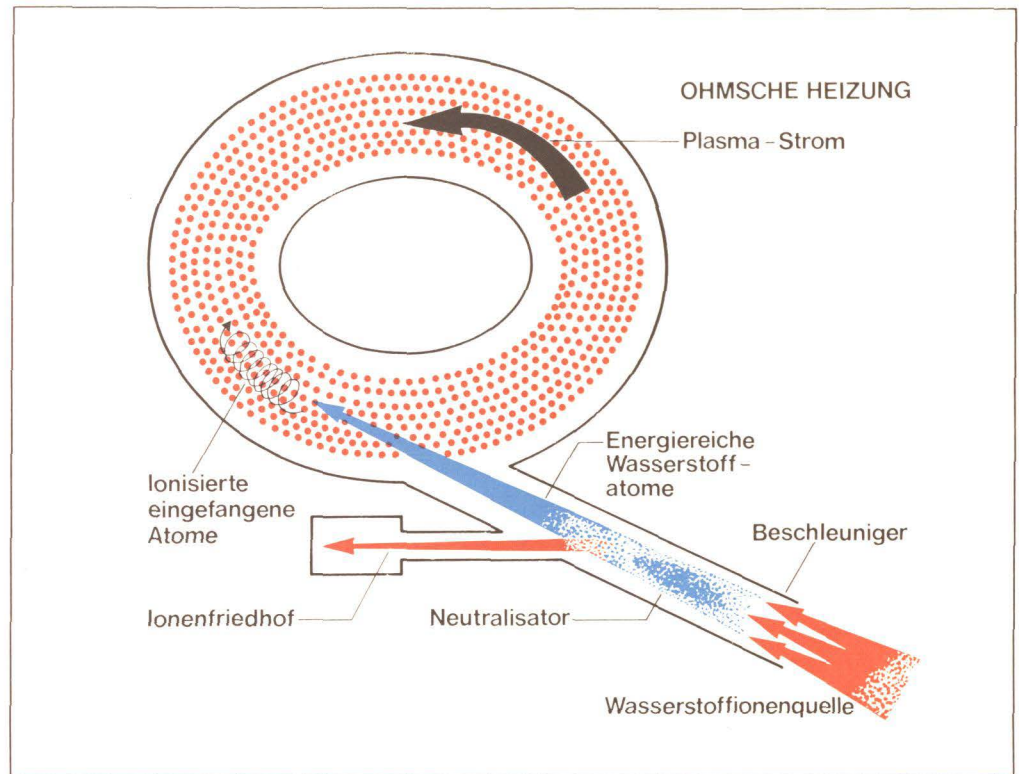


Abb. 5: Heizung eines Tokamak-Plasmas durch Einschub hochenergetischer Wasserstoffatome.

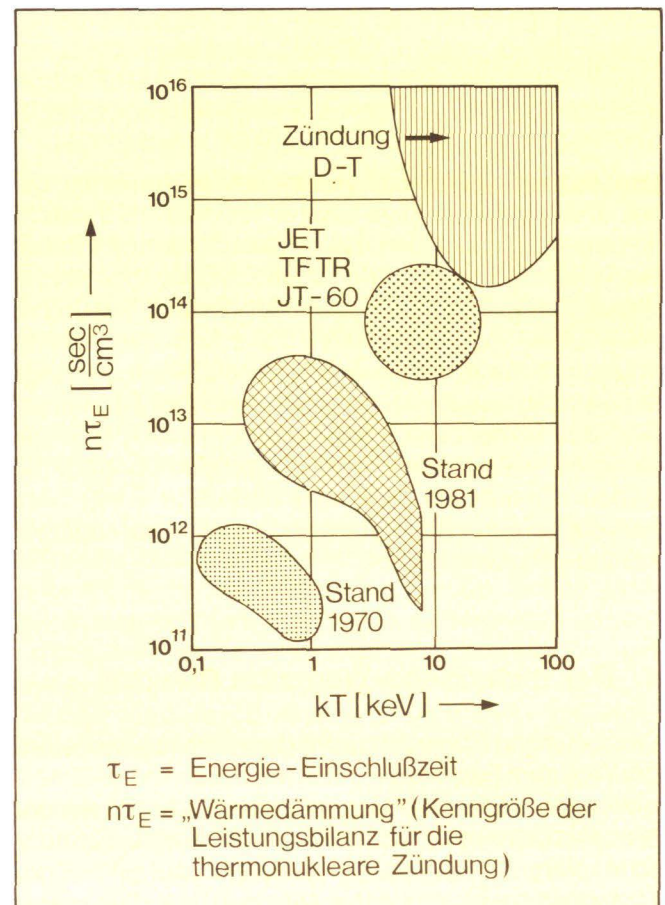
3.3 Weitere Entwicklung

Um die Zündbedingung zu erreichen gilt es vor allem, das Produkt $n\tau_E$ zu erhöhen. Aus den bisherigen Experimenten wurde empirisch abgeleitet, daß $n\tau_E$ etwa quadratisch mit dem Radius des Plasmaschlauchs, d.h. proportional der Querschnittsfläche ansteigt. Große Apparaturen sind aber sehr teuer, mehr als 1 Mrd. DM für JET⁵⁾, wobei der Preis in etwa proportional zum Volumen ist (Abbildung 7). Aus diesem Grunde geht man nur schrittweise zu größeren Maschinen.

Für die Wirtschaftlichkeit eines Reaktors ist es wichtig, eine möglichst hohe Leistungsdichte zu erreichen, d.h. eine hohe Leistung bei kleinem Volumen. Die Reaktionsleistungsdichte ist proportional dem Quadrat der Plasmadichte n , oder bei festgehaltener Temperatur T dem Quadrat des gaskinetischen Druckes. Dieser Druck will den Plasma-Schlauch aufblähen, wobei allerdings hier – im Gegensatz zu einem Autoreifen – der große Radius

Abb. 6: Die historische Entwicklung der bisher erreichten Werte für das Produkt aus Dichte und Energie-Einschlußzeit ($n\tau_E$) und die Ionentemperatur T_i . (Die Energie $kT = 10$ keV entspricht grob der Temperatur $T = 100$ Mio. K) Der Bereich in der oberen rechten Ecke des Bildes wird die Zündung des Fusionsplasmas erlauben; dort liegt daher das Arbeitsgebiet für den Betrieb des Reaktors. Der kleine Bereich darunter wird nach derzeitigen Schätzungen von den Großanlagen erreicht werden.

vergrößert wird. Um das zu verhindern, muß ein entsprechender Gegendruck erzeugt werden, dies erreicht man durch eine Erhöhung des vertikalen Magnetfeldes. Der Druck kann allerdings nicht beliebig erhöht werden; denn oberhalb eines bestimmten Wertes für das Verhältnis β von gaskinetischem zu magnetischem Druck erwartet



⁵⁾ JET: Joint European Torus, das derzeit größte Tokamak-Experiment, Standort Culham in England [6].

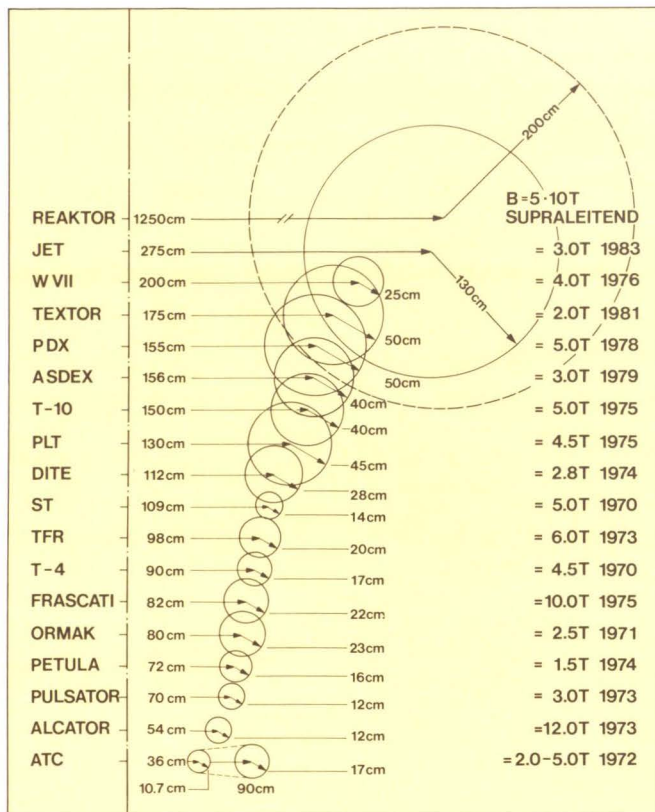


Abb. 7: Abmessungen einiger Tokamak-Experimente. In ATC wurde die Heizmethode der adiabatischen Kompression des Plasmaschlauches studiert, daher sind dort zwei verschiedene Abmessungen angegeben. W VII ist ein „Stellarator“, bei dem die „poloidale“ Komponente des Magnetfeldes auch durch äußere Stromwicklungen erzeugt werden kann.

man Instabilitäten des Plasmas, die den Einschluß rapide verschlechtern. Diese Grenze für den erreichbaren Plasmadruck ist bisher noch nicht genau bekannt.

Ein Tokamakreaktor muß gepulst betrieben werden, daher sind weitere wichtige Größen für die Wirtschaftlichkeit die Brenndauer und das erreichbare Verhältnis von Brennzeit zur Totzeit; denn für die Zündung muß ein gewisser Energiebetrag aufgewendet werden. Die Brenndauer sollte möglichst etwa 1000 s betragen und die Totzeit 1/4 der Brenndauer nicht übersteigen. So lange Brennzeiten lassen sich nur dann erreichen, wenn es gelingt, das bei der Fusion von Deuterium und Tritium entstehende Helium kontinuierlich abzupumpen, so daß seine Konzentration 10 % nicht übersteigt. Gleichzeitig muß die Verunreinigungsdichte auf einem sehr niedrigen Niveau gehalten werden.

4. Der technische Weg zum Reaktor

Die bisherigen Überlegungen haben bereits gezeigt, daß der Weg zum Fusionsreaktor in neue technische Dimensionen führt. Die mehr plasmaphysikalischen Aufgaben hierbei ergeben sich aus der Notwendigkeit zur beträchtlichen Vergrößerung der Abmessungen der zukünftigen Fusionsanlagen, in denen Plasmen mit Fusionslei-

stungsdichten von mehr als 1 MW/m^3 erzeugt und stabil eingeschlossen werden müssen. Von Fusionsreaktoren gibt es bisher nur Konzeptvorschläge und Modelle (Abbildung 8).

Die im allgemeinen unter dem Begriff Fusionsreakorteknologie zusammengefaßten Fragestellungen umfassen im wesentlichen die Probleme der Wärme-Auskopplung, des inneren und äußeren Tritiumkreislaufs, die Abschirmungs- und Aktivierungsfragen sowie die Probleme der Magnettechnologie und der elektrischen Energieversorgung und Steuerung. Bezüglich der Magnettechnologie muß hier der Hinweis genügen, daß die Entwicklung von supraleitenden ⁶⁾ Magneten mit maximalen Feldstärken größer als ca. 10 Tesla, die beim Tokamak zudem noch gepulst betrieben werden müssen, noch einen beträchtlichen Aufwand erfordert. Zu den anderen Fragen soll hier etwas ausführlicher Stellung genommen werden, woran sich einige Überlegungen zur Sicherheit von Fusionsreaktoren anschließen sollen. Zusammenfassend läßt sich formulieren, daß der Weg zum Fusionsreaktor die Entwicklung einer elektrischen und nuklearen Großtechnologie darstellt.

4.1 Tritium und Blanket

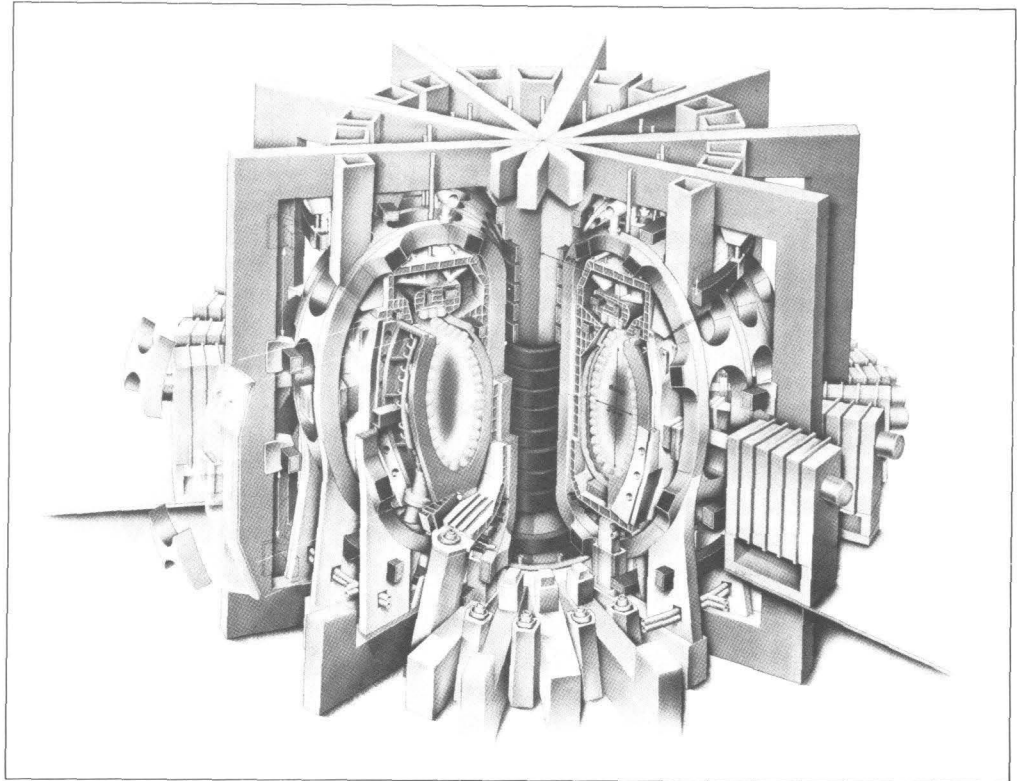
Unter dem inneren Tritiumbrennstoffkreislauf versteht man die Bereitstellung des Tritiums für das Deuterium-Tritium-Brennstoffgemisch im Torus, seine Wiedergewinnung im „Auspuff“ des Entladungsgefäßes durch Abtrennung von Verunreinigungen und durch Isotopentrennung vom leichteren Deuterium mit dem Ziel einer möglichst quantitativen Wiederverwendung. Der jeweilige Verbrauch während einer Entladung beträgt nur einige Prozent der umlaufenden Tritiummenge. Die Sicherheitsprobleme, die sich dabei stellen, sind im wesentlichen mit dem Einschluß des Tritiums, das leicht durch Metallwände diffundieren kann, verbunden.

Der äußere Tritiumbrennstoffkreislauf beginnt im sogenannten „Blanket“, wo neuer Tritium-Brennstoff aus dem Brutstoff Lithium erzeugt wird. Als Blanket bezeichnet man die konzentrisch um das Torusgefäß angebrachte Ummantelung, die aus Konstruktions- und Wartungsgründen im allgemeinen modular aufgebaut ist. Sie weist in ihrer radialen Anordnung eine Schichtung verschiedener Materialien auf, die die vielfachen Funktionen des Blankets erfüllen sollen. Die erste, bereits erwähnte Aufgabe ist es, eine ausreichende Brutrate für Tritium zu gewährleisten; hierfür kann das Blanket den Brutstoff Lithium entweder in metallischer Form oder aber in Form einer Legierung oder Verbindung enthalten. Es wird nötig sein, die Zahl der aus dem Fusionsplasma in das Blanket eingefallenden Neutronen durch geeignete Neutronen-Multiplikator-Materialien ⁷⁾ zu

⁶⁾ In supraleitenden Materialien (z.B. Nb Ti) kann bei sehr tiefen Temperaturen ein elektrischer Strom praktisch leistungslos aufrechterhalten werden.

⁷⁾ Ein Beispiel für ein Material, in dem solche hochenergetischen (n, 2n)-Reaktionen ablaufen, ist Blei.

Abb. 8: Tokamak-Reaktor-Entwurf. Gezeichnet nach einer Konzeptstudie ^[7].



vergrößern, um eine Tritiumbrutrate im Gesamtblanket zu erhalten, die ausreichend größer als Eins ist (d.h. daß mehr Tritium-Atome im Blanket erzeugt werden als insgesamt verbraucht werden). Die Fragen, welches Tritiuminventar sich im Gleichgewicht im Blanket ansammelt sowie die damit verbundenen Permeationsprobleme und welche Verfahren zur kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Extraktion des Tritiums aus dem Blanket man verwendet, sind entscheidend von der Auswahl der Lithiumverbindung abhängig und befinden sich heute noch in offener Diskussion.

Die zweite Aufgabe des Blankets ist die Abfuhr der aus dem Fusionsplasma einfallenden Leistung. Wegen des Impulserhaltungssatzes teilt sich die gesamte beim Fusionsprozeß freiwerdende Energie im umgekehrten Verhältnis der Massen der Endprodukte auf, so daß auf das Neutron $4/5$, d.h. $14,1$ MeV, und auf das ^4He (Alpha-Teilchen) $1/5$, d.h. $3,5$ MeV, entfallen. Die Neutronen tragen als ungeladene Teilchen diese Energie ungehindert aus dem Plasma weg und deponieren sie im Blanket durch Wechselwirkung mit den dortigen Materialien. Die hierbei freigesetzte Wärmeenergie muß durch geeignete Kühlmittel, z.B. Druckwasser oder Helium, abgeführt und entsprechenden externen Wärmetauschern zur Elektrizitätserzeugung oder zur Prozeßwärmebereitstellung angeboten werden.

Schließlich hat das Blanket die Aufgabe, die es umgebenden supraleitenden Spulen vor Strahlungsdosen abzuschirmen, die diese Spulen in ihrer Funktionstüchtigkeit beeinträchtigen würden. Hierbei strebt man eine möglichst geringe Dicke des Blankets an, damit die aufwendigen und teuren Magnetfeldspulen möglichst klein gehalten werden können.

4.2 Materialfragen

Schon die bisherigen Ausführungen über die an ein Fusionsreaktorblanket zu stellenden Anforderungen zeigen, daß hier einige sich zum Teil widersprechende ingenieurmäßige Aufgaben zu lösen sind. Hinzu kommt das besonders schwierige Materialproblem. Es war bereits deutlich gemacht, daß die Fusionsneutronen unabgebremst auf die dem Plasma zugewandte Erste Wand des Blankets einfallen und sie durchdringen. Dabei können Strahlenschäden dadurch entstehen, daß die Atome des Blanketmetalls von ihrem Platz gestoßen oder durch Kernprozesse in andere Elemente umgewandelt werden. Hinzu kommt aber noch, daß die von den Alpha-Teilchen zunächst an das Plasma abgegebene und den thermonuklearen Fusionsprozeß in Gang haltende Energie im Gleichgewichtsfall letztlich ebenfalls durch die Erste Wand nach außen ausgekoppelt werden muß. Dies geschieht im wesentlichen durch auf die Wand einfallende elektromagnetische Strahlung sowie durch Elektronen und Ionen. Gerade die letzteren verursachen Zerstäubungsprozesse, die einerseits zur Verunreinigung des Plasmas und zum anderen zu einer kontinuierlichen Erosion der Ersten Wand führen. Dem Abtragsprozeß kann man durch Erhöhung der Wandstärke Rechnung tragen, jedoch sind auch hier aus mechanischen Festigkeitsgründen bei der hohen zyklischen thermischen Belastung der Ersten Wand in einem Tokamak obere Grenzen gesetzt. Wir erkennen auch hier wieder eine schwierige Ingenieuraufgabe, der heute mit einer Vielzahl von Material- und Konzeptvorschlägen begegnet wird. Die endgültige Lösung läßt sich nur durch sorgfältige Untersuchungen in jenen Maschinen finden, die als Zwischenschritte zwischen den heutigen Fusionsexperimenten und dem endgültigen Fusionsreaktor noch zu bauen sein werden. Tabelle 2 soll einen Eindruck vermitteln, wie unterschiedlich die vielfältigen für

Kriterium	Gutes Material	Schlechtes Material
1. Strahlenschäden und Haltbarkeit		
a) Schwellen	Ti*), V*), Mo*), Stahl	Nb*), Al, C
b) Versprödung	C, Nb*), V*), Ti*), Stahl*)	Mo, Al
c) Oberflächeneigenschaften	V, Ti, Al, C	Stahl, Nb, Mo
2. Kompatibilität mit Kühlmitteln und Tritium		
a) Lithium	Ti, V, Nb, Mo, Stahl	(Al**), C**)
b) Helium	Stahl, Ti, Mo*), Al, C	(Nb**), V***)
c) Wasser	Stahl, Al, Ti	(C*)*)
d) Tritium	Mo, Al, Stahl	Ti, V, Nb, C
3. Mechanische und thermische Eigenschaften		
a) Elastizitätsmodul	Mo, Nb, V, Ti, Stahl	Al, C
b) Bruchfestigkeit	Stahl, Ti, Al	V, Nb, Mo, C
c) Kriechen	Mo, V, Ti, Stahl	C, Al, Nb
d) thermische Spannungen	Mo, Al, Nb, V	Ti, Stahl, C
4. Bearbeitung	Stahl, Al, Ti, C	Nb*), V*), Mo, C*)
5. Industrielle Verfügbarkeit und Datensammlung	Stahl, Al, Ti, C	Mo, Nb, B
6. Kosten	C, Al, Stahl, Ti	Mo, Nb, V
7. Langzeitig induzierte Radioaktivität	V, C, Ti, Al	Stahl, Nb, Mo
8. Rohstoff-Vorkommen	C, Ti, Mo, Al, Stahl	Nb, V

*) Bei diesen Materialien wurden bezüglich des betreffenden Kriteriums unterschiedliche Angaben in der Literatur gefunden

**) Bedeutet unverträglich

Tab. 2: Auswahlkriterien für Wandmaterialien (Nach ^[13])

die Erste Wand in Betracht gezogenen Materialien unter den verschiedenen anzulegenden Kriterien heute beurteilt werden. Neben den Materialproblemen in bezug auf die Erste Wand sind auch noch die Fragen zu beachten, die sich bei den „Strukturmaterialien“ stellen. Hiermit sind alle im Blanket und im weiteren Aufbau des Reaktors (z.B. Spulenkörper, Kryostate, mechanische Stützkonstruktionen usw.) eingebrachten Materialien gemeint, die mehr oder weniger starken Neutronendosen ausgesetzt sind und hierdurch aktiviert werden. Diese Neutronenaktivierung der Strukturmaterialien in Verbindung mit der Tritiumkontamination praktisch aller inneren Oberflächen des Torusgefäßes und der es umgebenden peripheren Vakuumleitungen und -gefäße sind der Grund dafür, daß schon bei der Konstruktion, z.B. durch modularen Aufbau, berücksichtigt werden muß, daß Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie Austausch von Komponenten an einer mit Deuterium-Tritium betriebenen Fusionsmaschine fernbedient vorgenommen werden können. Neutronenaktivierung und Tritiumfreisetzung gehören damit zugleich zu den am meisten relevanten Sicherheitsfragen in einem künftigen Fusionsreaktor.

4.3 Nukleare Sicherheitsfragen

Die im Entladungsgefäß ablaufende Fusionsreaktion selbst stellt keine Gefahrenquelle dar, denn sie läuft bei geringer Dichte ab – 10^{14} Teilchen/cm³ entspricht 1/230000 der Dichte der Luft bei Atmosphärendruck – und in einer Reaktorkammer sind nur ca. 0,4 g D-T-Gemisch. Würde durch einen Fehler diese Menge erhöht,

so kann der Reaktor trotzdem nicht „durchgehen“, da ein Plasma zu großer Dichte bei der Brenntemperatur nicht eingeschlossen bleibt. Der Ablauf wäre wie folgt: Zunächst steigt der Gasdruck, der Magnetfelddruck hält dem nicht stand, das Plasma berührt die Wand; eine kleine Menge Wandmaterial wird verdampft und diese Verunreinigung löscht die Reaktion.

Das radioaktive Gefährdungspotential eines Fusionsreaktors wird durch sein Tritiuminventar und durch die Menge des aktivierten Strukturmaterials bestimmt, das durch Neutronenbestrahlung entsteht. Dabei sei hier noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß das Gefährdungspotential keineswegs identisch mit dem Risiko ist. Das Gefährdungspotential ist ein Maßstab für die maximalen Auswirkungen bei vollständiger Freisetzung des gesamten radioaktiven Inventars. Das Risiko ist das Produkt aus dem Gefährdungspotential und der Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Eintrittswahrscheinlichkeit und damit das Risiko läßt sich durch eine gute ingenieurmäßige Auslegung verringern. Es gibt eine vergleichende Studie^[8] über das Gefährdungspotential von Schnellbrüterreaktoren und Fusionsreaktoren, wo der Fusionsreaktor im allgemeinen bis zu zwei Größenordnungen günstiger abschneidet. Solche Studien tragen naturgemäß einen mehr qualitativen Charakter; denn für einen quantitativen Vergleich müßte man einen echt durchkonstruierten Fusionsreaktor zur Verfügung haben, und diesen gäbe es im Unterschied zum Schnellen Brüter eben noch nicht.

Ein Fusionsreaktor produziert keinen radioaktiven Abbrand; allerdings wird Wand- und Strukturmaterial aktiviert, das aber in fester Form anfällt. Abbildung 9 zeigt

das Abklingverhalten einiger in Frage kommender Materialien. Sollte es gelingen, solche Materialien zu verwenden, bei denen nur kurzlebige radioaktive Isotope entstehen, so wäre eine Endlagerung überflüssig, da sie nach einiger Zeit wieder verwendet werden könnten. Zumindest für die ersten Reaktoren wird mangels einer industriellen Basis für solche Materialien Stahl verwendet werden müssen. Untersuchungen zum biologischen Gefährdungspotential von Tritium werden in ^[9], zu dem von Strukturmaterialien, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Langzeitaktivierung, in ^[10] beschrieben. Neuere Überlegungen zur Sicherheit von Fusionsreaktoren finden sich auch in ^[2].

Zusammenfassend lassen sich einige qualitative sicherheitsrelevante Argumente zum Fusionsreaktor aufzählen: Der eigentliche Fusionsprozeß der Brennkammer

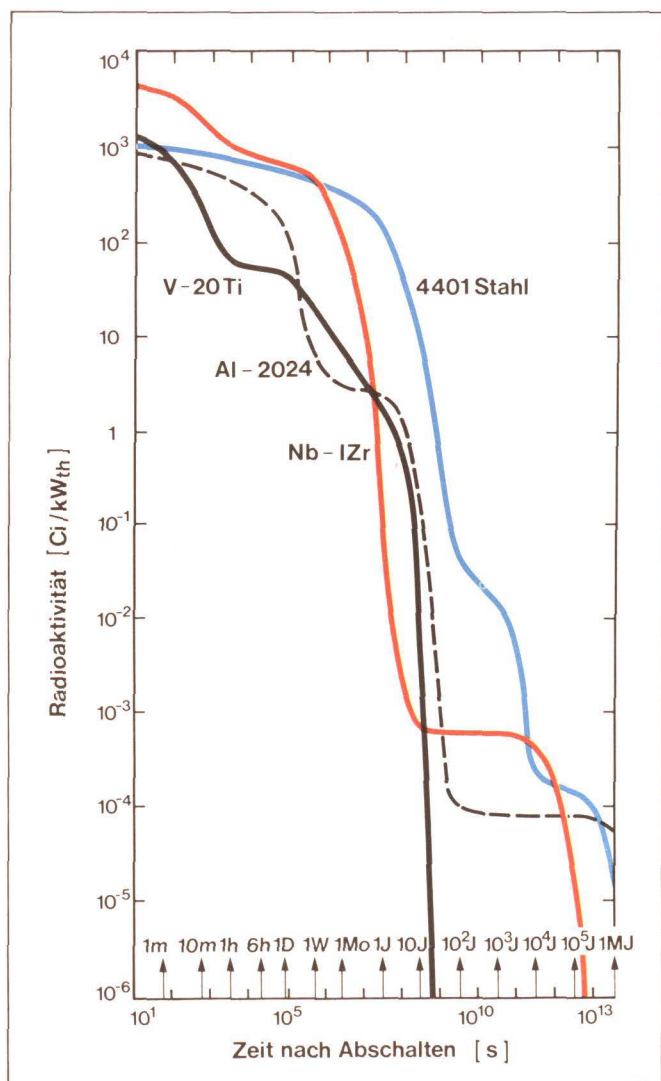


Abb. 9: Abklingverhalten der induzierten Radioaktivität verschiedener Werkstoffe, die für die Erste Wand in Frage kommen. Angenommen wurde eine Bestrahlung durch Neutronen, die 1,25 MW/m² über 2 Jahre entspricht. Vanadium-Titan könnte nach einiger Zeit wieder verwendet werden, soweit nicht darin enthaltene Verunreinigungen letztlich das zeitliche Abklingen der induzierten Radioaktivität bestimmen. Stahl erfordert in jedem Fall eine Endlagerung, nach ^[8].

kann nicht „durchgehen“. Radioaktive Spaltprodukte, die einen wesentlichen Anteil am Gefährdungspotential von Kernspaltungsreaktoren haben, werden bei der Fusion nicht erzeugt. Die in den Strukturmaterialien durch Neutronenfänger erzeugte Aktivierung führt fast ausnahmslos zu radioaktiven Folgeprodukten, die in fester Form vorliegen. Damit dürfte für den Betrieb eines Fusionsreaktors das wichtigste sicherheitstechnische Aufgabengebiet bei der Entwicklung zuverlässiger Einschlußtechniken für ein Tritiuminventar der Größenordnung 10 kg liegen, woran heute bereits intensiv gearbeitet wird.

5. Zusammenfassung

Die auf das Ziel eines technisch nutzbaren Fusionsreaktors gerichteten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben bei den internationalen Planungen für das zunehmend kostspielige Forschungsprogramm Kernfusion ein ungewöhnliches Maß an Vernetzung zwischen den kooperierenden Ländern herbeigeführt. Gleichzeitig wurde eine deutliche Hinwendung zu technologischen Fragestellungen eingeleitet, die verbunden ist mit der Errichtung von internationalen Großexperimenten und darüber hinaus mit weiteren gemeinsamen Planungsarbeiten. Diese Entwicklung drückt sich insbesondere aus in

- den 1983 in Betrieb gegangenen Großanlagen TFTR=Toroidal Fusion Test Reactor ^[11] (Princeton, USA) und JET=Joint European Torus ^[6] (Culham, England), die bereits mit Tritium-Deuterium-Gemischen betrieben werden sollen, um dabei eine nennenswerte Rate von Fusionsreaktionen zu erzielen,
- den begonnenen Planungsarbeiten zu weiterführenden „nuklearen“ Versuchsanlagen wie INTOR=International Torus ^[12] (IAEA)⁸⁾ und NET=Next European Torus (EURATOM).

Um den noch vor uns liegenden Weg überschaubar zu machen, hat man folgende Zwischenstufen – Meilensteine – festgelegt:

- Demonstration des physikalischen Prozeßablaufs (scientific feasibility)
- Demonstration der technischen Durchführbarkeit (technical feasibility)
- Demonstration der wirtschaftlichen Brauchbarkeit (economic feasibility)

Wir stehen heute an der Schwelle zum 1. Meilenstein; die Demonstration des physikalischen Prozeßablaufs bzw. der physikalischen Machbarkeit hofft man im Verlauf der 80er Jahre zu erreichen. Planungsmodellen zufolge könnte der 2. Meilenstein bei günstiger Entwicklung innerhalb von 25 Jahren erreichbar sein.

Abschätzungen zum 3. Meilenstein sind besonders diffizil und wohl auch fragwürdig, weil sie Annahmen über das energiewirtschaftliche Umfeld im nächsten Jahrhundert und über Ergebnisse weit vor uns liegender Forschungsprogramme benötigen. Ein erfolgreiches Ende

⁸⁾ IAEA = Internationale Atomenergie-Organisation, eine Unterorganisation der UNO.

des Weges ist also noch nicht sichergestellt. Bei Bewertung dieser Unsicherheit ist jedoch zu bedenken, daß die angestrebte Beherrschung des „thermonuklearen“ Feuers technische Dimensionen eröffnen kann, die in ihrer Bedeutung nur mit der schrittweisen Beherrschung und Nutzung des „chemischen Feuers“ in der Menschheitsgeschichte vergleichbar sind.

Literatur

- [¹] Course on Stationary and Quasi-Stationary Reactors; International School on Fusion Reactor Technology, 1972, Erice-Trapani. EUR-4999e, Luxemburg 1973
- [²] RAEDER, J., et al.: Kontrollierte Kernfusion. Teubner, Stuttgart, 1981
- [³] WOLF, G.H., CONRADS, H.: Bild der Wissenschaft, Dezember 1981, S. 46
- [⁴] Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices; J. Nucl. Mat. 93/94, 1980
- [⁵] Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Vols. I und II, IAEA-Wien, 1979, insbesondere Eubank, H. et al., PLT Neutral Beam Heating Results, S. 167
- [⁶] Das JET-Projekt, Stand Februar 1978. EUR-JET-R7, Abingdon, Oxfordshire, England
- [⁷] MITCHELL, J.T.D.: Proceedings American Nuclear Society, 3rd Topical Meeting on Technologie of Controlled Nuclear Fusion, Santa Fe, New Mexico, May 9-11, 1978
- [⁸] HÄFELE, W., HOLDREN, J.P., KESSLER, G., KULCINSKI, G.L.: Fusion and Fast Breeder Reactors, IIASA-Bericht RR-77-8 International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, 1976, rev. 1977
- [⁹] FEINENDEGEN, L.E.: Radiation Problems in Fusion Energy Production. Proc. 6th Int. Congress of Radiation Research, Tokyo (May 1979)
- [¹⁰] GRUBER, J.: Potential Environmental Concentrations of Relevant Radionuclids in Drinking Water, in: IAEA Technical Committee Meeting on Fusion Reactor Safety, Vienna, March 23-27, 1981
- [¹¹] Tokamak Fusion Test Reactor, Final Design Report PPPL 1475 PH-R007, Princeton Plasma Physics Laboratories, August 1978
- [¹²] GRIEGER, G.: atomwirtschaft 27, 1982, S. 153
- [¹³] CONN, R.W.: First Wall and Divertor Plate Selection in Fusion Reactors in: Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, J. Nucl. Mat 76, 77, 1978, S. 103