Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 90 (1972)
Heft: 41

Artikel: Energie aus Kernverschmelzung - Probleme und Aussichten
Autor: Künzler, M.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85328

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

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

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

Download PDF: 11.07.2025

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

gab am 11. Juni erstmals elektrischen Strom ans Versorgungsnetz ab. Infolge eines Defektes bei einer Öldruckleitung entstand bei der Turbinengruppe B am 28. Juli ein Brand. Der Reaktor hat sofort automatisch abgeschaltet und ist damit vollständig isoliert worden. Das Ereignis hat zu keiner radioaktiven Kontamination geführt, weder in der Umgebung noch innerhalb der Anlage. Die Behebung der Brandschäden verzögert die kommerzielle Inbetriebnahme des Werkes um mehrere Monate [3]).

Beteiligung im Ausland

Nachdem bis Ende 1971 infolge der geschilderten Entwicklungen in der Schweiz kein Baubeschluss für ein dringend benötigtes weiteres Kernkraftwerk gefasst werden konnte, war ein Engpass in der Stromversorgung für die Jahre 1976–78 bereits abzusehen. Die 30%ige Beteiligung der BKW, EOS und NOK am französischen Kernkraftwerk *Fessenheim* (zwischen Basel und Colmar) ist ein Beitrag zur Überbrückung dieses Engpasses. Er darf aber nicht zur Illusion verleiten, es können unsere Umweltschutzprobleme auf diese Weise auf die Nachbarstaaten abgewälzt werden. Angesichts der starken Abhängigkeit unseres gesamten wirtschaftlichen und privaten Lebens vom guten Funktionieren der Elektrizitätsversorgung muss sich die Öffentlichkeit bewusst werden, was die weitere Verzögerung oder sogar Verhinderung der notwendigen Kraftwerkbauten für jeden einzelnen Bürger bedeuten würde.

3. Nuklearindustrie

Obschon für die im Nuklearsektor tätigen schweizerischen Industriefirmen der wichtige einheimische Markt infolge mangelnder Kernkraftwerksbestellungen ausgetrocknet war, konnten verschiedene Unternehmen ihre internationale Stellung dank Spezialisierung und Qualität weiterausbauen. Es seien hier einige wenige besonders erfreuliche Beispiele gegeben:

Komponenten für Kernkraftwerke

Die AG Brown, Boveri & Cie., Baden, erhielt von der amerikanischen TVA einen Auftrag für zwei Kernkraftwerk-Turbogruppen von je 1300 MW und ist damit der einzige ausländische Turbinenhersteller, der sich bisher in den USA für Atomkraftwerksturbinen dieser Leistungsklasse erfolgreich durchgesetzt hat. – Gebr. Sulzer AG, Winterthur, erhielt auch 1971 aus der ganzen Welt zahlreiche Bestellungen für ein breites Spektrum von Reaktorkomponenten, mit einer Schwerpunktbildung bei Reaktordruckgefässen, Sicherheitshüllen und Pumpen. Mit der deutschen Firma Klein, Schanzlin und Becker wurde eine gemeinsame Tochtergesellschaft gegründet: die «Sulzer-KSB Kernkraftwerkspumpen GmbH». – Georg Fischer AG, Schaffhausen, findet bezüglich Stahlguss für die verschiedensten Kernkraftwerksteile zunehmend Anerkennung und konnte Lieferungen tätigen für Nuklearanlagen in Deutschland, Frankreich, England, Italien, Schweden und den USA. – Charmilles S. A., Genf, wurde zu einem der führenden unabhängigen Hersteller von Brennelementhandhabungseinrichtungen in Europa, wobei die Firma für das schwedische Kernkraftwerk *Ringhals-2* einen weiteren Auftrag verzeichnete. – K. Rütschi, Brugg, lieferte Spezialpumpen für Nuklearanlagen in Deutschland und Schweden. – Chemap, Männedorf, konnte Filtrieranlagen für die deutschen Kernkraftwerke *Philippsburg* und *Brunsbüttel* absetzen. – Metrohm, Herisau, die sich auf Geräte für die Messung der Borkonzentration bei Druckwasserreaktoren spezialisiert, verzeichnete neue Bestellungen von der deutschen Reaktorindustrie. – Bei den Ingenieurfirmen verdient ein Beratungsauftrag Erwähnung, den Motor-Columbus von der finnischen TVO-Gruppe bezüglich der Projektierung eines 600-MW-Kernkraftwerkes erhielt.

Bestrahlungseinrichtungen

In der Schweiz selbst waren im Bereiche der Anwendung grosser Strahlenquellen drei interessante Entwicklungen zu verzeichnen. Die erste von Sulzer gebaute industrielle Bestrahlungsanlage der Schweiz mit einer Kobalt-60-Quelle wurde bei der SSC Steril Catgut in Schaffhausen vollendet und wird für die Sterilisation chirurgischer und medizinischer Instrumente dienen. Die Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil, bestellte bei Sulzer eine Co-60-Bestrahlungsanlage für Forschungen im Bereiche der biologischen Schädlingsbekämpfung, Pflanzenzucht, Mikrobiologie und Lebensmittelkonservierung. – In St. Gallen baute E. Haefely eine erste Beschleunigerbestrahlungsanlage für die Trocknung von Lacken auf Platten für die Bau- und Möbelindustrie.

[3]) Siehe *H. R. Lutz:* Der Turbinenölbrand im Kernkraftwerk Mühleberg. «Bulletin SVA» *14* (1972), Nr. 14, Beilage.

Energie aus Kernverschmelzung – Probleme und Aussichten

DK 621.039.6.001.2

Umweltschutz und Energieverbrauch

Ende der sechziger Jahre ist der Menschheit ziemlich plötzlich der Begriff Umwelt bewusst geworden. Seither werden immer mehr Stimmen laut, die die Erhaltung der Biosphäre und die Rückkehr zum natürlichen Gleichgewicht mit Nachdruck fordern. Umweltschutz ist zum Modewort geworden; es wird ausgeschlachtet, so dass es zum Geschäft wird; es gehört zum Rüstzeug eines jeden Politikers. Jeder glaubt, eine Massnahme «sine qua non» entdeckt oder erfunden zu haben, die unbedingt erfüllt werden muss – aber eben: «von den anderen». Typisch für diese Art von Vorschlägen ist die in jüngster Zeit gehörte Forderung nach einer Einschränkung des Energiekonsums.

Man muss sich aber bewusst sein, dass selbst ein Einfrieren des Energiekonsums auf die heutige Menge pro Kopf in Wirklichkeit einer Verbrauchszunahme um jährlich 2 bis 3% gleichkommt, entsprechend der Bevölkerungszunahme. Und diese Zunahme wird sich nicht verringern, denn der einzelne Mensch – der ja von Natur aus stark egozentrisch ist – wird sich wohl zur Beschränkung der Bevölkerungszahl bekennen, aber nur so lange, als es andere betrifft; er selbst wird sicher nicht auf Kinder verzichten – und dafür auch die passenden Gründe finden.

Um also in Zukunft nicht mehr Energie als heute zu verbrauchen, müsste man den spezifischen Konsum vermindern. Und wer möchte schon im nächsten Jahr auf den Fernseher, im übernächsten auf den Kühlschrank, im darauffolgenden auf das schöne Auto verzichten? Wieder sollen es die «anderen» tun. Somit ist der Kreislauf geschlossen. Die einzig mögliche Trennung dieses Kreises liegt in der Gesinnesänderung der gesamten Menschheit, und eine solche dauert Generationen. Die Energieknappheit kommt aber viel eher. Man denke an die geforderte Umstellung des Konsums auf den natürlichen Kreislauf, das heisst auf die Verwertung und Nutzbarmachung der heute noch vernichteten oder irgendwo deponierten Abfälle – wie soll dies geschehen ohne Energiezufuhr?

Der Energiebedarf wird weiterhin steigen, und die Menschheit steht vor zwei völlig gegensätzlichen Forderungen:

1. Erhöhung des Energieangebotes, um den zunehmenden Verbrauch zu decken
2. Erhaltung der Umwelt, um das Leben schlechthin zu erhalten.

Auf dem Wege zur Erfüllung dieser Forderungen hat der Mensch die Möglichkeit entdeckt, Energie aus der Spaltung schwerer Atomkerne zu gewinnen. Dies erfüllt wohl die erste Forderung, die zweite aber nur unbefriedigend, wenn auch viel besser als die bisherigen Energieerzeugungssysteme. Abwärme, radioaktive Abfälle sind Mängel, die der Kernspaltungsenergie anhaften. Ausserdem sind die Lagerstätten des Rohmaterials für die Erzeugung dieser Energie wohl gross, aber doch beschränkt.

Diese Nachteile führen zur Suche nach einer noch umweltfreundlicheren Energiequelle. Als mögliche Methode zeichnet sich die Verschmelzung zweier leichter Atomkerne ab.

Die Fusion oder Verschmelzung von Atomkernen

Das Prinzip der Fusion zweier Atomkerne beruht auf der Tatsache, dass die mittlere Bindungsenergie je Kernteilchen in den leichtesten und in den schwersten Kernen geringer ist als in Kernen mittlerer Ordnungszahl. Damit ist auch die aufzubringende Energie, um Kernreaktionen zu bewirken, in den leichtesten und in den schwersten Atomen am geringsten. Diese Reaktionen bewirken in den schweren Kernen eine Spaltung unter Freisetzung von Energie; in den leichten Kernen verschmelzen zwei Teilchen zu einem neuen, ebenfalls unter Energiefreisetzung.

Es gibt mehrere Verschmelzungsreaktionen zweier leichter Kerne, bei denen Energie freigesetzt wird. Die meistversprechenden sind die D-D-Reaktionen, das heisst Reaktionen zwischen zwei Deuteriumkernen, und die D-T-Reaktionen (Deuterium-Tritium-Reaktionen).

Das Deuterium ist ein schweres Wasserstoffisotop, das im Verhältnis von 1 Atom auf 6500 Atome des gewöhnlichen Wasserstoffes im Wasser vorkommt. Es wird geschätzt, dass trotz dieser scheinbar geringen Menge, die Weltmeere und andere Gewässer an der Erdoberfläche insgesamt mehr als 10^{14} t Deuterium enthalten.

Das Tritium ist dagegen in der Natur nur in den allergeringsten Spuren vorhanden. Es kann aber in einer D-D-Reaktion erzeugt werden: $^2D + {}^2D \rightarrow {}^3T + {}^1H + 4{,}03$ MeV. Das somit erzeugte Tritium kann dann mit Deuteriumkernen die Reaktion $^2D + {}^3T \rightarrow {}^4He + {}^1n + 17{,}6$ MeV eingehen. Wegen der grossen Energiefreisetzung ist diese Reaktion von primärem Interesse für die Energieerzeugung. Die dabei frei gewordenen schnellen Neutronen entweichen aus der Reaktorumgebung. Dort können sie ihre kinetische Energie einem geeigneten Moderator (Wasser, Lithium, Beryllium) als nutzbare Wärme abgeben. Die langsamen Neutronen können dann in Lithium 6, das zu 7,5% im natürlichen Lithium vorkommt, durch die Reaktion $^6Li + {}^1n \rightarrow {}^4He + {}^3T + 4{,}6$ MeV eingefangen und zur Erzeugung von Tritium genutzt werden. Das Tritium kann zur Reaktion mit Deuterium dem System zugeführt werden. Die gesamte freigesetzte Energie wäre in diesem System 34,1 MeV für je 5 verbrauchte Deuteriumkerne.

Riesige Energiemengen

Um sich ein Bild zu machen von den Energiemengen, die aus diesen Reaktionen freigesetzt werden könnten, sei gesagt, dass 1 g Deuterium etwa $8 \cdot 10^{10}$ cal abgeben könnte. Zur Erzeugung von 1 g Deuterium benötigt man etwa 30 l Wasser, so dass 1 l Wasser ein Fusionsenergieäquivalent von rund $0{,}267 \cdot 10^{10}$ cal hat. Die Verbrennung eines Liters Benzol ergibt beispielsweise etwa $0{,}9 \cdot 10^7$ cal; demnach entspräche die Kernfusionsenergie, die aus einem Liter Wasser erhalten werden könnte, rund 300 l Benzol.

Obwohl das Kernenergiepotential von 1 g Deuterium der Explosionsenergie von etwa 80 t TNT entspricht, erwartet man von Fusionsreaktoren grosse Sicherheit. Dies wird damit begründet, dass solche Reaktoren bei sehr niedrigen Gasdichten arbeiten und dass die Gesamtenergiedichte des Systems unter etwa 20 cal/cm³ liegen wird.

Die grössten Schwierigkeiten

Werden zwei Kerne zwecks Verschmelzung einander genähert, so tritt eine wachsende Abstosskraft (Coulomb-Abstossung) auf, denn die Kerne sind positiv geladene Teilchen. In einem bestimmten Abstand voneinander übertreffen dann die nuklearen Anziehkräfte kurzer Reichweite die Abstossungskräfte mit langer Reichweite. An diesem Punkt wird die Verschmelzung möglich. Um die Coulombschen Abstosskräfte zu überwinden, müssen die wechselwirkenden Kerne mit genügend Energie versehen werden. Dies könnte wohl mit Beschleunigern geschehen, nach dem heutigen Stand der Technik scheint es aber eher möglich zu sein, den Kernen durch Erwärmung die nötige Energie zu verleihen.

Zur Erzeugung von Kernverschmelzungsreaktionen auf thermonuklearem Wege muss das Gemisch aus Deuterium und Tritium während einer Zeit von ungefähr 1 s auf einer Temperatur in der Grössenordnung von 100 Mio °C gehalten werden.

Dabei ergeben sich zwei Hauptschwierigkeiten:

1. Wie erwärmt man das Gas auf diese Temperatur?
2. Wie wird ein Gas von dieser Temperatur für die Dauer von 1 s eingeschlossen? Kein bekannter Werkstoff könnte zu diesem Zweck verwendet werden, denn er würde sofort verdampfen.

Die Temperatur selbst liefert aber ein Mittel für den Einschluss: Bei Temperaturen oberhalb etwa 50 eV, also $5{,}8 \cdot 10^5$ K, nehmen Deuterium und Tritium die Form eines völlig ionisierten Plasmas aus geladenen Teilchen an. Daher erscheint es möglich, das Plasma durch die Verwendung von elektrischen oder magnetischen Feldern während einer genügend langen Zeit einzuschliessen. Beide können auf die geladenen Teilchen einen Druck ausüben und diese somit daran hindern, den Reaktorbereich zu verlassen.

Um das Plasma wirksam einzuschliessen, müsste ein elektrisches Feld kaum zu verwirklichende Abmessungen aufweisen, so dass man sich heute auf die Anwendung von magnetischen Feldern konzentriert.

In einem Magnetfeld winden sich die Bahnen geladener Teilchen um die Feldlinien herum, wobei die positiven Teilchen eine Richtung und die negativen die andere einnehmen. Die Ionen und Elektronen können sich entlang dieser Linien in jeder Richtung frei bewegen, sind aber an die Feldlinien gebunden. Das Magnetfeld nimmt die Form eines inmateriellen Rohres an, in dem das Plasma eingeschlossen ist. Es wurden mehrere Methoden vorgeschlagen, um zu verhindern, dass das Plasma durch die «Rohrenden» entweicht. Das aussichtsreichste System scheint der magnetische Spiegel (oder magnetische Flasche, magnetic bottle) zu sein. Hierbei wird ein longitudinales Magnetfeld mit Hilfe eines Solenoides angelegt. Das Feld ist im mittleren Bereich gleichmässig; an den Enden ist es stärker. Im Bereich des stärkeren Feldes (Spiegel) werden die Feldlinien nach innen gedrückt und nehmen die Form eines Flaschenhalses an. Da die durch das Magnetfeld auf das Teilchen ausgeübte Kraft stets senkrecht zur Feldlinie gerichtet ist, ergibt sich im Bereich des Spiegels in Richtung der Magnetkräfte eine Rückwärtskomponente, die das Teilchen in den Bereich zwischen den zwei Spiegeln zurückdrückt.

Stand der Forschungsarbeiten

In den USA, Grossbritannien und der UdSSR sind bereits seit fast 20 Jahren Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Plasmaeinschlusses unter Verwendung magnetischer Flaschen im Gange. Die ersten Versuche brachten enttäuschende Er-

gebnisse, denn die erreichte Einschlussdauer war um ein Mehrfaches kürzer als erwartet. Im Jahre 1968 gelang jedoch in der Sowjetunion ein Durchbruch. Man vernahm, dass ihnen der Einschluss heisser Kerne während einer Zeit gelungen sei, die der angestrebten nahe kam. Das angewendete System nannten sie «Tokamak». Es schien, als ob die Fusionsenergie Wirklichkeit werden könnte. Obwohl die in der russischen Tokamak-Einrichtung erreichten Einschlusszeiten wesentlich kürzer als 1 s waren, waren sie doch vergleichbar mit den als notwendig vorausgesagten.

Falls Theorie und Experiment weiterhin übereinstimmen, können Einschlusszeiten in der Grössenordnung von 1 s durch einfache Vergrösserung des magnetischen Feldes und der Abmessungen der magnetischen Flasche erreicht werden. Die russischen Ergebnisse wurden kürzlich vom Princeton Plasma Physics Laboratory, einem der vier grössten amerikanischen Regierungs-Laboratorien, die auf diesem Gebiet tätig sind, unabhängig bestätigt.

Forschung in den Vereinigten Staaten

Zurzeit werden in den USA vier neue Tokamak-Einrichtungen entwickelt, die alle in Kürze betriebsbereit sein dürften. Jede dieser Einrichtungen wird einem anderen Zweck dienen. Die erste, genannt The Ormac, wird am Oak Ridge National Laboratory gebaut. Hier soll untersucht werden, ob die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment auch bei grossen magnetischen Flaschen bestehen bleibt. Eine weitere Einrichtung, The Alcator am M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology), soll zeigen, inwiefern die Übereinstimmung von Theorie und Experiment aufrechterhalten bleibt, wenn das magnetische Feld weiter vergrössert wird. Falls die Ergebnisse dieser zwei Forschungsprogramme die Voraussagen der Theorie bestätigen, dürfte das Problem des Plasmaeinschlusses als gelöst (oder zumindest als lösbar) gelten. Die dritte Tokamak, Doublet II, wird bei Gulf General Atomic gebaut und soll anhand von Versuchen die Frage beantworten, ob eine weitere Verlängerung der Einschlussdauer durch bessere Formgebung der magnetischen Flasche erzielt werden kann.

Die vierte Tokamak, genannt Texas Turbulent Tokamak, wird an der University of Texas gebaut. Hier sollen neue Methoden der Plasmaerwärmung geprüft werden. In den russischen und in allen bisher erwähnten amerikanischen Versuchen wurde eine Ohmsche Erwärmungsmethode verwendet. Dem Plasma wird die zur Erwärmung dienende Energie in Form von elektrischem Strom, der durch das Plasma fliesst, zugeführt. Die Erwärmung ist proportional dem Widerstand des Plasmas und der zweiten Potenz des elektrischen Stromes. Aus Stabilitätsgründen kann der Strom, der durch das Tokamaksche Plasma fliesst, nicht beliebig verstärkt werden. Der Widerstand des ruhenden Plasmas nimmt in der Tokamak-Einrichtung mit steigender Temperatur ab. Dadurch wird die Temperatur, auf die das Plasma mit dieser Methode erwärmt werden kann, begrenzt. Die höchste auf diese Weise zu erreichende Temperatur liegt in der Grössenordnung von 20 bis 30 Mio °C und ist zu niedrig, um die Reaktionen einer thermonuklearen Fusion auszulösen.

Es bestehen aber noch andere Möglichkeiten der Erwärmung. Eine davon, pulsierende Erwärmung genannt, beruht auf der Tatsache, dass der Plasmawiderstand um einen Faktor von 100 Mio zunimmt, wenn dem Plasma eine fein verteilte Turbulenz eingeprägt werden kann. Bei Versuchen mit dieser Erwärmungsmethode im kleinen Massstab wurden bereits die geforderten Temperaturen von 100 Mio °C erzielt. Zumindest theoretisch könnte diese Methode auch in grösserem Massstab zur Erzeugung der nötigen Temperaturen verwendet werden.

Die Versuchseinrichtungen, die bereits in diesem Jahr betriebsbereit sein dürften, sollen die Frage beantworten, ob die Einschluss- und Erwärmungsergebnisse, die im verkleinerten Massstab erreicht wurden, auch bei grossen Einrichtungen zu verwirklichen sind.

Der letzte Schritt wird die Konstruktion einer genügend grossen Einrichtung mit einem genügend starken magnetischen Feld und einer starken Beheizung sein. Der Bau einer solchen Anlage wird an der University of Texas geplant; die Ergebnisse sollten in 4 bis 5 Jahren vorliegen.

Kommerzielle Entwicklung

Sollte die Durchführbarkeit bewiesen werden können, so wird sich die Entwicklung in der Lage befinden, in der sich die Energiegewinnung durch Kernspaltung befand, als anfangs der vierziger Jahre in Chicago der erste Atomreaktor hergestellt wurde. Noch viele Probleme werden gelöst werden müssen. Glücklicherweise sind viele den Problemen ähnlich, die im Zusammenhang mit dem schnellen Brutreaktor gelöst werden müssen. Es wird angenommen, dass ein grosser Teil der Entwicklungsarbeiten für den schnellen Brüter ziemlich direkt den thermonuklearen Reaktionen zugute kommen wird.

In einer thermonuklearen Anlage mit D-T-Reaktionen muss der Brutmantel drei Forderungen erfüllen: 1. Er muss Tritium erzeugen, 2. Er muss die kinetische Energie der Neutronen in Wärme umwandeln, 3. Er muss beständig sein gegen Strukturfehler und Korrosion bei den auftretenden sehr hohen Betriebstemperaturen und unter der Neutronen-Strahlung.

Die Vakuum-Wand und die Behälter des Brutmantels können aus Niob oder Vanadium bestehen, als Kühlmittel kann Lithium oder Lithium in Verbindung mit Lithium-Beryllium-Fluorid und als Reflektor Graphit verwendet werden.

Das für den Plasmaeinschluss erforderliche Magnetfeld wird mittels supraleitenden Spulen erzielt. Das Spulenschild dämpft die Strahlungen ab, wodurch eine gewisse Erwärmung der mit Kältemittel gekühlten Spulen auftritt. Der Spulenschild kann beispielsweise aus Borwasser für die Neutronenabsorption und aus Blei für die hochenergetischen Strahlen bestehen. Die Gesamtdicke des Brutmantels, des Spulenschildes und der Spule wird ungefähr 2,4 m betragen.

Erzeugung von Brennstoff

Fusionsreaktoren werden ein Brutverhältnis von mindestens 1,4 haben, also etwa so viel wie die Schnellbrüter. Das bedeutet, dass bei jeder Fusions- oder Spaltungsreaktion 1,4 Neutrone für die Erzeugung von Brennstoff verfügbar sein werden. Die durch die Spaltung von Uran freigesetzte Energie beträgt 200 MeV, während die bei der Verschmelzung von Deuterium und Tritium freigesetzte Energie ungefähr 20 MeV beträgt. Demnach brauchte es 10 Verschmelzungsreaktionen zur Erzeugung der gleichen Energiemenge wie bei einer Spaltreaktion. Aus den 10 Deuterium-Tritium-Reaktionen werden 14 Neutrone freigesetzt; bei einer Spaltreaktion mit gleicher Energieausbeute sind es 1,4 Neutronen. Bei jeder Spalt- oder Schmelzreaktion wird zum Ersetzen des in der Reaktion verbrauchten Brennstoffs ein Neutron benötigt; die überschüssigen Neutrone können zur Erzeugung von zusätzlichem Brennstoff herangezogen werden. Dies bedeutet, dass bei der Erzeugung einer Energie von 200 MeV sich im Schnellbrüter-System 0,4 Überschuss-Neutrone und im Fusionssystem 4,0 Überschuss-Neutrone ergeben, also zehnmal mehr. Diese Neutronen können zur Herstellung von Spaltmaterial benützt werden, das als Brennstoff für herkömmliche nukleare Reaktoren dienen kann. Demnach wird ein Fusionsreaktor 10mal mehr Spaltungsmaterial erzeugen als ein Schnellbrüter gleicher Leistung. Damit könnte der Ende dieses Jahrhunderts erwartete Mangel an Spaltungsmaterialien abgefangen werden.

Eines der dringlichsten technologischen Probleme wird der Schutz vor Beschädigung durch Strahleneinwirkung sein. Die Teilchendichte der schnellen Neutrone beim Schmelzbrüterprozess ist jedoch vergleichbar mit derjenigen im Schnell-

brutreaktor. Die Studien der Strahlungsschäden, die für die Schnellbrutreaktoren durchgeführt werden, können auch wichtige Grundlagen zum Studium der Materialprobleme in Fusionsreaktoren liefern. Die Neutronenenergie liegt allerdings beim Fusionsreaktor etwas höher als beim Schnellbrüter, die Materialfragen sind aber bei beiden Systemen durchaus vergleichbar.

Die Handhabung von Tritium

Die Handhabung und Wiedergewinnung von Tritium wirft wichtige Fragen auf beim Entwurf eines Fusionsreaktors. Das im Brutmantel entstehende Tritium wird in das Plasma als Brennstoff zurückgeführt. Da es ein radioaktives Element ist, muss jedoch beim Umgang damit und bei dessen Trennung vom Kühlmittel äusserst sorgfältig vorgegangen werden. Hier tauchen drei wichtige Problemgruppen auf. Die erste ist das langsame Entweichen von kleinen Tritium-Mengen während des Betriebes. Die zweite ist die mögliche Freisetzung von grösseren Tritium-Mengen beim sogenannten «grössten noch denkbaren Unfall», zum Beispiel beim Absturz eines Flugzeuges auf den Reaktor. Die dritte ist die Möglichkeit einer Anreicherung der Weltatmosphäre mit Tritium, insbesondere wenn alle Energiebedürfnisse der Erde durch Fusionsenergie gedeckt würden.

Diese Probleme wurden von *Fraas* und *Postma* in Oak Ridge untersucht. Sie kamen zur Schlussfolgerung, dass mit normalen technischen Mitteln der langsame Ausfluss von Tritium während des Normalbetriebes zuverlässig unterhalb der empfohlenen jährlichen Strahlungs-Grenzmengen gehalten werden kann. Bezüglich des grössten denkbaren Unfalls kamen sie zum Schluss, dass diese Gefahr mindestens 10000mal kleiner sei als beim entsprechenden Unfall in einem Spaltreaktor. Bezüglich der Anreicherung der Atmosphäre bei einer weltweiten Fusionskraftkapazität von $6 \cdot 10^6$ MW kamen sie zum Schluss, dass die sich daraus ergebende, auf den menschlichen Körper wirkende Dosis sich ungefähr auf 1/500 der Dosis der natürlichen Radioaktivität auf der Erde belaufen würde.

Induzierte Radioaktivität

Ein weiteres Problem ist die von Neutronen im Material des Reaktors induzierte Aktivität. Obschon die Abfallprodukte der Fusionsreaktoren nicht radioaktiv sind, bewirken die durch die Verschmelzung entstehenden Neutrone, dass das Material des Reaktors radioaktiv wird. Dieser Frage wurde neuerdings grosse Aufmerksamkeit gewidmet. Man erwartet, dass bei Verwendung von Vanadium sich diese Probleme bewältigen lassen.

Ein erheblicher Vorteil der Fusionsreaktoren ist, dass die freigesetzte Energie fast ausschliesslich direkt im Kühlmittel abgelagert wird und nicht etwa im Inneren eines Brennstoffelements wie im Spaltreaktor. Diese Tatsache lässt einen hohen thermischen Wirkungsgrad von über 50% erwarten.

Ein Überblick über die Kernfusion und deren Aussichten wäre unvollständig, ohne auf die Möglichkeit einer direkten Umwandlung der Nuklearenergie in elektrische Energie – ohne Zwischenschritt einer Dampfphase – hinzuweisen. Erste Untersuchungen im Livermore-Laboratorium der AEC lassen erwarten, dass sogar gegen 90% der nuklearen Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt werden könnte. Diese Schätzungen beruhen auf der Anwendung der Reaktion $^2D + {}^3He \rightarrow {}^4He + {}^1H + 18{,}3$ MeV, bei der die Fusionsenergie vollständig in Form von aufgeladenen Teilchen erscheint. Diese Teilchen sind im Plasma enthalten, und die Energie wird dem Plasma elektrisch entzogen. Sollte diese Entwicklungsrichtung Erfolg haben, würde das Problem der Abfallwärme wesentlich verringert.

Forschungszeitplan

In dem Culham-Laboratorium in England fand kürzlich eine Konferenz über die konstruktive Seite der thermonuklearen Energieproduktion statt. Eine Arbeitsgruppe hat nachher folgenden Zeitplan der Entwicklung von gesteuerten thermonuklearer Kraft vorgeschlagen bzw. geschätzt:

Etappe I: 1970 bis 1975. Experimente von zunehmender Grösse zum Beweis der Durchführbarkeit der gesteuerter thermonuklearen Energieerzeugung und Untersuchungen der erfolgversprechenden Entwicklungszweige.

Etappe II: 1975 bis 1985. Bau von grossen Prototypen thermonuklearer Reaktoren, welche Versuche verschiedener wissenschaftlicher und konstruktiver Konzepte in grossem Massstab ermöglichen sollen.

Etappe III: 1985 bis 1995. Bau erster Reaktoren zur Erzeugung gesteuerter thermonuklearer Kraft für kommerzielle Zwecke.

M.K.

Bruchsicherheit und Komponenten von Kernkraftwerken

DK 539.42:621.039.5

Die Art, in der sich die riesigen Energien der Kernspaltung der Menschheit offenbarten, liess in der Öffentlichkeit ein Unbehagen, ja ein Angstgefühl vor den latenten Gefahren aufkommen, die der friedlichen und nutzbringenden Anwendung der Kerntechnik innewohnen können. Die Furcht vor den unheimlichen Energiemengen und – vielleicht noch mehr – vor den Folgen einer radioaktiven Verseuchung von Luft und Wasser haben letzten Endes dazu beigetragen, dass man erstmals nicht nach Unfällen klug geworden ist, sondern von Anfang an ein Verfahren entwickelt hat, bei dem der Begriff *Sicherheit* eine absolute *Vorrangstellung* einnahm.

Die sich aus den zahlreichen und strengen Sicherheitsvorschriften ergebenden Fragen haben die gesamte Industrie befruchtet, so dass auch viele Gebiete, die nicht direkt mit der Kerntechnik in Verbindung stehen, Nutzen daraus ziehen.

Mit der industriellen Anwendung der Kernenergie haben auch die *Materialprüfverfahren* zusätzliche Bedeutung erlangt; einige wurden neu entwickelt, andere mussten verfeinert werden. War die Sprödbruchsicherheit von Behältern (beispielsweise von Druckrohrleitungen für hydraulische Kraftwerke) schon immer wichtig, so erhielt sie im Lichte der Kerntechnik, insbesondere durch die Forderung, radioaktive Produkte *sicher zurückzuhalten,* eine lebenserhaltende Bedeutung.

Beim spröden Bruch werden Bauteile bei Belastung unterhalb der einachsigen Fliessgrenze oder sogar unterhalb der zulässigen Spannung teilweise oder ganz getrennt. Die Gefährlichkeit dieses schlagartigen Bruches weist auf die Notwendigkeit einer zusätzlichen Bewertung der Sprödbruchsicherheit hin.

Für bestimmte Anwendungen wurden schon früher sorgfältige Prüf- und Bewertungstechniken entwickelt, zu denen die Beurteilung der Sprödbruchsicherheit der erwähnten Druckleitungen durch *W. Felix* und *W. Müller* als Beispiel dienen kann.

Die unterschiedlichen Betriebsbedingungen und in der Folge die vielfältigen Abmessungen und Wanddicken, Stahlsorten, Technologie und Fertigungsqualität machten indessen das Bedürfnis nach einer systematischen Bewertung der Sprödbruchsicherheit deutlich. Dieses Bedürfnis wurde durch die anderseits fast unübersehbare Mannigfaltigkeit der Sprödbruchprüfverfahren weiter vergrössert.