

Stilllegung kerntechnischer Anlagen



Inhalt

1	Einführung	3
2	Überblick	4
2.1	Leistungs- und Prototypreaktoren	6
2.2	Forschungsreaktoren	8
2.3	Anlagen der Ver- und Entsorgung	9
3	Stilllegungsstrategien	10
4	Schrittweiser Abbau eines Kernkraftwerks	12
5	Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren	14
5.1	Rechtlicher Rahmen	14
5.2	Genehmigungsverfahren	15
5.3	Aufsichtsverfahren	15
6	Sicherheit und Strahlenschutz	16
6.1	Sicherheitsbetrachtungen	16
6.2	Strahlenschutz	18
6.3	Meldepflichtige Ereignisse	19
7	Techniken	20
7.1	Dekontaminationstechniken	20
7.2	Abbau- und Zerlegetechniken	21
7.3	Alternativen zur Zerlegung vor Ort	23
8	Reststoff- und Abfallmanagement	23
8.1	Freigabe	24
8.2	Abklinglagerung	27
8.3	Radioaktiver Abfall	29
9	Die Kosten	30
9.1	Kosten für die kommerziell betriebenen Kernkraftwerke	30
9.2	Kosten für die öffentliche Hand	30
10	Internationales	31
10.1	Übereinkommen zur nuklearen Entsorgung	31
10.2	IAEA	31
10.3	OECD/NEA	31
10.4	EU	31
10.5	WENRA	31
11	Zusammenfassung und Ausblick	32
12	Anhang	32
12.1	Liste zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Deutschland	32
12.2	Kurzbeschreibung ausgewählter Stilllegungsprojekte	34
13	Glossar	41
14	Bildnachweis	44

Impressum

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Autoren: Boris Brendebach, Gerd Bruhn, Matthias Dewald,
Horst May, Sebastian Schneider, Thorsten Stahl

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMUB im
Rahmen des Vorhabens 3616R01310 erstellt worden.

2. überarbeitete Auflage
Dezember 2017

1 Einführung

Die Stilllegung kerntechnischer Anlagen ist eine Aufgabe, der sich die Kernenergieländer stellen müssen. Insgesamt wurden nach Angaben der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) mit Stand August 2017 bisher über 600 Reaktoren und etwa 300 Anlagen der Ver- und Entsorgung außer Betrieb genommen.

Nach Ende ihrer betrieblichen Nutzung können kerntechnische Anlagen nicht sich selbst überlassen werden. Da von ihnen nach wie vor eine Gefährdung ausgehen kann, müssen sie zum Schutz von Mensch und Umwelt geordnet stillgelegt werden. Unter dem Begriff »Stilllegung« versteht man alle Maßnahmen, die nach Erteilung der Stilllegungsgenehmigung durchgeführt werden, bis eine behördliche, d. h. atom- und strahlenschutzrechtliche Überwachung nicht mehr notwendig ist. Dies bedeutet in der Regel, dass alle Gebäudeteile entfernt sind und der natürliche Ausgangszustand in Form der sogenannten »Grünen Wiese« wiederhergestellt ist, wie es beispielsweise beim Kernkraftwerk Niederaichbach (► Abb. 1) der Fall war.



Abb. 1: Rückbau des Kernkraftwerks Niederaichbach

2 Überblick

Im August 2017 befanden sich in Deutschland 21 Kernkraftwerke (Leistungs- und Prototypreaktoren) in verschiedenen Phasen der Stilllegung. Nach dem Unfall im japanischen Kernkraftwerk Fukushima und dem darauf folgenden Ausstiegsbeschluss der Bundesregierung wurden bisher neun Kernkraftwerke endgültig abgeschaltet. Von diesen haben fünf in der ersten Hälfte des Jahres 2017 die Genehmigung zu Stilllegung und Abbau erhalten: das Kernkraftwerk Isar-1 (KKI 1, Stilllegungsgenehmigung am 17. Januar 2017 erteilt), das Kernkraftwerk Neckarwestheim I (GKN-I, Stilllegungsgenehmigung am 3. Februar 2017 erteilt), die Kernkraftwerke Biblis-A und Biblis-B (KWB A und KWB B, Stilllegungsgenehmigungen jeweils am 30. März 2017 erteilt) sowie das Kernkraftwerk Philippsburg-1 (KKP 1, Stilllegungsgenehmigung am 7. April 2017 erteilt). Die verbliebenen acht Anlagen, welche sich derzeit noch im Leistungsbetrieb befinden, werden schrittweise bis 2022 endgültig abgeschaltet; jeweils eine Anlage bis Ende 2017 und jeweils drei Anlagen bis Ende 2021 und 2022. Auch diese Anlagen werden nach ihrer endgültigen Abschaltung stillgelegt (► Kapitel 12.1 Liste zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Deutschland).

Zehn Forschungsreaktoren unterschiedlicher Größe waren im August 2017 endgültig abgeschaltet, wovon sich bereits sechs in Stilllegung befanden. Zuvor wurden in Deutschland bereits 29 Forschungsreaktoren und neun Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung vollständig stillgelegt und bei zwei dieser Anlagen ist die Stilllegung im Gange. Am Standort des Kernkraftwerks Greifswald (KGR) wird eines der weltweit größten Stilllegungsprojekte durchgeführt (► Abb. 2).

Die Karte in ► Abb. 3 gibt einen Überblick über die Anlagen, die sich in Deutschland im August 2017 in der Stilllegung befanden oder bereits gänzlich abgebaut sind. Neben den Leistungs- und Prototypreaktoren sind dies Forschungsreaktoren sowie Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung.

Abb. 2: Standort des Kernkraftwerks Greifswald



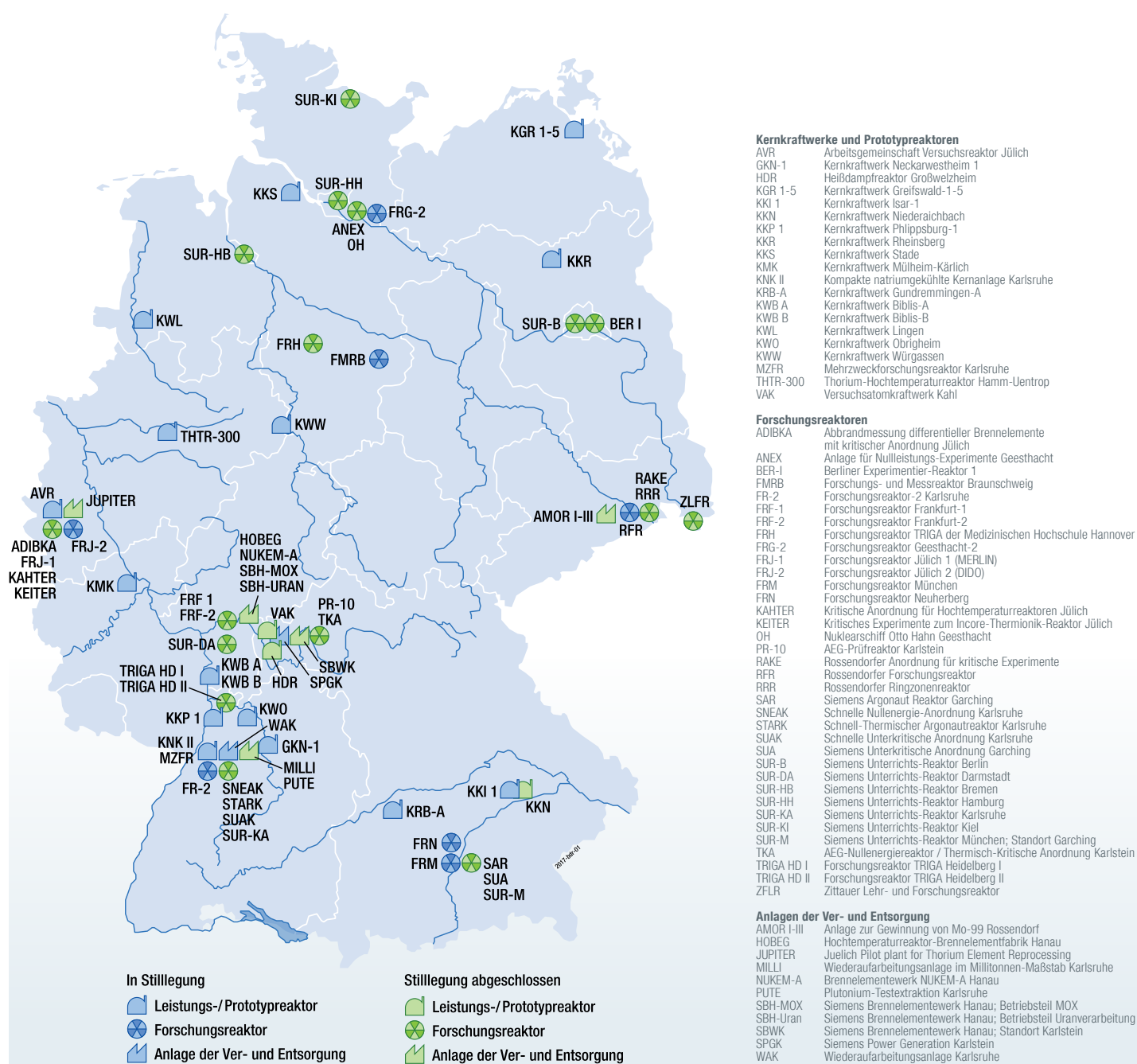


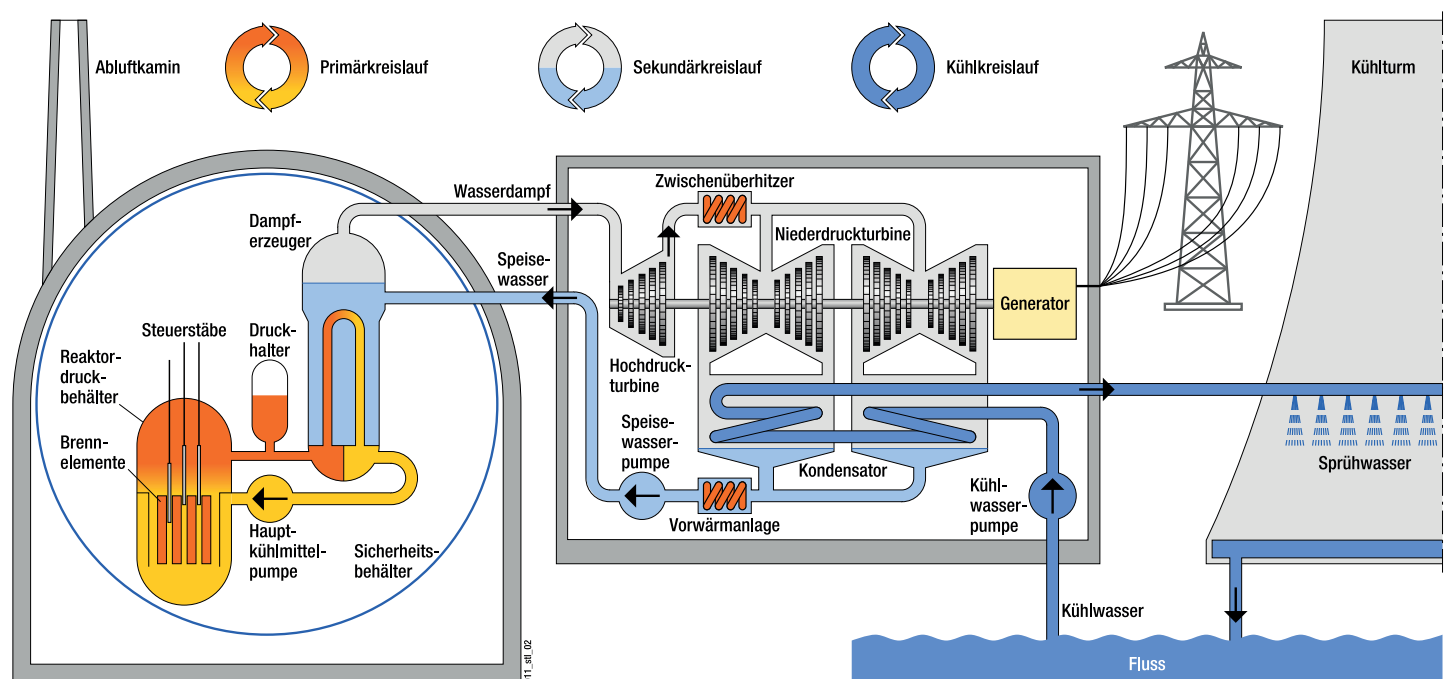
Abb. 3: Kerntechnische Anlagen in Deutschland, die sich in Stilllegung befinden oder deren Stilllegung abgeschlossen ist.

2.1 Leistungs- und Prototypreaktoren

Bei Kernkraftwerken (Leistungs- und Prototypreaktoren) wird der Energieinhalt des Kernbrennstoffs (in den so genannten Brennelementen) in elektrische Energie umgesetzt. In einer kontrollierten Kettenreaktion wird durch Kernspaltung Wärme erzeugt. Diese Wärme wird von einem Wasserkreislauf aufgenommen und dort in Dampf umgewandelt, der Turbinen antreibt. Diese wiederum treiben Generatoren an, die Strom erzeugen. Kernkraftwerke werden hauptsächlich im Grundlastbereich eingesetzt, helfen also, den täglich gleich bleibenden Teil des Strombedarfs zu decken.

In Deutschland werden derzeit zwei unterschiedliche Bauarten an Kernkraftwerken betrieben, Siedewasser- und Druckwasserreaktoren. Wie aus den ► Abb. 4 und 5 ersichtlich ist, wird bei beiden Bauarten Wasser als Kühlmittel eingesetzt, jedoch unterscheiden sie sich u. a. im Aufbau des Kühlkreislaufes.

Abb. 4: Schematischer Aufbau eines Druckwasserreaktors

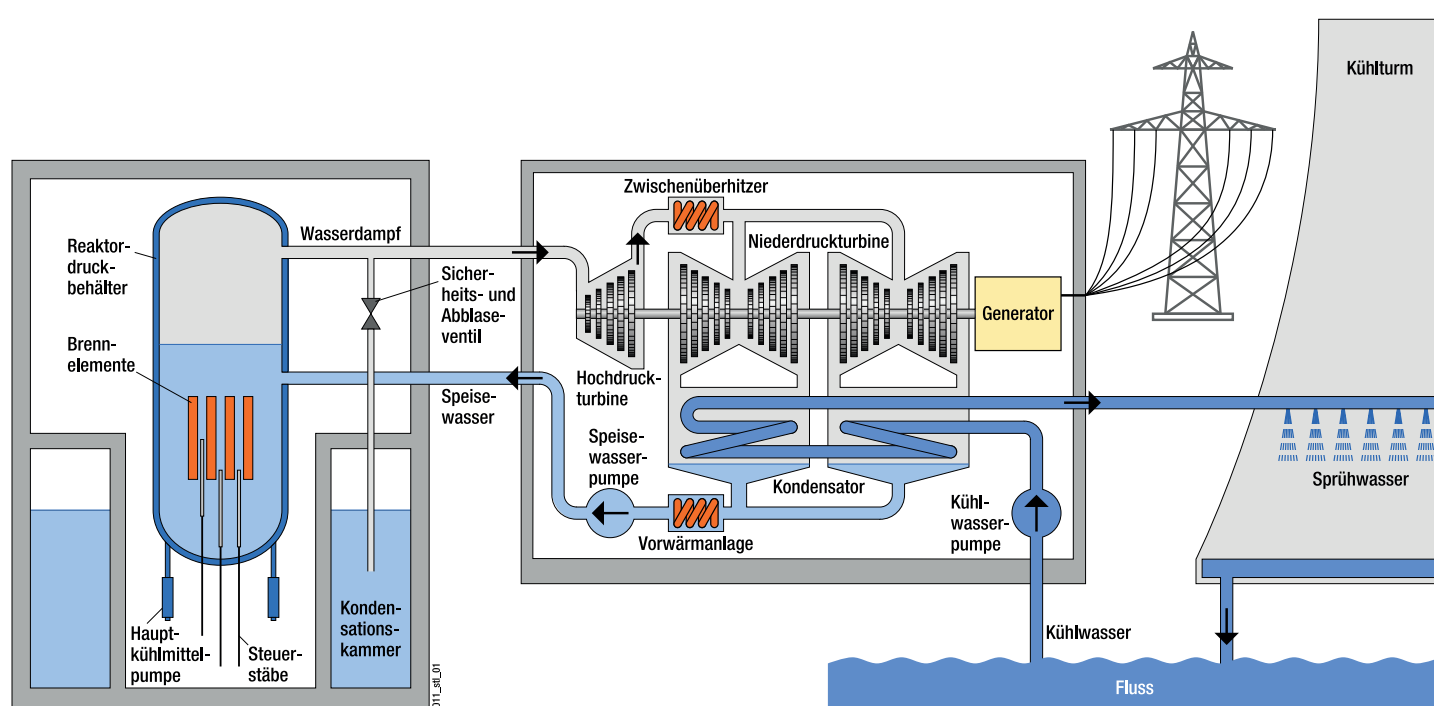


Drei Kernkraftwerke wurden bisher vollständig abgebaut, das Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN), der Heißdampfreaktor Großwelzheim (HDR) und das Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK). Bei den ersten beiden Anlagen handelte es sich um Prototypreaktoren, deren Entwicklung nicht weiter verfolgt wurde. Das Versuchsatomkraftwerk Kahl war das erste Kernkraftwerk, das in Deutschland errichtet wurde. Nach über 25 Jahren Betrieb folgte 1985 die endgültige Abschaltung. Anlagenteile und Gebäude wurden dekontaminiert, vollständig abgebaut und das Gelände 2010 ohne Einschränkungen für die spätere Nutzung freigegeben (► Kapitel 8.1 Freigabe).

Bei den Stilllegungen zeigt sich, dass jedes Stilllegungsprojekt individuell verläuft. Erfahrungsgemäß dauert die Stilllegung eines Leistungs- oder Prototypreaktors etwa 10 bis 20 Jahre.

Verschiedene Beispiele für abgebaute oder in Stilllegung befindliche Leistungs- und Prototypreaktoren sind im Anhang (► Kapitel 12.1) aufgeführt.

Abb. 5: Schematischer Aufbau eines Siedewasserreaktors



2.2 Forschungsreaktoren

Im Gegensatz zu Leistungsreaktoren dienen Forschungsreaktoren im Allgemeinen zu speziellen Zwecken in der Forschung, der Medizin oder im industriellen Bereich. Dabei steht in erster Linie die Nutzung der im Reaktor erzeugten Neutronenstrahlung im Vordergrund.

Die Stilllegung verläuft nach demselben Prinzip wie die eines Kernkraftwerks. Der Ablauf des Genehmigungsverfahrens und die einzusetzenden Techniken für Dekontamination, Zerlegung und Abfallkonditionierung weisen große Gemeinsamkeiten auf. Allerdings sind der Anlagenumfang und das radioaktive Inventar bei einem Forschungsreaktor deutlich geringer als bei einem Kernkraftwerk, z. B. fehlt in der Regel u. a. der gesamte technische Anlagenteil zur Stromerzeugung.

Meist kann daher ein Forschungsreaktor innerhalb eines kürzeren Zeitraums (zwischen einigen Monaten und einigen Jahren) abgebaut werden als ein größerer Leistungsreaktor.

Beispiele aus dem Rückbau von Forschungsreaktoren zeigen die ► Abb. 6 und 7 (siehe auch die Auflistung und detaillierte Beispiele im Anhang (► Kapitel 12)).



Abb. 6: Blick auf den Reaktorblock des Forschungsreaktors FRF

Abb. 7: Abbau des Forschungsreaktors FRJ-1



2.3 Anlagen der Ver- und Entsorgung

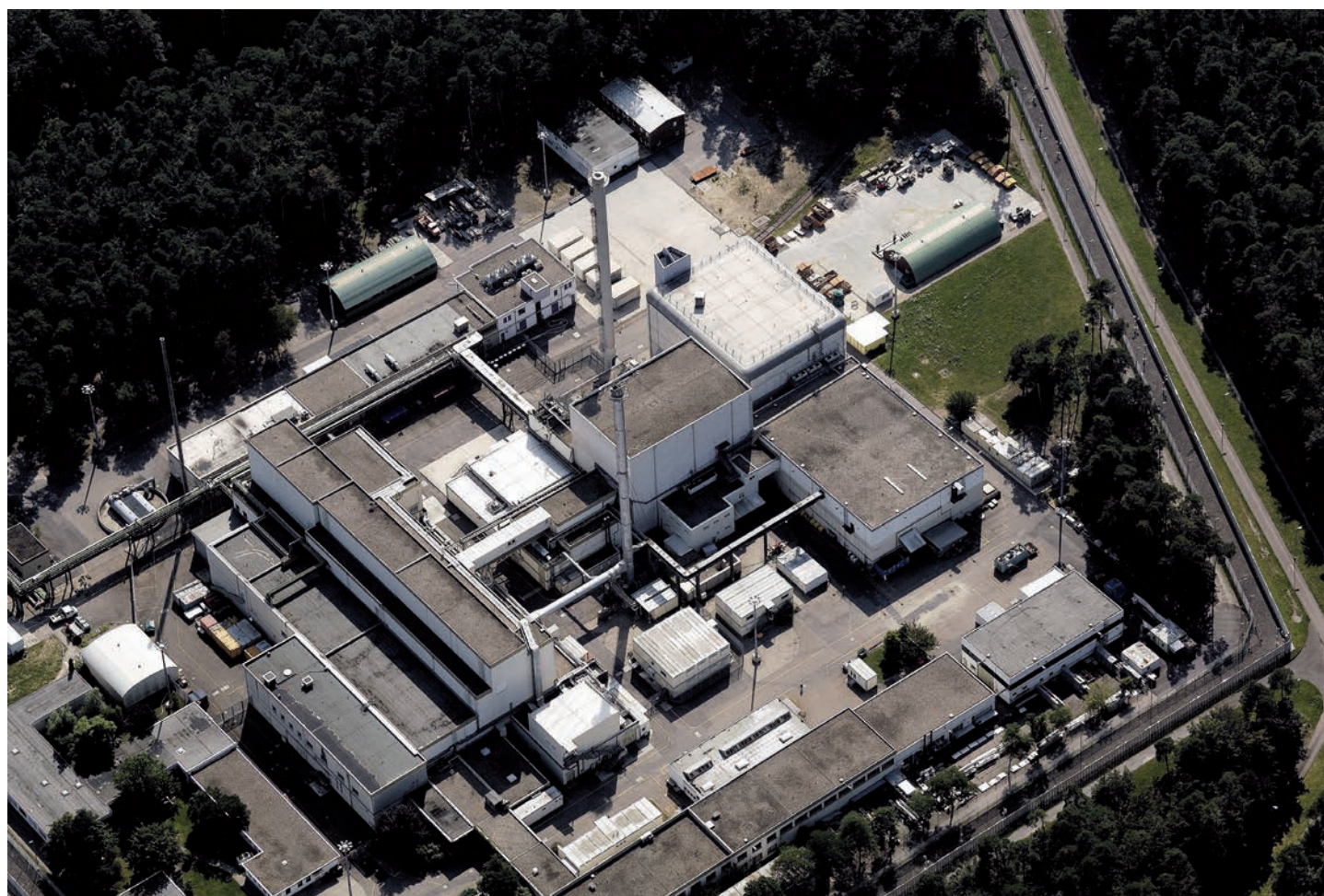
Anlagen der Ver- und Entsorgung dienen beispielsweise der Herstellung oder Wiederaufarbeitung von Brennelementen oder der Konditionierung von Abfällen. Wie aus der Liste im Anhang ► Kapitel 12.1) hervorgeht, gibt es in Deutschland nur wenige derartige Anlagen.

Der Ablauf der Genehmigungsverfahren sowie die Dauer der Stilllegung sind mit der Stilllegung von Kernkraftwerken vergleichbar ► Kapitel 5.2 Genehmigungsverfahren)

In technischer Hinsicht unterscheiden sich die Projekte jedoch deutlich von der Stilllegung von Kernkraftwerken. Dies liegt vor allem daran, dass Anlagen der Ver- und Entsorgung aufgrund der mechanischen und chemischen Verarbeitung von Kernbrennstoff während des Betriebes eine erhebliche Kontamination mit Uran und anderen alphastrahlenden Radionukliden aufweisen können. Daher stellen sich andere Anforderungen an Dekontaminations- und Abbautechniken und den Strahlenschutz des Personals.

Am Standort Hanau sind einige Anlagen zur Brennelementherstellung in den 1980er und 1990er Jahren außer Betrieb genommen worden. Im damaligen Kernforschungszentrum Karlsruhe (heute Karlsruher Institut für Technologie, KIT) wurde von 1971 bis 1990 die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) ► Abb. 8) als Versuchsanlage betrieben. Ihre Stilllegung stellt besonders komplexe Anforderungen. So wird etwa für den Abbau der WAK mit einer Dauer von ca. 35 Jahren gerechnet – von der Erteilung der ersten Stilllegungsgenehmigung im Jahre 1994 bis zur vollständigen Beseitigung der Anlage, die etwa für das Jahr 2030 geplant ist.

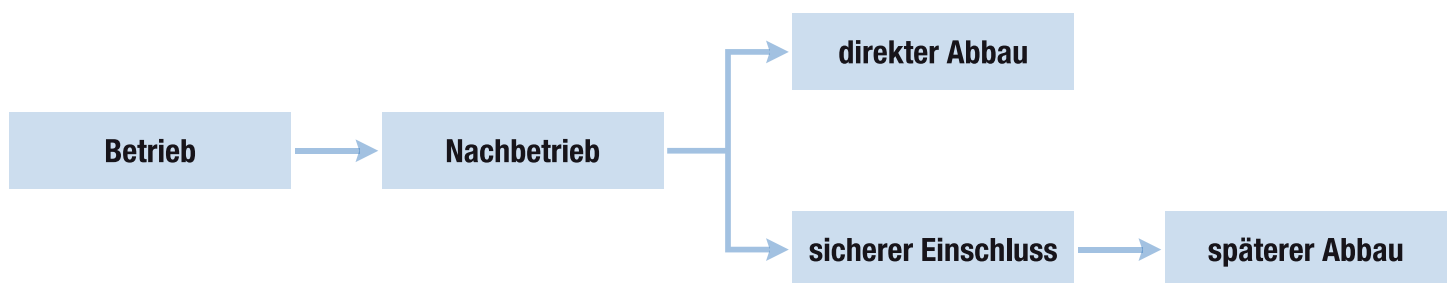
Abb. 8: Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK)



3 Stilllegungsstrategien

Es lassen sich zwei Strategien unterscheiden, nach denen die Stilllegung international und auch in Deutschland im Allgemeinen durchgeführt wird: der direkte Abbau oder der Abbau nach einem sicheren Einschluss (► Abb. 9).

Abb. 9: Stilllegungsstrategien



Zwischen der endgültigen Abschaltung und dem Beginn der eigentlichen Stilllegung bzw. der Herstellung des sicheren Einschlusses liegt die sogenannte Nachbetriebsphase, die mehrere Jahre dauern kann. In diesem Zeitraum können die Brennelemente abtransportiert und auch die Betriebsmedien und -abfälle entsorgt werden, sofern dies durch die Betriebsgenehmigung der kerntechnischen Anlage abgedeckt ist. Spätestens in der Nachbetriebsphase beantragt der Anlagenbetreiber die Genehmigung der Stilllegung (► Kapitel 5.2 Genehmigungsverfahren). Erst nachdem diese erteilt worden ist, können die konkreten Stilllegungs- und Abbautätigkeiten beginnen.

Beim direkten Abbau wird die Anlage unmittelbar beseitigt, d. h. direkt im Anschluss an die Nachbetriebsphase werden alle Systeme und Einrichtungen des Kontrollbereichs (► Kapitel 6.2 Strahlenschutz) abgebaut (► Abb. 10).



Abb. 10: Demontage eines Dampferzeugers im Rahmen des direkten Abbaus

Bei der alternativen Strategie wird die Anlage dagegen vor dem Abbau erst eine gewisse Zeit (typischerweise einige Jahrzehnte) sicher eingeschlossen. Dabei sind drei Phasen zu unterscheiden:

1. Maßnahmen in der Anlage, die der Realisierung des sicheren Einschlusses dienen und die Anlage in einen wartungsarmen Zustand überführen (z. B. Entfernung von Brennelementen und Brandlasten),
2. Verwahrung der Anlage im sicheren Einschluss über einen längeren Zeitraum (z. B. 30 Jahre) (► Abb. 11) und
3. Abbau der Anlage.



Abb. 11: Gebäude des THTR-300 (Bereich des sicheren Einschluss hervorgehoben)

Jede der beiden Strategien weist Vor- und Nachteile auf, die im konkreten Einzelfall gegeneinander abzuwägen sind (► Tab. 1). Die Entscheidung, welche Stilllegungsstrategie realisiert werden soll, trifft der Anlagenbetreiber im Rahmen seiner unternehmerischen Verantwortung.

Für Kernkraftwerke wurde mit dem Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 16. Juni 2017 festgelegt, dass sie unverzüglich stillzulegen und rückzubauen sind. Ausnahmen hiervon können lediglich durch die zuständige Behörde im Einzelfall aus Gründen des Strahlenschutzes für Anlagenteile zugelassen werden.

	Direkter Abbau	Sicherer Einschluss und späterer Abbau
Vorteile	• Verfügbarkeit von Personal, das mit der Betriebshistorie vertraut ist. • Milderung wirtschaftlicher Folgen für die Region. • Finanzierungssicherheit. • Gelände kann früher wieder genutzt werden.	• Radioaktivität nimmt mit der Zeit ab (»Abklingen«). • Durch geringere Strahlenbelastung beim Abbau können Abbauarbeiten technisch einfacher sein.
Nachteile	• Höhere noch vorhandene Radioaktivität. • Höhere Strahlenbelastung kann Abbauarbeiten auch technisch erschweren.	• Messtechnischer Aufwand für die radiologische Bewertung nimmt mit der Zeit zu. • Kenntnisse über die Anlage gehen verloren. • Für den Abbau nach dem sicheren Einschluss muss neues qualifiziertes Personal gefunden werden.

Tab. 1: Gegenüberstellung einiger Vor- und Nachteile beider Stilllegungsstrategien

In Deutschland befinden sich nur wenige Anlagen im sicheren Einschluss (► Kapitel 12 Anhang). Die aktuell in Deutschland beantragten Stilllegungsprojekte haben den direkten Abbau zum Ziel.

Teilweise werden beim direkten Abbau einige der Vorteile des sicheren Einschlusses genutzt, indem Großkomponenten (z. B. Dampferzeuger, ► Abb. 10) im Ganzen demontiert und für eine gewisse Zeit zwischengelagert werden (► Kapitel 8.2 Abklinglagerung). Im Anschluss ist eine Zerlegung mit einfacheren Hilfsmitteln und Strahlenschutz Aufwand möglich. Weiterhin verringert sich dadurch der radioaktive Abfall. Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass der sichere Einschluss für kerntechnische Anlagen genutzt wird, bei denen der Entsorgungsweg für Teile der Anlage derzeit nicht geklärt ist. Dies ist z. B. bei Kernkraftwerken mit Graphit als Moderator der Fall (etwa in England und Frankreich). Weiterhin wird nach einem Unfall der sichere Einschluss bei Anlagen bevorzugt, um die Anlage in einen sicheren Zustand zu überführen und dann zu einem späteren Zeitpunkt den geordneten Abbau zu beginnen. In einigen Fällen führt auch das Fehlen der notwendigen Finanzierung für den Abbau einer Anlage zur Wahl der Strategie des sicheren Einschlusses.

4 Schrittweiser Abbau eines Kernkraftwerks

Am Beispiel eines Kernkraftwerks soll dargestellt werden, wie der Abbau kerntechnischer Anlagen prinzipiell verläuft. Die ► Abb. 12–15 erläutern den Abbau anhand eines vereinfachten Schnitts durch ein Kernkraftwerk. In jedem Abbauschritt werden die jeweils rot markierten Strukturen, Systeme und Komponenten entfernt. Die dargestellte Abbaureihenfolge stellt eine von verschiedenen Vorgehensweisen dar.

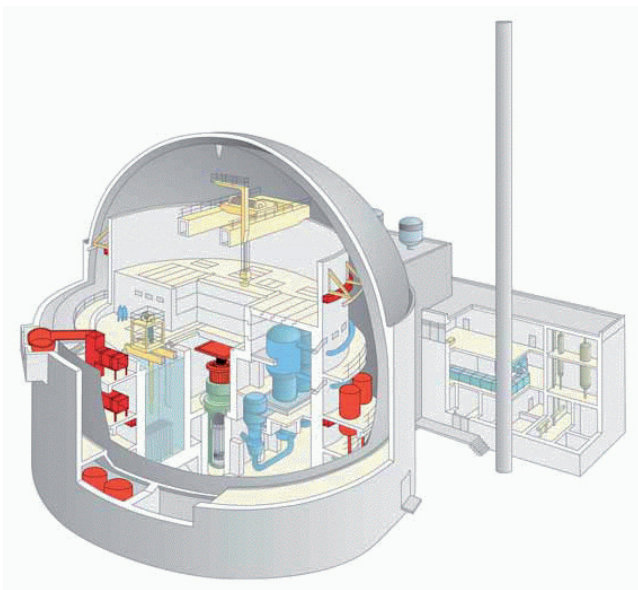


Abb. 12: Zunächst werden die für den Betrieb des Rückbaus nicht mehr benötigten Anlagenteile abgebaut.

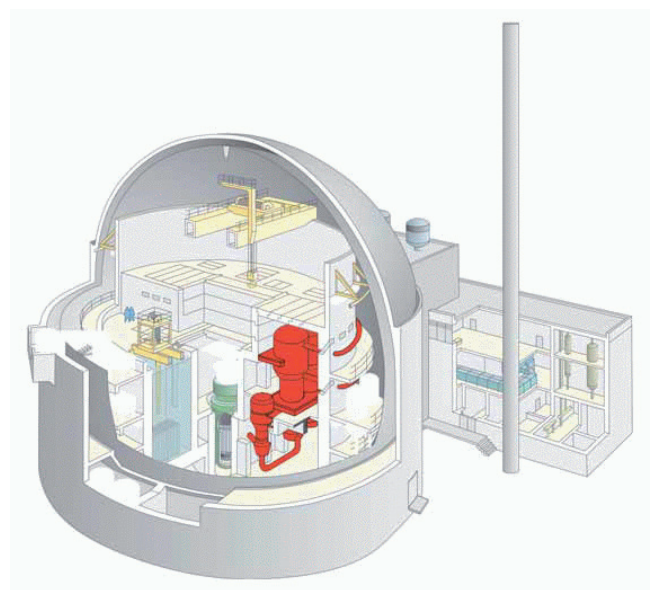


Abb. 13: In den nächsten Schritten werden die höher aktivierten Teile wie z. B. Dampferzeuger und Teile des Primärkreislaufes entfernt.

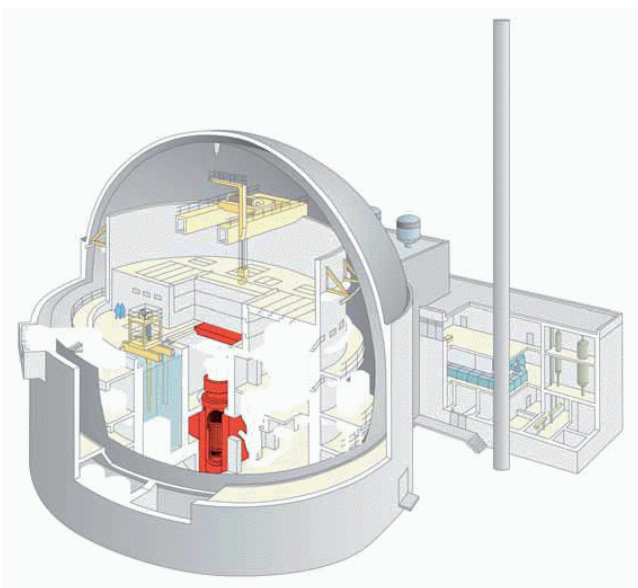


Abb. 14: Als letzte große Komponente wird in der Regel der hoch aktivierte Reaktordruckbehälter abgebaut.

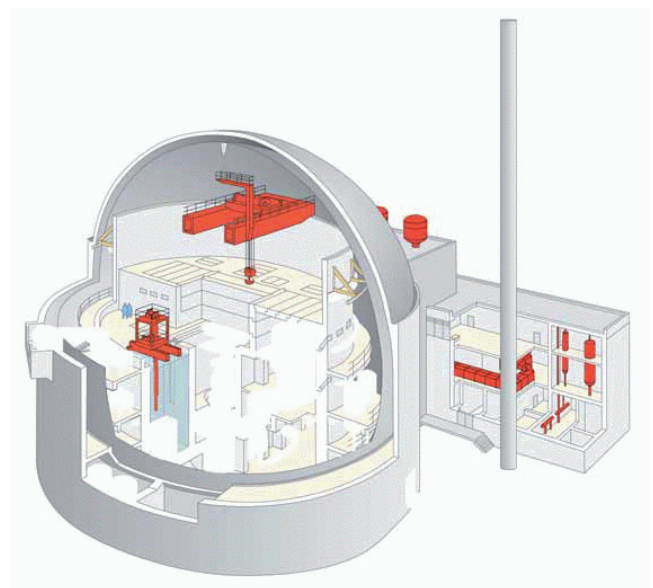


Abb. 15: Als Letztes werden die bis dahin benötigten Teile wie Kräne und Filtersysteme beseitigt.



Abb. 16: Dekontamination mittels Sandstrahlen

Vor Beginn der Abbauarbeiten befindet sich die Anlage noch weitgehend im gleichen technischen Zustand wie während des Betriebs. Brennelemente sind allerdings bereits entfernt oder befinden sich noch im Abklingbecken.

Zur Vorbereitung der Stilllegungsarbeiten wird eine detaillierte Übersicht über das radioaktive Inventar der Anlage erstellt. In allen Bereichen der Anlage werden hierzu Messungen durchgeführt, Proben genommen und ausgewertet. Danach kann der endgültige Plan für den Abbau erstellt werden. In dieser Phase wird auch über die Techniken für die Dekontamination und Zerlegung (► Kapitel 7 Techniken) entschieden.

In verschiedenen Stilllegungsprojekten werden unterschiedliche Reihenfolgen beim Abbau angewendet, wobei auch Mischformen der nachfolgend beschriebenen Varianten zweckmäßig sein können. Eine Variante sieht vor, zunächst die Komponenten mit der höchsten Aktivierung bzw. Kontamination zu entfernen, um für die später folgenden Abbautätigkeiten eine erhebliche Verringerung der Strahlungsexposition des Abbaupersonals zu erreichen. Zu diesen Komponenten gehören die Einbauten des Reaktordruckbehälters, der kernnahe Bereich und die sich unmittelbar anschließenden Systeme und Komponenten innerhalb des Sicherheitsbehälters. Schwächer oder nicht kontaminierte Anlagenteile werden nachfolgend entfernt.

Alternativ kann umgekehrt in den Bereichen mit geringer Kontamination begonnen werden, um anschließend in Bereiche mit höherer Kontamination fortzuschreiten; es wird »von außen nach innen« vorgegangen. In den freigebliebenen Bereichen, z. B. Teilen des Maschinenhauses, können dann notwendige Geräte installiert werden, um den Abfall und die Reststoffe zu zerlegen, zu dekontaminieren und aufzubereiten. Praktisch alle ausgebauten Teile werden in leicht handhabbare Stücke zerlegt und, wenn nötig, dekontaminiert (► Abb. 16). In Deutschland wird häufig noch in der Nachbetriebsphase eine Systemdekontamination (► Kapitel 7.1 Dekontaminationstechniken) durchgeführt, die die innen liegende Kontamination eines Großteils der Reaktorkomponenten um Größenordnungen reduzieren kann. Eine Dekontamination einzelner Teile kann je nach Gegebenheiten aber auch nach der Zerlegung stattfinden.



Abb. 17: Konventioneller Abriss der äußeren Gebäudehülle des Kernkraftwerks Niederaichbach

Komponenten können entweder in eingebautem Zustand, in eigens vor Ort eingerichteten Raumbereichen oder extern zerlegt werden. In einigen Fällen werden Großkomponenten zunächst zur Abklinglagerung aus der Anlage entfernt (► Kapitel 8.2 Abklinglagerung) und später extern zerlegt. Jedes Stück wird auf Radioaktivität hin untersucht. Anhand dieser radiologischen Charakterisierung wird entschieden, ob das Stück konditioniert und als radioaktiver Abfall abgegeben werden muss, oder ob es weiterbehandelt und freigegeben werden kann.

Der Reaktordruckbehälter und seine Einbauten werden weitgehend fernbedient abgebaut, um den Aufenthalt von Personen in Bereichen hoher Strahlenexposition zu vermeiden. Viele der Arbeiten werden zusätzlich unter Wasser ausgeführt, da Wasser eine wirksame Abschirmung darstellt. Die Materialien, die aus diesem Abbauschritt anfallen, sind zum großen Teil aktiviert. Sie bilden einen wesentlichen Anteil der radioaktiven Stilllegungsabfälle.

EDV-Systeme sichern die lückenlose Verfolgung der Stücke, vom Ort ihres Abbaus über die folgenden Behandlungsschritte bis zum Abtransport aus der Anlage. Die für die Reststoff- und Abfallbehandlung notwendige Logistik ist umfangreich und ein maßgeblicher Kostenfaktor.

Wichtige Einrichtungen, wie Lüftung, Strom- und Medienversorgung, werden über alle Abbauschritte hinweg benötigt. Diese Systeme sind entweder noch aus der Betriebsphase vorhanden und können genutzt werden, oder es werden neue und gegebenenfalls externe Systeme nachgerüstet, die besser an die jeweiligen Anforderungen des Abbaus angepasst sind. Die Einrichtung neuer und externer Systeme ermöglicht den früheren Abbau der Systeme aus der Betriebsphase.

Nachdem das Gebäude vollständig leergeräumt ist, verbleiben nur noch gegebenenfalls vorhandene Restkontaminationen auf den Oberflächen der Gebäudestrukturen. Diese Flächen werden dekontaminiert und auf verbleibende radioaktive Kontamination erneut geprüft. Nach Freigabe kann das Gebäude aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen und danach konventionell genutzt oder abgerissen (► Abb. 17) werden.

5 Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren

5.1 Rechtlicher Rahmen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen ergeben sich aus dem Atomgesetz (AtG). Es schreibt vor, dass hierfür eine Genehmigung der zuständigen Behörde erforderlich ist (► Kapitel 5.2 Genehmigungsverfahren).

In ► Abb. 18 ist die Hierarchie des nationalen Regelwerks einschließlich ihres Verbindlichkeitsgrades in Form der sogenannten Regelwerkspyramide dargestellt. Das Grundgesetz gibt grundlegende Prinzipien vor und regelt, dass die Gesetzgebung hinsichtlich der Kernenergienutzung ausschließlich beim Bund liegt.

Zur weiteren Konkretisierung des Atomgesetzes wurden mehrere Verordnungen erlassen. Für die Stilllegung sind die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), die Atomrechtliche Verfahrensverordnung (AtVfV) und die Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) von besonderer Bedeutung.

Die StrlSchV enthält die Definition der Strahlenschutzgrundsätze und legt die zulässigen Grenzwerte der Strahlenbelastung fest. Darüber hinaus enthält sie Regelungen zur Beförderung radioaktiver Stoffe, zur Fachkunde des Personals, ab wann der Umgang mit radioaktiven Stoffen überwachungsbedürftig ist, wie mit radioaktiven Abfällen zu verfahren ist, unter welchen Umständen Reststoffe freigegeben werden können und wie der Strahlenschutz in kerntechnischen Anlagen zu organisieren ist. Im Zuge der Umsetzung europäischer Regeln im Strahlenschutz wurde 2017 ein Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) erlassen, welches übergeordnete Regelungen zum Strahlenschutz enthält. Das In-Kraft-Treten wesentlicher Teile des StrlSchG ist jedoch erst für Ende 2018 vorgesehen, bis dahin gilt die StrlSchV unverändert fort.

Die AtVfV regelt u. a. das atomrechtliche Genehmigungsverfahren, die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung sowie die Einbeziehung der Öffentlichkeit (Öffentlichkeitsbeteiligung) im Rahmen von atomrechtlichen Genehmigungsverfahren. Regelungen zu den Meldekriterien für meldepflichtige Ereignisse bei Kernkraftwerken sind in der AtSMV enthalten.

Neben Gesetzen, Verordnungen und Allgemeinen Verwaltungsvorschriften existiert eine Vielzahl von kerntechnischen Regelungen und Richtlinien von in erster Linie technischer Natur. Diese erhalten ihre regulatorische Bedeutung, indem auf sie in atomrechtlichen Genehmigungen Bezug genommen wird. Ihnen kommt die Aufgabe zu, den Stand von Wissenschaft und Technik zu beschreiben. Das sind Empfehlungen der Entsorgungskommission (ESK), der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und der Strahlenschutzkommission (SSK), Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) sowie DIN-Normen. Hierzu zählen auch Bekanntmachungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), wie beispielsweise der Stilllegungsleitfaden (»Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes« vom 23.06.2016), der vom BMUB zusammen mit den zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden der Länder erarbeitet wurde. Er enthält alle relevanten Aspekte des Genehmigungs- und Aufsichtsverfahrens und Vorschläge für die Vorgehensweise bei Stilllegung und Abbau kerntechnischer Anlagen. Diese Vorschläge betreffen die Anwendung des untergesetzlichen Regelwerks, die Planung und Vorbereitung der Stilllegung und die Genehmigung und Aufsicht. Die ESK hat am 16. März 2015 die Empfehlung »Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen« in aktualisierter Fassung veröffentlicht. Diese Leitlinien enthalten technische Anforderungen und ergänzen so den Stilllegungsleitfaden.

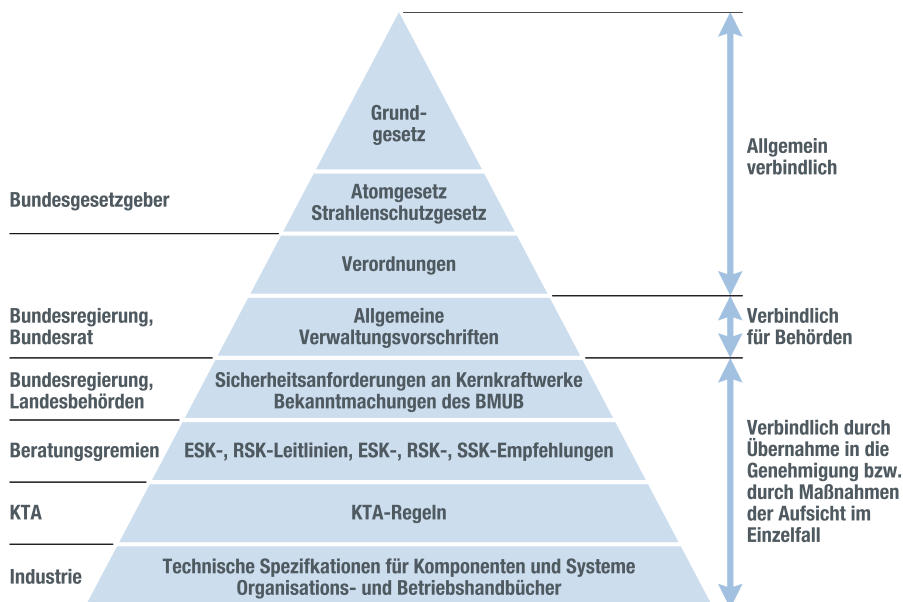


Abb. 18: Regelwerkspyramide

5.2 Genehmigungsverfahren

Soll eine kerntechnische Anlage, deren Errichtung und Betrieb nach dem Atomgesetz genehmigt worden war, stillgelegt werden, so muss der Betreiber bzw. Eigentümer der Anlage eine Stilllegungsgenehmigung beantragen. Bei größeren Anlagen kann es zweckmäßig sein, das Genehmigungsverfahren in mehrere Schritte aufzuteilen und jeden Schritt zum Gegenstand einer eigenständigen Genehmigung zu machen. Ein beispielhaftes zeitliches Ablaufschema für die Stilllegung eines Leistungsreaktors ist in ► Abb. 19 dargestellt.

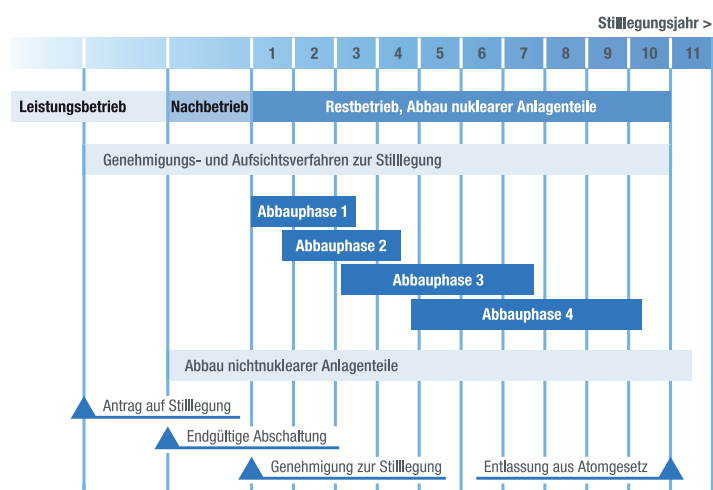


Abb. 19: Beispielhaftes zeitliches Ablaufschema

Für den Antrag auf Erteilung einer Genehmigung müssen bei der jeweiligen Landesbehörde des Bundeslandes, in welchem sich die Anlage befindet, festgelegte Unterlagen und Informationen vorgelegt werden. In diesen sind die beantragte Vorgehensweise, die geplanten Abbaumaßnahmen und anzuwendenden Verfahren, die Auswirkungen auf die Umwelt sowie die Vorkehrungen des Strahlenschutzes usw. darzulegen. Näheres ist in der Atomrechtlichen Verfahrensverordnung geregelt und im Stilllegungsleitfaden zusammengestellt (► Kapitel 5.1 Rechtlicher Rahmen).

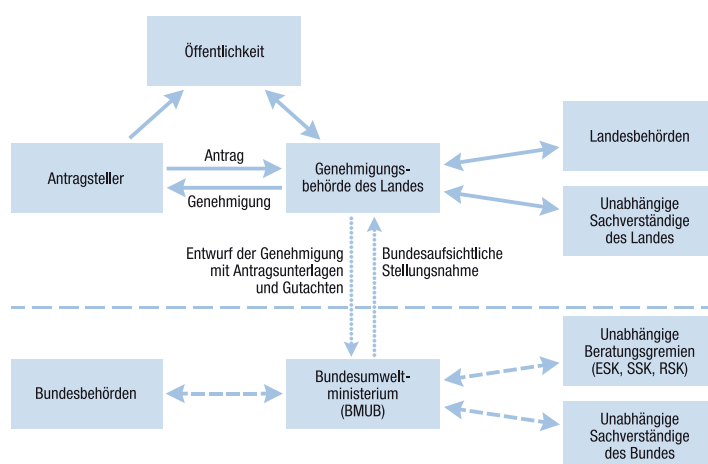


Abb. 20: Beteiligte im Genehmigungsverfahren

Das Verfahren zur Erteilung einer Stilllegungsgenehmigung wie auch die Wechselbeziehungen zwischen Behörden, Sachverständigen, der Öffentlichkeit und anderen Beteiligten sind in ► Abb. 20 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert:

- Die Bundesländer sind zuständig für die Erteilung der Genehmigung. Sie handeln dabei im Auftrag des Bundes (»Bundesauftragsverwaltung«). Sie unterliegen der Aufsicht des BMUB und ggf. dessen Weisungen. Das BMUB wird hierbei von der ESK, der RSK und der SSK beraten.
- Die Zuständigkeit für den Erlass sowie gegebenenfalls die Rücknahme oder den Widerruf von atomrechtlichen Genehmigungen sowie für die atomrechtliche Aufsicht liegt bei den Bundesländern.
- Genehmigungsanträge werden bei der jeweils zuständigen Landesbehörde gestellt, bearbeitet und geprüft. Diese stellt die Beteiligung der Öffentlichkeit am Genehmigungsverfahren sicher und sorgt, sofern erforderlich, für die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung.
- Die in der Stilllegungsgenehmigung gestatteten Arbeiten werden von den zuständigen Landesbehörden im ► Aufsichtsverfahren (Kapitel 5.3) überwacht.

5.3 Aufsichtsverfahren

Die Einhaltung der in der Stilllegungsgenehmigung gestatteten Arbeiten wird von den zuständigen Landesbehörden im Aufsichtsverfahren überwacht. Dabei wird überprüft, ob die für die Arbeiten in der Genehmigung festgelegten Bedingungen und erteilten Auflagen sowie die gesetzlichen und untergesetzlichen Anforderungen eingehalten werden. Ergänzende Kontrollen werden durch unabhängige Sachverständige durchgeführt, die von den Landesbehörden zur Unterstützung beauftragt werden. Weiterhin werden die in der Genehmigung festgelegten Techniken (► Kapitel 7 Techniken) und Verfahren im Verlauf des Aufsichtsverfahrens endgültig spezifiziert und im Detail geplant.

Die Ableitung von radioaktiven Stoffen durch eine kerntechnische Anlage in die Umgebung wird während der gesamten Abbauphase von den Behörden überwacht. Dazu stehen Messstationen des Betreibers in der näheren Umgebung des Kraftwerks zur Verfügung. Weiterhin werden die Ableitungen von Luft und Wasser aus der Anlage messtechnisch überprüft. Die entsprechenden Daten werden rund um die Uhr automatisch über die Kernreaktorfernüberwachung an die zuständigen Aufsichtsbehörden übermittelt.

6 Sicherheit und Strahlenschutz

Die Sicherheit bei der Stilllegung und beim Abbau kerntechnischer Anlagen wird durch eine Reihe von technischen und administrativen Maßnahmen gewährleistet. Ziel ist es, das Betriebspersonal, die Bevölkerung und die Umwelt vor unzulässigen Strahlenexpositionen zu schützen. Dieser Schutz muss nicht nur bei allen Arbeiten, die mit der Stilllegung verbunden sind, sichergestellt sein, sondern auch bei Störfällen. Weitere Sicherheitsaspekte umfassen den Arbeitsschutz beim Umgang mit Chemikalien, die Unfallverhütung usw., wie sie in jeder Industrieanlage relevant sind.

6.1 Sicherheitsbetrachtungen

Das Gefährdungspotenzial einer kerntechnischen Anlage liegt in ihrem radioaktiven Inventar sowie darin, dass ein Teil dieses Inventars durch einen Störfall freigesetzt werden könnte.

Das Gefährdungspotenzial setzt sich aus zwei Faktoren zusammen:

1. dem in der Anlage vorhandenen radioaktiven Material: das »Aktivitätsinventar« und dem Anteil hiervon, der prinzipiell für eine Freisetzung in die Umgebung und damit für eine potenzielle Gefährdung der Bevölkerung verfügbar ist: die »freisetzungsfähige Aktivität« und
2. der Wahrscheinlichkeit, dass solch eine Aktivität überhaupt freigesetzt wird: die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Störfalles, zum Beispiel infolge eines Brandes oder einer Leckage.

Mit Voranschreiten des Abbaus der Anlage wird das Aktivitätsinventar in der Anlage verringert, bis schließlich nach vollständigem Abbau kein Aktivitätsinventar mehr vorhanden ist.

Im Folgenden wird beschrieben, wie sich das Gefährdungspotenzial am Beispiel eines Kernkraftwerkes entwickelt.

Während des Anlagenbetriebs befinden sich die Brennelemente im Reaktordruckbehälter, und der Prozess der Kernspaltung läuft. Das Aktivitätsinventar in den Brennelementen ist um das Zehn- bis Hunderttausendfache höher als das Aktivitätsinventar, das sich sonst noch in der Anlage findet. Ausgedrückt in der Maßeinheit der Radioaktivität, dem Becquerel, liegt sie bei 10^{20} bis 10^{21} Bq.

Abb. 21: Innerbetrieblicher Transport bestrahlter Brennelemente



Mit der endgültigen Abschaltung des Kernreaktors ist die Anlage drucklos bei niedriger Temperatur. Auch wenn der Prozess der Kernspaltung nicht mehr läuft, müssen die Brennelemente aufgrund der entstehenden Wärme durch den weiterhin stattfindenden radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte noch einige Jahre weiter gekühlt werden.

Nach dem Abtransport der bestrahlten Brennelemente aus dem Reaktor-gebäude und deren Lagerung im Zwischenlager am Standort (► Abb. 21), ist das Gefährdungspotenzial deutlich reduziert. Eine weitere erhebliche Reduzierung des Aktivitätsinventars kann durch die Entsorgung der radioaktiven Betriebsabfälle erreicht werden. Diese Maßnahmen reduzieren das radioaktive Inventar auf etwa ein Zehntausendstel des ursprünglichen Wertes. Es verbleibt nun noch eine Aktivität von etwa 10^{16} bis 10^{17} Bq. Dieses Aktivitätsinventar ist zum größten Teil als Aktivierung fest in den kernnahen Strukturmaterialien der Anlage eingebunden. Es kann allenfalls in geringem Umfang mobilisiert werden.

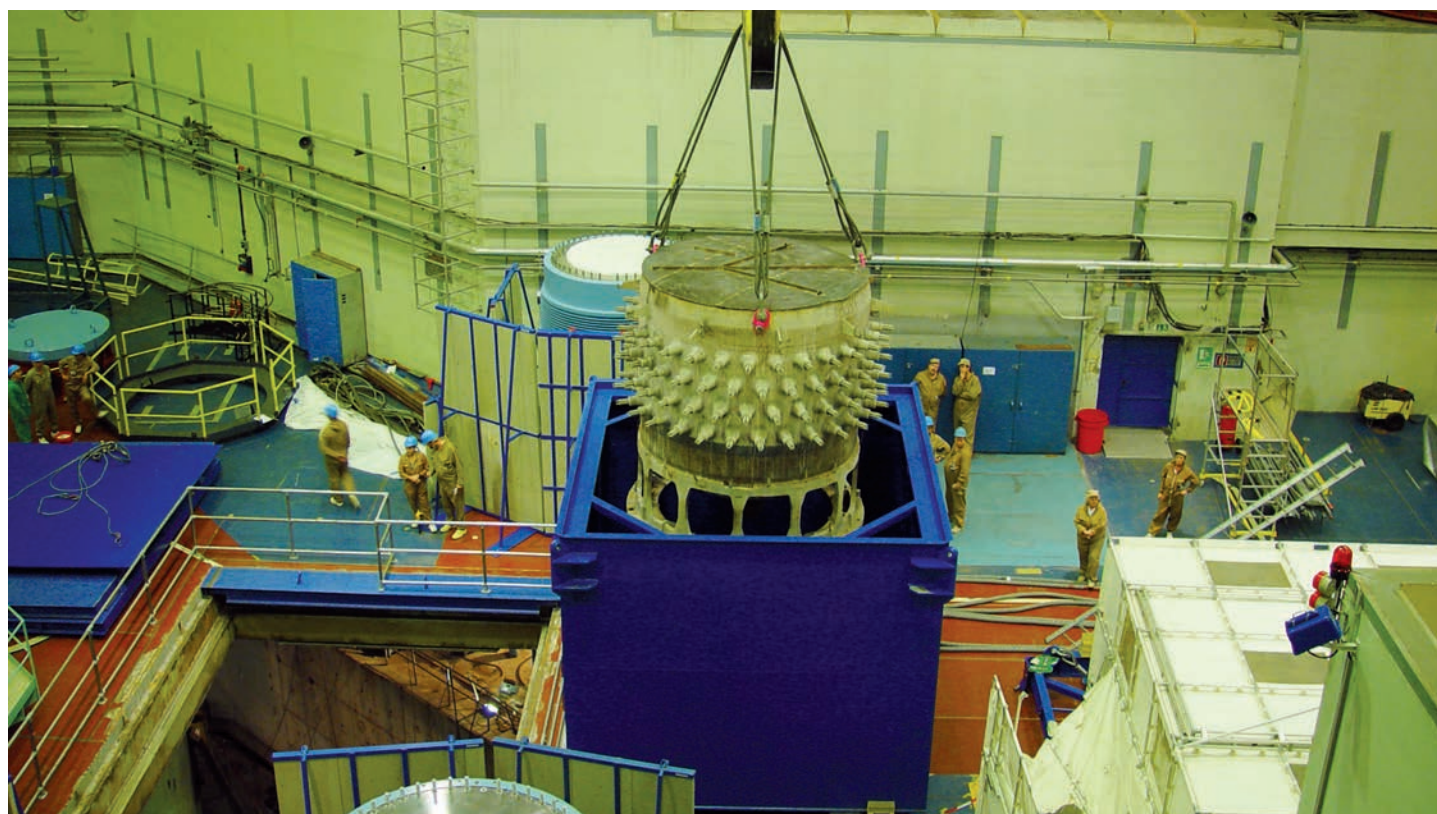
Nicht nur die Aktivierung, sondern auch die Oberflächenkontamination auf Anlagenteilen und Gebäudeoberflächen trägt zum radioaktiven Inventar bei, das in der Anlage verbleibt. Die Aktivität der Oberflächenkontamination liegt bei etwa 10^{11} bis 10^{12} Bq und ist somit nochmals hunderttausend Mal kleiner als die Aktivität aufgrund von Aktivierung.

In der Restbetriebs- und Abbauphase werden die Anlagenteile demontiert (► Abb. 22). Das radioaktive Inventar der Anlagen und Anlagenteile kann durch Dekontamination vor oder nach der Demontage erheblich reduziert werden. Ein wesentlicher Teil des Materials lässt sich so weit dekontaminieren, dass es behördlich freigegeben und wieder dem konventionellen Stoffkreislauf zugeführt werden kann (► Kapitel 8.1 Freigabe). Für die Sicherheit wichtige Einrichtungen, wie Lüftungs- und Brandschutzsysteme, werden weiter betrieben bzw. an die geänderten Anforderungen angepasst.

Im Zuge der Abbau- und Zerlegearbeiten kann – zeitlich und örtlich begrenzt – der freisetzungsfähige Anteil der Radioaktivität zeitweise ansteigen. Dies kann z. B. geschehen, wenn bis dahin geschlossene Rohrleitungen, Behälter usw. geöffnet werden. Durch Strahlenschutzmaßnahmen muss verhindert werden, dass bei solchen Abbaumaßnahmen Radioaktivität freigesetzt wird.

Durch fortschreitende Dekontamination und durch den Abbau wird das radioaktive Inventar, das in der Anlage verbleibt, immer weiter reduziert, bis zuletzt die Anlage und das Gelände für eine andere Nutzung behördlich freigegeben werden können. Bei vielen Anlagen werden die radioaktiven Abfälle zunächst auf dem Anlagengelände in geeigneten Gebäuden zwischengelagert, bis ein geeignetes Endlager bereitsteht.

Abb. 22: Entfernung eines Druckhalters



6.2 Strahlenschutz

Sowohl beim Betrieb als auch bei Stilllegung und Abbau einer kerntechnischen Anlage ist der Schutz des Personals, der Bevölkerung und der Umgebung vor den Gefahren der ionisierenden Strahlung eine zentrale Aufgabe.

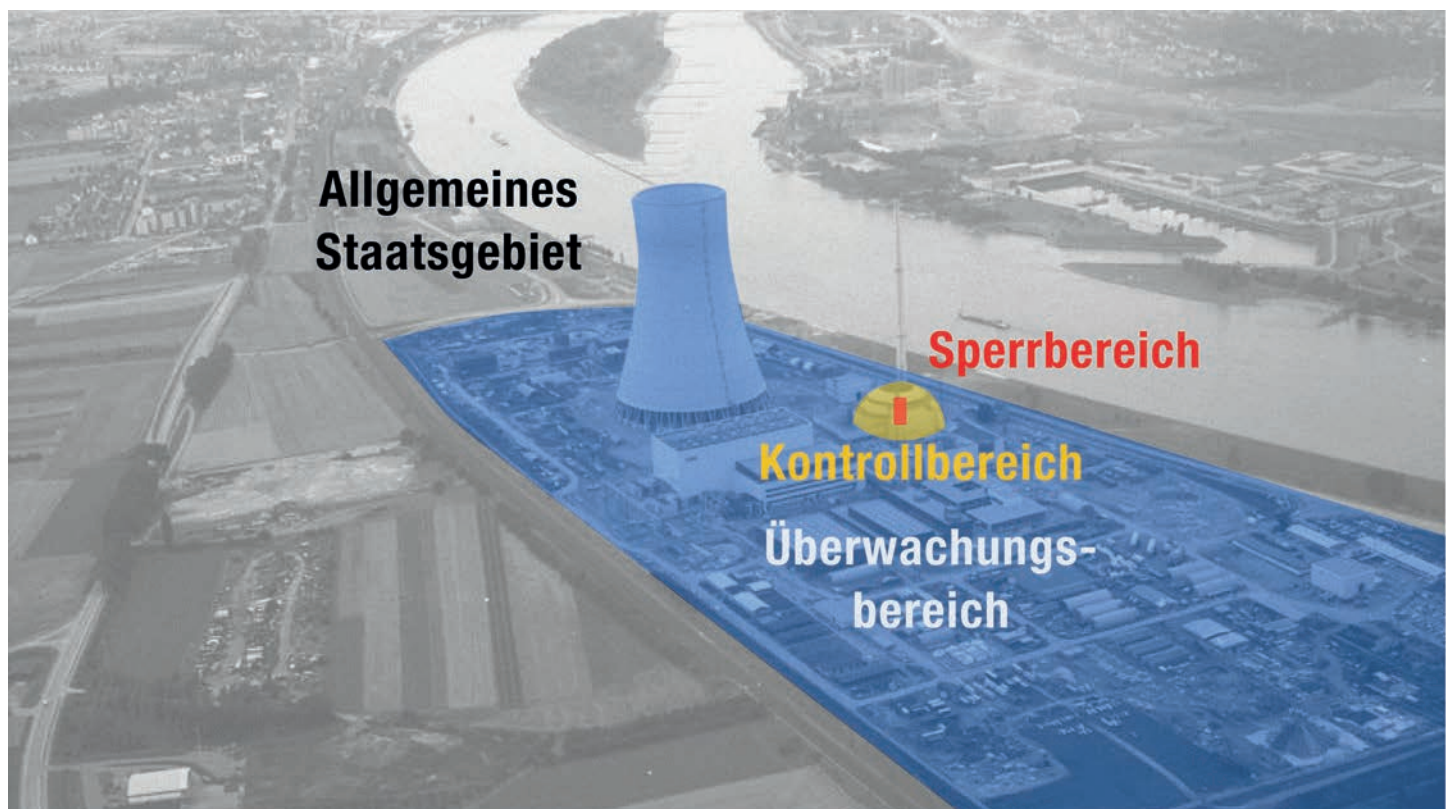
Ein komplexes System überwacht ständig die Strahlungssituation in allen Räumen und Bereichen der Anlagen. Jede Person, die im Kontrollbereich einer Anlage (► Abb. 23) tätig ist, trägt ein persönliches Dosimeter, das die Strahlenexposition (Dosis) misst. Durch weitere Maßnahmen wird außerdem die Aufnahme von Radionukliden in den Körper vermieden. Dosisgrenzwerte für das Personal sind im strahlenschutzrechtlichen Regelwerk (► Kapitel 5.1 Rechtlicher Rahmen) festgelegt und werden ergänzt durch Dosisrichtwerte in betrieblichen Ordnungen. Sie dürfen nicht überschritten werden. Darüber hinaus sind eine Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und eine Dosisreduzierung auch unterhalb der festgelegten Grenzwerte vorgeschrieben. In der Praxis werden die Grenzwerte für die Strahlenexposition infolge der eingesetzten wirksamen Strahlenschutzmaßnahmen in der Regel weit unterschritten.

Auch die technisch unvermeidbare Ableitung von Radionukliden mit der Abluft und dem Abwasser wird sorgfältig überwacht. Grenzwerte für diese Ableitungen werden in den Genehmigungen festgelegt. In der Praxis werden auch diese Grenzwerte sowohl während der Betriebs- als auch während der Stilllegungsphase weit unterschritten.

Eine Vielzahl von technischen und administrativen Strahlenschutzmaßnahmen stellt sicher, dass die Anforderungen an den Strahlenschutz eingehalten werden. Dazu gehören:

- Einschluss des radioaktiven Inventars in Systemen und Räumen, um eine Freisetzung und Ausbreitung zu verhindern,
- Abschirmmaßnahmen, um die Strahlenexposition am Arbeitsplatz zu reduzieren,
- individuelle Schutzmaßnahmen für das Personal, etwa die Pflicht, spezielle Schutzanzüge, Handschuhe, Überschuhe und ggf. Atemschutzmasken zu tragen (► Abb. 24),
- Schulung des Fremd- und Eigenpersonals,
- gezielte Luftführung in der Anlage und
- Filterung der Abluft und Reinigung der Abwässer, um die Menge radioaktiver Stoffe zu reduzieren, die kontrolliert im Rahmen der behördlichen Genehmigung in die Umgebung abgegeben werden dürfen.

Abb. 23: Schematische Darstellung der Strahlenschutzbereiche einer kerntechnischen Anlage



Da viele Tätigkeiten beim Abbau denen ähneln, die bei der Instandhaltung der Anlage während des Betriebs notwendig sind, können die vorhandenen Strahlenschutzkenntnisse in der Abbauphase genutzt werden. Beim direkten Abbau der Anlage (► Kapitel 3 Stilllegungsstrategien) kann daher die vorhandene Strahlenschutzorganisation weitgehend übernommen werden, wobei Anpassungen beispielsweise im Hinblick auf die Abfallbehandlung notwendig sein können.

6.3 Meldepflichtige Ereignisse

Ein Ereignis, das sicherheitsrelevante Auswirkungen auf eine kerntechnische Anlage hat oder haben könnte, muss vom Betreiber an die zuständige Aufsichtsbehörde gemeldet werden. Die Meldefristen hängen von der Art des Ereignisses ab und sind in der atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV, ► Kapitel 5.1 Rechtlicher Rahmen) geregelt.

Die Verpflichtung der Betreiber zu solchen Meldungen endet nicht mit der Abschaltung der Anlage, auch wenn ab diesem Zeitpunkt das Gefährdungspotenzial (► Kapitel 6.1 Sicherheitsbetrachtungen) deutlich geringer ist. Sie gilt, bis eine bestimmte Aktivitätsinventargrenze unterschritten ist und auf Antrag des Betreibers eine Befreiung von der Meldepflicht genehmigt wird, oder bis die Anlage vollständig abgebaut und aus dem atomrechtlichen Geltungsbereich entlassen ist. Ein solches meldepflichtiges Ereignis wäre z. B. eine bei einer Funktionsprüfung festgestellte Fehlfunktion einer Brandmeldeanlage.

Abb. 24: Vollschutzausrüstung bei der Dekontamination mittels Hochdruckreiniger



7 Techniken

Für die Durchführung der Stilllegung ist es wichtig, über ausgereifte, zuverlässige Techniken zu verfügen, mit denen Anlagenteile und Gebäude abgebaut, dekontaminiert und in handhabbare Stücke zerlegt werden können. Diese Techniken müssen den Anforderungen gerecht werden, die an Sicherheit, Strahlenschutz und zügige Projektdurchführung gestellt werden. In Forschungszentren und an Universitäten, aber auch in der Industrie wurden daher viele konventionelle Techniken für die Stilllegung von kerntechnischen Anlagen fortentwickelt und den besonderen Anforderungen angepasst, die Strahlenschutz und kerntechnische Sicherheit stellen. Einige Techniken mussten so weiterentwickelt werden, um sie auch fernbedient einsetzen zu können.

Für eine Stilllegung kerntechnischer Anlagen werden verschiedene Verfahren zur Dekontamination, zum Abbau und der Zerlegung sowie zu Aktivitätsmessungen und zur Abfallkonditionierung benötigt.

Die jeweils verwendeten Techniken wählt der Betreiber der Anlage. Eine Grundlage für diese Wahl ist u. a. die Kenntnis über Menge und Art der Radioaktivität des jeweiligen Anlagenteils oder Raumes. Deshalb wird vor Beginn der Abbauarbeiten die Kontamination aller Kreisläufe und Räume ermittelt und in einem so genannten Kontaminationsatlas zusammengestellt.

Bei der Auswahl der einzelnen Techniken werden u. a. folgende Kriterien berücksichtigt:

- Strahlenschutzaspekte, vor allem Reduzierung der Dosis des Personals,
- Eignung und Effektivität des Verfahrens,
- möglichst umfangreiche Freigabe von Reststoffen und Anlagenteilen, Verringerung des Volumens der radioaktiven Abfälle und räumliche Randbedingungen.

Auswahl und Einsatz der Techniken werden durch Behörde und Gutachter genehmigt und kontrolliert (► Kapitel 5 Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren).

7.1 Dekontaminationstechniken

Dekontaminationstechniken dienen der Entfernung von anhaftenden Radionukliden (Kontamination). Dies verbessert den Strahlenschutz und bildet eine wichtige Voraussetzung für die Reststoffverwertung. Dekontamination spielt an zwei Stellen im Stilllegungsablauf eine wichtige Rolle:

1. vor Beginn der Abbauarbeiten,
2. zur Reinigung solcher abgebauten Teile, die zur Freigabe gelangen sollen.

Um die Strahlenexposition des Personals zu reduzieren, werden vor Beginn der Abbauarbeiten Kreisläufe und Räume dekontaminiert. Dabei werden oft nicht nur die oberflächlich abgelagerten Radionuklide abgetragen, sondern auch eine dünne Schicht des Materials selbst. Dadurch wird auch radioaktives Material entfernt, das in Risse eingedrungen ist oder sich an unzugänglichen Stellen abgelagert hat. So kann z. B. vor Abbaubeginn der geschlossene Reaktorkühlkreislauf von innen dekontaminiert werden, indem verschiedene Chemikalien durch die Rohrsysteme und Ventile gepumpt werden. Diesen Vorgang bezeichnet man als Systemdekontamination.

Abgebaute Anlagenteile werden oft nochmals dekontaminiert, um diese letztlich freigegeben, also aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen zu können (► Kapitel 8 Reststoff- und Abfallmanagement).

Die Ursache der Kontamination kann direkter Kontakt mit einem aktivitätsführenden Medium (etwa dem Primärwasser) sein. Oberflächen können auch dadurch kontaminiert sein, dass sich Radionuklide mit der Luft im Anlagengebäude ausgebreitet haben. Bei oberflächlicher Kontamination kann es genügen, die Materialoberflächen abzubürsten oder unter Hochdruck zu waschen. Ist die Kontamination tiefer eingedrungen, so muss ein Teil der Oberfläche (einige Mikrometer bis einige Millimeter) abgetragen werden. Wenn alle Verfahrensparameter richtig gewählt wurden, weist die auf diese Weise neu geschaffene Oberfläche keine Kontamination mehr auf.



Abb. 25: Chemische Dekontamination

Man unterscheidet im Allgemeinen mechanische und chemische Dekontaminationsverfahren. Chemische Verfahren arbeiten z. B. in einem weiten Bereich schwacher und starker organischer und anorganischer Säuren (► Abb. 25). Auch mehrphasige, sehr spezialisierte Prozesse werden eingesetzt, ebenso sogenannte Komplexbildner, Schäume oder Gele. Relativ einfache mechanische Verfahren sind z. B. Bürsten und Saugen, stärker wirkt das Hochdruckreinigen mit Wasser oder Dampf (► Abb. 26). Verfahren mit Oberflächenabtrag sind etwa Abraspeln, Schaben, Nadeln oder Abschälen. Dazu zählen auch verschiedene Strahlverfahren mit festen abrasiven Medien (Schleifmitteln) wie Sand oder Stahlkugeln. Welche Verfahren angewendet werden, hängt von der Art und Eindringtiefe der Kontamination sowie vom kontaminierten Werkstück ab.



Abb. 26: Dekontamination mit Wasserstrahl

7.2 Abbau- und Zerlegetechniken

Abbau- und Zerlegetechniken benötigt man für viele Aufgaben und Einsatzgebiete beim Abbau kerntechnischer Anlagen. Anlagenteile müssen aus der Anlage ausgebaut und in handhabbare Stücke zerlegt werden (Nachzerlegung). Dies ist eine wichtige Voraussetzung für das gesamte Abfall- und Reststoffmanagement. Das Spektrum der Aufgaben reicht vom einfachen Trennen einer dünnen Rohrleitung, die nie mit radioaktiven Stoffen in Kontakt war, über den Abbau und das Zerlegen großer Behälter und dickwandiger Rohre für radioaktive Flüssigkeiten, bis hin zur Zerlegung des Reaktordruckbehälters und dessen Einbauten.

Auch die Nachzerlegung bereits abgebauter großer Werkstücke, etwa zur Dekontamination oder zur Freigabemessung, ist eine wichtige Aufgabe. Neben verschiedenen Metallsorten ist auch Beton zu zerlegen, der – wie etwa beim biologischen Schild oder bei einigen Gebäudestrukturen – stark mit Armierungsstahl durchsetzt sein kann.

Wenn in einem Bereich mit starkem Strahlungsfeld oder an hochaktiven Teilen gearbeitet werden muss, wie etwa im aktivierten kernnahen Bereich, kann dies nicht direkt manuell geschehen, sondern fernbedient – oft unter Wasser (► Abb. 27). Das Wasser bildet eine wirksame Abschirmung gegen die Strahlung, die von den zu zerlegenden Materialien ausgeht.

Kriterien zur Entscheidung, welche Techniken sich am besten eignen, sind vor allem die Sicherheit, aber auch z. B. Schneidgeschwindigkeit, maximal trennbare Materialdicke oder Freisetzung von Stäuben (Aerosolen).

Es werden also Zerlegetechniken gebraucht, die in unterschiedlichen Bereichen und unter unterschiedlichen Bedingungen und ggf. sogar unter Wasser einsetzbar sein müssen. Dieses Spektrum von Aufgaben ist nicht mit einer einzigen Zerlegetechnik beherrschbar. Nachfolgend werden einige thermische und mechanische Zerlegetechniken beschrieben.

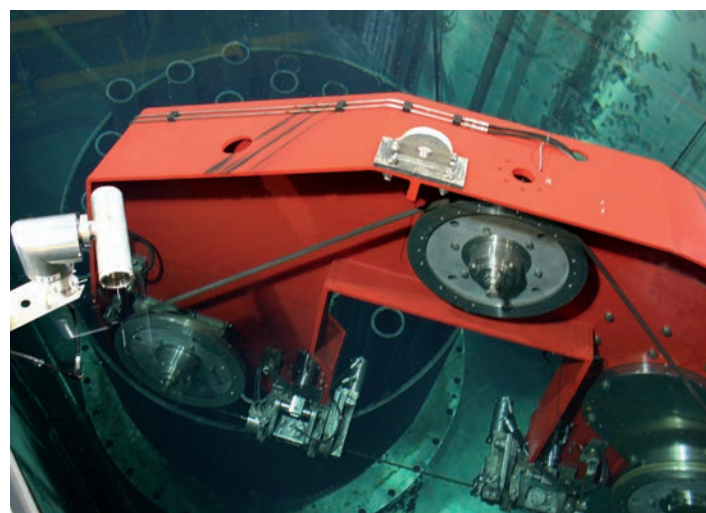


Abb. 27: Zerlegung von Komponenten unter Wasser mit einer Bandsäge

Thermische Zerlegetechniken schmelzen das Material mittels einer Flamme, eines Lichtbogens oder eines Laserstrahls auf und treiben dann den geschmolzenen Anteil durch einen Gas- oder Wasserstrom oder einfach durch die Schwerkraft aus der Schnittfuge. Solche Techniken werden weitaus häufiger für Metalle als für Beton oder konventionelle Bauwerkstoffe angewendet (► Abb. 28). Einige Techniken sind für beide Materialtypen geeignet. Beim thermischen Schneiden in Luft und unter Wasser entstehen partikelförmige Emissionen, sogenannte Aerosole bzw. Hydrossole, die jedoch mit handelsüblichen Absaug- und Filteranlagen beherrschbar sind.

Wichtige thermische Techniken sind die folgenden:

- autogenes Brennschneiden,
- Plasmaschmelzschnitten,
- Lichtbogenschneiden,
- Funkenerosion und
- Laserstrahlschnitten.



Abb. 28: Manueller Einsatz thermischer Zerlegetechniken



Abb. 29a: Steuerstand für fernbediente Arbeiten

Diese Techniken zeichnen sich in der Regel durch hohe Schneidgeschwindigkeiten und geringe Rückstellkräfte aus, sodass sich entsprechende Geräte für den fernbedienten Einsatz mithilfe von Manipulatoren eignen. Ein Beispiel für fernbedientes thermisches Schneiden ist in ► Abb. 29 a und b dargestellt.

Mechanische Zerlegetechniken erzeugen die Schnittfuge, indem mechanisch Material abgetragen wird. Dabei wird das Material weder aufgeschmolzen noch verbrannt, auch werden keine Schneidgase eingesetzt. Die beim Trennen entstehenden Späne und Stäube sind vergleichsweise grob und leicht durch Filter aufzufangen. Mechanische Zerlegetechniken werden für Metalle und für Baustrukturen angewendet.

Wichtige mechanische Techniken sind:

- Sägen,
- Seilsägen,
- Fräsen,
- Trennschleifen,
- Scheren,
- Wasser-Abrasivschneiden und
- Sprengen.



Abb. 29b: Kammer zur Trockenzerlegung

7.3 Alternativen zur Zerlegung vor Ort

Großkomponenten wie Dampferzeuger oder Reaktordruckbehälter werden nicht immer vor Ort zerlegt, sondern können zur weiteren Verarbeitung oder zur Abklinglagerung im Ganzen transportiert werden (► Kapitel 8.2 Abklinglagerung). So wurden die Dampferzeuger des Kernkraftwerks Stade (KKS) nach einer ersten Dekontamination zur Weiterverarbeitung nach Schweden verschifft (► Abb. 30). Dort wurden sie zerlegt, weiter dekontaminiert und stückweise eingeschmolzen. Der Großteil der radioaktiven Stoffe befindet sich danach in der Schlacke, so dass der Stahl überwiegend wieder verwertet werden kann. Der radioaktive Restabfall, der nur einen geringen Teil der Gesamtmasse ausmacht, wird wieder nach Deutschland zurückgebracht.



Abb. 30: Transport eines Dampferzeugers nach Schweden zum Einschmelzen

8 Reststoff- und Abfallmanagement

Eine der wichtigsten Aufgaben beim Abbau kerntechnischer Anlagen ist es, das Aufkommen an Reststoffen und Abfällen zu bewältigen. Der Begriff »Reststoff- und Abfallmanagement« steht dabei für die Gesamtheit von Maßnahmen, die den sicheren, effektiven und ressourcenschonenden Umgang mit dem Material aus kerntechnischen Anlagen zum Ziel haben. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten (► Abb. 31):

- Liegt die Aktivität nachweislich unter einem bestimmten Niveau, so kann eine Freigabe erfolgen. Hierzu ist eine behördliche Entscheidung erforderlich.
- Vor einer Freigabe oder weiteren Behandlung kann zur Reduzierung der Aktivität eine Abklinglagerung durchgeführt werden.
- Ist das Material als radioaktiver Abfall zu beseitigen, muss es konditioniert, zwischen- und schließlich endgelagert werden.
- Ein geringer Teil des Materials wird ggf. zur Weiterverwendung an andere kerntechnische Anlagen abgegeben.

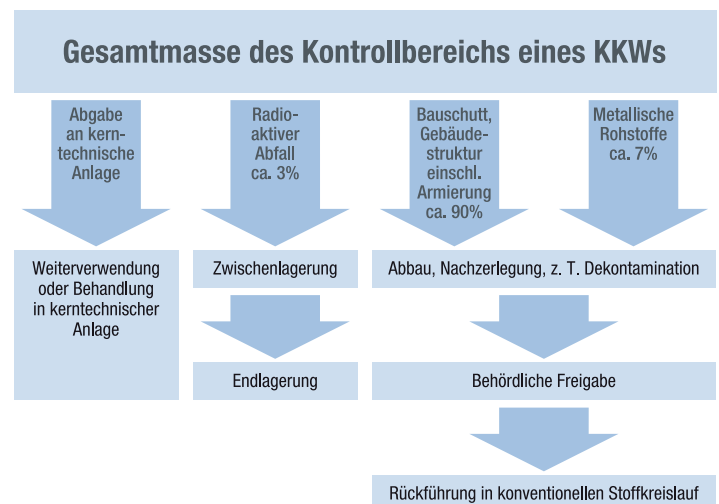


Abb. 31: Radioaktiver Abfall und Reststoffe

Die Gesamtmassen, die an den Standorten von Kernkraftwerken in Deutschland jeweils anfallen, unterscheiden sich nach Kraftwerkstyp (Druck- oder Siedewasserreaktor). Die Massen des Kontrollbereiches, also jenes Bereiches, in dem während des Kraftwerksbetriebes mit radioaktiven Stoffen umgegangen werden kann, beziffern sich jedoch für die meisten Kraftwerke auf jeweils etwa 200.000 Mg.

Die 200.000 Mg des Kontrollbereichs eines Kernkraftwerks können zu einem Großteil (ca. 97 %) freigegeben werden (► Kapitel 8.1 Freigabe). Nur etwa 3 % der Masse des Kontrollbereichs sind, bei einem optimierten Abbau, radioaktiver Abfall und müssen entsprechend endgelagert werden (► Abb. 32).

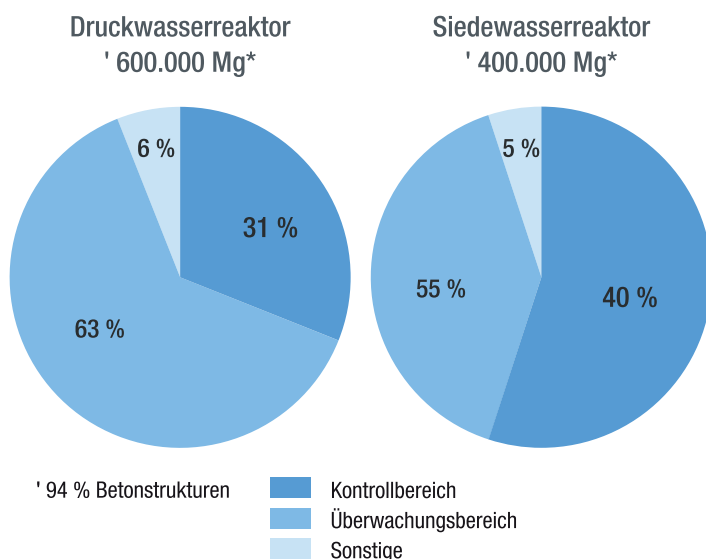
8.1 Freigabe

Nur ein kleiner Teil des gesamten Materials in einer kerntechnischen Anlage ist überhaupt jemals mit radioaktiven Stoffen in Berührung gekommen. Davon kann wiederum der größte Teil durch Dekontaminationsmaßnahmen von anhaftenden Radionukliden befreit werden.

Material, dessen Aktivität nachweislich unterhalb eines bestimmten Niveaus liegt und die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Freigabewerte unterschreitet, kann aufgrund behördlicher Entscheidung freigegeben werden und wird damit aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung entlassen. Das restliche Material ist dagegen radioaktiver Abfall und muss zwischen- bzw. endgelagert werden. Da die Entscheidung für jedes Einzelstück zu treffen ist, wird das Material üblicherweise vorsortiert, wie es in ► Abb. 33 dargestellt ist.



Abb. 33: Gitterboxen mit vorsortierten Reststoffen zur Freigabe



* Über verschiedene Standorte ermittelte Gesamtmassen aller Gebäude aus Strahlenschutzbereichen und sonstigen Bereichen

Abb. 32: Gesamtmassen beim Abbau von Kernkraftwerken (nach ESK)

Freigabeoptionen

Bei der Freigabe existiert eine Reihe von Optionen, die durch die Strahlenschutzverordnung vorgegeben sind:

- Nach einer »uneingeschränkten Freigabe« ist das Material im Sinne des Atomrechts nicht mehr radioaktiv und kann für beliebige Zwecke wieder verwendet werden. Daher sind die Freigabewerte (► Tab. 2) für die uneingeschränkte Freigabe im Vergleich zu anderen Optionen deutlich niedriger, um die Sicherheit unter allen denkbaren Nutzungsmöglichkeiten des Materials zu gewährleisten.
- Bei einer »Freigabe zur Beseitigung« muss das Material an eine geeignete konventionelle Deponie oder Verbrennungsanlage abgegeben und dort auf bestimmte Weise beseitigt werden.
- Weitere Optionen bestehen z. B. für Metallschrott, welcher zum Einschmelzen in ein konventionelles Stahlwerk oder in eine Gießerei gelangen soll, für große Mengen an Bauschutt, für die Gebäude der Anlage sowie für das Anlagengelände.

Beispiele der für die einzelnen Optionen festgelegten Freigabewerte sind in ► Tab. 2 aufgeführt. Die Freigabewerte sind jeweils so hergeleitet worden, dass die im Folgenden beschriebenen Freigabekriterien zuverlässig eingehalten werden.

Freigabekriterien

Nach internationaler Fachmeinung (z. B. der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP) kann eine Entlassung aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung verantwortet werden, wenn dadurch für eine Einzelperson der Bevölkerung nur eine zusätzliche Dosis im Bereich von 10 µSv im Kalenderjahr auftreten kann. Diese Vorgabe ist in der Strahlenschutzverordnung festgeschrieben und entspricht auch den Grundnormen für den Strahlenschutz der EU (EURATOM). Eine solche Dosis ist 200 Mal niedriger als die Dosis aus der natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung im gleichen Zeitraum (z. B. durch kosmische Strahlung und natürlich vorkommende Radioaktivität). Aus dieser Überlegung heraus wurden die Freigabewerte so entwickelt, dass diese zulässige Dosis auch unter den ungünstigsten Umständen nicht überschritten werden kann.

Nuklid	Uneingeschränkt	Zur Beseitigung	Als Metallschrott zum Einschmelzen
Fe-55	200 Bq/g	10.000 Bq/g	10.000 Bq/g
Cs-137	0,5 Bq/g	10 Bq/g	0,6 Bq/g
Pu-241	2 Bq/g	100 Bq/g	10 Bq/g
Am-241	0,05 Bq/g	1 Bq/g	0,3 Bq/g

Tab. 2: Freigabewerte ausgewählter Radionuklide nach Strahlenschutzverordnung



Abb. 34: Messung zur Freigabe



Abb. 36: Raum mit Markierungen zur Bestimmung der Oberflächenkontamination

Ablauf der Freigabe

Der Ablauf der Freigabe ist behördlich geregelt. An vielen Stellen sind qualitätssichernde Maßnahmen vorgesehen. Die zuständige atomrechtliche Behörde prüft, dass die Schritte des Verfahrens und die eingesetzte Messtechnik (z. B. ► Abb. 34) für das Freigabeverfahren geeignet sind. Die Behörde stellt dadurch sicher, ggf. unter Hinzuziehung unabhängiger Sachverständiger, dass das freizugebende Material die für die Freigabe geltenden Kriterien erfüllt.

► Abb. 35 gibt einen Überblick über den Gesamtablauf des Freigabeverfahrens, dessen einzelne Stationen am Beispiel eines abgebauten Anlagenteils dargestellt sind.

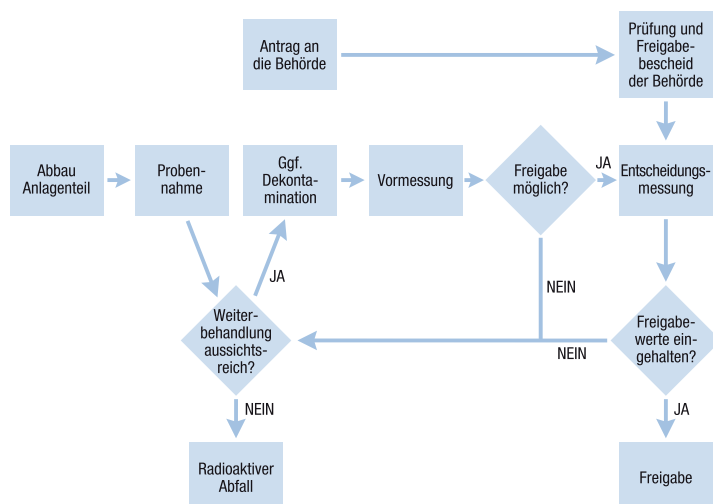


Abb. 35: Entscheidungsschema zur Freigabe von Anlagenteilen

Freigabe von Gebäudestrukturen und Bodenflächen

Um die Gebäude einer kerntechnischen Anlage nach dem Abbau weiter nutzen oder abreißen zu können, müssen diese freigegeben werden. Die Oberflächen werden auf Kontamination hin überprüft (► Abb. 36). Die dabei angewendeten Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der Freigabewerte müssen von der zuständigen Behörde genehmigt werden.

Überschreitet die Aktivität einer Oberfläche die einzuhaltenden Freigabewerte, so folgen ein oder mehrere Dekontaminationsschritte. Die Freigabewerte für Gebäudestrukturen und Bodenflächen sind ebenfalls in der Strahlenschutzverordnung festgelegt.

Auch die Bodenflächen auf dem Gelände einer kerntechnischen Anlage werden bei einem Abbau der Anlage auf Kontamination hin überprüft und durch die zuständige Behörde freigegeben (z. B. ► Abb. 37).

8.2 Abklinglagerung

Bei radioaktiven Stoffen, deren Aktivität auch nach Dekontaminationsmaßnahmen meist aufgrund von Aktivierung noch oberhalb der Freigabewerte liegt, kann eine Abklinglagerung (► Abb. 38) in Betracht gezogen werden. Das Material wird bei diesem Verfahren so lange gelagert, bis die vorhandene Aktivität die Freigabewerte unterschreitet.

Dabei wird ausgenutzt, dass nach Ablauf einer spezifischen Zeitspanne (Halbwertszeit) die Hälfte aller Atomkerne eines Radionuklides zerfallen ist und sich damit auch die Aktivität halbiert. Nach dem Ablauf einer weiteren Halbwertszeit halbiert sich die Aktivität abermals usw.

Die Halbwertszeit ist spezifisch für jedes Radionuklid und kann sich bei unterschiedlichen Radionukliden um viele Größenordnungen unterscheiden. So liegt die Halbwertszeit von z. B. Kobalt-60 (Co-60) bei 5,3 Jahren, bei Cäsium-137 (Cs-137) bei 30 Jahren und bei Plutonium-239 (Pu-239) bei 24.000 Jahren. Radionuklide mit sehr viel kürzeren Halbwertszeiten (Tage bis hinunter zu Millisekunden) spielen bei der Abklinglagerung keine Rolle.



Abb. 37: Messung zur Freigabe von Außenflächen



Abb. 38: Abklinglagerung von Gießlingen

Bei Strukturen, die durch Neutronen aktiviert wurden (z. B. ► Abb. 39), sind die Radionuklide über das Volumen verteilt und lassen sich durch Dekontaminationsverfahren nicht beseitigen. Eine Abklinglagerung vor der Bearbeitung wird in diesem Fall genutzt, um die Strahlenexposition des Personals deutlich zu verringern. Insbesondere Großkomponenten wie Dampferzeuger oder Reaktordruckbehälter werden teilweise über mehrere Jahre oder Jahrzehnte zwischengelagert, bevor sie weiter zerlegt und bearbeitet werden. Viele solcher Großkomponenten lagern zurzeit im Zwischenlager Nord bei Greifswald (► Abb. 40).



Abb. 39: Messung der Dosisleistung



Abb. 40: Abklinglagerung von Großkomponenten im Zwischenlager Nord

Abb. 41: Konditionierung von Abfällen (Fasstrochnungsanlage)



8.3 Radioaktiver Abfall

Alles Material, das beim Abbau einer kerntechnischen Anlage anfällt und nicht freigegeben oder an andere kerntechnische Anlagen abgegeben werden kann, ist radioaktiver Abfall. Bezogen auf die Gesamtmasse des Kontrollbereichs einer Anlage, die bei einem Leistungsreaktor etwa 200.000 Mg beträgt, liegt das Massenaufkommen des radioaktiven Abfalls aus der Stilllegung im Bereich weniger Prozent. Dominante Nuklide bei Kernreaktoren sind relativ kurzlebige Beta/Gamma-Strahler wie Kobalt-60 und Cäsium-137. Bei Anlagen der Ver- und Entsorgung kommen langlebige Nuklide hinzu, die wegen ihrer Alpha-Aktivität besonders radiotoxisch sind.

Der größte Anteil der radioaktiven Abfälle stammt aus der Stilllegung von Kernkraftwerken und Anlagen der Ver- und Entsorgung. Deutlich geringere Mengen kommen aus der Stilllegung von Forschungsreaktoren und sonstigen kerntechnischen Forschungseinrichtungen.

Radioaktive Abfälle müssen über lange Zeit von der Biosphäre isoliert werden. Dies kann durch die Verbringung der radioaktiven Abfälle in ein Endlager erreicht werden. Bis in Deutschland ein Endlager zur Verfügung stehen wird, ist eine Konditionierung (z. B. in Form eines Fasses, ► Abb. 41) und Zwischenlagerung notwendig. Deswegen werden bei Leistungsreaktoren während der Stilllegung standortnahe Zwischenlager (► Abb. 42) eingerichtet, die alle radioaktiven Abfälle aus dem Abbau der Anlagen aufnehmen. Die abgebrannten Brennelemente von Leistungsreaktoren durften bis 2005 an Wiederaufarbeitungsanlagen abgegeben werden. Seitdem müssen sie in einem standortnahen Zwischenlager aufbewahrt werden. Die abschließende Freigabe des Standorts wird also nicht allein vom vollständigen Abbau der Anlage bestimmt, sondern auch davon, wann der Abfall aus dem Zwischenlager in ein Endlager überführt werden kann.

Abb. 42: Einlagerung eines Transportbehälters mit abgebrannten Brennelementen in das Zwischenlager Brunsbüttel



9 Die Kosten

Die Betreiber von Anlagen, in denen mit Kernbrennstoffen umgegangen wird, haben gemäß § 9a Absatz 1 Atomgesetz (neben anderen Entsorgungspflichten) u. a. dafür zu sorgen, dass anfallende radioaktive Reststoffe schadlos verwertet oder als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden (direkte Endlagerung). Diese Pflicht kann an einen vom Bund mit der Wahrnehmung der Zwischenlagerung beauftragten Dritten nach § 2 Absatz 1 Satz 1 des Entsorgungsübergangsgesetzes übergehen. Dahinter steht der Grundsatz, dass die Kosten der Stilllegung und Entsorgung letztlich von den Verursachern zu zahlen sind:

- für die kommerziell betriebenen Kernkraftwerke sind dies deren Betreiber bzw. die dahinterstehenden privaten Energieversorgungsunternehmen (EVU, s. a. ► Kapitel 9.1),
- für die Anlagen der Ver- und Entsorgung die jeweiligen Betreibergesellschaften und
- für kerntechnische Anlagen in der Forschung (Forschungsreaktoren, Einrichtungen in den Forschungszentren, an Universitäten usw.), für Prototypreaktoren und für die in der Stilllegung befindlichen Kernkraftwerke der ehemaligen DDR in Greifswald und Rheinsberg die öffentliche Hand.

9.1 Kosten für die kommerziell betriebenen Kernkraftwerke

Der Deutsche Bundestag hat das Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung verabschiedet, das am 16. Juni 2017 in Kraft getreten ist. Basierend auf den Empfehlungen der hierzu eingesetzten Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstieges (KFK) wird damit u. a. die Verantwortung für die Zwischen- und Endlagerung der radioaktiven Abfälle aus der Kernenergienutzung in die Hand des Staates gelegt. Zur Finanzierung haben die EVU finanzielle Mittel in Höhe von rd. 24,1 Milliarden Euro in einen öffentlich-rechtlichen Fonds eingezahlt. Die Handlungs- und Finanzierungsverantwortung für die Stilllegung, den Abbau und die fachgerechte Verpackung der radioaktiven Abfälle liegen weiterhin direkt bei den EVU.

9.2 Kosten für die öffentliche Hand

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (bzw. das vorher für Forschung zuständige Ressort) veranlasste in den vergangenen Jahrzehnten die Errichtung von Forschungs- und Prototypanlagen. Stilllegung und Abbau der in diesem Rahmen errichteten kerntechnischen Anlagen werden zum größten Teil aus öffentlichen Haushalten von Bund und Ländern finanziert.

Die Gesamtkosten für die öffentliche Hand werden etwa 10-15 Milliarden Euro betragen.

10 Internationales

Neben dem nationalen Gesetzes- und Regelwerk sind Vorschriften und Empfehlungen auf EU-Ebene zu beachten sowie diverse Empfehlungen und Veröffentlichungen internationaler Gremien, wie zum Beispiel der Internationalen Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency, IAEA) und der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP). Darüber hinaus sind die Verpflichtungen aus dem »Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle« zu erfüllen.

10.1 Übereinkommen zur nuklearen Entsorgung

Dem 1997 geschlossenen »Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle« sind bis 2016 über 70 Staaten beigetreten. Das Übereinkommen erstreckt sich auch auf die Stilllegung, den sicheren Einschluss und den Abbau von kerntechnischen Anlagen. Konferenzen der Vertragsstaaten auf denen überprüft wird, inwieweit die Zielsetzung des Gemeinsamen Übereinkommens erfüllt ist, finden in der Regel alle drei Jahre statt.

10.2 IAEA

Von der Internationalen Atomenergie-Organisation werden im Rahmen der »IAEA Safety Standard Series« Regeln veröffentlicht, die die Sicherheit bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen betreffen. Insgesamt werden hierzu umfangreiche Ausarbeitungs- und Abstimmungsprozesse unter Beteiligung der zuständigen atomrechtlichen Aufsichtsbehörden der IAEA-Mitgliedsstaaten durchgeführt.

Außerdem publiziert die IAEA im Rahmen ihrer Aktivitäten zum Erfahrungsaustausch zur Stilllegung eine Reihe von Dokumenten, die die umfangreichen weltweiten Erfahrungen bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen reflektieren. Diese Dokumente sind damit Teil des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik.

10.3 OECD/NEA

Die Nuclear Energy Agency (NEA) ist eine Institution innerhalb der internationalen Organisation für die wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) mit Sitz in Paris. Die NEA hat zum Ziel, eine friedliche, sichere, umweltschonende und wirtschaftliche Nutzung der Kernenergie zu fördern. Unter den 31 Mitgliedsländern (Stand 2016) aus Europa, Nordamerika und dem asiatisch-pazifischen Raum befindet sich auch Deutschland. Insgesamt werden in den Mitgliedsländern zusammen rund 85 % der globalen Kernenergie produziert. In der NEA werden zahlreiche Koordinations-, Informations-, Überprüfungs- und Forschungsaktivitäten u. a. zum Thema Stilllegung durchgeführt.

10.4 EU

Auf EU-Ebene sind aufgrund des EURATOM-Vertrags bei der Stilllegung von Kernreaktoren und Wiederaufarbeitungsanlagen umfangreiche Angaben zur Anlage und deren Umgebung, zur geplanten und nichtgeplanten Ableitung radioaktiver Stoffe, zur Beseitigung radioaktiver Abfälle aus der Anlage sowie zu Notfallplänen und zur Umgebungsüberwachung zu übermitteln. Diese Angaben sind möglichst ein Jahr, mindestens jedoch sechs Monate vor Erteilung einer Genehmigung zur Ableitung radioaktiver Stoffe, über das zuständige Bundesministerium mitzuteilen.

10.5 WENRA

Die Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA) ist eine unabhängige Organisation, die aus Vertretern der atomrechtlichen Aufsichtsbehörden der Länder Europas zusammengesetzt ist. Wesentliche Zielsetzungen sind die Entwicklung eines gemeinsamen Ansatzes für nukleare Sicherheit und behördliche Praxis, insbesondere innerhalb der EU zur Weiterentwicklung der nuklearen Sicherheit in nationaler Verantwortung sowie die Entwicklung eines Netzwerkes der obersten europäischen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden zur Förderung des Erfahrungsaustausches und zur Stärkung der Zusammenarbeit.

Zur Weiterentwicklung der nuklearen Sicherheit hat die Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD) der WENRA spezifische Anforderungskataloge an Stilllegung und Entsorgung mit so genannten Sicherheitsreferenzniveaus erstellt. Die WENRA-Mitglieder haben sich dazu verpflichtet, die jeweiligen Sicherheitsreferenzniveaus in den nationalen Regeln umzusetzen, soweit sie nicht bereits darin enthalten sind.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die in Deutschland und im Ausland gesammelten Erfahrungen mit dem vollständigen Abbau kerntechnischer Anlagen verschiedener Typen und Größen bis zur »Grünen Wiese« belegen, dass derartige Vorhaben mit heutigen verfügbaren Technologien sicher und in einem Zeitrahmen von etwa zehn bis zwanzig Jahren durchführbar sind. Diese Feststellung hat erhebliche Bedeutung für die zukünftigen Stilllegungsaufgaben in Deutschland: auch die Stilllegungen der noch in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke und anderen kerntechnischen Anlagen können sicher durchgeführt werden. Was zuletzt bleibt, ist der radioaktive Abfall, der durch den Abbau entstanden ist. Dieser muss sicher endgelagert werden.

Zukünftige Aufgaben in Deutschland aus Sicht der Stilllegung sind, die laufenden Stilllegungsprojekte abzuschließen und die noch in Betrieb befindlichen Anlagen nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer stillzulegen. Mit der Änderung des Atomgesetzes von Juli 2011 werden die verbliebenen Anlagen schrittweise bis 2022 endgültig abgeschaltet, so dass in den nächsten Jahren weitere Kernkraftwerksblöcke stillgelegt werden. Eine Liste mit den Anlagen, die sich momentan in der Stilllegung befinden, enthält der

► Anhang (Kapitel 12.1).

12 Anhang

12.1 Liste zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Deutschland

Im August 2017 befanden sich in Deutschland 21 Leistungs- und Prototypreaktoren in unterschiedlichen Phasen der Stilllegung. Darüber hinaus wurden das Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN), der Heißdampfreaktor Großwelzheim (HDR) und das Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK) bereits vollständig abgebaut. In den Anlagen in Würgassen (KWW), Gundremmingen-A (KRB-A) und am Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR) bei Karlsruhe ist der nukleare Abbau weitgehend oder vollständig abgeschlossen.

In 2011 wurden acht Leistungsreaktoren endgültig abgeschaltet, 2015 folgte das Kernkraftwerk Grafenrheinfeld (KKG). Für diese neun abgeschalteten Kernkraftwerke wurden Anträge auf Stilllegung und Abbau gestellt. Von diesen Anlagen haben das Kernkraftwerk Isar-1 (KKI 1) am 17. Januar 2017, das Kernkraftwerk Neckarwestheim I (GKN-I) am 3. Februar 2017, die Kernkraftwerke Biblis-A (KWB A) und Biblis-B (KWB B) am 30. März 2017 sowie das Kernkraftwerk Philippsburg-1 (KKP 1) am 7. April 2017 die Genehmigung zu Stilllegung und Abbau erhalten. Es ist vorgesehen, die verbliebenen acht Leistungsreaktoren bis Ende 2022 endgültig abzuschalten.

29 Forschungsreaktoren und neun Anlagen der Ver- und Entsorgung wurden bereits abgebaut bzw. aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen.

Kernkraftwerke (Leistungs- und Prototypreaktoren)	<i>Kürzel</i>	<i>Stand: April 2017</i>
Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich	AVR	Stilllegung seit 1994
Kernkraftwerk Biblis-A	KWB A	Stilllegung seit 2017
Kernkraftwerk Biblis-B	KWB B	Stilllegung seit 2017
Kernkraftwerk Brokdorf	KBR	Abschaltung vorgesehen 2021
Kernkraftwerk Brunsbüttel	KKB	Stilllegung beantragt 2012
Kernkraftwerk Emsland	KKE	Abschaltung vorgesehen 2022, Stilllegung beantragt 2016
Kernkraftwerk Grafenrheinfeld	KKG	Stilllegung beantragt 2014
Kernkraftwerk Greifswald-1-5	KGR 1-5	Stilllegung seit 1995
Kernkraftwerk Grohnde	KWG	Abschaltung vorgesehen 2021
Kernkraftwerk Gundremmingen-A	KRB-A	Stilllegung seit 1983
Kernkraftwerk Gundremmingen-B	KRB-II-B	Abschaltung vorgesehen 2017, Stilllegung beantragt 2014
Kernkraftwerk Gundremmingen-C	KRB-II-C	Abschaltung vorgesehen 2021
Kernkraftwerk Isar-1	KKI 1	Stilllegung seit 2017
Kernkraftwerk Isar-2	KKI 2	Abschaltung vorgesehen 2022
Kernkraftwerk Krümmel	KKK	Stilllegung beantragt 2015
Kernkraftwerk Lingen	KWL	Sicherer Einschluss seit 1988, Abbau seit 2015
Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich	KMK	Stilllegung seit 2004
Kernkraftwerk Neckarwestheim I	GKN-I	Stilllegung seit 2017
Kernkraftwerk Neckarwestheim-II	GKN II	Abschaltung vorgesehen 2022, Stilllegung beantragt 2016
Kernkraftwerk Obrigheim	KWO	Stilllegung seit 2008
Kernkraftwerk Philippsburg-1	KKP 1	Stilllegung seit 2017
Kernkraftwerk Philippsburg-2	KKP 2	Abschaltung vorgesehen 2019, Stilllegung beantragt 2016
Kernkraftwerk Rheinsberg	KKR	Stilllegung seit 1995
Kernkraftwerk Stade	KKS	Stilllegung seit 2005
Kernkraftwerk Unterweser	KKU	Stilllegung beantragt 2012
Kernkraftwerk Würgassen	KWW	Stilllegung seit 1997
Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage	KNK II	Stilllegung seit 1993
Mehrzweck-Forschungsreaktor	MZFR	Stilllegung seit 1987
Thorium-Hochtemperaturreaktor	THTR-300	Sicherer Einschluss seit 1997

Forschungsreaktoren	<i>Kürzel</i>	<i>Stand: März 2017</i>
Berliner Experimentier-Reaktor II	BER-II	Abschaltung vorgesehen 2019
Forschungsreaktor-2 Karlsruhe	FR-2	Sicherer Einschluss seit 1996
Forschungsreaktor Geesthacht-1	FRG-1	Stilllegung beantragt 2013
Forschungsreaktor Geesthacht-2	FRG-2	Stilllegung beantragt 2013 ¹
Forschungsreaktor Jülich 2	FRJ-2	Stilllegung seit 2012
Forschungsreaktor München	FRM	Stilllegung seit 2014
Forschungsreaktor Neuherberg	FRN	Sicherer Einschluss seit 1984
Rossendorfer Forschungsreaktor	RFR	Stilllegung seit 1998
Siemens-Unterrichtsreaktor Aachen	SUR-AA	Stilllegung beantragt 2010
Siemens-Unterrichtsreaktor Hannover	SUR-H	Stilllegung beantragt 2013
Forschungs- und Messreaktor Braunschweig	FMRB	Stilllegung seit 2001, Anlage bis auf Zwischenlager aus dem AtG entlassen

Anlagen der Ver- und Entsorgung	<i>Kürzel</i>	<i>Stand: Februar 2017</i>
Siemens Power Generation Karlstein	SPGK	Stilllegung seit 1993
Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe mit Verglasungsreinrichtung (VEK)	WAK	Stilllegung seit 1993

¹FRG-2 ist außer Betrieb und teilabgebaut. Da es sich um eine gemeinsame Anlage mit FRG-1 handelt, ist formal nur eine gemeinsame Stilllegung möglich.

12.2 Kurzbeschreibung ausgewählter Stilllegungsprojekte

Versuchsatomkraftwerk Kahl

Das Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK) war das erste Kernkraftwerk in Deutschland. Obwohl es sich um eine Versuchsanlage handelte, wurde es schon kommerziell bestellt, errichtet und betrieben. Es verfügte über einen Siedewasserreaktor mit einer Leistung von lediglich 16 MWe (Megawatt elektrisch; zum Vergleich: das 1974 in Betrieb genommene Kernkraftwerk Biblis wies bereits mehr als 1200 MWe auf). 1985 wurde die Anlage nach 25 Betriebsjahren endgültig abgeschaltet, nachdem sie ihre wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Aufgaben erfüllt hatte. Die Stilllegung wurde im Jahr 1988 begonnen und 2010 abgeschlossen. Bei dieser Anlage wurde der sofortige Abbau ohne vorherigen sicheren Einschluss verwirklicht (► Kapitel 3 Stilllegungsstrategien).

Kernkraftwerk Greifswald

Für den Kernkraftwerksstandort Greifswald (KGR) an der Ostsee waren acht Kernkraftwerksblöcke mit Druckwasserreaktoren sowjetischer Bauart mit einer elektrischen Leistung von je 440 MWe vorgesehen. 1989 befanden sich die Blöcke 1 bis 4 im Betrieb (Inbetriebnahme zwischen 1974 und 1979) und Block 5 in der Inbetriebnahme, während die Blöcke 6 bis 8 noch im Bau waren. Die einzelnen Blöcke des Kernkraftwerks wurden Ende 1989 bzw. im Verlauf des Jahres 1990 endgültig abgeschaltet. Um die Kernreaktoren nach bundesdeutschem Atomrecht zu betreiben, wären umfangreiche Nachrüstmaßnahmen notwendig geworden.

Die erste Stilllegungsgenehmigung wurde 1995 erteilt. Das Stilllegungskonzept sieht vor, dass die Gesamtanlage abgebaut und grundsätzlich aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen wird. Der Umfang der Abbauarbeiten (u. a. ► Abb. 43) und die dabei entstehende Menge an Abfällen und Reststoffen machen die Stilllegung des Kernkraftwerks Greifswald zum weltweit größten Projekt seiner Art. Die Dampferzeuger und die Reaktordruckbehälter befinden sich im sogenannten Zwischenlager Nord zur Abklinglagerung (► Abb. 40, S. 28).

Abb. 43: Maschinenhaus des Kernkraftwerks Greifswald nach der Entfernung der Generatoren



Kernkraftwerk Niederaichbach

Das Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN) war von 1972 bis 1974 in Betrieb. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen wurde es 1974 endgültig abgeschaltet. Bemerkenswert beim Abbau des KKN war der Einsatz eines Manipulators, der beim Abbau des Reaktordruckbehälters und dessen Einbauten eingesetzt wurde. Das komplexe, für das KKN maßgeschneiderte System konnte diverse Werkzeuge tragen, wies einen hohen Automatisierungsgrad auf und war sehr flexibel einsetzbar. Die Erfahrung lehrte jedoch, dass oft einfacheren, robusten Manipulatorsystemen der Vorzug zu geben ist.

Kernkraftwerk Obrigheim

Das Kernkraftwerk Obrigheim (KWO) war das erste, welches im Rahmen des sogenannten Atomkonsenses aus dem Jahre 2000 endgültig abgeschaltet wurde. Die endgültige Abschaltung nach über 36 Jahren Leistungsbetrieb erfolgte 2005. Eine Systemdekontamination im Jahr 2007 senkte das Strahlenniveau durchschnittlich um den Faktor 600, so dass die beim Abbau Beschäftigten weniger exponiert werden. Nach Erteilung der ersten Stilllegungs- und Abbaugenehmigung wurde 2008 mit dem Abbau begonnen. Die vierte und letzte Stilllegungsgenehmigung wurde 2015 beantragt, so dass nach deren Erteilung sämtliche Systeme und Anlagenteile in den Genehmigungen erfasst sind und die Anlage vollständig abgebaut werden kann. Bis 2023 soll der Abbau abgeschlossen sein.

Abb. 44: Leitstand zur fernbedienten Zerlegung im Kernkraftwerk Obrigheim



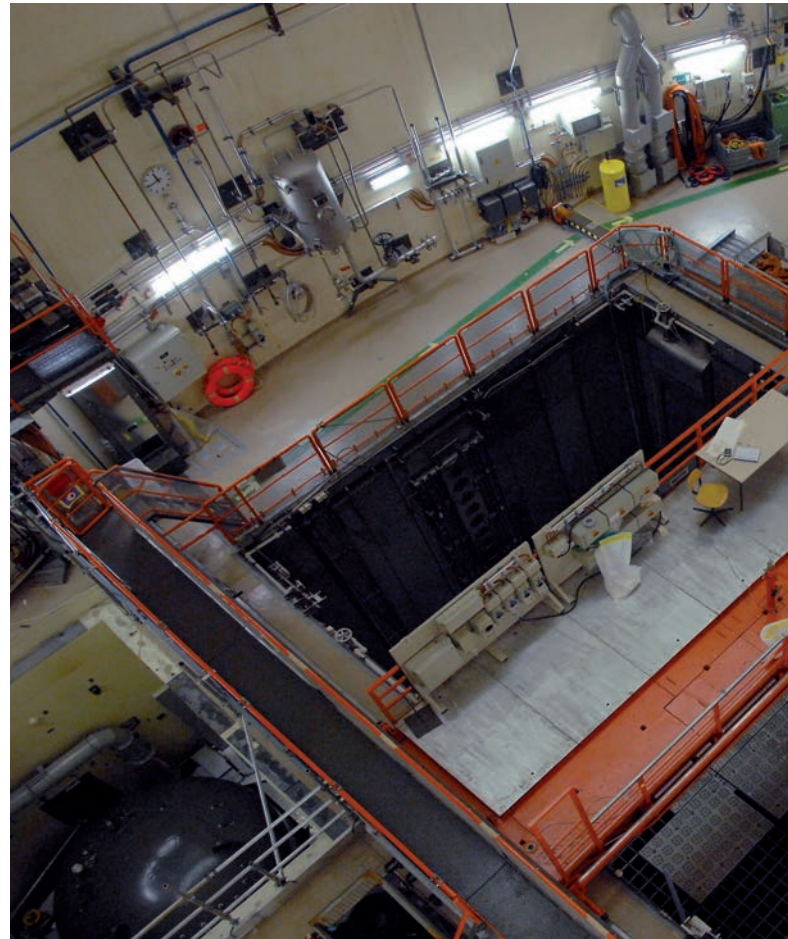
Kernkraftwerk Stade

Beim Kernkraftwerk Stade (KKS) handelt es sich um den ersten rein kommerziellen Druckwasserreaktor der Bundesrepublik Deutschland. Nach 31-jähriger Betriebszeit wurde das Kraftwerk im November 2003 aus wirtschaftlichen Gründen endgültig abgeschaltet. Die Anlage wurde bis zur Erteilung der Stilllegungsgenehmigung im September 2005 in einer sich dem Leistungsbetrieb anschließenden Nachbetriebsphase betrieben und befindet sich seither im Abbau. Die Dampferzeuger des Kernkraftwerks Stade wurden zum Einschmelzen als Ganzes nach Schweden transportiert. Die aufgrund ihrer Radioaktivität nicht wieder verwendbaren Anteile (d. h. die Schlacke und ein Anteil der erzeugten Gießlinge) werden als radioaktiver Abfall zurück nach Deutschland transportiert.

Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich

wurde in der Zeit zwischen 1975 und 1986 als Zweikreis-Druckwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1302 MWe errichtet und befindet sich etwa 10 Kilometer nordwestlich der Stadt Koblenz. Im August 1987 wurde der kommerzielle Betrieb der Anlage aufgenommen. Bereits nach einem Jahr Betriebszeit wurde die Anlage aus rechtlichen Gründen außer Betrieb genommen. Nach einem sich anschließenden langjährigen Rechtsstreit wurde im Rahmen des so genannten Atomkonsenses aus dem Jahre 2000 beschlossen, das Kernkraftwerk stillzulegen. Die Stilllegungsgenehmigung für die erste Abbauphase wurde 2004 erteilt, und seitdem wird die Anlage abgebaut. Die Brennelemente wurden bereits 2002 im Rahmen der Nachbetriebsphase aus der Anlage abtransportiert. Die Aktivierung von kernnahen Strukturen und damit auch das radioaktive Inventar fallen aufgrund der kurzen Betriebszeit geringer aus als bei vergleichbaren Anlagen. Hinzu kommt, dass sich das Aktivitätsinventar aufgrund der langen Stillstandzeit durch den radioaktiven Zerfallsprozess weiter reduziert hat.

Abb. 46: Das leere Brennelementbecken des Kernkraftwerks Mülheim-Kärlich



Kernkraftwerk Biblis Blöcke A und B

Das Kernkraftwerk Biblis Block A (KWB A) begann 1975 mit dem Leistungsbetrieb, Block B (KWB B) folgte 1977. Das Kraftwerk erreichte eine elektrische Leistung von 1225 MW (brutto). Beide Blöcke teilen sich am Standort diverse Nebengebäude. Die Anlagen verloren mit der 13. Novelle des Atomgesetzes vom 06.08.2011 im Nachgang zu den Ereignissen in Fukushima die Berechtigung zum Leistungsbetrieb. Im August 2012 wurde für beide Blöcke ein Antrag auf Genehmigung von Stilllegung und Abbau gestellt. Bis zur Erteilung der 1. Stilllegungs- und Abbaugenehmigung am 30.03.2017 befanden sich die Blöcke in der sogenannten Nachbetriebsphase. In dieser Phase wurden mit Blick auf den späteren Abbau bereits Tätigkeiten wie etwa eine Primärkreisdekontamination durchgeführt, die durch die Betriebsgenehmigung abgedeckt waren. KWB A ist seit Ende 2016 frei von Kernbrennstoff. Die Herstellung der Brennstofffreiheit von KWB B soll Ende 2017 erreicht werden. Die jeweils ersten Stilllegungs- und Abbaugenehmigungen umfassen u. a. den Abbau der Reaktordruckbehältereinbauten, den Abbau nicht mehr benötigter Systeme und Einrichtungen sowie einer Vielzahl von Bauteilen (z. B. Dampferzeuger, Primärkühlmittelpumpen, etc.). Im weiteren Verlauf des Abbaus soll je Block noch mindestens eine weitere Genehmigung beantragt werden, die dann den Abbau des Reaktordruckbehälters, des Bioschildes und weiterer Einrichtungen umfasst.

Thorium-Hochtemperaturreaktor

Der Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR-300) war ein gasgekühlter Hochtemperaturreaktor mit einer Leistung von 300 MWe in Hamm-Uentrop. Er ging erstmals im Herbst 1983 in Betrieb und wurde 1988 endgültig abgeschaltet. Der THTR-300 ist der einzige Leistungsreaktor, der sich gegenwärtig im sicheren Einschluss befindet. Da sich die Anlage auf dem Gebiet eines größeren Kraftwerksgeländes befindet, das ohnehin überwacht werden muss, ist der Aufwand für die Aufrechterhaltung des sicheren Einschlusses des THTR-300 vergleichsweise klein.



Kernkraftwerk Würzgassen

Als erste große kommerzielle Siedewasserreaktoranlage der Bundesrepublik Deutschland mit einer elektrischen Bruttoleistung von 670 MWe speiste das Kernkraftwerk Würzgassen (KWW) nach knapp vier Jahren Bauzeit am 18.12.1971 erstmalig Strom ins öffentliche Netz. Es handelte sich um eine Modellanlage eines Siedewasserreaktors mit direkter Dampfeinspeisung vom Reaktor in die Turbine, wie sie später in Deutschland in abgewandelter Form mehrfach realisiert wurde. Nach Rissbefunden am Kernmantel und an den Kerngittern, die eine Grundsanierung der Kerneinbauten zur Folge gehabt hätte, erfolgte am 29.05.1995 der Stilllegungsbeschluss aus wirtschaftlichen Gründen. Die Tätigkeiten zum Rückbau der Anlage im Reaktor-gebäude, Maschinenhaus und den angrenzenden Bauteilen im Kontrollbereich konnten 2014 abgeschlossen werden. Nach aktueller Planung sollen das Reaktorgebäude und das Maschinenhaus erst nach Räumung der Zwischenlager abgerissen werden.

AVR-Versuchskernkraftwerk Jülich

Mit dem gasgeköhlten Hochtemperaturreaktor, der 1967 erstmals Strom in das öffentliche Netz einspeiste, wurde weltweit erstmalig das Konzept eines Kugelhaufenreaktors umgesetzt. Während des 21-jährigen Leistungsbe-triebes wurden zahlreiche Forschungsziele zu der neuen Reaktortechnik erreicht. Ende 1988 wurde das Versuchskernkraftwerk abgeschaltet und ging zunächst in den sicheren Einschluss, bevor 2009 die Genehmigung zum Abbau der Anlage erteilt wurde. Ein Meilenstein des Abbaus stellte das Ausheben und Abtransportieren des Reaktorbehälters in einem Stück dar. Hierfür wurde eine Materialschleuse mit Krananlage an das Reaktorgebäude gebaut, sodass es so weit entfernt werden konnte, bis das Ausheben des Reaktorbehälters möglich war. Der Behälter wurde mit Porenleichtbeton verfüllt, um radioaktive Stoffe im Inneren zu binden und die Strukturen des Behälters zu stabilisieren. Der 2.000 t schwere Reaktorbehälter wurde nach dem Ausheben aus dem Gebäude in der Materialschleuse in die Horizontale gedreht, um ihn so im Mai 2015 in das eigens hierfür errichtete Zwischenlager auf dem Gelände des Forschungszentrums Jülich zu transportieren. Es ist vorgesehen, den Behälter nach etwa 60 Jahren zu zerlegen, wenn die Radioaktivität im Inneren deutlich abgeklungen ist. In der Zwischenzeit können die verbliebenen Komponenten und das Reaktorgebäude vollständig entfernt werden.

Abb. 47: Transport des AVR-Reaktorbehälters zum Zwischenlager



Forschungsreaktor 2

Der Forschungsreaktor 2 (FR 2) markiert den Beginn des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Die Anlage hatte eine thermische Leistung von 50 MWth und diente als Neutronenquelle für vielfältige physikalische Experimente. Der Kernreaktor genügte aber Anfang der 1980er Jahre den Ansprüchen der Forscher nicht mehr und wurde daher 1981 außer Betrieb genommen. 1982 bis 1986 wurden die Brennelemente und das Kühlmittel entfernt und die Versuchskreisläufe abgebaut. 1993 begannen die weiteren Abbau- und Dekontaminationsmaßnahmen. Am 20.11.1996 endete die Stilllegung des FR 2 vorläufig damit, dass der sichere Einschluss des Reaktorblocks erreicht war (► Kapitel 3 Stilllegungsstrategien). Mit Ausnahme des Reaktorblocks sind alle radioaktiven Komponenten aus der Anlage entfernt. Neben- und Hilfsanlagen und nicht mehr sinnvoll nutzbare Gebäude sind abgebaut. Der freigewordene Baugrund ist rekultiviert. Das Reaktorgebäude ist bis auf den Bereich des eingeschlossenen Reaktorkerns frei zugänglich und beherbergt heute eine für die Öffentlichkeit zugängliche Ausstellung zur Entwicklung der Kernenergie und zur kerntechnischen Forschung.

Forschungsreaktor TRIGA Heidelberg (TRIGA HD I und TRIGA HD II)

Der Forschungsreaktor TRIGA HD I befand sich am Standort des Deutschen Krebsforschungszentrums (DKFZ) in Heidelberg und wurde vom Institut für Nuklearmedizin betrieben. Er diente primär der Erzeugung kurzlebiger Radionuklide für medizinische Zwecke sowie weiterer Analysen im Rahmen der Krebsforschung. Der Reaktor ging im August 1966 in Betrieb und wurde aufgrund des Neubaus eines zweiten Forschungsreaktors (TRIGA HD II) im März 1977 abgeschaltet. Der neuere Forschungsreaktor gleicher Bauart, TRIGA HD II, nahm im Folgejahr seinen Betrieb auf und wurde nach 21-jähriger Betriebsdauer im November 1999 abgeschaltet, da er aufgrund neuer Forschungsschwerpunkte nicht mehr benötigt wurde. Die Anlage TRIGA HD I befand sich in der Zeit zwischen 1980 und 2006 in einer Phase des sicheren Einschlusses (► Stilllegungsstrategien) und wurde 2006 vollständig abgebaut. Bei TRIGA HD II wurde der direkte Abbau im Jahre 2005 abgeschlossen.



Forschungsreaktor Frankfurt

Der Forschungsreaktor Frankfurt (FRF-1) wurde 1957 von der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt, in Betrieb genommen. Der Kernbrennstoff war eine wässrige Uranylsulfatlösung. Aufgrund technischer Probleme wurde der Reaktor 1968 abgeschaltet. Der neue FRF-2, ein TRIGA-Reaktor, wurde 1973–1977 eingebaut, ging jedoch nie in Betrieb. Die Stilllegung wurde 1980 verfügt. Die Genehmigung für den Abbau der Anlage wurde Ende 2004 erteilt. Die Abbauarbeiten liefen von März 2005 bis August 2006. Die Anlage wurde mit Bescheid vom 31.10.2006 aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen. Der Reaktorblock aus Schwerstbeton wurde mittels eines Hydraulikmeißels in Form eines Tunnels ausgearbeitet, der Graphit im Innern des Blockes manuell mit Stangenwerkzeugen gezogen und alle anderen Anbauteile mit dem Kran ausgehoben. Nach dem Ausbohren der Strahlrohre durch Kernbohrungen konnte die aktivierte Struktur von innen heraus demontiert werden. Dies erfolgte durch Erweitern des Tunnels mit einer kombinierten Vorgehensweise von Betonbohrgerät und Seilsäge. Anschließend erfolgte die Demontage der sonstigen Systeme. Die radioaktiven Abfälle werden bei der Landessammelstelle Hessen abgegeben und die Freimessung von Reststoffen erfolgt im VKTA, Rossendorf.

13 Glossar

Aktivierung

Prozess, bei dem durch Bestrahlung beispielsweise mit Neutronen aus einem laufenden Kernreaktor manche Stoffe selbst radioaktiv werden. Die entstandenen Radionuklide verteilen sich über das Volumen des Materials und sind daher praktisch nicht entfernbar.

Aktivität

Anzahl der zerfallenden Atomkerne pro Zeiteinheit für eine radioaktive Substanz (► Becquerel).

Alphastrahlung

Teilchenstrahlung, die aus Helium-Atomkernen besteht. Diese tritt bei einem bestimmten radioaktiven Zerfall (Alphazerfall) auf. Alphastrahler sind bei einer Bestrahlung von außen für den Menschen relativ ungefährlich, bei einer Aufnahme in den Körper (z. B. mit der Atemluft) haben sie aber eine höhere Radiotoxizität als Beta- oder Gammastrahler.

Anlagen der Ver- und Entsorgung

Anlagen, die der Versorgung und Entsorgung radioaktiver Stoffe dienen, wie z. B. Herstellung und Wiederaufarbeitung von Brennelementen oder die Konditionierung von Abfällen.

Anreicherung

Vorgang, bei dem der Anteil des Nuklids Uran-235 am Kernbrennstoff gegenüber dem natürlichen Gehalt erhöht wird. Dies ist nötig, um den Kernbrennstoff in Leichtwasserreaktoren zu nutzen.

Atomgesetz

Gesetzliche Grundlage für die Nutzung der Kernenergie und die Stilllegung in Deutschland, auf dem u. a. die Strahlenschutzverordnung beruht.

Aufsichtsverfahren

Überwachung der Einhaltung aller Vorschriften des Atomgesetzes, der zugehörigen Rechtsverordnungen und der Bestimmungen der Genehmigungsbescheide bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung kerntechnischer Anlagen durch die atomrechtliche Behörde.

Becquerel (Bq)

Maßeinheit für die Aktivität einer radioaktiven Substanz. 1 Bq (Becquerel) entspricht 1 Zerfall pro Sekunde.

Betastrahlung

Teilchenstrahlung, die aus Elektronen (bzw. deren Antiteilchen, den Positronen) besteht. Diese tritt bei einem bestimmten radioaktiven Zerfall (Betazerfall) auf.

Biologischer Schild

Dickwandige Betonstruktur (ca. 2 m), die den Reaktordruckbehälter umgibt und Neutronenstrahlung und Gammastrahlung reduziert.

BMUB

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Brennelement

Bestandteil des Kernreaktors, das den Kernbrennstoff enthält.

Brennstoff

► Kernbrennstoff

Dampferzeuger

Komponente zur Erzeugung von Wasserdampf, die in einem Druckwasserreaktor genutzt wird, um die Wärme aus dem Reaktorkern (Primärkreis) an den Sekundärkreis abzugeben, der die Generatorturbine speist.

Dekontamination

Vollständige bzw. teilweise Entfernung einer Kontamination, z. B. durch Abspülen, Einsatz von chemischen Lösungsmitteln oder Abschleifen.

DIN

Deutsches Institut für Normung e. V.

Direkter Abbau

Stilllegungsstrategie, bei der eine kerntechnische Anlage ohne vorherigen sicheren Einschluss unmittelbar im Anschluss an die Nachbetriebsphase abgebaut wird.

Dosimeter

Messinstrument, das die Dosis (Strahlenbelastung) messen kann. Je nach Messaufgabe besitzen Dosimeter verschiedene Eigenschaften und Funktionen.

Dosis

Die beim Zerfall radioaktiver Stoffe ausgesendete Strahlung ruft bei ihrer Absorption in Material oder Gewebe eine bestimmte Wirkung hervor, deren Maß als Dosis bezeichnet wird. Die Dosis wird in Sievert (Sv) gemessen.

Dosisgrenzwerte

Obergrenzen für Dosen, die in der Strahlenschutzverordnung festgelegt sind. Für strahlenschutzüberwachtes Personal (Personen, die in kerntechnischen Anlagen einer erhöhten Strahlenexposition ausgesetzt sind) liegt der Grenzwert bei 20 mSv pro Jahr.

DWR

Druckwasserreaktor (wassergekühlt)

Endlager

Lager für radioaktive Abfälle oder abgebrannte Brennelemente, die tief unter der Erdoberfläche eingerichtet werden sollen. Ziel ist eine für sehr lange Zeiträume zuverlässige Isolierung von der Biosphäre.

ESK

Entsorgungskommission, ein Gremium unabhängiger Experten, das das Bundesumweltministerium zu Fragen der Entsorgung radioaktiver Stoffe berät.

Forschungsreaktoren

Kernreaktoren in Forschungszentren, Universitäten, Kliniken oder in der Industrie. Sie dienen zu Zwecken in der Forschung, der Medizin oder im industriellen Bereich. Mit Forschungsreaktoren wird im Unterschied zu Leistungsreaktoren kein Strom erzeugt.

Freigabe

Verwaltungsakt, der die Entlassung radioaktiver Stoffe sowie bewegliche Gegenstände, von Gebäuden, Bodenflächen, Anlagen oder Anlagenteilen, die aktiviert oder mit radioaktiven Stoffen kontaminiert sind, und die aus Tätigkeiten stammen, aus dem Regelungsbereich des Atomgesetzes und darauf beruhender Rechtsverordnungen sowie verwaltungsbehördlicher Entscheidungen zur Verwendung, Verwertung, Beseitigung, Innehabung oder zu deren Weitergabe an Dritte als nicht radioaktive Stoffe bewirkt.

Gammastrahlung

Elektromagnetische Strahlung, die bei bestimmten radioaktiven Zerfällen auftritt. Gammastrahlung hat eine vergleichbar große Reichweite und ist daher die Hauptgefahrenquelle bei einer äußeren Bestrahlung, während bei einer Aufnahme in den Körper (z. B. durch Einatmen) Alphastrahlung schädlicher ist.

Genehmigungsverfahren

Verfahren zur Erteilung einer Genehmigung oder Teilgenehmigung gemäß der Atomrechtlichen Verfahrensordnung (AtVfV).

Halbwertszeit

Zeitspanne, in der die Hälfte eines Radionuklids zerfallen ist. Die Halbwertszeit ist spezifisch für jedes Radionuklid.

Kernbrennstoff

Spaltbares Material, dessen Energieinhalt in einem Kernkraftwerk in elektrische Energie umgesetzt wird.

Kernbrennstoffkreislauf

Bezeichnung aller Arbeitsschritte und Prozesse, die der Versorgung und Entsorgung radioaktiver Stoffe dienen.

Kernkraftwerk

Wärmekraftwerk zur Gewinnung elektrischer Energie mit einem Kernreaktor.

Kernenergie

Technologie zur großtechnischen Umwandlung von Energie aus der Kernspaltung in elektrischen Strom.

Kernreaktor

Anlage, bei der eine kontrollierte Kernspaltung in einer Kettenreaktion kontinuierlich abläuft.

Kernspaltung

Prozess, bei dem ein Atomkern durch Neutronen unter Freisetzung von Energie in mehrere Einzelteile zerlegt wird.

Kerntechnische Anlage

Sammelbegriff für Kernkraftwerke, Forschungsreaktoren und Anlagen der Ver- und Entsorgung.

Kettenreaktion

Vorgang, bei dem die während der Spaltung von Atomkernen entstandenen Neutronen ihrerseits weitere Atomkerne spalten.

Konditionierung

Endlagerechte Aufbereitung und Verpackung radioaktiver Abfälle und abgebrannter Brennelemente.

Kontamination

Hier: Anhaftung radioaktiver Stoffe

Kontrollbereich

Räumlich abgetrennter Bereich des Strahlenschutzes, in dem Personen einer jährlichen Dosis von mehr als 6 mSv ausgesetzt werden können. Der Kontrollbereich darf nur zur Durchführung bestimmter Arbeiten betreten werden. Der Kontrollbereich ist in der Regel von einem Überwachungsbereich umschlossen.

Konversion

Umwandlung der Zwischenprodukte des Uranerzes in einen für die Anreicherung notwendigen Zustand.

Kritikalität / kritisch

Man spricht davon, dass ein Kernreaktor kritisch ist, wenn genauso viele Neutronen bei der Kernspaltung entstehen, wie für die weitere Aufrechterhaltung der Kettenreaktion nötig ist. Als Kritikalität wird demnach der normale Betriebszustand eines Kernreaktors bezeichnet.

KTA-Regeln

Sicherheitstechnische Regeln für die Errichtung und den Betrieb kerntechnischer Anlagen. Diese werden vom Kerntechnischen Ausschuss (KTA) erstellt, einem Gremium unabhängiger Experten.

Kühlmittel

Medium in Kernreaktoren (bei Leichtwasserreaktoren Wasser), das die Wärme, die bei der Kettenreaktion entsteht, aus dem Reaktorkern abführt. Dieser Wärmeinhalt wird dann zur Stromerzeugung genutzt.

Leichtwasserreaktor

Sammelbezeichnung für Druckwasser- und Siedewasserreaktoren.

Leistungsreaktor

Kernreaktor, der ausschließlich der Stromerzeugung dient. Im Vergleich zu Forschungsreaktoren haben Leistungsreaktoren eine deutlich höhere Leistung.

MW

Megawatt, Maß für die Leistung von Kernreaktoren. Bei Kernkraftwerken wird die elektrische Leistung (MWe, Megawatt elektrisch) angegeben, bei Kernreaktoren ohne Stromerzeugung die thermische Leistung (MWth, Megawatt thermisch).

Nachbetrieb

Übergangsphase zwischen der endgültigen Abschaltung eines Kernkraftwerkes und der Erteilung und Inanspruchnahme der Stilllegungsgenehmigung. Die vorbereitenden Arbeiten zum Abbau müssen von der noch geltenden Betriebsgenehmigung abgedeckt sein.

Neutron

Elektrisch neutrales Teilchen, das Teil eines Atomkerns ist und bei der Kernspaltung frei wird. Neutronen werden zur Spaltung von Atomkernen in einem Kernreaktor benötigt.

Prototypreaktor

Kernreaktor, mit dem eine bestimmte Bauweise erstmalig realisiert wurde. Prototypreaktoren sind kleiner als typische Leistungsreaktoren.

Radioaktiver Stoff

Stoff, der mindestens ein Radionuklid enthält und dessen Aktivität im Sinne des Atomgesetzes nicht außer Acht gelassen werden kann.

Radionuklid

Bestimmtes Nuklid (Atomsorte), das spontan ohne äußere Einwirkung unter Strahlungsemission zerfällt.

Radiotoxizität / radiotoxisch

Schädliche Wirkung eines Stoffes aufgrund seiner Radioaktivität.

Reaktordruckbehälter

Dickwandiger Metallkörper (ca. 20 cm), der den Reaktorkern und sonstige kernnahe Einbauten sicher umschließt.

Reaktorkern

Teil eines Kernreaktors, der den Kernbrennstoff enthält und in dem die kontrollierte Kettenreaktion abläuft.

RSK

Reaktor-Sicherheitskommission, ein Gremium unabhängiger Experten, das das Bundesumweltministerium zu Fragen der Reaktorsicherheit berät.

Sicherer Einschluss

Stilllegungsstrategie, bei der eine kerntechnische Anlage vor dem Abbau eine gewisse Zeit (typischerweise 30 Jahre) sicher eingeschlossen wird, um eine geringere Strahlenbelastung des Abbaupersonals zu erreichen.

Sicherheitsbehälter

Dickwandiger (einige cm), meist kugelförmiger Metallkörper mit mehreren 10 m Durchmesser, der als zusätzliche technische Barriere das Austreten radioaktiver Stoffe verhindert.

Sperrbereich

Räumlich abgetrennter Bereich des Strahlenschutzes, in dem Personen eine Dosis von 3 mSv innerhalb einer Stunde erhalten können. Ein Betreten ist nur unter bestimmten Umständen für kurze Zeit zulässig.

Sv

Sievert, Maßeinheit für die Strahlendosis (1 Sv = 1000 mSv). Die natürliche Strahlenexposition für Menschen in Deutschland liegt im Bereich von 1 bis 6 mSv pro Jahr bei einem Mittelwert von 2,4 mSv pro Jahr.

SSK

Strahlenschutzkommission, ein Gremium unabhängiger Experten, das das Bundesumweltministerium zu Fragen des Strahlenschutzes berät.

Stilllegung

Alle Maßnahmen, die nach Erteilung der Stilllegungsgenehmigung für eine kerntechnische Anlage durchgeführt werden, bis eine behördliche, d. h. atomrechtliche Überwachung nicht mehr nötig ist.

Strahlenschutz

Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädigenden Wirkung ionisierender Strahlung, die u. a. von radioaktiven Stoffen ausgeht.

Strahlenschutzverordnung

Gesetzliche Verordnung, die zum Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung Grundsätze und Anforderungen für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen regelt.

SWR

Siedewasserreaktor (wassergekühlt).

Überwachungsbereich

Räumlich abgetrennter Bereich des Strahlenschutzes, in dem Personen einer jährlichen Dosis von mehr als 1 mSv ausgesetzt werden können. Oft ist das gesamte Betriebsgelände eines Kraftwerks als Überwachungsbereich ausgezeichnet.

Urananreicherung

► Anreicherung

Uranerzbergbau und Uranerzaufbereitung

Zunächst muss Uranerz in Bergwerken (wie anderes Metallerz auch) gewonnen werden. Das Uran wird über Zwischenschritte in den Aufbereitungsanlagen abgetrennt.

Wiederaufarbeitung

Verfahren, um aus »abgebrannten«, d. h. im Kernkraftwerk eingesetzten Brennelementen, noch ungenutztes spaltbares Material zurückzugewinnen. Der hochradioaktive »abgebrannte« Anteil wird für die Endlagerung konditioniert.

Zwischenlager

Lager (zentral, bzw. am Standort der Anlage, die den Abfall verursacht), in dem konditionierte Abfallgebinde für eine Übergangszeit so lange zwischengelagert werden, bis sie in ein passendes Endlager verbracht werden können.

14 Bildnachweis

- Babcock Noell GmbH: Abb. 6 und 28
- Bundesarchiv, B 145 Bild-F056650-0021, Engelbert Reineke, unter Wikimedia Creative Common Lizenz, Bearbeitung GRS: Abb. 23
- EnBW Energie Baden-Württemberg AG: Abb. 44
- EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH: Abb. 2, 8, 10, 16, 21, 22, 24-27, 29a, 29b, 30, 34, 37, 38-41 und 43
- GRS gGmbH: Abb. 3-5, 9, 18-20, 31-33, 35 und 36
- Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH: Abb. 7, 47
- Karlsruher Institut für Technologie: Abb. 1 und 17
- PreussenElektra GmbH: Abb. 12-15 und 45
- RWE Power AG: Abb. 46
- Tim Reckmann unter Wikimedia Creative Common Lizenz, Bearbeitung GRS: Abb. 11
- Vattenfall AB: Abb. 42

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
85748 Garching b.München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200