

ANHANG A:

**Aufbau, Wirkungsweise und wesentliche Sicherheitsmerkmale von
Kernkraftwerken**

A.1 Kernphysikalische Grundlagen

A.2 Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (DWR)

- A.2.1 Funktionsweise eines Kernkraftwerkes mit Druckwasserreaktor am Beispiel der Anlage Isar 2
- A.2.2 Wichtige Systeme und Komponenten
 - A.2.2.1 Nukleares Dampferzeugungssystem
 - A.2.2.1.1 Reaktorkern
 - A.2.2.1.2 Reaktordruckbehälter
 - A.2.2.1.3 Dampferzeuger
 - A.2.2.2 Reaktorhilfs- und –nebenanlagen

A.3 Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktor (SWR)

- A.3.1 Funktionsweise eines Kernkraftwerks mit Siedewasserreaktor am Beispiel der Anlage Krümmel
- A.3.2 Nukleare Wärmezeugung
 - A.3.2.1 Reaktorkern
 - A.3.2.2 Reaktordruckbehälter
 - A.3.2.3 RDB-Einbauten
 - A.3.2.4 Zwangsumwälzpumpen
- A.3.3 Sicherheitsbehälter und Druckabbausystem

A.4 Kernkraftwerke mit Hochtemperaturreaktor (HTR)

- A.4.1 Aufbau und Funktion eines Kernkraftwerks mit Hochtemperaturreaktor am Beispiel des THTR-300
- A.4.2 Nukleares Dampferzeugungssystem
- A.4.3 Sicherheitseinrichtungen

A Aufbau, Wirkungsweise und wesentliche Sicherheitsmerkmale von Kernkraftwerken

Nachstehend werden – soweit es für den Zweck dieser Arbeit sinnvoll und angemessen ist - Aufbau und Funktion von Druckwasser-, Siedewasser- und Hochtemperaturreaktoren sowie ihrer wichtigsten sicherheitstechnisch bedeutsamen Systeme in knapper Form beschrieben. Die Angaben wurden im wesentlichen der für das atomrechtliche Genehmigungsverfahren erstellten Kurzbeschreibung des Kernkraftwerks Isar 2 [KUR 81], derjenigen des Kernkraftwerks Krümmel [KUR 81A] sowie einer einschlägigen GRS-Broschüre [FRA 83] entnommen.

A.1 Kernphysikalische Grundlagen

Durch die Spaltung von Atomkernen kann Wärme erzeugt werden, diesen physikalischen Tatbestand macht man sich in den Kernkraftwerken zunutze. Es werden dabei spaltbare Uranatomkerne mit Neutronen beschossen. Durch die Aufnahme eines Neutrons in einen Uran-235-Kern zerplatzt dieser in zwei mittelschwere Kernbruchstücke; nur selten entsteht noch ein drittes leichtes Kernbruchstück. Einen Teil der Bindungsenergie, die den Urankern zusammenhielt und nun nicht mehr gebraucht wird, nehmen die Bruchstücke als Bewegungsenergie mit auf ihren Weg. Die Kernbruchstücke sind elektrisch positiv geladen, stoßen sich im Augenblick des Entstehens ab und fliegen mit großer Geschwindigkeit auseinander. Durch die Einbettung des gespaltenen Atoms in ein Kristallgitter können die Kernbruchstücke nicht frei wegfliegen, sondern werden sehr schnell abgebremst. Bei der Bremsung der Kernbruchstücke wird die Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt.

Die bei der Spaltung eines Uranatoms freiwerdende Energie beträgt ca. 200 MeV. Bei der Spaltung von 1 kg U 235 werden ca. 17 Milliarden Kilokalorien ($71,2 \times 10^{12}$ Joule) frei, zu deren Erzeugung andernfalls ca. 2,4 Millionen kg Steinkohle benötigt würden. Außerdem werden je Spaltvorgang zwei bis drei Neutronen frei, die sich im Mittel mit einer Geschwindigkeit von rund 10 000 km je Sekunde fortbewegen. Man spricht hierbei von "schnellen" Neutronen. Damit eines dieser Neutronen mit möglichst großer Wahrscheinlichkeit wiederum einen Urankern trifft und diesen spaltet, muß die Geschwindigkeit der Neutronen verringert werden.

Dieses geschieht in einem Bremsmittel, dem sogenannten Moderator. Die anfangs "schnellen" Neutronen verlieren ihre Energie durch ständiges Anstoßen an die Moderatoratome. Die nach dem Bremsvorgang vorhandenen Neutronen nennt man "thermische" Neutronen. Sie besitzen eine Geschwindigkeit von etwa 2000 m je Sekunde, wie sie auch Gasmoleküle durch die Wärmebewegung bei normaler Temperatur haben. Diese langsamen Neutronen eignen sich für die Auslösung weiterer Spaltvorgänge, damit kann eine kontinuierliche Wärmeerzeugung im Reaktor aufrechterhalten werden. Als Moderator wird bei dem hier beschriebenen Reaktortyp aufbereitetes "leichtes" Wasser (H_2O) verwendet.

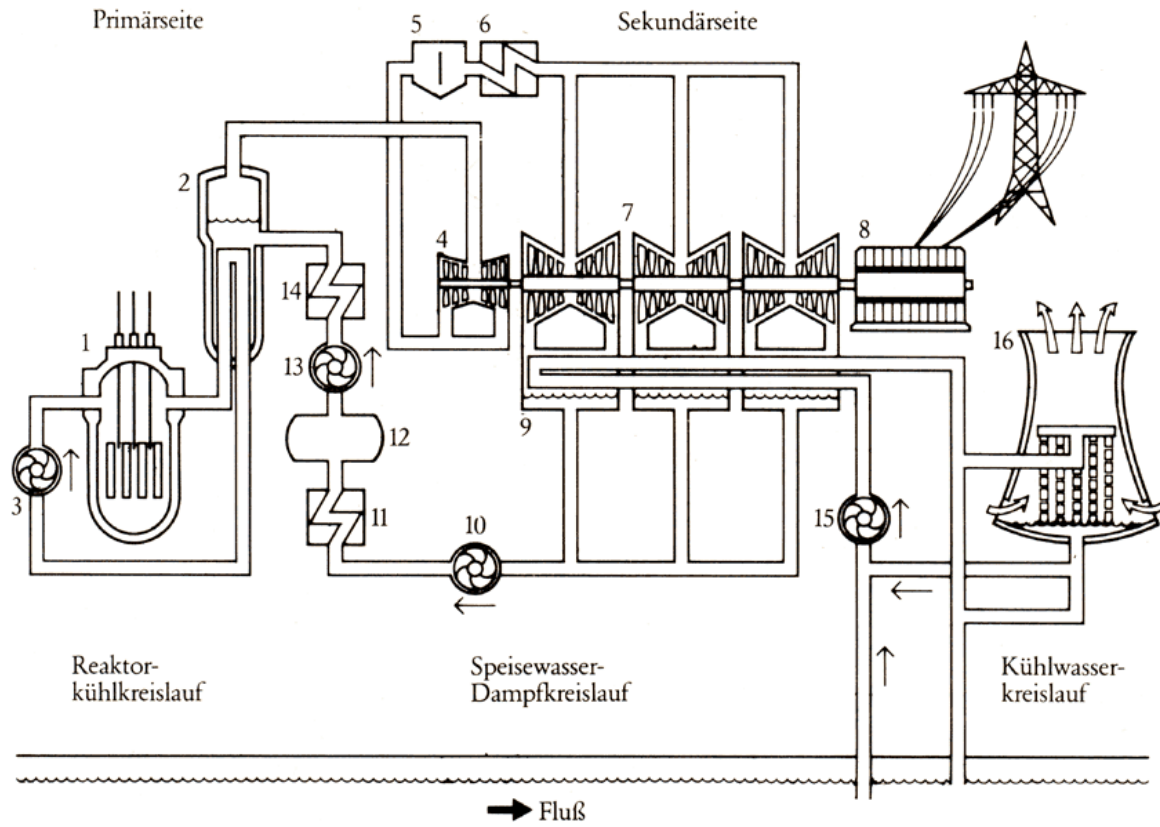
Die bei der Kernspaltung entstehenden Kernbruchstücke werden "Spaltprodukte" genannt; es entsteht eine Vielzahl verschiedener Nuklide, so zum Beispiel Xenon 133, Krypton 85, Jod 131 usw.

Die Kernspaltungsvorgänge sind von der Aussendung radioaktiver Strahlung begleitet. Der größte Teil dieser Strahlung tritt sofort - beim Spaltungsvorgang - auf und wird als "prompte" Strahlung bezeichnet. Sie besteht aus "prompten" Neutronen, von denen einige nach der Abbremsung im Moderator die Kettenreaktion weitertragen. Des Weiteren entsteht dabei die "prompte" Gammastrahlung, die weitgehend der Röntgenstrahlung entspricht. Die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte sind größtenteils selbst radioaktiv, sie senden entsprechend ihrer Zerfallszeit noch über längere Zeit Strahlung aus.

Die meisten Spaltprodukte stabilisieren sich durch die Aussendung von Betastrahlung (aus Elektronen bestehende Strahlung). Häufig entsteht nach einem Betazerfall noch zusätzlich Gammastrahlung. Diese radioaktiven Zerfallsvorgänge sind die Ursache für die noch nach Abschalten des Reaktors (Unterbinden der Kettenreaktion) entstehende Nachzerfallswärme.

Neben den Spaltprodukten entstehen beim Reaktorbetrieb weitere radioaktive Stoffe als sogenannte Aktivierungsprodukte und Transurane. Dabei werden normalerweise nichtradioaktive Elemente durch Neutroneneinfang aktiviert.

Die vorstehend beschriebenen radioaktiven Stoffe stellen das eigentliche Gefährdungspotential im Kernkraftwerk dar. Alle Sicherheitseinrichtungen haben zum Ziel, diese Stoffe nicht bzw. nur in zulässigem Maße in die Umgebung gelangen zu lassen.



Reaktorkühlkreislauf	Speiswasser-Dampfkreislauf	Kühlwasserkreislauf
1 Reaktor	4 Hochdruckturbine	15 Hauptkühlwasserpumpe
2 Dampferzeuger	5 Wasserabscheider	16 Hauptkühlwasserpumpe
3 Hauptkühlmittelpumpe	6 Zwischenüberhitzer	
	7 Niederdruckturbine	
	8 Generator	
	9 Kondensator	
	10 Hauptkondensatpumpe	
	11 Niederdruckvorwärmer	
	12 Speiswasserbehälter	
	13 Speiswasserpumpe	
	14 Hochdruckvorwärmer	

Abb. A-1: Funktionsschema eines Kernkraftwerkes mit Druckwasserreaktor

A.2 Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (DWR)

A.2.1 Funktionsweise eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor am Beispiel der Anlage Isar 2

Der Reaktorkern ist die nukleare Wärmequelle eines Kernkraftwerkes. Er besteht aus aneinandergesetzten, gleichartigen Brennelementen, die den Kernbrennstoff (Uran mit dem spaltbaren Isotop Uran 235) enthalten und vom Wasser des Reaktorkühlsystems durchströmt werden. Das Wasser hat hier sowohl die Funktion des Moderators als auch des Kühlmittels (s. Abb. A-1).

Die bei der Kernspaltung freiwerdende Wärme wird über ein geschlossenes Reaktorkühlsystem – bestehend aus vier parallel geschalteten Primärkreisläufen (Loops) – an den Speisewasser-Dampf-Kreislauf – bestehend aus vier parallel geschalteten Sekundärkreisläufen – abgegeben. Durch den Einsatz von Steuerstäben und durch Veränderung der Borkonzentration im Kühlmittel lässt sich die gewünschte Wärmeerzeugung im Reaktorkern steuern.

Die Steuerstäbe enthalten Materialien, die Neutronen einfangen (z.B. eine Silber-Indium-Cadmium-Legierung oder Bor); der Borzusatz im Kühlmittel dient dem gleichen Zweck. Im Reaktorkühlsystem wird das als Kühlmittel verwendete Wasser mittels vier Hauptkühlwasserpumpen zwischen dem Reaktordruckbehälter und den vier Dampferzeugern umgewälzt. Das im Reaktor auf ca. 326°C erwärmte Wasser kann nicht verdampfen, da das Reaktorkühlsystem durch den Druckhalter auf einem höheren Druck (158 bar) als dem Verdampfungsdruck des Wassers gehalten wird (daher der Name "Druckwasserreaktor"). Die Wärme aus dem Reaktorkühlsystem wird über Wärmetauscher (Dampferzeuger) an den Sekundärkreislauf abgegeben. Die Rohrwände der Dampferzeuger trennen das Reaktorkühlsystem vom Sekundärkreislauf und verhindern den Übergang von radioaktiven Stoffen aus dem Kühlmittel in den Speisewasser-Dampf-Kreislauf. Sekundärseitig fördern Hauptspeisepumpen Speisewasser aus dem Speisewasserbehälter zu den Dampferzeugern, in den Dampferzeugern verdampft das Speisewasser. Der erzeugte Frischdampf steht unter einem Druck von ca. 64 bar und hat eine Temperatur von ca. 280°C. Dieser Dampf treibt eine 1500-tourige Kondensationsturbine mit direkt gekoppeltem Drehstromgenerator an. Der Abdampf aus der Turbine wird in Oberflächenkondensatoren niedergeschlagen, die mit Wasser aus dem Hauptkühlwassersystem gekühlt werden. Hauptkondensatpumpen fördern das in den Kondensatoren anfallende Kondensat zum Speisewasserbehälter zurück. Auf dem Weg von den Kondensatoren zu den Dampferzeugern wird das Speisewasser entgast und durch "Anzapfdampf" aus der Turbine vorgewärmt.

Die im Drehstromgenerator erzeugte elektrische Energie wird über Transformatoren in das bundesweite Höchstspannungsnetz eingespeist.

Die Leistungsregelung und Abschaltung des Reaktors erfolgen mit Hilfe der Steuerstäbe. Nach dem Abschalten des Reaktors sorgen Nachkühlsysteme für die Abfuhr der in den Systemen gespeicherten Wärme und der Nachzerfallwärme. Letztere ist durch den Zerfall der radioaktiven Spaltprodukte bedingt und wird auch nach Beendigung der Kettenreaktion frei. Sie beträgt unmittelbar nach Reaktorabschaltung noch einige Prozent der vollen Wärmeleistung, um dann sehr schnell – exponentiell – abzufallen.

A.2.2 Wichtige Systeme und Komponenten

A.2.2.1 Nukleares Dampferzeugungssystem

Das nukleare Dampferzeugungssystem ist im Reaktorgebäude untergebracht und besteht im wesentlichen aus den nachfolgend beschriebenen Komponenten (Abb. A-2).

- 1 Reaktordruckbehälter
- 2 Dampferzeuger
- 3 Hauptkühlmittelpumpe
- 4 Lager für neue Brennelemente
- 5 Brennelementlagerbecken
- 6 Lademaschine
- 7 Biologischer Schild
- 8 Sicherheitscontainment
- 9 Reaktorgebäude
- 10 Materialschleuse
- 11 Frischdampfleitung
- 12 Ringräume

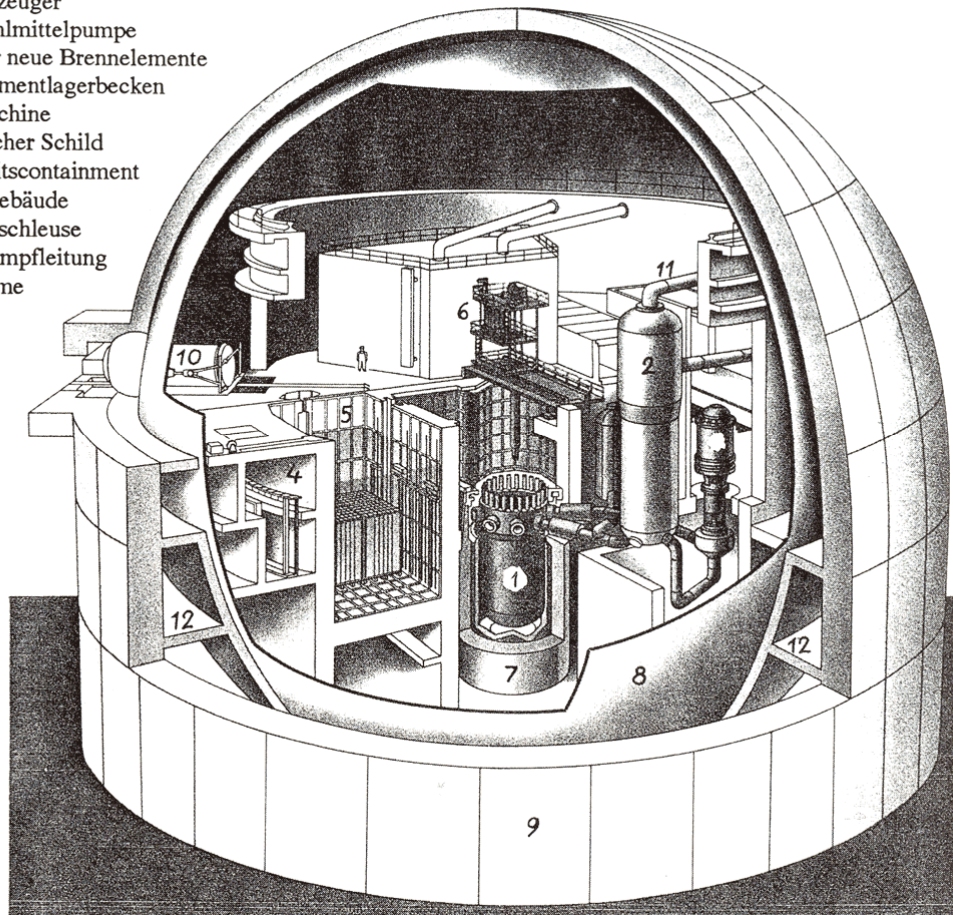


Abb. A-2: Schnitt durch das Reaktorgebäude

A.2.2.1.1 Reaktorkern

Innerhalb des stählernen Reaktordruckbehälters ist der Reaktorkern angeordnet. Er besteht aus 193 Brennelementen. Die Brennelemente haben einen quadratischen Querschnitt und sind so angeordnet, daß sie sich der zylindrischen Form des Kernbehälters gut anpassen.

In den einzelnen Brennelementen sind die Brennstäbe in Quadratgitterpositionen in 16 x 16-Geometrie angeordnet. Ein Brennstab besteht aus einem dünnwandigen Rohr einer Zirkonlegierung, das mit einer Säule von Urandioxyd-Tabletten gefüllt ist. Die Enden sind mit Endstopfen gasdicht verschweißt.

Die Länge der Säule, die der aktiven Länge des Brennelements entspricht, beträgt 3.900 mm. Die einzelnen Brennstäbe werden durch Abstandshalter in ihrer Position gehalten. Insgesamt hat jedes Brennelement $16 \times 16 = 256$ mögliche Brennstabpositionen, von denen aber nur 236 mit Brennstäben besetzt sind.

Die restlichen 20 Positionen sind mit Steuerstabführungsrohren besetzt. Diese sind Leerrohre, in die die Absorberfinger der Steuerstäbe eintauchen können. Sie sind gleichmäßig über den Brennelementquerschnitt verteilt.

Zu dieser vorstehend beschriebenen Kern- und Brennelementauslegung ist ein gleichwertiges alternatives Auslegungskonzept vorgesehen, bei dem die Brennstäbe und Führungsrohre auf Quadratgitterpositionen in 18×18 -Geometrie angeordnet sind.

Ein 18×18 -Brennelement umfaßt 324 mögliche Brennstab-Positionen, die auf 300 Brennstäbe und 24 Steuerstabführungsrohre aufgeteilt sind. Dieser Brennelementtyp hat die gleichen Außenabmessungen und enthält in etwa die gleiche Uranmenge wie das 16×16 -Brennelement.

Insgesamt enthält der Reaktor 61 Steuerelemente mit jeweils 20 bzw. 24 Absorberfingern, die am oberen Ende über einen spinnenförmigen Fingerhalter verbunden sind und gemeinsam bewegt werden können.

Der Reaktorkern wird durch das Kerngerüst im Reaktordruckbehälter gehalten. Das Kerngerüst besteht aus einer unteren Gitterplatte, die die Brennelemente trägt, und einer oberen Gitterplatte, durch die die Brennelemente gegen Umkippen gesichert werden. Des Weiteren sind Einrichtungen vorgesehen, die sicherstellen, daß der gesamte Kern gleichmäßig vom Kühlmittel durchströmt wird.

Die im Reaktorkern angeordneten Brennelemente sind untereinander weitgehend austauschbar. Sie unterscheiden sich im "Erstkern" durch drei verschiedene Anreicherungen an U 235. Bei jedem Brennelementwechsel werden jährlich etwa $1/3$ der Brennelemente aus dem Reaktorkern entnommen und durch neue Elemente ersetzt.

A.2.2.1.2 Reaktordruckbehälter

Der Reaktordruckbehälter ist ca. 12 m hoch und hat einen Außendurchmesser von ca. 6 m (Abb. A-3). Die Wandstärke im zylindrischen Teil beträgt ca. 250 mm. Der Behälter ist für 175 bar bei 350°C ausgelegt und aus niedrig legiertem Feinkornbaustahl gefertigt. Dieser Werkstoff zeichnet sich neben hoher Zähigkeit und geringer Versprödungsneigung unter Neutronenbestrahlung durch gute Schweißbarkeit aus. Aufgrund bruchmechanischer Untersuchungen und durch exakte Spezifizierung aller Werkstoffprüfungen wird sichergestellt, daß ein Bruch des Reaktordruckbehälters ausgeschlossen ist. Zur Kontrolle der Neutronenversprödung sind im Reaktor repräsentative "voreilende" Werkstoffproben eingesetzt, die regelmäßig untersucht werden.

Der abnehmbare Deckel des Reaktordruckbehälters ist mit hydraulisch vorgespannten Bolzen verschraubt und durch zwei selbstdichtende metallische Dichtringe mit Zwischenabsaugung abgedichtet.

Im Reaktordruckbehälter ist das Kerngerüst eingesetzt, das den Reaktorkern trägt und den Kühlmittelstrom führt.

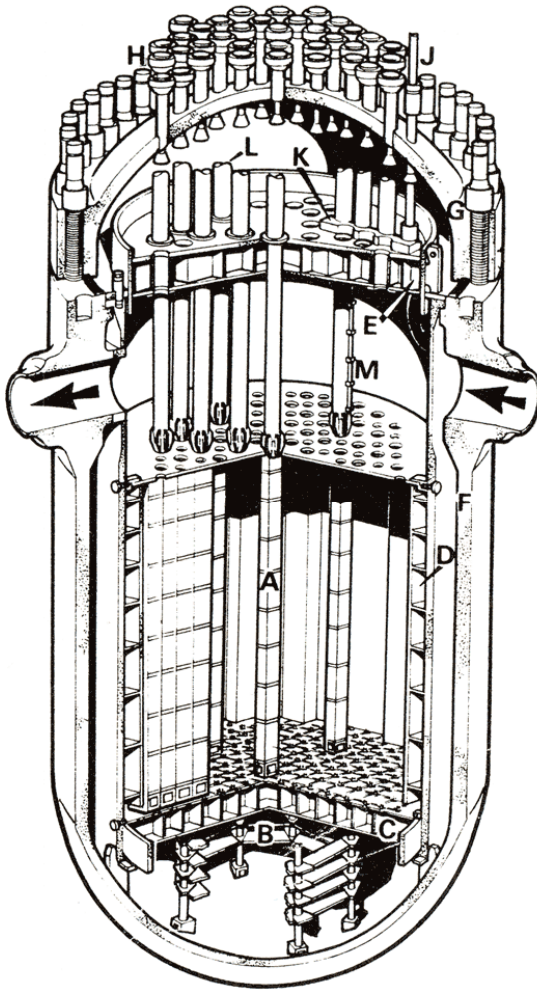


Abb. 2.2.1.4 Schnitt durch das Reaktordruckgefäß

- A Reaktorkern
- B Schemel
- C Unterer Rost
- D Kernbehälter, thermischer Schild
- E Oberer Rost
- F Reaktordruckbehälter
- G Reaktordruckbehälterdeckel
- H Stützen für Steuerantriebe
- I Stützen für Kerninstrumentierung
- K Instrumentierungslanze
- L Steuerelementführungseinsatz
- M Kerninstrumentierungsführungsrohr

Abb. A-3: Reaktordruckbehälter mit Einbauten

A.2.2.1.3 Dampferzeuger

Die vier Dampferzeuger übertragen die Wärme des Reaktorkühlmittels an den Speisewasser-Dampf-Kreislauf und erzeugen Sattdampf von 64,5 bar und 280,3°C zum Antrieb des Turbogenerators. Ein Dampferzeuger ist ca. 21 m lang und hat einen Außendurchmesser von ca. 5 m beim Dampfdom und ca. 4 m beim unteren zylindrischen Teil (Abb. A-4). Die Dampferzeuger sind aus Feinkornbaustahl gefertigt. Die Heizrohre selbst bestehen aus Incoloy 800, einem Werkstoff, der sich durch hohe Korrosionsbeständigkeit auszeichnet.

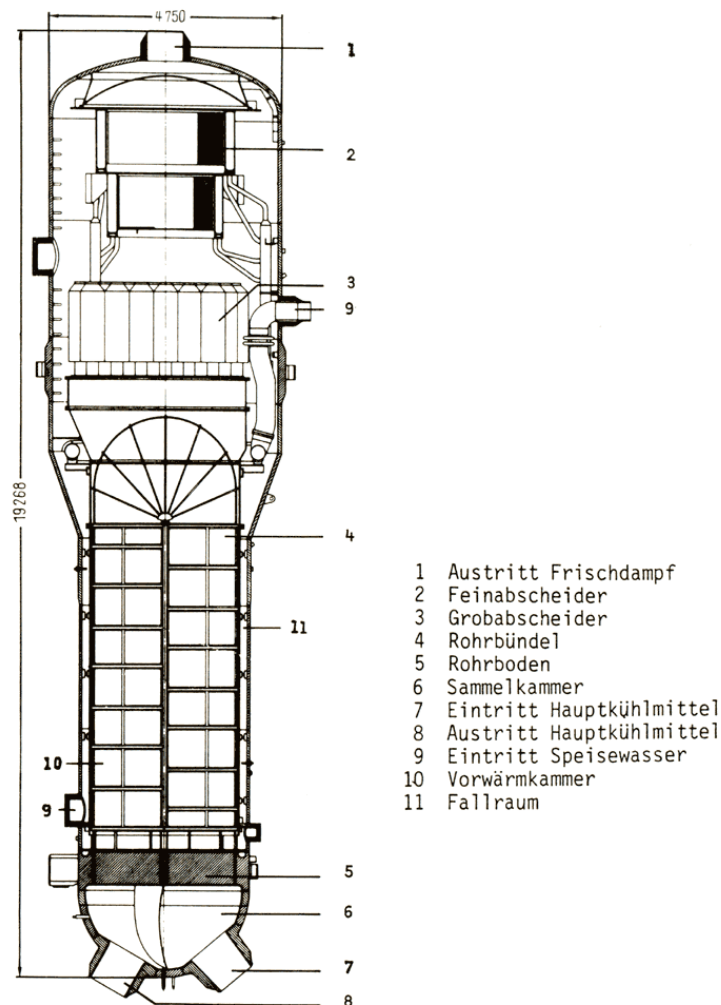


Abb. A-4: Dampferzeuger

A.2.2.2 Reaktorhilfs- und -nebenanlagen

Dem nuklearen Dampferzeugungssystem sind eine große Zahl von Hilfs- und -nebenanlagen zugeordnet (Abb. A-5). Sie sind zur Aufrechterhaltung des Leistungsbetriebes der Anlage erforderlich und erfüllen darüber hinaus noch folgende wesentliche Aufgaben:

- Lagerung, Reinigung und chemische Behandlung des Kühlmittels
- Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr
- Abscheidung und Handhabung radioaktiver Stoffe.

Diese Systeme sind, soweit sie radioaktive Stoffe führen, im Reaktorgebäude und in dem – ebenfalls zum “Kontrollbereich” gehörenden – Reaktorhilfsanlagegebäude untergebracht.

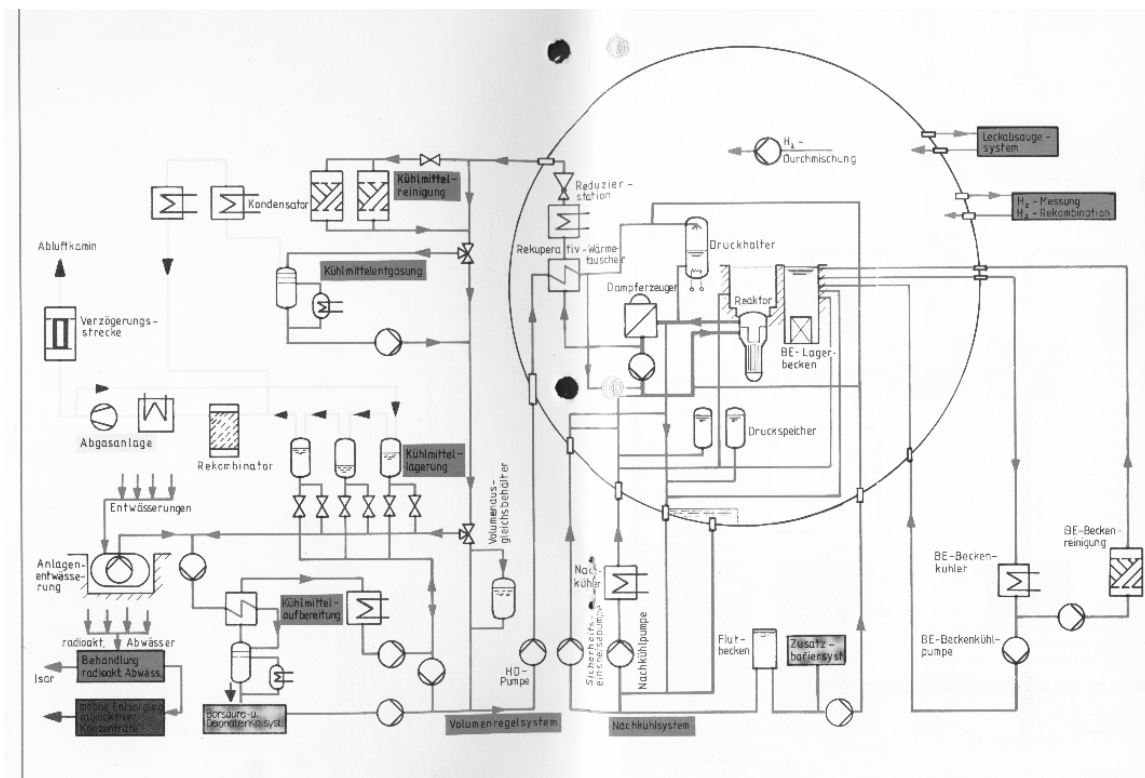


Abb. A-5: Gesamtschema der Reaktorhilfsanlagen

A.3 Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktor (SWR)

A.3.1 Funktionsweise eines Kernkraftwerkes mit Siedewasserreaktor am Beispiel der Anlage Krümmel

Das Kernkraftwerk Krümmel gehört zu den weltweit größten Siedewasserreaktor-Anlagen. Es verfügt über einen Einkreisreaktor mit internem Zwangsumlauf (Abb. A-6). Der Reaktorkern, die nukleare Wärmequelle des Kernkraftwerkes, besteht aus aneinandergesetzten gleichartigen Brennelementen, die den Kernbrennstoff enthalten. Sie werden von dem im Druckbehälter umlaufenden Wasser umströmt, wobei das Wasser sowohl die Funktion des Neutronenmoderators als auch des Kühlmittels für die Brennelemente hat.

Das Kühlmittel führt die im Reaktorkern erzeugte Wärme ab und verdampft dabei zu einem Teil.

Der erzeugte Sattdampf wird über einen Dampf-/Wasserabscheider und eine Dampftrocknereinheit innerhalb des Reaktorbehälters geleitet und anschließend der Turbine zugeführt.

In der Turbine wird die nutzbare Wärmeenergie des Dampfes in mechanische Rotationsenergie umgesetzt und zum Antrieb des Generators verwendet, der diese dann in elektrische Leistung umsetzt. Die im Kernkraftwerk Krümmel erzeugte elektrische Leistung beträgt 1316 MW bei Auslegungsbedingungen.

Nach Durchströmen der Turbine wird der Abdampf im Kondensator niedergeschlagen.

In der Anlage Krümmel wird zur Kühlung des Kondensators Flußwasser aus der Elbe verwendet.

Beim Siedewasserreaktor erfolgt die Regelung der Reaktorleistung auf zweierlei Weise: Zum einen über die Steuerstäbe, die je nach der gewünschten Leistung mehr oder weniger weit in den Reaktorkern eingefahren werden. Durch das "Einschießen" aller Steuerstäbe läßt sich der Reaktor schnellabschalten.

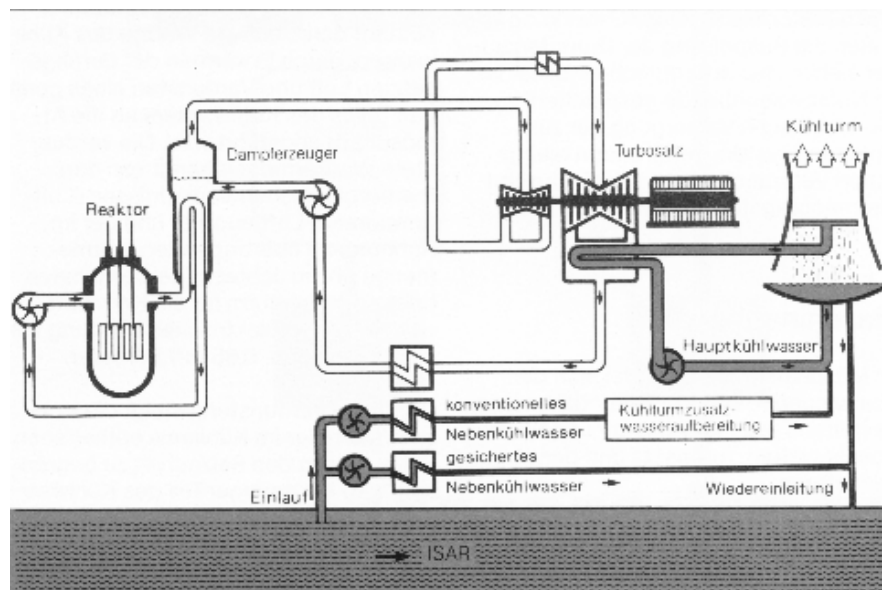


Abb. A-6: Funktionsschema eines Kernkraftwerkes mit Siedewasserreaktor

Die andere Regelungsmöglichkeit besteht in der Fördermengenverstellung der internen Zwangsumlaufpumpen über die Moderatorwirkung des Kühlmittels. Eine Änderung des Kühlmitteldurchsatzes im Kern bedingt eine Änderung des Dampfblasengehaltes im Kernbereich, was eine Schwächung oder Stärkung der Moderatorwirkung auf die Spaltneutronen ergibt und somit auf die Wärmeerzeugung im Reaktorkern rückwirkt.

Auch bei abgeschaltetem Reaktor wird infolge des radioaktiven Zerfalls von Spalt- und Aktivierungsprodukten noch Wärme frei, die über Nachkühlsysteme abgeführt wird. Diese erzeugte Nachwärme nimmt mit der Zeit ab, sie beträgt nach der Abschaltung ca. 2 % der Reaktorleistung und ist nach 10 Stunden auf weniger als 1 % abgefallen.

A.3.2 Nukleare Wärmeerzeugung

Die nukleare Wärmeerzeugungsanlage des Siedewasserreaktors besteht im wesentlichen aus:

- dem Reaktorkern,
- dem Reaktordruckbehälter (RDB), der den Kern einschließt,
- den sonstigen RDB-Einbauten und
- den Zwangsumlaufpumpen.

Diese Komponenten sind nachfolgend beschrieben.

A.3.2.1 Reaktorkern

Innerhalb des Reaktordruckbehälters ist der Reaktorkern angeordnet. Er besteht aus insgesamt 840 Brennelementen (BE), die so angeordnet sind, daß deren gleichmäßige Kühlung gewährleistet ist und die Anordnung der im Kern bewegten Steuerstäbe eine optimale Leistungsverteilung über den Kernquerschnitt bewirkt. Die Brennelemente sind untereinander weitgehend austauschbar. Sie unterscheiden sich bei erstmaliger Beladung des Kerns durch drei verschieden hohe Anreicherungen an U 235.

Bei jedem – jährlichen - Brennelementwechsel werden ca. 1/3 der Brennelemente entnommen und durch neue ersetzt, wobei die anderen 2/3 der optimalen Leistungsverteilung wegen entsprechend umgesetzt werden.

Die Brennelemente haben quadratischen Querschnitt, auf den sich insgesamt 63 Brennstäbe und ein Wasserstab (Leerrohr) in einer 8 x 8-Anordnung verteilen.

Diese Brennstäbe (Abb. A-7) bestehen aus dünnwandigen Rohren einer Zirkonlegierung, in die je eine Säule von Urandioxid-Tabletten gas- und druckdicht eingeschweißt ist. Die Länge dieser Säule, die der aktiven Länge des Brennelement entspricht, beträgt 3710 mm bei einem Außendurchmesser von 12,5 mm. Die einzelnen Brennstäbe werden durch Abstandshalter in ihren genauen Positionen gehalten, um strömungsbedingte Schwingungen der Stäbe zu verhindern.

Jedes Brennelement hat einen die Brennstäbe einhüllenden Blechkasten und wird im Reaktordruckbehälter von einem oberen und einem unteren Kerngitter fixiert.

Je vier dieser Brennelemente sind zu einer sogenannten Kernzelle zusammengefaßt, in deren Mitte ein im Querschnitt kreuzförmiger Steuerstab verfahren wird. Insgesamt wird der Kern von 205 Steuerstäben geregelt, womit auf 4 Brennelemente ungefähr ein Steuerelement kommt.

Die kreuzförmigen Steuerstäbe bestehen im wesentlichen aus mit Borcarbid - als Neutronenabsorber - gefüllten Stahlröhrchen und den diesen umhüllenden Stahlblättern. Dieser aktive Teil der Steuerstäbe ist über eine Kupplung mit dem

Steuerstabunterteil verbunden, der mittels Führungsrollen innerhalb der - unterhalb des Reaktorkerns eingebauten - Steuerstabführungsrohre geführt wird. Beim Siedewasserreaktor treten wegen der oberhalb des Kerns eingebauten Wasserabscheider und Dampftrockner die Steuerstäbe von unten in den Reaktorkern ein.

An bestimmten Positionen zwischen den Steuerstabzellen befinden sich Meßblenden für die Kerninstrumentierung sowie die zum Anfahren des Reaktors notwendigen Neutronenquellen.

Die Kerngitter bilden zusammen mit dem Kernmantel, einer zylindrischen Abgrenzung des Brennelementbereiches zum ringförmigen Rückströmraum, die Umschließung des Reaktorkerns.

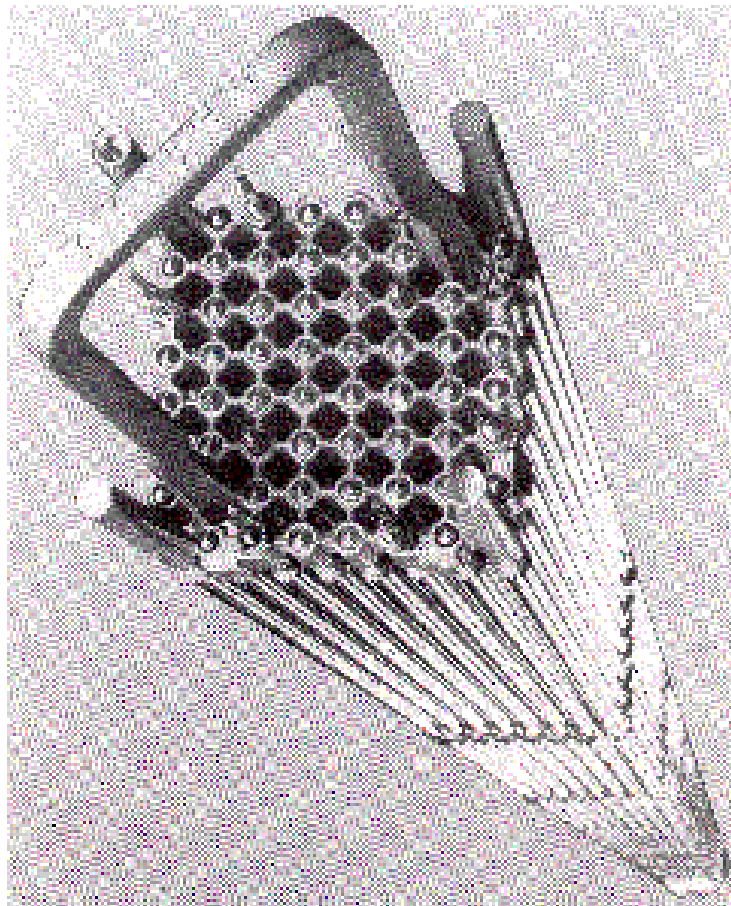


Abb. A-7: SWR-Brennelement

A.3.2.2 Reaktordruckbehälter

Der Reaktordruckbehälter (RDB) umschließt den Reaktorkern und die Einbauten, die zur Führung des Kühlmittels, zur Dampf-Wasser-Separation, zur Fixierung und Führung von Brennelementen, Steuerstäben und Instrumentierung nötig sind sowie die internen Zwangsumwälzpumpen (Abb. A-8).

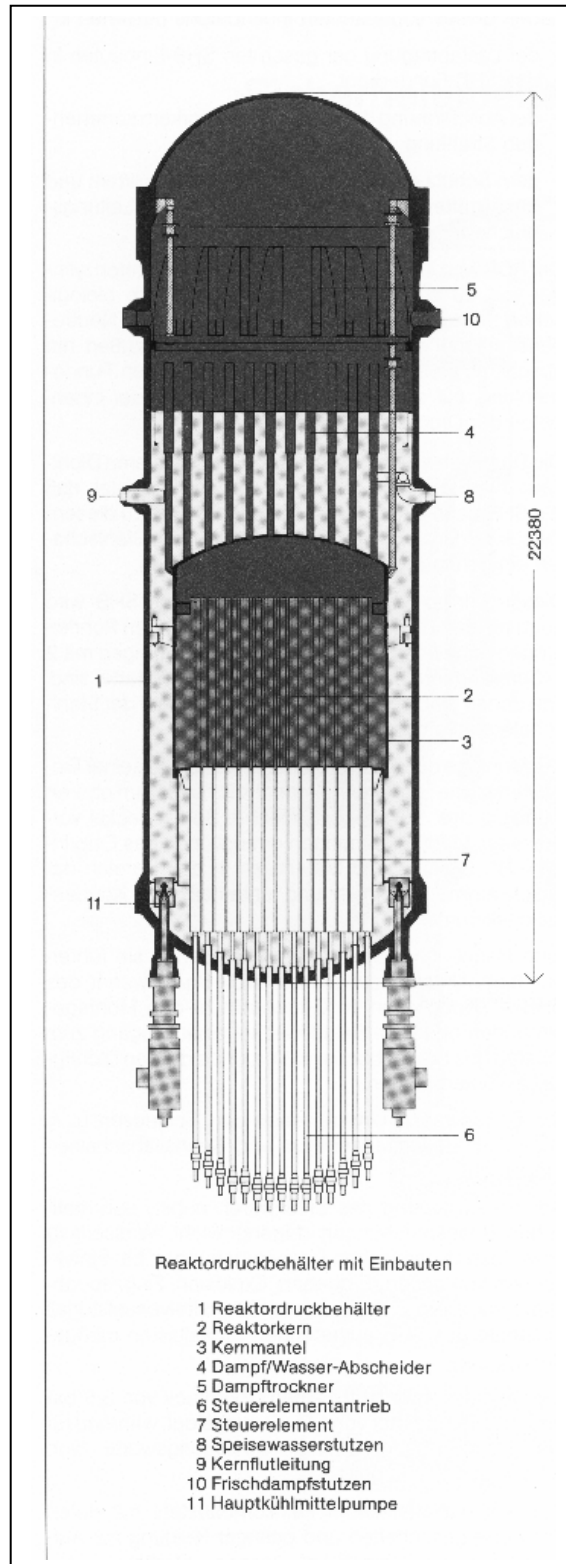


Abb. A-8: Der Reaktordruckbehälter des Siedewasserreaktors

Der RDB ist als zylindrisches Gefäß mit einem kugelkalottenförmigen Boden ausgebildet. Der halbkugelförmige Deckel ist mittels einer Flanschverbindung lösbar mit dem Behälter verbunden.

Der RDB ist mit verschiedenen Stutzen versehen. Im zylindrischen Teil befinden sich u.a. die Anschlüsse für den Frischdampf und das Speisewasser, welche ausreichend weit oberhalb der Kernoberkante angeordnet sind, so daß auch bei Leckagen dieser Anschlußleitungen der Kern geflutet und gekühlt werden kann. Der Boden enthält neben den Stutzen zur Durchführung der Steuerstabantriebe auch diejenigen für die Zwangsumlaufpumpen und die Kerninstrumentierung.

Die im RDB-Deckel angeordneten Stutzen sind für die Druckmessung innerhalb des RDB und für das Deckelsprühsystem erforderlich. Die inneren Oberflächen des RDB und der Stutzen sind mit einer Plattierung aus nichtrostendem Stahl versehen. Ausgelegt ist der RDB für einen Druck von 87,3 bar.

A.3.2.3 RDB-Einbauten

Die Reaktordruckbehälter-Einbauten sind nach ihren Aufgaben in zwei Gruppen gegliedert:

Kernmantel, Gitterplatten, Steuerstabführungs- und Kernflußmeßgehäuserohre, Speisewasserverteiler und Kerndeckel haben die Aufgaben,

- die Lage der Brennelemente, Steuerstäbe, Neutronenquellen und Kerninneninstrumentierung zu fixieren,
- den Reaktorkern zu tragen,
- die Kühlbarkeit des Kerns bei und nach einem Störfall zu gewährleisten.

Der Dampfabscheider und der Dampftrockner haben die Aufgaben,

- das aus dem Kern austretende Dampf-Wasser-Gemisch zu trennen, und
- den Dampf zu trocknen.

Als gemeinsame Aufgaben kommen hinzu,

- das umgewälzte Kühlmittel und das im Reaktorkern erzeugte Dampf-Wasser-Gemisch zu führen,
- Kühlmittel-, Gemisch- und Dampfraum voneinander zu trennen.

A.3.2.4 Zwangsumwälzpumpen

Im Einkreis-Siedewasserreaktor wird die im Reaktorkern erzeugte Wärme lediglich in Form von Dampf dem umlaufenden Kühlwasser entzogen. Da jedoch nur ein Teil des den Reaktorkern durchströmenden Kühlwassers verdampft, ist es sinnvoll, das weiter

umlaufende Wasser nicht erst über externe Umwälzschleifen erneut in den Reaktor einzuspeisen, sondern den Kühlmittelumlauf durch direkt im RDB angeordneten Pumpen zu unterstützen.

Es kommen bei der hier beschriebenen Anlage vertikale, einstufige Halbaxialpumpen mit einer hydrodynamischen Lagerung zur Verwendung. Zehn dieser Pumpen, gleichmäßig unter dem ringförmigen Rückströmraum verteilt, sorgen für einen Kühlmitteldurchsatz von 55 600 t/h durch den Reaktorkern.

A.3.3 Sicherheitsbehälter und Druckabbausystem

Unter den passiven Sicherheitseinrichtungen eines Siedewasserreaktors nimmt der Sicherheitsbehälter (SHB) die wichtigste Stellung ein.

Neben einer Sperre für Kühlmittel und Aktivitäten nach störfallbedingten Freisetzungen aus dem Kühlkreislauf übernimmt der Sicherheitsbehälter auch die Funktion eines Druckabbausystems (DAS). Er ist als kugelförmiger Stahlbehälter von 29,6 m Innendurchmesser mit einem im unteren Kugelbereich eingeschweißten Zylinderteil (Bodenwanne) ausgeführt. Der Sicherheitsbehälter umfaßt zwei Raumbereiche: die Druckkammer und die Kondensationskammer.

In der Druckkammer befinden sich der Reaktordruckbehälter, Sicherheits- und Entlastungsventile sowie verschiedene Hilfs- und Nebenanlagen.

Durch die torusförmige Ausführung der Kondensationskammer im Äquatorbereich der Stahlkugel läßt sich die Druckkammer aufteilen in den

- oberen Ringraum,
- unteren Ringraum und den zentralen Ringbereich des Biologischen Schildes um den RDB.

Im unteren zylindrischen Bereich, der von den anderen SHB-Bereichen lufttechnisch getrennt ist, befinden sich die Steuerstabantriebe sowie ganz unten der Sumpf, wo sich das Leckagewasser sammeln kann.

Die Kondensationskammer, die technisch druck- und gasdicht von der Druckkammer getrennt ist, enthält u. a. ein Wasserreservoir von ca. 3700 m³, in das insgesamt 72 Kondensationsrohre eintauchen. Neben diesen Kondensationsrohren, die die Verbindung zum oberen Ringraum der Druckkammer bilden, tauchen auch die Abblaserohre der Sicherheits- und Entlastungsventile des Druckentlastungssystems für den Reaktorkühlkreislauf in diese Wasservorlage ein.

Nach dem Bruch einer kühlmittelführenden Leitung innerhalb des SHB baut sich in der Druckkammer ein Überdruck auf, der das entstehende Dampf-Luftgemisch über die Kondensationsrohre in die Wasservorlage drückt. Durch die dort eintretende Kondensation des Dampfes wird der Druckaufbau im SHB wirksam begrenzt.

A.4 Kernkraftwerke mit Hochtemperaturreaktor (HTR)

A.4.1 Aufbau und Funktion eines Kernkraftwerks mit Hochtemperaturreaktor am Beispiel des THTR-300

Der Kugelhaufen-Hochtemperaturreaktor ist wie der Druck- und Siedewasserreaktor ein thermischer Reaktor (Abb. A-9). Die bei der Spaltung freiwerdenden schnellen Neutronen werden hier jedoch durch Graphit abgebremst, während als Kühlmittel Heliumgas unter hohem Druck verwendet wird. Helium ist chemisch inert, hat gute Wärmeübertragungseigenschaften und stört wegen seines kleinen Wirkungsquerschnittes für Neutronen nicht die Neutronenvermehrung im Reaktorkern. Als Brennstoff werden beschichtete Kernbrennstoffteilchen verwendet, die aus Oxiden oder Carbiden des Urans bzw. Thoriums bestehen, mit mehreren Schichten aus Pyrokohlenstoff zur Rückhaltung der Spaltprodukte überzogen und in die Graphitmatrix der Brennelemente eingebettet sind. Da der gesamte Reaktorkern aus keramischen Werkstoffen besteht, sind Betriebstemperaturen von 1000°C ohne weiteres möglich. Der Graphit selbst hat hohe thermische Stabilität und sublimiert erst bei rund 3500°C, so daß bis zu dieser Temperatur die Kernstruktur erhalten bleibt.

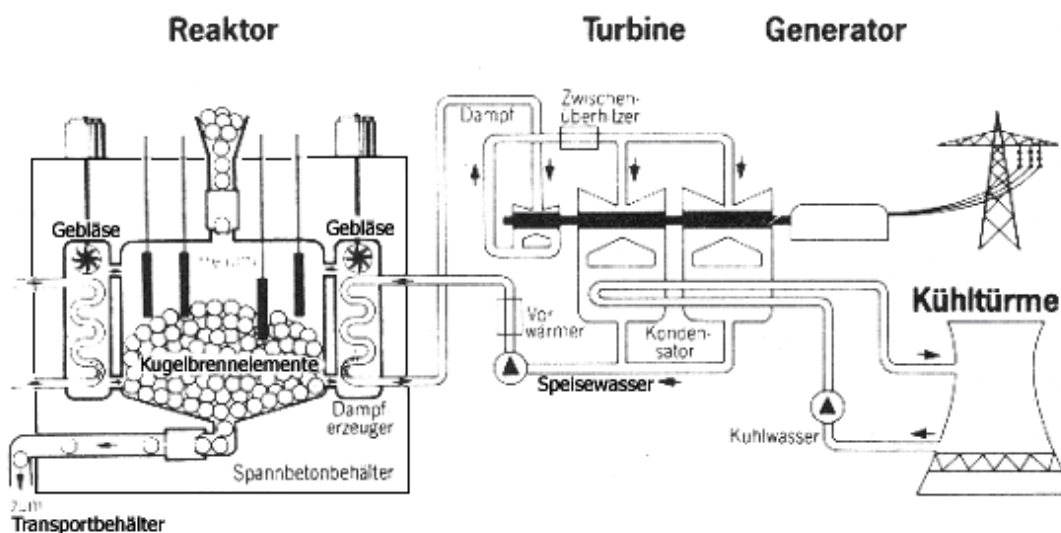


Bild: KfK

Abb. A-9: Kreislaufschema eines Kernkraftwerks mit Kugelhaufen-Hochtemperaturreaktor

Der Hochtemperaturreaktor benötigt für einen wirtschaftlich optimalen Brennstoffkreislauf hochangereichertes Uran (93 %) als Spaltstoff und natürliches Thorium als Brutstoff. Durch Neutroneneinfang wandelt sich das Thorium in das spaltbare Uran-233 um. Eine wirtschaftlich weniger interessante Variante des Brennstoffkreislaufs kommt mit geringer angereichertem Uran (5-10 %) aus, durch Konversion entsteht dann Plutonium.

Heliumtemperaturen zwischen 700 und 800°C, wie sie für Anlagen zur Stromerzeugung mit Dampfturbinen vorgesehen sind, erlauben Dampfzustände wie in kon-

ventionellen Kraftwerken und damit thermische Wirkungsgrade über 40 %. Die Möglichkeit noch höherer Heliumtemperaturen erschließt dem Hochtemperaturreaktor weitere Anwendungsmöglichkeiten, z.B. den Einsatz einer Heliumturbine im Direktkreislauf mit gutem Wirkungsgrad und die Nutzung als Wärmequelle für chemische Prozesse. Hier kommen die Vergasung von Braun- und Steinkohle, die Spaltung von Methan und die thermische Wasserzerlegung in Frage, wenn die Wärme auf hohem Temperaturniveau ausgekoppelt wird. Bei Auskopplung auf niedrigem Niveau ist auch die Versorgung von Fernwärmesystemen möglich.

Der in den Jahren 1984 –1988 am Standort Hamm-Uentrop betriebene und anschließend stillgelegte Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR) besaß eine elektrische Nettoleistung von 300 MW, er war als Zweitkreislaufanlage aufgebaut. Die im Reaktorkern freiwerdende Wärme wird bei diesem Reaktortyp vom Kühlmittel Helium zu den Dampferzeugern transportiert, dort vom Wasser/Dampf-Kreislauf aufgenommen und an den Turbosatz übertragen. Hierdurch ergibt sich - wie beim Druckwasserreaktor - eine Trennung des radioaktiven Primärkreislaufes vom inaktiven Sekundärkreislauf. Sechs Kühlgasgebläse drückten das Helium von oben nach unten durch den Reaktorkern, es erwärmte sich dabei auf rund 750°C. Aus dem Sammelraum unter dem Reaktorkern wurde es durch Heißgaskanäle den Dampferzeugern zugeführt. Beim Durchströmen der Dampferzeuger sank die Heliumtemperatur auf rund 250°C ab, das Kaltgas wurde von den Kühlgasgebläsen angesaugt und erneut durch den Reaktorkern gedrückt. Der in den sechs Schleifen des Wasser/Dampf-Kreislaufes erzeugte Frischdampf strömte zum Hochdruckteil (Eintrittsdruck und -temperatur 177,5 bar bzw. 530°C) des Turbosatzes, wurde anschließend in den Dampferzeugern zwischenüberhitzt, gelangte dann in den Mittel- und Niederdruckteil der Turbine (Eintrittsdruck und temperatur 46,5 bar bzw. 530°C) und wurde im Kondensator niedergeschlagen. Zur Rückkühlung des Kondensators förderten die Kühlwasserpumpen das Kühlwasser zu einem Trockenkühlturm, von wo es in geschlossenem Kreislauf zum Kondensator zurückkehrte. Bei dem Turbosatz des THTR-300 handelte es sich um eine dreigehäusige Heißdampf-Kondensationsmaschine, der Drehstrom-Synchrongenerator war direkt gekoppelt und speiste über einen 410-MVA-Maschinentransformator in das 220-kV-Netz.

A.4.2 Nukleares Dampferzeugungssystem

Der Brennstoff, des THTR-300 der außer Uran auch Thorium enthielt, war in der Form der beschichteten Teilchen ("coated particles") mit einem Durchmesser unter 0,8 mm in eine Graphitmatrix eingebettet (Bild A-10). Wegen der Porosität der Graphitmatrix wurden bis zu drei Pyrokohlenstoffschichten auf die Brennstoffteilchen aufgebracht, um die entstehenden Spaltprodukte vom Kühlmittel fernzuhalten. Während die inneren Schichten hierfür porös sein mußten, wiesen die äußeren große Festigkeit auf, um dem Spaltgasdruck von mehreren 100 bar bei hohen Abbränden zu widerstehen. Bei der Herstellung der Brennelementkugeln wurde ein aus verschiedenen Graphiten und aus Phenolharzbindern bestehendes Pulver mit den beschichteten Teilchen vermischt und in Gummimatrizen verpreßt. Dem brennstoffhaltigen Kern wurde eine 5 mm dicke, brennstofffreie Graphitschale aufgepreßt, so daß der Außendurchmesser der Kugel 60 mm betrug. Die THTR-Brennelementkugeln enthielten insgesamt 192 g Kohlenstoff, 0,96 g Uran-235 (93 % Anreicherung) und 10,2 g Thorium-232. Durch Aufheizen auf 800°C verkockte der

Binder, eine weitere Wärmebehandlung der Graphitmatrix bei 1800°C sicherte der Brennelementkugel hohe Festigkeit und gute Wärmeleitfähigkeit.

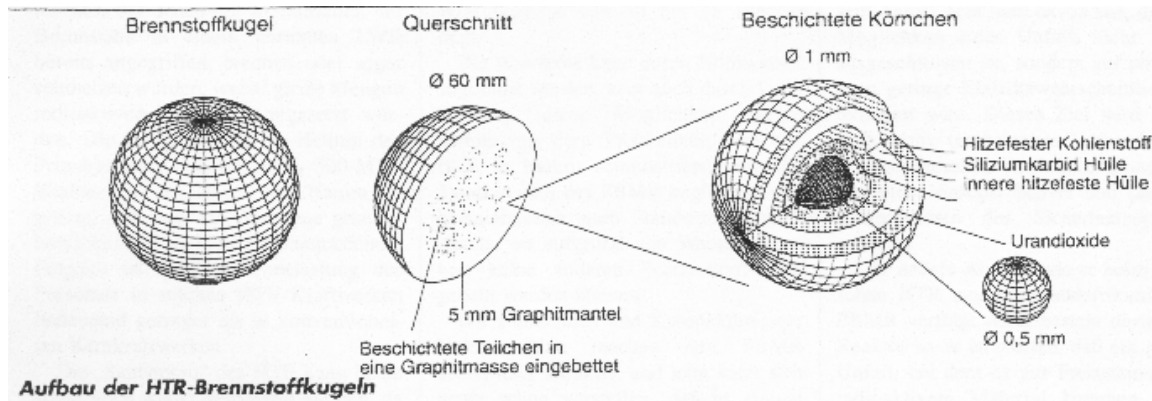


Abb. A-10: Kugelförmiges Brennelement des Hochtemperaturreaktors

Der Reaktorkern des THTR-300 bestand aus einer Schüttung von rund 675 000 kugelförmigen Brennelementen, die sich in einem zylindrischen Behälter von 5,6 m Innendurchmesser und 6 m lichter Höhe befanden. Die Behälterwände aus Graphit dienten gleichzeitig als Neutronenreflektor, der Behälterboden war trichterförmig ausgebildet und mündete in das zentrale Kugelabzugsrohr. Die gußeiserne Trag- und Stützkonstruktion für die Graphit- und Kohlesteineinbauten bildete zusammen mit der Deckenplatte den thermischen Schild. Die Abschalt- und Regelstäbe des Reaktors bestanden aus 42 Kernstäben, die direkt von oben durch den Spannbetondeckel in den Kugelhaufen einfuhren, und aus 36 Reflektorstäben, die in Bohrungen des Seitenreflektors verfahren wurden.

Für die Temperatur- und Teillastregelung des Reaktors wurde ein Teil der Reflektorstäbe eingesetzt. Diese übernahmen auch die Schnellabschaltung bei Störfällen, die Kernstäbe kamen bei langfristiger und bei störfallbedingter Abkühlung des Reaktorkerns zum Einsatz. Zum normalen Abfahren der Anlage wurden die zur Regelung herangezogenen Reflektorstäbe und die Kernstäbe verwendet. Die Kernstäbe wurden normalerweise langsam und schrittweise mit einem pneumatisch angetriebenen Kurzhubzylinder in den Kugelhaufen ein- und ausgefahren, zur Schnellabschaltung diente ein davon unabhängiger Langhubzylinder. Alle Kernstäbe hatten unabhängige Antriebe und Medienversorgung, die schnelleren Reflektorstäbe verfügten über frequenzgeregeltere Elektromotorantriebe. Sollen die Abschaltstäbe versagen, konnte borhaltiges Gas in den Reaktor eingespeist werden.

Für den kontinuierlichen Brennelementwechsel war eine Beschickungsanlage vorhanden, mit der die Brenn-, Moderator- und Absorberkugeln während des Reaktorbetriebes entnommen und zugegeben werden konnten (Abb. A-11). Frische Kugeln wurden an der Zugabeeinrichtung in die Anlage eingebracht, gelangten von dort zu den pneumatisch arbeitenden Höhenförderern und in den Reaktor, den sie nach einiger Zeit als bestrahlte Kugeln über das Kugelabzugsrohr wieder verließen. Nach Vereinzelung, Abscheidung von Bruch und Durchlaufen einer Pufferstrecke

erreichten sie eine Unterscheidungs- und Abbrandmeßanlage, deren Prozeßrechner entschied, ob die Kugel entnommen oder in den Reaktorkern zurückgefördert wurde.

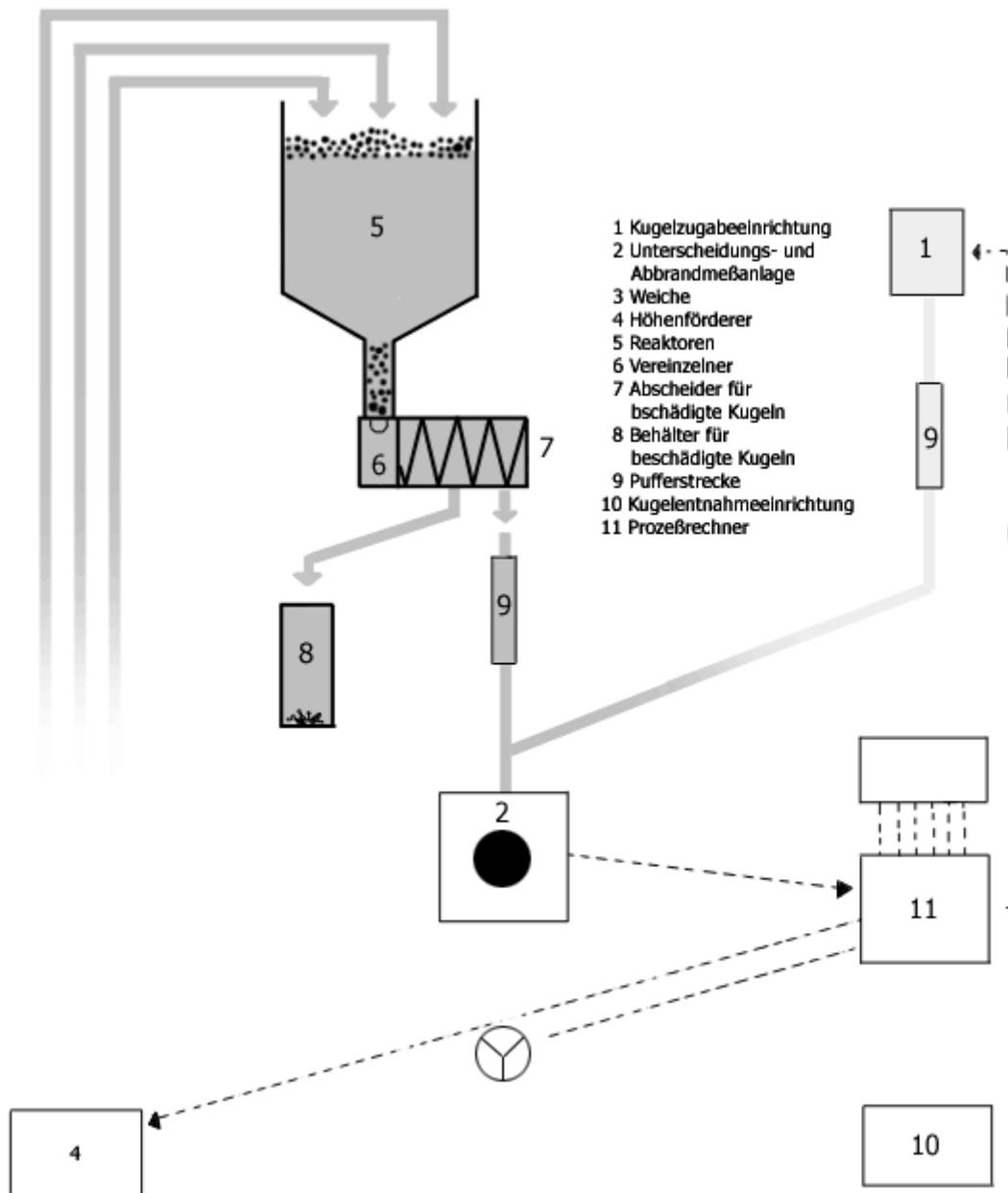


Abb. A-11: Schema der Brennelement-Beschickungsanlage beim Kugelhaufen-Hochtemperaturreaktor mit den dazugehörigen Einrichtungen

Durch die Verwendung keramischer Werkstoffe für den Reaktorkern konnten in Verbindung mit dem negativen prompten Temperaturkoeffizienten ein störfallbedingtes Schmelzen der Brennelementkugeln und eine unkontrollierte Aktivitätsfreisetzung ausgeschlossen werden. Die inhärente Sicherheit des Systems gewährleistete, daß bei steigender Temperatur die Reaktorleistung zurückging.

Alle Komponenten des Primärkreislaufs der Anlage waren in einem Reaktordruckbehälter aus Spannbeton untergebracht. Dieser Spannbetondruckbehälter hatte die

Form eines stehenden Zylinders mit ebenen Böden. Die Betonstärke der zylindrischen Wand betrug 4,45 m, die der Böden 5,10 m. Der Innenraum hatte eine Höhe von 15,30 m und einen Durchmesser von 15,90 m. Die zugrunde gelegte integrierte Bauweise bedeutete, daß auch Gebläse, Dampferzeuger, Kern- und Reflektorstabtrieb u.a. im Spannbetonbehälter untergebracht werden konnten. Dessen Wandung bestand, von innen nach außen betrachtet, aus der metallischen Wärmeisolierung, dem gasdichten Liner, dem Liner Kühlsystem und dem Spannbeton selbst.

Die sechs Dampferzeuger konnten durch Öffnungen im Spannbetonbehälter ausgebaut werden. Zu jedem Dampferzeuger gehörte ein Kühlgasgebläse, das horizontal im oberen zylindrischen Teil der Behälterwand eingebaut war. Motor und Gebläse bildeten eine gekapselte Einheit, die ebenfalls ausgebaut werden konnte. Der in den Dampferzeugern überhitzte Dampf gelangte in den Hochdruckteil und nach Zwischenüberhitzung in den Dampferzeugern in den Mittel- und Niederdruckteil der Turbine. In den Dampferzeugern waren – in Strömungsrichtung - die Heizflächen von Überhitzer, Zwischenüberhitzer, Verdampfer und Vorwärmer angeordnet.

A.4.3 Sicherheitseinrichtungen

Die Wandstärke des Spannbetonbehälters von 5,10 m ermöglichte nicht nur eine wirksame Abschirmung der ionisierenden Strahlung aus dem Reaktorkern, sondern auch einen guten Schutz gegenüber Einwirkungen von außen. Über einen zusätzlichen druckfesten Sicherheitseinschluß, wie er beim Druck- und Siedewasserreaktor vorgesehen ist, verfügte die Anlage wegen ihrer besonderen Sicherheitseigenschaften nicht, jedoch war der Spannbetonbehälter zur kontrollierten Ableitung radioaktiver Stoffe bei Undichtigkeit des Primärsystems von einer Luftführungswand aus Stahlblech umgeben. Der Kühlmittelverluststörfall war ebenfalls einfacher zu beherrschen als beim Druck- und Siedewasserreaktor. Die Wärmeabfuhr verschlechtert sich zwar infolge der abnehmenden Kühlmitteldichte, wegen der thermischen Trägheit des Systems sind aber kurzfristig keine Gegenmaßnahmen erforderlich, auch keine Notkühlung im eigentlichen Sinne des Wortes. Erst nach vielen Stunden könnte ein solcher Störfall zu größeren Aktivitätsfreisetzungen führen, so daß ausreichende Zeit für Gegenmaßnahmen zur Verfügung steht.

Durch Undichtigkeit von Dampferzeugern könnte Wasser in den Primärkreislauf eindringen und wegen der zusätzlichen Moderatorwirkung einen kurzen Leistungsanstieg bewirken. Durch Schnellabschaltung kann der Reaktor jedoch innerhalb weniger Minuten unter 800°C abgekühlt werden, wodurch die Wasser-Gas-Reaktion unterbrochen wird. Die umgesetzten Graphitmengen sind in diesem Falle so gering, daß keine Festigkeitseinbußen tragender Teile zu befürchten sind.

Zur Nachwärmeabfuhr standen beim THTR-300 mehrere Systeme zur Verfügung. Nach normaler Abschaltung der Anlage wurde grundsätzlich das betriebliche Kühlsystem weiterbenutzt. Funktionierte dieses System infolge von Störfällen nicht mehr, konnte auf mindestens zwei voneinander unabhängige Nachwärmeabfuhrsysteme zurückgegriffen werden, wobei auch die betrieblichen Dampferzeuger einsetzbar waren.

Literatur zu Anhang A

- [KUR 81] Kernkraftwerk Isar 2, Kurzbeschreibung nach § 3 Abs. 3 der atomrechtlichen Verfahrensverordnung, Bayernwerk AG, München, Februar 1981
- [KUR 81A] Kernkraftwerk Krümmel, Standort- und Anlagenkurzbeschreibung nach § 3 Abs. 3 der atomrechtlichen Verfahrensverordnung, Kernkraftwerk Krümmel GmbH, Oktober 1981
- [FRA 83] Franzen, L.F., Aufbau und Wirkungsweise von Kernkraftwerken, GRS-S-38, September 1983