©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Atomenergie, Gewinnung und Anwendung.

Von Dr. Peter Weinzierl, Wien.

Vortrag, gehalten am 9. Jänner 1957.

Aus einem Bericht über die Energieversorgungslage der OEEC-Länder aus dem Jahre 1956 geht hervor, daß im Jahre 1955 ein Energiedefizit in diesen Ländern vorhanden war, der 146 Millionen Tonnen Kohle äquivalent ist, was ungefähr 20% des Verbrauches entspricht. Nach der Abschätzung für das Jahr 1975 wird dieser Defizit bis dahin auf 450 Millionen Tonnen Kohle-Äquivalent bzw. 40% des vorausgesehenen Verbrauches angewachsen sein. Abgesehen von der mit der Einfuhr solcher großen Energiemengen verbundenen Belastung der Handelsbilanzen der europäischen Länder, ist es durchaus unwahrscheinlich, daß die Weltförderung in den nächsten Jahrzehnten in der Lage sein wird, diesen enorm ansteigenden Bedarf durch fossile Brennstoffe abzudecken. Ist doch in einem Zeitraum von 150 bis 200 Jahren mit der Erschöpfung der bekannten Kohlenvorräte zu rechnen und eine Produktionssteigerung in demselben Tempo wie die

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Bedarfszunahme nahezu ausgeschlossen. Es erscheint daher von ungeheurer Bedeutung, daß in den Uran- und Thoriumreserven eine Energiequelle von etwa zehnfacher Reichhaltigkeit (verglichen mit den fossilen Brennstoffen) erschlossen wurde. Dabei bezieht sich diese Abschätzung nur auf die nach dem Stande der heutigen Technologie abbauwürdigen Vorkommen; berücksichtigt man die in allen vulkanischen Gesteinen enthaltenen Uran- und Thoriummengen, so ergibt sich ein noch wesentlich größerer Energievorrat. Auf Grund dieser Gegebenheiten schätzt der oben zitierte OEEC-Bericht, daß bis zum Jahre 1975 bereits etwa 2×10^{11} kWh pro Jahr in den westeuropäischen Ländern durch Kernenergie gewonnen werden dürften.

Betrachten wir das Problem nun einmal von der wirtschaftlichen Seite her, so sind zwei Charakteristika der Atomenergiegewinnung noch im Auge zu behalten. Die bei der Spaltung von 1 g Uran freiwerdende Wärmemenge von 24.000 kWh entspricht dem Kalorienwert von 2,5 Tonnen Kohle. Es ist offenkundig, was dies für die Versorgung von Kraftwerken in abgelegenen Gebieten bedeutet und welche Einsparungen an Transportkosten daraus resultieren. Hinsichtlich des Preises der reinen Rohmaterialien fällt der Vergleich ebenfalls günstig für die Atomenergie aus: 1 g spaltfähiges Uran (U^{235}) in Form natürlichen Urans kommt auf 146.— S (offizieller US-Preis: 40 Dollar pro kg natürliches Uran), wäh-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

rend sich 2,5 t Kohle auf ca. 1000.— S stellen. Diese Preisrelation darf jedoch nicht zu dem Schluß verleiten, daß Atomenergiegewinnung heute bereits billiger wäre als die Stromerzeugung nach den konventionellen Methoden. Die Technologie eines Atomkraftwerkes ist um so vieles komplizierter als die eines normalen Kohlekraftwerks, daß der Preis der Kilowattstunde heute in einem Atomkraftwerk höher oder bestenfalls gleichhoch liegt wie in einer konventionellen Anlage. Der günstige Preis des Grundstoffes Uran zeigt jedoch, welche Möglichkeiten hinsichtlich einer Weiterentwicklung der Technologie der Atomenergiegewinnung gegeben sind.

Diese einleitenden Zahlen wollten nur darauf aufmerksam machen, welche enorme Bedeutung die praktische Nutzung der Atomenergie in den nächsten Jahrzehnten auch in Europa gewinnen wird. Es erscheint darum sehr angebracht und wahrlich eine Sache der allgemeinen Bildung, über jene Vorgänge einigermaßen Bescheid zu wissen, welche dem Prozeß der „Uranverbrennung“ zugrunde liegen.

Es ist hinlänglich bekannt, daß alle Materie aus kleinsten Bausteinen, Atome genannt, zusammengesetzt ist. Diese Atome stellen selbst wieder äußerst komplizierte Gebilde dar. Das Zentrum des Atoms bildet der Atomkern, der fast die ganze Masse des Atoms in sich vereinigt. Um diesen kreisen die sehr leichten Elektronen in einem Sonnensystem vergleichbaren Bahnen. Der Zusammenhalt

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

zwischen dem positiv geladenen Kern und den negativen Elektronen erfolgt durch elektrostatische Kräfte. Der Kern selbst, dessen Durchmesser noch etwa zehntausendmal kleiner ist, als der der Elektronenhülle des Atoms, ist aus zwei Arten von Bausteinen zusammengesetzt: den elektrisch positiv geladenen Protonen und den neutralen Neutronen. Das Proton ist mit dem Kern des Wasserstoffatoms identisch und in seinem Gewicht von dem Neutron wenig verschieden. Alles, was wir an mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften an einem Stück Materie wahrnehmen, ist durch das Verhalten der äußersten Elektronen des Atoms bestimmt. Was wir z. B. unter einem einheitlichen chemischen Element verstehen, sind die Atome, die sich in Zahl und Anordnung der Elektronen gleichen. Da die Zahl der Elektronen in der Hülle stets gleich der der Protonen im Kern ist, entspricht einem bestimmten chemischen Element auch eine bestimmte Anzahl von Protonen im Kern. So enthält z. B. der Sauerstoff 8 Protonen, der Schwefel 16, das Eisen 26. Zu dieser Protonenzahl kann bei einem gegebenen chemischen Element eine in gewissen Grenzen variierende Neutronenzahl treten. Atomsorten, die sich bei gleicher Protonenzahl durch die Neutronenanzahl unterscheiden, nennt man die Isotope des betreffenden Elements. Das bekannteste Beispiel hiefür ist der schwere Wasserstoff: sein Kern besteht aus einem Proton und einem Neutron,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

während der gewöhnliche Wasserstoff nur ein Proton als Kern besitzt. Chemisch unterscheiden sich Isotope nicht voneinander, jedoch besitzen sie ein etwas verschiedenes Gewicht. Eigenschaften, welche vom Gewicht des Atoms abhängen, wie z. B. die Geschwindigkeit seiner Wärmebewegung, können daher zur Trennung von Isotopen eines Elementes herangezogen werden. Bei Untersuchungen, welche die Eigenschaften des Atomkerns betreffen, zeigen sich aber ganz drastische Unterschiede zwischen verschiedenen Istotopen: z. B. gibt es neben den natürlich vorkommenden Isotopen der Elemente zu jedem Element eine Anzahl künstlich darstellbare radioaktive Isotope, welche nicht stabil sind und sich durch eine spontane Umwandlung ihres Kernes unter Emission von Strahlung in stabile Atomarten umwandeln.

Man hat im Laufe der letzten Jahrzehnte gelernt, die verschiedensten Arten von Veränderungen an Atomkernen (Kernreaktionen) im Laboratorium durchzuführen. Eine von diesen Reaktionen ist zu entscheidender Bedeutung gelangt und stellt die Grundlage unserer heutigen Atomenergieanlagen dar: die Spaltung des Urans. Im natürlichen Uran kommt das Isotop mit der Kennzeichnung U^{235} mit eine Häufigkeit von etwas weniger als 1% vor (die Kennzeichnung der Isotope erfolgt, indem man dem chemischen Zeichen des Elementes die Gesamtzahl der Kernbausteine, Neutronen- plus Protonenzahl,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

hinzusetzt). Wird ein Kern des Uranisotops 235 von einem Neutron getroffen, so wird dieses Neutron zuerst in den Verband der Kernteilchen aufgenommen. Der Kern gerät dadurch in einen äußerst instabilen Zustand und zerbricht unmittelbar darauf in zwei ungefähr gleich große Bruchstücke. Diese beiden Spaltprodukte werden mit ungeheurer Energie auseinandergeschleudert; in dichter Materie wird dieser Flug der Spaltprodukte bereits innerhalb der ersten Millimeterbruchteile durch Zusammenstoß mit Nachbaratomen abgebremst, so daß sich die Bewegungsenergie der Kernbruchstücke in Wärme umsetzt. Entscheidend an der Uranspaltung aber ist folgendes: Bei jedem Spaltungsprozeß werden zwei bis drei Neutronen des gespalteten Kernes in Freiheit gesetzt und fliegen mit großer Geschwindigkeit davon. Treffen diese Neutronen auf andere spaltfähige Urankerne, so besteht die Möglichkeit, daß sich eine Kettenreaktion entwickelt und binnen kürzester Zeit eine ungeheure Vervielfachung der Neutronenanzahl und enorme Hitzeproduktion eintritt: die Explosion einer Atombombe.

Wie ist es nun möglich, eine solche Kettenreaktion auszulösen und in kontrollierter Weise ablaufen zu lassen? Die erste Voraussetzung ist die Ansammlung einer hinreichend großen Menge des Uranisotops 235. Man muß ja bedenken, daß für die Neutronen, welche ungehindert — weil elektrisch

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

neutral — durch die Elektronenhüllen der Atome hindurchgehen, ein kompaktes Stück Materie, z. B. Uranmetall, ein äußerst „luftiges“ Gebilde ist. Die Neutronen „sehen“ von den Atomen ja nur die Kerne, deren Durchmesser um etwa 4 Größenordnungen kleiner ist als die Abstände der Atome voneinander. Damit eine nennenswerte Wahrscheinlichkeit besteht, daß ein bei einer Spaltung von Uran gebildetes Neutron wiederum einen Kern trifft und zu einer neuen Spaltung Anlaß gibt, muß also eine beträchtliche Menge von Uran 235 angesammelt sein. Diejenige Menge von Uran 235, bei der im Durchschnitt gerade eines der bei der Spaltung eines Urankerns gebildeten Neutronen zu einer neuen Spaltung führt, nennt man die kritische Masse. In dem Augenblick, wo in einer Ansammlung von reinem Uran 235 diese kritische Masse um einen kleinen Bruchteil überschritten wird, tritt eine Atomexplosion ein. Auslösende erste Neutronen sind nämlich in der Atmosphäre mit geringer Dichte stets vorhanden; sie werden dort durch die Wirkung der kosmischen Strahlung erzeugt. Außerdem tritt, sehr selten, aber doch, auch eine spontane Spaltung von Urankernen ein. Da die Reindarstellung des Uranisotops 235, auf die wir später noch zuückkommen werden, äußerst kostspielig und schwierig ist, geht die Atomenergiegewinnung womöglich von Uran aus, das die natürliche Isotopenzusammensetzung, bzw. nur eine geringe Ausreiche-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

rung des Isotops 235 hat. Nun besitzen aber alle Atomkerne in kleinerem oder größerem Maße die Eigenschaft, Neutronen in ihrem Kernverband aufzunehmen, sie zu absorbieren, wobei dann meist radioaktive künstliche Isotope entstehen. Hat man daher eine beliebig große Menge von natürlichem Uran angehäuft, so wird es niemals zu einer Kettenreaktion kommen, da die Neutronenabsorption des mit über 99% vorhandenen Uranisotops 238 bei weitem die zur Spaltung führende Absorption im Uran 235 überwiegt. Der entscheidende Kunstgriff, mit dessen Hilfe es E. Fermi im Jahre 1942 gelang, die erste kontrollierte Kettenreaktion auszulösen, ist folgender: Neutronen, mit sehr geringer Geschwindigkeit, d. h. mit Geschwindigkeiten, welche der Wärmebewegung von Atomen entsprechen (2200 Meter/sec. für ein Neutron), sind für die Spaltung von Uran 235 unvergleichlich wirksamer als Neutronen hoher Energie, wie sie bei der Spaltung entstehen. Gelingt es daher, die Spaltungsneutronen auf diese niedrige Energie abzubremsen, ohne daß sie vom Uran 238 absorbiert werden, dann ist die Wahrscheinlichkeit ihrer Absorption im Uran 235 so groß, daß eine Kettenreaktion mit natürlichem Uran ausgelöst werden kann. Die Neutronenverlangsamung kann z. B. in der Weise erreicht werden, daß das Uran in Form von Stäben in Graphitblöcke eingebettet wird. Graphit besitzt eine äußerst kleine Absorptionswahrscheinlichkeit für

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Neutronen aller Geschwindigkeiten und bei Zusammenstößen der schnellen Neutronen mit den Kohlenstoffkernen des Graphits verlieren diese sehr schnell ihre hohe Anfangsenergie und werden sogenannte thermische Neutronen mit der oben erwähnten Durchschnittsgeschwindigkeit. Diese thermischen Neutronen diffundieren dann in den Graphitblöcken umher, bis sie wieder auf einen Uranstab treffen und in diesem dann eine Spaltung eines U^{235}-Kerns hervorrufen. Die erforderliche kritische Menge für einen derartigen Reaktor ist noch immer sehr groß. Man verwendet Uranstäbe mit einem Gesamtgewicht von etwa 8 Tonnen; über 100 Tonnen Graphit bilden den Neutronenverlangsamer, meist Moderator genannt.

Wie erfolgt nun die Regelung eines solchen Reaktors? Es gibt Stoffe, z. B. Cadmium oder Bor, welche thermische Neutronen außerordentlich stark absorbieren. Bringt man daher einige Stäbe aus solchen Materialien in den Reaktor, in dem etwas mehr als die kritische Menge von Uran vorhanden ist, so werden diese Stäbe soviel Neutronen aufsaugen, daß trotzdem keine Kettenreaktion eintritt. Zieht man nun diese Stäbe langsam heraus, so wird die Kettenreaktion bei einer bestimmten Stellung einsetzen. Kontrolliert man die Lage dieser Stäbe automatisch mit Hilfe eines Instrumentes, das die Neutronendichte im Reaktor mißt, so kann eine sehr verläßliche automatische Regelung erzielt wer-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

den. Außer diesen Kontrollstäben sind noch einige andere Neutronenabsorber enthaltende Sicherheitsstäbe vorhanden, welche im Falle eines Versagens irgendeines Teiles der Reaktoranlage automatisch in den Reaktorkern hineingestoßen werden und die Kettenreaktion zum Stillstand bringen. Die bei der Uranspaltung freiwerdende Energie tritt, wie erwähnt, zum überwiegenden Teil als Wärme in den Uranstäben auf. Diese müssen daher gekühlt werden. Graphitreaktoren der erwähnten Art werden meist durch Gase (Luft, CO_2) gekühlt. Bei einem Energie liefernden Reaktor müssen diese Kühlgase so weit erhitzt werden, daß sie imstande sind, einen Dampfkessel zu beheizen, von dem seinerseits eine Turbine gespeist wird.

Der in der beschriebenen Weise aus Uran und Graphit bestehende Kern des Reaktors ist von einem Reflektor und einem dicken Schutzwall umgeben. Der Reflektor hat die Aufgabe, den Austritt der Neutronen aus dem Reaktorinneren so weit als möglich zu verhindern, die Schutzmauer muß die im Reaktor entstehenden gefährlichen Strahlungen auf ein für das Bedienungspersonal ungefährliches Maß herabsetzen. Hiefür sind einige Meter dicke Betonmauern erforderlich. Neben der Neutronenstrahlung ist es eine durchdringende, der Röntgenstrahlung vergleichbare, sogenannte Gammastrahlung, welche teilweise bei der Spaltung entsteht und teilweise von den Spaltprodukten emittiert wird, welche ge-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

sundheitsgefährdend ist. Die Spaltprodukte des Urans stellen nämlich radioaktive Isotope dar, welche sich unter Emission von Elektronen und Gammastrahlung erst langsam in stabile Isotope verwandeln. Da sich unter den verschiedenen gebildeten Spaltprodukten (der Urankern bricht nicht immer an derselben Stelle auseinander, sodaß eine große Anzahl verschiedener Isotope entsteht) auch solche befinden, welche ähnlich dem Bor ein extremes Absorptionsvermögen für Neutronen besitzen, würde ein Reaktor nach einer gewissen Zeit des Betriebes durch eine Art Selbstvergiftung mit absorbierenden Spaltprodukten zum Stillstand kommen. Außerdem erleiden die Uranstäbe durch die heftige Strukturzerstörung bei der Abbremsung der Spaltprodukte bei längerem Betrieb so weitgehende Veränderungen ihres metallischen Gefüges, daß auch aus diesem Grund von Zeit zu Zeit eine Erneuerung des Uranmaterials erforderlich ist. Wegen der Anwesenheit der stark radioaktiven Spaltprodukte in den gebrauchten Uranstäben ist dies leichter gesagt als getan. Die Strahlungsintensität dieser Spaltprodukte nach längerem Betrieb eines Reaktors entspricht größenordnungsmäßig etwa der von 100 Tonnen Radium! Die Uranstäbe müssen daher mit ferngesteuerten Greifzangen aus dem Reaktor entfernt und zunächst hinter dicken Abschirmungen längere Zeit radioaktiv „abgekühlt“ werden, bis dann ebenfalls in fernkontrollierten

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Anlagen eine chemische Aufarbeitung des Urans möglich ist. Diese äußerst schwierige und kostspielige Prozedur besitzt jedoch auch eine positive Seite: Neutronen, welche im Uranisotop 238 eingefangen wurden, verwandelten dieses für die Atomenergiegewinnung zunächst nicht nutzbare Material in einigen Umwandlungsstufen in das Plutoniumisotop 239, das in seiner Spaltfähigkeit dem Uran 235 vergleichbar ist. Das heißt, während ein gewisser Teil des spaltbaren Urans 235 im Reaktor zerstört wurde, kam es zu einer Nachbildung des spaltbaren Materials in Form von Plutonium. Bei einem Graphitreaktor der beschriebenen Art beträgt der Konversionsfaktor ca. 0,8, d. h. für 1 kg gespaltenes Uran 235 werden 0,8 kg Pu^{239} erzeugt. Es ist jedoch möglich, auch Reaktortypen zu konstruieren, bei denen mehr Plutonium gebildet wird, als Uran 235 durch Spaltung verloren geht. Mit Hilfe solcher „Brutreaktoren“ ist es also möglich, das natürliche Uran zur Gänze dem Prozeß der Kernenergiegewinnung nutzbar zu machen. Ähnlich wie das Uranisotop 238 verhält sich das Thorium (Th^{232}) im Reaktor. Es wird in das spaltbare Uranisotop 233 umgewandelt. Die eingangs zitierten Abschätzungen der Energiereserven an Kernspaltstoffen basierten auf der Annahme, daß diese volle Ausnutzung der Uran- und Thoriumvorräte möglich sein wird, woran prinzipiell nicht mehr zu zweifeln ist. Es ist nur eine Frage der Wirtschaft-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

lichkeit, wann man dazu übergehen wird, die technisch besonders schwierigen Brutreaktoren in großem Stile zu verwirklichen.

Während ein Graphitreaktor der Art, wie wir ihn bisher besprachen, etwa die Größe eines kleinen Hauses besitzt, ermöglicht die Verwendung von angereichertem Spaltmaterial, d. h. Uran, dessen Gehalt an U^{235} künstlich erhöht oder dem Pu^{239} zugesetzt wurde, eine außerordentliche Vielfalt von Reaktorkonstruktionen. Z. B. ist es möglich, einen Reaktor zu betreiben, dessen Kern aus einer kleinen Stahlkugel besteht, die etwa 15 Liter einer Uransalzlösung in Wasser enthält. Das Uran besteht zu etwa 90% aus dem Isotop 235, etwa $^3/_4$ kg sind zum Betrieb dieses Reaktors erforderlich. Der Reaktor wird durch ein innerhalb der Stahlkugel angeordnetes Rohrsystem gekühlt, weshalb man die Type als Water-Boiler-(Durchlauferhitzer-)Reaktor bezeichnet hat. Die Grundlagen für den Betrieb solcher Reaktortypen sind die Isotopentrennanlagen, die ursprünglich für militärische Zwecke errichtet, heute auch für zivilen Bedarf angereichertes U^{235} erzeugen. Das hauptsächlich hier zur Isotopentrennung verwendete Prinzip ist das folgende: Es wird eine gasförmige Uranverbindung, Uranhexafluorid, erzeugt, welche in riesigen Kammern durch poröse Wände hindurchdiffundiert. Bei dieser Diffusion sind die wenigen Moleküle, welche das leichtere Uranisotop U^{235} enthalten, etwas bevor-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

zugt, wodurch eine langsame Trennung der Isotope ermöglicht wird.

Nachdem wir nun eine Erläuterung der prinzipiellen Funktionsweise von Reaktoren gegeben haben, wäre es unsere Aufgabe, die wesentlichen heute in Verwendung oder Planung stehenden Reaktortypen zur Atomenergiegewinnung zu diskutieren. Mit Rücksicht auf das in Österreich bestehende aktuelle Interesse an der Anschaffung eines Forschungsreaktors, soll jedoch zunächst kurz auf diese Anlagen eingegangen werden. Der hauptsächliche Wert eines Forschungsreaktors besteht in der ungeheueren Neutronenintensität, welche in seinem Inneren bzw. am Ausgang geeignet angelegter Experimentieröffnungen in der Reaktorschutzwand besteht. Die Neutronendichte eines typischen Reaktors für Forschungszwecke liegt zwischen 10^{11} bis 10^{14} Neutronen pro cm^2 pro Sekunde. Für den praktischen Wert eines Forschungsreaktors ist neben der Höhe dieses Neutronenflusses das Volumen maßgebend, in dem Proben diesem Fluß ausgesetzt werden können, sowie die Größe der Absorption der eingebrachten Probe, welche ohne nennenswerte Störung der Reaktorfunktion toleriert werden kann. Die älteste Type von Experimentalreaktoren stellen die beschriebenen Graphitreaktoren dar, welche an vielen Orten in Betrieb sind und sich als außerordentlich verläßlich erwiesen haben. Ihr Neutronenfluß ist allerdings nicht allzu hoch und beträgt etwa

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

10^{12} n/cm²/sec. Der Vorteil dieser Anlage liegt in der Größe des Volumens des Reaktorkerns, in dem viele Proben zur Bestrahlung untergebracht werden können. Radioaktive Isotope, die kommerziell erhältlich sind, werden überwiegend in derartigen Graphitreaktoren erzeugt. Für österreichische Verhältnisse wäre die Errichtung eines so großen und kostspieligen Experimentalreaktors kaum angezeigt: die kommerziell erhältlichen Isotope ließen sich nur bei einem Betrieb von einem mit Harwell vergleichbaren Ausmaß zu konkurrenzfähigen Preisen herstellen. Isotope wieder, die wegen ihrer Kurzlebigkeit nicht versandt werden, können auch in einem kleineren Reaktor in hinreichendem Ausmaß gewonnen werden. Als eine für Experimentalzwecke besonders günstige Reaktortype scheint sich der Schwimmbecken-(Swimming Pool-)Reaktor zu erweisen. Er wird mit angereichertem Uran betrieben, das in Brennstoffelementen mit lamellarer Struktur untergebracht ist. Der Reaktorkern, dessen Dimensionen etwa einem Würfel von $^3/_4$ Meter Kantenlänge entsprechen, taucht tief in ein großes Wasserbecken ein, das als Moderator, Kühlflüssigkeit und Reflektor dient und außerdem einen guten Teil der notwendigen biologischen Abschirmung übernimmt. Der Reaktorkern hängt von einer kleinen Brücke herab, von welcher aus die Regeleinrichtungen betätigt werden und kann mit dieser in einem großen Wasserbecken hin und her bewegt werden. Durch

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

die Betonmauer des Wasserbeckens führen Experimentierkanäle unmittelbar zum Reaktorkern.

Ein Neutronenfluß von 10^{13} n/cm²/sec ist in einem derartigen Reaktor ohne weiteres zu erzielen, wenn durch eine Pumpanlage für eine verstärkte Kühlung des Reaktorkerns gesorgt wird. Handelt es sich darum, Materialien für den Reaktorbau selbst zu prüfen, so ist es notwendig, diese unter einer möglichst vergleichbaren mechanischen Beanspruchung auch der intensiven Neutronen- und Gammabestrahlung, welche im Reaktor herrscht, auszusetzen. Da die Strukturschädigungen durch die Strahleneinwirkung nicht nur dem Fluß, sondern auch der Expositionszeit dieser Strahlung proportional sind, ist es — um Testexperimente in einer vernünftigen Zeit durchführen zu können — notwendig, in einem solchen Materialprüfreaktor einen Neutronenfluß zur Verfügung zu haben, welcher um mindestens eine Größenordnung die später im Reaktorbetrieb zu erwartenden Bedingungen übertrifft. Ein Materialprüfreaktor, dessen Kern dem der Swimming Pool-Type sehr ähnlich ist, ist in den USA seit einigen Jahren in Betrieb. Der von einem intensiven Wasserstrom gekühlte Kern ist von Beryllium als Moderator und Reflektorsubstanz umgeben. Die Kosten einer derartigen Anlage sind außerordentlich hoch und liegen bei etwa 100 Millionen Schilling. Die Anschaffung eines Materialprüfreaktors wird in den Ländern unerläßlich sein, in denen praktisch an

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

der Entwicklung von Kraftwerksreaktoren bzw. deren Bauteilen und Konstruktionsmaterialien gearbeitet wird. Als letzte charakteristische Type eines Versuchsreaktors wäre der schon erwähnte Water Boiler-Reaktor zu nennen. Seine hervorstechendste Eigenschaft ist seine Betriebssicherheit: auch im Falle des Versagens aller äußeren Regelmechanismen kann eine Überhitzung dieser Reaktortype praktisch nicht zustande kommen, da jede durch Erwärmung bedingte Expansion der Reaktorflüssigkeit zu einer automatischen Herabsetzung der Spaltungshäufigkeit und damit zu einer Selbstkontrolle des Reaktors führt. Die Leistung und damit der Neutronenfluß dieses Reaktortyps scheint jedoch derzeit noch beschränkt zu sein (ca. 50 kW Maximum, bzw. 10^{12} n/cm²/sec), da bei höherer Intensität des Betriebes die Rekombination des durch Wasserzersetzung gebildeten Knallgases in dem als ganzen hochradioaktiven System zu Schwierigkeiten führt.

Hat man den Bau von Leistungsreaktoren zum Zweck der Erzeugung elektrischer Energie im Auge, so muß man vor allem bestrebt sein, die Temperatur des Reaktors so hoch zu halten, daß der Wärmewirkungsgrad der anschließenden Turbinenanlage günstig wird. Dies bedeutet aber, daß die Konstruktionsmaterialien des Reaktors neben der intensiven Strahlungseinwirkung auch durch Hitze, Druck und korrodierende Wirkung des Kühlmittels beansprucht werden. Auf der anderen Seite sollen alle im Reaktor-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

kern verwendeten Materialien eine sehr geringe Einfangwahrscheinlichkeit für Neutronen besitzen, sonst müssen die dadurch auftretenden Verluste durch eine höhere Anreicherung des verwendeten Uranbrennstoffs wettgemacht werden. Praktisch stehen wir zweifellos erst am Anfang der Entwicklung geeigneter Reaktorbaumaterialien und die bis heute erreichten Betriebstemperaturen von Leistungsreaktoren liegen um 300°, was zu einem Wirkungsgrad von etwa 25% der Turbinenanlage führt, im Gegensatz zu etwa 40% in kalorischen Kraftwerken konventioneller Bauart. Man kann sagen, daß die weitere Entwicklung des Reaktorbaus und vor allem die Frage der Wirtschaftlichkeit von Leistungsreaktoren zum überwiegenden Teil durch die Fortschritte auf metallurgischem Gebiet bestimmt ist.

Bei dieser Situation im Leistungsreaktorbau ist es nicht verwunderlich, daß es eine Vielzahl von Entwicklungsrichtungen gibt, deren Vertreter jeweils von den besonders günstigen Aussichten ihres Typs überzeugt sind. England ist durch die Ungunst seiner Energieversorgungsverhältnisse frühzeitig zu einer Entscheidung in der Frage des heute geeignetsten Leistungsreaktors gezwungen worden und hat sich für einen mit Kohlendioxyd unter Druck gekühltem Graphitreaktor ähnlich dem oben beschriebenen Typus entschieden. Calder Hall, das seit dem Herbst vergangenen Jahres bereits Energie liefert,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

stellt die erste Anlage dieser Art dar. Eine größere Anzahl ähnlicher Leistungsreaktoren wird in den nächsten Jahren gebaut werden. Auf diese Weise erwartet man, daß im Jahre 1975 bereits ca. 40% der englischen Stromversorgung durch diese Atomkraftwerke gedeckt wird. Auch Frankreich ist dabei, die ersten Leistungsreaktoren in ähnlicher Weise zu bauen. Anders liegen die Verhältnisse in den Vereinigten Staaten. Der außerordentliche Reichtum an leicht erschließbaren fossilen Brennstoffen läßt dort Atomkraftwerke nur dann attraktiv erscheinen, wenn sie konkurrenzfähig mit kalorischen Kraftwerken der alten Bauart arbeiten. Eine große Zahl von Entwicklungsarbeiten an den verschiedensten Typen von Leistungsreaktoren ist dort gleichzeitig im Gange. Ein Großkraftwerk, das jedoch in erster Linie zum Zwecke des Erfahrungsammelns gebaut wurde, wird 1957 in Shippingport, Pennsylvania, in Betrieb genommen. Es handelt sich um einen Druckwasserreaktor, der mit Brennstoffelementen teilweise aus natürlichem, teilweise aus hochangereichertem Uran ausgestattet ist. Das als Moderator und Kühlmittel dienende Wasser zirkuliert bei einem Druck von etwa 140 Atmosphären und 300° und erzeugt in einem sekundären Wasserkreislauf Dampf für die Turbinen. Auch eine Reaktortype, bei der der Dampf direkt durch das kochende Kühlwasser des Reaktors erzeugt wird, ist bereits seit 1955 als kleines Kraftwerk in Betrieb und wird weiter ent-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

wickelt. Von sogenannten homogenen Reaktoren, die mit einer Lösung von Uransalzen in Wasser arbeiten (vgl. den Water Boiler), verspricht man sich ein besonders wirtschaftlich arbeitendes System. Neben den sehr günstigen Sicherheitsverhältnissen besteht ihr großer Vorteil darin, daß bei ihnen ständig ein kleiner Teil der Reaktorflüssigkeit zur chemischen Aufarbeitung abgezweigt werden kann, was wesentlich billiger kommt als die Aufarbeitung fester Spaltstoffelemente. Die Zirkulation der extrem radioaktiven Reaktorflüssigkeit unter hohem Druck bei ca. 300°, sowie die stark korrodierende Wirkung dieser Lösungen stellen jedoch sehr schwierige technologische Aufgaben dar. Nicht viel einfacher gestaltet sich die Entwicklungsarbeit an den schnellen Brutreaktoren. Als „schnell" werden diese Reaktoren deswegen bezeichnet, weil sie keinen Moderator besitzen und die Spaltung durch schnelle Neutronen abläuft. Bei diesem Reaktortyp ist es möglich, wesentlich höhere Konversionsfaktoren zu erzielen, als bei den mit Moderator arbeitenden Typen. Die Kühlung dieses Reaktortyps erfolgt meist durch flüssiges Natrium. Schließlich hat man sogar einen Reaktortyp in ernste Erwägung gezogen, bei dem das Uran in Form einer flüssigen Metallegierung zirkuliert.

Wie steht es nun heute mit der erstrebten Wirtschaftlichkeit der Kernreaktoren als Energiespender? Calder Hall, dessen Strompreis pro kWh mit

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

englischen Anlagen konventioneller Art durchaus konkurrenzfähig sein soll, kann hier nicht voll gewertet werden, da es in erster Linie Plutoniumlieferant für militärische Zwecke und erst in zweiter Linie Energiezentrale ist. Ein Überblick über die in Bau, bzw. konkreter Planung befindlichen Leistungsreaktoren in Amerika zeigt, daß die Baukosten pro kW Leistung der Anlage für Atomkraftwerke wesentlich höher liegen (um einen Faktor 2 bis 5) als für Anlagen, die mit fossilen Brennstoffen gespeist werden. Die Stromkosten hingegen sind insbesondere für die größeren Anlagen vergleichbar, bzw. nur um einen Faktor 2 größer als bei konventionellen Kraftwerken. Dabei muß gesagt werden, daß in diese Berechnungen der Stromkosten pro kWh Abschätzungen hinsichtlich der Amortisationszeit der Atomkraftwerke eingehen. Diese jedoch stellen einen sehr großen Unsicherheitsfaktor in allen derartigen Berechnungen dar, denn erst der Betrieb eines Atomkraftwerkes durch ein oder zwei Jahrzehnte unter voller Belastung kann zeigen, welche Schwierigkeiten und Schäden dabei auftreten und was an Reparaturen an den hoch radioaktiv gewordenen Reaktorbauteilen möglich ist. Wirkliche Erfahrungen liegen hier nur mit den amerikanischen und englischen Plutoniumerzeugungsreaktoren vor, die nun schon über ein Jahrzehnt laufen. Was an diesen vorgeht und an Reparaturen vorgenommen werden kann, gehört aber zur Geheimwissenschaft,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

über die Eingeweihte nur gelegentlich optimistische allgemeine Redensarten verlauten lassen. In jedem Fall hat man den Eindruck, daß die Nutzung der Atomkraft als Energiequelle in den nächsten Jahrzehnten in großem Umfange verwirklicht werden wird und an ihrem Erfolg kaum zu zweifeln ist.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien

Jahr/Year: 1957

Band/Volume: 97

Autor(en)/Author(s): Weinzierl Peter

Artikel/Article: Atomenergie, Gewinnung und Anwendung. 23-44