

Moderne Technologien durch Werkstoff, Konstruktion, Fertigung und Qualitätskontrolle am Beispiel kerntechnischer Anlagen

Von Franz Mayinger, Hannover

Bei Kernreaktoren spielt die sicherheitstechnische Auslegung die führende Rolle. Anhand einfacher Beispiele der konstruktiven Gestaltung gas- und wassergekühlter Reaktoren wird auf die bei Konstruktion, Fertigung und Qualitätsprüfung angewandten sicherheitstechnischen Maßnahmen kurz eingegangen. Der Text stellt die Kurzfassung eines Vortrages dar, der im Rahmen eines Seminars für Führungskräfte an der Technischen Universität Hannover gehalten wurde.

1 Kernenergie notwendig, wirtschaftlich und sicher?

Die Diskussion um die Kernenergie ist gerade in diesen Tagen in eine Phase geraten, in der in der Öffentlichkeit verschiedentlich mehr emotionale als technisch-wirtschaftliche Gesichtspunkte im Vordergrund stehen. Eine sachliche Erörterung um das Für und Wider der Kernenergie muß sich zunächst am voraussichtlichen Energiebedarf der nächsten Jahrzehnte orientieren, wird dann die Verfügbarkeit der verschiedenen Energieträger wie Kohle, Öl, aber auch Sonne und Kernfusion

und deren Wirtschaftlichkeit prüfen und schließlich über eine „cost-benefit“-Rechnung gemessen an einer sorgfältigen Risikoanalyse die Entscheidung treffen. Dabei spielen sicher nicht nur technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte, sondern vor allem auch politische Überlegungen, aber keineswegs ideologische Doktrine eine Rolle.

Mineralöl und Kohle sind heute die wesentlichen Träger der Primärenergie in der Bundesrepublik. Würde man auf Kernenergie verzichten, so müßte im Jahre 2020 die Kohle zu über 90% die Energieversorgung übernehmen, da bis dahin die Erdöl- und auch die Erdgasreserven voraussichtlich stark erschöpft sind und neue Technologien zur großtechnischen Nutzbarmachung der Sonnen- und der Fusionsenergie noch nicht zur Verfügung stehen. Kohle sollte aber gerade im Hinblick auf den Bedarf zukünftiger Generationen viel mehr als Rohstoff und nicht als Brennstoff gesehen werden, ganz abgesehen von den Problemen, die aus der Kohlendioxid- und der Schwefeldioxidemission für Klima und Umwelt entstehen können.

Im Kernkraftwerk setzen sich die Stromerzeugungskosten etwa zu 67% aus Anlagekosten, zu 21% aus Brennstoffkosten und zu 12% aus Betriebskosten zusammen, während im Kohlekraftwerk die Anlagekosten 25%, die Brennstoffkosten 65% und die Betriebskosten 10% betragen. Die Preis- und Kostenescalation ist damit bei Kohlekraftwerken zu 70% lohnabhängig, woraus für die Zukunft erhebliche Kostenvorteile bei Kernenergiestrom gegenüber Kohlestrom abgeleitet wird, auch wenn der Uranpreis noch weiter zunehmen sollte.

Bei aller Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit sind Kernkraftwerke aber nur dann vertretbar, wenn sie sicher sind, d.h. wenn das von ihnen ausgehende Risiko weit unter den bereits vorhandenen zivilisatorischen und natürlichen Risiken liegt. Hierüber wurde in den USA eine umfangreiche Studie durchgeführt, deren Ergebnisse im sogenannten *Rasmussen-Report* [1] zusammengefaßt sind. Einen Risikovergleich für amerikanische Standortverhältnisse zeigt **Bild 1**. In jüngster Zeit hat sich eine weitere, von der amerikanischen Ford-Foundation initiierte und finanzierte Studie [2] ebenfalls mit der Problematik Kernenergie befaßt und dabei auch das davon ausgehende Risiko erörtert. Diese Studie kam zu dem Schluß, daß der intensive Einsatz von Kernenergie unter gegenüber *Rasmussen* um den Faktor 500 für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalles pessimistischeren Annahmen im statistischen Mittel den Tod von 1 bis 10 Personen je Jahr und je 1000 MW erzeugter elektrischer Leistung verursachen könnte. Diese Zahl klingt zunächst erschreckend hoch, die Berechnung unter den gleichen Annahmen für Kohlekraftwerke ergab jedoch 2 bis 25 Tote je 1000 MW und je Jahr. Es ist hier nicht Zeit und Ort, auf die in der bisherigen Technik beispiellosen sicherheitstechnischen Maßnahmen bei Kernkraftwerken einzugehen. Ein gewisser Eindruck wird jedoch bei der Diskussion der Auslegung, Fertigung und Qualitätssicherung von Reaktorkomponenten vermittelt.

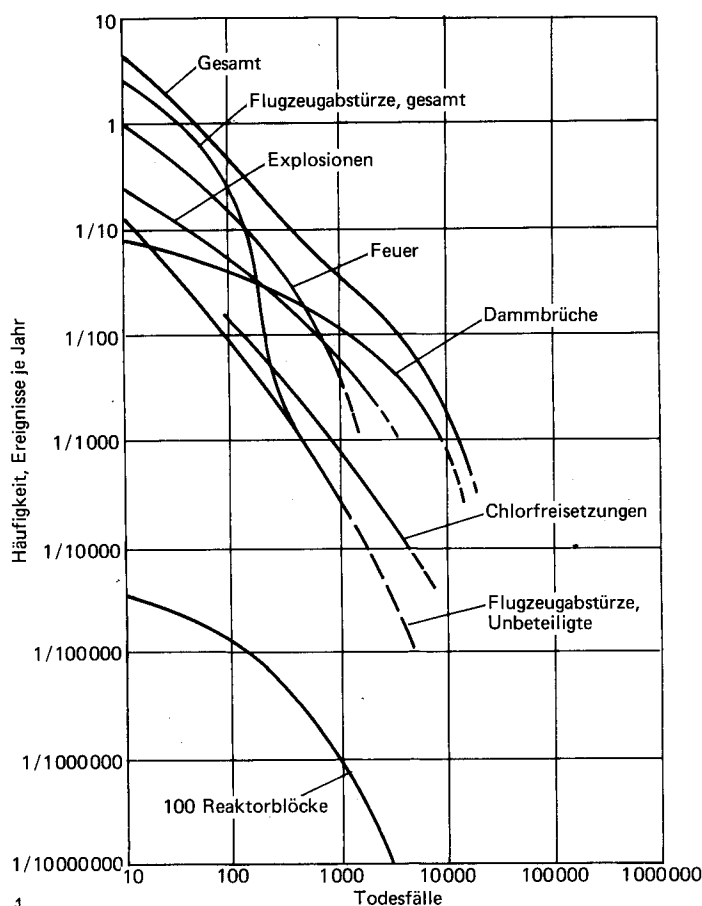


Bild 1. Häufigkeit von Todesfällen (ohne Langzeitfolgen) aufgrund zivilisationsbedingter Ereignisse nach WASH 1400 [1].

2 Reaktorbauarten

Die Unterteilung der Typen von Leistungsreaktoren [3] kann nach Kühlmittel, nach Energieniveau der die Kernspaltung bewirkenden Neutronen oder auch nach Bruteffekt, d.h. dem gewonnenen Anteil neuen spaltbaren Materials erfolgen. Zur kommerziellen Stromerzeugung werden heute fast ausschließlich mit normalem Wasser gekühlte Reaktoren herangezogen,

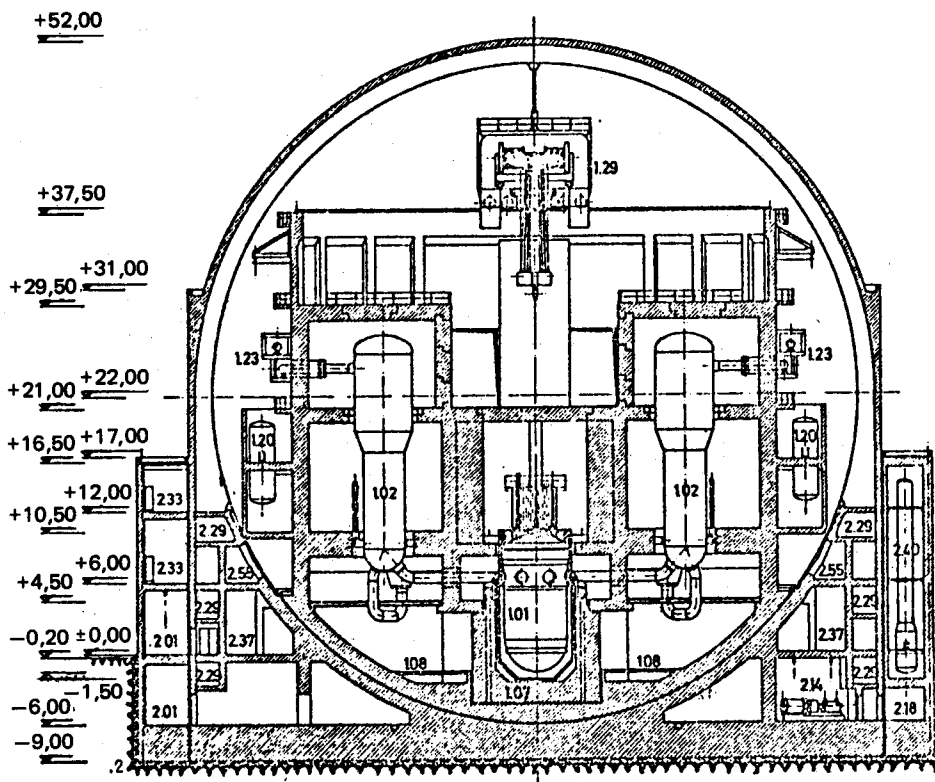


Bild 2. Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor.
 1.01 Reaktordruckbehälter
 1.02 Dampferzeuger
 1.20 Druckspeicher

Primärkreiskomponenten wie Umwälzgebläse und Dampferzeuger integriert sind. Konstruktiv und auslegungstechnisch besonders interessante Komponenten sind hier die mit Elektromotor oder auch mit Dampfturbine angetriebenen Helium-Umwälzgebläse, die gasdichte und wärmeisolierende Auskleidung des Betondruckbehälters — Linner genannt — und die im Zwangsdurchlauf arbeitenden Dampferzeuger.

Der in der Bundesrepublik Deutschland im Bau befindliche flüssig-metallgekühlte Schnelle Brüter, **Bild 6**, arbeitet im Dreikreisssystem, d.h. zwischen dem Natriumprimärkreis und dem die Turbine antreibenden Dampfkreislauf ist ein zweiter Natriumkreislauf zwischengeschaltet, um zu vermeiden, daß bei irgendwelchen Störfällen Natrium des Primärkreises mit Wasser in Berührung kommt. Der doppelwandige Behälter, die Natriumumwälzpumpen und die Dampferzeuger sind hier u.a. die aus-

während gasgekühlte Reaktoren in der Minderzahl sind und flüssigmetallgekühlte Reaktoren sich erst in der Entwicklung bzw. in der Prototypphase befinden.

Wassergekühlte Leistungsreaktoren werden als Druckwasserreaktoren oder als Siedewasserreaktoren gebaut. Der Druckwasserreaktor, **Bild 2**, arbeitet im Zweikreisssystem, wobei vollentsalztes Wasser im Primärkreis an den Reaktorbrennelementen Wärme — ohne zu verdampfen — aufnimmt, die es dann in vier Dampferzeugern an siedendes Sekundärwasser abgibt, dessen Dampf eine Turbine antreibt. Die wichtigsten Komponenten des Primärsystems sind der Reaktordruckbehälter (RDB) mit den darin zum Reaktorkern assemblierten Brennelementen, die vier Dampferzeuger und die Umwälzpumpen. Das Primärsystem ist von einer kugelförmigen Stahlhülle — dem Sicherheitsbehälter — von 50 bis 60 m Durchmesser umgeben.

Beim Siedewasserreaktor, **Bild 3**, erfolgt eine Teilverdampfung des Wassers an den Brennelementen im Reaktordruckbehälter und der Dampf strömt unmittelbar der Turbine zu. Der Kühlmittelumlauf wird bei Reaktoren deutscher Bauart durch im Reaktordruckbehälter angeordnete axiale Umwälzpumpen gewährleistet. Der Sicherheitsbehälter enthält eine Wasservorlage in einer ringförmigen Kondensationskammer, die bei einer Leckage des Primärsystems die Aufgabe hat, den austretenden Dampf weitgehend zu kondensieren, um einen Druckaufbau in größerem Umfang zu vermeiden. Die nach außen führenden Rohrleitungen des Primärsystems zur und von der Turbine werden im Störfall durch rasch wirkende Ventile geschlossen.

Gasgekühlte Reaktoren wie der Thorium-Hochtemperaturreaktor, **Bild 4**, und ein weiterer im Projektierungsstadium befindlicher Hochtemperaturreaktor (HTR 1160), **Bild 5**, besitzen Druckbehälter aus vorgespanntem Beton, in dem alle

auslegungstechnisch und konstruktiv interessanten Apparate.

3 Auslegung und Qualitätssicherung an Reaktorkomponenten

Aus den großen Leistungseinheiten und der gleichzeitigen Forderung nach hoher Sicherheit ergibt sich die Aufgabenstellung für die Entwicklung, die Gestaltung und den Bau von Kernkraftwerken. Insbesondere muß sich die maschinentechnische und apparative Ausrüstung dazu eignen, große Kraftwerkseinheiten bauen zu können, da große Einheiten höhere Wirtschaftlichkeit ermöglichen. Die einzelnen Komponenten müssen so gestaltet und ausgelegt sein, daß ein störungs- und reparaturfreier Betrieb während der gesamten Lebensdauer weitgehend sichergestellt ist, da Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten wegen der radioaktiven Strahlung mit erheblichen Kosten, Zeitaufwand und menschlicher Belastung verbunden sind. An erster Stelle steht jedoch die Forderung nach über das übliche technische Maß weit hinausgehender Unfallsicherheit und der in der Strahlenschutzverordnung vorgeschriebene Schutz der Umwelt.

Primärkomponenten [4, 5] von Leichtwasserreaktoren sind ausschließlich Schweißkonstruktionen aus Schmiedestücken, Stahlgußteilen oder Blechen aus niedrig legierten Feinkornbaustählen, die soweit möglich nur durch Rundnähte verbunden sind. Die kühlmittelbeaufschlagte Innenoberfläche ist mit austenitischem Stahl schmelzschweißplattiert.

Für die Herstellung der Primärkomponenten ist eine hochentwickelte Schweißtechnik von ausschlaggebender Bedeutung. So sind (zum Beispiel beim Druckgefäß, **Bild 7**, für einen Druckwasserreaktor eines 1200 MW-Kernkraftwerkes für die Nähte mehr als 12 t Schweißgut erforderlich. Die Schmelz-

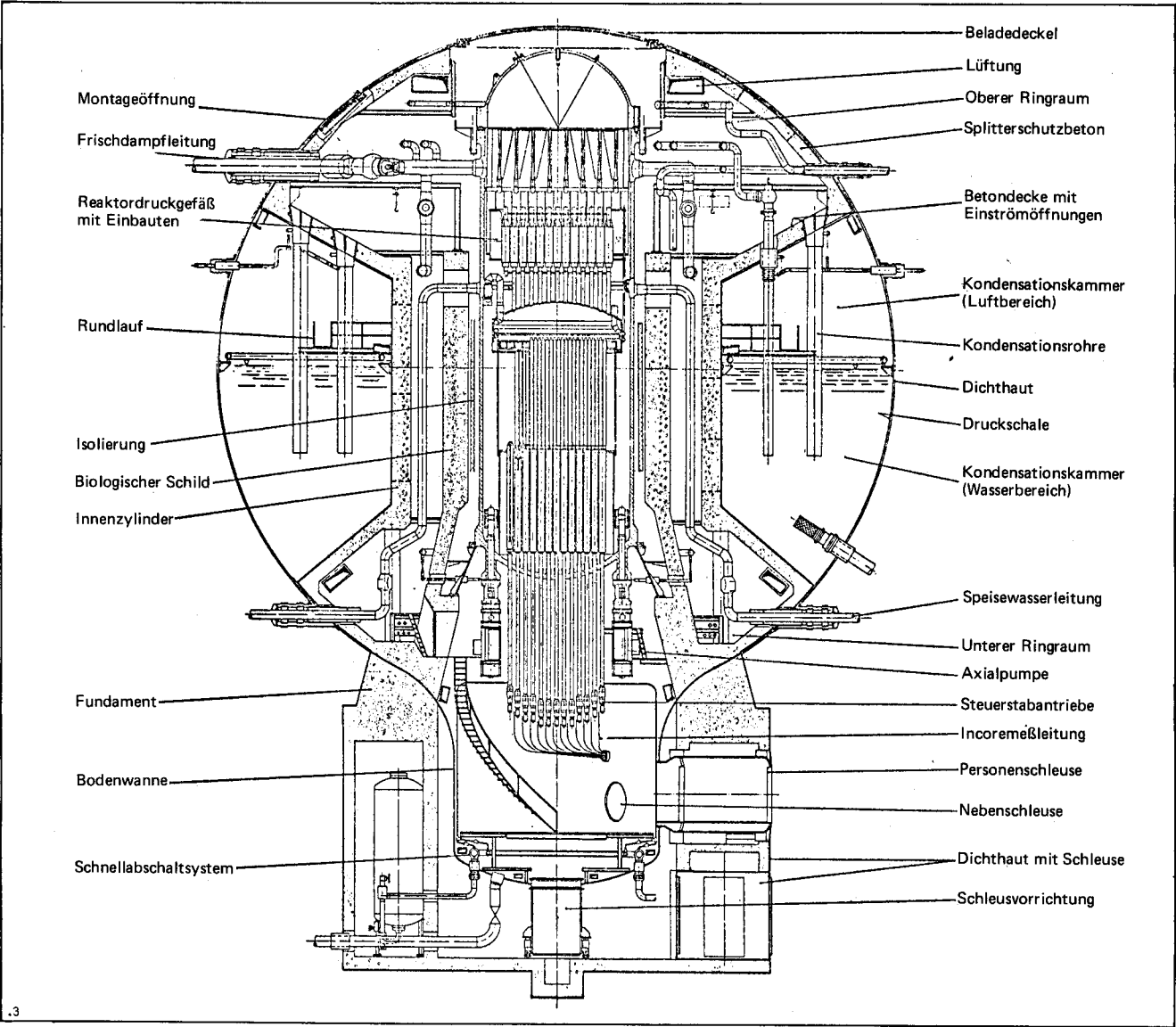


Bild 3. Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor.

schweißplattierung wiegt etwa 13 t. Die Sicherheitshülle, die das nukleare Dampferzeugungssystem umschließt, hat Schweißnähte von rund 5000 m Länge. Beim Reaktordruckbehälter beträgt der zeitliche Anteil des Schweißens einschließlich der hierfür erforderlichen Arbeitsgänge wie Naht vorbereiten, Glühen und Prüfen etwa 55% des Gesamtaufwandes für die Herstellung [6].

Während der Fertigung ist eine Vielzahl von Prüfungen notwendig. Insbesondere an jeden Schweißvorgang schließt sich ein Prüfschritt an. In **Bild 8** ist beispielhaft für die Herstellung eines Reaktordruckbehälters der Ablauf der Hauptprüfschritte als Funktion des Fertigungsablaufes dargestellt. Für die Fertigung ist eine Reihe von Vorprüfunterlagen notwendig, die jeden Fertigungs- und Prüfschritt am Bauteil beschreiben und Gegenstand eines aufwendigen und eingehenden Genehmigungsverfahrens sind. Als Prüfverfahren werden neben der Druckprobe vor allem die Durchstrahlung mit Röntgenstrahlen und die Ultraschallmethode angewandt, die heute Stand der Technik sind. Bei der Wiederholungsprüfung werden automa-

tisch arbeitende Ultraschallsonden mit mehreren Sender- und Empfängerköpfen in Tandembauweise eingesetzt. Hinzuweisen ist auch auf ein neues, erst in Entwicklung befindliches Meßverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung, das mit Hilfe der optischen Holographie [7] arbeitet und vor allem für oberflächennahe kleine Fehlstellen und Risse geeignet ist. Dieses Verfahren macht sich die Störung von Oberflächenwellen an Rissen und Fehlern zu Nutze und kann zukünftig insbesondere für Wiederholungsprüfungen und Vergleichsmessungen an Behältern bis 40 mm Wandstärke herangezogen werden. **Bild 9** zeigt das Interferenzmuster an einer mit Rissen behafteten Platte. Die Störung der Wellenausbreitung macht sich deutlich in einer starken Anomalie der Interferenzstruktur an den Fehlerstellen bemerkbar.

Die festigkeitstechnische Berechnung und werkstoffmäßige Auslegung [8 bis 10] der Reaktorbauteile, insbesondere des Druckgefäßes, erfolgt nach neu entwickelten Berechnungsmethoden, mit deren Hilfe man in der Lage ist, sowohl die stationären als auch die instationären Beanspruchungen zu erfassen.

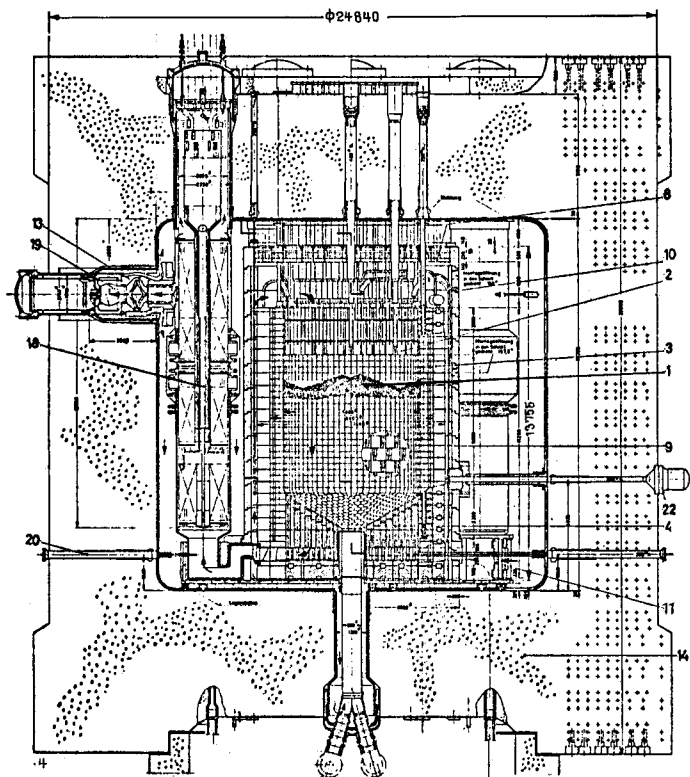


Bild 4. Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300).
1 Kugelhaufen 19 Gebläse 18 Dampferzeuger

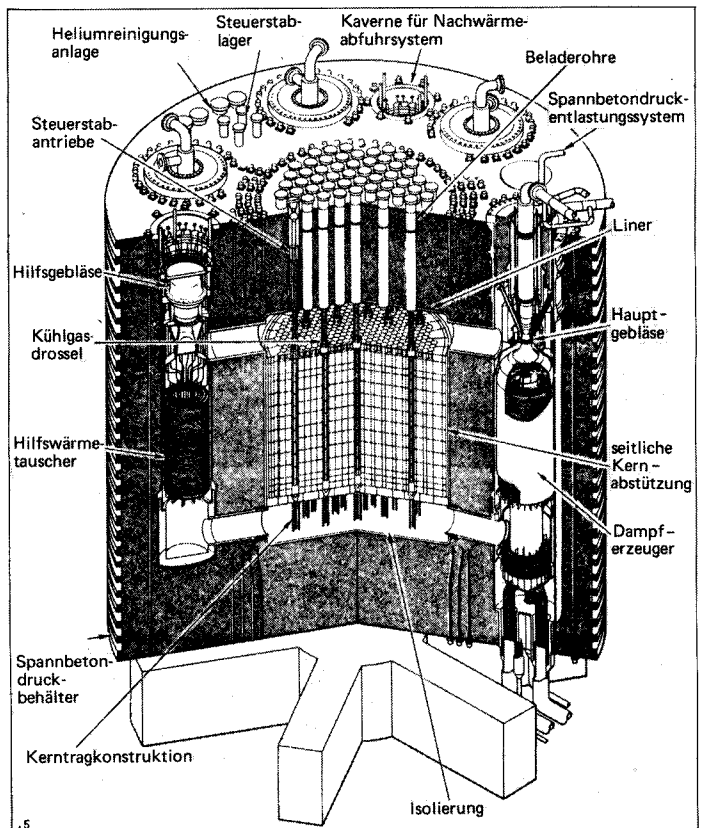


Bild 5. Hochtemperaturreaktor (HTR 1160).

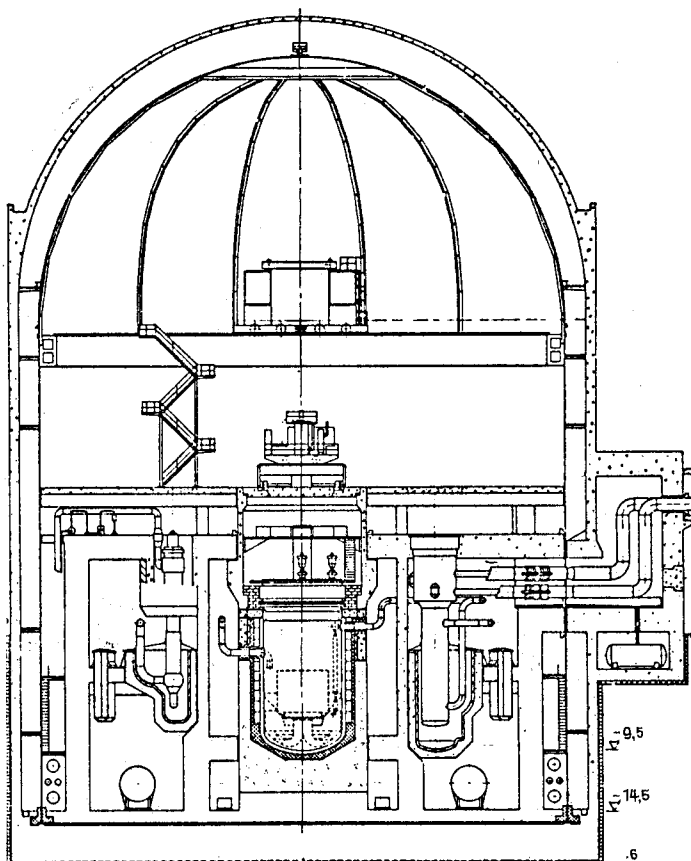


Bild 6. Natriumgekühlter Schneller Brüter (SNR 300).

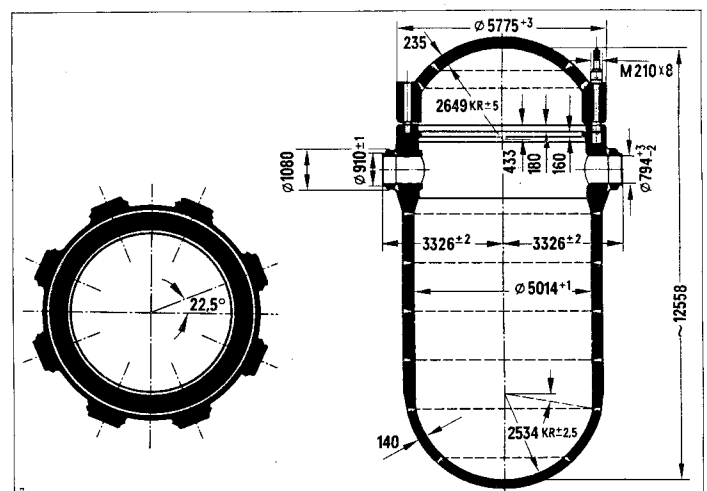


Bild 7. Reaktordruckbehälter für 1200 MW Druckwasserreaktor.

Die Berechnungsgenauigkeit, insbesondere mit Hilfe der Methode der finiten Elemente, geht weit über jene hinaus, die man mit der bisherigen Berechnungsweise im konventionellen Behälterbau erreichte. Umfangreiche Dehnungsmessungen an Druckgefäßen und spannungsoptische Versuche brachten den Beweis, daß auch bei komplizierten Bauteilen die Spannungen sehr genau rechnerisch bestimmbar sind.

Da sicherzustellen ist, daß die Gefäßwände alle Belastungen sicher ertragen, kommt der Werkstoffauswahl größte Bedeutung zu. Neben den ausreichend mechanischen Eigenschaften muß auf die Durchvergüt- und Schweißbarkeit und vor allem auf die Verformbarkeit des Werkstoffes geachtet werden. Ziel

Moderne Technologien durch Werkstoff, Konstruktion, Fertigung und Qualitätskontrolle am Beispiel kerntechnischer Anlagen

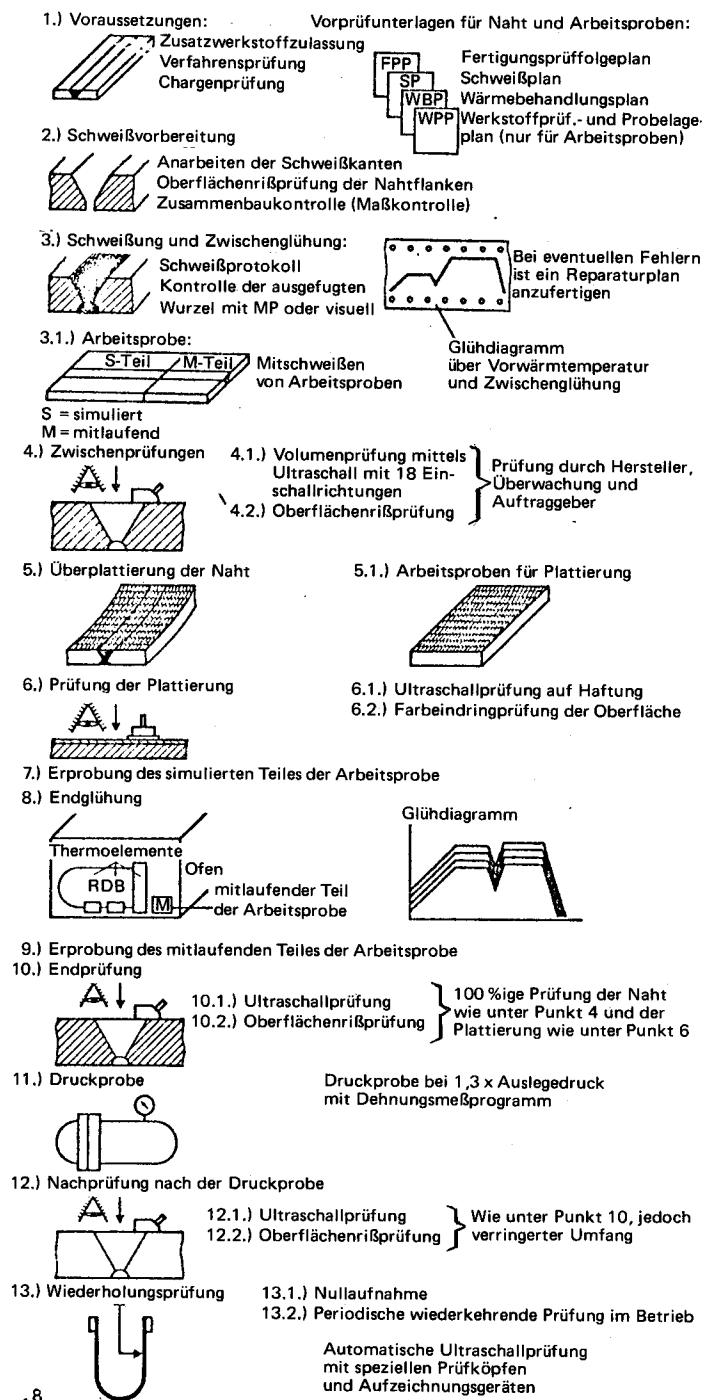


Bild 8. Herstellungs- und Prüfgeschichte einer Reaktordruckbehälter-Schweißnaht.

1. Der spröde Bruch, d.h. ein spontanes Anwachsen des Fehlers, das zu einem spröden Versagen oder Bersten des Druckgefäßes führen würde, was aber physikalisch erst ab einer bestimmten kritischen Fehlergröße möglich ist.
2. Der Verformungsbruch oder zähe Bruch, d.h. ein langsames Anwachsen des Fehlers infolge wechselnder Beanspruchung, was zum Leckwerden des Druckgefäßes führen würde.

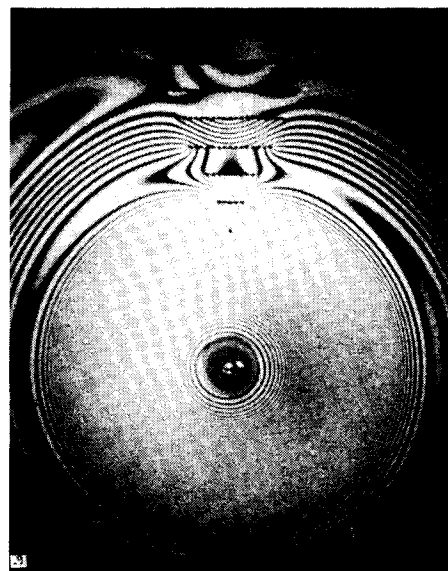


Bild 9. Interferenzlinien von Oberflächenwellen an einer mit verschiedenen Rissen (punktierte Linien) behafteten Platte.

Die Sicherheit gegen beide Bruchmöglichkeiten läßt sich anschaulich in einem „Sprödbbruch-Fahrdiagramm“ darstellen, wie dies in **Bild 10** beispielsweise für das Druckgefäß des Kernkraftwerkes Biblis A geschehen ist [4]. Man erkennt, daß das Fahrdiagramm, d.h. alle Betriebszustände des Druckgefäßes,

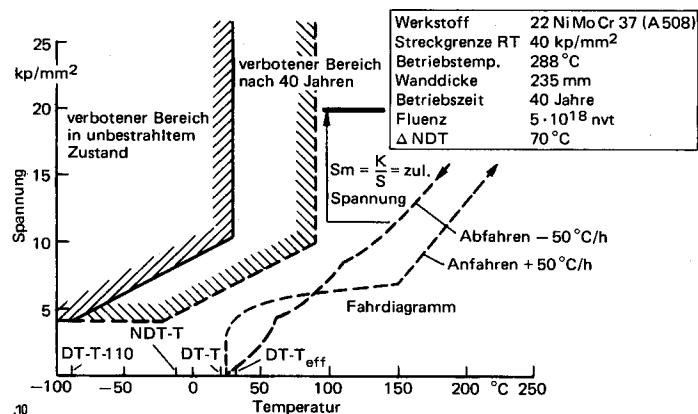


Bild 10. Sprödbbruchdiagramm für Druckbehälter Kernkraftwerk Biblis A.

der Werkstoffentwicklung war es vor allem, bessere Zähigkeitseigenschaften und nicht so sehr höhere Festigkeitswerte zu erreichen.

In der Praxis gibt es kein absolut fehlerfreies Werkstück und die Auslegung hat darauf in vollem Maße Rücksicht zu nehmen. Für die im Werkstück verbleibenden – wenn auch minimalen – Fehler müssen zwei Möglichkeiten bezüglich ihrer Auswirkung während der Lebensdauer des Druckgefäßes untersucht werden.

weit außerhalb der verbotenen Betriebsbereiche liegen und es kann deshalb ein Sprödbbruch des Druckgefäßes nach dieser ersten Untersuchungsmethode ausgeschlossen werden. Eine zweite Untersuchungsmethode führt über die Bruchmechanik, mit deren Hilfe sich die kritischen Rißlängen, die zum Sprödbbruch führen könnten, berechnen lassen. Die Bruchmechanik beruht auf der Energiebilanz zwischen der im beanspruchten Werkstück gespeicherten elastischen Energie und jener Energie, die zur Erzeugung einer neuen Bruchfläche erforderlich ist.

Hieraus lassen sich auch zulässige Rißtiefen, wie in **Bild 11** beispielhaft in Abhängigkeit von der Wanddicke dargestellt ist, festlegen. Die entwickelten Prüfmethoden lassen Fehler einer Größenordnung erkennen, die wesentlich unter der der kritischen Abmessungen ist.

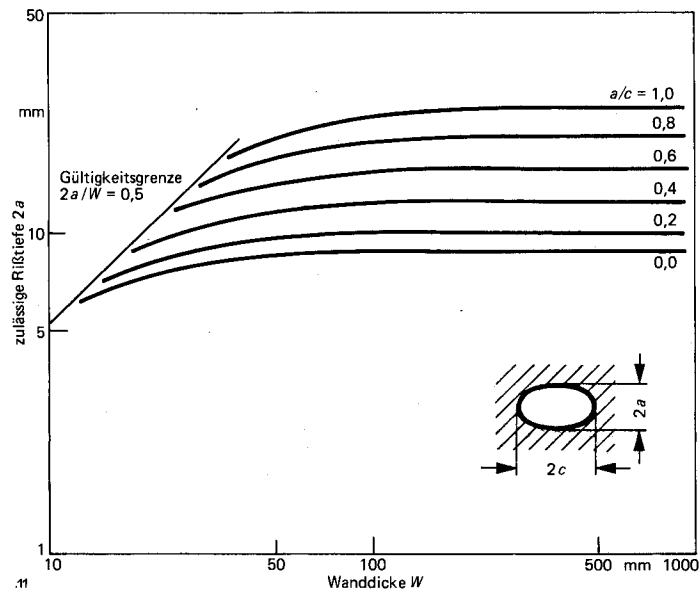


Bild 11. Zulässige Rißtiefen für Innenriß in Abhängigkeit von der Wanddicke.

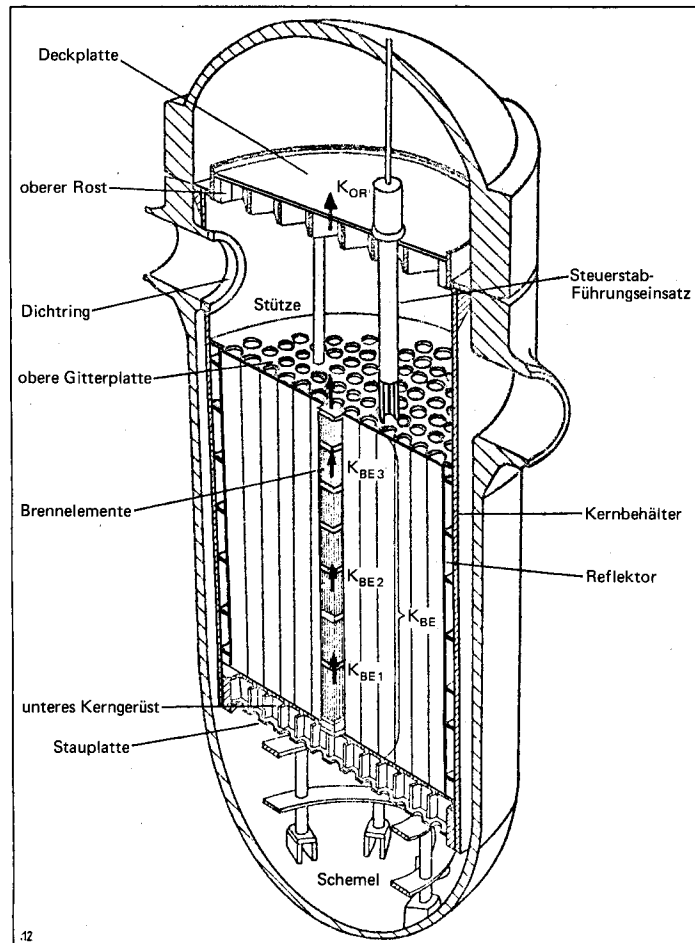


Bild 12. Einbauten für Reaktordruckbehälter.

Bisher aufgetretene Fehler, zum Beispiel an der Primärdampfleitung des Kernkraftwerkes Würzgassen, aber auch am Speisewasserbehälter des Kernkraftwerkes Biblis A haben darüber hinaus das „Leck-Vor-Bruchkriterium“ bestätigt, d.h. daß bei der unter Betriebstemperatur vorhandenen Zähigkeit des Werkstoffes die druckführende Umschließung leak wird, bevor ein rasch anwachsender Bruch einsetzt.

Druckgefäße sind jedoch nicht nur für bestimmungsgemäßen Betrieb, sondern auch für die bei Stör- und Unfällen zu erwartenden Beanspruchungen ausgelegt. Bei einer Leckage im

Primärsystem verursachen starke Druckwellen, die bei und kurz nach der Entstehung des Bruches auftreten, eine erhebliche Beanspruchung der in **Bild 12** skizzierten Druckgefäßeinbauten, insbesondere der Core-Tragstruktur. In einer sorgfältigen, auf Experimente abgestützten rechnerischen Analyse werden diese Kräfte bestimmt und das Druckgefäß daraufhin ausgelegt.

Das aus vorgespanntem Beton bestehende Druckgefäß für einen gasgekühlten Reaktor bedarf einer besonders sorgfältigen Konstruktion der Rohrleitungs-Durchführungen und der gasdichten inneren Auskleidung — Liner genannt. Beton enthält bekanntlich Wasser, das bei Temperaturen weit unter der des die Brennelemente kühlenden Heliums des Primärkreises verdampft und einen unzulässigen Druck zwischen Beton und Liner aufbauen würde. Der Liner muß deshalb, wie in **Bild 13** beispielhaft skizziert, nicht nur eine Dichtfunktion übernehmen, sondern er muß auch Isolier- und Kühlelemente enthalten. In neuerer Zeit werden aus Stahlgußsegmenten bestehende vorgespannte Stahlguß-Druckbehälter [11] für gasgekühlte Kernreaktoren vorgeschlagen. Sie lassen einen geringeren Bauaufwand und niedrigere Kosten als Beton-Druckbehälter erwarten. Hierbei stellt jedoch die Liner-Konstruktion eine schwierige ingenieurmäßige Aufgabe dar.

Einer völlig anderen Problematik sieht sich der Reaktorkonstrukteur bei der Auslegung der Dampferzeuger, **Bild 14**, gegenüber. Besonders in den USA wurden korrosionsbedingte

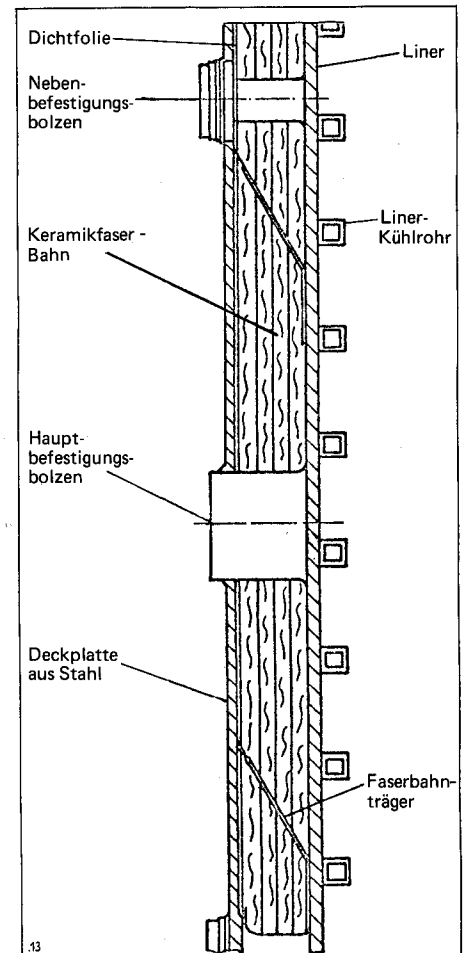


Bild 13. Liner für gasgekühlten Reaktor.

**Moderne Technologien durch Werkstoff,
 Konstruktion, Fertigung und Qualitätskontrolle
 am Beispiel kerntechnischer Anlagen**

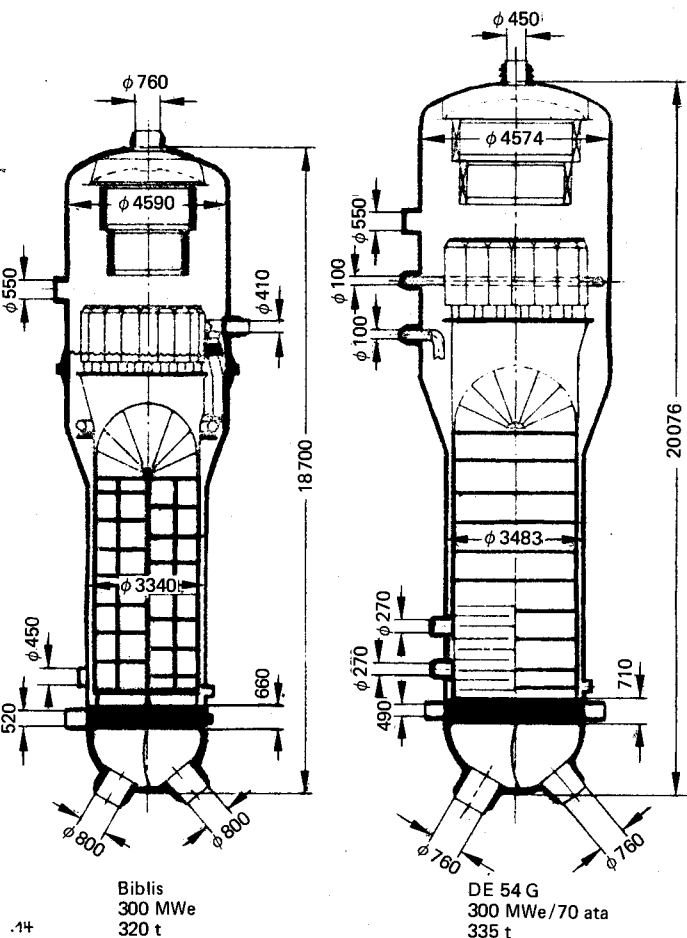


Bild 14. Dampferzeuger für Druckwasserreaktoren.

Schäden mit sichtlichen Wanddickenminderungen an den Rohren im Bereich der Rohrbögen, der Schwingungsdämpfer, insbesondere aber oberhalb der Rohrplatte festgestellt [12]. Hierbei spielt die Wasserchemie und die Strömungsführung des Sekundärwassers im Bereich der Rohrplatte eine große Rolle. Aus Japan wird berichtet, daß es gelang, diese Schäden einfach dadurch zu vermeiden, daß bei der jährlichen Revision Ablagerungen an der Rohrplatte mit einem kräftigen Wasserstrahl abgelöst und abgespült wurden. Diese dem Vernehmen nach wirkungsvolle Methode ist aber wegen der damit verbundenen radioaktiven Belastung des Reinigungspersonals keine ideale Lösung. Dampferzeuger deutscher Hersteller besitzen eine andere Materialzusammenstellung und eine sorgfältige Führung der Wasserchemie, wobei mit gasförmigen Zusätzen – auf Hydrazinbasis – gute Erfahrungen gemacht wurden. Neue Konstruktionen der Dampferzeuger besitzen, wie im rechten Dampferzeuger von Bild 14 skizziert, eine besondere Strömungsführung für das zulaufende Speisewasser.

4 Systemzuverlässigkeit durch laufende Prüfung und Redundanz

Die hohe Sicherheit von Kernreaktoren kann nur durch ein abgestuftes System erreicht werden: nämlich hohe Qualitätsgarantie bei der Fertigung, laufende wiederkehrende Prüfungen während des Betriebes, eine stete Überwachung auf anormale Betriebszustände durch ein umfangreiches und empfind-

liches Schutzsystem, das den Reaktor gegebenenfalls automatisch abschaltet und schließlich durch im Unfall aktiv und passiv wirksam werdende Sicherheitseinrichtungen wie zum Beispiel der gas- und druckdichte Sicherheitsbehälter und das Notkühlsystem, die eine unzulässige radioaktive Freisetzung in die Umgebung sicher verhindern. Darüber hinaus sind Kernkraftwerke auch gegen Einwirkungen von außen wie Flugzeugabsturz, chemische Explosionen, Erdbeben oder Sabotage geschützt.

Für die Sicherheit wesentliche Komponenten sind in Kernenergieanlagen redundant, d.h. „in überflüssigem Maße“, also vielfach vorhanden. Eine sicherheitstechnisch zentrale Rolle spielt das sogenannte Notkühlsystem, dessen Schaltschema für einen Druckwasserreaktor im Bild 15 gezeigt ist und das bei einem Kühlmittelverlust – dem sogenannten größten anzunehmenden Unfall – durch Kühlung die Brennelemente vor unzulässigen Schäden bewahrt und damit die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Primärkreissystem durch das Leck in den Sicherheitsbehälter in sicheren Grenzen hält. Bei der Unfallanalyse geht man pessimistisch von der Annahme aus, daß eine dieser aus jeweils zwei Pumpen, einem Wärmetauscher und einem Vorratsbehälter bestehenden Notkühleinheiten bei Eintritt des Unfalles zufällig in Inspektion ist, eine zweite versagt, schließlich die dritte zum Teil unmittelbar auf die Leckstelle speist, so daß nur die vierte voll zur Verfügung steht. Diese Annahmen werden getroffen, obwohl die Funktionsfähigkeit der Einheiten ständig überwacht wird und Inspektionszeiten äußerst kurz sind.

Man erreicht damit aber Ausfallwahrscheinlichkeiten je Anforderung dieses Notkühlsystems, die im Bereich von 10^{-4} liegen, wie Systemanalysen ermittelten, wobei wegen der sorgfältigen Fertigung und der wiederholten Prüfungen der Primärkreiskomponenten die Wahrscheinlichkeit für die Anforderung ebenfalls extrem gering ist. Grundlage dieser Berechnungen zur Ausfallwahrscheinlichkeit sind die Fehlerbaumanalyse und Betrachtungen zur Ereigniskette [9]. Mit ihrer Hilfe läßt sich nicht nur einwandfrei feststellen, welche Komponenten des Systems in welcher Zahl redundant vorhanden sein sollen, sondern es ließe sich damit auch im konventionellen, also nicht-nuklearen Bereich für beliebig kompliziert verschaltete Anordnungen eine Kosten-Nutzenbetrachtung für die Ersatzteilhaltung von Anlagenkomponenten vornehmen, so daß dem Betriebsmanagement quantitative Angaben zur unterneh-

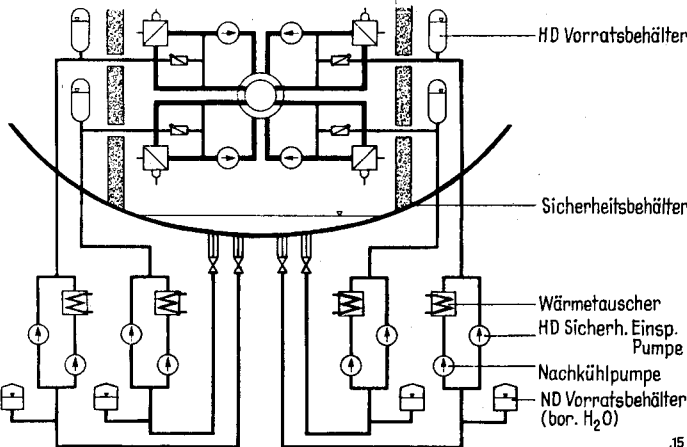


Bild 15. Schema des Notkühlsystems für Druckwasserreaktoren deutscher Bauart.

merischen Entscheidung zur Verfügung gestellt werden können.

Funktionsprüfungen in festgelegten Zeitintervallen und Qualitätskontrollen mit Hilfe der bereits erwähnten zerstörungsfreien Werkstoffprüfungen ergeben Gewißheit über die Verfügbarkeit sicherheitstechnisch wichtiger Systeme in einem bisher in der Technik nicht verifizierten Maße.

Schrifttum

- [1] Reactor Safety Study. United States Atomic Energy Commission, WASH 1400, August 1974.
- [2] Nuclear Power Issues and Choices. Report of the Nuclear Energy Policy Study Group. Ballinger Publishing Company, Cambridge Massachusetts, 1977.
- [3] Smidt, D.: Reaktortechnik. Karlsruhe: G. Braun Verlag, 1976.
- [4] Dörner, H.: Druckgefäße und Primärkomponenten von Druckwasserreaktoren. ATW, Sonderdruck aus der Zeitschrift Atomwirtschaft — Atomtechnik. Handelsblatt GmbH, Düsseldorf, Jahrgang XV, Nr. 9/10, Sept./Okt. 1970.
- [5] Oldekop, W.: Druckwasserreaktoren für Kernkraftwerke. Thiemig-Taschenbücher, Band 51. München: Verlag Karl Thiemig.

- [6] Cerjak, H., W. Debray und D. Pellkofer: Erfahrungen beim Schweißen der Primärkomponenten von Leichtwasserreaktoren. Schweißen und Schneiden Bd. 27 (1975) Nr. 8.
- [7] Mayinger, F., u. W. May: Zerstörungsfreie Materialprüfung mit Hilfe der optischen Holographie. VGB Kraftwerkstechnik. Bd. 56 (1976) Nr. 5, S. 334/40.
- [8] Bartholomé, G., u. H. Dörner: Sicherheitsanalyse von Reaktordruckbehältern. Nuclear Engineering and Design Bd. 20, (1972) Nr. 1, S. 201/13, North-Holland, Publishing Company Amsterdam.
- [9] Kussmaul, K., J. Ewald, G. Maier u. W. Schellhammer: Enhancement of the quality of the reactor pressure vessel used in light water power plants by advanced material, fabrication and testing technologies. Paper presented at the 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology 15—19 Aug. 1977, San Francisco, California, USA.
- [10] Jezussek, A.: Konstruktion und Festigkeitsanalyse für Primärkreis Komponenten. Sonderdruck aus: Kerntechnik Bd. 18 (1976) Nr. 4, S. 168/74, Verlag Karl Thiemig, München.
- [11] Battelle-Institut, Frankfurt: Untersuchung über die Realisierbarkeit eines vorgespannten gußeisernen Reaktordruckbehälters, Bd. 1, Sept. 73, u. Bd. 2 Dez. 74.
- [12] Kläke, R. D., u. H. Kracht: Unterschiedliche Schadensempfindlichkeit der Dampferzeuger von Druckwasserreaktoren. GKSS-Bericht 1303, Geesthacht, März 1975. A 28 199

Metalle, mittel- und langfristige Entwicklung

Von Friedrich Erdmann-Jesnitzer, Hannover

Der Beitrag gibt in stark gekürzter Form einen Vortrag des Verfassers wieder. Die Ausführungen vermitteln einen Einblick in die Probleme der Veredelung von Metallen und befassen sich vor allem mit Rohstoff- und Wirtschaftlichkeitsfragen.

1 Einleitung

Das Metier des Werkstoffkundlers ist es zu wissen, was und wie sich etwas im Metallinneren abspielt als Folge der Belastung einer Konstruktion, durch Verarbeitung der Werkstoffe. Im Vordergrund steht die Frage, wie stoffbezogene Eigenschaften günstig erzeugt werden können.

Welche Änderungen sind betrieblich beherrschbar? Warum besitzen metallische Werkstoffe Festigkeit? Nutzen wir schon alle physikalischen und technischen Möglichkeiten aus? Dies ist das Gebiet angewandter Metall- bzw. Festkörperphysik, für viele „Betriebsleute“ ein Gebiet, das sie wenig oder gar nicht beherrschen. Von Bedeutung wird es für sie oft erst, wenn Schaden entstand und Ursachen geklärt werden müssen.

Werkstoffkenntnisse werden im konstruktiven Ingenieurbau durch oft komplexe Beanspruchung zur fundamentalen Basis angewandter Betrachtung, zum Beispiel in der Bruchmechanik.

Erkennbar ist, daß ein fortschrittlicher Maschinenbau, eine hochentwickelte Konstruktionslehre und Fertigungstechnik sowie neue Erkenntnisse in der Metallurgie und Legierungsentwicklung offensichtlich die größten Möglichkeiten zur Innovation versprechen. Zu lange erfolgte eine nur empirische Entwicklung von Eisen- und Nichteisenmetalllegierungen als Optimierung der Zusammensetzung ohne volle Ausschöpfung möglicher Zustandsänderungen. Welchen Weg sollen wir gehen? Was tun zu werkstofflicher Innovation, zu Verbesserungen unter Berücksichtigung von Rohstofffragen, von Kostenaufwand und Energiebedarf? Müssen wir lernen, in der nahen Zukunft umzudenken?

2 Klassische Herstellung metallischer Werkstoffe

Art, Menge und Verteilung der im Mischkristall löslichen Elemente bestimmen in einphasigen Mischkristallgefügen die Werte mechanischer Festigkeit. Streck- oder Fließgrenze sind ebenso wie Zugfestigkeit und Verfestigungsfähigkeit an eintretende oder eingetretene plastische Deformation gebunden. Die Bildung, Wanderung und Auflösung von Versetzungen stellt einen der Elementarprozesse plastischer Deformation dar. Festigkeitswerte steigen an mit abnehmender Korngröße. Die gleitblockierende Auswirkung der Körnerberührungsflächen — im Schlißbild die Korngrenzen oder Interfaces bei Fremdphaseneinschluß, Ausscheidungsprodukten oder Einschlüssen — üben einen elementaren Einfluß auf die Festigkeit als Widerstand gegen Verformung aus.

Jedes Hindernis im Gefüge wirkt sich qualitativ analog wie eine Korngrenze aus. Der Widerstand gegen Verformung steigt an. Die Konstruktion wird höher belastbar. Man strebt deshalb die Erzeugung heterogener, d.h. mehrphasiger Gefüge an: Zweite und dritte Phasen sind erwünscht. Diese können willkürlich erzeugbar durch thermomechanische Behandlung entstehen. Genutzt wird dabei die mit höherer Temperatur in der Regel auftretende vergrößerte Löslichkeit. Ist diese erreicht, erfolgt entweder anschließend Abschrecken und darauf folgend Anlassen. Während des Anlassens entstehen Ausscheidungen. Die andere Möglichkeit besteht in einer Teil-Temperaturabsenkung, dann folgt Warmformgebung. Es treten durch plastisches Durchkneten Ausscheidungen bevorzugt noch in der Wärme auf. Erwünscht sind diese Ausscheidungsprodukte in homogener Verteilung bei betrieblich vertretbarem Umformgrad.

Parallel zur Warmformgebung läuft die Rekristallisation ab. Neue Körner bilden sich. Sie wachsen so lange, wie dies ungestört möglich ist. Die Größe dieser Körner ist begrenzt. Wenn Ausscheidungen erreicht werden, tritt aus energetischen Gründen eine Wachstumshemmung ein. Man erzielt also Kornfein-