

**Strahlenschutzaspekte
gängiger Abbau- und
Dekontaminations-
techniken**

Strahlenschutzaspekte gängiger Abbau- und Dekontaminations- techniken

Informationen und
Erfahrungen aus
der Stilllegung kern-
technischer Anlagen

Jörg Kaulard
Boris Brendebach
Erik Strub

Dezember 2010

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde-
liegenden Arbeiten wurden mit
Mitteln des Bundesministeri-
ums für Bildung und Forschung
(BMBF) unter dem Förderkenn-
zeichen 02 S 8578 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH
durchgeführt.

Die Verantwortung für den In-
halt dieser Veröffentlichung
liegt allein bei den Autoren.

Deskriptoren:

Abbau, Dekontamination, kerntechnische Anlage, Rückbau, Stilllegung, Strahlenschutz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der Auswahlprozess	5
2.1	Vorbemerkungen zum Konzept eines idealisierten Auswahlprozesses	5
2.2	Der Kontext der Auswahl von Abbau- und Dekontaminationstechniken	6
2.3	Der idealisierte Auswahlprozess	7
2.3.1	Die Abbaustrategie	8
2.3.2	Vorauswahl der Techniken	10
2.3.3	Auswahl nach Bewertung	11
2.4	Strahlenschutzaspekte im idealisierten Auswahlprozess	12
3	Beispiele zu Aspekten der Abbaustrategie	13
3.1	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)	13
3.2	Kernkraftwerk Greifswald (KGR)	14
3.3	WAK GmbH (Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe, WAK, Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage, KNK und Mehrzweckforschungsreaktor, MZFR)	15
3.4	Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1)	17
4	Merkmale von Abbau- und Dekontaminationstechniken unter Strahlenschutzgesichtspunkten	19
4.1	Technische Eignung	19
4.2	Erzeugte Abfallart und -menge	19
4.3	Eignung zum fernhantierten Einsatz	20
4.4	Eignung zum Unterwassereinsatz	21
4.5	Bewährung	21
4.6	Universalität	22
4.7	Rüst- und Wartungsaufwand	23
4.8	Trennprinzip (speziell für Abbautechniken)	23
4.9	Dekontaminationsprinzip	24
4.10	Weitere Merkmale	24

5	Beispiele zur Auswahl von Abbautechniken anhand von Merkmalen in der deutschen Stilllegungspraxis	25
5.1	Zerlegung von RDB-Einbauten im Kernkraftwerk Gundremmingen Block A (KRB-A)	25
5.2	Zerlegung des RDB mit Einbauten im Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK)	26
5.3	Zerlegung des RDB mit Einbauten im Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR)	26
5.4	Ausbau von RDB im Kernkraftwerk Greifswald (KGR)	27
5.5	Zerlegung von RDB-Einbauten im Kernkraftwerk Würgassen (KWW).....	27
5.6	Zerlegung RDB-Einbauten Kernkraftwerk Stade (KKS).....	27
6	Überblick über Abbau- und Dekontaminationstechniken	29
6.1	Gängige Abbautechniken.....	29
6.1.1	Autogenes Brennschneiden	29
6.1.2	Plasmaschmelzschnneiden (Plasma Arc Cutting)	30
6.1.3	Laserstrahlschnneiden.....	31
6.1.4	Lichtbogenschnneiden	32
6.1.5	Bügel-, Stich-, Kreis-, Bandsägen	33
6.1.6	Scheibenfräsen.....	34
6.1.7	Diamant-Seilsägen/Diamant-Kettensägen	34
6.1.8	Trennscheiben/Trennschleifen.....	35
6.1.9	Trenn- und Rohrscheren.....	35
6.1.10	Wasser-Abrasiv-Suspensionsschnneiden (Abrasive Waterjet Cutting, WASS).....	36
6.1.11	Weitere mechanische Abbauverfahren	36
6.2	Abbautechniken in der Entwicklung bzw. in der Einzelfallanwendung	37
6.3	Zusammenstellung der Literatur zu Abbautechniken	39
6.4	Überblick über Dekontaminationsverfahren	45
6.4.1	Abrasivreinigung	45
6.4.2	Schleifen, Fräsen, Nadeln.....	45
6.4.3	Chemische und elektro-chemische Verfahren.....	46
6.4.4	Einschmelzen	47

6.5	Dekontaminationstechniken in der Entwicklung bzw. in der Einzelfallanwendung	47
6.6	Zusammenstellung der Literatur zu Dekontaminationstechniken	48
7	Erfahrungen mit Dekontaminations- und Abbautechniken unter radiologischen Gesichtspunkten.....	51
7.1	Deutsche Leistungs- und Prototypreaktoren	51
7.1.1	Stilllegung des Kernkraftwerkes Greifswald (KGR)	51
7.1.2	Stilllegung des Kernkraftwerkes Würgassen (KWW).....	52
7.1.3	Stilllegung des Kernkraftwerkes Stade (KKS)	54
7.1.4	Stilllegung des Kernkraftwerkes Gundremmigen Block A (KRB-A)	56
7.1.5	Stilllegung Versuchsatomkraftwerkes Kahl (VAK)	63
7.1.6	Stilllegung der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage (KNK) – Zerlegung des Reaktortanks	64
7.1.7	Stilllegung des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR) – Zerlegung des Reaktordruckbehälters	65
7.1.8	Auswertungen der sat science GmbH bei verschiedenen Stilllegungsprojekten.....	67
7.2	Erfahrungen aus dem Betrieb von Kernkraftwerken.....	69
7.2.1	Chemische Dekontamination bei Kernkraftwerken.....	69
7.2.2	Core-Schrott-Konditionierung in Gösgen (Schweiz)	70
7.2.3	Verschiedene Erfahrungen der GNS beim Zerlegen von Kernbauteilen... 70	
7.3	Erfahrungen aus der Stilllegung deutscher Forschungsreaktoren	71
7.3.1	Stilllegung des Forschungsreaktors TRIGA HD II	71
7.3.2	Stilllegung des Forschungsreaktors FRJ-1.....	71
7.3.3	Auswertungen der sat science GmbH beim Abbau des Biologischen Schildes eines Forschungsreaktors	80
7.4	Deutsche Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufes.....	81
7.4.1	Stilllegung der WAK Karlsruhe.....	81
7.5	Sonstige Anlagen.....	83
7.5.1	Abbau eines Neutronengenerators	83

8	Zusammenfassung	85
	Danksagung	87
	Literaturverzeichnis.....	89
	Abbildungsverzeichnis.....	121
	Tabellenverzeichnis.....	123

1 Einleitung

Die Stilllegung und der Abbau stellen die letzte Phase im Lebenszyklus einer kerntechnischen Anlage dar, die gegenüber dem Betrieb neue Herausforderungen an den Betreiber der Anlage stellt. Während der Betrieb einer kerntechnischen Anlage durch einen „statischen“ oder sich nur langsam ändernden Anlagenzustand gekennzeichnet ist, unterliegt eine kerntechnische Anlage in Stilllegung und vor allem im Abbau ständigen Änderungen. Diese Änderungen stellen hohe Anforderungen an die Planungs- und Überwachungsprozesse, denn auch während Stilllegung und Abbau einer kerntechnischen Anlage sind die kerntechnische Sicherheit der Anlage und der Strahlenschutz des Personals und der Bevölkerung zu jeder Zeit zu gewährleisten.

Einen wichtigen Aspekt bei der Planung der Maßnahmen zum Abbau stellt die Auswahl geeigneter Abbau- und Dekontaminationstechniken dar. Bei der Auswahl kann heute auf Erfahrungen aus etwa 40 Jahren Stilllegung und Abbau kerntechnischer Anlagen zurückgegriffen werden. Im Rahmen dieser Stilllegungsprojekte und in intensiven Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wurde eine Vielzahl an Abbau- und Dekontaminationsverfahren und -techniken entwickelt und kontinuierlich an die Begebenheiten und Bedürfnisse laufender Stilllegungsprojekte angepasst. Damit stehen heute für fast alle technischen Fragestellungen zum Abbau einer kerntechnischen Anlage geeignete, ggf. geringfügig anzupassende Verfahren zur Verfügung. Vielfach kann bei einer konkreten Aufgabenstellung auf verschiedene Verfahren zugegriffen werden, so dass die Verantwortlichen eine Auswahl unter verschiedenen Gesichtspunkten treffen können.

Der vorliegende Fachbericht zielt darauf ab, in die Auswahl von Abbau- und Dekontaminationstechniken bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen einzuführen und im Sinne eines Überblicks in einer möglichst geschlossenen Form, technische und strahlenschutzrelevante Informationen zu Abbau- und Dekontaminationstechniken und Hinweise zur Durchführung eines Auswahlprozesses bereitzustellen.

Ausgehend von den bisherigen Erfahrungen werden hierzu gängige Abbau- und Dekontaminationstechniken zusammengefasst und im Kontext des Auswahlprozesses betrachtet. Dazu wird zunächst im vorliegenden Fachbericht ein idealisierter Prozess zur Auswahl der jeweiligen Abbau- und Dekontaminationstechnik entwickelt und anhand von Beispielen aus der Stilllegungspraxis illustriert. Es zeigt sich hierbei, dass Strahlenschutzaspekte, die einen Schwerpunkt in diesem Fachbericht ausmachen, in zweierlei Weisen bei der Auswahl der Abbau- und Dekontaminationstechniken berücksich-

tigt werden: Einerseits werden sie bei der Festlegung der Abbaustrategie zum gesamten Stilllegungsvorhaben, aber auch zum konkreten Gewerk im Sinne von Grundanforderungen berücksichtigt, wobei stets ein enger Zusammenhang mit der ingenieurmtechnischen Aufgabenstellung, d. h. der Frage nach der Machbarkeit besteht. Andererseits werden die Aspekte des Strahlenschutzes bei der detaillierten Planung zum Gewerk im eher operativen Sinne berücksichtigt und beeinflussen die konkrete Auswahl, wenn sich im Rahmen der bisherigen Planung mehrere Möglichkeiten zur Auswahl einer Technik ergeben haben oder wenn nach Auswahl einer Technik der Strahlenschutz optimiert wird, sowie die Festlegung der konkreten Strahlenschutzmaßnahmen.

Im Anschluss an die Diskussion zum Auswahlprozess werden Abbau- und Dekontaminationstechniken detaillierter beschrieben. Hierbei werden nicht nur technischen Aspekte zusammengestellt, sondern auch strahlenschutzrelevante Aspekte behandelt und mit aktuellen Publikationen referenziert. Soweit entsprechendes Datenmaterial verfügbar war bzw. im Rahmen des Vorhabens erhoben werden konnte, werden zu einzelnen Abbau- und Dekontaminationstechniken beispielhaft strahlenschutzbezogene Daten aus der nationalen und internationalen Stilllegungspraxis dargestellt.

Der Fachbericht gliedert sich im Einzelnen in die folgenden Kapitel:

- Der Einleitung in Kapitel 1 folgt in Kapitel 2 die Beschreibung des oben angesprochenen idealisierten Prozesses zur Auswahl von Abbau- und Dekontaminationstechniken.
- In Kapitel 3 wird anhand von Beispielen aus konkreten Stilllegungsprojekten illustriert, welche Rolle Strahlenschutzaspekte als Grundanforderungen im Rahmen der Entwicklung einer Abbaustrategie spielen.
- Im folgenden Kapitel 4 werden verschiedene Merkmale von Abbau- und Dekontaminationstechniken beschrieben, die bei der Auswahl berücksichtigt werden können. Hierbei wird auf die Zusammenhänge zwischen den Merkmalen und Aspekten des Strahlenschutzes eingegangen.
- In Kapitel 5 werden verschiedene Beispiele aus der Praxis beschrieben, mit deren Hilfe illustriert werden soll, wie strategische Vorgaben zum Einsatz unterschiedlicher Techniken, d. h. von Techniken mit unterschiedlichen Merkmalen, führen. Die Beispiele illustrieren damit gleichzeitig die Vielfalt der technischen Möglichkeiten, eine Aufgabenstellung zu bearbeiten.

- Im 6. Kapitel werden gängige Techniken für Abbau und Dekontamination zusammengestellt. Sie werden hierbei im Sinne einer Übersicht beschrieben und zu vorhandenen Veröffentlichungen und konkreten Stilllegungsprojekten in Bezug gesetzt. Es werden die grundsätzlichen Vor- und Nachteile unter radiologischen Gesichtspunkten angesprochen. Ziel ist es, einen möglichst umfassenden Überblick über die derzeit in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen verwendeten Techniken und die damit im Zusammenhang stehende Fachliteratur zu geben.
- Im 7. Kapitel werden schließlich radiologisch relevante Angaben abgeschlossener und noch laufender Stilllegungsprojekte systematisch zusammengestellt und in Bezug zu eingesetzten Techniken gesetzt. Grundlage bilden hierbei Daten, die in der Literatur verfügbar sind, und Daten, die in gezielten Datenerhebungen mittels hierfür entwickelter Erfassungsbögen und mit großer Unterstützung verschiedener nationaler Stilllegungsprojekte erhoben werden konnten.
- In Kapitel 8 werden die Schlüsse zu Auswahl und Einsatz von Abbau- und Dekontaminationstechniken gezogen und die wesentlichen Erkenntnisse nochmals zusammengefasst.

2 Der Auswahlprozess

In diesem Kapitel wird ein idealisierter Prozess zur Auswahl von Abbau- und Dekontaminationstechniken beschrieben. Durch die Beschreibung dieses Prozesses wird verdeutlicht, welche Kriterien und Randbedingungen in der Praxis bei der Auswahl von Techniken angewendet werden, welche Grundanforderungen und Grundsatzentscheidungen im Rahmen einer Abbaustrategie diese Auswahl häufig beeinflussen und wie Strahlenschutzaspekte hierbei berücksichtigt werden.

2.1 Vorbemerkungen zum Konzept eines idealisierten Auswahlprozesses

Die Planung der Stilllegung und des Abbaus einer kerntechnischen Anlage erfolgt in einem komplexen, iterativen Konzeptions- und Planungsprozess:

Im Idealfall wird bereits bei der Errichtung der kerntechnischen Anlage ein Stilllegungskonzept entwickelt, das die wesentlichen Maßnahmen zur Stilllegung, insbesondere auch zum Abbau einer kerntechnischen Anlage und zur Entsorgung der Abfälle, als Nachweis der grundsätzlichen Durchführbarkeit der Maßnahmen bis zur Erreichung des Stilllegungsziels darstellt /ESK 10/. Aspekte des Strahlenschutzes sowie der einzusetzenden Techniken werden in abstrakter Form soweit betrachtet, wie dies für den geforderten Nachweis bzgl. eines durchführbaren und sicheren Abbaus erforderlich ist. Im Allgemeinen findet hierbei keine Auswahl konkreter Abbau- und Dekontaminationstechniken statt.

Im Allgemeinen nach Einstellung des Betriebs der kerntechnischen Anlage wird eine Stilllegungsplanung fertig gestellt, die ein konkretes Vorgehen zu Stilllegung und Abbau einer kerntechnischen Anlage detailliert beschreibt, und in Deutschland dem jeweiligen Genehmigungsverfahren zur Stilllegung, zum Abbau oder zum sicheren Einschluss nach Atomgesetz zugrunde gelegt. Die Stilllegungsplanung beinhaltet unter anderem ein Abbaukonzept¹ mit Informationen zu den vorgesehenen Abbauschritten und Abbaumaßnahmen von Gebäuden, Systemen und Komponenten und den sofern

¹ In den ESK-Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen /ESK 10/, die die Anforderungen und Vorgaben des Stilllegungsleitfadens /BFS 09/ aus technischer Sicht ergänzen, wird der Begriff Abbaukonzept wie folgt definiert: „Darstellung der wesentlichen Maßnahmen zum Abbau einer Anlage, einschließlich deren gegenseitiger Abhängigkeiten und der voraussichtlichen zeitlichen Abfolge. Das Abbaukonzept ist Bestandteil der Stilllegungsplanung.“ Der im vorliegenden Fachbericht verwendete Begriff der Abbaustrategie (siehe Abschnitt 2.3.1) bezieht sich auf übergeordnete Überlegungen zur Herangehensweise an ein Stilllegungsprojekt.

technisch sinnvoll mehreren möglicherweise einzusetzenden Abbau- und Dekontaminationstechniken und erforderliche Hilfseinrichtungen (siehe auch /ESK 10/). Die Stilllegungsplanung bewegt sich hierbei auf einem gegenüber dem Stilllegungskonzept deutlich konkreteren Niveau, erreicht im Allgemeinen aber noch nicht die erforderliche Detailtiefe, um die konkreten Maßnahmen im Einzelnen durchführen zu können. Entsprechend wird vor Beginn der jeweiligen Abbaumaßnahme der entsprechende Teil des Abbaukonzeptes konkretisiert und hierbei – sofern entsprechende Optionen im Rahmen der Stilllegungsplanung vorgesehen wurden – die für die Durchführung der Maßnahme vorgesehene Technik ausgewählt.

Die Auswahl einer Abbau- und Stilllegungstechnik erfolgt damit im Allgemeinen in einem mehrstufigen, sehr häufig iterativen Abwägungs- und Entscheidungsprozess, bei dem auch die jeweiligen Folgen des Technikeinsatzes für den Strahlenschutz eine wichtige Rolle spielen. Im Folgenden wird dieser Prozess in idealisierter Form beschrieben.

2.2 Der Kontext der Auswahl von Abbau- und Dekontaminationstechniken

Wie bereits angedeutet, stellt die Wahl von Abbau- oder Dekontaminationstechnik einen Optimierungsprozess unter einer Vielzahl von Einflussgrößen (Kriterien und Randbedingungen) wie Zeitbedarf, Kosten, Raumbedarf, Abfallerzeugung und Wechselwirkung mit anderen Verfahren oder Anforderungen an die Logistik dar (vgl. /THI 09/). Von zentraler Bedeutung sind auch sicherheitstechnische Aspekte sowie die speziellen Eigenschaften der jeweiligen Technik und die radiologische Ausgangssituation. Wie Abb. 2.1 verdeutlicht, beeinflussen sich diese Größen wechselseitig und hängen von den Eigenschaften des spezifischen Stilllegungsprojektes ab. Der Strahlenschutz stellt hierbei einerseits einen von verschiedenen expliziten Aspekten (z. B. Raumbedarf, Zeitbedarf, entstehender Abfall, etc.) im Auswahlprozess dar, er wird andererseits aber auch von den verschiedenen Faktoren beeinflusst und beeinflusst diese auch selbst. Beispielsweise kann es zunächst aus Gründen des Strahlenschutzes günstig sein, größere Abfallmengen in Kauf zu nehmen, wenn dadurch Strahlenexpositionen vermieden werden können, dabei muss aber berücksichtigt werden, ob dadurch längere Bearbeitungszeiten und damit ggf. höhere Dosen bei der späteren Konditionierung anfallen. Auch das Entfernen kompletter Großkomponenten aus einer Anlage kann aus Sicht des Strahlenschutzes von Vorteil sein, weil dann keine Zerlegung in Einbaulage

stattfinden muss, die aufgrund der baulichen Randbedingung dosisintensiv sein kann. Andererseits entstehen dadurch zusätzliche logistische und technische Anforderungen an eine spätere Nachbearbeitung.

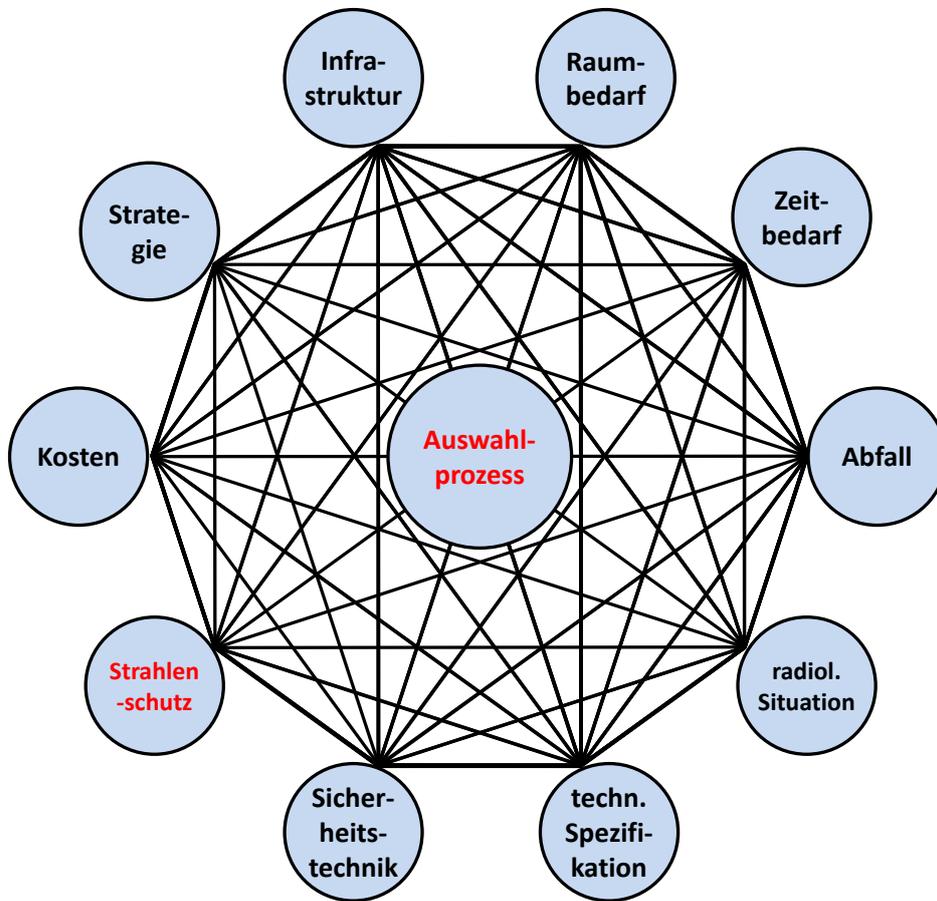


Abb. 2.1: Der Kontext des Auswahlprozesses

2.3 Der idealisierte Auswahlprozess

Die nachfolgende Abb. 2.2 zeigt einen auf Grundlage bisheriger Erfahrungen abgeleiteten idealisierten Prozess zur Auswahl der Abbau- und Dekontaminationstechnik. Die aufgeführten Begriffe und einzelnen Prozessschritte dieses idealisierten Auswahlprozesses werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

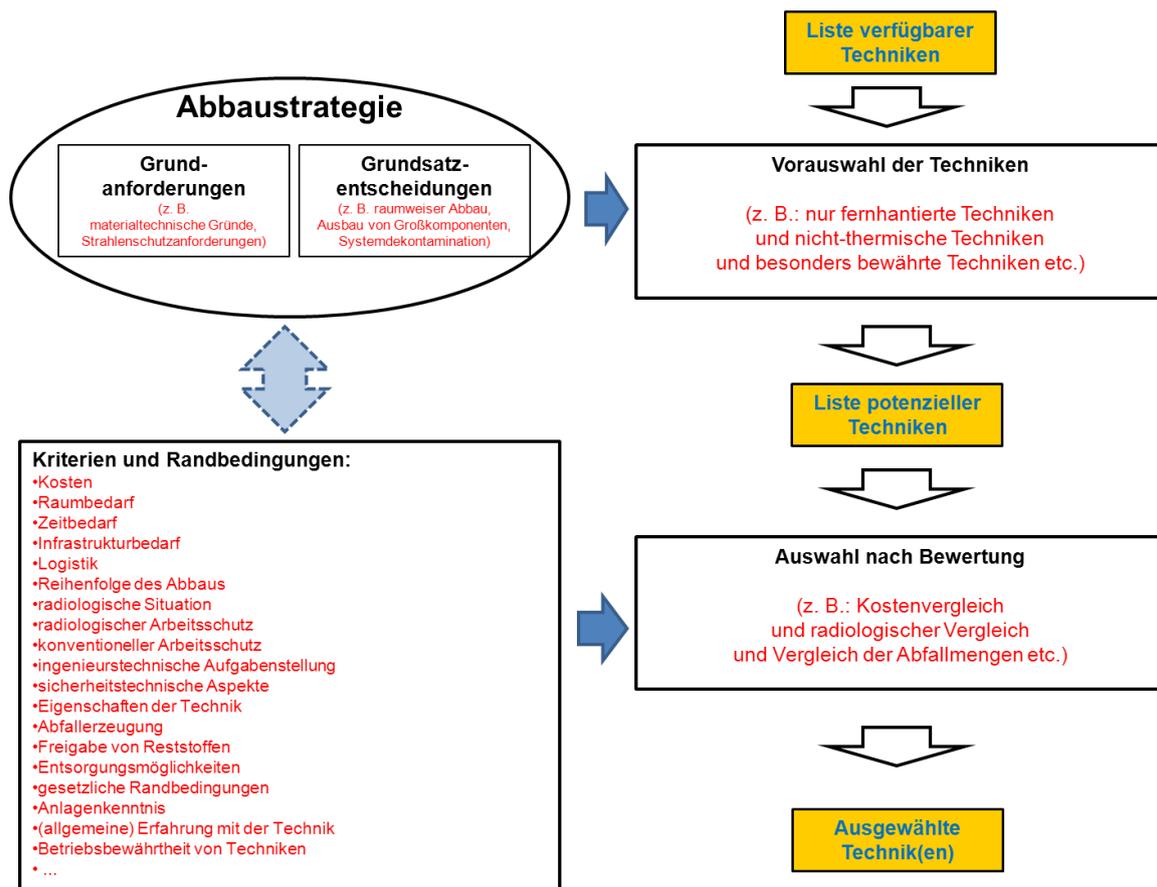


Abb. 2.2: Schematische Darstellung des idealisierten Prozesses zur Auswahl von Abbautechniken und Dekontaminationstechniken und –verfahren bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

2.3.1 Die Abbaustrategie

Von zentraler Bedeutung für den idealisierten Auswahlprozess ist zunächst die Abbaustrategie. Der Begriff der Abbaustrategie meint hier im weiten Sinne die Menge der Entscheidungen, die das grundsätzliche Vorgehen bei der Stilllegung beeinflussen. Insbesondere geht der Begriff der Abbaustrategie über die reine „Stilllegungsstrategie“ hinaus, also der Entscheidung, ob eine Anlage nach Einstellung des Betriebes mehr oder weniger unmittelbar abgebaut wird oder zunächst in einen sicheren Einschluss überführt und zu einem späteren Zeitpunkt abgebaut wird.

Bei der Festlegung einer Abbaustrategie können dabei zunächst einige grundsätzliche Erwägungen von Bedeutung sein, die in **Grundanforderungen** und **Grundsatzentscheidungen** unterschieden werden.

- **Grundanforderungen**

Einerseits bestehen technische, regulatorische und radiologische Grundanforderungen. Dies können beispielsweise materialtechnische Gründe (nicht alle Techniken sind für die Zerlegung eines bestimmten Materials geeignet), oder aus den radiologisch relevanten Randbedingungen erwachsende Gründe sein (in sehr hohen Ortsdosisleistungsfeldern kommen praktisch nur fernhantierbare Techniken in Frage). Ebenso können Anforderungen des technischen Regelwerks, insbesondere hinsichtlich des Nachweises einer Betriebsbewährung, die Auswahl begrenzen. Im Rahmen der Abbaustrategie stellt der Strahlenschutz zunächst eine dieser Grundanforderungen dar.

- **Grundsatzentscheidungen**

Andererseits können aus strategischen Erwägungen des Betreibers bestimmte Grundsatzentscheidungen getroffen werden, die ihrerseits die Auswahl der Techniken beeinflussen. Beispielsweise kann die strategische Entscheidung für den Einsatz von ausschließlich mechanischen Trennverfahren oder von solchen Techniken, die nur von einem speziellen Dienstleister angeboten werden, dazu führen, dass alternative Techniken a priori ausgeschlossen werden, die unter ingenieurtechnischen Gesichtspunkten ebenfalls für den Abbau eines Systems oder einer Komponente geeignet wären. Ebenso kann die konsequente Durchführung einer Systemdekontamination (als Grundsatzentscheidung) nachfolgend den Einsatz von Techniken ermöglichen, die ohne entsprechende Maßnahmen nicht einsetzbar wären.

Bei der Festlegung von Grundanforderungen und dem Fällen von Grundsatzentscheidungen werden verschiedene Kriterien und Randbedingungen berücksichtigt. Abb. 2.2 listet hierzu verschiedene Kriterien und Randbedingungen auf, die je nach Anlage verschiedene oder auch keinerlei Bedeutung für die Festlegung der Grundanforderungen und das Fällen der Grundsatzentscheidungen besitzen können. Typische Randbedingungen sind in etwa gesetzliche Randbedingungen, vorhandene Entsorgungsmöglichkeiten oder Art und Menge der erwarteten freizugebender Materialien.

Zum Beispiel sind die gesetzlichen Randbedingungen im Allgemeinen gleich, d. h. sie stellen nicht variable Grundanforderungen an die Abbaustrategie. Die radiologischen Randbedingungen hingegen sind in hohem Maße von der Betriebshistorie und weiteren Faktoren abhängig und daher in aller Regel von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich. Wenn bestimmte Grundsatzentscheidungen getroffen wurden, können sich

aus den Kriterien und Randbedingungen weitere Anforderungen ergeben, die in der Abbaustrategie berücksichtigt werden müssen. Beispiele für diesen Zusammenhang sind:

- Wenn die Randbedingungen einen manuellen Abbau erlauben, ist es möglich, dass die Grundsatzentscheidung vorgenommen wird, keine fernhantierten Techniken einzusetzen: Die Abbaustrategie (z. B. Reihenfolge des Abbaus oder die Logistik) wird unter dieser Voraussetzung festgelegt.
- Wenn die Grundsatzentscheidung für eine Entfernung von Großkomponenten getroffen wurde, dann werden die genauen logistischen Anforderungen stark von z. B. geometrischen Randbedingungen und der Betriebshistorie abhängen.

Die Abbaustrategie einer spezifischen Anlage ergibt sich also im Zusammenspiel von Grundanforderungen, Grundsatzentscheidungen und zu berücksichtigenden Kriterien und Randbedingungen. Dabei hat das hier beschriebene Vorgehen stark idealisierenden Charakter; in der Realität wird es sich oft um einen iterativen Prozess handeln. Falls sich beispielsweise durch eine mögliche Abbaustrategie die beschriebene Vorauswahl der Techniken dazu führt, dass sich die Durchführung von Arbeiten als unmöglich erweist, wird dies notwendigerweise zu einer erneuten Anpassung der Abbaustrategie führen. Mitunter kann auch die Entwicklung und Erprobung neuer, speziell auf den Anforderungsfall gerichteter Techniken in Betracht gezogen werden. Meist wird jedoch eine Adaption bereits erprobter Techniken bevorzugt.

Beispielhaft werden einige Aspekte von Abbaustrategien und Randbedingungen aus der deutschen Stilllegungspraxis in Kapitel 3 geschildert.

2.3.2 Vorauswahl der Techniken

Ausgehend von der Abbaustrategie und einer Liste verfügbarer Techniken² kann sich im idealisierten Auswahlprozess eine erste Vorauswahl derjenigen Techniken ergeben

² Kapitel 6 stellt eine Liste gängiger Abbau- und Dekontaminationstechniken mit entsprechenden Literaturverweisen zusammen. Diese Liste und die zugehörigen Publikationen können Ausgangspunkt für die endgültige Auswahl einer bestimmten Abbautechnik sein. Zugehörige radiologische Daten aus Anwendungen in der Praxis sind in Kapitel 7 zusammenfassend dargestellt. Dabei werden sowohl Daten aus der in Kapitel 6 angeführten Literatur dokumentiert als auch Daten, die im Rahmen dieses Vorhabens bei deutschen Anlagen erhoben wurden.

(**Liste potenzieller Techniken** in Abb. 2.2), die bei den späteren Maßnahmen zum Abbau oder zur Dekontamination eingesetzt werden könnten. Damit werden also alle Techniken identifiziert, die die Abbaustrategie unterstützen und im Einklang mit den Grundanforderungen und Grundsatzentscheidungen stehen, so dass im Idealfall eine breite Palette von Techniken – auch unter Gesichtspunkten des Strahlenschutzes – zur Verfügung stehen kann.

Bei dieser Vorauswahl der Techniken werden in der Regel keine quantitativen Gegenüberstellungen mehrerer technischer Optionen vorgenommen. Ausschlaggebend ist häufig vielmehr, dass auf Grund der Abbaustrategie nur Techniken mit bestimmten Grundeigenschaften (**Merkmale**) für weitere Betrachtungen in Frage kommen (beispielsweise solche mit der Möglichkeit zum fernhantierten Einsatz). Verschiedene dieser Merkmale werden in Kapitel 4 dargestellt. Die konkrete Anwendung dieser Merkmale bei Stilllegungsprojekten in der Praxis wird in Kapitel 5 beispielhaft gezeigt.

2.3.3 Auswahl nach Bewertung

Im Rahmen der Konkretisierung der Abbaumaßnahmen findet dann die Auswahl der konkret einzusetzenden Technik statt. Hierbei wird aus der Vorauswahl potenzieller Techniken diejenige ausgewählt, die unter Berücksichtigung und Abwägung verschiedener Kriterien und Randbedingungen geeignet erscheint. Bei dieser Auswahl können durchaus zu einzelnen oder mehreren Kriterien qualitative oder quantitative Vergleiche durchgeführt werden, die eine Bewertung und damit die Auswahl der Techniken unterstützen sollen. So kann sich beispielsweise eine bestimmte Abbautechnik im direkten Vergleich mit einer anderen Technik unter Gesichtspunkten der erforderlichen Abbauleistung oder unter Kostengesichtspunkten als vorteilhaft erweisen.

Die Auswahl der Techniken auf Grundlage einer Bewertung führt zur sogenannten **Liste der ausgewählten Techniken** (s. Abb. 2.2). In diesem Prozessschritt können bereits Aspekte des operativen Strahlenschutzes, insbesondere zur Optimierung im Sinne des ALARA-Prinzips³, berücksichtigt werden. Die Festlegung von Maßnahmen zum

3 ALARA (as low as reasonably achievable): Das ALARA-Prinzip bezeichnet im Strahlenschutz die Anforderung, die Strahlenbelastung des Personals unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten (§ 6 Abs. 2 StrlSchV).

Strahlenschutz des Personals⁴ findet darüber hinaus stets auch im Rahmen der konkreten Arbeitsplanung zum jeweiligen Gewerk und der zugehörigen Strahlenschutzplanung statt.

2.4 Strahlenschutzaspekte im idealisierten Auswahlprozess

Wie bereits in den vorigen Abschnitten erwähnt, können Strahlenschutzaspekte in verschiedener Weise Berücksichtigung im idealisierten Auswahlprozess finden:

1. Bei der Vorauswahl der Techniken werden Grundanforderungen betrachtet, in die Strahlenschutzaspekte in grundlegender Weise eingehen können.
2. Bei der Auswahl einer oder mehrerer Techniken für ein bestimmtes Gewerk (und bei der nachfolgenden Arbeitsplanung) kann eine detaillierte Bewertung der jeweiligen Techniken unter Strahlenschutzgesichtspunkten stattfinden.
3. Nach Auswahl der konkret einzusetzenden Technik werden die Maßnahmen zum Strahlenschutz des Personals – auch unter Aspekten des ALARA-Prinzips – festgelegt.

Generell ist dabei eine Optimierung des Strahlenschutzes bei verschiedenen Techniken möglich; nur in Ausnahmefällen wird eine bestimmte Abbau- oder Dekontaminationstechnik aus radiologischen Gründen zwingend geboten sein. Vielmehr können verschiedene Vorgehensweisen zu Strahlenexpositionen vergleichbarer Größenordnung führen. Entsprechend werden oft ingenieurstechnische Gründe für die Auswahl entscheidend sein.

⁴ Im Allgemeinen zielen die Maßnahmen zum Strahlenschutz auch stets auf den Schutz der Bevölkerung. Bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen ist das Aktivitätsinventar in der Regel jedoch gegenüber Anlagen im Betrieb wesentlich verringert, so dass das Gefährdungspotenzial bei einer möglichen Freisetzung entsprechend geringer ausfällt. Daher beschränkt sich der vorliegende Fachbericht in den gewählten Formulierungen auf die konkreten Maßnahmen zum Schutz des Personals.

3 Beispiele zu Aspekten der Abbaustrategie

Nachfolgend werden verkürzt verfügbare Informationen zu einzelnen Stilllegungsprojekten hinsichtlich eines möglichen Auswahlprozesses zum Einsatz von Abbau- und Dekontaminationstechniken beschrieben. Ziel dieser Beschreibungen ist die Illustration des vorher beschriebenen Auswahlprozesses auf einem entsprechend abstrakten Niveau. Nicht beabsichtigt ist hierbei, den Auswahlprozess in jedem Detail nachzuzeichnen, da dies dem einführenden Charakter dieses Fachberichtes nicht entsprechen würde. Vielmehr soll erläutert werden, wie einzelne Aspekte der jeweiligen Abbaustrategien die Vorauswahl der Techniken beeinflussen. Teilweise wird kurz auf radiologische Konsequenzen eingegangen.

3.1 Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)

Beim Reaktor der AVR handelt es sich um einen Hochtemperaturreaktor, der mit Grafitbrennelementen und Heliumkühlung betrieben wurde. Die thermische Nennleistung des AVR betrug 46 MW, die elektrische Bruttoleistung belief sich auf 15 MW. Nach 21-jährigem Leistungsbetrieb erfolgte am 31. Dezember 1988 die Einstellung des Betriebes.

Randbedingungen und Aspekte der Abbaustrategie

Aus der Bauweise des AVR ergeben sich für den Abbau und den Strahlenschutz besondere Voraussetzungen. Zum einen besteht die spezielle Problematik des kontaminierten Grafits bzw. Grafitstaubs im gesamten Primärkreis, andererseits weisen auch die Nuklidvektoren (Leitnuklid Sr-90 mit β -Strahlung ohne assoziierte γ -Linie, Tritiumproblematik) andere Eigenschaften auf als bei Leichtwasserreaktoren. Damit ergibt sich als eine Grundanforderung an die Abbaustrategie, mit diesem messtechnisch schwierig zu erfassenden Nuklidvektor umzugehen. Ein wichtiges Element der Abbaustrategie bei AVR war daher, alle verwendeten Techniken so zu modifizieren, dass die Ausbreitung oder Verschleppung der (schwer messbaren) Kontamination weitestgehend ausgeschlossen werden konnte.

Beispiele für eingesetzte Techniken

Bei der Umsetzung des oben genannten Elements der Abbaustrategie wurde beispielsweise beim Schneiden von kontaminierten Rohren u. a. wie folgt vorgegangen:

Rohrleitungen wurden vor dem Schnitt gequetscht, um ein Austreten von Kontaminationen zu vermeiden. Dickere Rohre wurden vor dem Schneiden ausgeschäumt (mit Hilfe eines Ballons und 2-Komponenten-Kunststoff). Feuchtigkeits- oder flüssigkeitsgefüllte Rohre (mögliche Tritiumbelastung) wurden teilweise vor dem Schnitt eingefroren (vgl. Eissägen bei KRB-A; /EIC 98/, /STE 97°).

3.2 Kernkraftwerk Greifswald (KGR)

Beim KGR handelt es sich um eine große Anlage von insgesamt fünf Kernkraftwerksblöcken. Die ersten vier Blöcke waren als Doppelblockanlagen mit Reaktoren vom Typ WWER-440/W-230 errichtet worden und nahmen im Zeitraum von 1973 bis 1979 den Betrieb auf. Block 5 war vom Reaktortyp WWER-440/W-213 und ist über den Probebetrieb nicht hinausgekommen. Weitere drei Blöcke des Typs WWER-440/W-213 befanden sich in unterschiedlichen Stadien der Montage, als am 17.12.1990 entschieden wurde, die Anlage stillzulegen.

Randbedingungen und Aspekte der Abbaustrategie

Grundsätzlich wurde beim KGR entschieden, Großkomponenten einer Abklinglagerung zu unterziehen. Dafür wurde das Zwischenlager Nord eingerichtet, in dem u. a. die Reaktordruckbehälter aus dem KGR eingelagert wurden. Die grundlegende Überlegung ist dabei, zunächst möglichst große Teile der Anlagen zu entfernen und sie an einem anderen Ort zu zerlegen.

Konsequenzen der Abbaustrategie beim KGR

Der Ausbau von Großkomponenten verursacht in der Konsequenz zunächst eine Strahlenexposition beim Ausbau, allerdings kann dann in einer optimierten Umgebung (auch unter Strahlenschutzaspekten) und zu einem späteren Zeitpunkt weiter zerlegt werden. Dies ermöglicht bessere radiologische Bedingungen als eine Zerlegung in Einbaulage mit möglicherweise räumlich ungünstigen Verhältnissen und durch andere Komponenten verursachten Dosisleistungsfeldern. Beispielsweise wurden bei Block 1 und 2 die Reaktorkreisläufe nur in 6 m-Stücke zerlegt (zum Transport in 20-Fuß-Containern). Die resultierende Dosis für das Personal war etwa halb so hoch wie bei den entsprechenden Arbeiten bei Block 3 und 4, wo die Zerlegung in kleinere Teile vor Ort stattfand. Grund war eine Änderung der Abbaustrategie, die eine momentane Kosteneinsparung mit einer momentanen Dosisersparnis verbindet. Die Voraussetzung

hierfür ist das Vorhandensein von großen Lagerkapazitäten, wie sie mit dem Zwischenlager Nord gegeben sind.

Das angeführte Beispiel belegt, dass ein Zusammenhang zwischen Techniken und aufgetretenen Dosen stets im Rahmen der gesamten Abbaustrategie betrachtet werden muss. Im Fall des KGR sind die bisher aufgetretenen Dosen maßgeblich von der Entscheidung beeinflusst, die Komponenten nicht in ihrer Einbaulage zu zerlegen. Die Einsparungen von Dosis sind aber schwer zu ermitteln: Zwar wurde bei den Blöcken 1 und 2 nur etwa die halbe Dosis verursacht wie bei den Blöcken 3 und 4, andererseits ist für das Material noch eine später erfolgende Nachzerlegung nötig, deren resultierende Dosis im Moment noch nicht beziffert werden kann.

3.3 WAK GmbH (Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe, WAK, Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage, KNK und Mehrzweckforschungreaktor, MZFR)

Die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe Rückbau- und Entsorgungs-GmbH (WAK GmbH) ist verantwortlich für die Stilllegung der Reaktoren (MZFR und KNK) des **Karlsruher** Instituts für Technologie (KIT, ehemals Forschungszentrum Karlsruhe) sowie die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK). Beim MZFR handelte es sich um einen schwerwasser-gekühlten und -moderierten Druckwasser-Reaktor mit einer elektrischen Bruttoleistung von 57 MW, der von 1965 bis 1984 betrieben wurde und u. a. als Testreaktor zur Entwicklung von Schwerwasser-Systemen und zur Erprobung von Brennelementen diente. Neben der Stromerzeugung wurde ein Teil der erzeugten Wärme zur Gebäudeheizung genutzt. Die KNK war ein Versuchsreaktor mit 21 MW elektrischer Leistung und diente nach einem Umbau ab 1977 bis zur Betriebseinstellung im Jahre 1991 der Erprobung der Schnellen-Brüter-Technologie. Die WAK-Anlage wurde als Pilotanlage für die kommerzielle Wiederaufarbeitung von Brennelementen in Wackersdorf konzipiert. In der Zeit von 1971 bis zur Betriebseinstellung am 30.06.1991 wurden ca. 200 Tonnen Kernbrennstoffe aus Versuchs- und Leistungsreaktoren aufgearbeitet.

Randbedingungen und Aspekte der Abbaustrategien

Nach den Erfahrungen der Stilllegungsprojekte in Karlsruhe war eine wichtige Grundentsatzentscheidung stets die Wahl zwischen fernhantierten/semi-fernhantierten/nicht fernhantierten Techniken. Dies war eine Folge der Grundanforderungen bei den drei

Anlagen, die sich jeweils aus den speziellen radiologischen und ingenieurstechnischen Randbedingungen ergaben:

- Im Fall der WAK war dabei die grundsätzliche Vorauswahl der Abbautechniken vornehmlich durch Strahlenschutzaspekte geprägt. Die Dosisleistungen waren so hoch, dass sich die Anwendung anderer als fernhantierter Techniken vom radiologischen Standpunkt her verbot. Die Verwendung fernhantierter Techniken stellte also eine Grundanforderung dar.
- Im Fall der KNK ist die Abbaustrategie durch sicherheitstechnische Aspekte geprägt. Durch das Vorhandensein von metallischem Natrium in Primär- und Sekundärkreislauf müssen alle Arbeiten unter Inertgasatmosphäre und fernhantiert stattfinden, was die Vorauswahl der Techniken einschränkt und eine Grundsatzentscheidung zugunsten fernhantierter Techniken zur Folge hatte. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse darf außerdem der Raumbedarf der verwendeten Techniken nicht groß sein. Die Randbedingungen führten zu einer engen Vorauswahl der Techniken und zu einer Entwicklung von Spezialwerkzeugen.
- Beim MZFR handelt es sich um ein Stilllegungsprojekt, dessen Planung bereits in den 1980er Jahren begonnen wurde. Zu Beginn der Stilllegung kamen lediglich Plasmaschneiden und Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden (WASS) als bewährte fernhantierbare Techniken in Frage, während das Spektrum verfügbarer Techniken bei neueren Stilllegungsprojekten wesentlich breiter ist. Tendenziell hatten beim MZFR thermische Verfahren Vorrang wegen der geringeren Rückstellkräfte und der damit verbundenen besseren Fernhantierbarkeit mit dem vorhandenen Trägersystem.

Radiologische Aspekte

Speziell besteht bei allen Anlagen in Karlsruhe die Möglichkeit, Komponenten zur Nachzerlegung/Konditionierung an die hierauf spezialisierte Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB) abzugeben. Hierdurch wird in effizienter Weise – auch unter Gesichtspunkten des Strahlenschutzes – Nutzen aus bestehenden technischen Einrichtungen zur Nachzerlegung und Konditionierung und hierzu vorliegenden Erfahrungen gezogen.

3.4 Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1)

Der FRJ-1 auf dem Gelände des Forschungszentrums Jülich GmbH wurde von Oktober 1963 bis März 1985 betrieben. Beim FRJ-1 handelte es sich um einen Schwimmbadreaktor mit einer ursprünglichen Leistung von 5 MW, die ab September 1971 auf 10 MW gesteigert wurde.

Randbedingungen und Aspekte der Abbaustrategie

Dem Charakter eines Forschungsreaktors entsprechend sind die Dosisleistungsfelder wesentlich schwächer als bei einem Leistungsreaktor, auch entfallen diejenigen Reaktorkomponenten, die für einen Leistungsbetrieb benötigt würden. Insgesamt ist dadurch der Abbau relativ überschaubar und die räumlichen Randbedingungen günstig (relativ große Reaktorhalle). Dies ermöglichte auch das gewählte Vorgehen. Beim Abbau des FRJ-1 wurde die Grundsatzentscheidung getroffen, möglichst universell vorzugehen. Aspekte der resultierenden Abbaustrategie waren daher die Verwendung möglichst variabler Werkzeuge zum Abbau und die identische Ausbildung der relativ kleinen beteiligten Personengruppe.

Verwendete Techniken

Für den Abbau des Reaktorblocks wurde ein hydraulischer Bagger gewählt. Im Unterschied zur Abbaustrategie z. B. bei der WAK war dabei die Verwendung von fernhantierten Techniken aber keine Grundanforderung, da beim FRJ-1 ein viel niedrigeres Dosisniveau vorlag. Vielmehr erfüllte das System die Grundanforderung der Universalität. Die Zerlegung von thermischem Schild, biologischem Schild und die Nachzerlegung der Strahlrohre konnten mit dem gleichen Werkzeug erfolgen.

Radiologische Konsequenzen der Abbaustrategie beim FRJ-1

Die Verwendung fernhantierter Techniken minimiert die Personendosen, falls keine aufwändigen Rüst- und Wartungsarbeiten ausgeführt werden müssen. Im konkreten Fall war die Ortsdosisleistung bei den späteren Abbauschritten so niedrig, dass in der Praxis die Bedienung sogar aus der Reaktorhalle erfolgen konnte, was durch den möglichen Sichtkontakt die Arbeitsweise erleichterte.

4 Merkmale von Abbau- und Dekontaminationstechniken unter Strahlenschutzgesichtspunkten

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, stehen am Beginn der Entscheidungen für bestimmte technische Lösungen in der Praxis grundsätzliche Überlegungen im Rahmen der Abbaustrategie, die die Vorauswahl von Techniken einschränken können. Darüber hinaus kann je nach den vorliegenden Randbedingungen und der Aufgabenstellung eine ganze Gruppe von Techniken besonders geeignet oder besonders ungeeignet sein.

Im Folgenden werden einige Merkmale diskutiert, nach denen Techniken gruppiert werden und die vor allem bei der ersten Einschränkung der Auswahl berücksichtigt werden können. In der Beschreibung zu den Merkmalen ist ein erster Hinweis auf technikbezogene Aspekte des Strahlenschutzes enthalten, der der Einschätzung hinsichtlich radiologischer Konsequenzen dienen soll.

4.1 Technische Eignung

Grundmerkmal einer Technik ist ihre Eignung, die Aufgabenstellung in einem konkreten Gewerk erfüllen zu können – kann also mit der vorgesehenen Technik beispielsweise grundsätzlich eine Rohrleitung abgetrennt werden. Die Anforderungen an das Grundmerkmal ergeben sich dabei vor allem aus der ingenieurstechnischen Anforderung im jeweiligen Gewerk und führen dazu, dass Techniken (d. h. Werkzeuge und Verfahren) aus dem konventionellen Bereich ebenso wie Sonderentwicklungen zum Einsatz kommen können.

Der Zusammenhang der technischen Eignung mit Aspekten des Strahlenschutzes wird in aller Regel trivial sein – ist die Anwendung einer speziellen Technik für ein bestimmtes Gewerk der einzige technisch gangbare Weg, müssen die Strahlenschutzmaßnahmen entsprechend angepasst werden. Stehen mehrere Techniken zur Wahl, werden radiologische Kriterien eine Rolle bei der Auswahl nach Bewertung spielen (s. Abb. 2.2).

4.2 Erzeugte Abfallart und -menge

Weiteres Merkmal einer Technik mit Blick auf Aspekte des Strahlenschutzes sind erzeugte Abfallart (Flüssigkeiten, Späne, Aerosole ggf. mit spezifischer Korngrößenver-

teilung usw.) und Abfallmenge sowohl des Primärabfalls wie auch des entstehenden Sekundärabfalls⁵.

Eine erste Bewertung einer Technik unter Gesichtspunkten dieses Merkmals ist im abstrakten Raum schwer möglich. Je nach angedachtem Vorgehen zur Zerlegung von Komponenten (z. B. Abfallgebindegerechte Zerlegung vor Ort oder Zerlegung auf größtmögliche, noch handhabbare Teilkomponenten) kann beispielsweise der Einsatz von Techniken mit höherem Abfallaufkommen sachgerecht sein, wenn hierdurch Expositionen bei Nachzerlegungen vermieden werden können oder die Logistik alternative Vorgehen nicht erlaubt. Dies steht wiederum im Zusammenhang mit infrastrukturellen Gegebenheiten, also z. B. dem Vorhandensein einer „aktiven Werkstatt“ am Anlagenstandort.

4.3 Eignung zum fernhantierten Einsatz

Ein weiteres Merkmal einer Technik ist ihre Eigenschaft, fernhantiert⁶ eingesetzt zu werden. Von Bedeutung ist dieses Merkmal dann, wenn die Bedingungen eines Gewerkes dies erforderlich machen.

Fernhantiert einsetzbare Techniken sind aus radiologischer Sicht vor allem in den Fällen zu bevorzugen oder zwingend einzusetzen, in denen bei einer manuellen Durchführung der Abbau- oder Dekontaminationsarbeit vor Ort ein Aufenthalt von Personen in hohen oder sehr hohen Strahlenfeldern erforderlich wäre. Allerdings sollte bei einer radiologischen Bewertung berücksichtigt werden, ob und welche Wartungsarbeiten zu erwarten sind und welche Expositionen damit einhergehen. Ebenso sollten unter Strahlenschutzgesichtspunkten Aspekte des Vorgehens bei Fehlfunktion und Ausfall der fernhantierten Technik bewertet werden. Je nach Gewerk können bei einem fernhan-

5 Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten der Definition von Sekundärabfall. Sekundärabfall kann Verschnitt, Späne, Strahlmittel, Medien usw. umfassen. Teilweise werden Strahlmittel und Medien aber auch als Tertiärabfälle bezeichnet; teilweise werden auch Verbrauchsmittel wie Handschuhe, Wischtücher etc. dem Sekundärabfall zugerechnet. Im Rahmen des vorliegenden Fachberichts wird auf diese Unterscheidungsmöglichkeiten nicht näher eingegangen.

6 In der Stilllegungspraxis werden die Begriffe fernhantiert, fernbedient und ferngesteuert teilweise synonym verwendet, obwohl sie unterschiedliche Sachverhalte bezeichnen können, je nachdem ob z. B. reine Verlängerungswerkzeuge zur Vergrößerung des Abstands zwischen Person und zu bearbeitenden Werkstück verwendet werden oder ob die Technik z. B. über mechanische oder elektronische Schnittstellen bedient wird. Im vorliegenden Fachbericht wird der Begriff fernhantiert als Oberbegriff verwendet, um zum Ausdruck zu bringen, dass die Person durch den Einsatz einer entsprechenden Technik sich nicht im unmittelbaren Strahlenfeld aufhalten muss.

tierten Einsatz manuelle Vor- und Nacharbeiten durchzuführen sein, die ebenfalls bei einer radiologischen Bewertung des fernhantierten Einsatzes berücksichtigt werden sollten.

4.4 Eignung zum Unterwassereinsatz

Eng verknüpft mit der Eignung zum fernhantierten Einsatz und hierauf aufbauend ist die Eignung zum Unterwassereinsatz. Die Notwendigkeit zum Unterwassereinsatz ergibt sich dabei vor allen Dingen aus den radiologischen Randbedingungen (z. B. der Notwendigkeit zur Abschirmung).

Viele Techniken erfüllen diese Bedingung grundsätzlich. Allerdings ist im Einzelfall zu prüfen, ob sich während des Einsatzes die Bedingungen des Wassers derart verändern (z. B. Eintrübung des Wassers), dass die fernhantierten Arbeiten beeinträchtigt werden bzw. ob sich daraus eine Verlängerung oder Erhöhung des Grades der Komplexität der Arbeiten ergeben. Je nach den Randbedingungen kann z. B. die Dauer der Arbeiten oder die Notwendigkeit zusätzlicher Arbeitsschritte innerhalb des Strahlenfeldes ein entscheidender Gesichtspunkt für die radiologische Bewertung sein, ähnlich wie bei fernhantierbaren Techniken.

4.5 Bewährung

Ein wichtiges Merkmal von Techniken oder Verfahren ist auch ihre Bewährung, insbesondere wenn spezifische Erfahrungen innerhalb der Anlage existieren. Sind Techniken bekannt und erprobt, wirkt sich das positiv auf die technische und logistische Arbeitsplanung aus und erlaubt eine erfahrungsbasierte Bewertung von Strahlenschutzaspekten.

In der Praxis liegt bei der Bewertung der Bewährung die Schwierigkeit vor allen Dingen bei der Prüfung, ob die Randbedingungen des konkreten Gewerkes im Wesentlichen mit denjenigen übereinstimmen, unter denen die Bewährung gezeigt werden konnte, so dass eine Übertragung auf das konkrete Gewerk gerechtfertigt ist. In Folge einer solchen Prüfung können durchaus Techniken ausgeschlossen werden, die aufgrund ihrer bisherigen Bewährung vermeintlich für einen Einsatz in Frage gekommen wären.

In diesem Zusammenhang hat die Praxis gezeigt, dass es vorteilhaft sein kann, konventionelle Techniken, ggf. nach Anpassung, einzusetzen, da zu diesen üblicherweise umfassende Erfahrungen vorliegen, sie technisch ausgereift sind, häufig ohne hohen Anpassungsaufwand auf ihren konkreten Einsatz vorbereitet werden können, ggf. strahlenschutzrelevante Reparatur- und Wartungsarbeiten minimiert oder vermieden werden können.

4.6 Universalität

Ein weiteres Merkmal stellt die Eigenschaft einer Technik dar, in verschiedenen technischen Zusammenhängen eingesetzt werden zu können. Hierunter wird die Eigenschaft verstanden,

- nicht nur in einem, sondern in mehreren Gewerken eines Stilllegungsprojektes eingesetzt werden zu können, und
- für verschiedene Detailarbeiten in einem Gewerk (z. B. Trennen von verschiedenen Werkstoffen) verwendet werden zu können.

Der Einsatz einer solch universellen Technik kann u. a. dazu führen, dass Ausbildung und Erfahrungsaufbau auf die Anwendung weniger Techniken konzentriert, die Vorhaltung erforderlicher Ersatzteile oder Austauschgeräte optimiert und die Kompetenzen im Einsatz kontinuierlich gesteigert werden können. Die Vorteilhaftigkeit des Einsatzes einer solchen Technik kann aber erfahrungsgemäß nur im konkreten Fall überprüft werden. So kann der letztgenannte Aspekt sich auf Aspekte des Strahlenschutzes, insbesondere bei Techniken mit umfangreicheren manuellen Vor- und Nachbereitungszeiten in Bereichen mit höherer Dosisleistung oder höherem Kontaminationsniveau günstig auswirken.

Bei Einsatz in Bereichen mit hohen Kontaminationen zeigt sich allerdings auch, dass bei Wechsel des Einsatzortes ggf. umfangreichere Dekontaminationen durchgeführt werden müssen, so dass dann abzuwägen ist, ob der Vorteil des Wiedereinsatzes den entsprechenden Aufwand, ggf. auch unter Gesichtspunkten des Strahlenschutzes rechtfertigt.

Im Bereich fernhantierter Techniken zeigt sich in der Stilllegungspraxis häufig, dass z. B. eine Kombination aus geeignetem Trägersystem und verschiedenen zugehörigen

Abbau- und Dekontaminationstechniken eine universelle technische Lösung bilden kann.

Die Reduzierung der Vielfalt an einzusetzenden Techniken, d. h. durch Verwendung von Techniken, die in verschiedenen Gewerken, ggf. mit geringfügigen Anpassungen eingesetzt werden können, kann den Umfang der notwendigen Trainingsmaßnahmen verringern und den Erfahrungsaufbau erleichtern. Dadurch kann sich eine Optimierung der Durchführungsdauer ergeben, was wiederum positive Auswirkung auf das Erreichen von Strahlenschutzzielen haben kann.

4.7 Rüst- und Wartungsaufwand

Die Praxis zeigt, dass generell, insbesondere aber mit Blick auf Aspekte des Strahlenschutzes bei Einsatz in höheren Ortsdosisleistungsfeldern oder Bereichen mit erhöhter radioaktiver Kontamination, auch Rüst- und Wartungsaufwand im Auswahlprozess berücksichtigt werden und eine wichtige Rolle spielen können. Entsprechend spiegelt das Merkmal des Rüst- und Wartungsaufwandes unter Gesichtspunkten des Strahlenschutzes ein weiteres Merkmal.

Bei fernhantierten Techniken fällt Dosis ausschließlich während manuell durchgeführter Rüst- und Wartungsarbeiten an. Techniken, bei denen ein geringerer Wartungsaufwand besteht, sind entsprechend vorteilhafter wie auch Techniken mit einem geringen Fehler- und Fehlfunktionsrisiko und zugehöriger Reparaturwahrscheinlichkeit.

Ebenso wie ihre Bewährung (siehe Abschnitt 4.5) können Rüst- und Wartungsaufwand auch ein Argument sein, konventionelle bzw. handelsübliche Maschinen einzusetzen, die sich komplett oder teilweise einfach und kostengünstiger ersetzen lassen als Spezialanfertigungen.

4.8 Trennprinzip (speziell für Abbautechniken)

Ein spezielles Merkmal für Abbautechniken ist das ihnen zugrunde liegende Trennprinzip.

Im Rahmen einer Bewertung der radiologisch relevanten Randbedingungen wird üblicherweise geklärt, welches Trennprinzip zum Einsatz kommen sollte. Etwaige Ent-

scheidungen zum Trennprinzip stehen natürlich in engem Zusammenhang mit den sich dem Gewerk ergebenden Anforderungen der technischen Aufgabenstellen (siehe Abschnitt 4.1).

4.9 Dekontaminationsprinzip

Neben den in den Abschnitten 4.1 bis 4.7 genannten Merkmalen kann für Dekontaminationstechniken- und verfahren das diesen zugrunde liegende Wirkprinzip als Merkmal genutzt werden:

- physikalisch-oberflächliche Verfahren („Spülen“), die nur oberflächliche Anhaftungen entfernen;
- chemische Verfahren (mit Anlösen der Oberfläche), die oberflächliche Anhaftungen gemeinsam mit einem Anteil des Oberflächenmaterials ablösen. Es existiert heute eine Vielzahl von Methoden (siehe Kapitel 6); insbesondere sind hier chemische Dekontaminationsverfahren zu nennen, die sich vielfältig nach Art der verwendeten Reagenzien unterscheiden lassen. Durch die Tatsache, dass bestimmte Verfahren als Komplettverfahren patentiert bzw. klassifiziert sind, entsteht eine nahezu unüberschaubare Zahl von Möglichkeiten. Eine Übersicht zu aktuellen Dekontaminationstechniken ist in Abschnitt 6.4 enthalten, weitere Informationen können aber auch /IAE 99^b/ und /NEA 99/ entnommen werden;
- mechanische Verfahren (Wandabtrag), bei denen nicht nur die Oberfläche, sondern eine makroskopische Schicht des Materials abgelöst wird.

4.10 Weitere Merkmale

In einzelnen Fällen können sehr spezielle Merkmale von Techniken entscheidend für ihren Einsatz sein, wie zum Beispiel die Möglichkeit eines fernhantierten Einsatzes unter Inertgasatmosphäre (vgl. Abschnitt 3.3) oder die Möglichkeit, eine Kontaminationsgefahr durch Modifikation von Techniken weiter einzuschränken (vgl. Abschnitt 3.1).

5 Beispiele zur Auswahl von Abbautechniken anhand von Merkmalen in der deutschen Stilllegungspraxis

Im vorigen Kapitel 4 wurden verschiedene Merkmale zu Abbau- und Dekontaminations-techniken beschrieben, die bei einer ersten Auswahl der jeweiligen Technik berücksichtigt werden können. Nicht immer sind diese Merkmale gleichrangig, oft besitzen einige eine höhere Bedeutung als andere. Welche Merkmale dies unter unterschiedlichen Voraussetzungen sein können, wird in diesem Kapitel anhand des Gewerkes „Rückbau des Reaktordruckbehälters (RDB) und seiner Einbauten“ dargestellt. Die Beispiele stammen dabei aus unterschiedlichen deutschen Stilllegungsprojekten (vgl. /BAE 10/); entscheidende Merkmale sind jeweils kursiv gesetzt.

Neben der Illustration der angesprochenen Merkmale zeigen die nachfolgenden Beispiele darüber hinaus, dass, wie bereits in Kapitel 2 erläutert, oft gleichwertige Wege für die Durchführung eines bestimmten Gewerks, z. B. dem Abbau eines RDB, bestehen, die die Grundanforderungen erfüllen. Welcher dieser Wege beschritten wird, ergibt sich aus den Grundsatzentscheidungen, die im Rahmen der Abbaustrategie getroffen werden.

5.1 Zerlegung von RDB-Einbauten im Kernkraftwerk Gundremmingen Block A (KRB-A)

Beim KRB-A handelt es sich um eines der ersten größeren Stilllegungsprojekte (erste Stilllegungsgenehmigung 1980 beantragt). Zu dieser Zeit existierten wenige Erfahrungen zur Systemdekontamination, so dass die entsprechenden Verfahren damals als **nicht bewährt** gelten konnten. Eine komplette Systemdekontamination wurde daher in KRB-A nicht durchgeführt. Eine Abschätzung der erwarteten Kollektivdosis ergab für die komplette Stilllegung im direkten Abbau 3,9 Pers.Sv /EIC 93/.

Wegen der vorliegenden hohen Ortsdosisleistung lag bei KRB-A die Grundsatzentscheidung nahe, für die Zerlegung der RDB-Einbauten im Wesentlichen **thermische Trenntechniken** einzusetzen, die **unter Wasser** und wegen der geringen Rückstellkräfte auch **fernhandelt** eingesetzt werden können.

Konkret wurden die RDB-Einbauten mit Plasmaschmelzschneiden und Kontaktlichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC) zerlegt /EIC 97^a/, /EIC 98/, /KAL 95/, /STE 97^a/.

5.2 Zerlegung des RDB mit Einbauten im Versuchatomkraftwerk Kahl (VAK)

Bei der Entscheidung über die Abbautechniken, die im VAK für die Zerlegung des RDB eingesetzt werden sollten, waren von Bedeutung, dass aufgrund der Größe der Anlage nur eine kleine Anzahl an Eigenpersonal und Fremdpersonal während des Betriebs vor Ort tätig war, und im Sinne einer Grundsatzentscheidung nach Kapitel 2 daran festgehalten wurde, auch über den Betriebszeitraum hinaus dem Versuchscharakter des VAK Rechnung zu tragen und daher innovative Trenntechniken im Rahmen von Forschungsvorhaben einzusetzen.

Dementsprechend wurden (nicht nur beim Abbau des RDB) einerseits konventionelle, also **bewährte** und **universelle** Verfahren eingesetzt, andererseits damals innovative Verfahren wie WASS (Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden) verwendet und erprobt /DUW 09/, /BAC 01/, /BAC 02/, /EIC 97^a/, /EIC 98/, /EIC 99^a/, /EIC 06/, /KAL 95/, /REI 98/, /REI 00/, /RUN 04/.

5.3 Zerlegung des RDB mit Einbauten im Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR)

Bedingt durch die **räumlichen** Gegebenheiten am MZFR (siehe /HIL 06/) musste der RDB in Einbaulage zerlegt werden. Die nötige Flexibilität wurde durch Einsatz verschiedener Techniken in mehreren Schritten erreicht:

Zunächst wurden manuell (also nicht-**fernhandliert**) die Komponenten oberhalb des RDB demontiert. Die stabförmigen Einbauten des RDB wurden anschließend **fernhandliert** trocken und unzerlegt ausgebaut und zur Nachzerlegung zur Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB) gegeben, wo eine Zerlegezelle vorhanden war. Der RDB-Deckel wurde trocken **fernhandliert** zerlegt. Der Moderatortank und der Thermische Schild mit insgesamt hoher Gesamtaktivität wurden ebenfalls **fernhandliert** und **unter Wasser** unter Verwendung von Contact Arc Metal Cutting (CAMC) und Plasmaschneiden zerlegt. Die Zerlegung der unteren Füllkörper und des RDB-Unterteils fand **fernhandliert** mit der Bandsäge und Autogenbrenner an Luft statt /BAC 06/, /BAC 06^a/, /BAE 99/, /HIL 06/, /LOE 05/, /PFE 04/, /PRE 05/, /PRE 06/, /PRE 07/, /PRE 09/, /STA 06/, /THO 06/, /VAL 06/.

5.4 Ausbau von RDB im Kernkraftwerk Greifswald (KGR)

Die Stilllegung des KGR ist maßgeblich bestimmt von der Entscheidung, Großkomponenten zur Abklinglagerung komplett ins Zwischenlager Nord (ZLN) zu verbringen. Dies ist im Rahmen der Gesamtabbaustrategie zum Standort mit seinen fünf atomrechtlich relevanten Reaktoren und zugehöriger Infrastruktur und dem für die Stilllegung eigens errichteten ZLN zu sehen. Die Motivation für diese Abbaustrategie liegt unter anderem darin, langfristig (nach Abklinglagerung) die **Abfallmenge** deutlich zu reduzieren (siehe /BUN 10/).

Nachvollziehbar erscheint hierbei auch, dass beim KGR fünf RDB ausgebaut wurden, so dass ein **bewährtes** Vorgehen mit zugehörigen Techniken entwickelt werden konnte. Zudem ermöglicht die spätere Zerlegung nach der Abklinglagerung die Anwendung konventioneller, also **bewährter** Techniken (Seilsägen), deren Einsatz bei der Zerlegung in situ aufgrund ihres Platzbedarfes erschwert werden könnte, während im ZLN die entsprechenden Zerlegeeinrichtungen vorhanden und fest installiert sind /BOE 05/, /KIS 99/, /VRB 01^a/, /VRB 01^b/.

5.5 Zerlegung von RDB-Einbauten im Kernkraftwerk Würgassen (KWW)

Im KWW stellt sich die grundlegende Situation ähnlich dar wie bei KRB-A. Aufgrund der 15 Jahre später (1995) getroffenen Entscheidung zur Stilllegung stand jedoch ein größerer Fundus von **bewährten** Techniken zur Verfügung /BOL 07/, /DUW 05/, /DUW 07/, /DUW 09/, /ITZ 09/, /KRA 08/, /RUN 05/.

5.6 Zerlegung RDB-Einbauten Kernkraftwerk Stade (KKS)

Im Stilllegungsprojekt KKS wurde zunächst eine Systemdekontamination durchgeführt. Im Ergebnis dieser wurde in den betroffenen Anlagenräumen im Sinne des Strahlenminimierungsgebotes das Ortsdosisleistungsniveau deutlich gesenkt. Die Einbindung des Reaktors und seiner Einbauten in den Prozess der Systemdekontamination führte des Weiteren zu verbesserten radiologischen Rahmenbedingungen bei der Zerlegung der RDB-Einbauten. Zerlegung und Verpackung der RDB-Einbauten erfolgten **fernhandelt** und im Wesentlichen **unter Wasser** /FRI 07/.

6 Überblick über Abbau- und Dekontaminationstechniken

In diesem Kapitel des Fachberichts wird ein Überblick über Abbau- und Dekontaminationstechniken gegeben. Neben den gängigen Techniken, die sich bereits bewährt haben, werden auch innovative Techniken vorgestellt, deren Potenzial sich noch in der Praxis zeigen muss.

Die Techniken und Verfahren werden kurz beschrieben; in tabellarischer Form werden zu diesen Techniken Referenzen auf technische Beschreibungen und bisherige Einsatzorte sowie Literaturquellen mit Informationen zu radiologischen Kenngrößen, wie Kollektiv- und Personendosis, angegeben. Darüber hinaus wird auch auf Beispiele für den Einsatz der Techniken in deutschen Stilllegungsprojekten verwiesen, die in Kapitel 7 weiter beschrieben werden und für die strahlenschutzrelevante Daten zum Einsatz einer Technik im Rahmen der Erstellung dieses Fachberichtes ermittelt wurden.

6.1 Gängige Abbautechniken

6.1.1 Autogenes Brennschneiden

Das autogene Brennschneiden ist ein weit entwickeltes und vielseitig einsetzbares Verfahren /BAC 93/, /BAC 01/, /BAC 02/, /BAE 99/, /BOE 05/, /IAE 99^b/, /ITZ 09/, /LIN 07/, /STE 08/, /TAB 04/, /THI 00/, /THI 09/, /VER 05/, /VRB 01^a/. Beim autogenen Brennschneiden wird das zu schneidende Material mit Hilfe einer Brenngas/Sauerstoff-Flamme erhitzt und reagiert (verbrennt) mit O₂. Da kein direkter Kontakt des Schneidbrenners mit dem Werkstoff erfolgt, treten keine Rückstellkräfte auf. Das autogene Brennschneiden eignet sich somit zu einem fernhantierten Einsatz. Auch ein Einsatz unter Wasser ist möglich, hierbei verhindert eine Gaskaverne um die Heizflamme einen Kontakt mit dem Medium. Hauptanwendungsgebiet ist die Zerlegung austenitisch plattierter bzw. ferritischer Werkstoffe, allerdings ist auch die Zerlegung von Beton möglich. Mit dem autogenen Brennschneiden lässt sich selbst mit einem handgeführten Brenner Material bis zu einer Stärke von etlichen 100 mm (600 mm Stahl) an Luft schneiden; unter Wasser werden Schneidtiefen bis 300 mm erzielt /IAE 99^b/. An Beton sind in Experimenten Schnitttiefen von 1200 mm erreicht worden /BAC 02/, /VER 05/. Mit geeigneten Brenngasen sind Wassertiefen um 100 m möglich, im Falle von Acetylen als Brenngas jedoch nur bis 1,5 bar an Überdruck /BAC 93/, also bis ca. 15 m Wassertiefe.

Beim autogenen Brennschneiden entstehen Schlacke und Aerosole, welche das Einrichten von Absaug- und Filteranlagen erfordern.

Beim autogenen Brennschneiden können verschiedene spezielle Verfahren unterschieden werden: Das autogene **Brennschneiden ohne Schneidpulver** (Oxyfuel Gas Cutting) eignet sich für das Schneiden von unlegierten und niedriglegierten Stählen wie Molybdän und Titan /THI 09/, /BAC 93/, /IAE 99^b/. Im Unterschied dazu erlaubt beim **Pulverbrennschneiden** (Powder Flame Cutting) der Einsatz von Schneidpulver die Zerlegung von hochlegierten Stählen und Beton. In /BAC 02/ und /VER 05/ wird das Schneiden von 320 mm Stahl und 1200 mm Beton beschrieben. Die Auswahl des möglichen Schneidpulvers richtet sich nach der gestellten Aufgabe: So bewirkt Fe/Al eine Temperaturerhöhung, Na₂CO₃/NaHCO₃ eignet sich zur besseren Verflüssigung hochschmelzender Schlacken (z. B. Cr) und SiO₂/Sand zur mechanischen Unterstützung /BAC 02/, /IAE 99^b/, /THI 09/. Letzteres ist bis dato nur versuchsweise angewendet worden. Vergleichbar mit dem autogenen Brennschneiden ohne Schneidpulver führt beim **autogenen Brennschneiden mit Lanze** (Thermic Lance) die Nachführung von Al/Mg-Draht zu einer zusätzlichen Temperaturerhöhung. Allerdings eignet sich dieses Verfahren nicht zur Automatisierung und die Schnittgeschwindigkeiten sind relativ gering /BAC 02/. Das **autogene Brennschneiden mit Plasmafugenhobeln** erlaubt die Zerlegung dickwandiger, austenitisch plattierter, ferritischer Werkstoffe an Luft /THI 00/. Im Gegensatz dazu können mit dem **autogenen Brennschneiden mit Lichtbogen-Wasserstrahlschneiden** dickwandige, austenitisch plattierte, ferritische Werkstoffe auch unter Wasser zerlegt werden /THI 09/.

Das autogene Brennschneiden wurde z. B. bei der Zerlegung eines Gullywasserbehälters und eines Dampferzeugers bei KGR eingesetzt (siehe Abschnitte 7.1.1.1 und 7.1.1.2).

6.1.2 Plasmaschmelzschnitten (Plasma Arc Cutting)

Ein weiteres bewährtes Verfahren ist das Plasmaschmelzschnitten /BAC 01/, /BAC 02/, /BAC 06^a/, /BER 98/, /BOE 05/, /EIC 97^a/, /EIC 98/, /HIL 06/, /IAE 99^b/, /KAL 95/, /KRA 08/, /LOE 05/, /MOE 07/, /PFE 04/, /PRE 07/, /SAT 10/, /STE 97^a/, /STE 02/, /TAB 04/, /THI 09/, /THO 06/, /VER 05/, /VRB 01^b/, /YAN 88/. Das Arbeitsprinzip des Plasmaschmelzschnitens ist wie folgt: Durch Ionisation eines Arbeitsgases (Ar, N₂, H₂, O₂, Luft, Gemische) wird ein Plasma gebildet, über welches ein Strom-

kreis von der Elektrode zum Werkstück geschlossen wird. Das aus der Schneiddüse austretende Plasmagas treibt das aufgeschmolzene Material aus der Schnittfuge aus. Hierbei wird die Elektrode nicht verbraucht. Es können jedoch lediglich elektrisch leitende Materialien (auch Grafit) getrennt werden; dies bis zu einer Stärke von 150 mm an Luft /BAC 01/, /VER 05/, bzw. 100 mm unter Wasser /EIC 98/, /VER 05/. Auch beim Plasmaschmelzschnitten treten keine Rückstellkräfte auf, so dass es sich für einen fernhantierten Einsatz eignet. Der Einsatz unter Wasser ist ebenfalls möglich. Die Schneidgeräte sind sehr kompakt und zeichnen sich durch eine hohe Schneidleistung aus. Dabei hängt die Schneidgeschwindigkeit von der realisierten Stromstärke ab. Beide Größen haben Einfluss auf die Menge an anfallenden Schlacken und Aerosolen, welche den Einsatz von Absaug- und Filtertechniken erfordern /BAC 02/. Das Plasmaschmelzschnitten zeichnet sich durch hohe Standzeiten beim Einsatz an homogenen Flächen aus, der Verschleiß kann bei Anwendung an komplexen Oberflächen jedoch bedeutend werden. Durch die Verwendung spezieller Brenner-Wechselköpfe sind dazu aber keine langen Wartungszeiten erforderlich /LOE 05/.

Das Plasmaschmelzschnitten wurde z. B. bei der Zerlegung eines Gullywasserbehälters bei KGR eingesetzt (siehe Abschnitt 7.1.1.1).

6.1.3 Laserstrahlschnitten

Das Laserstrahlschnitten /BAC 93/, /BAC 01/, /BAC 02/, /DRY 05/, /IAE 99^b/, /TAB 04/, /THI 09/, /VER 05/ zeichnet sich durch die örtliche Trennung der Erzeugung des Laserstrahls von der Einsatzstelle und Überbrückung der Distanz mittels Lichtleiter aus. Dadurch ist ein fernhantierter Einsatz möglich. Der Einsatz eines Laserstrahls erlaubt das Schneiden nahezu jeden Materials (auch Asbest). Die Schnitttiefe hängt im Wesentlichen von der Leistung des eingesetzten Lasers ab, für unlegierte Stähle sind 100 mm erzielt worden /IAE 99^b/ . Ein Einsatz unter Wasser ist möglich, allerdings müssen hierbei Einschränkungen auf die zu trennende Materialstärke berücksichtigt werden. Darüber hinaus gibt es keine Einschränkung bezüglich der Einbaulage des zu schneidenden Werkstücks, da Gravitationseffekte nicht berücksichtigt werden müssen. Schnittpräzision und -geschwindigkeit sind bei Einsatz des Laserstrahlschneidens sehr hoch. Es entstehen allerdings Schlacke und Aerosole, welche mit Absaug- und Filtervorrichtungen aufgefangen werden müssen.

Es lassen sich drei spezielle Verfahren unterscheiden: Beim **Laserstrahlschmelzschneiden** wird die Schlacke mit einem Inertgas aus der Fuge getrieben. Im Falle des **Laserstrahlbrennschneidens** wird O₂ als Schneidgas verwendet, welches mit dem Werkstück exotherm reagiert und beim **Laserstrahlsublimationsschneiden** wird das Material sublimiert /THI 09/.

6.1.4 Lichtbogenschneiden

Ein weiteres thermisches Trennverfahren stellt das Lichtbogenschneiden dar. Hierbei handelt sich um ein universelles und häufig eingesetztes Verfahren /BAC 93/, /BAC 01/, /BAC 02/, /BAC 05/, /BAC 06/, /BAC 06^a/, /BAC 07/, /BER 98/, /BOE 05/, /EIC 98/, /EIC 99^a/, /HIL 06/, /IAE 99^b/, /MOE 07/, /PRE 05/, /PRE 06/, /STA 06/, /TAB 04/, /THI 09/, /THO 06/, /VER 05/, /VRB 01^b/. Aufgrund fehlender Rückstellkräfte eignet sich das Lichtbogenschneiden sehr gut zur Fernhantierung, welches auch das Trennen komplizierter Geometrien, wie z. B. Rohr-in-Rohr-Verbindungen, erlaubt. Darüber hinaus ist ein Einsatz unter Wasser möglich. Der Kontakt einer Elektrode mit dem Werkstück erzeugt einen Lichtbogen, der das Material aufschmilzt. Dabei wird das Elektrodenmaterial verbraucht. Das zu schneidende Material muss elektrisch leitend sein. Es entstehen Schlacke und Aerosole.

Man unterscheidet sechs Varianten des Lichtbogenschneidens: Beim **Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden/Bohren** (Contact Arc Metal Cutting, CAMC, bzw. Drilling) dient Reinstgraphit, kohlefaserverstärkter Graphit oder eine Wolfram-Kupferlegierung als Elektrodenmaterial. Das Material wird geschmolzen und mit Wasser ausgetrieben. Der Einsatzbereich hängt von der Elektrodenlänge und ihrer Kühlung ab; bis zu einer Materialdicke von 280 mm ist das Verfahren erprobt /IAE 99^b/. Vergleichbar hierzu ist das **Lichtbogen-Wasserstrahlschneiden** (Consumable Electrode Waterjet Cutting), welches jedoch mit einer nachführbaren Metallelektrode arbeitet. Das Lichtbogen-Wasserstrahlschneiden ist bis zu einer Materialstärke von 100 mm erprobt /BAC 93/, /BAC 01/, /IAE 99^b/, /THI 09/. Das Gerätegewicht ist wegen der mitgeführten Drahtrolle relativ hoch. Beim **Lichtbogen-Luftschneiden** kommt eine Cu-beschichtete Grafitelektrode zum Einsatz, das Material wird mit Luft aus der Schnittfuge ausgetrieben /BER 98/. Entsprechend wird beim **Lichtbogen-Sauerstoffschneiden** die Schlacke mit O₂ ausgetrieben, was zu einer zusätzlichen Energiefreisetzung führt /IAE 99^b/, /THI 09/. In kerntechnischen Anlagen wurde dieses Verfahren jedoch mindestens bis zum Jahre 2000 nicht eingesetzt. Zwei weitere Spezialfälle des Lichtbogenschneidens

lassen sich nennen: Beim **Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen** (Contact Arc Metal Grinding, CAMG) oder auch Lichtbogensägen wird die Elektrode nicht (bzw. kaum) verbraucht /BAC 05/. Dieses Verfahren erlaubt das Trennen von komplexen, dickwandigen metallischen Strukturen. Die Schnitttiefe ist lediglich durch den Scheibendurchmesser limitiert; in bisherigen Anwendungen wurden 260 mm erzielt /VER 05/. Bei der Rotation der scheibenförmigen Elektrode wird das Material durch den Luftstrom aus der Fuge ausgetrieben. Hiermit lässt sich eine schmale Schnittfuge erzielen. Das Verfahren kann auch unter Wasser bis zu einer Tiefe von 15 m eingesetzt werden /BAC 05/. Beim Verfahren der **Funkenerosion** (Electron Discharge Machining, EDM, Variante: Metal Disintegration Machining, MDM) wird durch immer neue Kontakte zwischen Werkstück und Elektrode beim Vorschub stets ein neuer Lichtbogen erzeugt. Damit ist auch das Bohren von Löchern möglich. Das Verfahren wird oft bei schwierigen geometrischen Verhältnissen sowie unter Wasser eingesetzt /BAC 01/, /EIC 99^a/, /IAE 99^b/, /THI 09/.

6.1.5 Bügel-, Stich-, Kreis-, Bandsägen

Sägen werden in Abbaumaßnahmen häufig eingesetzt, da sie für die Zerlegung sämtlicher Materialien einsetzbar sind /BAC 01/, /BAC 02/, /BAE 99/, /BEN 02/, /BER 98/, /BOC 09/, /BOR 07/, /DUW 05/, /DUW 07/, /DUW 09/, /EIC 97^a/, /EIC 98/, /EIC 99^a/, /FRI 07/, /IAE 99^b/, /ITZ 09/, /KAL 95/, /LIN 07/, /MIN 07^a/, /MOE 07/, /PRE 06/, /REI 00/, /SAT 10/, /STE 96/, /STE 97^a/, /TAB 04/, /THI 09/, /VIE 07/, /VRB 01^a/, /VRB 01^b/. Sägen sind jedoch für eine Fernhantierung oft ungeeignet bzw. nur beschränkt geeignet, da Arbeitsbereiche aufgrund ihrer Geometrie für die Dimensionen der Sägen, oft problematisch sind. Besonders Bandsägen benötigen viel Platz. Ein Einsatz unter Wasser ist prinzipiell möglich. Die Schnitttiefe beim Sägen wird lediglich durch die Länge des Sägeblattes bzw. dessen Durchmesser begrenzt. Obwohl sie relativ langsam arbeiten, werden Stichsägen aufgrund ihrer Zuverlässigkeit oft eingesetzt. Darüber hinaus sind sie gut an die geometrischen Verhältnisse anzupassen. Als Beispiel für einen fernhantierten Einsatz sei die verklammerte Stichsäge genannt, welche mittels Halterungen am Werkstück befestigt wird und in der Folge selbsttätig arbeiten kann. Bei Sägearbeiten entstehen Späne und geringe Mengen an Aerosolen, die im Vergleich mit den thermischen Trennverfahren relativ einfach zu handhaben sind.

Ein Spezialfall des Bandsägens ist das **Eissägen**. Hierbei werden komplexe Strukturen mit Wasser gefüllt und vor dem Zersägen eingefroren. Das Eis dient dabei der Fixie-

rung von inneren Strukturen z. B. in Dampferzeugern und der Kühlung des Sägeblattes. Außerdem verringert es die Aerosolbildung und sorgt durch seine abschirmende Wirkung für eine Dosisreduktion /EIC 98/, /IAE 99^b/, /STE 97^c/, /THI 00/.

Diverse Sägen wurden z. B. bei der Zerlegung eines Dampferzeugers in KGR (siehe Abschnitt 7.1.1.2) und bei Abbaumaßnahmen in der WAK (siehe Abschnitte 7.4.1.1 und 7.4.1.2) eingesetzt.

6.1.6 Scheibenfräsen

Scheibenfräsen stellen eine universell einsetzbare Technik dar /BAC 01/, /BAC 02/, /BEN 02/, /BER 98/, /BOE 05/, /DUW 09/, /EIC 98/, /EIC 99^a/, /HIL 05/, /IAE 99^b/, /MIN 07/, /TAB 04/, /THI 09/, welche sowohl fernhantiert als auch manuell zu bedienen sind. Allerdings treten hohe Rückstellkräfte auf, welche durch entsprechende Konstruktionen aufgefangen werden müssen. Dies bedingt einen größeren Raumbedarf und längere Rüstzeiten. Ein Einsatz unter Wasser ist prinzipiell möglich. Die Schneidtiefen beschränken sich auf die Dimensionen der Frässcheibe, bei Stahl sind 200 mm und bei Beton 500 mm erzielt worden /BAC 02/. Die anfallenden großen Späne sind gut handhabbar, jedoch ist auf Funkenflug zu achten.

6.1.7 Diamant-Seilsägen/Diamant-Kettensägen

Seilsägen/Kettensägen erlauben einen Einsatz in einer flexiblen Schneidgeometrie und werden daher häufig verwendet /BAC 02/, /BOE 05/, /BOL 07/, /DUT 05/, /DUW 05/, /GAE 05/, /GEN 06/, /GOE 07/, /IAE 99^b/, /ITZ 09/, /KRA 08/, /RUN 05/, /SAT 10/, /STA 06^a/, /STE 08/, /TAB 04/, /THI 09/, /VAL 06/. Der Einsatz unter Wasser ist ebenfalls möglich. Sägen eignen sich zur Zerlegung von Stahlbeton aber auch Stahl. Die Zerlegung von Metall bis 300 mm und Beton bis 1.750 mm ist dokumentiert /BAC 02/, /GAE 05/; bei der Verwendung von Seilsägen gibt es praktisch keine Begrenzung der maximal möglichen Materialdicke. Aufenthaltszeiten im Strahlungsfeld, auch für Reparatur- und Wartungsarbeiten, wie Seilwechsel oder Lösen von Verkantungen aufgrund der Werkstoffgeometrie, sind relativ kurz. Es fällt relativ viel Fugenmaterial in Form von Stäuben an, daher sind die Errichtung einer Einhausung und der Einsatz einer Absaug- und Filteranlage notwendig. In der Regel ist eine Kühlung des Seils notwendig und das Kühlwasser muss ebenfalls aufgefangen und entsorgt werden /ITZ 09/. Bei neueren

Entwicklungen entfällt die Kühlung und der Staubproblematik wird mit integrierten Absaugvorrichtungen entgegengewirkt /GAE 05/, /GEN 06/, /GOE 07/.

Eine Seilsäge wurde z. B. bei der Zerlegung eines Dampferzeugers in KGR eingesetzt (siehe Abschnitt 7.1.1.2).

6.1.8 Trennscheiben/Trennschleifen

Das Verfahren des Trennschleifens wird in praktisch allen Stilllegungsprojekten verwendet /BAE 99/, /BEN 02/, /EIC 99^a/, /HIL 06/, /KAL 95/, /PFE 06^a/, /PRE 06/, /SAT 10/, /THI 09/, /VIE 07/. Aufgrund der Abmessungen der Gerätschaften zum Auffangen der hohen Rückstellkräfte ist ein hoher Platzbedarf notwendig, was eine Fernhantierung einschränkt. Ein Einsatz unter Wasser ist prinzipiell möglich. Es lassen sich sämtliche Materialien, jedoch mit mobilen Geräten nur bis zu einer Stärke von etwa 30 mm /THI 09/, zerlegen. Die Trennscheiben müssen gekühlt werden und es entstehen Staub und Aerosole (laut /THI 09/ > 200-mal mehr gegenüber dem Sägen). Auf Funkenflug ist zu achten.

Trennschleifer sind z. B. bei der Zerlegung eines Dampferzeugers in KGR eingesetzt worden (siehe Abschnitt 7.1.1.2).

6.1.9 Trenn- und Rohrscheren

Auch Scheren werden praktisch in allen Stilllegungsprojekten eingesetzt /BAC 02/, /BAE 99/, /BIT 07/, /DUW 05/, /DUW 09/, /EIC 98/, /EIC 99^a/, /FRI 07/, /FRI 09/, /HIL 06/, /IAE 99^b/, /KAL 95/, /LOE 05/, /PFE 06^a/, /PRE 05/, /PRE 06/, /PRE 07/, /TAB 04/, /THI 09/, /THO 06/, /VAL 06/, /VIE 07/. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass keine Rückstellkräfte auftreten. Eine Fernhantierung ist somit grundsätzlich möglich. Auch ein Unterwassereinsatz ist an hydraulischen Manipulatoren möglich. Scheren werden vornehmlich zur Zerlegung von Stäben und Rohren eingesetzt. Hierbei entstehen praktisch keine Späne oder Stäube.

Zwei Spezialfälle des Schneides mit Scheren sind zu nennen: Das **Knabberschneiden** (Nibbeln) findet Anwendung bei Materialien größerer Dicken unter beengten räumlichen Verhältnissen, z. B. bei Druckbehältereinbauten /DUW 05/, /EIC 99^a/, /IAE 99^b/, /TAB 04/, /THI 09/. Das Schneiden von Rohren mit Schneiden innerhalb und außerhalb

des Rohrs (**Orbital Cutter**) ist anwendbar bei dünnen oder mittleren Wandstärken /IAE 99^b/, /SAT 10/, /THI 09/).

Scheren wurden z. B. bei der Zerlegung eines Dampferzeugers in KGR (siehe Abschnitt 7.1.1.2) und bei Abbaumaßnahmen in der WAK (siehe Abschnitte 7.4.1.1 und 7.4.1.2) eingesetzt.

6.1.10 Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden (Abrasive Waterjet Cutting, WASS)

Das Wasserstrahlabrasivschneiden ist ein bewährtes Verfahren /BAC 93/, /BAC 01/, /BAC 02/, /BAC 07/, /DUW 07/, /DUW 09/, /EIC 98/, /EIC 99^a/, /IAE 99^b/, /PET 05/, /REI 00/, /REI 98/, /TAB 04/, /THI 09/. Es treten nur geringe Rückstellkräfte auf, somit ist ein fernhantierter Einsatz möglich. Diese Technik eignet sich auch für den Einsatz unter Wasser. Der Raumbedarf ist aufgrund der geringen Baugröße gering. Beim Wasserstrahlabrasivschneiden wird ein Hochdruckwasserstrahl auf das Werkstück gelenkt, welcher mit mineralischen Partikeln (z. B. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Zirkonkorund), Olivin ($(\text{Mg},\text{Mn},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$) oder Granat ($(\text{Mn},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Al},\text{Fe},\dots)_3[\text{SiO}_4]_3$)) beladen ist. Mit dieser Technik können Stahl bis 130 mm, Blech bis 280 mm und prinzipiell auch Grafit /BAC 01/ zerlegt werden. Aufgrund der kleinen Fugenbreite fällt wenig Fugenmaterial an. Das Strahlmittel stellt jedoch ein zusätzliches Materialaufkommen dar, welches wiederum durch Rezyklierung vermindert werden kann.

6.1.11 Weitere mechanische Abbauverfahren

Ebenfalls bewährt hat sich der Einsatz von **Meißeln** zur Zertrümmerung von Beton /BEN 02/, /EIC 06/, /HOE 07/, /IAE 99^b/, /PRE 09/, /RUN 04/, /SAT 10/, /STA 06^a/, /STA 09/, /TAB 04/, /THI 09/. Eine Fernhantierung mit Manipulatoren ist möglich. Die anfallenden Teilstücke sind recht grob.

Ein Meißel wurde z. B. bei der Zerlegung des Reaktorblocks im FRJ-1 eingesetzt (siehe Abschnitt 3.4).

Mitunter von Vorteil gegenüber dem Sprengen ist das **Ausbohren** eines Betonkerns /BER 06/, /EIC 06/, /GOE 07/, /HIL 05/, /IAE 99^b/, /ITZ 09/, /STA 06^a/, /THI 09/. Der Einsatz an Manipulatoren ist möglich. Neben den Bohrkernen entsteht Staub.

Spreizen, die Zerlegung durch Brechen, findet Anwendung bei Strukturen aus Grafit und bei Beton nach Vorbohren /BAC 01/, /BAC 02/, /BER 06/, /BOC 09/, /IAE 99^b/, /KAU 06/, /TAB 04/. Hierbei ist von Vorteil, dass praktisch kein Fugenmaterial entsteht. Stäube entstehen lokal, zeitlich begrenzt und sind grobkörnig und damit gut zu handhaben.

Die Verwendung einer **Abrissbirne** ist eine konventionelle Abbautechnik, welche zum Abbau von nichtarmierten Betonstrukturen eingesetzt wird, die nicht aktiviert bzw. kontaminiert sind, wie z. B. zum Abbau von Sicherheitsbehältern /IAE 99^b/.

6.2 Abbautechniken in der Entwicklung bzw. in der Einzelfallanwendung

Zwar steht bereits ein umfangreiches Arsenal an bewährten Abbautechniken zur Verfügung, dennoch wird weiterhin geforscht (z. B. /MUE 09/. Gerade auf den Gebieten Automatisierung und Effizienzsteigerung sind weitere Fortschritte zu erwarten, die letztlich auch einen Einfluss auf die radiologischen Kenngrößen haben und daher für den Strahlenschutz beim Abbau kerntechnischer Einrichtungen von Bedeutung sein können. Beispielhaft seien nachfolgend Abbautechniken aufgeführt, deren Potenziale teilweise derzeit noch nicht abzusehen sind und die sich erst noch in der Praxis bewähren müssen.

Die Zerlegung durch **kontrollierte Explosion** (geformt (shaped) oder schneidend (linear shaped)) stellt ein schnelles Verfahren dar, welches jedoch umfangreiche Begleitmaßnahmen erfordert. Daher wird das Sprengen im kerntechnischen Bereich nur in bestimmten Fällen bei größeren Anlagen in Betracht gezogen /IAE 99^b/, /TAB 04/, /THI 09/. Die Anwendung ist breit gefächert und umfasst Stahl bis 150 mm /THI 09/, Rohre, Platten, z. T. auch Beton oder Betonoberflächen, wie die aktivierten Teile des biologischen Schildes oder zur Trennung von Beton und Bewehrung. Die entstehenden Teilstücke sind grob.

Mittels **Mikrowellen** können Betonoberflächen zertrümmert werden. Der entstehende Abfall ist relativ grob. Eine Fernhandlung ist im Prinzip möglich, allerdings beschränkt sich das Verfahren auf ausreichend feuchten Beton und ist daher praktisch kaum angewandt worden /THI 09/.

Das **Schleifdrahtverfahren** ist ähnlich dem Seilsägen, jedoch folgt das Seil einer Hin- und Herbewegung statt eines Rundlaufs. Dadurch wird eine Verminderung von Kontaminationen erzielt /ARN 00/.

Bei der Zerlegung mit **expansivem Mörtel** werden in Betonstrukturen Löcher gebohrt und mit Mörtel gefüllt, der sich beim Trocknen ausdehnt. Die entstehenden Teilstücke sind hierbei recht grob /IAE 99^b/, /TAB 04/.

Das **Flüssiggasschneiden** arbeitet im Prinzip wie das Wasserstrahlschneiden, es fällt jedoch kein Strahlmittel an, welches zusätzlich behandelt werden müsste. Es lässt sich auf alle Materialien anwenden und bietet als weiteren Vorteil, dass keine Gefährdung durch Explosionen, Feuer und Oxidation vorliegt /IAE 99^b/.

Ebenfalls eine Weiterentwicklung des Wasserstrahlschneidens ist das **Wasserabrasivinjektorstrahl-Verfahren** (WAIS). Es erlaubt das Schneiden von 400 mm Stahl und Grauguss /BAC 07/, /PET 05/.

Gedächtnismetalle können bei Betonstrukturen wie expansiver Mörtel eingesetzt werden. Bei Aufheizung kehren diese Materialien zu ihrer vorgegebenen Form zurück, unter Freiwerden starker Kräfte. Die dabei entstehenden Bruchstücke sind grob /IAE 99^b/.

Beim Verfahren des **Elektrischen Widerstands** (Electrical Resistance) wird Strom eingesetzt zur Zerlegung von Stahlbeton. Dabei erhitzt sich die Bewehrung und der Beton platzt ab /IAE 99^b/.

Elektrisch leitende Materialien können beim **Elektrochemischen Schneiden** (Electrochemical Cutting) durch das Anlegen einer elektrischen Spannung bei Anwesenheit einer Elektrolytlösung (z. B. 10 % NaNO₃) behandelt werden. Als Elektrode können alle thermisch und elektrisch leitfähigen Metalle mit hohem Schmelzpunkt benutzt werden. Diese werden während der Anwendung nicht verbraucht. Als Abfall fallen Hydroxidniederschläge an /BAC 93/.

Zwei Weiterentwicklungen des Lichtbogenschneidens werden derzeit für den Einsatz in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen erforscht /HAS 09/, /PTE 10/. Mit dem **Hot-Wire-Plasmaschneiden** lassen sich auch nichtmetallische Materialien wie etwa armerter Beton thermisch trennen. Der Lichtbogen wird dabei zwischen dem Brenner und einem Zusatzdraht, nicht dem Material selbst, gezündet. Der Draht ist mit Alumini-

umpulver und Eisenoxid gefüllt, welche für eine starke chemische Reaktion innerhalb des Lichtbogens sorgen. Durch diese zusätzliche Energie können auch dicke Betonwände durchtrennt werden. Bei Verwendung von Magnesiumdrähten ist auch ein Einsatz unter Wasser möglich. Das **Lichtbogen-Sauerstoff-Impulsschneiden** stellt das Gegenteil zum klassischen Metallschutzgasschweißen /HAS 09/, /PTE 10/. Durch Ersetzen des Schweißgases durch reaktiven Sauerstoff brennt das zu bearbeitende Material durch. Die Energie wird außerdem nicht kontinuierlich, sondern impulsförmig eingebracht. Hierdurch wandert der Lichtbogen im Material und verhindert damit das Wiederverschließen der Schneidfuge.

Abschließend sei erwähnt, dass eine Reihe konventioneller Abbautechniken für den speziellen Einsatz in der Stilllegung ertüchtigt werden. So werden z. B. Werkzeuge nachgerüstet, um vor allem die Elektronik, Kabel und Leitungen im Strahlungsfeld zu schützen. Dadurch wird die Lebensdauer der Werkzeuge erhöht, Wartungsintervalle verlängert und somit die anfallende Dosis für Reparatur- und Wartungsarbeiten verringert.

Darüber hinaus werden im Einzelfall auch **Spezialmaschinen** für spezielle Demontearbeiten entwickelt. Als ein Beispiel sei eine spezielle Maschine zur Entfernung von hochaktivierten, kobalthaltigen Führungsrollen und -pins an ausgedienten Steuerelementen im Kernkraftwerk Leibstadt, Schweiz, genannt /BRA 09/. Hierfür wurde eigens ein Auspresswerkzeug entwickelt, welches an einer Stange montiert manuell in Position gebracht wird. Die Führungsrollen und -pins werden dann hydraulisch abgeschert und schießen in einen selbstentwässernden Entsorgungsbehälter. Anschließend werden die verbleibenden Enden mittels eines Sicherungsverpresswerkzeuges geschlossen.

6.3 Zusammenstellung der Literatur zu Abbautechniken

In Tab. 6.1 sind Verweise zu Artikeln mit technischen Beschreibungen der Abbauprozesse und Quellenangaben zum Einsatz der Techniken in konkreten Stilllegungsprojekten zusammengestellt. Darüber hinaus werden Literaturstellen separat aufgeführt, die Angaben zu radiologischen Kenngrößen, wie Kollektiv- und Personendosen sowie Arbeitszeiten, enthalten. Die Tabelle kann aufgrund der Dynamik im Bereich des

Einsatzes von Abbautechniken nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sie bildet jedoch einen guten Ausgangspunkt für eine weiterführende Literaturrecherche.

Tab. 6.1: Tabelle der Abbautechniken

Liste der Abbautechniken	Allgemeine Technikbeschreibungen	Stilllegungsprojekte		Radiologische Kenngrößen
Autogenes Brennschneiden	/BAC 93/ /BAC 01/ /BAC 02/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 00/ /THI 09/ /VER 05/	KGR	/BOE 05/ /VRB 01 ^a /	/LIN 07/ /STE 08/
		KRB-A	/STE 08/	
		KWW	/ITZ 09/	
		MZFR	/BAE 99/	
		Ringhals	/LIN 07/	
Plasmaschmelzschnneiden (Plasma Arc Cutting)	/BAC 01/ /BAC 02/ /BAC 06 ^a / /BER 98/ /IAE 99 ^b / /STE 97 ^a / /STE 02/ /TAB 04/ /THI 09/ /VER 05/	KGR	/BOE 05/ /VRB 01 ^b /	/EIC 97 ^a / /SAT 10/
		KKR	/MOE 07/	
		KRB-A	/EIC 97 ^a / /EIC 98/ /KAL 95/ /STE 97 ^a /	
		KWW	/KRA 08/	
		MZFR	/BAC 06 ^a / /HIL 06/ /LOE 05/ /PFE 04/ /PRE 07/ /THO 06/	
		JPDR	/YAN 88/	
Laserstrahlschnneiden	/BAC 93/ /BAC 01/ /BAC 02/ /DRY 05/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 09/ /VER 05/	KGR	/KIS 99/	
Lichtbogenschneiden	/BAC 93/ /BAC 01/ /BAC 02/ /BAC 05/ /BAC 06/ /BAC 06 ^a / /BAC 07/ /BER 98/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 09/ /VER 05/	KGR	/BOE 05/ /VRB 01 ^b /	/EIC 98/
		KKR	/MOE 07/	
		KRB-A	/EIC 98/ /EIC 99 ^a /	
		MZFR	/BAC 06/ /BAC 06 ^a / /HIL 06/ /PRE 05/ /PRE 06/ /STA 06/ /THO 06/	
		VAK	/EIC 98/	
Bügel-, Stich-, Kreis-, Bandsägen	/BAC 01/ /BAC 02/ /BER 98/ /IAE 99 ^b /	KGR	/BOE 05/ /VRB 01 ^a / /VRB 01 ^b /	/DUW 05/ /DUW 07/ /EIC 97 ^a / /EIC 98/
		KKI	/FRI 07/	

Liste der Abbautechniken	Allgemeine Technikbeschreibungen	Stilllegungsprojekte		Radiologische Kenngrößen
	/TAB 04/ /THI 09/	KKR	/MOE 07/	/EIC 99 ^a / /LIN 07/ /SAT 10/
		KKS	/VIE 07/	
		KNK	/BEN 02/ /ITZ 09/ /MIN 07 ^a / /STE 96/	
		KRB-A	/EIC 97 ^a / /EIC 98/ /KAL 95/ /STE 97 ^a /	
		KWW	/DUW 05/ /DUW 07/ /DUW 09/	
		MZFR	/BAE 99/ /PRE 06/	
		RFR	/BOC 09/	
		Ringhals	/LIN 07/	
		VAK	/EIC 97 ^a / /EIC 98/ /EIC 99 ^a / /KAL 95/ /REI 00/	
Eissägen	/IAE 99 ^b / /STE 97 ^c / /THI 00/	KRB-A	/EIC 98/ /STE 97 ^c /	/EIC 98/ /STE 97 ^c /
Scheibenfräsen / Kreissägen	/BAC 01/ /BAC 02/ /BER 98/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 09/	KGR	/BOE 05/	/EIC 99 ^a / /MIN 07/
		KNK	/BEN 02/ /HIL 05/ /MIN 07/	
		KWW	/DUW 09/	
		VAK	/EIC 98/ /EIC 99 ^a /	
Diamant-Seilsägen / Diamant-Kettensägen	/BAC 02/ /GAE 05/ /GEN 06/ /GOE 07/ /IAE 99 ^b / /ITZ 09/ /TAB 04/ /THI 09/	FRF-1	/STA 06 ^a /	/BOL 07/ /DUW 05/ /ITZ 09/ /SAT 10/ /STE 08/
		KGR	/BOE 05/	
		KNK	/VAL 06/	
		KRB-A	/STE 08/	
		KWO	/GEN 09/	
		KWW	/BOL 07/ /DUW 05/ /ITZ 09/ /KRA 08/ /RUN 05/	
		WAK	/DUT 05/	

Liste der Abbautechniken	Allgemeine Technikbeschreibungen	Stilllegungsprojekte		Radiologische Kenngrößen
Trennscheiben / Trennschleifen	/THI 09/	KKS	/VIE 07/	/EIC 99 ^a / /SAT 10/
		KNK	/BEN 02/	
		MZFR	/BAE 99/ /HIL 06/ /PRE 06/	
		VAK	/EIC 99 ^a / /KAL 95/	
		WAK	/PFE 06 ^a /	
Trenn- und Rohrscheren	/BAC 02/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 09/	Gösgen	/BIT 07/	/BIT 07/ /DUW 05/ /EIC 99 ^a / /KAL 95/ /SAT 10/
		KKS	/FRI 07/ /VIE 07/	
		KWO	/FRI 09/	
		KWW	/DUW 05/ /DUW 09/	
		MZFR	/BAE 99/ /HIL 06/ /LOE 05/ /PRE 05/ /PRE 06/ /PRE 07/ /THO 06/ /VAL 06/	
		VAK	/EIC 98/ /EIC 99 ^a / /KAL 95/	
Wasserstrahlabrasivscheiden (Abrasive Waterjet Cutting)	/BAC 93/ /BAC 01/ /BAC 02/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 09/	KWW	/DUW 07/	/DUW 07/ /EIC 99 ^a /
		VAK	/DUW 09/ /BAC 01/ /BAC 02/ /EIC 98/ /EIC 99 ^a / /REI 98/ /REI 00/	
Meißeln	/HOE 07/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 09/	FRF-1	/STA 06 ^a /	/RUN 04/ /SAT 10/ /STA 09/
		FRJ-1	/STA 09/	
		KNK	/BEN 02/	
		MZFR	/PRE 09/	
		VAK	/EIC 06/ /RUN 04/	
Sprengen	/IAE 99 ^b / /TAB 04/ /THI 09/			
Kernbohren	/GOE 07/ /IAE 99 ^b / /THI 09/	FRF-1	/STA 06 ^a /	
		KNK	/HIL 05/	
		KWW	/ITZ 09/	

Liste der Abbautechniken	Allgemeine Technikbeschreibungen	Stilllegungsprojekte		Radiologische Kenngrößen
		TRIGA HD II	/BER 06/	
		VAK	/EIC 06/	
Spreizen	/BAC 01/ /BAC 02/ /IAE 99 ^b / /TAB 04/	RFR	/BOC 09/	/KAU 06/
		TRIGA HD II	/BER 06/ /KAU 06/	
Abrissbirne	/IAE 99 ^b / /TAB 04/			
Fräsen (Betonfräsen)	/IAE 99 ^b / /TAB 04/			
Mikrowellen-Zerkleinerung	/THI 09/			
Schleifdrahtverfahren	/ARN 00/			
Expansiver Mörtel	/IAE 99 ^b / /TAB 04/			
Flüssiggasschneiden (Liquified Gas Cutting)	/IAE 99 ^b /			
Wasserabrasivinjektorstrahlschneiden	/BAC 07/ /PET 05/			
Gedächtnismetall (Shape Memory Alloys)	/IAE 99 ^b /			
Elektrischer Widerstand (Electrical Resistance)	/IAE 99 ^b /			
Elektrochemisches Schneiden	/BAC 93/			
Hot-wire-Plasmaschneiden	/HAS 09/ /PTE 10/			
Lichtbogen-Sauerstoff-Impulsschneiden	/HAS 09/ /PTE 10/			

6.4 Überblick über Dekontaminationsverfahren

Eine Übersicht über die Dekontaminationstechniken und -verfahren schließt streng genommen Abbautechniken mit ein, da in der Praxis eine Dekontamination auch durch Entfernung der Oberfläche erreicht wird. Die Zusammenstellung der in Abschnitt 6.1 aufgeführten Abbautechniken ist somit vor allem um Techniken und Verfahren zu ergänzen, bei denen unter Zuhilfenahme eines Lösungsmittels die Oberfläche gereinigt („physikalisch-oberflächliche Löseverfahren“) oder entfernt („chemische Löseverfahren“) wird. Eine detaillierte Auflistung der Techniken und Verfahren müsste materialabhängig nach Art des Lösungsmittels oder auch der Anwendungspraxis des Anbieters unterscheiden. Ein ausführlichere Zusammenstellung von Dekontaminationstechniken mit teilweise detaillierten Beschreibungen findet sich u. a. in /IAE 99^b/, /NEA 99/ und /TAB 04/. Alle diese Techniken und Verfahren sind aber letztlich in der Ausführung aus radiologischer Sicht so ähnlich, dass sie nachfolgend zusammenfassend beschrieben werden können.

6.4.1 Abrasivreinigung

Abrasivverfahren werden zum Abtrag kontaminierter Oberflächen, meist aus Beton, eingesetzt /AND 03/, /BAC 03/, /GEI 02/, /IAE 99^b/, /KRA 07/, /LIN 07/, /NEA 99/, /SCH 07/, /STE 08/. Dabei wird ein Strahlmittel mit Hochdruck auf die abzutragende Oberfläche gestrahlt. Auch bei geometrisch komplexen Strukturen ist dieses Verfahren gut einsetzbar. Allerdings sind die Flächenabtragsraten meist gering. Zur Verringerung des Materialeinsatzes kann das Strahlmittel in einem Kreislauf aufgefangen und wiederverwendet werden. Allerdings kann es bei diesem Prozess zu einer Rückkontamination des bearbeiteten Werkstücks durch die abgelösten Kontaminationen kommen. Nach Beendigung der Arbeiten muss das Strahlmittel entsorgt werden. Bei trockenen Verfahren entstehen darüber hinaus Stäube, welche mit Filteranlagen aufgefangen werden müssen. Beim Nassstrahlverfahren wird eine Suspension aus deionisiertem Wasser und Strahlmittel (z. B. Korund, Glasperlen) mit Hochdruck auf die zu bearbeitende Oberfläche gestrahlt /AND 03/.

6.4.2 Schleifen, Fräsen, Nadeln

Schleif- und Frästechniken /BAC 01/, /BAC 03/, /COM 07/, /DUT 05/, /GEI 02/, /HEP 07/, /IAE 99^b/, /PLE 05/, /NEA 99/, /SCH 03/, /SCH 07/, /STE 08/, /TAB 04/,

/THI 09/ wurden bereits im Kapitel über die Abbautechniken behandelt. Sie erlauben den Abtrag großer Flächen. Die einzusetzenden Geräte haben jedoch meist ein hohes Gewicht, um die auftretenden Rückstellkräfte abzufangen. **Mikromeißeln/Nadeln** wird eingesetzt, um die Oberfläche von Betonstrukturen bis zu einer Tiefe von 4 mm abzutragen /HEP 07/. Sie werden mitunter auch zur Vorbehandlung von Bereichen verwendet, bevor Abstrahlverfahren eingesetzt werden /STE 08/. Handgeführte Nadler können auch bei der Behandlung von schwer zugänglichen Bereichen oder Decken eingesetzt werden. Allerdings ist die Arbeitsbelastung dabei recht hoch /BAC 03/, zum einen aufgrund längerer Aufenthaltszeiten im Strahlungsfeld, zum anderen auch rein körperlich durch Handhabung und Bedienung der Geräte. Bei diesen Techniken muss die Rückkontaminationsproblematik bedacht werden.

6.4.3 Chemische und elektro-chemische Verfahren

Oberflächenbeschichtungen können je nach Beschaffenheit des Werkstücks durch **Spülen** oder das Einbringen in ein **Säurebad** gelöst werden /BAC 01/, /BAC 01^b/, /EIC 84/, /EIC 87/, /EIC 91/, /EIC 93/, /EIC 97^a/, /EIC 98/, /IAE 99^b/, /NEA 99/, /SCH 07/, /STE 08/, /THI 09/. Natronlauge eignet sich zum Lösen von Farbschichten, Ölen und Fetten, die Anwendungsdauer beträgt 10 – 20 min /STE 08/. Phosphorsäure kommt zum Einsatz bei Eisenwerkstoffen, um Oxidschichten und Teile des Grundmaterials zu lösen. Die Anwendungsdauer beträgt mehrere Stunden und ist proportional zur abgetragenen Schichtdicke. Letzteres Verfahren kann durch das Anlegen einer Spannung an das Elektrolysebad zum Verfahren des **Elektropolierens** erweitert werden /BAC 01^b/, /EIC 84/, /THI 09/. Hiermit lassen sich auch hochlegierte Stähle dekontaminieren. Bei der anschließenden chemischen Aufbereitung des Elektrolysebades fällt Eisenoxid an, welches als radioaktiver Abfall weiter behandelt werden muss.

Ein in der Revision von Kernkraftwerken häufig eingesetztes chemisches Verfahren zur Dosisreduktion in Kreisläufen, welches auch zur Vorbereitung auf die Stilllegung genutzt werden kann, ist das von Siemens-Areva entwickelte **CORD-Verfahren** (Chemische Oxidation-Reduktion-Dekontamination). Hierbei wird zunächst in der Oxidschicht vorliegendes Cr(III) mit verdünnter Permangansäure zu leicht löslichem Chromat(IV) voroxidiert und anschließend mit Oxalsäure reduziert /BAC 01^b/, /HES 00/, /IAE 99^b/, /KRU 09/, /PRI 08/, /SCH 07/, /SCH 08^a/, /TAB 04/, /THA 08/. Die Korrosionsprodukte sowie die gelöste Aktivität werden an Ionentauscherharze fixiert. Dadurch lässt sich die Aktivität in den Kreisläufen um Faktoren zwischen 10 und 50 reduzieren /KAR 10/. Da

die Aktivität sich in den Ionentauscherharzen niederschlägt, welche anschließend zu entsorgen sind, fallen an dieser Stelle weitere Dosen an, die bei einer Bilanzierung beachtet werden müssen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Rüstzeiten nicht unbeträchtlich sind und zusätzliche Maßnahmen zur Dosisminimierung während Planung und Durchführung des Verfahrens notwendig sind /KAR 10/.

6.4.4 Einschmelzen

Das Einschmelzen von Großkomponenten hat sich als wirkungsvolle Option zur Verminderungen des radioaktiven Abfalls erwiesen /IAE 99^b/, /KRA 07/, /LIN 07/, /NEA 99/, /SCH 07/, /THA 08/. Der überwiegende Anteil aktivierter Atome (z. B. α -Strahler, Sr-90, Eu-152, Eu-154, Cs-134, Cs-137) findet sich nach dem Einschmelzen in der Schlacke wieder, so dass große Mengen an Stahl zur Rezyklierung freigegeben werden können. In diesem Sinne stellt das Einschmelzen eine spezielle Dekontaminationstechnik dar. Zu beachten ist jedoch bei der Bilanzierung von radiologischen Kenngrößen, dass Dosen, die bei vorbereitenden Maßnahmen, beim Ausbau der Großkomponenten bei der Entsorgung der Schlacke und während des Transports zum Einschmelzen anfallen /THA 08/, mit berücksichtigt werden müssen.

6.5 Dekontaminationstechniken in der Entwicklung bzw. in der Einzelfall-anwendung

Das **Hochdruckwasserstrahlen** /BAC 01^b/, /BAC 03/, /IAE 99^b/, /NEA 99/, /SCH 03/, /SCH 07/, /TAB 04/ ist vergleichbar dem Abrasivstrahlen, wobei kein Abrasivmittel dem Wasserstrahl zugesetzt wird. Daher erfolgt die reinigende Wirkung durch den Aufprallmechanismus und nicht die Abrasion /BAC 01^b/.

Die **CO₂-Reinigung** /BAC 01^b/, /COM 07/, /IAE 99^b/, /NEA 99/, /SCH 07/, /VER 05/ zeigt aufgrund der geringen Härte von Trockeneis zwar eine geringe abrasive Wirkung auf die behandelte Oberfläche, jedoch erzeugen die kalten Pellets einen Temperaturgradienten zwischen Oberfläche und darunter liegenden Schichten. Dies führt zu thermischen Spannungen, die Rissbildung und Risswachstum hervorrufen. Durch den Einsatz von Trockeneis, also festes Kohlendioxid bei einer Temperatur von -78,5 °C, fällt kein Sekundärabfall an, da das Strahlmedium während des Prozesses in die Gasphase übergeht und über Filteranlagen abgesaugt werden kann. Das **Trockeneis-Laser-Entschichten** nutzt denselben Effekt, wie die CO₂-Reinigung, mittels Fokussierung ei-

nes Laserstrahls auf die zu bearbeitende Stelle wird diese zusätzlich geschwächt und der thermische Schock erhöht /BAC 01/, /BAC 03/, /BAC 05^a/, /BAC 07/, /COM 07/, /GEI 02/, /IAE 99^b/, /VER 05/. Auch das **Flüssigstickstoffstrahlen** /BAC 01^b/, /IAE 99^b/ ist der CO₂-Reinigung ähnlich, verstärkt dessen Effekt noch durch die tieferen Temperaturen.

Mittels Einstrahlen eines **Hochleistungsdiodenlasers** wird die Oberfläche des behandelten Werkstücks aufgeschmolzen und die Schmelze durch Einwirkung eines Blasgasstromes ausgetragen. Mit diesem Verfahren können Abtragtiefen von bis zu 5 mm erzielt werden /EXN 05/, /HUR 09/, /IAE 99^b/, /KNO 05/, /LIP 06/, /LIP 07/, /TAB 04/.

Wie bereits im Abschnitt über die Abbautechniken beschrieben, können **Mikrowellenverfahren** eingesetzt werden, um einen Oberflächenabtrag zu erzielen, indem das im Beton gebundene Wasser durch die Mikrowelleneinstrahlung expandiert und die Oberflächenschicht abplatzt /BAC 01/, /IAE 99^b/, /NEA 99/. Ein Vorteil der Mikrowellenverfahren ist, dass keine Rückkontamination auftritt.

6.6 Zusammenstellung der Literatur zu Dekontaminationstechniken

In Tab. 6.2 sind Verweise zu Artikeln mit technischen Beschreibungen der Dekontaminationsverfahren und Quellenangaben zum Einsatz der Verfahren in konkreten Stilllegungsprojekten gelistet. Darüber hinaus werden Literaturstellen separat aufgeführt, die Angaben zu radiologischen Kenngrößen, wie Kollektiv- und Personendosen sowie Arbeitszeiten, enthalten. Die Tabelle kann aufgrund der Dynamik im Bereich des Einsatzes von Dekontaminationstechniken nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sie bildet jedoch einen guten Ausgangspunkt für eine weiterführende Literaturrecherche.

Tab. 6.2: Tabelle der Dekontaminationsverfahren

Liste der Dekontaminationsverfahren	Allgemeine Verfahrensbeschreibungen	Stilllegungsprojekte		Radiologische Kenngrößen
Abrasiveinreinigung	/AND 03/ /BAC 03/ /GEI 02/ /IAE 99 ^b / /NEA 99/ /SCH 07/ /STE 08/	KKP	/SCH 07/	/KRA 07/ /LIN 07/
		KRB-A	/STE 08/	
		KWW	/SCH 07/	
		Ringhals	/KRA 07/ /LIN 07/	
Schleifen, Fräsen, Nadeln	/BAC 01/ /BAC 03/ /COM 07/ /GEI 02/ /HEP 07/ /IAE 99 ^b / /NEA 99/ /PLE 05/ /SCH 03/ /SCH 07/ /STE 08/ /TAB 04/ /THI 09/	KRB-A	/STE 08./	
		VAK	/SCH 03/	
		WAK	/DUT 05/	
Chemisch	/BAC 01 ^b / /HES 00/ /IAE 99 ^b / /KAR 10/ /NEA 99/ /SCH 07/ /TAB 04/	KKI	/SCH 08 ^a /	/HES 00/ /KRU 09/ /SCH 08 ^a / /THA 08/
		KKP	/SCH 07/	
		KKS	/THA 08/	
		KWL	/PRI 08/	
		KWO	/KRU 09/	
		MZFR	/HES 00/ /SCH 07/	
		WAK	/SCH 07/	
Elektro-chemisch	/BAC 01/ /BAC 01 ^b / /EIC 84/ /EIC 87/ /EIC 91/ /EIC 93/ /IAE 99 ^b / /SCH 07/ /STE 08/ /NEA 99/ /THI 09/	KRB-A	/EIC 87/ /EIC 91/ /EIC 93/ /EIC 97 ^a / /EIC 97 ^c / /EIC 98/ /SCH 07/ /STE 08/	/EIC 97 ^a / /EIC 97 ^c /
Einschmelzen	/IAE 99 ^b / /NEA 99/ /SCH 07/	Ringhals	/KRA 07/ /LIN 07/	/KRA 07/ /THA 08/
Hochdruckwasserstrahlen	/BAC 01 ^b / /BAC 03/ /IAE 99 ^b / /NEA 99/ /SCH 03/			

Liste der Dekontaminationsverfahren	Allgemeine Verfahrensbeschreibungen	Stilllegungsprojekte		Radiologische Kenngrößen
	/SCH 07/ /TAB 04/			
CO ₂ -Reinigung	/BAC 01 ^b / /COM 07/ /IAE 99 ^b / /NEA 99/ /SCH 07/ /VER 05/			
Trockeneis-Laserstrahl-Entschichten	/BAC 01/ /BAC 03/ /BAC 05 ^a / /BAC 07/ /COM 07/ /GEI 02/ /IAE 99 ^b / /VER 05/			
Flüssigstickstoffverfahren	/BAC 01 ^b / /IAE 99 ^b /			
Laserstrahl	/EXN 05/ /HUR 09/ /IAE 99 ^b / /KNO 05/ /LIP 06/ /LIP 07/ /TAB 04/			
Mikrowellenverfahren	/BAC 01/ /IAE 99 ^b / /NEA 99/			

7 Erfahrungen mit Dekontaminations- und Abbautechniken unter radiologischen Gesichtspunkten

Bereits in Kapitel 6 sind Verweise auf weiterführende Informationen bereitgestellt, in denen u. a. Anwendungsbeispiele aus konkreten Stilllegungsprojekten beschrieben sind. Ergänzend hierzu werden in diesem Kapitel weitere konkrete Erfahrungen mit Dekontaminations- und Abbautechniken unter Gesichtspunkten des Strahlenschutzes beschrieben, die sich auf in der Literatur beschriebene Abbaugewerke und auf während der Erstellung dieses Fachberichtes erhobene Daten basieren.

7.1 Deutsche Leistungs- und Prototypreaktoren

7.1.1 Stilllegung des Kernkraftwerkes Greifswald (KGR)

Die Stilllegung des Kernkraftwerkes Greifswald mit fünf Reaktoren beinhaltet eine Vielzahl von Dekontaminations- und „Abbaugewerken“. Während der Erstellung dieses Fachberichtes wurden gezielt Daten für zwei Gewerke erhoben, die nachfolgend beschrieben werden.

7.1.1.1 Zerlegung eines Gullywasserbehälters

Bei der Zerlegung eines Gullywasserbehälters bei KGR wurden Plasmaschneider, ein Elektroschweißgerät und Autogenbrenner eingesetzt. Die Arbeiten fanden in einer Einhausung statt, als Personenschutzmaßnahmen wurden fremdbelüftete Anzüge eingesetzt. Insgesamt wurden 13,365 Mg Material abgebaut, als Sekundärabfall (Schnittfugenmaterial, Brennschlacke) fielen 0,05 Mg an.

Die Kollektivdosis betrug 0,18 Pers.mSv, von denen etwa ein Drittel (0,056 Pers.mSv) auf den Gerüstbau entfiel, der Rest auf die Demontagetätigkeiten. Insgesamt waren acht Personen mit insgesamt ca. 550 Arbeitsstunden beteiligt, die größte Individualdosis betrug 0,097 mSv.

Dies entspricht rechnerisch einer tätigkeitsbezogenen Dosisleistung von nur etwa 0,3 $\mu\text{Sv/h}$. Die tatsächlich gemessene Ortsdosisleistung betrug durchschnittlich 3 $\mu\text{Sv/h}$ (maximal 10 $\mu\text{Sv/h}$), sie war bestimmt durch die Dosisleistung des zu zerlegenden Behälters selbst. Die Tatsache, dass die rechnerische tätigkeitsbezogene Do-

sisleistung um mindestens einen Faktor 10 niedriger ist als die gemessene Ortsdosisleistung lässt darauf schließen, dass die Arbeiten so geplant und durchgeführt wurden, dass die Exposition der beteiligten Personen wirkungsvoll reduziert werden konnte.

7.1.1.2 Demontage Dampferzeuger 1 (DE 1) von Block 4

Zur Demontage des DE 1 von Block 4 des KGR wurden Sägen, eine Schrottschere, Autogenbrenner und Trennschleifer eingesetzt. Sägearbeiten wurden im Zwischenlager Nord unter einer Einhausung durchgeführt und das Personal durch das Tragen von Schutzhandschuhen und Filtermasken geschützt. Die Abbaumasse betrug 160 Mg bei einem Sekundärabfallaufkommen an Schnitffugenmaterial und Brennschlacke von 8,4 Mg.

Die Kollektivdosis summierte sich zu 3,098 Pers.mSv und verteilte sich auf 22 Personen, welche ca. 4220 Stunden im Einsatz waren. Dabei betrug die größte Individualdosis 0,787 mSv.

Auch im Falle der Demontage des DE 1 von Block 4 lässt der Vergleich der errechneten tätigkeitsbezogenen Dosisleistung von ca. 0,7 $\mu\text{Sv/h}$ mit der tatsächlich gemessenen Ortsdosisleistung von im Mittel 5 $\mu\text{Sv/h}$ (bei einem Maximalwert von 500 $\mu\text{Sv/h}$) auf eine wirkungsvolle Strahlenschutzplanung schließen.

7.1.2 Stilllegung des Kernkraftwerkes Würgassen (KWW)

7.1.2.1 Seilsägen von Wärmetauschern

Zur fernhantierten Demontage eines Regenerativwärmetauschers im KWW wurde eine hydraulische Diamantseilsäge verwendet /BOL 07/, da sich diese bei der Zerlegung der komplexen Stahlstrukturen des Dampftrockners I bewährt hatte. Die Machbarkeit des Verfahrens wurde zunächst an einem Mock-Up demonstriert und Sägeparameter ermittelt. 14 Sägeschnitte waren zur Zerlegung notwendig, wobei pro Schnitt von 55000 mm^2 etwa ein Sägeseil verbraucht wurde (Standzeit: 60000 mm^2). Bei einer ODL von 15-800 $\mu\text{Sv/h}$ ergab sich eine Kollektivdosis von ca. 14 Pers.mSv; 8 Pers.mSv entfielen auf die Demontage, 6 Pers.mSv auf Dekontamination und Nachzerlegung der Schnitte. Somit konnte die erwartete Kollektivdosis von 20 Pers.mSv deutlich unterschritten werden.

7.1.2.2 Zerlegung von Steuerstabführungsrohren und Strahlpumpen

Die Zerlegung von Steuerstabführungsrohren und Strahlpumpen im KWW wird in /DUW 05/ beschrieben. Sämtliche Zerlegemaßnahmen erfolgten aus Strahlenschutzgründen unter Wasser. Zur Vorzerlegung kam daher eine Bandsäge zum Einsatz. Die Nachzerlegung erfolgt mittels Nibbler. Beide mechanische Verfahren haben folgende Vorteile:

- Es werden keine Aerosole und Hydrosole freisetzen, die zu einer Wassertrübung führen und damit die Sicht beeinträchtigen könnten.
- Die anfallenden Schneidspäne können einfach eingesammelt werden, aufwendige Wasserreinigung- und -filtrationsgeräte sind nicht vonnöten.
- Mit Ausnahme der Verschleißteile wird kein Sekundärabfall erzeugt.
- Beide Methoden sind Standardtrennverfahren.

Die Aufhängung des Nibblers als Auftriebskörper erlaubte dessen Führung per Hand. In einem Zeitraum von drei Monaten wurden im 2-Schichtbetrieb unter Einsatz von zehn Personen pro Schicht 110 Steuerstabführungsrohre und 18 Strahlpumpen zerlegt und verpackt. Die Kollektivdosis einschließlich des zur Überwachung eingesetzten Strahlenschutzpersonals belief sich auf 1,6 Pers.mSv.

7.1.2.3 Zerlegung Dampfwasserabscheider

Die Zerlegung eines Dampfwasserabscheiders im KWW erfolgte fernhantiert unter Wasser /DUW 07/. Zum Einsatz kamen Stich- und Bandsäge, sowie WASS zur Demontage der Kernsprühingleitungen. In sieben Monaten wurden im 2-Schichtbetrieb mit jeweils durchschnittlich zehn Personen pro Schicht ca. 35 Mg Stahl zerlegt und verpackt. Dabei fiel eine Kollektivdosis von 46 Pers.mSv an. Insgesamt wurden 50 Sägeblattwechsel durchgeführt, welche mit durchschnittlich 40 µSv pro Wechsel zu Buche schlugen.

7.1.2.4 Zerlegung Reaktordruckbehälter (RDB)-Einbauten

Die Zerlegung der RDB-Einbauten in KWW umfasst eine Gesamtmasse von ca. 55,3 Mg /DUW 09/. Dosisleistungen für aktivierte kernnahe Bauteile waren wie folgt:

Kerndeckel 1 – 3 Sv/h, oberes Kerngitter 10 – 20 Sv/h, unteres Kerngitter 5 – 10 Sv/h, Kernmantel 2 – 6 Sv/h. Aufgrund der hohen Dosisleistung erfolgte die Zerlegung und Verpackung grundsätzlich fernhantiert unter Wasser. So konnte die Ortsdosisleistung (ODL) an der Wasseroberfläche auf maximal 10 µSv/h begrenzt werden. Die Zerlegung erfolgte mit Hilfe folgender Techniken, welche sich bei der Zerlegung des Dampfwas-serabscheiders (siehe Abschnitt 7.1.2.3) bewährt hatten: Stichsäge, Bandsäge, Hyd-raulischschere, Fräse, WASS (Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden). Letzteres wurde zur Zerlegung der Kerngitter und des Kerndeckels eingesetzt und erfolgte in einer Becken-in-Becken-Konstruktion zur Minimierung der Ausbreitung des Abrasivmittel-Trennfugenmaterial-Gemischs. Beim Einsatz der übrigen Abbautechniken wirken sich die Vorteile, wie sie in Abschnitt 7.1.2.2 zur Zerlegung von Steuerstabsführungsrohren und Strahlpumpen aufgeführt worden sind, positiv aus. Für die beschriebenen Abbauarbeiten ergab sich insgesamt eine Kollektivdosis von 99 Pers.mSv.

7.1.2.5 Fernhantierte mechanische Zerlegung Dampftrockner

Der Dampftrockner 1 des KWW wurde außerhalb des RDB mit einer Diamantseilsäge fernhantiert mechanisch zerlegt /RUN 05/. Dieses als Stand der Technik einzustufende Verfahren wurde aufgrund des komplexen Innenaufbaus des Dampftrockners gewählt. Auf Grund der positiven Erfahrungen mit diesem Verfahren wurde in der Folge der Dampftrockner 3 ebenfalls mit diesem Verfahren zerlegt /RUN 07/. 20 Mg an Material wurden bearbeitet, das eine Dosisleistung aufgrund von Kontaminationen von 0,35 mSv/h aufwies. Fünf Schnitte wurden durchgeführt mit einer reinen Sägezeit von 345 h. Es wurden 18 Sägeseile benötigt, wobei deren Durchmesser sukzessive verringert wurde. Der Planwert für die Kollektivdosis von 21 Pers.mSv konnte unterschritten werden. Nach Beendigung der Maßnahme ergab sich eine Kollektivdosis von 19 Pers.mSv.

7.1.3 Stilllegung des Kernkraftwerkes Stade (KKS)

7.1.3.1 Ausbau von Dampferzeugern

Eine umfassende Darstellung der radiologischen Bedingungen beim Ausbau der Dampferzeuger aus KKS und deren Transport an einen externen Dienstleister ist in /THA 08/ enthalten.

Als vorbereitende Maßnahme zum Ausbau der DE wurde zunächst die Materialschleuse umgebaut. Dazu waren Arbeiten in einem Bereich mit einer Ortsdosisleistung (ODL) $< 5 \mu\text{Sv/h}$ nötig. Aufgrund der Arbeitszeit von insgesamt 10.000 Pers.h ergab sich eine Kollektivdosis von ca. 8,2 Pers.mSv. Arbeiten an der DE-Peripherie führten zu folgenden Kollektivdosen:

- Abbau der Frischdampf-Sicherheitsarmaturen-Bedienbühnen: 6.000 Pers.h bei einer ODL $< 5 \mu\text{Sv/h}$ ergaben eine Kollektivdosis von 3,4 Pers.mSv,
- Ausbau Riegel DE-Räume: 260 Pers.h bei einer ODL $< 5 \mu\text{Sv/h}$ ergaben eine Kollektivdosis von 0,2 Pers.mSv,
- Abbau der Stahlkonstruktionen im Bereich der DE: 2.200 Pers.h bei einer mittleren ODL von $40 \mu\text{Sv/h}$ ergaben eine Kollektivdosis von 8,4 Pers.mSv,
- Demontage Hauptkühlmittelleitung (HKL) bei einer ODL von $60 \mu\text{Sv/h}$ und Verschließen der Stützenöffnungen bei einer ODL von $10 \mu\text{Sv/h}$ führten bei 1.000 Pers.h zu einer Kollektivdosis von 7,8 Pers.mSv. Stichprobenartig wurden darüber hinaus Ausscheidungsanalysen durchgeführt um etwaige Inkorporationen und zugehörige Expositionen ermitteln zu können; die ermittelte Dosis lag unterhalb von $50 \mu\text{Sv}$.

Der Ausbau und die Transportbereitstellung eines Dampferzeugers wurden bei Werten für die Ortsdosisleistung zwischen $6 - 60 \mu\text{Sv/h}$ durchgeführt. In 1.800 Pers.h wurde dabei eine Kollektivdosis von 2,3 Pers.mSv festgestellt.

Anschließend wurde der Dampferzeuger für eine weitere Demontage bei einem externen Dienstleister zu einem Schiffsanleger transportiert. Die hieran beteiligten 21 Personen erhielten an den vier Arbeitstagen eine Kollektivdosis von 0,35 Pers.mSv. Verladen, Schiffstransport und Entladen schlugen mit 0,49 Pers.mSv, verteilt auf 23 Personen, zu buche. Die Kollektivdosis bei der mechanischen/thermischen fernhantierten bzw. abgeschirmten Demontage des Dampferzeugers beim externen Dienstleister wurde im Vorfeld auf 80 Pers.mSv abgeschätzt. Nach der Zerlegung der vier Dampferzeuger ist geplant 480 Mg an Material freizugeben; 140 Mg an Gießlinge und 30 Mg Abfall sind zu entsorgen.

7.1.4 Stilllegung des Kernkraftwerkes Gundremmigen Block A (KRB-A)

Die Stilllegung von KRB-A gliedert sich in drei Abbauphasen (siehe z. B. /EIC 93/, /STE 95/), die nachfolgend hinsichtlich eingesetzter Techniken und Aspekten des Strahlenschutzes beschrieben werden. Die Abbaubereiche der drei Abbauphasen waren:

1. Arbeiten im Maschinenhaus;
2. Abbau der Sekundärdampferzeuger und kontaminierten Systeme;
3. Abbau des Reaktordruckbehälters sowie seiner Einbauten und des biologischen Schilts.

7.1.4.1 Arbeiten im Maschinenhaus

Die erste Phase des Abbaus des Kernkraftwerks KRB-A umfasste Arbeiten im Maschinenhaus /STA 89/. Unter anderem wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Im Rahmen von Arbeiten zum Abbau der Kondensatorkammern mussten aus den geöffneten Kondensatorkammern 17.000 Messingrohre herausgebohrt werden. Dazu wurden die 15 m langen Rohre zunächst mit einer Schleifmaschine halbiert zur besseren Handhabung. Die Gesamtarbeitszeit umfasste 5.660 Pers.h, und es wurde eine Kollektivdosis von 14,5 Pers.mSv registriert.
- Am Beispiel der Hochdruckturbine wurde die Eignung der Propan/Sauerstoff-Schneidtechnik zur Zerlegung von dickwandigen ferritischen Komponenten demonstriert. Zwar wäre durch den Einsatz von Sägetechniken die Entstehung von Aerosolen und damit die Notwendigkeit, Filtersystem für die Reinigung der Raumluft und Masken für die Arbeiter zur Verfügung zu stellen, vermieden worden. Jedoch fielen die vorherrschenden räumlichen Bedingungen und damit der Vorteil der Flexibilität der Schneidtechnik stärker ins Gewicht. Schraubarbeiten wurden bei einer Ortsdosisleistung von 0,0025 mSv/h durchgeführt und dauerten 95 h, was zu einer Kollektivdosis von 0,24 Pers.mSv führte. Die Schneidarbeiten wurden in 210 h verrichtet bei einer Ortsdosisleistung von 0,0123 mSv/h; hieraus resultiert eine Kollektivdosis von 2,6 Pers.mSv.

Das Propan/Sauerstoff-Schneiden wurde dann auch für die Niederdruckturbine eingesetzt. Dabei ist eine Kollektivdosis von 1,7 Pers.mSv aufgelaufen.

- Die Dampfrohre zwischen Hoch- und Niederdruckturbine wurden dekontaminiert; die Dekontamination erfolgte chemisch/elektrochemisch in einem Phosphorsäurebad mit anschließender Hochdruckwasserstrahlreinigung. Versuche mit Ultraschallreinigung und Beizen mit Schwefelsäure zeigten aufgrund der festgebundenen Metalloxidkontaminationen nicht die erhofften Resultate. Die Arbeitszeit summierte sich zu 1.700 Pers.h, wobei 2,8 Pers.mSv Kollektivdosis registriert wurde.
- Zur Dekontamination des Kondensatorgehäuses wurde dasselbe Verfahren wie für die Dampfrohre angewendet, jedoch wurde noch ein zusätzlicher Prozessschritt vorgeschaltet: In einem Bad mit Natronlauge wurde zuerst der Farbanstrich entfernt. Die gesamte Prozedur umfasst 3.500 Pers.h und führte zu einer Kollektivdosis von 14 Pers.mSv. Die Methode des Abbeizens und/oder Elektropolierens mit 40%iger Phosphorsäure und anschließender Hochdruckwasserstrahlreinigung wurde noch für die Dekontamination weiterer Rohre und Ventile eingesetzt. Hierauf entfielen 300 Pers.h und eine Kollektivdosis von 1 mSv.

Die Abbaumaßnahmen in der Phase I führten zu Abfallmengen von 3.500 Mg Metallschrott und 500 Mg sonstigen Materialien. Die Gesamtaktivität aller behandelten Komponenten umfasste $4e10$ Bq, die erhaltene Kollektivdosis belief sich auf 1 Pers.Sv /EIC 93/, /STE 97°/.

7.1.4.2 Arbeiten zum Abbau der Sekundärdampferzeuger und kontaminierter Systeme

Die Abbauphase II umfasste die primärwasserbeaufschlagten Systeme und Komponenten. Das Abfallaufkommen belief sich hier auf 700 Mg bei einer Aktivität von $1e12$ Bq. Die Kollektivdosis bei Arbeiten in der Phase II summierte sich auf 1,4 Pers.Sv /EIC 93/, /STE 97°/.

Im Rahmen der Arbeiten zur Abbauphase II wurden u. a. die Sekundär-Dampferzeuger zerlegt. Hierbei wurde das Verfahren des Eissägens eingesetzt, bei dem die Dampferzeuger zunächst mit Wasser gefüllt, auf -20 °C eingefroren, und anschließend mit einer Bandsäge segmentiert werden. Vorteile dieses Verfahrens sind

- die abschirmende Wirkung des Eises und damit Reduzierung der Dosisleistung im Arbeitsbereich,
- die erheblich verringerte Freisetzung von Aerosolen,

- die Fixierung der Einbauten und
- die Kühlung des Sägeblattes /EIC 93/.

Durch Elektropolieren wurde die ursprüngliche Dosisleistung von 20 mSv/h so weit reduziert, dass u. a. die dekontaminierte Außenhülle uneingeschränkt freigegeben werden konnte.

Tab. 7.1 stellt die Arbeitszeiten und Kollektivdosen bei der Zerlegung der drei Sekundär-Dampferzeuger zusammen /STE 98/.

Tab. 7.1: Kollektivdosen beim Zerlegen der Dampferzeuger (DE) in KRB-A /STE 98/

	DE I	DE II	DE III
Vorbereitung [Pers.h]	5.000	4.200	3.700
Demontage [Pers.h]	1.300	1.300	1.100
Nachzerlegung [Pers.h]	2.700	1.800	1.600
Kollektivdosis [Pers.mSv]	176	138	90

7.1.4.3 Arbeiten zum Abbau des Reaktordruckbehälters, seiner Einbauten und des biologischen Schildes

Die Abbauphase III beinhaltet den Abbau des Reaktordruckbehälters (RDB) samt Einbauten und Abbau des Biologischen Schildes /EIC 93/.

Für die Zerlegung des Dampftrockners war ein Aufwand von 6.600 Pers.h erforderlich, dabei fiel eine Kollektivdosis von 39 Pers.mSv an /EIC 93/. Die Arbeiten wurden unter Wasser durchgeführt. Einfache und zuverlässige Verfahren, welche bis zu einer Wassertiefe von 20 m eingesetzt werden können, waren gefordert. Daher kam das Plasmaschmelzschnitzen zum Einsatz, lediglich für die Demontage von dünnwandigen Drainagerohren wurde eine Stichsäge verwendet /STE 96/. Weitere 1000 Pers.h waren für die Entfernung der Hülle des Dampftrockners mittels Plasmalichtbogenschneides nötig. Die Kollektivdosis summierte sich zu 7 Pers.mSv. Der Dekontaminationsaufwand durch Elektropolieren der Komponenten betrug 700 Pers.h bei 5 Pers.mSv Kollektivdosis /EIC 97^a/, /EIC 97^c/, /EIC 98/.

Die Zerlegung der RDB-Einbauten erfolgte fernhantiert unter Wasser. Oberer und unterer Abschnitt des RDB wurden fernhantiert mittels autogenen Brennschneidens an Luft zerlegt, da dieses Verfahren eine hohe Schneidgeschwindigkeit aufweist. Dabei erfolgten die Arbeiten von außen nach innen und die entstehenden Aerosole wurden nach

innen abgesaugt. Die Kalotte wurde ebenfalls thermisch zerlegt. Insgesamt umfasst der Abbau des RDB 250 Mg ferritischen, innen austenitisch plattierten Stahl mit einer Wandstärke bis zu 400 mm. Die Gesamtschnittlänge betrug 400 m und es war ein Arbeitsaufwand von 30.000 Pers.h zu verrichten. Dabei wurde eine Kollektivdosis von 135 Pers.mSv ermittelt /STE 08/.

Der Abbau des Biologischen Schildes umfasste ein Betonmasse von 300 Mg. Zur Zerlegung wurde eine Diamantseilsäge eingesetzt; die gesamte Schnittfläche zwischen den einzelnen Betonsegmenten betrug 150 m². In den 21.000 Pers.h dieses Abbauschnittes wurde eine Kollektivdosis von 170 Pers.mSv akkumuliert /STE 08/.

Bei der Dekontamination der Oberflächen im Sicherheitsbehälter (SHB) kommen eine Reihe von Verfahren zum Einsatz: Nadler, Schleifer, Meißel, Abstrahlen mit Stahlkies und Absaugen und Recycling des Strahlmittels. Insgesamt ist bis dato (Stand 2008) die Hälfte der SHB-Oberflächen von 12.000 m² bei einer Belastung von etwa 1 µSv/h bearbeitet worden. Die Gesamtmenge abgetragenen Materials beträgt ca. 70 Mg /STE 08/.

Insgesamt wurde ca. 600 Mg an Material mit einer Gesamtaktivität von 2e16 Bq bearbeitet. Die Kollektivdosis wurde mit 1,5 Pers.Sv abgeschätzt /EIC 93/.

7.1.4.4 Zusammenstellung von Daten zu Arbeiten in KRB-A aus verschiedenen Literaturstellen

In der folgenden Tab. 7.2 werden weitere radiologische Daten bei diversen Abbau- und Dekontaminationsarbeiten in KRB-A aufgelistet. Insbesondere werden in /STE 08/ über die radiologischen Daten hinaus auch umfassende Information zur Arbeitsplanung der jeweiligen Abbaumaßnahmen gegeben.

Tab. 7.2: Radiologische Daten zu Arbeiten in KRB-A aus /STE 98/, /STE 08/ und /STA 93/

Komponente	Werkzeug	Pers.h	Kollektivdosis [Pers.mSv]	ODL
Nachkühler	Eissägen	1.150	21 (40% für Handhaben der geschnittenen Rohre)	0,8 mSv/h @ 0,5 m
Reinigungskühler	Eissägen	1.100	8,9	0,8 mSv/h @ 0,1 m
Primärkreis	Plasmaschneiden	52 Planung 109 Abschirmen 62 Vorbereitung 60 Zerlegung 9 Transport	0,016 2,42 1,676 1,1215 0,286	2,3 mSv/h @ 0,1 m, Innenseite 6 mSv/h
Hauptkühlmittelpumpe (Angaben beziehen sich auf eine von 3 Pumpen)	Dekont mit Detergenzien; Sägen, Dekont mit H ₃ PO ₄ , Elektropolieren, Schmelzen	77 Planung 960 Vorbereitung 625 Ausbauen 4.220 Zerlegung 2.208 Dekont	5,8 18,7 36,0 13,4	4,7 mSv/h Rotor
Dampftrockner	Plasmaschneiden/Stichsäge unter Wasser s. o.	7.100	39	
Regelstäbe	hydraulisches Pressen zum Entfernen von Stellit-Rollen	206	2,4	150 Sv/h
Speisewasser-Verteilerring	Unterwasser Stichsäge	650	6,2 (Planungswert)	
Reaktordruckbehälter	Brennschneiden (Acetylen)	30.000	135	
Biologischer Schild	Diamantseilsägen	21.000	170	
Rohrleitungen, Armaturen	Brennschneiden Acetylen, händisch, Nachzerlegung mit Bügelsäge	1000	2,7	
Kastenträger Niederdruck-Turbine,	Schrauben Brennschneiden Propan, Atemvollschutz	80 Demontage 855 Nachzerlegung	0,1 1,7	
Hochdruck-Turbinenoberteil	Schrauben Brennschneiden Propan, Atemvollschutz	95 Demontage 210 Nachzerlegung	0,37 2,6	
Rohrbündel Speisewasservorwärmer	Kohlelichtbogen-Pressluft	220	0,9	

Komponente	Werkzeug	Pers.h	Kollektivdosis [Pers.mSv]	ODL
Hauptkondensator	Ziehen, Trennschleifen	1.995	14,8	
	Scheren,	5.250	5,3	
	autogenes Brennschneiden, tw. Kohlelichtbogen-Pressluft	610	3,9	
Dekont. Rohrleitungen, Ar- maturen	Säurebehandlung	317	0,38	
	Nachbehandlung	149	0,55	
	Transport	95		
Dekont Kanalwände	Säurebehandlung	893	0,915	
	Nachbehandlung	238	0,81	
Dekont Wasserabscheider	Säurebehandlung	147	0,73	
	Nachbehandlung	92	0,35	
Dekont Bauteile Hauptkon- densator, 104 Mg	Vorbereitung Schweißnähte	153	0,38	
	Farbentfernung	83	0,19	
	H ₃ PO ₄ -Beizen	1.972	7,1	
	Säureaufbereitung	283	1,47	
	Dekont-Nachbehandlung	938	3,56	
Transport	240	1,25		

Die aus diversen Literaturstellen zusammengetragenen Daten zur beruflichen Strahlenexposition bei Abbau- und Dekontaminationsmaßnahme bei KRB-A sind in Tab. 7.3 noch einmal in einer Gesamtschau wiedergegeben und den drei Abbauphasen des Stilllegungsprojekts KRB-A zugeordnet worden. Die Summen- und Prozentangaben in der Tabelle verdeutlichen dabei, welcher Anteil der in den einzelnen Stilllegungsphasen aufgelaufenen Personendosis von der Literaturlauswertung erfasst wurde.

Tab. 7.3: Abschätzung der abbautätigkeitsbezogenen Kollektivdosis des Personals
/STA 89/, /STA 93/, /STE 98/

Phase	Summe [mSv]	Einzel-dosen [mSv]	Pers.h	Abbautätigkeit („Job“)	Quelle
I	1.000	14,5	5.660	Schneiden Kondensatorrohre	/STA 89/
		2,8	305	Demontage HD-Turbine	
		1,7		Demontage ND-Turbine	/STA 89/
		2,8	1.700	Dekont Dampfrohr zw. HD und ND-Turbine	/STA 89/
		14	3.500	Zerlegen Kondensator-Gehäuse	/STA 89/
		2,7	1.000	Schneiden Rohre	/STA 93/
		4,77	1.240	Kastenträger ND-Turbine/HD Turbinenoberteil	/STA 93/
		14,8	1.995	Hauptkondensator Ziehen	/STA 93/
		5,3	5.250	Hauptkondensator Scheren	/STA 93/
		3,9	610	Hauptkondensator Schneiden	/STA 93/
		1,73	1.130	Dekont Kanalwände	/STA 93/
		1,08	240	Dekont Wasserabscheider	/STA 93/
		13,95	3.669	Dekont Hauptkondensator	/STA 93/
	0,93	466	Dekont Rohre	/STA 93/	
Summe		84,96			
%		8,5			
II	1.400	176	9.000	DE I	/STE 98/
		138	7.300	DE II	/STE 98/
		90	6.400	DE III	/STE 98/
		21	1.150	Nachkühler	/STE 98/
		8,9	1.100	Reinigungskühler	/STE 98/
		5,6	290	Primärkreis Komponenten	/STE 98/
		79	9.600	HKMP (1 von 3)	/STE 98/
Summe		561,3			
%		40			
III	1.500	39	7.100	Dampftrockner RDB	/STE 98/
		2,4	206	Regelstab-Demontage (Teil)	/STE 98/
		6,2*	650*	Speisewasser-Verteilerring	/STE 98/
		135*	30.000*	RDB	/STE 08/
		170	21.000	Biologischer Schild	/STE 08/
Summe		352,6			
%		23,5			

(*Planungswerte)

7.1.5 Stilllegung Versuchsatomkraftwerkes Kahl (VAK)

Im Rahmen der Stilllegung des VAK wurden verschiedene Abbauarbeiten an Reaktordruckbehältereinbauten unter Wasser durchgeführt, von denen einzelne nachfolgend unter Gesichtspunkten des Einsatzes von Abbautechniken beschrieben werden.

7.1.5.1 Demontage des Notkühlprührings

Die Demontage des Notkühlprührings (Gesamtaktivität $1,7e9$ Bq an Co-60, Mn-54, Ni-63, Fe-55) wurde mit einer Stichsäge durchgeführt, die für das Arbeiten unter Wasser ertüchtigt wurde und sich in früheren Maßnahmen bewährt hatte. Der Arbeitsaufwand betrug 100 Pers.h und resultierte in eine Kollektivdosis von 0,7 Pers.mSv /KAL 95/, /EIC 97^a/.

7.1.5.2 Abbau Kamin VAK

Der Kamin (Gesamtaktivität $9,6e13$ Bq an Co-60, Mn-54, Ni-63, Fe-55) war eine Blechkonstruktion aus austenitischem Material im Reaktordruckbehälter, der einer gerichteten Dampfströmung diente. Der Abbau erfolgte mit Nibbler und Stichsäge unter Wasser. 508 Pers.h waren vonnöten und 2,3 Pers.mSv Kollektivdosis ist akkumuliert worden /KAL 95/. Addiert man noch die Daten zur Verpackung, so ergibt sich bei 550 Pers.h eine Kollektivdosis von 2.6 mSv /EIC 97^a/. Die Ortsdosisleistung am Werkzeugkopf durch Kontamination betrug nach 50 Schnitten 0,01 mSv/h.

7.1.5.3 Abbau obere Kerngitterplatte

Beim Abbau der oberen Kerngitterplatte (Gesamtaktivität $1e14$ Bq an Co-60, Mn-54, Ni-63, Fe-55) kam eine Trennschleifmaschine unter Wasser zum Einsatz, die mit Hilfe eines speziell konstruierten Gehäuses an den ehemaligen Brennelement-Stellplätzen positioniert werden konnte/KAL 95/, /EIC 97^a/. Ein Werkzeugwechsel war nach jeweils acht Schnitten notwendig. Die Schleifscheiben wiesen dann eine Oberflächendosisleistung von 0,05 mSv/h auf. Die komplette Demontage und Verpackung nahm 200 Pers.h in Anspruch und führte zu einer Kollektivdosis von 1,6 Pers.mSv.

7.1.5.4 Abbau des Kernsprührings

Der Abbau des Kernsprührings (Gesamtaktivität $1,2 \times 10^{10}$ Bq an Co-60, Mn-54, Ni-63, Fe-55) erfolgte mittels Electron Discharge Machining (EDM) unter Wasser, die Nachzerlegung mit einer Stichsäge /EIC 97^a/. Der Arbeitsaufwand betrug 1.000 Pers.h mit einer Kollektivdosis von 7,7 Pers.mSv. Auf die Nachzerlegung entfielen davon 100 Pers.h mit einer KD von 600 μ Sv /EIC 98/.

7.1.5.5 Zerlegung Biologischer Schild

Die Zerlegung des Biologischen Schilds des VAK wurde fernhantiert mit einem Bagger durchgeführt, welcher mit Meißel, hydraulischer Schere und Plasmaschneider bestückt werden konnte /RUN 04/. Das Plasmaschneiden der Kühlungs- und Neutronenmonitorrohre wurde jedoch auch teilweise manuell durchgeführt. Die maximale Ortsdosisleistung am Biologischen Schild betrug 4-5 mSv/h, bei einzelnen Abfallfässern wurden 8 mSv/h gemessen. Die Arbeiten liefen neun Monate in einem 2-Schichtbetrieb; in 15.000 Pers.h wurden insgesamt 26,4 Pers.mSv Kollektivdosis akkumuliert, wobei die Maximaldosis einer Person bei 3,5 mSv lag. Insgesamt fielen 287 Mg an aktivem Abfall (davon 275 Mg Beton) an, 90 Mg Material konnte freigegeben werden.

7.1.6 Stilllegung der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage (KNK) – Zerlegung des Reaktortanks

Die Zerlegung des Reaktortanks (Gesamtgewicht samt Einbauten von 99,6 Mg) und der Abbau der Wärmeisolierung sowie Ausbau der Zerlegung der Primärabschirmung in der KNK werden in /MIN 07^a/ und /MIN 07/ beschrieben. Aufgrund der hohen Dosisleistung (s. u.) wurde die Zerlegung in einer Einhausung (350 mm Stahl) durchgeführt, bis zur Entfernung sämtlicher natriumhaltigen Teile in N₂-Atmosphäre. Zum Einsatz kam eine spezielle fernhantierte Zerlegemaschine mit zwölf Anbaumodulen (u. a. eine Fräse), die den besonderen räumlichen Verhältnissen angepasst und für den Transport schwerer Lasten ausgelegt war.

Die folgenden Daten zur Zerlegung des Reaktortanks der KNK wurden im Rahmen der Erstellung dieses Fachberichtes vom Betreiber bereitgestellt.

Bei der Maßnahme fiel insgesamt eine Kollektivdosis von 139,3 Pers.mSv an; dabei betrug die maximale Ortsdosisleistung an der Komponente 27,3 Sv/h; innerhalb der Einhausung maximal 500 mSv/h und außerhalb der Einhausung nur etwa 2 µSv/h. Auf 96,7 Mg Primärabfälle (8,49e13 Bq) kamen 22,9 Mg Sekundärabfälle (9e11 Bq).

Da die Tätigkeiten fernhantiert ausgeführt wurden, fiel der größte Teil der Dosis bei Wartungs- und Reparaturarbeiten an (84,7 Pers.mSv), auf die Abfallbehandlung entfielen nur 5,4 Pers.mSv. Die Nachzerlegung, Dekontamination und Konditionierung der ausgebauten Anlagenteile und Abfälle erfolgt in der Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB); die hierbei bisher bzw. künftig anfallenden Dosen sind in den obigen Angaben nicht berücksichtigt.

Bei der Durchführung des Abbaus waren verschiedene Personengruppen, die anhand ihrer Tätigkeiten unterschieden werden können, beteiligt. Bei der Tätigkeitsgruppe „Strahlenschutz“ fielen 9,3 Pers.mSv an, bei den Demontagearbeiten inklusive der ersten Nachzerlegung selbst 40,5 Pers.mSv.

7.1.7 Stilllegung des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR) – Zerlegung des Reaktordruckbehälters

Der mit Einbauten ca. 400 Mg schwere Reaktordruckbehälter (RDB) des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR) wurde fernhantiert demontiert. An den Arbeiten waren über einen Zeitraum von zehn Jahren hinweg (14.01.1999 bis 30.06.2009) 60 Personen beteiligt, die eine Kollektivdosis von 318 Pers.mSv erhielten. Die maximale Individualdosis lag bei 10,4 mSv. In der folgenden Tabelle sind radiologische Daten und Randbedingungen zu einzelnen Abbauschritten zusammengefasst.

Detailldaten zur Zerlegung des Reaktordruckbehälters des MZFR wurden mit Hilfe eines Datenerfassungsbogens erhoben und sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 7.4: Zusammenstellung von Daten zur Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR)

Abbauschritt	Werkzeuge	Persone nanzahl	Kollektivdosis (max. ind. Dosis)	Ortsdosisleistung (max.)	Primärabfall Menge Aktivität	sek. Abfall Menge Aktivität	Dosisaufteilung Tätigkeiten
Ausbau stabförmiger Komponenten	Greifer, Orbitalschweißgerät, mechanische Trenn- werkzeuge	60	52 Pers.mSv (6,1 mSv)	0,4 mSv/h (1,25 Sv/h)	31 Mg 2,7e13 Bq	-	Vorbereitung 1,4 Pers.mSv (max. 0,3 mSv) Wartung 6,0 Pers.mSv Abfallbeh. 0,1 Pers.mSv Dekont. 0,5 Pers.mSv Transport 0,1 PersmSv
Trockenzerlegung RDB-Deckel, Füll- körper und Füllkör- perring	Bandsäge	46	40 Pers.mSv (5,2 mSv)	0,05 – 0,4 mSv/h (4 mSv/h)	188 Mg 4,1e12 Bq (40 Mg Blei freigebbar)	44 Mg 7e12 Bq	Vorbereitung 6,4 Pers.mSv (max. 0,95 mSv)
Nasszerlegung Moderatorbehälter, thermischer Schild mit Messleitungen, Moderator- Fall – und Ringleitung	Plasmaschneiden, Hydraulikscheren, Trennschleifen	60	83 Pers.mSv (10,4 mSv)	< 0,25 mSv/h (23 mSv/h)	64 Mg 7,4e15 Bq	19 Mg 3,7e11 Bq	Vorbereitung 8,3 Pers.mSv (max. 0,9mSv) Wartung 30 Pers.mSv Reparatur 34 Pers.mSv Dekont. 5,5 Pers.mSv Transport 1,2 Pers.mSv
Trockenzerlegung untere Füllkörper und RDB	Mechanische Trenn- werkzeuge, Schneidbrennen, Schweiß- und Lötge- räte, Bohrmaschine, Litzenheber	43	122 Pers.mSv (9,5 mSv)	< 0,2 mSv/h (71 mSv/h)	182 Mg 6,6e12 Bq	130 Mg 2e13 Bq	Vorbereitung 32,7 Pers.mSv (max. 6,9 mSv) Wartung 60 Pers.mSv Reparatur. 3,5 Pers.mSv Abfallbeh. 1,0 Pers.mSv Dekont. 1,0 Pers.mSv Gerüstbau 0,017 Pers.mSv
Auf- und Rückbau Infrastruktur		45	21 Pers.mSv (1,0 mSv)	< 0,1 mSv/h (0,7 mSv/h)	-		
Insgesamt		60	318 Pers.mSv (10,4 mSv)	-	465 Mg 7,5e15 Bq		

Wie bereits einleitend erläutert, wurde ein großer Teil aller Tätigkeiten fernhantiert durchgeführt. Dies zeigt sich im Vergleich der aufgetretenen Ortsdosisleistungen mit den niedrigen Kollektivdosen.

Dies macht deutlich, dass die Dosis insgesamt viel stärker von den Strahlenschutzmaßnahmen (im vorliegenden Fall Einhausung, Fernhantierung, teilweise Arbeiten unter Wasser) abhängt als von der ausgewählten Zerlegetechnik, die für alle Zerlegetechniken unterschiedlich war.

Betrachtet man die Aufteilung der Dosis auf Tätigkeiten, so zeigt sich, dass etwa 40 % der Dosis auf Reparatur- und Wartungsarbeiten zurückzuführen ist.

7.1.8 Auswertungen der sat science GmbH bei verschiedenen Stilllegungsprojekten

Die sat science GmbH hat in Zusammenarbeit mit der sat.Kerntechnik GmbH, die als Dienstleister in verschiedenen Stilllegungsprojekten an Abbau- und Dekontaminationsarbeiten beteiligt ist, eine Auswertung von Dosismesswerten aus verschiedenen Stilllegungsprojekten vorgenommen /SAT 10/.

Dabei wurden Dosiswerte aus den amtlichen Dosen unter Berücksichtigung der Einsatzzeiten ermittelt. Es wurden dabei solche Datensätze berücksichtigt, bei denen aufgrund der vorhandenen Informationen zu den Gewerken in einem Monat der amtliche Dosiswert einer einzigen Tätigkeit zugeordnet werden konnte, die über den Tragezeitraum des amtlichen Dosimeters (d. h. über einen Monat) unverändert blieb und für die der zeitliche Arbeitsaufwand im Tragezeitraum bekannt war. Aus dem jeweiligen Dosiswert und dem zeitlichen Aufwand lässt sich als Maß für die radiologischen Randbedingungen die abbautätigkeitsbezogene Dosisleistung ermitteln. Allerdings beinhalten die so ausgewählten Daten Dosisbeiträge aus dem Aufenthalt am eigentlichen Arbeitsbereich wie auch aus Aufenthalten außerhalb des Arbeitsbereiches, z. B. außerhalb von Einhausungen in niedrigeren Dosisbereichen oder Bereichen ohne nennenswerte Kontamination. Durch die Normierung auf den zeitlichen Aufwand tendiert die abbautätigkeitsbezogene Dosisleistung damit zu niedrigeren Werten als sie insbesondere im Arbeitsbereich vorgelegen haben. Um diesen Mangel zu beseitigen, wurden daher Daten zu solchen Tätigkeiten weiter ausgewählt, bei denen das eingesetzte Personal Atemschutzmasken im Arbeitsbereich trug, über deren Tragedauer entsprechende Informationen vorliegen. Damit konnte eine realistischere, den wahren Wert leicht über-

schätzende abbautätigkeitsbezogene Dosisleistung berechnet werden. Die Ergebnisse der Analysen für zwei Abbaugewerke sind in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

7.1.8.1 Abbau einer Verdampferanlage und Entkernen der Räume

Beim Abbau einer Verdampferanlage und Entkernen der zugehörigen Räume sind 55 Mg Abbaumasse angefallen. Die Gesamtaktivität Co-60 betrug 1,7e09 Bq. Aufgrund von bekannten Leckagen aus dem Betrieb resultierte in einigen Bereichen eine Oberflächenkontamination in der Größenordnung 1 Bq/cm² Co-60, auf der Innenseite der Aggregate belief sich die Kontamination auf 1000 Bq/cm². Die Ortsdosisleistung betrug im unmittelbaren Arbeitsbereich 10 – 50 µSv/h und in den angrenzenden Bereichen ca. 5 µSv/h. Der Abbau erfolgte mittels mechanischer Trennverfahren (Seilsägen, Säbelsägen, Rohrschneiden). In der Planungsphase wurde als Kollektivdosis für den Abbau ein Wert von 3,6 Pers.mSv abgeschätzt, die tatsächliche Kollektivdosis betrug nach Abschluss der Arbeiten 1,7 Pers.mSv. Tab. 7.5 beinhaltet eine Aufschlüsselung der errechneten tätigkeitsbezogenen Ortsdosisleistungen sowohl auf Grundlage des zeitlichen Aufwandes für die Durchführung der Arbeiten, einschließlich Aufenthaltszeiten außerhalb des Arbeitsbereiches, als auch auf Grundlage der eingangs erläuterten Maskenstunden.

Tab. 7.5: Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in µSv/h

Person	Monat 1		Monat 2	
	a)	b)	a)	b)
A	2,7	3,6	1,1	1,5
B	0,8	1,3		
C	0,8	1,1	1,1	1,5
D	0,7	0,9	1,4	1,9
E	2,2	2,9	1,7	2,3

7.1.8.2 Abbau von Stützenüberständen an einem Reaktordruckbehälter

Beim Abbau einer Wasserrinne am RDB-Flansch und einiger Stützenüberstände war sowohl mit Aktivierung als auch mit α-Kontamination zu rechnen. Die Abbaumasse betrug ca. 10 Mg, die Kontaktdosisleistung lag bei 3 mSv/h an den Stützen direkt und die Ortsdosisleistung im Arbeitsbereich wurde zu 0,03 – 0,12 mSv/h abgeschätzt. Der Abbau der Wasserrinne erfolgte mittels Plasmaschneiden und der Abbau der Stützen er-

folgte mittels Orbital Cutter. Zusätzlich wurden die entstandenen Öffnungen verschlossen und die Nachzerlegung und Transportvorbereitungen im Abbaubereich in mobilen Teileinhausungen durchgeführt. Die registrierten tätigkeitsbezogenen Dosisleistungen sind in Tab. 7.6 und Tab. 7.7 zusammengestellt.

Tab. 7.6: Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen beim Plasmaschneiden bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$

Person	a)	b)
A	0,8	2,5
B	0,8	2,5
C	0,8	2,4

Tab. 7.7: Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen beim Abkreisen bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$

Person	Monat 1		Monat 2	
	a)	b)	a)	b)
D	5,2	14,6		
E	3,3	6,8		
F	0,8	1,6		
G	7,4	14,7	2,5	7,4
H	4,8	8,2		
I	2,5	6,9		
J	2,2	3,4		

7.2 Erfahrungen aus dem Betrieb von Kernkraftwerken

Der Einsatz von Dekontaminationssystemen ist nicht nur im Bereich der Stilllegung kerntechnischer Anlagen, sondern auch in Kernkraftwerken in Betrieb üblich. Auch die Zerlegung von Kernbauteilen findet teilweise während der Betriebsphase statt. Entsprechend sind nachfolgend einzelne Beispiele stellvertretend für das breite Spektrum an Anwendungen genannt.

7.2.1 Chemische Dekontamination bei Kernkraftwerken

Zur Vorbereitung der Wiederkehrenden Prüfung (WKP) der Lagerbeckenkühl- und Reinigungssystem des Kernkraftwerks Isar 1 (KKI-1) wurde eine chemische Dekontamination mit dem CORD-Verfahren durchgeführt /SCH 08^a/. Für die Prüfung der Lagerbeckenfilter wurde ohne vorherige Dekontamination eine Kollektivdosis von 10 Pers.mSv abgeschätzt. Die Kollektivdosis für die Durchführung der Gesamtprüfung konnte durch

Anwendung des CORD-Verfahrens auf 0,78 Pers.mSv reduziert werden, wobei hierin ein Dosisbeitrag von 0,18 Pers.mSv für die Durchführung der Dekontaminationsmaßnahme enthalten war. Auch zur Vorbereitung von Arbeiten an der Reaktorwasserreinigung (TC-System) wurde eine entsprechende Dekontamination mit dem CORD-Verfahren durchgeführt. Die bei der Durchführung der Arbeiten (inkl. Dekontamination) entstandene Kollektivdosis betrug statt der bis dahin üblicherweise auftretenden 500 – 1000 Pers.mSv nur 56 Pers.mSv, enthalten hierin waren 2,5 Pers.mSv für die Systemdekontamination.

In den Kernkraftwerken Biblis A (KWB-A) und Biblis B (KWB-B) wurden ebenfalls umfangreiche Erfahrungen zur Dekontamination während des Betriebes gesammelt, die insbesondere in /IMP 10/ zusammengestellt sind. Hierbei wurden chemische Dekontaminationsverfahren (CORD) und die Wasserhochdruck-Dekontamination eingesetzt und erhebliche Reduzierungen der Dosisleistungen in den Anlagen erreicht. Dabei werden Planungswerte (Dosisersparungen) detailliert betrachtet und u. a. Dekontaminationsfaktoren zwischen 27 und 86,45 berichtet.

7.2.2 Core-Schrott-Konditionierung in Gösgen (Schweiz)

Bei der Core-Schrott-Konditionierung im Kernkraftwerk Gösgen bei Däniken, Schweiz, werden in einem Lagerbecken ausgediente Kernbauteile mit einer Hydraulikschere fernhantiert unter Wasser zerkleinert und in Mosaik-Behälter verpackt /BIT 07/. Die Reinigung des Wassers erfolgt permanent über Ionentauscher. Eine Charakterisierung der Materialien ergab eine Abfallmenge von 2,5 Mg mit einer Aktivität von $1,5 \times 10^{15}$ Bq, die größtenteils auf Neutronendetektoren zurückzuführen war. Messungen der Ortsdosisleistungen ergaben an zehn Messlanzen mit jeweils sechs Neutronendetektoren Werte bis zu 2.000 Sv/h und für die Steuerelemente 400 Sv/h. Bei letzteren sind nur die Steuerstabspitzen stark aktiviert, an den Kopfstücken wurden nur 10 mSv/h gemessen. Als Kollektivdosis nach Beendigung von 2/3 der Arbeiten wurden etwa 3 Pers.mSv ermittelt, dies bei einer Ortsdosisleistung von normalerweise $< 10 \mu\text{Sv/h}$ im Arbeitsbereich, resultierend aus der 3 m Wasserüberdeckung der Komponenten.

7.2.3 Verschiedene Erfahrungen der GNS beim Zerlegen von Kernbauteilen

Im Rahmen der Revision in Kernkraftwerken fallen verbrauchte, aktivierte Kernbauteile an, welche zerlegt und in Transportbehälter verpackt werden müssen. /FRI 08/ präsen-

tiert eine umfangreiche Zusammenstellung von Personendosen bei unterschiedlichsten Abbau- und Konditionierungsprojekten. Allerdings erfolgt keine Aufschlüsselung getrennt nach Zerlege- und Verpackungsschritten, so dass eine Bewertung der aufgetretenen Personendosen für den Zerlegeschritt nicht möglich ist.

7.3 Erfahrungen aus der Stilllegung deutscher Forschungsreaktoren

7.3.1 Stilllegung des Forschungsreaktors TRIGA HD II

Von 2004 bis 2006 wurde der Forschungsreaktor TRIGA HD II im deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg abgebaut (siehe z. B. /BER 04/, /KAU 06/). Beim TRIGA HD II handelte es sich um einen Forschungsreaktor vom TRIGA MARK I Typ des US-amerikanischen Herstellers Gulf General Atomics Inc. mit einer thermischen Leistung von 250 kW, der von 1978 bis 1999 betrieben wurde. Hierbei wurden zunächst die stark aktivierten Edelstahlteile im Reaktorcore fernhantiert unter Wasser entfernt und verpackt. Der Reaktorcore und Graphitreflektor wurden als Ganzes verpackt und an die Landessammelstelle nach Karlsruhe zur weiteren Behandlung abgegeben. Die Zerlegung des Biologischen Schildes erfolgte im oberen, oberirdischen Teil durch hydraulisches Spreizen; aufgrund der Staubentwicklung wurden die Arbeiten in einer Einhausung durchgeführt. Im unteren, unterirdischen Teil wurde aktivierter Beton im Bereich des ehemaligen Reaktorkerns und im Bodenbereich mit einem Schlaghammer entfernt und so das Biologische Schild ausgeschält. Insgesamt ist beim Abbau des TRIGA HD II eine Kollektivdosis von 1,8 Pers.mSv aufgelaufen.

7.3.2 Stilllegung des Forschungsreaktors FRJ-1

Der Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1 oder auch MERLIN, „**M**edium **E**nergy **R**esearch **L**ight Water Moderated **I**ndustrial **N**uclear Reactor“) befand sich auf dem Gelände des Forschungszentrums Jülich GmbH und wurde von Oktober 1963 bis März 1985 betrieben. Beim FRJ-1 handelte es sich um einen Schwimmbadreaktor mit einer ursprünglichen Leistung von 5 MW, die ab September 1971 auf 10 MW gesteigert wurde.

Die durchgeführten Arbeiten und die Exposition des Personals wird nachfolgend detaillierter betrachtet, als in den vorigen Beispielen, um beispielhaft Einblicke in die Detailplanung, die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen und die Bedeutung der Strahlen-

schutzplanung / Dosisrichtwerte im Zusammenhang mit der eingesetzten Technik zu geben.

7.3.2.1 Radiologische und arbeitstechnische Aspekte beim Abbau des FRJ-1

Ziel der Stilllegungs- und Abbauarbeiten war es nach /MWM 97/, /NIS 98./ und /MWM 01/, den Reaktor und seine Hilfssysteme vollständig abzubauen und ihn und die zugehörigen Gebäude oder Gebäudeteile aus der atomrechtlichen Überwachung zu entlassen. Im Wesentlichen waren nach /PTE 07/ vier Abbauphasen gegeneinander abgegrenzt, wobei die aufgeführten Strahlenexpositionen für das eingesetzte Personal /STA 09/ resultierten:

1. Beim Abbau der Kühlkreisläufe und Experimentiereinrichtungen wurde eine Kollektivdosis von ca. 5 Pers.mSv registriert.
2. Während des Ausbaus der Reaktortankeinbauten trat eine Kollektivdosis von ca. 9 Pers.mSv auf.
3. Den unter Gesichtspunkten der Strahlenexposition wichtigsten Abbauschritt stellte der Abbau des Reaktorblocks dar. Für den 1,5 Jahre dauernden Abbauschritt fiel eine Kollektivdosis von ca. 40 Pers.mSv an.
4. Beim letzten Teilschritt (Freimessung und Freigabe der Reaktorhalle und der Nebengebäude) trat keine berufliche Strahlenexposition auf.

Nach /GNS 04/ war aus radiologischer Sicht beim Abbau des Reaktorblocks der dritte, d. h. mittlere Bauabschnitt im Bereich der Strahlrohre im Biologischen Schild von größter Bedeutung. Hier waren maximale Kontaktdosisleistungen von bis zu 420 mSv/h und spezifische Aktivitäten von bis zu $1,0 \times 10^7$ Bq/g zu berücksichtigen, wodurch der größte Teil der Kollektivdosis von 54 Pers.mSv für den kompletten Abbau des Forschungsreaktor Jülich FRJ-1 in diesem dritten Bauabschnitt auftrat.

Zur Minimierung der Personendosis wurden für jeden Bauabschnitt Vorsorgemaßnahmen in den Arbeitsablaufplänen schriftlich fixiert.

Folgende technische Schutzmaßnahmen wurden eingesetzt /ZEH 09/:

- Der Abbau des Reaktorblocks fand unter einer entsprechenden Einhausung statt, um Querkontaminationen zu vermeiden.

- Bei den Arbeiten des mittleren Bauabschnittes wurden primär fernhantierbare Werkzeuge sowie von der Reaktorwarte aus steuerbare und überwachte Abbau-bagger eingesetzt.
- Einer vermehrten Aerosolentwicklung wurde durch Einsatz eines Befeuchtungssystems entgegengewirkt.
- Luftaktivitätsmessungen stellten ein Entscheidungskriterium dar, ob das Tragen von Atemschutzausrüstung erforderlich war.
- Mögliche Inkorporationen konnten durch das Anlegen einer Staubmaske, welche erst nach dem Ablegen der übrigen Schutzkleidung abgenommen wurde, verhindert werden.

Als administrative Maßnahme wurde eine Obergrenze für die Personentagesdosis von 200 μSv eingeführt. Einem potentiellen Zeitverzug beim Abbau des FRJ-1 infolge eines Überschreitens dieses Tagesdosislimits wurde dadurch begegnet, dass jede tätig werdende Person für sämtliche Arbeitsschritte geschult wurde. Dadurch war es möglich, die Individualdosis aufgrund von Tätigkeiten in Bereichen vergleichbar hoher Ortsdosisleistung durch Austauschen des eingesetzten Personals zu begrenzen. Eine Person, welche das Tageslimit nahezu erreicht hatte, wurde von ihrer aktuellen Arbeitsposition abgezogen und anschließend an einem Arbeitsort mit entsprechend geringer Ortsdosisleistung eingesetzt. Als nicht-amtliche Dosimetrie wurde die Einhaltung des Tagesgrenzwertes mittels Stabsdosimetern realisiert.

7.3.2.2 Beschreibung der erhobenen Daten

Zu den Maßnahmen zum Abbau des Biologischen Schildes wurden im Rahmen der Erstellung dieses Fachberichtes umfangreiche Daten vom Betreiber des FRJ-1 zur Verfügung gestellt:

In Anlehnung an die Arbeitspakete, in die die Stilllegung und der Abbau des Reaktors FRJ-1 im Rahmenablaufplan unterteilt wurde, wurden einzelne Abbauphasen in Arbeitsablaufplänen (AAP) zusammengefasst.

Innerhalb der AAPs wurden auf Arbeitsblättern täglich die Namen der tätigen Personen und zugehörigen Personendosen dokumentiert. Zusätzlich wurden festgehalten: die Auswertungen der Raumluftüberwachung (Aerosolaktivität) im Arbeitsbereich, die Kon-

taktdosisleistung am zu bearbeitenden Gewerk und Ortsdosisleistung in 1 m Abstand, sowie die Dosisleistung am Arbeitsort der eingesetzten Personen.

In den Dokumentationsblättern zur Aerosolüberwachung sind teilweise Bemerkungen zu den durchgeführten Abbaumaßnahmen zu finden, wie z. B. Stemmen von Beton, Stahl, Aluminium und Blei, Baggern und Sägen. Eine grafische Aufbereitung der Daten, welche die Abbaumaßnahmen zur angefallenen Kollektivdosis in Bezug setzt, ist in Abb. 7.1 wiedergegeben. Häufig werden auf einem Dokumentationsblatt jedoch mehrere Abbaumaßnahmen aufgeführt. Eine Aufschlüsselung der angefallenen Kollektivdosis ist im Nachhinein nicht mehr möglich.

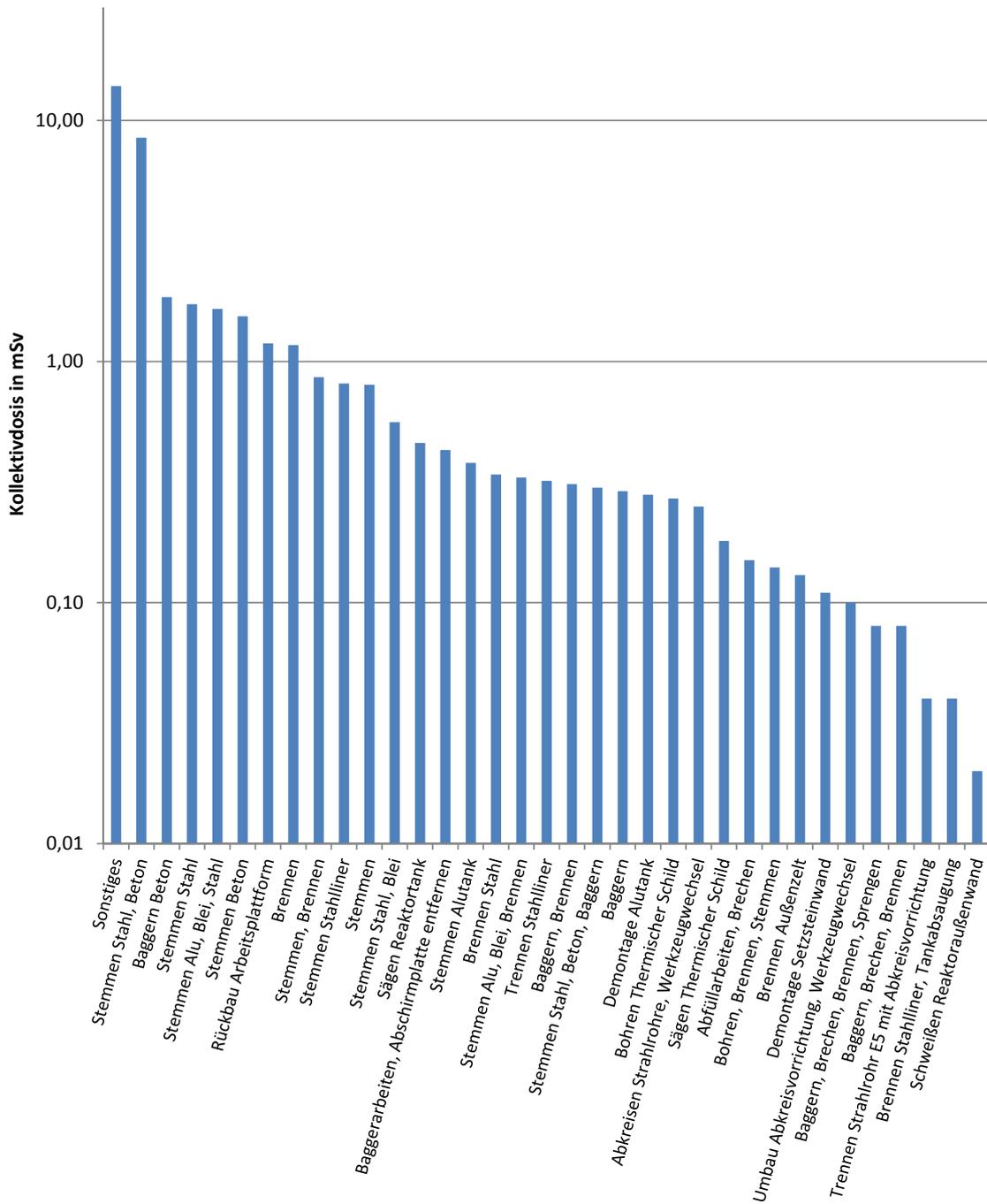


Abb. 7.1 Kollektivdosen verschiedener Abbautechniken beim FRJ-1, Abbauphase 3 (logarithmische Darstellung)

Die Unterlagen zu den Personendosen der Fremdfirmenmitarbeiter enthalten Angaben über die amtlichen und nicht-amtlichen Monatswerte. Anhand dieser Angaben konnten Zeiträume eingekreist werden, die für eine detaillierte Auswertung vielversprechend erschienen, weil die aufgetretene Dosis relativ hoch war. An dieser Stelle ist aus radiologischen Gesichtspunkten herauszustellen, dass die Begrenzung der Personentagesdosis auf maximal 200 μSv sich in den Monatsdosiswerten widerspiegelt, da selbst in der Phase des Abbaus des mittleren und unteren Abschnitts des Reaktorblocks, in der die höchsten Dosiswerte zu erwarten waren, die Personenmonatsdosen nur in wenigen Fällen an 2 mSv heranreichten, in der Regel unter 0,5 mSv begrenzt werden konnten.

Anhand der Monatspersonendosiswerte ist ersichtlich, dass der Hauptteil der Kollektivdosis im Rahmen des Abbaus und der Entsorgung des mittleren und unteren Abschnitts des Reaktorblocks RB 6 aufgelaufen ist (im Zeitraum April bis Oktober 2003). Dabei wurden zunächst im Mittel zehn Personen eingesetzt (inklusive Strahlenschutzpersonal), ab August 2003 erhöhte sich die Zahl auf bis zu 14 Personen.

Der Verlauf der Tageskollektivdosen ist in Abb. 7.2, der Maximalwert für eine einzelne Person in Abb. 7.3, die mittlere Personendosis in Abb. 7.4 und die Aerosolaktivität in Abb. 7.5 dargestellt.

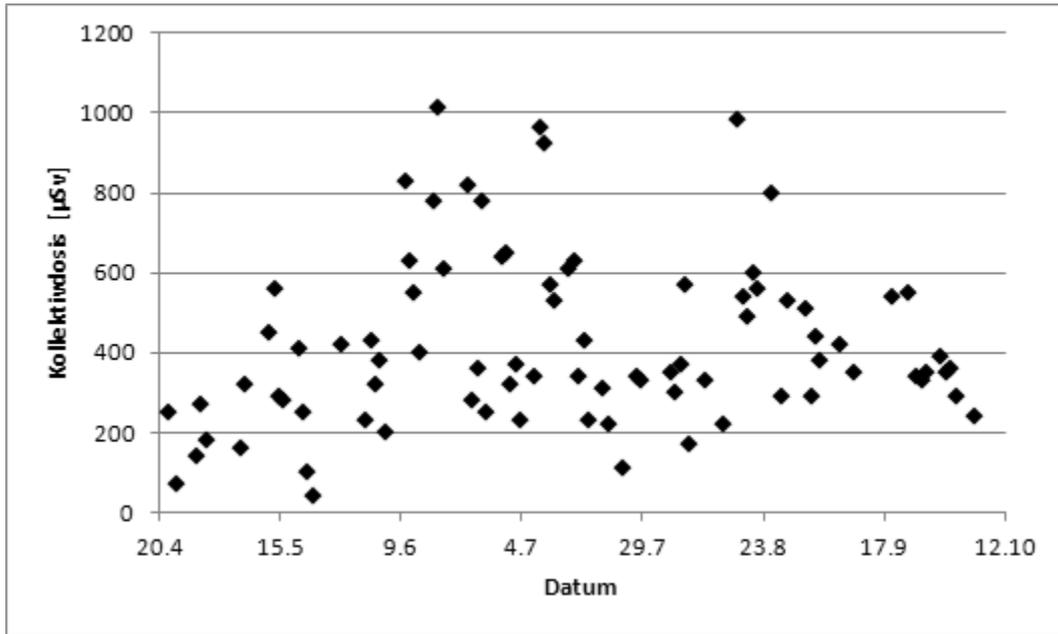


Abb. 7.2: Zeitlicher Verlauf der Tageskollektivdosis

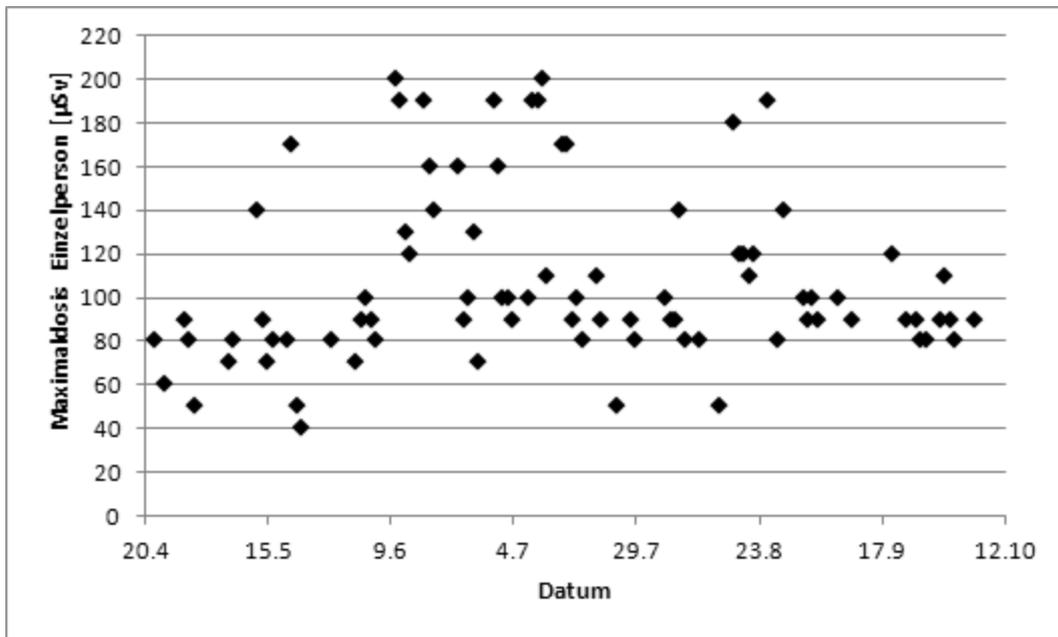


Abb. 7.3: Maximal aufgetretene Tagesdosis einer einzelnen Person

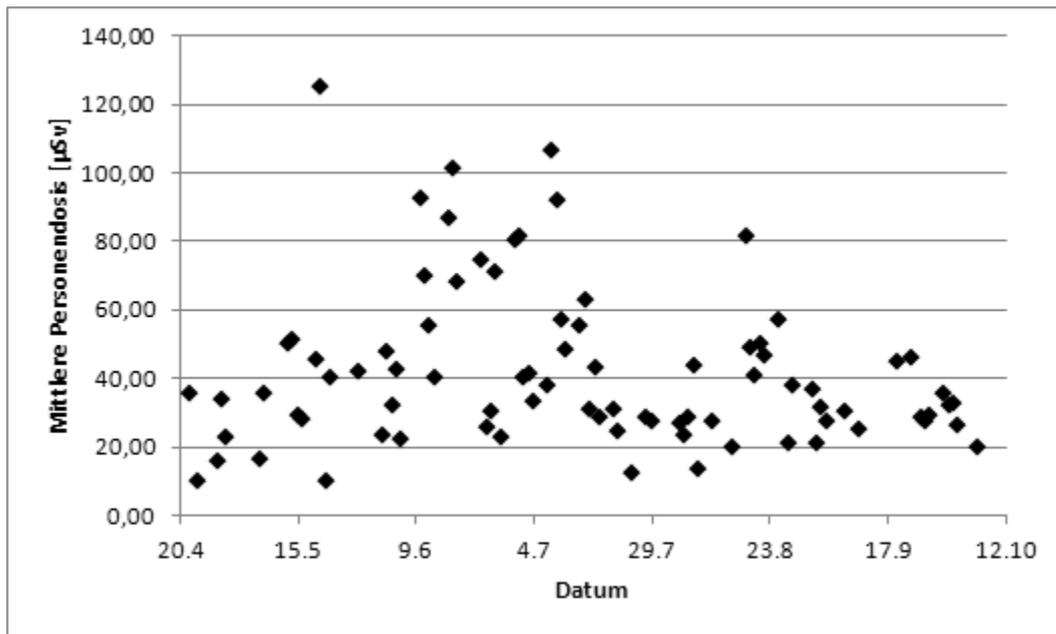


Abb. 7.4: Mittelung Tagesdosis über Anzahl der eingesetzten Personen

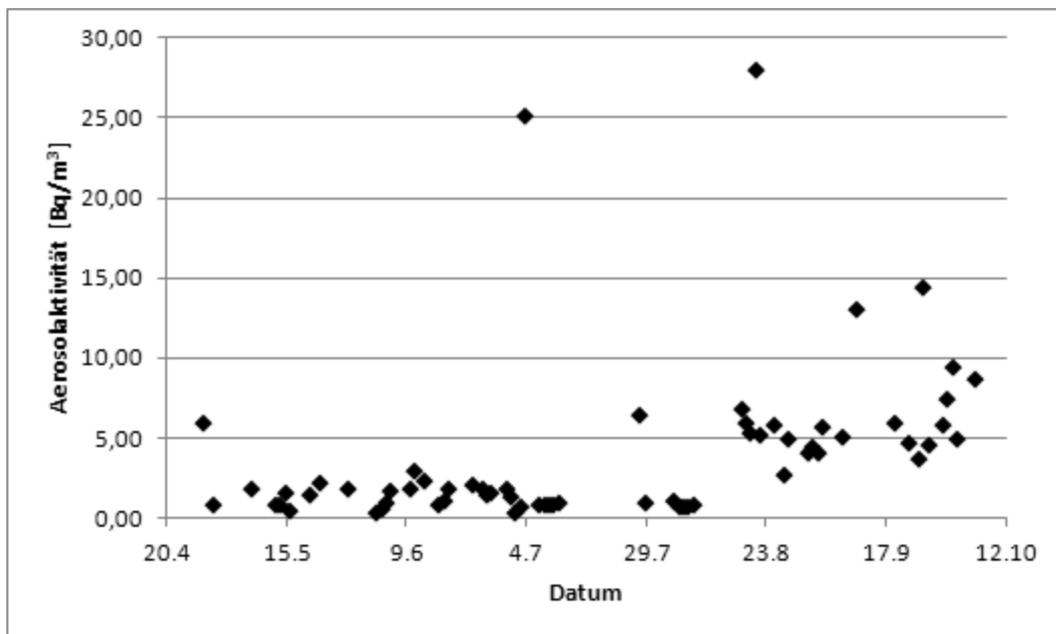


Abb. 7.5: Verlauf der Aerosolaktivität

Bewegten sich die Tageskollektivdosen zunächst während Säge- und Bohrarbeiten am Reaktortank und Thermischen Schild in der Zeit vom 22.04.2003 bis 30.04.2003 um 200 Pers.µSv, so wurden bei Arbeiten am Stahlliner Anfang Mai 2003 zum ersten Mal Werte bis zu 450 Pers.µSv registriert. Jedoch blieb die maximale Tagesdosis einer

Person bis auf eine Ausnahme unter 100 μSv und damit deutlich unterhalb des intern gesetzten Tageslimits von 200 μSv .

Von Juni bis Mitte Juli 2003 wurden Stemm- bzw. Baggerarbeiten an Beton-, Stahl- und Bleistrukturen durchgeführt. In dieser Zeit wurden vermehrt Kollektivdosen über 500 Pers. μSv registriert, an fünf Tagen sogar über 800 Pers. μSv , mit einem Maximalwert am 17.06.2003 von 1.010 Pers. μSv . Auch ist das Tageslimit von 200 μSv in diesem Zeitraum von einzelnen Personen zweimal erreicht und in fünf weiteren Fällen mit 190 μSv nahezu vollständig ausgeschöpft worden. Im Juni 2003 wurden ebenfalls die höchsten Kontaktdosisleistungswerte am zu bearbeitenden Gewerk von über 100 mSv/h, mit einem Maximalwert von 420 mSv/h bei Stemmarbeiten am Aluminiumtank, gemessen.

Im gesamten bisher betrachteten Zeitraum ergab die Überwachung der Aerosolaktivität Werte von 0,5 – 2,8 Bq/m³, mit zwei Ausnahmen: Am 28.04.2003 wurden 5,8 Bq/m³ und am 04.07.2003 wurden 25,0 Bq/m³ registriert (siehe Abb. 7.5). Diese erhöhten Werte korrelieren jedoch nicht mit auffälligen Werten der Tageskollektivdosis, maximalen Personendosis oder Kontaktdosisleistung.

Im Anschluss wurde die Arbeitsplattform rückgebaut. Die Tageskollektivdosis verringerte sich auf Werte unter 300 Pers. μSv , bei Maximaldosen für Einzelpersonen von unter 100 μSv .

Höhere Werte stellten sich wiederum ab Mitte August 2003 ein. So wurde am 18.08.2003 eine Kollektivtagesdosis von 980 Pers. μSv bei einer Personenmaximaldosis von 180 μSv registriert. An den folgenden Tagen beliefen sich die Werte auf ca. 550 Pers. μSv kollektiv bzw. 120 μSv für eine einzelne Person. Ein weiterer Spitzenwert wurde am 25.08.2003 aufgezeichnet, mit 800 Pers. μSv Kollektivdosis und 190 μSv Maximalwert für eine Person. Die Aufzeichnungsbögen zur Aerosolüberwachung geben in diesem Zeitraum keine Anhaltspunkte auf die durchgeführten Abbaumaßnahmen.

Bis zur Beendigung dieses Arbeitspaketes Anfang Oktober 2003 verringerten sich die Tageskollektivdosiswerte auf durchschnittlich 350 Pers. μSv bei Maximalwerten für eine einzelne Person von knapp unterhalb 100 μSv .

Im Zeitraum Mitte August bis Oktober 2003 schwankten die Werte der Aerosolüberwachung zwischen 4 Bq/m^3 und 14 Bq/m^3 mit einem Ausreißer am 21.08.2003 auf $27,87 \text{ Bq/m}^3$, ohne dass an diesem Tag die Personendosiswerte eine Auffälligkeit zeigten.

7.3.2.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass der Einsatz von Fernhantierungstechniken in Verbindung mit einem intern gesetzten Tagesdosislimit von $200 \mu\text{Sv}$ maßgeblich dazu beigetragen hat, dass auch bei Abbaumaßnahmen an Gewerken mit höheren Kontaktdosisleistungen die mittlere Tagespersonendosis auf unter $100 \mu\text{Sv}$ begrenzt werden konnte. So konnte in der Phase der höchsten Strahlenexposition, d. h. bei Abbau und Entsorgung des mittleren und unteren Reaktorblocks, die Monatspersonendosen im Mittel unterhalb $0,5 \text{ mSv}$ begrenzt werden und erreichten nur in wenigen Einzelfällen Werte zwischen $1,5 - 2 \text{ mSv}$.

7.3.3 Auswertungen der sat science GmbH beim Abbau des Biologischen Schildes eines Forschungsreaktors

Der Biologische Schild eines Forschungsreaktors, bestehend aus einem Stahlliner mit einer Co-60 Aktivität von $6,7 \times 10^3 \text{ Bq/g}$ und einer Schwerbetonumhüllung (Co-60 Aktivität 4 Bq/g) mit Stahlarmierung, einer zusätzlichen Schildkühlung (Co-60 Aktivität jeweils in der Größenordnung des Stahliners) und Rohrdurchführungen für Experimente (Co-60 Aktivität $1 \times 10^4 \text{ Bq/g}$), wurde in zwei Schritten abgebaut /SAT 10/. Die Datenerhebung erfolgte nach denselben Kriterien, wie in Abschnitt 7.1.8 beschrieben.

Im ersten Abbauschritt wurden mittels handgeführter Werkzeuge (v. a. Winkelschleifer) vorbereitende Abbauarbeiten im Reaktorraum durchgeführt. Die Schutzausrüstung bestand aus Kontaminationsanzug und Filtervollmaske. Die Kontaktdosisleistung betrug für den Liner $7,2 \text{ mSv/h}$. Damit wurde am oberen Rand des Reaktorbeckens eine Dosisleistung von $1,6 \text{ mSv/h}$ errechnet. Nach Ausbau des Liners sank die vorberechnete Kontaktdosisleistung mit der Betonwand auf $0,12 \text{ mSv/h}$ und die Dosisleistung des freigelegten Bewehrungsringes wurde auf $0,5 \text{ mSv/h}$ berechnet.

Die ermittelten tätigkeitsbezogenen Dosisleistungen sind in Tab. 7.8 aufgelistet.

Tab. 7.8: Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen für Schritt 1 bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$

Person	Monat 1		Monat 2		Monat 3		Monat 4		Monat 5	
	a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)
A	1,2	13,3	0,6	3,8						
B					0,6	3,8	1,9	6,5	4,6	25,0
C							2,0	10,9	3,8	13,2

Im zweiten Abbauschritt wurde der Abbruchbagger installiert, Wartungsarbeiten und der Abbruch fernhantiert durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 500 Mg Material entfernt. Die ermittelten Personendosen sind in Tab. 7.9 dargestellt.

Tab. 7.9: Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen für Schritt 2 bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$

Person	Monat 1		Monat 2	
	a)	b)	a)	b)
A	4,2	13,9	3,4	16,7
B	1,4	7,7	1,7	10,0

Die Werte für die tätigkeitsbezogenen Dosisleistungen während des fernhantierten Abbauschrittes liegen hier höher als während der manuellen Intervention. Dies lässt sich aber darauf zurückführen, dass die Interventionen insgesamt sehr kurz waren, während der vorbereitenden Maßnahmen längere Zeit auch im Umgebungsbereich mit Maske gearbeitet werden musste.

7.4 Deutsche Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufes

7.4.1 Stilllegung der WAK Karlsruhe

Im Folgenden werden zwei mittlerweile durchgeführte Einzelmaßnahmen bei der WAK detaillierter betrachtet, deren Daten im Rahmen der Erstellung dieses Fachberichtes vom Betreiber der WAK zur Verfügung gestellt wurden:

7.4.1.1 Abbau Raum R259, ehemalige Probenahme-Galerie

An insgesamt etwa 175 Arbeitstagen wurden Demontearbeiten von drei Personen (zusätzlich eine halbe Stelle Strahlenschutzpersonal) durchgeführt. Die Kollektivdosis betrug 7,7 Pers.mSv, wobei die Beteiligten alle ähnlich hohe Dosen erhalten haben. Die Ortsdosisleistung betrug etwa 37 μ Sv/h, die maximale Ortsdosisleistung an der Komponente 0,61 mSv/h. Ein Großteil der Dosis (5,66 Pers.mSv) entfielen auf die Abbrucharbeiten, kleinere Anteile auf Dekontamination (0,61 Pers.mSv), Strahlenschutz (0,64 Pers.mSv) und sonstige Tätigkeiten (0,81 Pers.mSv).

Die Arbeiten wurden in einer ventilierten Einhausung vorgenommen, als persönliche Schutzausrüstung wurde zudem Vollschutz mit Fremdbelüftung eingesetzt. Als Trenntechniken wurden Sägen, Scheren und Schweißen eingesetzt.

Es entstanden 45,6 Mg Primärabfall (Stahl) mit einer Aktivität von $3,1 \times 10^{12}$ Bq und 2,2 Mg Sekundärabfälle (Späne, Wischtücher, Restfaserbindemittel, Filtermasken etc.) mit einer Aktivität von $6,2 \times 10^9$ Bq.

7.4.1.2 Abbau Raum R065, Rohrkanal-Mischabsetzerbereich

Die Demontearbeiten wurden an insgesamt etwa 175 Arbeitstagen von fünf Personen durchgeführt. Die Kollektivdosis betrug 96,2 Pers.mSv. Die Ortsdosisleistung betrug etwa 200 μ Sv/h, die maximale Ortsdosisleistung an der Komponente 120 mSv/h.

Die Arbeiten wurden in einer ventilierten Einhausung vorgenommen, als persönliche Schutzausrüstung wurde zudem Vollschutz mit Fremdbelüftung eingesetzt. Tätigkeiten wurden semi-fernhandelt durchgeführt. Als Trenntechniken wurden Bandsägen, Stichsägen, Scheren und Schweißen eingesetzt.

Es entstanden 146,6 Mg Primärabfall (Stahl und Blei) mit einer Aktivität von $4,97 \times 10^{13}$ Bq und 7,5 Mg Sekundärabfälle (Späne, Wischtücher, Restfaserbindemittel) mit einer Aktivität von $6,3 \times 10^{12}$ Bq.

7.5 Sonstige Anlagen

7.5.1 Abbau eines Neutronengenerators

Der Abbau einer Neutronengeneratoranlage und die anschließende Freimessung der Gebäudestrukturen wird in /KNA 09/ beschrieben. Unter Gesichtspunkten des Strahlenschutzes von besonderer Bedeutung war die hohe Oberflächenkontamination mit Tritium (bis zu 42.000 Bq/cm²). Durch den Abtrag von 70 m² Wand- und Bodenfläche bis zu Tiefen von 0,2 – 3 mm unter Verwendung einer Druckluftlanze konnte die Oberflächenaktivität weit unter die in der Strahlenschutzverordnung geforderten Werte für uneingeschränkte Freigabe verringert werden. Von den ca. 9 Mg im Abbau angefallenen Material konnten etwa 50 % nicht freigegeben werden und mussten als radioaktiver Abfall behandelt werden. Dem Strahlenschutz wurde u. a. durch das Einrichten von Einhausungen und das Tragen von Schutzkleidung (insbesondere spezieller Halbmasken mit wassergetränkten Filtern zur Verringerung der Tritiuminkorporation) Rechnung getragen. Somit konnte die Kollektivdosis durch Inkorporation für das gesamte Abbauprojekt auf 0,09 Pers.mSv begrenzt werden.

8 Zusammenfassung

Auswahl und Einsatz geeigneter Abbau- und Dekontaminationstechniken stellen wichtige Elemente bei der erfolgreichen Durchführung von Stilllegungs- und Abbauprojekten dar. Ihre Auswahl erfolgt dabei im Rahmen der Planung der Maßnahmen zum Abbau. Die Praxis zeigt dabei, dass der Auswahlprozess geprägt ist von der Abwägung verschiedener Aspekte und im Allgemeinen iterativ durchlaufen wird. Im vorliegenden Fachbericht werden zentrale Aspekte und eine mögliche Prozessfolge als idealisierter Auswahlprozess beschrieben. Wesentliche Elemente hierbei sind:

- Das Vorgehen bei der Auswahl von Abbau- und Dekontaminationstechniken ist aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Aspekte und der jeweiligen Abhängigkeiten komplex, lässt sich aber in Form eines idealisierten Auswahlprozesses beschreiben.
- Im idealisierten Auswahlprozess spielen Strahlenschutzaspekte eine doppelte Rolle in Form von übergeordneten Grundanforderungen und (zeitlich) nachgeordneten Aspekten des betrieblichen Strahlenschutzes.
- Im Verlauf des idealisierten Auswahlprozesses werden in der Regel keine spezifischen Abbau- und Dekontaminationstechniken ausgewählt; sondern Merkmale identifiziert, denen die grundsätzlich in Frage kommenden Techniken genügen müssen – hieraus ergibt sich eine erste Auswahl relevanter Techniken.
- Welche Merkmale von Bedeutung sind, ergibt sich dabei aus übergeordneten Anforderungen (Grundanforderungen), zu denen auch Aspekte des Strahlenschutzes gehören, und die spezifischen Gegebenheiten der konkreten Anlage.
- Aus der vorgenommenen Auswahl wird im Rahmen der detaillierten Planung der jeweiligen Abbau- und Dekontaminationsmaßnahmen die konkrete Technik ausgewählt. Aspekte des Strahlenschutzes werden im Rahmen der Strahlenschutzplanung berücksichtigt, die die Detailplanung begleiten. Aufgrund der Kombination aus Technik und hierauf angepasster Strahlenschutzplanung sind häufig unter Gesichtspunkten des Strahlenschutzes verschiedene Techniken gleichwertig.

Anschließend werden Beispiele für relevante Merkmale von Techniken erläutert und es wird beispielhaft verdeutlicht – anhand des Gewerks „Abbau des Reaktordruckbehälters“ – welche Merkmale in der Praxis an verschiedenen Standorten eine Rolle gespielt haben. Aus radiologischer Sicht ist dabei kein spezielles Verfahren allgemein als das

für alle Projekte geeignete auszuzeichnen; vielmehr demonstriert und illustriert das breite Spektrum der angewandten Techniken die prinzipielle Gleichwertigkeit verschiedener Möglichkeiten.

Ein besonderer Schwerpunkt dieses Fachberichtes liegt auf Aspekten des Strahlenschutzes im Zusammenhang mit dem Einsatz von Abbau- und Dekontaminationstechniken. Die Vielfalt der heute gängigen Abbau- und Dekontaminationstechniken wird umfassend dokumentiert und die umfangreiche Fachliteratur gewürdigt. Beispiele zum Einsatz von Abbau- und Dekontaminationstechniken in der Praxis mit Hinweisen und Daten zu Aspekten des Strahlenschutzes, insbesondere Kollektivdosen, werden gegeben. Diese Daten wurden sowohl Fachpublikationen entnommen als auch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erhoben.

Eine spezifische Zuordnung von Dosimetriedaten zu einzelnen Abbau- und Dekontaminationstechniken ermöglicht dabei interessante Einblicke, aus denen Anregungen für den praktischen Strahlenschutz hervorgehen können. Im Einzelfall ist solch eine Auswertung auf der Basis von existierenden Daten retrospektiv bis zu einem gewissen Grad mit großem Aufwand möglich. Voraussetzung für eine umfassende Betrachtung solcher Daten über einzelne ausgewählte Abbauschritte hinaus wäre allerdings eine möglichst vollständige technikspezifische Erfassung von Dosimetriedaten. Aufgrund des unverhältnismäßigen Aufwandes hat eine Erfassung in dieser Form bei laufenden oder abgeschlossenen Stilllegungsprojekten bisher nicht stattgefunden. Ein künftiges Vorhaben müsste zunächst in Zusammenarbeit mit stilllegenden Betreibern ein Konzept entwickeln, dass die Erfassung für einen definierten abgegrenzten Bereich bei einem laufenden Projekt ermöglicht, ohne die praktischen Arbeiten zu beeinflussen und ohne dass bei der Erfassung zusätzliche Dosen anfallen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung, das im Vorhaben 02 S 8578 die Erstellung dieses Fachberichts gefördert und damit ermöglicht hat. Der besondere Dank der Autoren gilt den Betreibern und Personen, die das Projekt im Rahmen von Diskussionen, insbesondere des stattgefundenen Workshops, mit persönlichen Gesprächen unterstützt und die Daten und Informationen über ihre Stilllegungsprojekte zur Verfügung gestellt haben.

Literaturverzeichnis

- /AKR 06/ AK Rück der SSK,
Empfehlungen zu Inkorporationsschutz und -überwachung beim Rückbau
kerntechnischer Anlagen,
Stand 2006.
- /AND 03/ Anderssohn, H.; Schauff, H.,
Nass-Strahlverfahren für die Dekontamination - Ertüchtigung großer De-
kont-Boxen durch konstruktive Modifikation und die Wahl des adäquaten
Strahlenmittels,
Kontec 2003, 128.
- /ARN 00/ Arnold, H.-U.; Christ, B. ,
Das Schleifdraht-Verfahren "Eine Zerlegetechnik für Komponenten mit be-
liebigen Geometrien und Werkstoffzusammensetzungen",
Jahrestagung Kerntechnik 2000, 505.
- /ART 10/ Bundesamt für Strahlenschutz,
Artmann, A.; Bürgel, A.; Druwe, H.; Kaulard, J.; Pfeffer, W.; Rehs, B.;
Schmidt, C.; Schmitz, B.; Strub, E.,
Übersicht über Stilllegungsprojekte in Deutschland, Teil II: Forschungsre-
aktoren,
Salzgitter September 2010.
- /ATH 06/ IAEA International Conference on,
Lessons Learned from the Decommissioning of Nuclear,
Facilities and the Safe Termination of Nuclear Activities” ,
Proceedings Athen 2006.
- /BAC 01^a/ Bach, F.-W.; Bienia, H.,
Personengebundener Einsatz schwerer Schneidwerkzeuge mit dem
Steady-Cut-System,
Kontec 2001, 549.

- /BAC 01^b/ Bach, F.-W.; Redeker, C.,
Abtragen und Entschichten an metallischen, mineralischen und kerami-
schen Werkstoffen,
Kontec 2001, 411.
- /BAC 01/ Bach, F.-W.; Bienia, H.; Redeker, C.; Verseemann, R.; Wilk, P.; ,
Lindemaier, J. ,
Abtrag- und Zerlegetechniken für den Rückbau kerntechnischer Anlagen,
atomwirtschaft 46 (2001) 112.
- /BAC 02^a/ Bach, F.-W.; Verseemann, R.; Wilk, P.,
in: /IAE 02^c/.
- /BAC 02/ Bach, F.-W.; Verseemann R.; Wilk, P.,
Status and Development of Decontamination and Dismantling Techniques
for Decommissioning of Nuclear Installations,
in /BER 02/.
- /BAC 03^a/ Bach, F.-W.; Wilk, P.; Bach, C.; Linde, M.; Fricke, U.; Mende, A.; ,
Quade, U.,
Trennen von graphitischen Reaktorbauteilen,
Kontec 2003, 686.
- /BAC 03/ Bach, F.-W.; Redeker, C.; Verseemann, R.; Brüggemann, P.,
Technologien zur Bearbeitung von Oberflächen und dem Schneiden unter
Wasser ,
Kontec 2003, 720.
- /BAC 05^a/ Bach, F.-W.; Brüggemann, P.; Verseemann, R.,
Abtragen und Entschichten von mineralischen und organischen Werkstof-
fen,
Kontec 2005, 622.
- /BAC 05/ Bach, F.-W.; Verseemann, R.; Kremer, G. ,
Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen – Ein Verfahren zum Zerlegen
großer Wandstärken,
Kontec 2005, 324.

- /BAC 06^a/ Bach, F.W.; Kremer, G.; Rügenapp, T.,
Einsatz und Entwicklung von Zerlegewerkzeugen für den Rückbau nuklearer Anlagen,
Forschungszentrum Karlsruhe Nachrichten 38 (2006), 147.
- /BAC 06/ Bach, F.-W.; Kremer, G.; Rügenapp, Th.,
Leistungsfähige Rückbautechnologien - Plasmaschmelzschneiden, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC) und Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG),
atomwirtschaft 51 (2006), 602 .
- /BAC 07/ Bach, F.-W.; Kremer, G.; Rügenapp, Th.; Peter, D.; Brüggemann, P.,
Schneid- und Dekontaminantionstechnologien für den kostengünstigen Rückbau kerntechnischer Anlagen,
atomwirtschaft 52 (2007), 256.
- /BAC 93/ Bach, F.-W.; Steiner, H.; Schreck, G.; Pilot, G.,
Analysis of results obtained with different cutting techniques and associated filtration systems for the dismantling of radioactive metallic components,
Report EUR 14213 ,
Luxemburg 1993.
- /BAC 98/ Bach, F.-W.; Lindemaier, J.,
State of the art of thermal and hydraulic cutting techniques for decommissioning tasks in the nuclear Industry,
Waste Management 1998.
- /BAE 10/ Bächler, M.,
Zerlegung von Reaktordruckgefäßeinbauten in deutschen Kernkraftwerken,
Jahrestagung Kerntechnik 2010.
- /BAE 99/ Bächler, M.; Starke, H.; Lang, R.; Demant, W.,
Demontage von Komponenten und Rohrleitungssystemen im Reaktorgebäude des Mehrzweckforschungsreaktors im Rahmen der 6. Teilstilllegungsgenehmigung,
Jahrestagung Kerntechnik 1999, 521.

- /BAU 09/ Bauerfeind, M.,
Eine vergleichende Übersicht über Entsorgungskonzepte für Großkomponenten,
Kontec 2009, 148.
- /BEE 04/ Beer, H.-F.; Zahner, M. B. ,
Ganzheitlicher Strahlenschutz bei Rückbauprojekten, ,
in: "Strahlenschutzpraxis", Schwerpunktausgabe Strahlenschutz beim Rückbau 1/2004.
- /BEN 02/ Benkert, J.; Hillebrand, I.,
KNK Stilllegung Umsetzung des Konzeptes zur Demontage des Reaktortanks und des Biologischen Schildes,
Jahrestagung Kerntechnik 2002, 405.
- /BEN 03/ Benkert, J.; Haller, H.; Hillebrand, I.; Brockmann, K. ,
KNK Stilllegung Erprobungsprogramm zur Demontage des Reaktortanks,
Jahrestagung Kerntechnik 2003, 367.
- /BER 02/ IAEA International Conference on,
Safe Decommissioning of Nuclear Activities ,
Proceedings Berlin 2002.
- /BER 04/ Berthold, M; Jünger-Gräf, B.,
Rückbau der Reaktoranlagen TRIGA HD I und HD II im Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg,
atomwirtschaft 49 (2004),100.
- /BER 06/ Berthold, M.; Pöppinghaus, J.; Jünger, B.; Moser, T.,
Rückbau des Forschungsreaktors TRIGA HD II im Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) Heidelberg aus der Sicht des Generalunternehmers,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 485.

- /BER 98/ Bernard, J.; Pilot, G.; Grandjean, J. P.,
Evaluation of various cutting techniques suitable for the dismantling of nuclear components,
Report EUR 17919,
Luxemburg 1998.
- /BEV 09/ Beverungen, M. ,
Externe Entsorgung von Reststoffen am Beispiel von 4 Stk. Dampferzeugern aus dem Rückbau des Kernkraftwerkes Stade,
Kontec 2009, 49.
- /BFS 09/ Bundesamt für Strahlenschutz,
Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 Atomgesetz,
BAnz 2009, Nr. 162a,
12. 08.2009.
- /BFS 10/ Bundesamt für Strahlenschutz,
Kerntechnische Anlagen in Deutschland,
http://www.bfs.de/de/kerntechnik/Kerntechnische_Anlagen_in_Deutschland,
Stand: Mai 2010.
- /BIE 02/ Bienia, H.; Bach, F.-W.; Verseemann, R.; Philipp, E.,
Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen Ein thermisches Hochleistungstrennverfahren für den Unterwassereinsatz,
ICC 2002.
- /BIR 07/ Birringer, K. J.; Dutzi, W.,
Rückbau der WAK - Erfahrungen in der Abwicklung und Durchführung,
Forschungszentrum Karlsruhe,
Kursunterlagen K300 Abbau kerntechnischer Anlagen 2007.

- /BIS 00/ Bisplinghoff, B.; Lochny, M.; Fachinger, J.; Brücher H.,
Radiochemical characterization of graphite from jülich experimental reactor
(AVR),
Proc. IAEA Technical Meeting,
Manchester UK, 1999 .
- /BIT 07/ Bitterli, B.; Braun, D.,
Core-Schrott-Konditionierung im Kernkraftwerk Gösgen,
Kontec 2007, 94.
- /BMI 77/ Bundesminister des Innern,
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke vom 21.10.1977,
BAnz. 1997, Nr. 206.
- /BMU 04/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit,
Sicherheitsanforderungen an Kernbrennstoffversorgungsanlagen von April
1997 und Juni 2004.
- /BOC 09/ Bochmann, J.; Kowe, S.,
Rückbau des Thermischen und Biologischen Schildes des Rossendorfer
Forschungsreaktors (RFR),
Kontec 2009, 333.
- /BOE 02/ Boeßert, W.; Eichhorn, K.; Wagner, G.,
Radiologische Aspekte beim Rückbau der Isotopenproduktionsanlage des
VKTA,
Jahrestagung Kerntechnik 2002, 429.
- /BOE 05/ Böhme, G.; Hillebrecht, G.; Glauser, H.; Koglin, D.; Rüger, G.; Utke, V.,
Rückbau der kerntechnischen Anlagen Lubmin / Greifswald - Teil 1 -
Rückbaukonzepte Lubmin/Greifswald und Demontage der Reaktoren in
den KKW Lubmin / Greifswald und Rheinsberg,
Kontec 2005, 269.
- /BOL 07/ Bolles, F.; Jerusalem, V.,
Seilsägen von Wärmetauschern im KWW,
Kontec 2007, 518.

- /BOR 07/ Bundesamt für Strahlenschutz,
Borrmann, F.; Schell, H.; Philipczyk, F.,
Übersicht über Stilllegungsprojekte in Deutschland, Teil III: Anlagen der
nuklearen Ver- und Entsorgung,
Salzgitter Mai 2007.
- /BRA 09/ Brack, D. ,
Entfernung der Pins und Rollers, Dosisleistungsmessungen, Aktivitätsbe-
rechnungen und Verpackungskonzept für KKL-Steurelemente,
Kontec 2009, 57.
- /BRA 98/ Brandt, C; Louis, H. ,
Abschließende Untersuchungen für die erste Anwendung der Wasserabra-
sivsusensionsstrahl-Technologie für die Zerlegung unter realen Bedin-
gungen im VAK,
Jahrestagung Kerntechnik 1998, 481.
- /BRI 07/ Brielmayer, M. ,
Strahlenschutzanforderungen während der Stilllegung und dem Rückbau
kerntechnischer Anlagen,
Forschungszentrum Karlsruhe,
Kursunterlagen K300 Abbau kerntechnischer Anlagen 2007.
- /BUN 10/ Deutscher Bundestag,
Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der der Abgeordneten
Klaus Hagemann, Carsten Schneider (Erfurt), Petra Ernstberger, weiterer
Abgeordneter und der Fraktion der SPD – Drucksache 17/2513 –,
Drucksache 17/2646,
26.07.2010.
- /BUS 08/ Buß, K.,
Erfahrungen beim Rückbau des Versuchsatomkraftwerks Kahl aus Sicht
der Aufsichtsbehörde,
Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis,
TÜV-Süd Seminar 2008.

- /COM 07/ Compr-Symposium 2007 ,
Qualitätssicherung und Rückbau,
CD mit Vorträgen.
- /CZE 98/ Czeslik, P.; Demant, W.; Schmidt, D.; Stanke, D.,
Zerlegung des Reaktordruckbehälters mit Einbauten im MZFR,
Jahrestagung Kerntechnik 1998, 485.
- /DRY 05/ Drygalla, M.; Haferkamp, H.; Hustedt, M.; Walter, J.; Meier, O.; ,
von Busse, A. ,
Neue Einsatzmöglichkeiten der Lasertechnik für Zerlegeaufgaben in kern-
technischen Anlagen,
Kontec 2005, 366.
- /DUT 05/ Dutzi, G.; Praxl, H.,
Stand der laufenden Rückbaumaßnahmen im Prozessgebäude der WAK,
Kontec 2005, 266.
- /DUW 05/ Duwe, P.; Loock, R. ,
Zerlegung von Steuerstabführungsrohren und Strahlpumpen im KWW,
Kontec 2005, 386.
- /DUW 07/ Duwe, P.; Loock, R. ,
Zerlegung des Dampfwasserabscheiders (DWA) im KWW,
Kontec 2007, 379.
- /DUW 08/ Duwe, P.; Strobel, R. ,
Zerlegung der RDG-Einbauten im KWW,
TÜV-Symposium Stilllegung Hannover 2008.
- /DUW 09/ Duwe, P.; Strobel, R. ,
Zerlegung der RDG-Einbauten im KWW,
Kontec 2009, 140.

- /EIC 06/ Eickelpasch, L.; Hildwein, P. ,
Demontage des Außenbetons vom Reaktorgebäude des Versuchsatomkraftwerks Kahl mittels Wandsäge und hydraulischen Pressen,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 521.
- /EIC 84/ Eickelpasch, N; Lasch, M.,
Neuere Erfahrungen zur elektrochemischen Dekontamination,
VGB Kraftwerkstechnik 64 (1984), 240.
- /EIC 87/ Eickelpasch, N,
Rezyklierung und Beseitigung von Reststoffen,
Jahrestagung Fachverband Strahlenschutz 1987, 118.
- /EIC 91/ Eickelpasch, N.; Stang, W.; Fischer, A.,
Status of decommissioning work at the Gundremmingen unit A power station,
Kerntechnik 56 (1991) 367.
- /EIC 93/ Eickelpasch, N; Steiner, H.,
Gundremmingen Block A - Erfahrungen beim Rückbau eines Leistungsreaktors,
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 43 (1993) 320.
- /EIC 97^a/ Eickelpasch, N.; Kalwa, H.; Steiner, H.; Priesmeyer, U.,
The application of mechanical and thermal cutting tools for the dismantling of activated internals of the reactor pressure vessels in the Versuchsatomkraftwerk Kahl and the Gundremmingen Unit A,
Nuclear Engineering and Design 170 (1997), 175 – 182.
- /EIC 97^b/ Eickelpasch, N.; Steiner, H.; Priesmeyer, U.,
How to take apart a nuclear power plant,
Core Issues - The Journal of the Uranium Institute, June/July 1997.
- /EIC 97^c/ Eickelpasch, N.; Steiner, H.; Priesmeyer, U.,
Remote techniques for the underwater dismantling of reactor internals at the nuclear power plant Gundremmingen unit A,
Nuclear energy 36 (1997) 1, 49 - 54, ISSN 0140 4067.

- /EIC 98/ Eickelpasch, N.; Steiner, H.; Priesmeyer, U.; Raymont, J. M.,
Decommissioning projects in KRB A and VAK,
Waste Management 1998.
- /EIC 99^a/ Eickelpasch, N.; Reiter, W.; Kalwa, H.; Eickelpasch, L.,
Zerlegung der Einbauten des Reaktordruckbehälters im Versuchsatom-
kraftwerk Kahl - ein Resümee,
Jahrestagung Kerntechnik 1999, 517.
- /EIC 99^b/ Eickelpasch, N.; Steiner, H.; Schmidt, D.; Alba, H.,
Innovative Underwater Cutting Procedures for the Dismantling of two Ger-
man Nuclear Power Plants,
Waste Management 1999 .
- /ESK 10/ Entsorgungskommission,
Empfehlung der ESK – Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen,
Anlage zum Ergebnisprotokoll der 13. Sitzung der Entsorgungskommission
09.09.2010.
- /EXN 05/ Exner, H.; Treptau, S.; Geißler, S.,
Laserstrahliefenabtrag von Betonflächen mittels Hochleistungsdiodenla-
ser,
Kontec 2005, 600.
- /FAB 01/ Faber, P.; Raabe, E.; Schmitt, H.,
Rückbau einer α -kontaminierten Wand,
Stilllegung des Siemens Brennelementwerks Hanau,
Jahrestagung Kerntechnik 2001, 511.
- /FLE 02/ Fleischhacker, J.; Obermoser, B. ,
Strahlenschutzaspekte bei der Stilllegung,
Jahrestagung Kerntechnik 2002, 415.
- /FRI 07/ Friske, A.; Radzuweit, J.; Stechmann, L.,
Zerlegung von Stahlelementen aus dem KKW Stade/Entsorgung von
Steuerelementführungsrohren aus dem KKI 1,
Kontec 2007, 78.

- /FRI 08/ Friske, A.,
Chemische Dekontamination im Kraftwerksbetrieb: Ziele und Ergebnisse,
Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis,
TÜV-Süd Seminar 2008.
- /FRI 09/ Friske, A.; Radzuweit, J.; Huber, S.,
Konditionierung von Kernbauteilen des KKW Obrigheim (KWO),
Kontec 2009, 99.
- /FZK 06/ Forschungszentrum Karlsruhe,
Durchführung von nuklearen Stilllegungsprojekten im Forschungszentrum
Karlsruhe ,
Forschungszentrum Karlsruhe Nachrichten 38 (2006) 3.
- /GAE 05/ Gärtner, S.,
Neue Konzepte in der Zerlegetechnik - Trockenes Betonseilsägen,
Kontec 2005, 450.
- /GEI 02/ Geiser, H.; Bach, F.-W.; Verseemann, R.; Wilk, P. ,
Zerlegetechnik und Entsorgung von Beton- und Grafitstrukturen aus kern-
technischen Anlagen,
atomwirtschaft 47 (2002), 486.
- /GEN 06/ Gentes, S.; Gehbauer, F.,
Universal Demolition Equipment for Dust-Free and Waterless Demolition of
Reinforced Concrete Structures in Nuclear Facilities,
Jahrestagung Kerntechnik 2006.
- /GEN 09/ Gentes, S.; Huber, W.; Bothe, H.,
Trennen von Konsolen im BE-Lagerbecken (KWO),
Kontec 2009, 345.

- /GNS 04/ Gesellschaft für Nuklear-Service mbH,
Bereich Stilllegung (AS),
Erfolgreicher Abschluss des Rückbaus des Reaktorblocks und,
Absetzblocks FRJ-1 (MERLIN) im Forschungszentrum Jülich,
GNS-Information, Ausgabe 30,
09.02.2004.
- /GOE 07/ Gödickemeier, M.; Bohn, K.-P.; Moseley, P.; Siegenthaler, E.,
Trockenes Diamantschneiden von armiertem Beton beim Rückbau von
Kernanlagen,
Kontec 2007, 357.
- /GRA 07/ Graffunder, I.; Birringer, K. J.; Fleisch, J.; Pfeifer, W.,
Stilllegung WAK - Rückbau während und nach der Verglasung,
Jahrestagung Kerntechnik 2007, 556.
- /HAS 09/ Presseinformation Leibniz Universität Hannover,
Hannoversche Wissenschaftler zerlegen die ganz dicken Brocken,
[http://www.uni-
hannover.de/de/aktuell/presseinformationen/archiv/details/08229/](http://www.uni-hannover.de/de/aktuell/presseinformationen/archiv/details/08229/),
Stand: Juni 2010.
- /HEP 07/ Heppler, K.,
Autonomer Manipulator zur Dekontamination von Betonoberflächen,
Kontec 2007, 454.
- /HES 00/ Hesse, H.; Demant, W.; Reichert, A.; Willmann, F.,
Strahlenexposition des Personals während Abbau und Zerlegung des Pri-
märsystems des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR),
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,
FZKA 6510, 2000.
- /HIL 05/ Hillebrand, I.; Brockmann, K.; Minges, J.; Pfeifer, W.; Benkert, J.; ,
Willmann, F.,
Rückbau KNK - Kalte Inbetriebsetzung und Durchführung der ersten
Schnitte,
Kontec 2005, 188.

- /HIL 06/ Hildwein, P.,
Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR): Rückbau des Reaktordruckbehälters in Kooperation zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe, Hochschule und Industrie,
Forschungszentrum Karlsruhe Nachrichten 38 (2006), 130.
- /HOE 07/ Hörenbaum, W.; Herold, G.; Müller, H. S.,
Abbruchverfahren massiver Betonbauteile der Energietechnik,
Kontec 2007, 367.
- /HOL 97/ Holland, D.; Quade, U.; Bach, F.-W.; Wilk, P.,
A German Research Project About Applicable Graphite Cutting Techniques,
Proc. IAEA Technical Meeting, Manchester UK, 1999 .
- /HUR 09/ Hurtado, A.; Lippmann, W.; Herrmann, M.; Littwin, R.; Gentes, S.,
Bremmer, J.; Kern, P.; Gabor, N. ,
Dekontamination radioaktiv belasteter Betonoberflächen mittels eines manipulatorgetragenen Lasersystems,
Kontec 2009, 463.
- /IAE 00^a/ International Atomic Energy Agency,
The decommissioning of WWER type nuclear power plants,
TECDOC 1133, 2000.
- /IAE 00^b/ International Atomic Energy Agency,
Organization and Management for Decommissioning of Large Nuclear Facilities,
Technical Report Series No. 399, 2000.
- /IAE 01^a/ International Atomic Energy Agency ,
Methods for the Minimization of Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities,
Technical Report Series No. 401, 2001.

- /IAE 01^b/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities,
Safety Standard Series WS-G-2.4, 2001.
- /IAE 02^a/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning techniques for research reactors,
TECDOC 1273, 2002.
- /IAE 02^b/ International Atomic Energy Agency,
Safe Enclosure of Nuclear Facilities During Deferred Dismantling,
Safety Report Series No. 26, 2002.
- /IAE 02^c/ International Atomic Energy Agency,
Safe Decommissioning for Nuclear Activities,
Proceedings Berlin 2002.
- /IAE 02^d/ International Atomic Energy Agency ,
Record Keeping for the Decommissioning of Nuclear Facilities: Guidelines
and Experience,
Technical Report Series No. 411, 2002.
- /IAE 03^a/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities,
Technical Report Series 414, 2003.
- /IAE 03^b/ International Atomic Energy Agency,
Research Reactor Utilization, Safety, Decommissioning, Fuel and Waste
Management,
Proceedings Chile 2003.
- /IAE 04^a/ International Atomic Energy Agency,
Operational and decommissioning experience with fast reactors,
TECDOC 1405, 2004.

- /IAE 04^b/ International Atomic Energy Agency,
Planning, managing and organizing the decommissioning of nuclear facilities: lessons learned,
TECDOC 1394, 2004.
- /IAE 04^c/ International Atomic Energy Agency,
Status of the Decommissioning of Nuclear Facilities around the World,
2004.
- /IAE 05^a/ International Atomic Energy Agency,
Dismantling of Contaminated Stacks at Nuclear Facilities,
Technical Report Series 440, 2005.
- /IAE 05^b/ International Atomic Energy Agency,
Selection of decommissioning strategies: Issues and factors,
TECDOC 1478, 2005.
- /IAE 06^a/ International Atomic Energy Agency,
Management of Problematic Waste and Material Generated During the
Decommissioning of Nuclear Facilities,
Technical Report Series 441, 2006.
- /IAE 06^b/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material,
Safety Standard Series WS-R-5, 2006.
- /IAE 06^c/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning of Research Reactors: Evolution, State of the Art, Open
Issues,
Technical Report Series 446, 2006.
- /IAE 06^d/ International Atomic Energy Agency,
Characterization, Treatment and Conditioning of Radioactive Graphite from
Decommissioning of Nuclear Reactors,
TECDOC 1521, 2006.

- /IAE 07/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning Strategies for Facilities Using Radioactive Material,
Safety Report Series No. 50, 2007.
- /IAE 08/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning of Research Reactors and Other Small Facilities by
Making Optimal Use of Available Resources,
Technical Report Series 463, 2008.
- /IAE 89/ International Atomic Energy Agency,
Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities,
TECDOC 511, 1989.
- /IAE 93/ International Atomic Energy Agency,
Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities,
TECDOC 716, 1993.
- /IAE 97/ International Atomic Energy Agency,
Technologies for Gas Cooled Reactor Decommissioning, Fuel Storage and
Waste Disposal,
TECDOC 1043, 1997.
- /IAE 98^a/ International Atomic Energy Agency,
Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decom-
missioning Purposes,
Technical Report 389, 1998.
- /IAE 98^b/ International Atomic Energy Agency,
New Methods and Techniques for Decontamination in Maintenance or De-
commissioning Operations,
TECDOC 1022, 1998.
- /IAE 99^a/ International Atomic Energy Agency,
Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors,
Safety Standard Series WS-G-2.1, 1999.

- /IAE 99^b/ International Atomic Energy Agency,
State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities,
Technical Report Series 395, 1999.
- /IMP 10/ Impetro, M., Baschnagel, M.,
System- und Komponentendekontamination zur Reduzierung der der Individual und Kollektivdosis – Beispiele aus der Praxis,
TÜV - Expertentreffen Strahlenschutz, Lindau 2010.
- /ISH 02/ Ishikura, T.,
Status and Development of Nuclear Power Plant Decommissioning Technologies,
in /BER 02/.
- /ITZ 09/ Itzel, M.; Protzer, G.; Duwe, P.,
Zerlegung des Dampftrockners (DT3) im Kernkraftwerk Würgassen,
Kontec 2009, 200.
- /JUE 06/ Jünger-Gräf, B.; Moser, T.; Berthold, M. ,
Übersicht und Erfahrungen beim Rückbau des Forschungsreaktor TRIGA HD II aus der Sicht des Genehmigungsinhabers,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 491.
- /KAL 95/ Kalwa, H.; Steiner, H.,
Anwendung von mechanischen und thermischen Trennverfahren bei der Zerlegung von aktivierten Reaktordruckgefäßeinbauten in VAK und KRB A,
Jahrestagung Kerntechnik 1995, 430.
- /KAR 10/ Karinda, F. L.,
Chemische Dekontamination in KKW-Kreisläufen,
Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis,
TÜV-Süd Seminar 2010.

- /KAU 06/ Kaulard, J.; Jünger-Gräf, B.,
Die Stilllegung der Forschungsreaktoren des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg – Erfahrungen mit dem „sicheren Einschluss“ und „direkten Abbau“ am Beispiel der Reaktoren TRIGA HD I und TRIGA HD II, atomwirtschaft 51 (2006), 331.
- /KIS 99/ Kistmacher, H.; Loebnitz, C.; Scholz, W.; Haferkamp, H.; Goede, M.; Drygalla, M,
Emissionsarme Trenntechnik: Handgeführtes Laser-Schneid-System für die Stellegung,
Kontec 1999, 494.
- /KNA 09/ Knappik, R.; Fleischer, K.; Wöllert, A.; Kinal, N.,
Rückbau einer Neutronengeneratoranlage und ein Tritiumproblem,
Kontec 2009, 302.
- /KNO 05/ Knorr, J.; Lippmann, W.; Reinecke, A.-M.; Wolf, R.; Rasper, R.,
Dekontamination silikatischer Oberflächen mittels Laserabtrag bei gleichzeitiger Abproduktkonditionierung,
Kontec 2005, 590.
- /KRA 07/ Krause, G.,
Decontamination, melting and recycling of a full size, 310 t Steam Generator from a PWR,
Kontec 2007, 348.
- /KRA 08/ Krauß, M.,
Neue Wege im Rückbau - Demontage des Sicherheitsbehälters, und des Druckbehälters im KWW,
TÜV-Symposium Stilllegung, Hannover 2008.
- /KRU 09/ Kruzinski, G.,
Strahlenschutzaspekte bei der Primärkreisdekontamination KWO,
Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis,
TÜV-Süd Seminar 2010.

- /LAN 97/ Lang, H.; Feddersen-Clausen, W.,
„Stand von Stilllegung und Rückbau des FRJ-1 (Merlin)“,
Beitrag zum V. Stilllegungskolloquium Hannover / 4. Statusbericht,
Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, Hannover 24.-25.,
Juni 1997.
- /LIN 07/ Lindström, A.; Wirendal, B.; Lindberg, M.,
New Treatment Concept for Steam Generators Technical Aspects,
Waste Management 2007.
- /LIP 06/ Lippmann, W.; Knorr, J.; Wolf, R.; Reinecke, A. ,
Decontamination of Silicate Surfaces by Laser Ablation with Simultaneous
Conditioning of Waste Products,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 531.
- /LIP 07/ Lippmann, W.; Knorr, J.; Wolf, R.; Herrmann, M.; Zeuner, R.; ,
Reinecke, A.-M.;Hille, R. ,
Dekontamination silikatischer Oberflächen mittels Laserabtrag bei gleich-
zeitiger Abproduktkonditionierung,
Kontec 2007, 649.
- /LOE 05/ Loeb, A.,
Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR) Karlsruhe, 7. Stilllegungsschritt, Zer-
legung des Moderatorbehälters und der verbliebenen Trennröhre,
Jahrestagung Kerntechnik 2005, 404.
- /MIN 07^a/ Minges, J.; Brockmann, K.; Thiess, J.; Russ, J.; Willmann, F.; Haller, H.,
Auslegung, Erfahrungen und Status des Rückbaus des Reaktortanks der
KNK,
Kontec 2007, 302.
- /MIN 07/ Minges, J.; Brockmann, K.; Thiess, J.; Russ, J.; Willmann, F.; Haller, H.,
Stilllegung KNK, Maßnahme 2 - Abbau Wärmeisolierung sowie Ausbau
und Zerlegung der Primärabschirmung - Einblicke in Konstruktion und Pla-
nung Ausblicke für die Durchführung,
Kontec 2007, 306.

- /MOE 07/ Möller, J.; Gülow, H.,
Zerlegung der Einbauten des Reaktors im Kernkraftwerk Rheinsberg,
Jahrestagung Kerntechnik 2007, 553.
- /MUE 09/ Müller, H.,
Abbruch massiver Betonbauwerke der Energietechnik,
Schlussbericht BMBF-Vorhaben 02 S 8305,
Karlsruhe 2009.
- /MWM 01/ Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes,
Nordrhein-Westfalen,
Genehmigungsbescheid Nr. 7/8c FRJ-1 - Teilgenehmigung,
31.07.2001.
- /MWM 97/ Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes,
Nordrhein-Westfalen,
Genehmigungsbescheid Nr. 7/8b FRJ-1 - Teilgenehmigung,
08.07.1997.
- /NEA 06/ Nuclear Energy Agency,
Selecting Strategies for the Decommissioning of Nuclear Facilities,
2006.
- /NEA 08/ Nuclear Energy Agency,
Regulating the Decommissioning of Nuclear Facilities,
2008.
- /NEA 99/ Nuclear Energy Agency,
Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities,
1999.
- /NEW 87/ Newton, G. J.; Hoover, M. D.; Barr, E. B.; Wong, B. A.; Ritter, P. D.,
Collection and Characterization of Aerosols from Metal Cutting Techniques
Typically Used in Decommissioning Nuclear Facilities ,
American Industrial Hygiene Association Journal 48 (1987), 922.

- /NIS 98/ NIS Ingenieurgesellschaft mbH im Auftrag des Bundesamtes für,
Strahlenschutz,
Datenblatt zur Erfassung von Daten zur Stilllegung des FRJ-1 (MERLIN) ,
Datenerfassungsbogen im Rahmen des Vorhabens SR 2277,
Bereitstellung der Unterlagen durch das Ministerium für Wirtschaft und,
Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen,
Februar 1998 .
- /PET 05/ Peter, D.; Louis, H.; Senne, T.; Verseemann, R. ,
Weiterentwicklungen des Wasserabrasivstrahlschneidens als universelle
Zerlegetechnik,
Kontec 2005, 346.
- /PFE 04/ Pfeifer, W.; Eisenmann, B.; Bach, F.-W.; Verseemann, R.; Bienia, H.,
Plasmaschneiden im MZFR-Unterwassereinsatz bei Stahldicken bis
130 mm,
atomwirtschaft 49 (2004), 103.
- /PFE 06^a/ Pfeifer, W.,
Stand und Perspektiven der Stilllegung der Wiederaufarbeitungsanlage
Karlsruhe (WAK) - Neustrukturierung des Projektes,
Forschungszentrum Karlsruhe Nachrichten 38 (2006), 159.
- /PFE 06/ Pfeffer, W.; Bürgel, A.; Kaulard, J.; Marx, H.,
Auswertung von Daten zur tätigkeitsbezogenen Exposition in Betrieb be-
findlicher Kernkraftwerke unter Betonung der Jahre 2000 bis 2003,
GRS- A-3316, März 2006.
- /PLE 05/ Plessing, J.,
BOLERO Shaver Portalgerüst-System zur Dekontamination von Oberflä-
chen,
Kontec 2005, 482.

- /POE 06/ Pötter, K.-F.; Eckelmann, J.; Safronov, V.; Franz, M.; Oehme, A. ,
Ein grafisches Dokumentationssystem für orts- und zeitabhängige Dosisleistungsmessungen in KKW,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 746.
- /POL 06/ Pollmann, E.; Bolles, F.; Cleve, R. ,
Konditionierung und Zwischenlagerung von Reaktordruckgefäß-Einbauten und Core-Schrotten im Kernkraftwerk Würgassen,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 508.
- /POL 98/ Pollmann, E.; Theis, S.,
Fernbediente Zerlegung von Großkomponenten im Kontrollbereich mit adaptierten Abrißwerkzeugen,
Jahrestagung Kerntechnik 1998, 551.
- /PRE 05/ Prechtel, E.; Eisenmann, B.; Pfeifer, W.; Süßdorf, W.,
Erfahrungen bei der fernbedienten Zerlegung des hochaktivierten Moderatortanks und weiterer RDB-Einbauten im Rahmen des vollständigen Rückbaus des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe ,
Kontec 2005, 204.
- /PRE 06/ Prechtel, E.; Eisenmann, B.; Süßdorf, W.,
Auf Sichtweite mit der „Grünen Wiese“: Status des MZFR-Rückbaus,
Forschungszentrum Karlsruhe Nachrichten 38 (2006), 125.
- /PRE 07^a/ Prechtel, E.; Eisenmann, B.; Süßdorf, W.,
Das Rückbauprojekt Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe (MZFR) Erfahrungen beim Rückbau der schwerwassergekühlten Druckwasserreaktoranlage,
Jahrestagung Kerntechnik 2007, 560.
- /PRE 07^b/ Prechtel, E.,
Der Rückbau des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe (MZFR) Meilenstein des kerntechnischen Rückbaus ,
Forschungszentrum Karlsruhe,
Kursunterlagen K300 Abbau kerntechnischer Anlagen 2007.

- /PRE 07/ Prechtl, E.; Eisenmann, B.; Weis, A.; Süßdorf, W.; Stanke, D.; Loeb, A.; Thoma, M. ,
Erfolgreicher Einsatz des Plasmaschneidverfahrens und der Contact-Arc-Metal-Cutting Zerlegetechnik (CAMC) beim Rückbau des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe (MZFR),
Kontec 2007, 294.
- /PRE 09/ Prechtl, E.; Huber, W. B.; Eisenmann, B.; Süßdorf, W. ,
Rückbau Biologischer Schild FZK/MZFR,
Kontec 2009, 170.
- /PRI 08/ Priesmeyer, U.; Rojahn, Th.; Fries, B. ,
Kernkraftwerk Lingen,
Vom Sicherem Einschluss in den Rückbau,
TÜV-Symposium Stilllegung, Hannover 2008.
- /PTE 07/ Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft,
Halbjahresbericht über den Stand der BMBF-Stilllegungsprojekte und,
der vom BMBF geförderten FuE-Arbeiten zu „Stilllegung/Rückbau,
kerntechnischer Anlagen“,
Berichtszeitraum: 1. Januar - 30. Juni 2007,
PTE-S Nr. 14,
August 2007.
- /PTE 10/ Karlsruher Institut für Technologie ,
Stand der BMBF-Stilllegungsprojekte und der vom BMBF geförderten FuE-
Arbeiten zu „Stilllegung/Rückbau kerntechnischer Anlagen“,
Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2009,
PTE-S Nr. 19,
April 2010.
- /REH 02/ Bundesamt für Strahlenschutz,
Rehs, B.; Spoden, E.,
Übericht über Stilllegungsprojekte in Deutschland, Teil I: Kernkraftwerke
und Prototypreaktoren,
Salzgitter Februar 2002.

- /REI 00/ Reiter, W.; Kalwa, H.; Hackel, W.; Eickelpasch, N.; Eickelpasch, L.,
Der Rückbau und die Entsorgung des Reaktordruckbehälters im Versuchsa-
tomkraftwerk Kahl,
Jahrestagung Kerntechnik 2000, 501.
- /REI 98/ Reiter, W.; Kalwa, H.; Brehmer, H.,
Zerlegung des Kernmantelunterteiles und des thermischen Schildes im
RDB des VAK durch Wasserstrahlschneiden,
Jahrestagung Kerntechnik 1998, 479.
- /ROH 06/ Rohde, Ch. ,
Demontage aktivierter Bauteile in der Energiewerke Nord GmbH,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 503.
- /RUN 04/ Runge, H.; Hackel, W.; Schmidt, D.,
Biological Shield Dismantling at VAK Kahl,
Waste Management 2004.
- /RUN 05/ Runge, H.; Duwe, P.; Arnold, H.-U.; Itzel, M. ,
Dampftrockner-Zerlegung im KWW Würgassen,
Kontec 2005, 392.
- /RUN 07/ Runge, H.; Itzel, M.; Arnold, H.-U.; Duwe, P.,
Zerlegung des Dampftrockners 3 (DT3) im Kernkraftwerk KWW Würgas-
sen,
Kontec 2007, 389.
- /SAT 10/ sat science GmbH,
Retrospektive Dosisermittlung für einzelne Rückbautechnologien,
Oktober 2010.
- /SCH 03/ Schulz, T.; Schlag, J.,
System DECON – Eine innovative Problemlösung für die Dekontamination
von Oberflächen an Bauwerken,
Kontec 2003, 784.

- /SCH 07/ Schwarzkopf, W.,
Dekontaminationsverfahren und ihre Wirksamkeit,
Forschungszentrum Karlsruhe,
Kursunterlagen K300 Abbau kerntechnischer Anlagen 2007.
- /SCH 08^a/ Scheuerer, C.,
Chemische Dekontamination im Kraftwerksbetrieb: Ziele und Ergebnisse,
Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis,
TÜV-Süd Seminar 2008.
- /SCH 08^b/ Scheer, J.,
Vorbereitende Maßnahmen beim Rückbau,
GRS-Behördenseminar Stilllegung kerntechnischer Anlagen,
Oktober 2008 .
- /SCH 09/ Schleuniger, P. ,
Rückbau der Versuchsverbrennungsanlage für radioaktive Abfälle am Paul
Scherrer Institut, Schweiz,
Kontec 2009, 282.
- /SSP 04/ Schwerpunktausgabe "Strahlenschutzpraxis" 1/2004 Strahlenschutz beim
Rückbau.
- /STA 03/ Stahn, B.; Printz, R.; Matela, K.; Zehbe, C.,
Abbau des Reaktorblocks des Forschungsreaktors FRJ-1 (MERLIN).
- /STA 04/ Stahn, B.; Printz, R.; Matela, K.; Zehbe, C.,
Forschungsreaktor FRJ-1 (MERLIN) - Das Hauptaktivitätsinventar ist durch
erfolgreichen Rückbau des Reaktorblocks entfernt,
atomwirtschaft 49 (2004), 93.
- /STA 06^a/ Starke, H.,
Restbetrieb und Restabbau des Forschungsreaktors Frankfurt,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 495.

- /STA 06/ Stanke, D.; Bienia, H.; Loeb, A.; Thoma, M.; Eisenmann, B.; Prechtl, E.; Süßdorf, W.; Kremer, G.; Rügenapp, T.,
Contact-Arc-Metal-Cutting (CAMC): Eine junge Schneidtechnologie ist den Kinderschuhen entwachsen. Erfolgreicher Einsatz unter Wasser beim Rückbau des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe (MZFR),
atomwirtschaft 51 (2006), 170.
- /STA 09/ Stahn, S.; Printz, R.; Matela, K.; Zehbe, C.; Stauch, B.; Zander, I. ,
Der Rückbau des Forschungsreaktors FRJ-1 (MERLIN) bis zur „Grünen Wiese“,
Kontec 2009, 234.
- /STA 76/ Schnell-Thermischer Argonaut-Reaktor Karlsruhe (STARK), hier: Demontage des Reaktors,
Detaillierter Plan zur Demontage des Reaktors STARK - Information an das Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung Baden-Württemberg,
Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe 1976.
- /STA 89/ Stang, W.; Fischer, A.; Rubischung, P.,
Large-Scale Application Segmenting and Decontamination Techniques,
Proceedings of the Int. Conference on the Decommissioning of Nuclear Installations Brussels, 1989.
- /STA 93/ Stang, W.; Fischer, A.,
Großtechnische Anwendung von optimierten Trenn-, Dekontaminations- und Säurebehandlungsverfahren,
EU-Bericht EUR 14402.
- /STA 97/ Starke, H.; Schwald, P.; Demant, W.,
Probenahme am Reaktordruckbehälter des Mehrzweckforschungsreaktors,
Jahrestagung Kerntechnik 1997, 507.
- /STE 02/ Steiner, H.; Priesmeyer, U.,
Plasmaschneiden in großen Wassertiefen,
ICC 2002.

- /STE 05/ Steiner, H.; Priesmeyer, U.; Steifensand, M.-K.,
Practical Experience in Decommissioning KRB A Plant, Gundremmingen,
Germany,
ANS Topical Meeting on Decommissioning, Decontamination, & Reutiliza-
tion, Denver, USA, 2005.
- /STE 07/ Steiner, H.,
Erfahrungen aus dem Rückbau von KRB A - Fernhantierung -
Reaktordruckbehälter- Biologischer Schild,
Forschungszentrum Karlsruhe,
Kursunterlagen K300 Abbau kerntechnischer Anlagen 2007.
- /STE 08/ Steiner, H.; Wiedig, D.,
Abbau und Dekontamination am Beispiel des Rückbauprojektes KRB A,
Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis,
TÜV-Süd Seminar 2008.
- /STE 95/ Steiner, H.; Eickelpasch, N.; Tegethoff, H.,
Erfahrungen aus der Zerlegung von drei Dampferzeugern mit dem "Eissä-
geverfahren" in KRB A,
Jahrestagung Kerntechnik 1995, 434.
- /STE 96/ Steiner, H.; Eickelpasch, N.; Priesmeyer, U.; Bach, F.-W.,
Verfahren für die Zerlegung der Einbauten des Reaktordruckgefäßes in
KRB A,
Jahrestagung Kerntechnik 1996, 579.
- /STE 97^a/ Steiner, H.; Priesmeyer, U.; Eickelpasch, N.,
Erfahrungen beim thermischen Trennen von hochaktivierten Einbauten des
Reaktordruckgefäßes in KRB A, Gundremmingen,
Jahrestagung Kerntechnik 1997, 511.
- /STE 97^b/ Steiner, H.; Priesmeyer, U.; Steifensand, M.-K.,
Zerlege- und Dekontaminationsverfahren bei der Stilllegung der Siedewas-
serreaktoren KRB A und VAK,
V. Stilllegungskolloquium, 24.-25.6.1997, Hannover.

- /STE 97^c/ Steiner, H.; Eickelpasch, N.; Tegethoff, H.,
Experience with the dismantling of three secondary steam generators in
unit A in Gundremmingen by the 'ice-sawing' technique ,
Engineering and Design 170 (1997), 165.
- /STE 98/ Steiner, H.; Eickelpasch, N.; Priesmeyer, U.; Fischer, A.; Blessing, M.,
Pilot Dismantling of the KRB A boiling water reactor,
EU report EUR 18330 EN.
- /STI 05/ Stiepani, C.; Seidelmann, K. ,
Full System Decontamination for decommissioning at German Pressu-
rized Water Reactor STADE,
Jahrestagung Kerntechnik 2005, 377.
- /SUE 07/ Süßdorf, W.,
Überblick über Handhabungs- und Zerlegetechniken,
Forschungszentrum Karlsruhe,
Kursunterlagen K300 Abbau kerntechnischer Anlagen 2007.
- /TAB 04/ Taboas, A. L.; Moghissi, A. A.; Laguardia, T. S.,
Decommissioning Handbook,
ASME, New York, 2004.
- /THA 08/ Thalinger, R.; Figger, J.,
Strahlenschutzaspekte bei der Entsorgung von Dampferzeugern,
Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis,
TÜV-Süd Seminar 2008.
- /THI 00/ Brenk Systemplanung,
Thierfeldt, S.,
Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen,
Aachen, 2000.

- /THI 09/ Brenk Systemplanung,
Thierfeldt, S.; Schartmann, F.,
Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen – Erfahrungen und Perspektiven ,
Aachen, 2009.
- /THO 06/ Thoma, M.; Loeb, A.; Eisenmann, B.; Prectl, E.; Süßdorf, W. ,
Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe. 7. Stilllegungsschritt. Abschluss
der Nasszerlegung des Moderatortanks und des thermischen Schildes,
Jahrestagung Kerntechnik 2006, 472.
- /TOP 07^a/ Topf, C.,
Full System Decontamination at the Obrigheim Nuclear Power Plant Prior
to Decommissioning,
Jahrestagung Kerntechnik 2007, 543.
- /TOP 07/ Topf, C.,
Full System Decontamination at the Obrigheim Nuclear Power Plant Prior
to Decommissioning,
atomwirtschaft 52 (2007), 727.
- /URB 06/ Urbahn, H.; Bürgel, A.; Kaulard, J.,
Die Strahlenexposition der Arbeitskräfte in stillgelegten Kernkraftwerken in
Deutschland bis zum Jahr 2004,
GRS- A-3332, September 2006.
- /VAI 02/ Vainshtein, V. V.; Abramov, M. I.,
Decommissioning of Uranium-Graphite Nuclear Reactors and Radioactive
Waste Handling,
in /BER 02/.
- /VAL 06/ Valencia, L.,
Behandlung und Entsorgung von Großkomponenten und radioaktiven
Reststoffen,
Forschungszentrum Karlsruhe Nachrichten 38 (2006), 153.

- /VER 05/ Versemann, R.; Bach, F.-W.; Kremer, G.; Brüggemann, P.,
Research an Development Results for Dismantling and Decontamination
Application,
Waste Managment 2005.
- /VIE 07/ Viermann, J.; Beverungen, M.,
Geplante Vorgehensweise bei der Entsorgung von Dampferzeugern,
Kontec 2007, 422.
- /VRB 01^a/ Vrba, H.; Rohde, C. ,
Einrichtungen für den Rückbau des KKW Greifswald,
Jahrestagung Kerntechnik 2001, 519.
- /VRB 01^b/ Vrba, H.; Fischer, J.,
Großbandsäge im Rückbau kerntechnischer Anlagen EWN/ZLN,
Jahrestagung Kerntechnik 2001, 515.
- /WIE 99/ Wieser, H.; Finsterwalder, L.,
Fortschritte beim Rückbau der WAK,
Jahrestagung Kerntechnik 1999, 493.
- /WIT 07/ Wittenauer, S.; Brockmann, K.; Minges, J.,
Stilllegung KNK, 9. SG, Status der Zerlegung des Reaktortanks und Pla-
nungsstand der Maßnahmen 2 und 3 der 9. SG,
Jahrestagung Kerntechnik 2007, 564.
- /WOO 06/ Wood, C. J.; Naughton, M. D.,
Experience with Reactor Internals Segmentation at US Power Plants,
in: Proceedings of the IAEA International Conference on Lessons Learned
from the Decommissioning of Nuclear Facilities and the Safe Termination
of Nuclear Activities, Athens 2006.
- /YAN 88/ Yanagihara, S.; Ashida, S.; Usui, H.,
Dismantling of JPDR internals using underwater plasma arc cutting tech-
nique operated by robotic manipulator,
Journal of Nuclear Science and Technology 25 (1988), 891.

/ZEH 09/ Zehbe, C.,
Persönliche Mitteilung,
Oktober 2009.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Der Kontext des Auswahlprozesses.....	7
Abb. 2.2:	Schematische Darstellung des idealisierten Prozesses zur Auswahl von Abbautechniken und Dekontaminationstechniken und –verfahren bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen	8
Abb. 7.1	Kollektivdosen verschiedener Abbautechniken beim FRJ-1, Abbauphase 3 (logarithmische Darstellung).....	75
Abb. 7.2:	Zeitlicher Verlauf der Tageskollektivdosis	77
Abb. 7.3:	Maximal aufgetretene Tagesdosis einer einzelnen Person	77
Abb. 7.4:	Mittelung Tagesdosis über Anzahl der eingesetzten Personen	78
Abb. 7.5:	Verlauf der Aerosolaktivität	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 6.1	Tabelle der Abbautechniken	41
Tab. 6.2	Tabelle der Dekontaminationsverfahren	49
Tab. 7.1	Kollektivdosen beim Zerlegen der Dampferzeuger (DE) in KRB-A (/STE 98/)	58
Tab. 7.2	Radiologische Daten zu Arbeiten in KRB-A aus /STE 98/, /STE 08/ und /STA 93/	60
Tab. 7.3	Abschätzung der abbautätigkeitsbezogenen Kollektivdosis des Personals /STA 89/, /STA 93/, /STE 98/	62
Tab. 7.4	Zusammenstellung von Daten zur Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR)	66
Tab. 7.5	Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$	68
Tab. 7.6	Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen beim Plasmaschneiden bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$	69
Tab. 7.7	Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen beim Abkreisen bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$	69
Tab. 7.8	Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen für Schritt 1 bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$	81
Tab. 7.9	Tätigkeitsbezogene Dosisleistungen für Schritt 2 bezogen auf a) Gesamtstunden und b) Maskenstunden in $\mu\text{Sv/h}$	81

**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

www.grs.de