

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	22
7.3	Alternativen zur Zerlegung vor Ort	23
8	Reststoff- und Abfallmanagement	24
8.1	Freigabe	24
8.2	Abklinglagerung	26
8.3	Radioaktiver Abfall	27
9	Die Kosten	28
9.1	Kosten der Energieversorgungsunternehmen (EVU)	28
9.2	Kosten der öffentlichen Hand	28
9.3	Gesamtkosten	28
10	Internationales	29
10.1	Übereinkommen zur nuklearen Entsorgung	29
10.2	IAEA	29
10.3	OECD/NEA	29
10.4	EU	29
10.5	WENRA	29
11	Zusammenfassung und Ausblick	30
12	Anhang	30
12.1	Liste zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Deutschland	30
12.2	Kurzbeschreibung ausgewählter Stilllegungsprojekte	32
13	Glossar	36
14	Bildnachweis	39

Impressum

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Autoren: Thorsten Stahl, Erik Strub, GRS

Grafische Endredaktion: Vivian Scheithe, GRS

Layout: Lengowski und Partner, Köln

Druck: Media Cologne Kommunikationsmedien GmbH, Hürth

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMU im Rahmen des Vorhabens 3610R03400 erstellt worden.

Februar 2012

1 Einführung

Die Stilllegung kerntechnischer Anlagen ist eine Aufgabe, der sich die Kernenergieländer stellen müssen. Insgesamt wurden nach Angaben der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) von 2011 bisher über 500 Reaktoren und etwa 275 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 Stilllegungsge-
nehmigung durchgeführt werden, bis eine behördliche, d. h. atomrechtli-
che 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

Mitte 2011 befanden sich in Deutschland 16 Kernkraftwerke (Leistungs- und Prototypreaktoren) in verschiedenen Phasen der Stilllegung. 2011 wurden acht weitere Reaktoren endgültig abgeschaltet und sollen in den nächsten Jahren stillgelegt werden. Die verbliebenen neun Anlagen werden aufgrund der Änderung des Atomgesetzes von Juli 2011 schrittweise bis 2022 endgültig abgeschaltet; jeweils eine Anlage bis Ende 2015, 2017 und 2019 und jeweils drei Anlagen bis Ende 2021 und 2022. Auch diese Anlagen werden nach ihrer endgültigen Abschaltung stillgelegt (► Anhang, Seite 30).

Über 30 Forschungsreaktoren unterschiedlicher Größe und über 10 Einrichtungen der nuklearen Ver- und Entsorgung wurden endgültig abgeschaltet und wurden oder werden stillgelegt. Am Standort des Kernkraftwerks Greifswald (KGR) wird das europaweit größte Stilllegungsprojekt durchgeführt (► Abb. 2).

Die Karte in ► Abb. 3 gibt einen Überblick über die Anlagen, die sich in Deutschland Mitte 2011 in der Stilllegung befinden oder bereits gänzlich abgebaut sind. Neben den Leistungs- und Prototypreaktoren sind dies Forschungsreaktoren sowie Anlagen der Ver- und Entsorgung. Nicht eingezeichnet sind Anlagen, die bereits endgültig abgeschaltet sind, aber noch keine Stilllegungsgenehmigung erhalten haben.

Abb. 2: Standort des Kernkraftwerks Greifswald



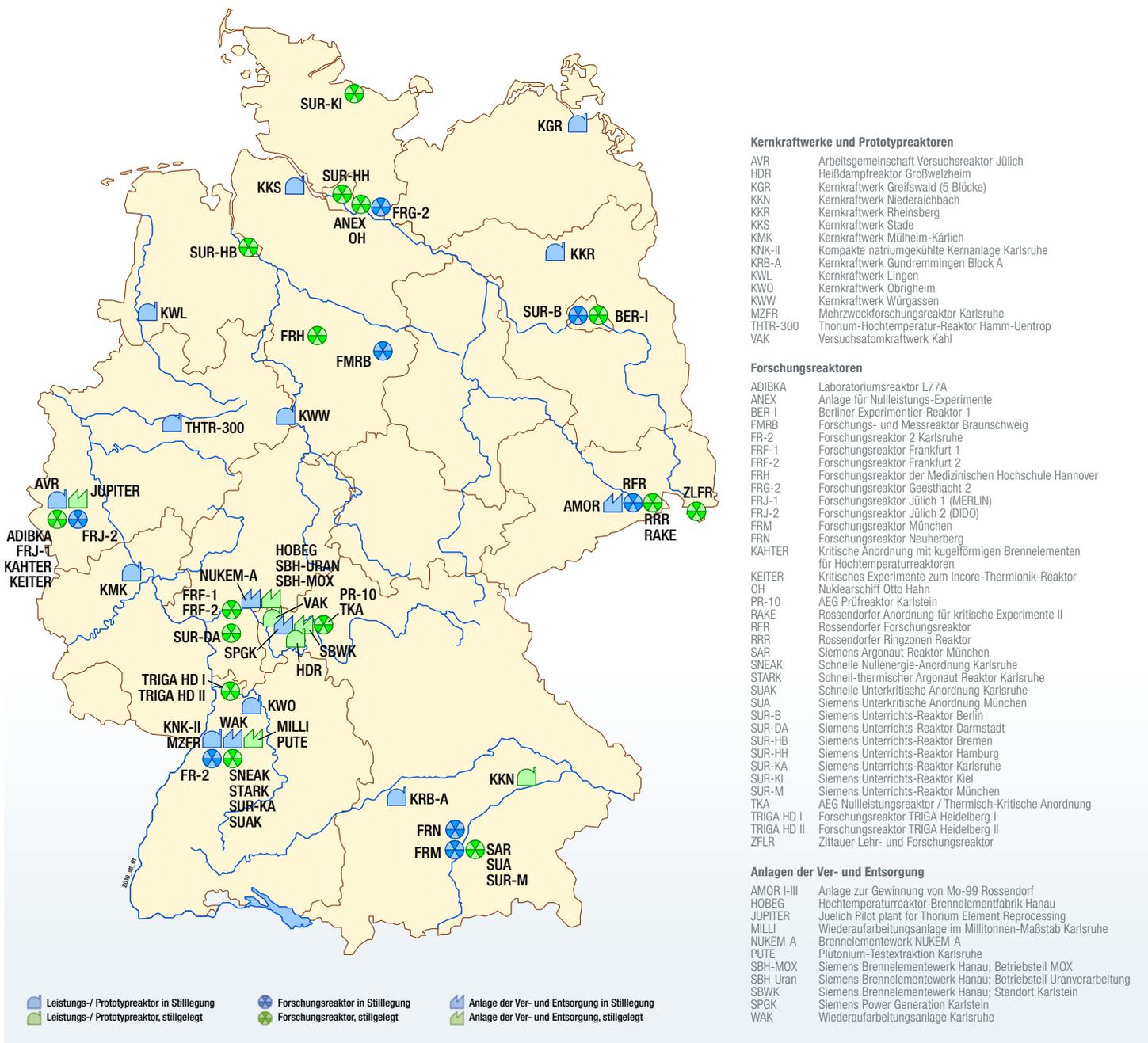


Abb. 3: Stillgelegte und in Stilllegung befindliche kerntechnische Anlagen in Deutschland. Nicht eingezeichnet sind Anlagen, die bereits endgültig abgeschaltet sind, aber noch keine Stilllegungsgenehmigung erhalten haben.

Bei den Stilllegungen zeigt sich, dass jedes Stilllegungsprojekt individuell verläuft. Projektablauf, Finanzierung, Wahl der Stilllegungsstrategie und viele weitere Randbedingungen hängen stark vom Anlagentyp ab und davon, wer Eigentümer der Anlage ist (► Finanzierung, Seite 28):

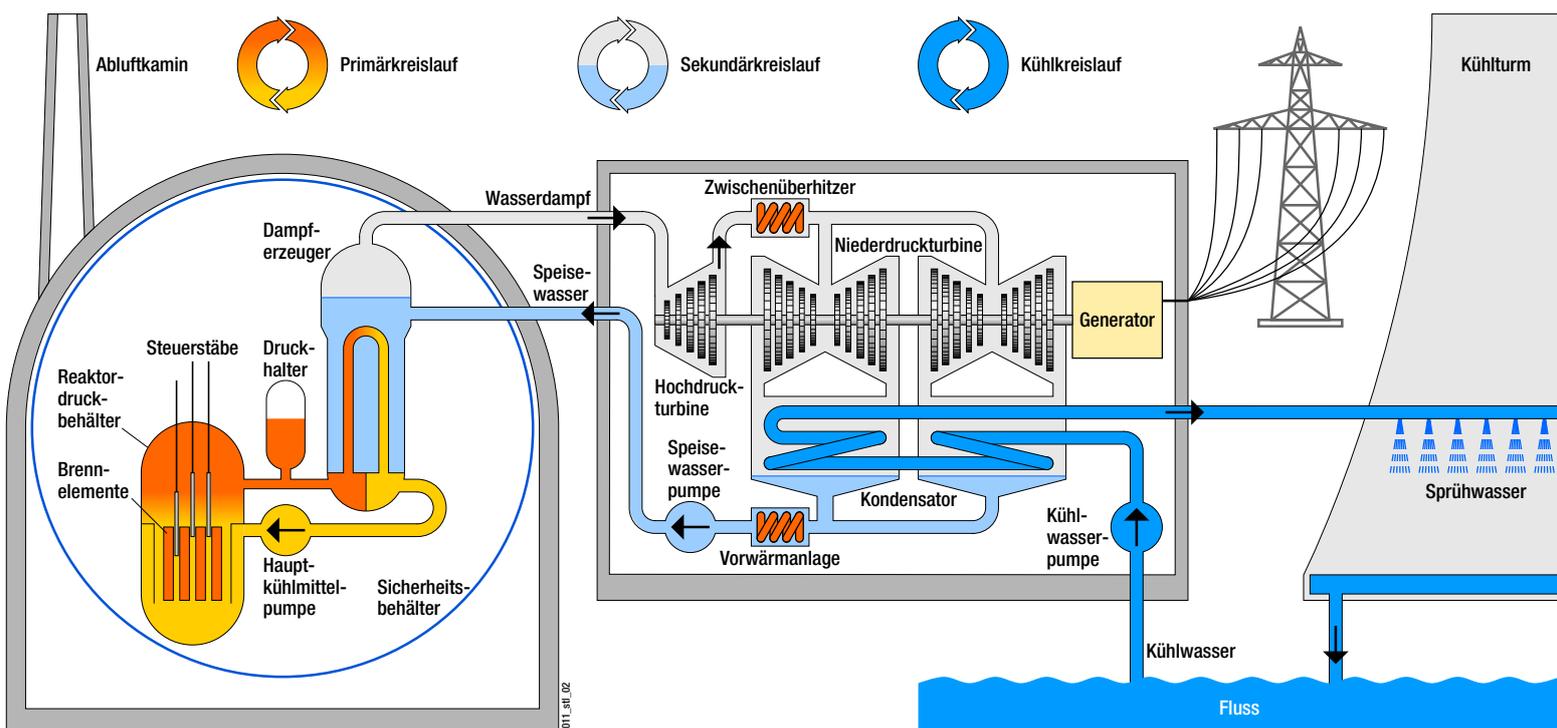
- Leistungsreaktoren und Anlagen zur Urananreicherung und Brennelementherstellung gehören den Energieversorgungsunternehmen und den in diesem Bereich tätigen Firmen.
- Dagegen sind Forschungsreaktoren, Prototypreaktoren zur Stromerzeugung und Prototypanlagen der Ver- und Entsorgung in Forschungszentren oder an Universitäten angesiedelt. Sie werden durch die öffentliche Hand finanziert. Die Stilllegung der Kernkraftwerke Greifswald und Rheinsberg der ehemaligen DDR wird aus dem Bundeshaushalt finanziert, ebenso wie die Stilllegung und Sanierung der Anlagen zur Uranerzförderung und -aufbereitung der »Wismut« in Sachsen und Thüringen. Die folgenden Abschnitte erläutern, wie eine Stilllegung bei verschiedenen Anlagentypen abläuft.

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

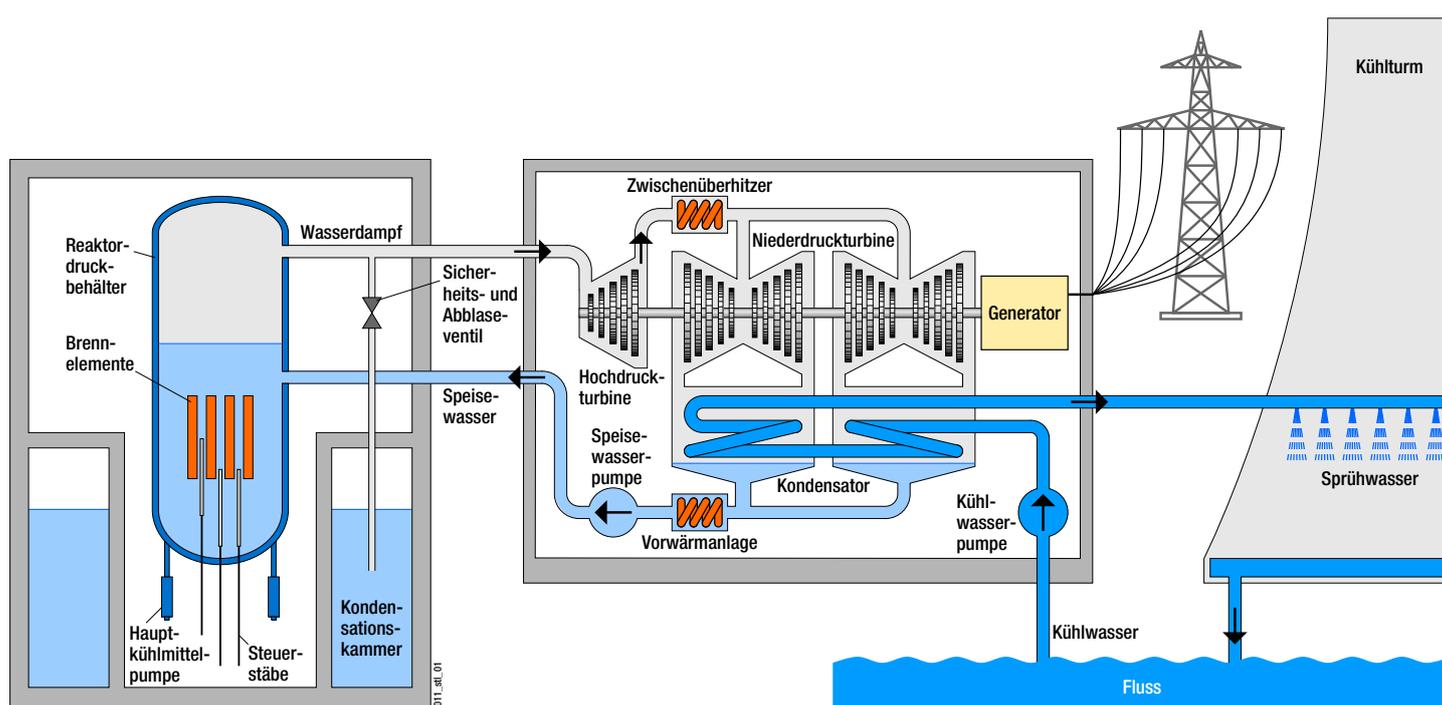


Drei Kernkraftwerke wurden bisher endgültig beseitigt, das Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN), der Heißdampfreaktor (HDR) Großwelzheim und das Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK). Bei den ersten beiden Anlagen handelt es sich um Prototypreaktoren, deren Entwicklung nicht weiter verfolgt wurde. Das Versuchsatomkraftwerk 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 uneingeschränkt freigegeben (► Freigabe, Seite 24).

Erfahrungsgemäß dauert die Stilllegung eines Leistungs- oder Prototypreaktors etwa 10 bis 20 Jahre, wobei sich das Abfallaufkommen deutlich unterscheiden kann (► Reststoff- und Abfallmanagement, Seite 24).

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

Abb. 5: Schematischer Aufbau eines Siedewasserreaktors



2.2 Forschungsreaktoren

Im Gegensatz zu Leistungsreaktoren dienen Forschungsreaktoren im Allgemeinen nicht zur Stromerzeugung, sondern werden zu speziellen Zwecken in der Forschung, der Medizin oder im industriellen Bereich genutzt. 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.

Aufgrund der geringeren Größe bei Forschungsreaktoren kann der technische Abbau innerhalb eines kürzeren Zeitraums (z. B. einige Monate bis zu mehreren Jahren) erfolgen als bei größeren Leistungsreaktoren.

Beispiele für zurückgebaute oder in Stilllegung befindliche Forschungsreaktoren sind in den ► Abb. 6 und 7 und im ► Anhang aufgeführt.



Abb. 7: Kontrollmessungen im Reaktorschacht des Forschungsreaktors TRIGA HD II

Abb. 6: Abbau des Forschungsreaktors FRJ-1



2.3 Anlagen der Ver- und Entsorgung

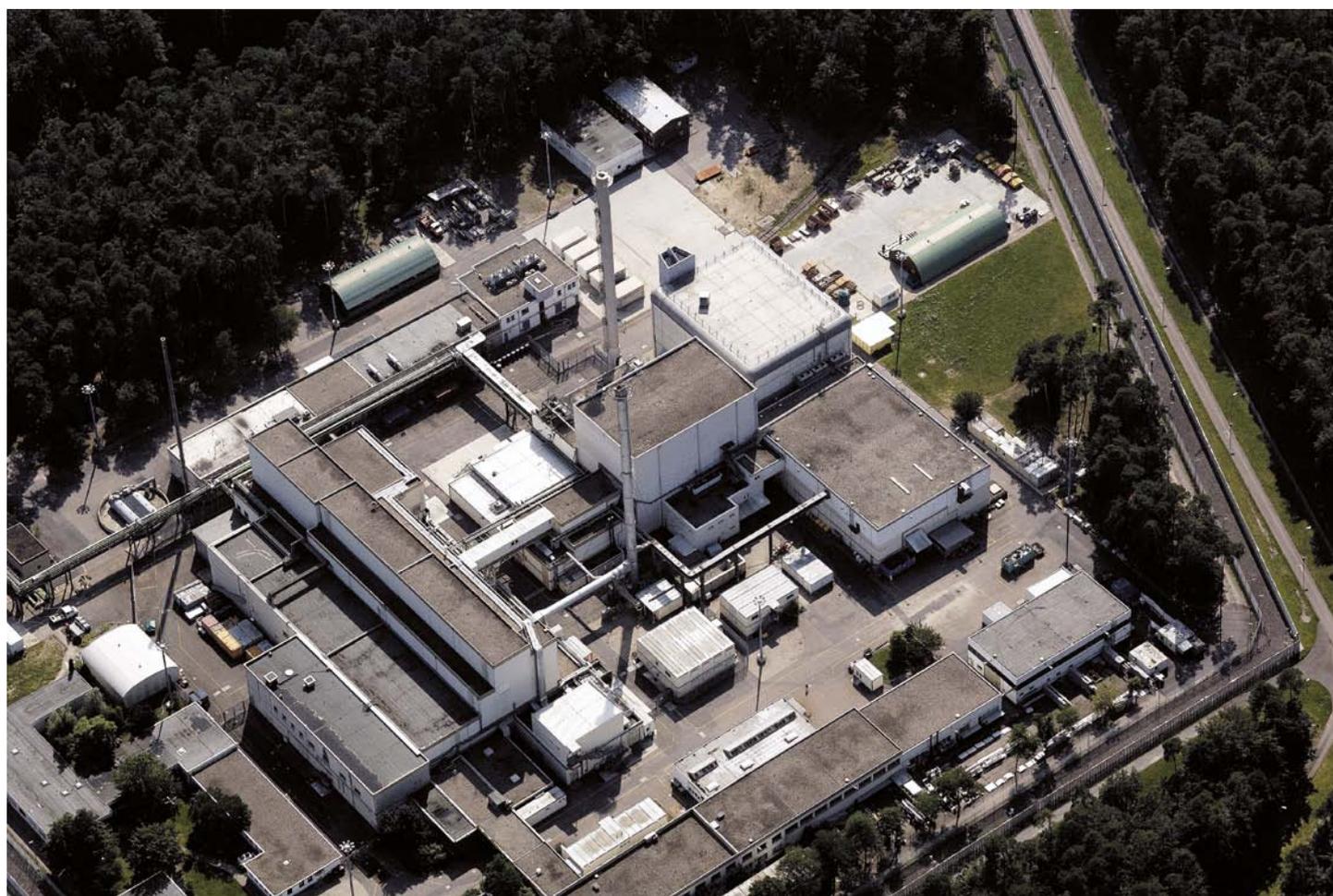
Anlagen der Ver- und Entsorgung dienen beispielsweise der Herstellung oder Wiederaufarbeitung von Brennelementen oder der Konditionierung von Abfällen. Wie aus der Liste im ► Anhang hervorgeht, gibt es in Deutschland nur wenige derartige Anlagen.

Am Standort Hanau sind einige Anlagen zur Brennelementherstellung in den 1980er und 1990er Jahren außer Betrieb genommen worden. Im Forschungszentrum Karlsruhe wurde von 1971 bis 1990 die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) (► Abb. 8) als Versuchsanlage betrieben. Ihre Stilllegung stellt besonders komplexe Anforderungen.

Der Ablauf der Genehmigungsverfahren sowie die Dauer der Stilllegung sind mit der Stilllegung von Kernkraftwerken vergleichbar (► Genehmigungsverfahren, Seite 15). So wird etwa bei der WAK mit ca. 25 Jahren gerechnet – von der Erteilung der ersten Stilllegungsgenehmigung im Jahre 1994 bis zur vollständigen Beseitigung der Anlage, die etwa für das Jahr 2020 geplant ist.

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

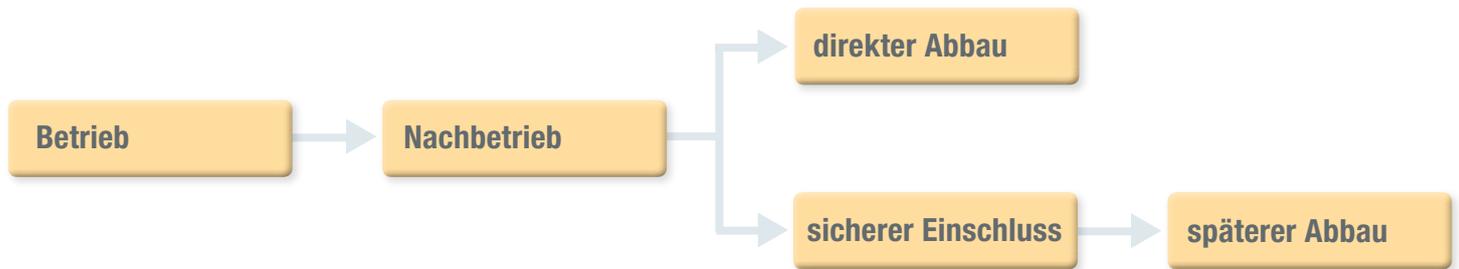
Abb. 8: Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK)



3 Stilllegungsstrategien

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

Abb. 9: Stilllegungsstrategien



Gemeinsam ist beiden, dass zwischen der endgültigen Abschaltung und dem Beginn der eigentlichen Stilllegung die sogenannte Nachbetriebsphase liegt, die mehrere Jahre dauern kann. In diesem Zeitraum können die Brennelemente abtransportiert oder die Betriebsmedien und -abfälle entsorgt werden, sofern dies im Rahmen der Betriebsgenehmigung des Kernkraftwerks abgedeckt ist. Spätestens in der Nachbetriebsphase beantragt der Anlagenbetreiber die Genehmigung der Stilllegung (► Genehmigungsverfahren). Erst nachdem sie 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 (► Strahlenschutz, Seite 18) abgebaut (► Abb. 10). Erfahrungsgemäß dauern die Arbeiten zur Stilllegung mindestens ein Jahrzehnt.

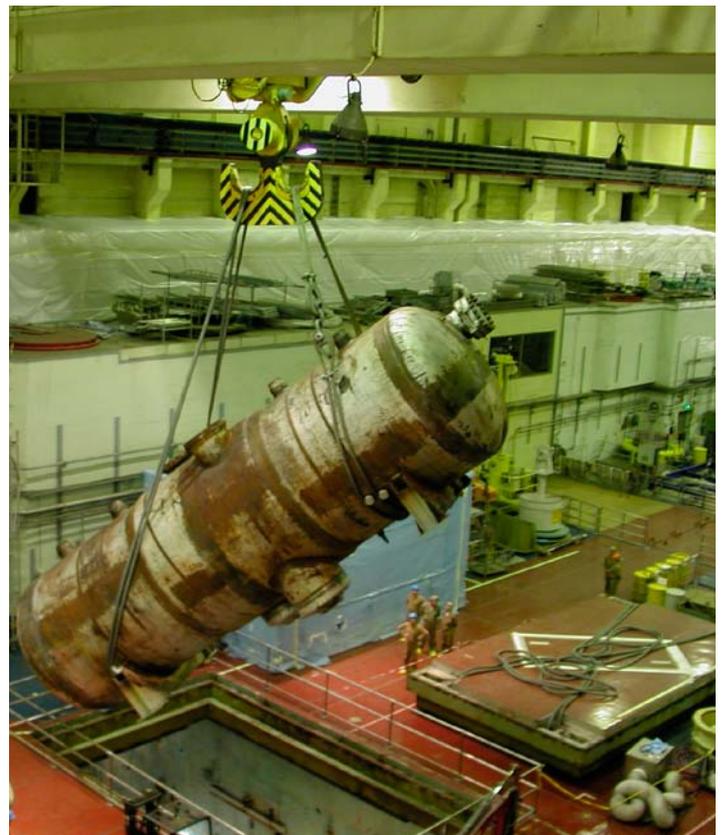


Abb. 10: Demontage eines Dampferzeugers im Rahmen des direkten Abbaus

Bei der alternativen Strategie wird die Anlage dagegen erst nach einer Periode des sicheren Einschlusses abgebaut. Dabei sind drei Phasen zu unterscheiden:

1. Maßnahmen in der Anlage, die der Realisierung des sicheren Einschlusses dienen,
2. Verwahrung der Anlage im sicheren Einschluss (z. B. 30 Jahre) (► Abb. 11) und
3. Abbau der Anlage.



Abb. 11: Sicherer Einschluss des THTR-300

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

Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass kerntechnische Anlagen meistens direkt abgebaut werden. Auch in Deutschland befinden sich nur wenige Anlagen im sicheren Einschluss (► Anhang).

	Direkter Abbau	Sicherer Einschluss und späterer Abbau
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit von Personal, das mit der Betriebshistorie vertraut ist. • Milderung wirtschaftlicher Folgen für die Region. • Finanzierungssicherheit. • Gelände kann früher wieder genutzt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioaktivität nimmt mit der Zeit ab (»Abklingen«). • Durch geringere Strahlenbelastung beim Abbau können Abbauarbeiten technisch einfacher sein.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere noch vorhandene Radioaktivität. • Höhere Strahlenbelastung kann Abbauarbeiten auch technisch erschweren. 	<ul style="list-style-type: none"> • 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

4 Schrittweiser Abbau eines Kernkraftwerks

Am Beispiel eines Kernkraftwerks soll dargestellt werden, wie der Abbau kerntechnischer Anlagen verläuft. Die ► Abb. 12 - 15 erläutern den Abbau anhand eines vereinfachten Schnitts durch ein Kernkraftwerk. In jedem Abbauschritt werden die jeweils rot markierten Systeme, Strukturen und Komponenten entfernt.

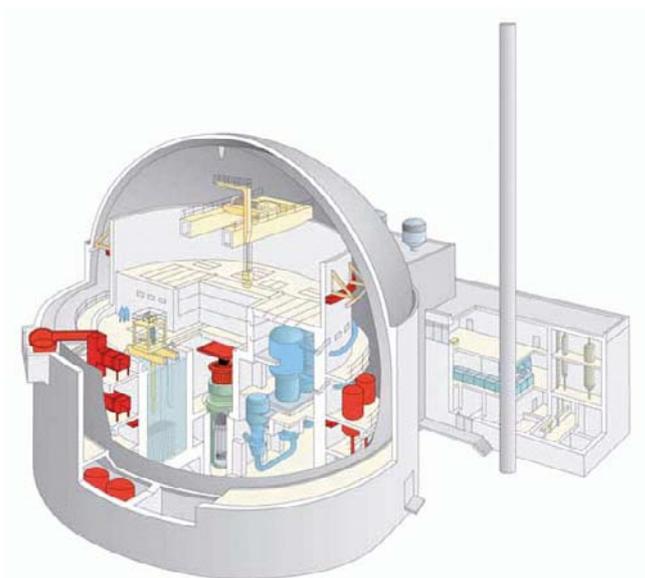


Abb. 12: Zunächst werden die für den Betrieb des Rückbaus nicht mehr benötigten Anlagenteile abgebaut.

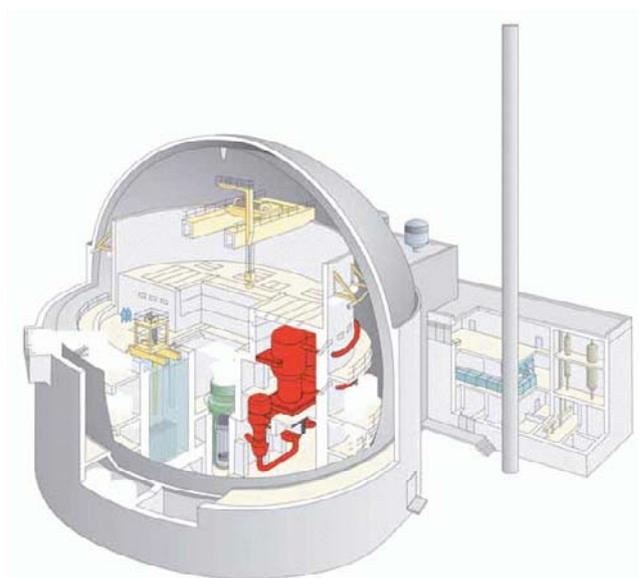


Abb. 13: In den nächsten Schritten werden die höher aktivierten Teile wie z. B. Dampferzeuger und Teile des Primärkreislaufes entfernt.

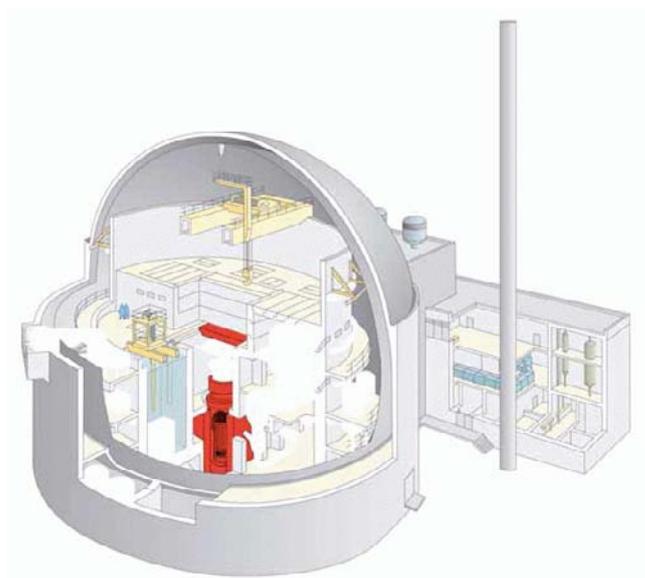


Abb. 14: Als letzte große Komponente wird in der Regel der hoch aktivierte Reaktordruckbehälter abgebaut.

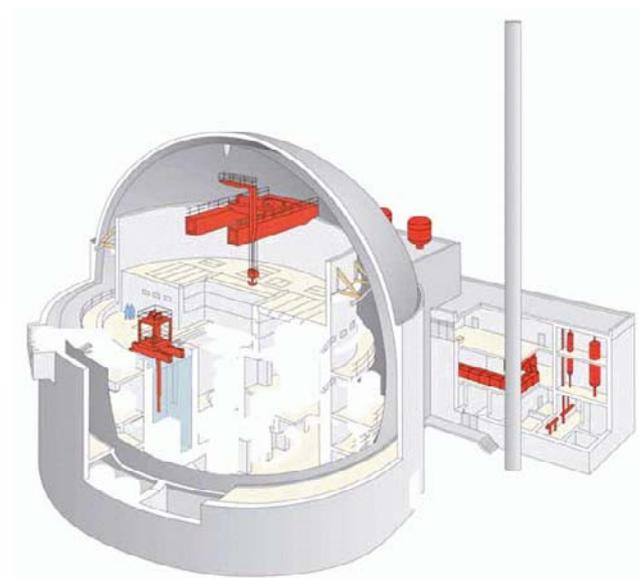


Abb. 15: Als letztes werden die bis dahin benötigten Teile wie Kräne und Filtersysteme beseitigt.

Vor Beginn der Abbauarbeiten befindet sich die Anlage noch weitgehend im gleichen technischen Zustand wie während des Betriebs. Brennelemente und Betriebsabfälle sind jedoch in der Regel entfernt.

Zur Vorbereitung der Stilllegungsarbeiten wird eine detaillierte Übersicht über das radioaktive Inventar der Anlage erstellt. In allen Bereichen der Anlage werden hierzu Messungen (► Abb. 16) durchgeführt, und es werden 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 (► Techniken, Seite 20) entschieden.



Abb. 16: Messung zur Bestimmung einer möglichen Kontamination

Der Abbau von Anlagenteilen wird in der Regel in den Bereichen mit geringer Kontamination begonnen und schreitet in Bereichen mit höherer Kontamination fort; man geht »von außen nach innen« vor. In den frei gewordenen Bereichen, z. B. Teilen des Maschinenhauses, können dann Geräte installiert werden, die gebraucht 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. Eine Dekontamination kann je nach Gegebenheiten vor oder nach der Zerlegung stattfinden. Jedes Stück wird auf eine vorhandene Radioaktivität hin untersucht. Dieser Prozess wird von unabhängigen Sachverständigen überprüft. Anhand der radiologischen Charakterisierung wird entschieden, ob das Stück konditioniert und als radioaktiver Abfall abgegeben werden muss, oder ob es weiterbehandelt und freigegeben werden kann (► Reststoff- und Abfallmanagement, Seite 24).

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

Wichtige Einrichtungen, wie Lüftung, Strom- und Medienversorgung, werden über alle Abbauschritte hinweg in Betrieb oder betriebsbereit gehalten. Diese Systeme sind aus der Betriebsphase vorhanden und ihr Weiterbetrieb ist notwendig. Je nach Erfordernis werden sie nachgerüstet.

Zuletzt wird an den höchstkontaminierten Bereichen und an den aktivierten Systemen und Komponenten gearbeitet. Zu diesen gehören der Reaktordruckbehälter und dessen Einbauten, der kernnahe Bereich und die unmittelbar anschließenden Systeme und Komponenten innerhalb des Sicherheitsbehälters. Diese Abbauschritte werden weitgehend fernbedient durchgeführt, um den Aufenthalt von Personen in Bereichen hoher Strahlenbelastung zu vermeiden. Viele der Arbeiten werden zusätzlich unter Wasser ausgeführt, weil Wasser eine wirksame Abschirmung darstellt. In einigen Fällen werden Großkomponenten zur Abklinglagerung aus der Anlage entfernt (► Abklinglagerung, Seite 26).

Die Materialien, die aus diesem Abbauschritt anfallen, sind zum großen Teil aktiviert. Sie bilden einen wesentlichen Anteil der radioaktiven Abfälle, die bei einer Stilllegung anfallen (► Reststoff- und Abfallmanagement).

Nachdem das Gebäude vollständig leergeräumt ist, verbleibt nur noch die Restkontamination auf den Oberflächen der Gebäudestrukturen. Im letzten Schritt werden diese dekontaminiert und auf verbleibende radioaktive Kontamination erneut geprüft. Nach erfolgreicher Freigabe kann das Gebäude aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen und danach konventionell genutzt oder abgerissen (► Abb. 17) werden. Ein typischer Abbau einer Anlage dauert mindestens ein Jahrzehnt.



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

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 (► 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.

Die AtVfV regelt das atomrechtliche Genehmigungsverfahren, die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung sowie die Einbeziehung der Öffentlichkeit (Öffentlichkeitsbeteiligung) im Rahmen von kerntechnischen 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 und Reaktorsicherheit, wie beispielsweise der Stilllegungsleitfaden (»Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach §7 des Atomgesetzes« vom 26.06.2009), der vom Bundesumweltministerium 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 9. September 2010 Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen verabschiedet. Diese Leitlinien enthalten technische Anforderungen und ergänzen so den Stilllegungsleitfaden.

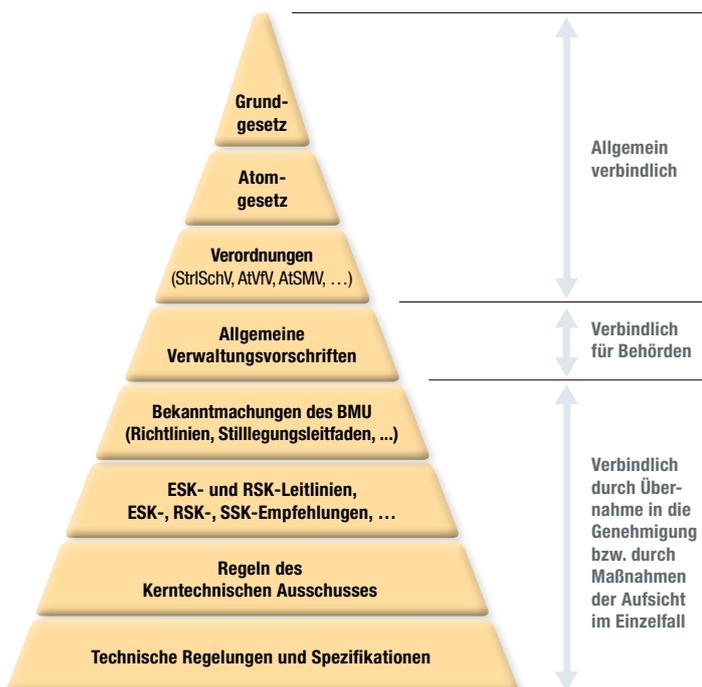


Abb. 18: Regelwerkspyramide

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 für jeden Schritt eine Teilgenehmigung zu beantragen bzw. zu erteilen. Ein beispielhaftes zeitliches Ablaufschema für die Stilllegung eines Leistungsreaktors ist in ► Abb. 19 dargestellt.

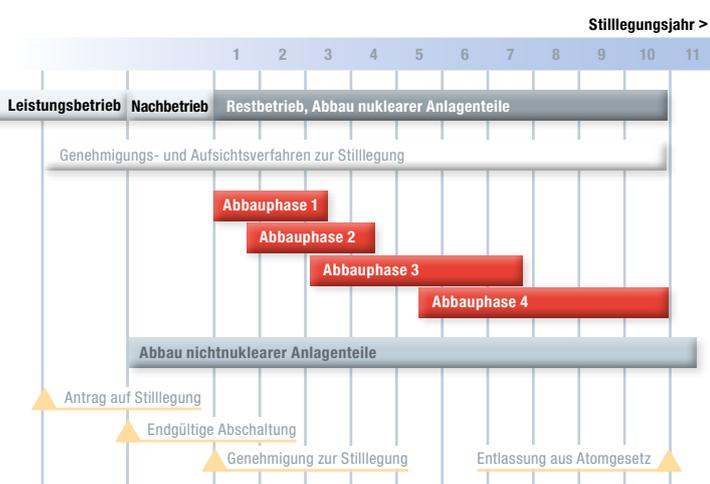


Abb. 19: Beispielhaftes zeitliches Ablaufschema

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 (► Rechtlicher Rahmen).

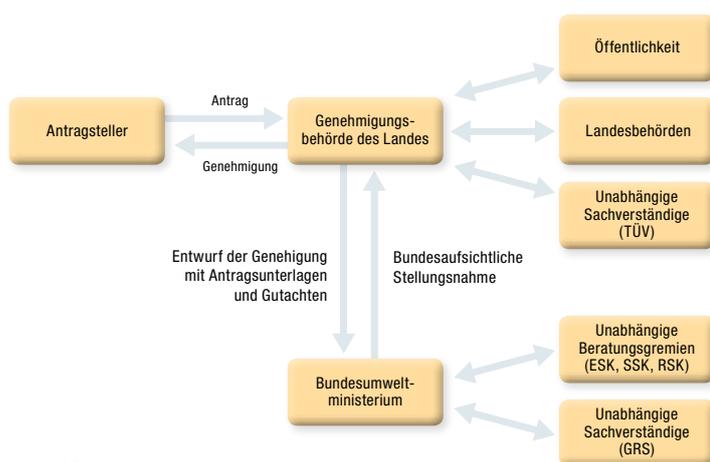


Abb. 20: Beteiligte im Genehmigungsverfahren

Das Verfahren zur Erteilung einer Stilllegungsgenehmigung wie auch die Wechselbeziehungen zwischen Behörden, Gutachtern, 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 dabei der Aufsicht des BMU und ggf. den Weisungen der Bundesregierung. Das BMU wird hierbei von der ESK, der RSK und der SSK beraten.
- Die Zuständigkeit für die Gewährung, Zurücknahme und 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 für die Durchführung der Umweltverträglichkeitsprüfung.
- Die in der Stilllegungsgenehmigung gestatteten Arbeiten werden von den zuständigen Landesbehörden im u Aufsichtsverfahren überwacht.

5.3 Aufsichtsverfahren

Die Einhaltung der in der Stilllegungsgenehmigung gestatteten Anforderungen an Arbeiten wird von den zuständigen Landesbehörden im Aufsichtsverfahren überwacht. Dabei wird überprüft, ob die für die Arbeiten festgelegten Bedingungen und erteilten Auflagen 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 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 Strahlenbelastungen zu schützen. Dieser Schutz muss nicht nur bei allen Arbeiten, die mit der Stilllegung verbunden sind, sichergestellt sein, sondern auch bei Störfällen. Darüber hinausgehende 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 eine Leckage.

Mit Vorschreiten 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. Für Forschungsreaktoren und Anlagen der Ver- und Entsorgung gilt analog, was hier für Kernkraftwerke ausgeführt wird.

Abb. 21: Innerbetrieblicher Transport bestrahlter Brennelemente



Betriebsphase

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.

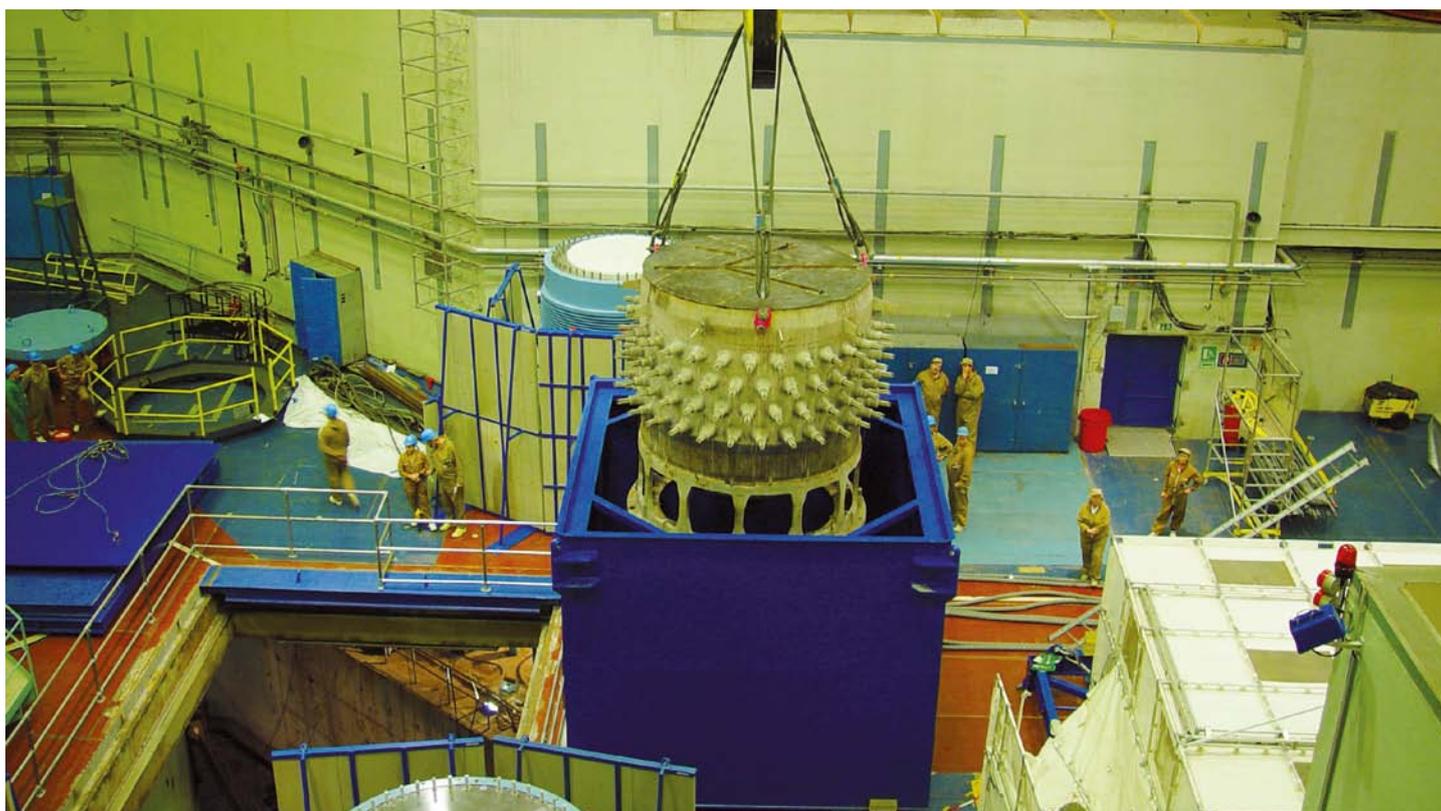
Nachbetriebsphase

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 noch einige Jahre weiter gekühlt werden.

Insbesondere, wenn die bestrahlten Brennelemente aus der Anlage abtransportiert bzw. am Standort zwischengelagert werden (► Abb. 21), reduziert sich das Gefährdungspotenzial deutlich. Dies geschieht üblicherweise während der Nachbetriebsphase. In dieser Phase werden oft auch die radioaktiven Betriebsabfälle entfernt, die ebenfalls einen großen Anteil des Aktivitätsinventars bilden.

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.

Abb. 22: Entfernung eines Druckhalters



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

Restbetriebs- und Abbauphase

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 kann so weit dekontaminiert werden, dass es behördlich freigegeben und wieder dem normalen Stoffkreislauf zugeführt werden kann (► Freigabe). Für die Sicherheit wichtige Einrichtungen, wie Lüftungs- und Brandschutzsysteme, werden weiter betrieben.

Im Zuge der Abbau- und Zerlegearbeiten kann – zeitlich und örtlich begrenzt – der freisetzungverfügbare 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 Operationen 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 Endlager bereitsteht.

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 Kontroll- oder Überwachungsbereich einer Anlage (► Abb. 23) tätig ist, trägt ein persönliches Dosimeter, das die Strahlenbelastung (Dosis) misst. Durch weitere Maßnahmen wird außerdem die Aufnahme von Radionukliden in den Körper vermieden. Dosisgrenzwerte für das Personal sind in der Strahlenschutzverordnung (► Rechtlicher Rahmen) und zusätzlich in betrieblichen Ordnungen festgelegt. Sie dürfen nicht überschritten werden. Darüber hinaus schreibt die Strahlenschutzverordnung die Vermeidung unnötiger Strahlenbelastung und eine Dosisreduzierung auch unterhalb der festgelegten Grenzwerte vor. In der Praxis werden die Grenzwerte für die Strahlenbelastung 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 Strahlenbelastung 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 minimieren, 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, die beim Abbau anfallen, denen ähneln, die bei der Instandhaltung der Anlage während des Betriebs notwendig sind, können auch die vorhandenen Strahlenschutzkenntnisse in der Abbauphase genutzt werden. Bei einem unmittelbaren Abbau der Anlage (► Stilllegungsstrategien) kann daher die vorhandene Strahlenschutzorganisation weitgehend übernommen werden.

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, ► Rechtlicher Rahmen) geregelt.

Die Verpflichtung der Betreiber zu solchen Meldungen endet nicht mit der Abschaltung der Anlage – auch wenn ab diesem Zeitpunkt das Gefährdungspotenzial (► Sicherheitsbetrachtungen) deutlich geringer ist – sondern gilt für die gesamte Zeit, 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 Techniken für verschiedene Verfahren benötigt: Dekontaminationstechniken, Abbau- und Zerlegetechniken sowie weitere Techniken, wie z. B. zu Aktivitätsmessungen und zur Abfallkonditionierung.

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 folgende Kriterien berücksichtigt:

- Strahlenschutzaspekte, vor allem Minimierung 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 (► 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 Strahlenbelastung 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 Radioaktivität entfernt, die in Risse eingedrungen ist oder sich an unzugänglichen Stellen abgelagert hat.

Abgebaute Anlagenteile werden oft nochmals dekontaminiert, um diese letztlich freigegeben, also aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen zu können (► 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 danach keine Kontamination mehr auf.

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 wirken 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 (► Abb. 27).



Abb. 25: Chemische Dekontamination



Abb. 26: Dekontamination mit Wasserstrahl

Abb. 27: Dekontamination mittels Sandstrahlen



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 hoher Strahlenbelastung oder an hochaktiven Teilen gearbeitet werden muss, wie etwa im aktivierten kernnahen Bereich, dann kann nicht direkt manuell gearbeitet werden, sondern fernbedient – oft unter Wasser (► Abb. 28). Das Wasser bildet eine wirksame Abschirmung gegen die Strahlung, die von den zu zerlegenden Materialien ausgeht.

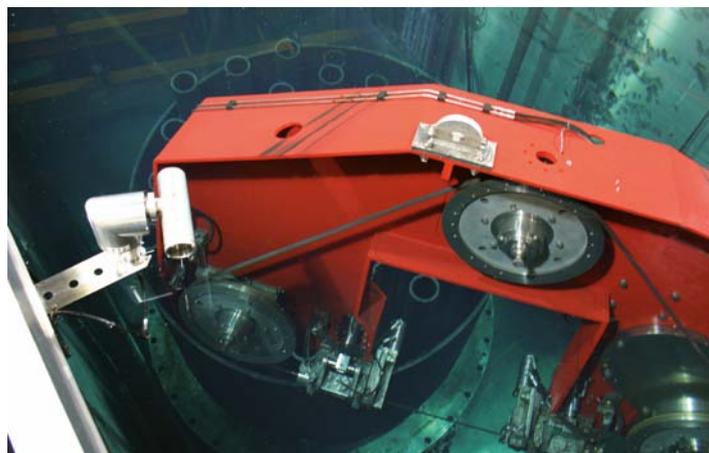


Abb. 28: Zerlegung von Komponenten unter Wasser mit einer Bandsäge

Kriterien zur Entscheidung, welche Techniken am besten geeignet sind, 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.

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. Einige Techniken sind für beide Materialtypen geeignet. Beim thermischen Schneiden in Luft und unter Wasser entstehen partikelförmige Emissionen, sogenannte Aerosole bzw. Hydrosole, die jedoch mit handelsüblichen Absaug- und Filteranlagen beherrschbar sind.

Wichtige thermische Techniken sind die folgenden:

- autogenes Brennschneiden,
- Plasmaschmelzschneiden,
- Lichtbogenschneiden,
- Funkenerosion und
- Laserstrahlschneiden.

Ein Beispiel für fernhantiertes thermisches Schneiden ist in ► Abb. 29 dargestellt.



Abb. 29a: Fernhantiertes thermisches Schneiden (Steuerstand für fernbediente Arbeiten)

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: Fernhantiertes thermisches Schneiden
(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 (► Abklinglagerung, Seite 26). 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.

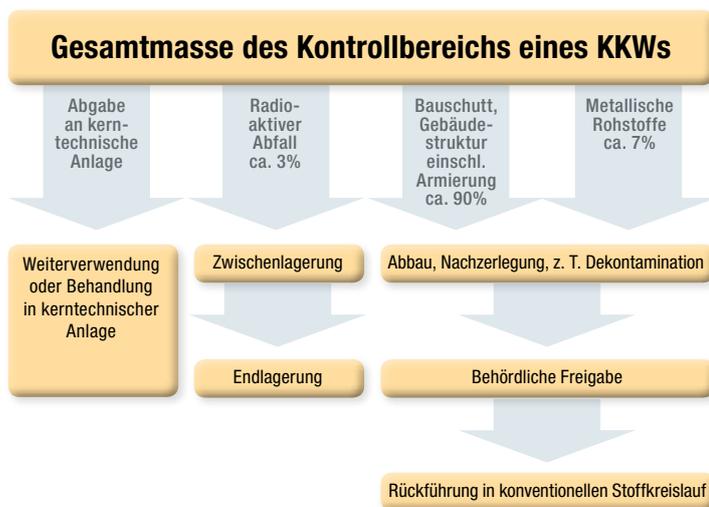


Abb. 31: Radioaktiver Abfall und Reststoffe

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. 32 dargestellt ist.



Abb. 32: Gitterboxen mit vorsortierten Reststoffen zur Freigabe

Freigabeoptionen

Bei der Freigabe existieren 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 extrem niedrig, um die Sicherheit unter allen denkbaren Nutzungsmöglichkeiten des Materials zu gewährleisten.
- Bei einer »eingeschränkten Freigabe zur Beseitigung« muss das Material an eine geeignete konventionelle Deponie oder Verbrennungsanlage abgegeben werden. Dafür kommen aufgrund der Abfallgesetzgebung nur wenige Materialarten, z. B. Isolierwolle, organisches Material usw. in begrenzten Mengen in Frage.
- Weitere Optionen der »eingeschränkten Freigabe« bestehen z. B. für Metallschrott, welcher zum Einschmelzen in einem konventionellen Stahlwerk oder einer Gießerei gelangen soll, für große Mengen an Bauschutt und Bodenaushub, für die Gebäude der Anlage sowie für das Anlagengelände.

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

Nuklid	Uneingeschränkt	Eingeschränkt zur Beseitigung	Eingeschränkt 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

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 μ Sv pro Jahr auftreten kann. Diese Vorgabe ist in der Strahlenschutzverordnung festgeschrieben und entspricht auch den Strahlenschutz-Grundnormen der EU. Eine solche Dosis bedeutet weniger als ein Hundertstel der natürlichen Strahlenbelastung der Bevölkerung (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. Sie wurden durch Modellrechnungen für ca. 300 Radionuklide und die oben aufgeführten Freigabeoptionen ermittelt und in der Strahlenschutzverordnung niedergelegt.

Ablauf der Freigabe

Der Ablauf der Freigabe ist behördlich geregelt. An vielen Stellen greifen qualitätssichernde Maßnahmen ein. Die zuständige atomrechtliche Behörde prüft, dass die Schritte des Verfahrens und die eingesetzte Messtechnik (z. B. ► Abb. 33) für das Freigabeverfahren geeignet sind. Die Behörde stellt dadurch sicher, ggf. unter Hinzuziehung unabhängiger Gutachter, dass das freizugebende Material die für die Freigabe geltenden Kriterien erfüllt.



Abb. 33: Messung zur Freigabe von Abfall

► Abb. 34 gibt einen Überblick über den Gesamtablauf des Freigabeverfahrens, dessen einzelne Stationen am Beispiel eines abgebauten Anlagenteils dargestellt sind.

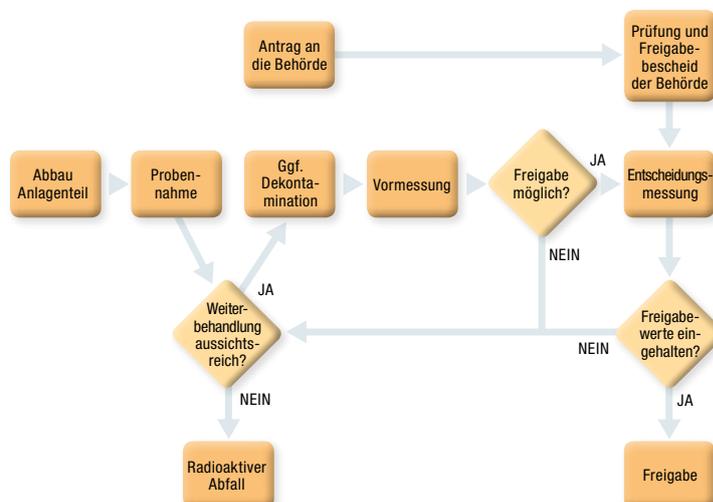


Abb. 34: Entscheidungsschema zur Freigabe von Anlagenteilen

Freigabe von Gebäudestrukturen und Bodenflächen

Um die Gebäude einer kerntechnischen Anlage nach dem Abbau weiter nutzen oder abreißen zu können, müssen diese ebenfalls freigegeben werden. Anhand eines geeigneten Stichprobenverfahrens werden die Oberflächen auf Kontamination hin überprüft (► Abb. 35). Die dabei angewendeten Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der Freigabewerte müssen von der zuständigen Behörde genehmigt werden.



Abb. 35: Raum mit Markierungen zur Bestimmung der Oberflächenkontamination

Überschreitet die Aktivität einer Oberfläche die einzuhaltenen Freigabewerte, so folgen ein oder mehrere Dekontaminationsschritte. Die Freigabewerte für Gebäudestrukturen und Bodenflächen sind ebenfalls in der Strahlenschutzverordnung festgelegt. Soll das Gebäude nicht abgerissen, sondern nach der Stilllegung weiter verwendet werden, muss eine uneingeschränkte Freigabe des Gebäudes erfolgen. Dazu müssen besonders niedrige Freigabewerte eingehalten werden.

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. 36).



Abb. 36: Messung zur Freigabe von Außenflächen

8.2 Abklinglagerung

Bei radioaktiven Stoffen, deren Aktivität auch nach Dekontaminationsmaßnahmen noch oberhalb der Freigabewerte liegt, kann eine Abklinglagerung (► Abb. 37) in Betracht gezogen werden. Das Material wird bei diesem Verfahren so lange gelagert, bis die vorhandene Aktivität ausreichend reduziert ist, um die Freigabewerte zu erreichen.



Abb. 37: Abklinglagerung von Gießlingen

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 (Bereich von Tagen bis hinunter zu Millisekunden) spielen bei der Abklinglagerung keine Rolle.

Bei Strukturen, die durch Neutronen aktiviert wurden (z. B. ► Abb. 38), 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.



Abb. 38: Messung der Dosisleistung



Abb. 39: Konditionierung von Abfällen (Fasstrochnungsanlage)



Abb. 40: Transportbehälter im Zwischenlager Nord

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 150 000 Tonnen beträgt, liegt das Massenaufkommen des radioaktiven Abfalls aus Stilllegungen im Bereich weniger Prozent. Die dominanten Nuklide bei Kernreaktoren sind vergleichsweise kurzlebige Beta/Gamma-Strahler wie Kobalt-60 und Cäsium-137. Bei Anlagen der Ver- und Entsorgung kommen langlebige Radionuklide hinzu, die wegen ihrer Alpha-Aktivität besonders radiotoxisch sind.

Der Hauptbeitrag radioaktiver Abfälle aus Stilllegungen stammt aus 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 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. 39) und Zwischenlagerung notwendig. Deswegen werden bei Leistungsreaktoren während der Stilllegung standortnahe Zwischenlager (► Abb. 40) 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.

9 Die Kosten

Die Kosten für die Stilllegung und den Abbau kerntechnischer Anlagen sowie die Entsorgung der resultierenden Abfälle sind vom Eigentümer der Anlage zu tragen. Eigentümer sind:

- für die kommerziell betriebenen Kernkraftwerke die privatwirtschaftlichen Energieversorgungsunternehmen (EVU),
- für die Anlagen der Ver- und Entsorgung: 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 in Greifswald und Rheinsberg: die öffentliche Hand.

9.1 Kosten der EVU

Bei den Energieversorgungsunternehmen (EVU) erfolgt die Finanzierung der Stilllegungs- und Abbaukosten aus Rückstellungen, die während der Betriebszeit getätigt und auf den Strompreis aufgeschlagen werden. Dadurch ist gewährleistet, dass Stilllegung und Abbau der Anlagen finanziell gesichert sind, wenn die Stromproduktion der Kernkraftwerke eingestellt wird.

Die Kosten für den Abbau einer kommerziellen Anlage mit Druckwasserreaktor liegen bei etwa 700 Millionen Euro. Da Siedewasserreaktoren einen systembedingt größeren Kontrollbereich besitzen, liegen die Kosten für eine Stilllegung dieses Reaktortyps etwas höher.

Nach Angabe der Energieversorgungsunternehmen beträgt die Gesamtsumme der Rückstellungen, die bis Ende 2010 für Stilllegung und Abbau der deutschen Kernkraftwerke angesammelt wurde, etwa 30 Milliarden Euro.

9.2 Kosten der öffentlichen Hand

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (bzw. dessen Rechtsvorgänger) 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.

9.3 Gesamtkosten

Rechnet man die Kosten zusammen, die für alle bereits in Angriff genommenen Stilllegungsprojekte und für die spätere Stilllegung der noch in Betrieb befindlichen Anlagen anfallen, so ergeben sich auf der Basis heutiger Schätzungen volkswirtschaftliche Gesamtkosten in der Größenordnung von ungefähr 50 Milliarden Euro. Nicht eingeschlossen sind in dieser Summe die Kosten für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle aus den Kernkraftwerken der Energieversorgungsunternehmen. Die Kosten hierfür verteilen sich auf die Betreiber, die hierfür Rücklagen bilden müssen, und die öffentliche Hand.

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 2011 über 50 Staaten beigetreten. Das Übereinkommen erstreckt sich auch auf die Stilllegung, den sicheren Einschluss und den Abbau von kerntechnischen Anlagen. Überprüfungskonferenzen finden in der Regel alle drei Jahre statt.

10.2 IAEA

Von der Internationalen Atomenergie-Organisation IAEA werden im Rahmen der »IAEA Safety Standard Series« Regeln veröffentlicht, die die Sicherheit bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen betreffen. Seit 2009 werden diese langfristig neu strukturiert und überarbeitet. 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 Erfahrungen bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen reflektieren. Diese Dokumente sind damit Teil des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik und somit Teil der behördlichen Bewertung. An diesen müssen sich deutsche Betreiber orientieren.

10.3 OECD/NEA

Die Nuclear Energy Agency (NEA) ist eine Institution innerhalb der internationalen Organisation für die wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) mit Sitz in Paris. Die NEA hat zum Ziel, eine friedliche, sichere, umweltschonende und wirtschaftliche Nutzung der Kernenergie zu fördern. Unter den 30 Mitgliedsländern (2011) 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-, Review- 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 (»best practices«) 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 dem heutigen Stand der Technik sicher und in einem Zeitrahmen von etwa einem Jahrzehnt 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 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, ist im ► Anhang aufgeführt.

12 Anhang

12.1 Liste zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Deutschland

Im Jahr 2011 befanden sich in Deutschland 16 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. 2011 wurden acht weitere Leistungsreaktoren endgültig abgeschaltet, die in den nächsten Jahren stillgelegt werden sollen. Es ist vorgesehen, die verbliebenen neun Leistungsreaktoren bis 2022 abzuschalten.

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

Leistungs- und Prototypreaktoren	<i>Kürzel</i>	<i>Stand: Ende 2011</i>
Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich	AVR	Stilllegung seit 1994
Kernkraftwerk Biblis Blöcke A und B	KWB	Abgeschaltet seit 2011
Kernkraftwerk Brokdorf	KBR	Abschaltung vorgesehen 2021
Kernkraftwerk Brunsbüttel	KKB	Abgeschaltet seit 2011
Kernkraftwerk Emsland	KKE	Abschaltung vorgesehen 2022
Kernkraftwerk Grafenrheinfeld	KKG	Abschaltung vorgesehen 2015
Kernkraftwerk Greifswald Blöcke 1-5	KGR	Stilllegung seit 1995
Kernkraftwerk Grohnde	KWG	Abschaltung vorgesehen 2021
Kernkraftwerk Gundremmingen Block A	KRB-A	Stilllegung seit 1983
Kernkraftwerk Gundremmingen Block B	KRB-B	Abschaltung vorgesehen 2017
Kernkraftwerk Gundremmingen Block C	KRB-C	Abschaltung vorgesehen 2021
Kernkraftwerk Isar Block 1	KKI-1	Abgeschaltet seit 2011
Kernkraftwerk Isar Block 2	KKI-2	Abschaltung vorgesehen 2022
Kernkraftwerk Krümmel	KKK	Abgeschaltet seit 2011
Kernkraftwerk Lingen	KWL	Sicherer Einschluss seit 1988
Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich	KMK	Stilllegung seit 2004
Kernkraftwerk Neckarwestheim Block 1	GKN-1	Abgeschaltet seit 2011
Kernkraftwerk Neckarwestheim Block 2	GKN-2	Abschaltung vorgesehen 2022
Kernkraftwerk Obrigheim	KWO	Stilllegung seit 2008
Kernkraftwerk Philippsburg Block 1	KKP-1	Abgeschaltet seit 2011
Kernkraftwerk Philippsburg Block 2	KKP-2	Abschaltung vorgesehen 2019
Kernkraftwerk Rheinsberg	KKR	Stilllegung seit 1995
Kernkraftwerk Stade	KKS	Stilllegung seit 2005
Kernkraftwerk Unterweser	KKU	Abgeschaltet seit 2011
Kernkraftwerk Würgassen	KWW	Stilllegung seit 1997
Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe	KNK-II	Stilllegung seit 1993
Mehrzweck-Forschungsreaktor Karlsruhe	MZFR	Stilllegung seit 1987
Thorium-Hochtemperatur-Reaktor Hamm-Uentrop	THTR-300	Sicherer Einschluss seit 1997

Forschungsreaktoren	<i>Kürzel</i>	<i>Stand: Ende 2011</i>
Forschungsreaktor 2 (Karlsruhe)	FR-2	Sicherer Einschluss seit 1996
Forschungsreaktor Geesthacht 1	FRG-1	Abgeschaltet seit 2010
Forschungsreaktor Geesthacht 2	FRG-2	Abgeschaltet seit 1995*
Forschungsreaktor Jülich 2	FRJ-2	Stilllegung beantragt 2007
Forschungsreaktor München	FRM	Stilllegung beantragt 1998
Forschungsreaktor Neuherberg	FRN	Sicherer Einschluss seit 1984
Rosendorfer Forschungsreaktor	RFR	Stilllegung seit 1998
SUR Aachen	SUR-AA	Stilllegung beantragt 2010
SUR Berlin	SUR-B	Stilllegung seit 2008

Anlagen der Ver- und Entsorgung	<i>Kürzel</i>	<i>Stand: Ende 2011</i>
Anlage zur Gewinnung von Mo-99 Rossendorf	AMOR I-III	Stilllegung seit 1997
Brennelementwerk NUKEM-A Hanau	NUKEM-A	Stilllegung seit 1993
Siemens Power Generation Karlstein	SPGK	Stilllegung seit 1993
Verglasungseinrichtung Karlsruhe	VEK	Abgeschaltet seit 2010
Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe	WAK	Stilllegung seit 1993

*FRG-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 (► 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 bis etwa 2012 abgebaut und grundsätzlich aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen wird. Der Umfang der Abbauarbeiten (u. a. ► Abb. 41) 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. 42).

Abb. 41: 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 Stade

Beim Kernkraftwerk Stade 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 Restbetrieb im Rahmen des Abbaus. 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.

Abb. 42: Abklinglagerung von Großkomponenten im Zwischenlager Nord



THTR-300

Der 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 – neben dem Kernkraftwerk Lingen (KWL) – einer von zwei Leistungsreaktoren, die sich gegenwärtig im sicheren Einschluss befinden. Beim Kernkraftwerk Lingen wurde entschieden, den sicheren Einschluss vorzeitig zu beenden. Nach derzeitigem Stand ist der THTR-300 daher der einzige Leistungsreaktor, bei dem eine 30-jährige Phase (Beginn 1997) des sicheren Einschlusses verwirklicht werden soll. Da sich die Anlage auf dem Gebiet eines größeren Kraftwerksgeländes befindet, das sowieso überwacht werden muss, ist der Aufwand für die Aufrechterhaltung des sicheren Einschlusses des THTR-300 vergleichsweise klein.

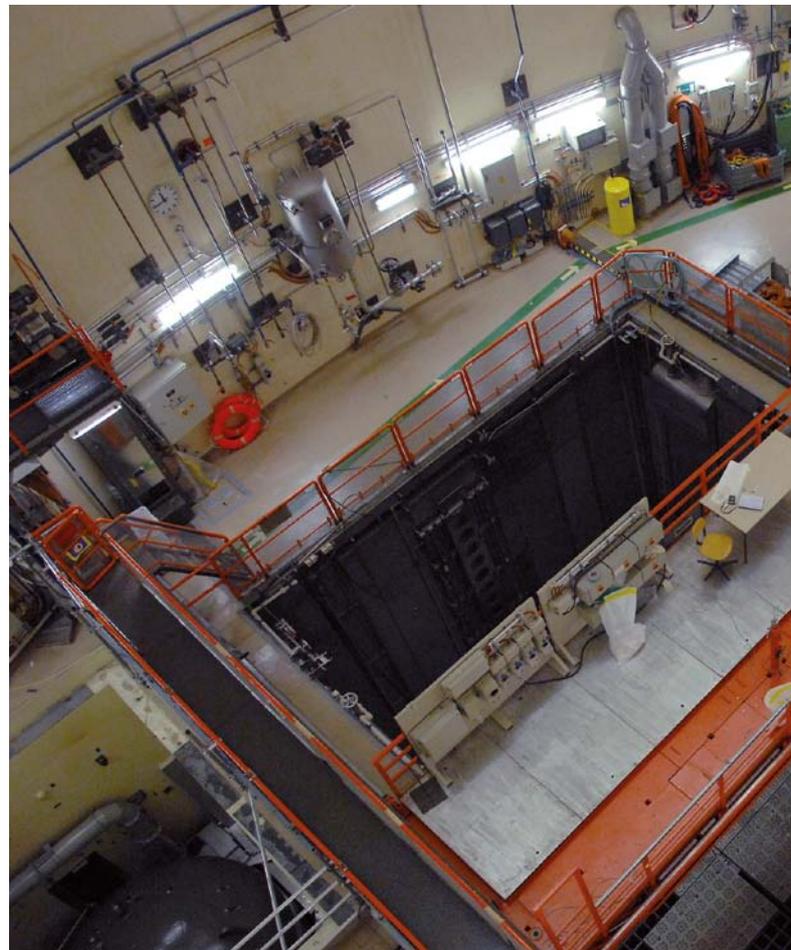
Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich

Das Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich (KMK, ► Abb. 43) 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 2001 geplanten Ausstieges Deutschlands aus der Kernenergie beschlossen, das Kernkraftwerk endgültig stillzulegen. Die Stilllegungsgenehmigung für die erste Abbauphase wurde 2004 erteilt und die Anlage wird seitdem 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. 43: Das leere Brennelementbecken des Kernkraftwerks Mülheim-Kärlich



Forschungsreaktor FR-2 in Karlsruhe

Der FR-2 – der erste deutsche Forschungsreaktor in Karlsruhe – markiert auch den Beginn des Forschungszentrums 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 (► 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.

Forschungsreaktoren 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 im Jahr 2006 vollständig abgebaut. Bei TRIGA HD II wurde der direkte Abbau im Jahre 2005 abgeschlossen.



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 Reaktorbehälter umgibt und Neutronenstrahlung und Gammastrahlung reduziert.

BMU

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz 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 Erde eingerichtet werden sollen. Ziel ist eine für sehr lange Zeiträume zuverlässige Isolierung von der Biosphäre.

ESK

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

Forschungsreaktor

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 atomrechtlichen Behörde, mit dem die Entlassung von Material, Gebäuden oder des Standorts kerntechnischer Anlagen aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes geregelt wird.

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 (► Anlagen der Ver- und Entsorgung).

Kernkraftwerk

Wärmeleistung 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 Betrieb kerntechnischer Anlagen. Diese werden vom Kerntechnischen Ausschuss 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 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 vernachlässigt 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 Umweltministerium 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 denen 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 Umweltministerium 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 Abfallgebände für eine Übergangszeit so lange zwischengelagert werden, bis sie in ein passendes Endlager verbracht werden können.

14 Bildnachweis

- Babcock Noell GmbH: Abb. 1
- Bundesarchiv, B 145 Bild-F056650-0021, Engelbert Reineke, unter Wikimedia Creative Common Lizenz, Bearbeitung GRS: Abb. 24
- E.ON Kernkraft GmbH: Abb. 12-15
- EWN Energiewerke Nord GmbH: Abb. 2, 8, 10, 16, 22, 23, 25-30, 33, 34, 36, 37 und 39-42
- Forschungszentrum Jülich GmbH: Abb. 6
- GRS mbH: Abb. 3, 4, 5, 9, 18-21, 32 und 35
- ©iStockphoto.com/hjalmeida: Abb. Titel
- KIT Karlsruher Institut für Technologie: Abb. 1 und 17
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Abb. 7
- RWE Power AG: Abb. 43
- Studsvik AB: Abb. 31 und 38
- Tim Reckmann unter Wikimedia Creative Common Lizenz, Bearbeitung GRS: Abb. 11

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

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

Forschungszentrum
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