

**Abbau- und
Dekontaminations-
techniken für die
Stilllegung kerntechnischer
Anlagen**

Abbau- und Dekontaminations- techniken für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Abschlussbericht

Thomas Braunroth
Matthias Dewald
Przemyslaw Imielski
Christian Lambertus
Johannes Nicol
Richard Spanier

Juni 2024

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4721R01380 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Abbau, Abbruch, Branchenübergreifender Austausch, Dekontaminationsverfahren, Kerntechnik, Kerntechnische Anlagen, Rückbau, Stilllegung, Trends, Trennverfahren

Kurzfassung

Nach der Einstellung des Leistungsbetriebes gehen kerntechnische Anlagen in ihre letzte Phase – die Stilllegung – über, die mit dem Erreichen des Stilllegungsziels – in Deutschland ist dies oftmals die „Grüne Wiese“ oder eine industrielle Nachnutzung – endet. Eine erfolgreiche Stilllegung ist das Ergebnis vieler, einzelner (Abbau-)Maßnahmen, bei denen das unter den gegebenen Randbedingungen geeignetste technische Verfahren zunächst ausgewählt und anschließend erfolgreich angewendet wird. Zu den wichtigsten technischen Aufgaben in der Stilllegung gehören u. a. das Trennen, das Dekontaminieren und der Abbruch. Für diese Aufgaben existieren industriebewährte technische Verfahren, mit denen nachweislich eine sichere Stilllegung kerntechnischer Anlagen nach deren Betriebsende gewährleistet werden kann.

In diesem Bericht werden zunächst allgemeine Informationen zu Trenn- und Dekontaminationsaufgaben gegeben und regulatorische Aspekte, wie sie sich aus dem nationalen und internationalen Regelwerk ergeben, beschrieben. Ein wesentlicher Aspekt dieses Berichts betrifft die Diskussion etablierter Trenn- und Dekontaminationsverfahren, zu denen im Falle des Trennens beispielsweise das Brennschneiden und das Seilschleifen gehören. Hierbei werden auch Kriterien für die fallbezogene Verfahrensauswahl aufgezeigt und anhand von Anwendungsbeispielen auf die Bedeutung individueller Verfahren für die Stilllegung hingedeutet.

Aufgrund von Sicherheitsaspekten gehört die kerntechnische Industrie zu den am stärksten regulierten Industriezweigen. Für die Nutzung innovativer Verfahren in sicherheitsrelevanten Arbeitsbereichen sind vor deren erstmaliger Verwendung aufgrund der regulatorischen Randbedingungen beispielsweise Sicherheitsnachweise zu erbringen. Insbesondere erstmalige Anwendungen neuer Verfahren sind mit einem entsprechenden Mehraufwand verbunden, was in manchen Fällen als Hürde interpretiert werden kann. Trotzdem finden sich auch für die deutschen Stilllegungslandschaft Beispiele für Innovationen, die zum Teil über das Förderkonzept FORKA finanzielle Unterstützung erfahren /BMBF 23/. Einige solcher innovativen Trenn- und Dekontaminationsverfahren werden in dem vorliegenden Bericht vorgestellt. Zudem gibt es industrieübergreifende Entwicklungen, die auch in der Stilllegung Verwendung finden. In diesem Bericht werden solche innovativen Entwicklungen skizziert und ihre Anwendung – insbesondere vor dem kerntechnischen Hintergrund – diskutiert.

In einigen Ländern existieren Netzwerke und Förderstrukturen, die einen branchenübergreifenden Austausch fördern, beispielsweise zur Unterstützung bei der Überführung neuer technischer Verfahren in andere Industriezweige. Ein Beispiel für ein solches Netzwerk mit Blick auf die Stilllegung ist das Förderprogramm *Gamechangers* in Großbritannien. In diesem Bericht werden Aspekte des industrieübergreifenden Austauschs als unterstützende Maßnahme bei der Überführung innovativer Verfahren in die kerntechnische Stilllegungslandschaft aufgegriffen und aus einer innerdeutschen Perspektive diskutiert.

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis eines Eigenforschungsvorhaben, das durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) finanziell unterstützt wurde (Forschungskennzahl 4721R01380).

Abstract

After the termination of power operation, nuclear facilities enter their decommissioning phase - which ends with reaching the decommissioning target - in Germany this is usually the so-called greenfield site. Successful decommissioning is the result of many individual dismantling measures in which the most suitable technical method under the given boundary conditions is first selected and then applied. The most important technical tasks include separation, decontamination, and demolition. Industry-proven technical processes exist for these tasks, which allow to ensure the safe decommissioning of nuclear facilities after their end of operation.

This report provides, amongst others, general information on separation and decontamination tasks and describes regulatory aspects as they result from national and international regulations. An essential aspect of this report concerns the description and discussion of established separation and decontamination procedures, which in the case of separation include, for example, flame cutting and wire sawing. Criteria for case-specific process selection are also shown and the importance of individual processes for decommissioning is pointed out based on application examples.

Due to safety aspects, the nuclear industry is one of the most heavily regulated industries. Before innovative processes can be used in safety-relevant areas of work, for example, safety certificates must be provided before they can be used for the first time due to the regulatory framework conditions. In particular, first-time applications of new processes are associated with corresponding additional efforts, which can be interpreted as a hurdle in some cases. Nevertheless, there are also examples of innovations in the German decommissioning landscape, some of which have received or are receiving financial support via the FORKA funding programme /BMBF 23/. Some of these innovative separation and decontamination processes are presented in this report. In addition, there are cross-industry developments that are also used in decommissioning. This report outlines such innovative developments and discusses their application - particularly against the background of nuclear technology.

In some countries, networks and funding structures exist that promote cross-industry exchange, for example to support the transfer of new technical processes to other industries. One example of such a network with a focus on decommissioning is the Gamechangers funding programme in

the UK. This report addresses and discusses aspects of cross-industry exchange in Germany with a view to transferring innovative processes to the nuclear decommissioning landscape.

This report is the result of a research project funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMUV) (research code 4721R01380).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Trennmaßnahmen in der Stilllegung.....	1
1.2	Dekontaminationsmaßnahmen in der Stilllegung.....	2
1.3	Manuelle und fernhantierte Nutzung von Trenn- und Dekontaminationsverfahren.....	4
1.4	Strukturierung des Berichtes	5
2	Nationales und internationales Regelwerk mit Bezug zu Trennungs- und Dekontaminationsmaßnahmen unter Berücksichtigung innovativer Verfahren	7
2.1	Internationales Regelwerk	7
2.2	Nationales Regelwerk	10
2.3	Zusammenfassung.....	11
3	Zusammenstellung und Bewertung etablierter Trenn- und Dekontaminationsverfahren für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen.....	13
3.1	Auswahlkriterien für Trenn- und Dekontaminationsverfahren	14
3.2	Trennverfahren.....	18
3.2.1	Beschreibung etablierter Verfahren	18
3.2.1.1	Thermische Trennverfahren	20
3.2.1.1.1	Autogenes Brennschneiden	20
3.2.1.1.2	Pulverbrennschneiden.....	25
3.2.1.1.3	Sauerstofflanze	26
3.2.1.1.4	Laserstrahlschneiden	29
3.2.1.1.5	Plasma-Schmelzschneiden	36
3.2.1.1.6	Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung.....	40
3.2.1.1.7	Funkenerosive Bearbeitungsverfahren	50
3.2.1.2	Mechanische Trennverfahren	53

3.2.1.2.1	Sägeverfahren (Band-, Stich-, Kreis-, Wand-, Säbel- und Bügelsägen)....	53
3.2.1.2.2	Fräsen (Stirnfräsen, Walzenfräsen).....	60
3.2.1.2.3	Scherverfahren (Trennscheren, Rohrscheren und Nibbeln).....	63
3.2.1.2.4	Schleifen (Trennschleifen und Diamantseilschleifen).....	66
3.2.1.2.5	Wasserstrahlschneiden	71
3.2.2	Qualitative Einschätzung etablierte Trennverfahren	76
3.2.2.1	Auswahl von Einschätzungsfaktoren	77
3.2.2.2	Grundsätzlicher Vergleich thermischer und mechanischer Trenn- verfahren.....	82
3.2.2.3	Darstellung und Diskussion der Bewertungsmatrix.....	85
3.3	Dekontaminationsverfahren.....	91
3.3.1	Wirkweise chemischer Verfahren für die Dekontamination von Metallen ..	93
3.3.2	Beschreibung etablierter Verfahren	97
3.3.2.1	Mehrstufige chemische Dekontaminationsverfahren	100
3.3.2.1.1	HP/CORD UV und HP/CORD D UV	102
3.3.2.1.2	ASDOC_D und ASDOC_D-MOD Verfahren	106
3.3.2.1.3	CAN-DEREM	110
3.3.2.1.4	LOMI	112
3.3.2.1.5	DFD.....	113
3.3.2.2	Beschreibung einstufiger chemische Dekontaminationsverfahren	116
3.3.2.2.1	Verfahren mit Ce ⁴⁺ (SODP, REDOX, MEDOC)	117
3.3.2.2.2	DECOHA-Verfahren	121
3.3.2.2.3	Salpeter- / Flusssäure-Verfahren.....	122
3.3.2.3	Elektrochemische Dekontaminationsverfahren.....	124
3.3.2.4	Verfahren mit Dekontaminationsschäumen und -gelen	128
3.3.2.5	Mechanische Dekontaminationsverfahren.....	129
3.3.2.5.1	Konventionelle Reinigungsverfahren (Abstauben, Absaugen, Abwischen, Abscheuern, Wasserspülen, Dampfreinigen).....	129
3.3.2.5.2	Schleifen, Polieren und Bürsten	130
3.3.2.5.3	Druckluftstrahlverfahren	131

3.3.2.5.4	Wasserstrahlverfahren	134
3.3.2.5.5	Abrasivestrahlverfahren	137
3.3.2.5.6	Fräsverfahren.....	139
3.3.2.5.7	Nadelverfahren.....	140
3.3.2.5.8	Ultraschallbad	141
3.3.2.6	Dekontamination durch Einschmelzen.....	142
3.3.3	Qualitative Einschätzung etablierter Dekontaminationsverfahren	143
3.3.3.1	Grundsätzliche Gegenüberstellung chemischer und mechanischer Dekontaminationsverfahren.....	144
3.3.3.2	Auswahl von Einschätzungsfaktoren	147
3.3.3.3	Darstellung und Diskussion der Einschätzungsfaktoren	151
3.4	Abbruchverfahren und Hilfsmittel bei der Anwendung von Trenn- und Dekontaminationsverfahren.....	160
3.4.1	Abbruchverfahren.....	160
3.4.1.1	Sprengen	160
3.4.1.2	Sequenzielles Kollabieren	164
3.4.1.3	Weitere mechanische Abbruchverfahren.....	165
3.4.2	Brecheranlagen für die Vor-Ort Zerkleinerung	166
3.4.3	Mobile Einhausungen.....	168
3.4.4	Mobile Filter- und Lüftungsanlagen	168
3.5	Zusammenfassung.....	169
4	Ausgewählte branchenübergreifende Entwicklung und ihre Berücksichtigung im Bereich der Stilllegung.....	173
4.1	Robotik und Automatisierung	173
4.1.1	Gestuftes Vorgehen zur Beschreibung des Automatisierungsgrades	175
4.1.2	Robotik-Anwendungen in der Stilllegung	177
4.1.2.1	Roboterassistierte Bearbeitung von Baugruppen (ROBBE)	180
4.1.2.2	Abbruchroboter in der Stilllegung	181

4.1.2.3	Kompetenzzentrum Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen (ROBDEKON).....	182
4.1.2.4	Automatisierte Zerlegung mittels Unterwasser-Robotertechnik.....	183
4.1.3	Zusammenfassung.....	184
4.2	Bauwerksdatenmodellierung	184
4.2.1	Anwendung in der Kerntechnik.....	185
4.3	Maschinelles Lernen und Aspekte Künstlicher Intelligenz.....	187
4.3.1	Anwendung des Maschinellen Lernens in der Kerntechnik.....	189
4.4	Digitale Realitäten – Virtuelle Realität und Erweiterte Realität.....	190
4.4.1	Anwendung Digitaler Realitäten in der Kerntechnik.....	192
4.5	Zusammenfassung.....	193
5	Betrachtung von Trenn- und Dekontaminationstechniken im Entwicklungs- bzw. Prototypstadium mit perspektivischem Nutzen für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen.....	195
5.1	Innovationen im Bereich der Trennverfahren.....	196
5.1.1	Laserstrahlschneiden	196
5.1.1.1	LD-SAFE Konsortium	196
5.1.1.2	Unterwasserlaserstrahlschneiden.....	197
5.1.1.3	Fernbedientes, robotergestütztes Laserstrahlschneiden.....	199
5.1.2	Wasserstrahlschneiden	200
5.1.3	Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schleifen (CAMG)	203
5.1.4	Rohrinnentrenner	205
5.1.5	Verbesserungen für das Seilschleifen	207
5.2	Innovationen im Bereich der Dekontaminationsverfahren.....	208
5.2.1	Laserdekontaminationsverfahren	209
5.2.2	Elektrokinetisches Dekontaminationsverfahren	211
5.2.3	Automatisierte Dekontaminationskabine AuDeKa.....	214
5.2.4	Automatisierte Wandflächendekontamination.....	215

5.2.5	Trocken-Mechanische Dekontamination von Innenkanten, Ecken und Störstellen mittels hand- sowie ferngesteuerten Geräten.....	216
5.2.6	Dekontamination von radioaktiv kontaminiertem Beton mittels elektrohydraulischer Fragmentierung	217
5.2.7	Dekontamination von borsäurehaltigem Verdampferkonzentrat.....	219
5.2.8	Biodekontamination.....	220
5.2.9	Weiterentwicklung bei elektrochemischen Dekontaminationsverfahren..	221
5.3	Qualitative Einschätzung innovativer Verfahren	222
5.3.1	Auswahl qualitativer Faktoren für die Einschätzung.....	222
5.3.2	Darstellung der Einschätzungsmatrix und Diskussion der Verfahren.....	226
5.4	Zusammenfassung.....	228
6	Transfer von Wissen und rückbaurelevanter Verfahren aus anderen Industriezweigen in die kerntechnische Industrie	231
6.1	Zusammenstellung wesentlicher Anforderungen im Bereich der Stilllegung kerntechnischer Anlagen	233
6.2	Industriezweige mit partiellen Übereinstimmungen hinsichtlich des Anforderungsprofils für den Rückbau	235
6.3	Industrieübergreifender Austausch.....	236
6.4	Fallbeispiele für einen Wissens- und Technologietransfer in die kerntechnische Industrie innerhalb Deutschlands.....	238
6.4.1	Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und Dienstleistern bzw. Technologieanbietern aus anderen Industriezweigen	238
6.4.2	Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und Dienstleistern bzw. Technologieanbietern mit Bezug zur Kerntechnik.....	241
6.4.3	Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und F+E-Einrichtungen (z. B. Universitäten).....	242
6.4.4	Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und Betreibern anderer Industriezweige	243
6.5	Zusammenfassung.....	244
7	Zusammenfassung.....	247

8	Ausblick	251
	Literaturverzeichnis	255
	Abkürzungsverzeichnis	277
	Abbildungsverzeichnis	281
	Tabellenverzeichnis	285
	Stichwortverzeichnis.....	287
	Glossar	291
A	Anhang: Wesentliche Definitionen der Norm DIN 8580 und verwandter Normen im Kontext der Trennverfahren	293

1 Einleitung

Im Verlauf der Stilllegung einer kerntechnischen Anlage müssen bis zum Erreichen des Stilllegungsziels – in Deutschland ist dies oft die „Grüne Wiese“ oder eine industrielle Nachnutzung – eine Vielzahl an Maßnahmen durchgeführt werden. Hierzu zählen insbesondere die praktischen Maßnahmen des Abbaus im weiteren Sinne, wozu unter anderem Demontagemaßnahmen, Trennmaßnahmen¹ und Dekontaminationsmaßnahmen gehören. Die hier genutzte Definition für den Begriff des *Abbaus* stützt sich auf den Stilllegungsleitfaden /BMU 21/ und umfasst – im Kontext der Stilllegung kerntechnischer Anlagen – die Demontage, die (Nach-)Zerlegung sowie ggfs. eine Nachbearbeitung (z. B. Dekontamination) und endet mit der Übergabe der Reststoffe/Rückstände an eine interne oder externe Einheit zum Zwecke der Lagerung oder der Entsorgung. Die in der Stilllegung von Kernkraftwerken (KKW) zu bewegenden Massen sind enorm, so entfallen allein etwa 200.000 Mg je KKW auf Kontrollbereiche. Typischerweise sind von diesen 200.000 Mg – auch durch den Erfolg von Dekontaminationsmaßnahmen – abschließend noch etwa 4.000 Mg (dies entspricht einem Massenanteil von etwa 2 %) als radioaktiver Abfall zu entsorgen /ESK 22/.

Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf technischen Verfahren, die für das Trennen und für das Dekontaminieren ausgelegt sind. Hierzu werden zunächst etablierte Verfahren und deren praktische Anwendung beschrieben bevor im Anschluss (vielversprechende) innovative Verfahren vorgestellt werden. Im Kontext innovativer Verfahren wird zudem der branchenübergreifende Austausch eruiert. Grundsätzlich fokussiert sich der Bericht auf das nationale Umfeld, internationale Aspekte werden, sofern Sie dem Verständnis dienen (z. B. Anwendungsbeispiele), aufgeführt.

1.1 Trennmaßnahmen in der Stilllegung

Trennmaßnahmen (siehe auch Anhang A) sind in vielen Fällen notwendig, um z. B. die Nachbearbeitung und Nachbehandlung (hierunter fallen auch Dekontaminationsmaßnahmen) zu

¹ Im umgangssprachlichen bzw. alltäglichen Gebrauch wird häufig der Begriff „Zerlegen“ genutzt, um Maßnahmen zu beschreiben, bei denen ein Materialverbund aufgebrochen wird bzw. in seine Bestandteile aufgelöst wird. Im Kontext der DIN 8580 entspricht dies dem Trennen, zu dem neben dem Zerlegen aber auch andere Verfahren wie das Zerteilen, das Spanen und das Abtragen gehören. Sofern möglich wird in diesem Bericht im Sinne der sauberen Abgrenzung überwiegend von den Vorgaben und Definition technischer Dokumente (wie z. B. etablierte Normen) Gebrauch gemacht.

vereinfachen oder um die Anforderungen im Kontext der Entsorgung aber auch der Rezyklierung zu erfüllen. Für Entsorgungszwecke ist es beispielsweise oft wünschenswert, dass die Materialien eines aus mehreren Materialien bestehenden Objektes sauber voneinander getrennt werden. Eine weitere Motivation für Trennmaßnahmen stellt die Volumenreduzierung, insbesondere hinsichtlich endzulagernder radioaktive Abfälle, dar. Als ein Beispiel dient die passende Zerlegung und möglichst effektive Volumenausnutzung in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Lager- und Entsorgungsbehälter.

Trennmaßnahmen können entweder in-situ (d. h. in Einbaulage) oder nach vorangegangener Demontage (d. h. nach Entfernen aus der Einbaulage) der Komponente an speziell ausgerüsteten (meist ortsnahen) Zerlegeplätzen oder Zerlegehallen (z. B. die derzeit in Errichtung befindliche Zerlegehalle der EWN am Standort Greifswald /EWN 24/) erfolgen. Grundsätzlich ist das Spektrum der dabei zu berücksichtigenden Materialien sehr breit und umfasst – neben einer Vielzahl an Stahlarten, Gusseisen, Aluminium – auch Beton unterschiedlichster Qualität und Auslegung, Kunststoffe und weitere Materialien. Zudem liegen die zu bearbeitenden Werkstücke in unterschiedlichsten Geometrien mit verschiedenen Materialdicken vor. Sowohl das breite Materialspektrum als auch die zu berücksichtigenden Randbedingungen (z. B. Platzbedarf, notwendige Sicherheitsvorkehrungen und zeitliche Aspekte) sind wesentlichen Gründe, weswegen in der Praxis kein universell gleichermaßen gut funktionierendes Trennverfahren existiert und sich eine Vielzahl an Verfahren für spezifische Szenarien etabliert haben. Die Auswahl eines Verfahrens für eine konkret durchzuführende Trennmaßnahme wird unter Berücksichtigung mehrerer Faktoren, bei denen neben technischen auch betriebliche Kriterien und Strahlenschutzaspekte berücksichtigt werden müssen, in einem entsprechenden Auswahlverfahren getroffen.

1.2 Dekontaminationsmaßnahmen in der Stilllegung

In der Betriebsphase einer kerntechnischen Anlage können durch individuelle Tätigkeiten und länger andauernde Prozesse (aber auch durch ungeplante Ereignisse, unvorhergesehene Betriebszustände oder auch durch Störfälle) Anlagenteile (z. B. Rohrleitungen und Lagerbehälter) oder Strukturen (z. B. Gebäudeflächen oder Bodenflächen) kontaminiert bzw. aktiviert werden. Insbesondere durch flüssigkeitsführende Systeme können an Partikeln anhaftende Kontaminationen auch größere Strecken zurücklegen, bevor sie sich im Anschluss dort an Oberflächen ablagern. Im kerntechnischen Umfeld beschreibt die *Dekontamination* allgemein die Entfernung solcher radioaktiven Kontaminationen. Diese liegen in der Regel auf der Oberfläche bzw. in

oberflächennahen Schichten vor. Grundsätzlich gibt es zwei übergeordnete Motivationen zur Durchführung von Dekontaminationsmaßnahmen:

- Radiologischer Schutz der Arbeitskräfte, der Allgemeinbevölkerung und der Umwelt
Durch die Dekontamination kann die Dosis in Arbeitsbereichen derart reduziert werden, dass die mit den (manuellen) Tätigkeiten verbundene Exposition von Personen verringert werden kann bzw. solche Tätigkeiten erst ermöglicht werden. Als beispielhaft hierfür sind routinemäßige und die im Zuge von Revisionsmaßnahmen stattfindende Systemdekontamination zu nennen. Zudem können Dekontaminationsmaßnahmen die Freisetzungswahrscheinlichkeit, das Risiko von Kontaminationsverschleppungen aber auch die Wahrscheinlichkeit für die Aufnahme/Inhalation radioaktiver Stoffe deutlich reduzieren.
- Gewichts- und volumenbezogene Reduzierung radioaktiver Abfälle
Durch geeignete Dekontaminationsmaßnahmen ist es möglich, anhaftende/eingedrungene radioaktive Verunreinigungen vom Werkstück oder betroffenen Strukturen zu entfernen. Im Idealfall kann das bearbeitete Werkstück bzw. die Struktur dem Freigabepfad zugeführt werden, so dass diese entweder weitergenutzt oder konventionell entsorgt werden können. Dies kann das Gewicht und das Volumen der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle signifikant reduzieren, was zum einen die Entsorgungskosten deutlich reduziert und zum anderen die beschränkten Entsorgungskapazitäten für radioaktive Abfälle nicht unnötig belastet². Zudem kann je nach Kontamination die Wahrscheinlichkeit für eine Rezyklierung oder einer weiteren Verwendung der zu dekontaminierenden Komponenten oder Strukturen erhöht werden.

Dekontaminationsmaßnahmen mit dem Ziel des radiologischen Schutzes werden insbesondere während des Betriebs und in frühen Stilllegungsphasen/Nachbetriebsphasen genutzt, z. B. im Rahmen vollständiger Systemdekontaminationen. Die dabei eingesetzten Verfahren sind verhältnismäßig materialschonend, so dass die Materialintegrität durch diese Maßnahmen nicht wesentlich beeinflusst wird (weiche Dekontaminationsverfahren). Maßnahmen im Kontext der Abfallbearbeitung und/oder Freigabe werden hingegen vor allem in späteren Stilllegungsphasen eingesetzt. Da betroffene Anlagenteile in der Regel bereits demontiert und vorzerlegt wurden bzw. die

² Die Einlagerungskapazität für das derzeit noch in der Errichtung befindliche Endlager Konrad für schwach- und mittelradioaktive Abfälle beträgt laut Genehmigung 303.000 m³ mit einer Gesamtaktivität von 5E18 Bq.

Wiederverwendung im Regelfall irrelevant ist, können hierzu auch aggressivere Verfahren eingesetzt werden (harte Dekontaminationsverfahren).

1.3 Manuelle und fernhantierte Nutzung von Trenn- und Dekontaminationsverfahren

Im kerntechnischen Rückbau erfolgt die Anwendung der Trenn- und Dekontaminationsverfahren durch das Fachpersonal entweder manuell oder – sofern es das eingesetzte Verfahren und die Werkzeuge erlauben – fernhantiert, grundsätzlich ist aber auch eine (teil-)automatisierte Nutzung möglich³. Eine Fernhantierung kann auf unterschiedliche Weisen umgesetzt werden:

- Bei der Fernhantierung mit Verlängerungswerkzeugen werden zur manuellen Bedienung der Geräte/Werkzeuge zusätzliche Verlängerungswerkzeuge genutzt, um den Abstand (z. B. aus radiologischen Gründen) zwischen dem Personal und dem zu bearbeitenden Werkstück zu vergrößern.
- Bei fernbedienter Anwendung werden die Geräte/Werkzeuge indirekt über mechanische oder elektronische Schnittstellen gesteuert. Das Personal hat direkten Sichtkontakt zu den Werkzeugen und kann so den bestimmungsmäßigen Ablauf sicherstellen.
- Bei der Teleoperation werden die Geräte/Werkzeuge indirekt über mechanische oder elektronische Schnittstellen gesteuert, wobei das Personal die Geräte/Werkzeuge unter Einbeziehung von Kameras und Sensoren aus größerer Entfernung (z. B. von einem Leitstand), d. h. ohne direkten Sichtkontakt, bedient. Die Bedienung ist (z. B. aufgrund einer schwer zu vermittelnden Tiefeninformationen) deutlich anspruchsvoller. Unter Wasser durchgeführte Trennmaßnahmen werden in der Regel ferngesteuert durchgeführt, so dass eine prozessbedingte Eintrübung des Wassers häufig ein Problem darstellt.
- Bei automatisierten Anwendungen werden Aufgaben in Teilen oder im Ganzen auch ohne Zutun des Personals durchgeführt. Das Spektrum der automatisch übernommenen Arbeiten ist sehr breit und reicht von einer Bedienung aus der Ferne bis zu einer autonomen Arbeitsweise. Aus praktischen Gründen wird oft eine mehrstufige Einteilung vorgenommen, weitere Informationen hierzu finden sich im Abschnitt 4.1.

³ Auch für aus der Ferne zu bedienende Geräte/Werkzeuge oder automatisierte Arbeitsprozesse sind in der Regel Rüstzeiten und Zeitfenster für Auf- und Abbau in der Nähe des zu bearbeitenden Werkstücks einzuplanen.

Für die einzelnen technischen Verfahren ergibt sich eine unterschiedliche gute Eignung für eine fernhantierte Nutzung, zum Teil sind besondere Vorkehrungen zu treffen. Ein wesentliches Augenmerk liegt hier auf Strukturen zum Auffangen von Prozesskräften, die im Falle der Trennverfahren beispielsweise für die mechanischen Verfahren im Vergleich zu den thermischen Verfahren aufgrund des direkten Kontakts zwischen Werkzeug und Werkstück in der Regel deutlich größer sind.

1.4 Strukturierung des Berichtes

Im folgenden Kapitel 2 werden wesentliche Aussagen des internationalen und nationalen Regelwerks zum Einsatz stilllegungsgerichteter Trenn- und Dekontaminationsverfahren und zum Umgang mit innovativen Verfahren zusammengefasst. Das Kapitel 3 setzt sich mit etablierten Trenn-, Dekontaminations- und Abbruchverfahren sowie technischen Hilfsmitteln auseinander. In Kapitel 4 werden ausgewählte branchenübergreifende Trends (z. B. Nutzen automatisierter Systeme oder virtuell/augmentierte Realität) aufgegriffen und deren Auswirkungen und Bedeutung für die Stilllegungsindustrie erläutert. Das Kapitel 5 wirft einen Blick in die derzeitige Forschung und Entwicklung und beschäftigt sich im Kern mit innovativen Trenn- und Dekontaminationsverfahren. Im Kapitel 6 wird der branchenübergreifende Austausch beleuchtet, bevor der Bericht mit einer Zusammenfassung (Kapitel 7) und einem Ausblick (Kapitel 8) endet.

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis eines Eigenforschungsvorhaben, das mit Mitteln des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter der Forschungskennzahl 4721R01380 durchgeführt wurde.

2 Nationales und internationales Regelwerk mit Bezug zu Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen unter Berücksichtigung innovativer Verfahren

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen und auf technische Verfahren bezogene Aussagen von Dokumenten des internationalen Regelwerks (Abschnitt 2.1) und des nationalen Regelwerks (Abschnitt 2.2) aufgeführt und die Kernaussagen zusammengefasst (Abschnitt 2.3).

2.1 Internationales Regelwerk

Im Kontext des internationalen Regelwerks sind insbesondere die *IAEA Safety Standards* hervorzuheben, in denen die grundlegenden Prinzipien, Anforderungen und Empfehlungen zur Wahrung der nuklearen Sicherheit aufgeführt werden.

In den *General Safety Requirements Part 6* der Internationalen Atomenergie-Organisation (englisch: *International Atomic Energy Agency, IAEA*) werden allgemeine Sicherheitsanforderungen im Kontext der Stilllegung dargelegt /IAEA 14/. Hier wird für die vorläufige Stilllegungsplanung (d. h. eine Stilllegungsplanung, die während der Betriebsphase oder der Errichtung der Anlage erstellt wird) festgehalten⁴, dass der Genehmigungsinhaber bei beabsichtigter Nutzung neuer Technologien und Konzepte diese derart evaluieren und erproben soll, dass diese für die sichere Erfüllung der geplanten Maßnahmen genutzt werden können. Auf die Art und Weise der notwendigen Nachweisführung wird nicht im Detail eingegangen.

Hinsichtlich der Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen wird in der Anforderung 12 festgehalten, dass für die Auswahl der eingesetzten Techniken mehrere Kriterien berücksichtigt und erfüllt werden sollen. Zu diesen gehören:

- Optimierung des Schutzes und der Sicherheit
- Sicherstellung des Schutzes der Bevölkerung und der Umwelt

⁴ Im originalen Wortlaut: „7.12. *If the final decommissioning plan or updates to it include new technologies and concepts for decommissioning actions, the licensee shall demonstrate prior to their use that such methods are safe and can effectively achieve the desired result.*“ /IAEA 14/

- Minimierung der erzeugten Abfallmengen sowie Minimierung möglicher negativer Auswirkungen auf die Lagerung und Entsorgung (insbesondere radioaktiver) Abfälle

Zudem sollen die sicherheitsrelevanten Auswirkungen der durchgeführten Maßnahmen erfasst und derart berücksichtigt werden, dass daraus resultierende Gefahren erkannt, vermindert und ggfs. vermieden werden⁵.

Im *Specific Safety Guide No. SSG-47* der IAEA zur Stilllegung von Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren und weiteren Einrichtungen des nuklearen Brennstoffkreislaufes werden im dortigen Kapitel 8 weitere Anforderungen für die Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen aufgeführt /IAEA 18/. Hier wird in der Anforderung 8.9⁶ zunächst festgehalten, dass bereits viele Techniken und Methoden für die Stilllegung zur Verfügung stünden und dass es grundsätzlich sinnvoll sei, auf bewährte und kommerziell zur Verfügung stehende Verfahren mit einem nachgewiesenen Reifegrad zurückzugreifen. Die für eine Maßnahme grundsätzlich zur Verfügung stehenden Verfahren sollen vor Maßnahmendurchführung dahingehend evaluiert werden, dass die Eignung des Verfahrens für die konkrete Maßnahme nachweislich gegeben ist und die Anwendung mit dem Stilllegungsplan übereinstimmt. Des Weiteren werden einige Faktoren aufgeführt, die die Auswahl des einzusetzenden Verfahrens im Einzelfall beeinflussen können (z. B. Auswirkungen auf Arbeitskräfte und Umwelt, Kosten-Nutzen-Betrachtung oder Auswirkungen auf benachbarte Systeme, Strukturen und Tätigkeiten).

⁵ Im originalen Wortlaut: „8.3. *In accordance with the final decommissioning plan, decommissioning techniques shall be selected such that protection and safety is optimized, protection of the environment is ensured, the generation of waste is minimized and any potential negative impact on the storage and disposal of waste is minimized (e.g. by avoiding the use of decontamination techniques that may result in increased mobility of the radionuclides in the waste). As decommissioning actions progress, such as decontamination, cutting and handling of large components, new hazards may arise. The impact of these actions on safety shall be assessed and managed so that the potential consequences of such new hazards are prevented or are detected and mitigated.*“ /IAEA 14/

⁶ Im originalen Wortlaut: „8.9. *There are many techniques and methods available for decommissioning. It is preferable to select proven techniques that are commercially available and technically mature. The available techniques to be deployed to carry out the decommissioning actions should be evaluated to confirm their feasibility and suitability, in accordance with the final decommissioning plan. The following factors might influence the choice of the decommissioning techniques to be deployed: [...]*“ /IAEA 18/

In der Anforderung 8.10⁷ wird zunächst festgestellt, dass in Abhängigkeit der Maßnahme spezielle Werkzeuge und Ausstattungen benötigt werden oder etablierte Werkzeuge unter besonderen Randbedingungen eingesetzt werden sollen. Für solche Fälle sind die Werkzeuge und Geräte vorab unter realitätsnahen Bedingungen zu testen bzw. zu erproben, insbesondere um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten und um im Wartungsfall entsprechende Arbeiten nachweislich durchführen zu können. Hierzu können z. B. computer-gestützte Simulationen oder realitätsnahe Testumgebungen (*mock ups*) genutzt werden, um Verfahren auszuwählen, Optionen zu evaluieren und Designs ggfs. anzupassen und um das Personal vor Durchführung der Maßnahme zu schulen.

Die Anforderung 8.12⁸ richtet sich primär an Dekontaminationsmaßnahmen und stellt zunächst fest, dass sich solche Maßnahmen sowohl auf innere als auch auf äußere Oberflächen erstrecken können und dass diese grundsätzlich vor, während oder nach der Demontage von Anlagen/Anlagenteilen durchgeführt werden können. Vor Auswahl eines Verfahrens für eine bestimmte Dekontaminationsmaßnahme sollen mögliche Verfahren evaluiert und hinsichtlich ihrer Effektivität, der resultierenden Dosisreduzierung sowie Auswirkungen auf die Abfallcharakteristiken bewertet werden. Zudem soll nachgewiesen werden, dass der Dekontaminationsprozess bzw. die Produkte des Prozesses mit den Systemen für Abfallbehandlung, Zwischenlagerung und Entsorgung kompatibel sind.

⁷ Im originalen Wortlaut: „8.10. *In some cases, special tools and equipment might be necessary or standard tools and equipment might need to be used in special conditions. Equipment should be tested in simulated conditions before its use, from the points of view of both its safe operability and its maintainability. Benefits can be derived from computer-based simulations, providing the necessary benchmarking has been performed, as well as from physical mock-ups, in order to select decommissioning techniques, to evaluate options, to aid in the design and to train workers.*“ IAEA 18/

⁸ Im originalen Wortlaut: „8.12. *Decommissioning of a facility might be aided in certain instances by partial or total decontamination of the equipment and SSCs to be dismantled. Decontamination can be applied to internal or external surfaces and covers a broad range of actions directed at the removal or reduction of radioactive contamination in or on equipment and SSCs of the facility. Given this, the process of decontamination associated with the decommissioning actions can be conducted before, during or after dismantling. Before any decontamination technique is selected, an evaluation of its effectiveness, of the potential for reducing total exposure, and of the benefit in terms of generation of waste and effluents should be performed. The decontamination process should also be evaluated to ensure it is compatible with waste processing systems as well as storage and/or disposal options. [...]*“ IAEA 18/

2.2 Nationales Regelwerk

Das allgemein verbindliche Regelwerk (das Grundgesetz, das Atomgesetz, das Strahlenschutzgesetz und das Standortauswahlgesetz) gemäß der kerntechnischen Regelwerkspyramide – siehe Abb. 2.1 – trifft keine wesentlichen Aussagen, die die technischen Verfahren für Stilllegungsmaßnahmen betreffen. Diese lassen sich erst auf der Ebene des untergesetzlichen Regelwerks finden.

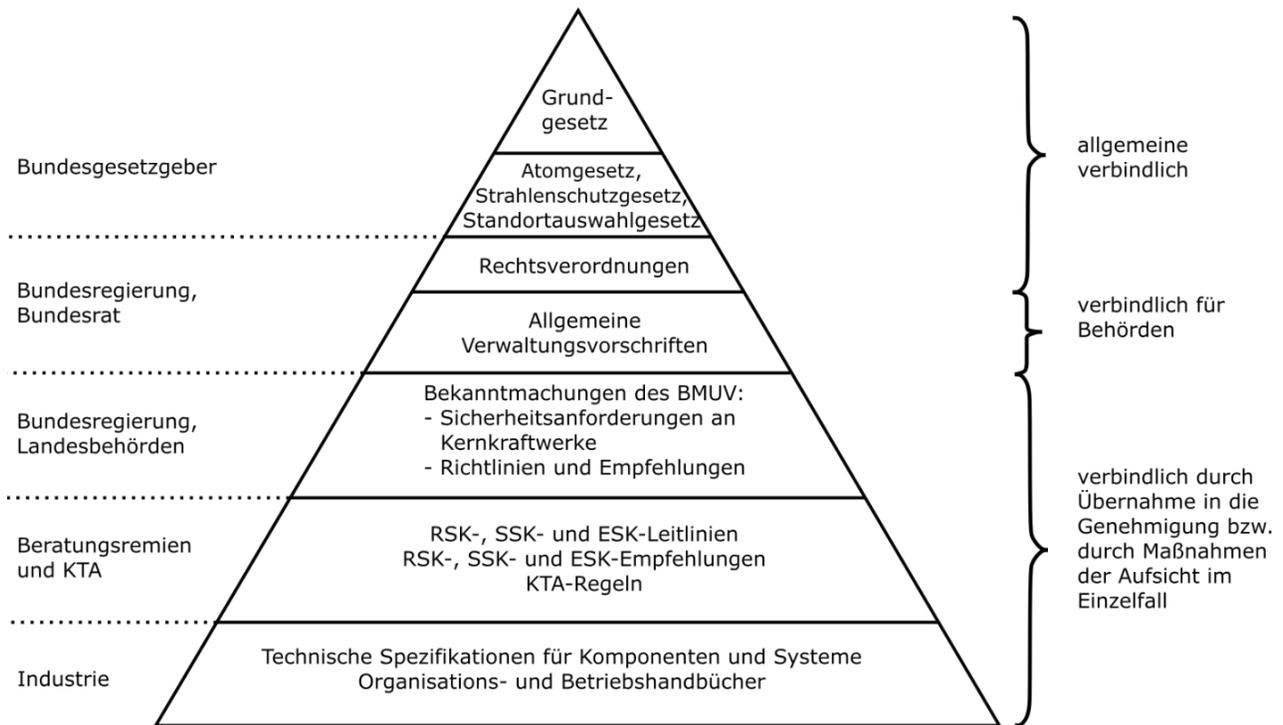


Abb. 2.1 Das deutsche kerntechnische Regelwerk als Pyramide

Die *Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Einrichtungen* der Entsorgungskommission (ESK) /ESK 20/ (im Folgenden: Stilllegungsleitlinien) fordern bereits für das Abbaukonzept eine adäquate Auseinandersetzung mit den Abbau-, Zerlege- und Dekontaminationstechniken. Dort wird zudem festgehalten, dass für den Rückbau grundsätzlich auf bewährte Abbau-, Zerlege- und Dekontaminationstechniken zurückgegriffen werden sollte, da diese u. a. bereits weitestgehend auf eine Minimierung der Sekundärabfälle und der Exposition optimiert seien. Vor dem praktischen Einsatz neuer Techniken sind diese zu erproben und zu qualifizieren, beispielsweise im Rahmen von Kaltversuchen.

Der *Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes* (im Folgenden: Stilllegungsleitfaden) trifft im Kapitel 3.6 Aussagen zur Festlegung von Dekontaminations- und Demontagetechniken /BMU 21/.

Für die Auswahl der einzusetzenden Dekontaminationstechniken sind gemäß des Stilllegungsleitfadens im Wesentlichen Aspekte des Strahlenschutzes und Aspekte bezüglich der Verwertung von radioaktiven Stoffen zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Demontagetechniken unterscheidet der Stilllegungsleitfaden zwischen den etablierten konventionellen Techniken und fernbedienten Techniken mit den jeweils dazugehörigen Strahlen- und Arbeitsschutzmaßnahmen. Bei der Auswahl sind die technologische Aufgabe, die Strahlenschutzbedingungen, die vorgesehene Weiterbehandlung und Entsorgung sowie Sekundärabfälle zu berücksichtigen. Der Stilllegungsleitfaden stellt fest, dass eine große Zahl erprobter und bewährter Techniken für die Dekontamination und die Demontage zur Verfügung stehen. Für diese seien die Betriebssicherheit, das Emissionsverhalten, notwendige Maßnahmen zum radiologischen Arbeitsschutz und die Kosten bekannt. Von diesem angesammelten Wissen kann im Rahmen des Arbeitserlaubnisverfahrens Kredit genommen werden, so dass eine hinreichende sicherheitstechnische Beschreibung dieser bewährten Technik(en) und Festlegung der Randbedingungen ausreichend sind. Die Auswahl der Dekontaminations- und Demontagetechniken wird in der Detailplanung festgelegt und aufsichtlich begleitet.

Der Stilllegungsleitfaden stellt fest, dass in einigen Fällen fernbediente Demontagetechniken erforderlich sind. Sind diese nicht betriebsbewährt und/oder anlagenspezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen, müssen Nachweise (Vorprüfungen, Abnahme- und Funktionsprüfungen, wiederkehrende Prüfungen und Sicherheitsbetrachtungen) erbracht werden. Zur Optimierung können Vorversuche an Testständen gegebenenfalls sinnvoll genutzt werden.

2.3 Zusammenfassung

Die internationalen Empfehlungen der IAEA stellen grundsätzlich fest, dass sich für die Stilllegung Verfahren etabliert haben, mit denen die Stilllegung nachweislich und sicher durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund wird grundsätzlich die Empfehlung ausgesprochen auf diese etablierten Verfahren zurückzugreifen, sofern dem keine wesentlichen Gründe entgegenstehen. Neue technische Verfahren sind grundsätzlich vorab zu erproben und zu evaluieren. Vor der Durchführung von Maßnahmen ist insbesondere die Eignung der vorgesehenen Verfahren für die vorliegende Maßnahme nachzuweisen – dies gilt allerdings auch für etablierte Verfahren, je nach praktischen Erfahrungswerten kann die Prüftiefe allerdings stark variieren. Für Dekontaminationsmaßnahmen

wird explizit darauf hingewiesen, dass die bei der Anwendung entstehenden (radioaktiven) Abfälle mit den zur Verfügung stehenden Entsorgungswegen kompatibel sein müssen.

Das Regelwerk in Deutschland orientiert sich stark an diesen internationalen Vorgaben. Auch hier wird – sofern möglich – die Nutzung etablierter Verfahren empfohlen. Bei der Verwendung neuer Verfahren wird festgehalten, dass entsprechende Nachweise zu erbringen sind, mit denen nachvollziehbar belegt wird, dass das Verfahren für die sichere Durchführung der beabsichtigten Maßnahme geeignet ist. Hierzu gehören z. B. die Durchführung und Dokumentation von Kaltversuchen, Sicherheitsbetrachtungen oder Nachweise zur Bergung von Werkzeugen bei ungeplantem Werkzeugausfall. Die Art und Weise der Nachweisführung wird allerdings nicht ausgearbeitet, zudem existieren derzeit auch keinerlei etablierte Dokumente die hier als Hilfestellung dienen können.

3 Zusammenstellung und Bewertung etablierter Trenn- und Dekontaminationsverfahren für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen

In der kerntechnischen Industrie wird der konsensfähige Standpunkt vertreten, dass die Stilllegung von Leistungsreaktoren und insbesondere der Rückbau von Leichtwasserreaktoren technisch gelöst ist und sicher umgesetzt werden kann, siehe z. B. /ALT 18/. Eine besondere Bedeutung bei der Stilllegung der Leistungsreaktoren hat die Zerlegung von Einbauten des Reaktordruckbehälters (RDB-Einbauten) und des RDB selbst, da der RDB bzw. dessen Einbauten im Regelfall die mit großem Abstand am stärksten aktivierten Komponenten darstellen⁹, was in der Praxis häufig eine Fernhantierung bedingt. Das Spektrum der geometrischen Formen der RDB-Einbauten ist zudem sehr breit, so dass die Vorgehensweise bei der Materialtrennung im Allgemeinen und der Zerlegung im Speziellen detailliert geplant werden muss.

Zu Beginn dieses Kapitels werden in Abschnitt 3.1 Kriterien aufgeführt, die für eine konkret durchzuführende Trenn- oder Dekontaminationsmaßnahme bei der Verfahrensauswahl herangezogen werden können.

Im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen die für die Stilllegung etablierten Trenn- und Dekontaminationsverfahren, die in Abschnitt 3.2 und Abschnitt 3.3 beschrieben werden. Zur Darstellung wesentlicher Vor- und Nachteile wird bei Bedarf auf die Auswahlkriterien Bezug genommen, zudem werden praktische Anwendungsbeispiele referenziert.

Damit bestimmte technische Trenn- oder Dekontaminationsverfahren genutzt werden können, sind ggfs. zusätzliche Hilfsmittel notwendig, um z. B. Aktivitätsfreisetzungen oder Kontaminationsverschleppungen zu vermeiden. Für den Abbruch von (bewehrten) Betonstrukturen haben sich zudem einige Abbruchverfahren etabliert. Solche Verfahren bzw. Hilfsmittel werden im Abschnitt 3.4 näher betrachtet.

⁹ Die Betreiberin des Kernkraftwerks Brunsbüttel (DWR, Vor-Konvoi) hat durch Aktivierungsberechnungen die Gesamtaktivität des Kernkraftwerks zu ca. $5,3E16$ Bq abgeschätzt (Zeitpunkt: ein Jahr nach Ende des Leistungsbetriebes). Diese Aktivität ist fast vollumfänglich (> 99 %) in den RDB-Einbauten lokalisiert. Deutlich geringere Beiträge liefern der RDB (ca. $3,1E13$ Bq), der Biologische Schild (ca. $5,8E12$ Bq) und der Tragschild (ca. $6,9E11$ Bq) /PEL 21b/. Ein vergleichbares Bild ergibt sich für das Kernkraftwerk Krümmel (SWR), für das die Betreiberin die Gesamtaktivität zu etwa $8E15$ Bq abgeschätzt hat. Auch hier ist der Bezugszeitpunkt gegeben durch ein Jahr nach Einstellung des Leistungsbetriebes und auch hier liefen die RDB-Einbauten den mit Abstand größten Beitrag (> 99%). Die für den RDB berechnete Aktivität beläuft sich auf $8,5E12$ Bq /KKK 20/.

Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 3.5, in der zum Zwecke eines qualitativen Vergleiches die Einschätzungsfaktoren auf Basis eines gestuften Konzeptes in tabellarischer Form aufbereitet werden.

3.1 Auswahlkriterien für Trenn- und Dekontaminationsverfahren

Im Rahmen der Detailplanung von Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen werden im Rahmen von Auswahlverfahren die einzusetzenden technischen Verfahren ausgewählt. Die hierfür genutzten Auswahlkriterien werden häufig sowohl für Trenn- als auch Dekontaminationsmaßnahmen verwendet, weswegen zur Vermeidung von Dopplungen eine gemeinsame Betrachtung der Auswahlkriterien gewählt wird. Die Kriterien lassen sich grundsätzlich in einige Überkategorien zusammenführen, gewisse Überschneidungen sind aber nicht zu vermeiden. Zu diesen Kategorien gehören insbesondere:

- Materialaspekte, d. h. Eigenschaften des zu bearbeitenden Materials
- Technische Aspekte, d. h. verfahrensspezifische Kriterien die sich für die Anwendung ergeben
- Projektplanung- und wirtschaftliche Aspekte sowie Aspekte die das Aufsichts-/Genehmigungsverfahren betreffen
- Entsorgungsaspekte
- Äußere Randbedingungen

Eine Zusammenfassung wesentlicher Auswahlkriterien ist in Tab. 3.1 und Tab. 3.2 aufbereitet. Es ist festzuhalten, dass diese Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit stellt. In der Praxis können weitere Kriterien genutzt werden, diese sind aber in der Regel von geringerer Bedeutung. Aufgrund der Fülle möglicher Kriterien werden im Folgenden nur einige wesentliche Aspekte diskutiert.

Zuvorderst stehen bei der Verfahrensauswahl grundsätzliche Eignungskriterien, mit denen das gesamte Verfahrensspektrum objektiv auf die in Frage kommenden Verfahren reduziert werden kann. Ein Beispiel stellt die Materialdicke für Trennmaßnahmen dar, da die Verfahren in der Regel hinsichtlich ihrer Schnittdicke entweder verfahrensbedingt oder bedingt durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge beschränkt sind. Auch das Platzangebot am Einsatzort ist entscheidend, da sich je nach Verfahren der Platzbedarf unterschiedlich gestaltet. Neben dem Platzbedarf stellt

für Dekontaminationsverfahren auch die Zugänglichkeit der zu reinigenden Oberfläche ein mögliches Ausschlusskriterium dar; mechanische Verfahren sind beispielsweise für kontaminierte Innenflächen oftmals ungeeignet.

Sicherheitsaspekte nehmen bei der Verfahrensauswahl eine entscheidende Rolle ein. Die anwendungsbedingte Exposition ist bestmöglich zu vermeiden. In der Praxis kann eine Dosisbetrachtung beispielsweise dazu führen, dass Werkzeuge aus der Ferne gesteuert werden müssen. Hier ist festzustellen, dass nicht alle Verfahren gleichermaßen für einen Betrieb aus der Ferne ausgelegt sind bzw. dafür adaptiert werden können, beispielsweise aufgrund von zu hoher Rückstellkräften. Einige Trennarbeiten sind zudem aus radiologischen Gründen nur unter Wasser durchzuführen – auch hier ist festzuhalten, dass nicht alle Verfahren gleichermaßen für den Unterwassereinsatz geeignet sind, wohingegen einige Verfahren sogar primär für den Unterwasser konzipiert sind. Grundsätzlich sind sowohl bei Trenn- als auch bei Dekontaminationsmaßnahmen Freisetzung zu erwarten, die je nach Verfahren unterschiedlich gestaltet (z. B. Späne, Aerosole, Prozessgase oder Produkte aus chemischen Prozessen (z. B. Wasserstoffbildung)) sind. Besondere Vorsicht ist bei möglichen Aktivitätsfreisetzungen geboten. Je nach Verfahren bieten sich hier unterschiedliche Hilfsmittel wie temporäre Einhausungen und Filteranlagen an (siehe Abschnitt 3.4.3 und Abschnitt 3.4.4). Insbesondere durch Trennverfahren können enorme Lärmbelastungen mit Lärmexpositionspegeln von mehr als 85 dB entstehen, vor denen das Personal entsprechend geschützt werden muss (persönliche Schutzausrüstung). Zudem können sich weitere Anforderungen aus dem nicht-radiologischen Arbeitsschutz ergeben (z. B. beim Umgang mit Prozesschemikalien), durch die weitere Vorkehrungen zu treffen sind.

Eine besondere Bedeutung haben Erfahrungswerte aus ähnlich gelagerten Maßnahmen. Aus diesen ergeben sich Kriterien für die unterschiedlichen Kategorien, beispielsweise hinsichtlich der praktischen Anwendungserfahrung für den Umgang mit bestimmten Verfahren oder Werkzeugen. Dadurch stehen Informationen zur Verfügung, mit denen sich Risikoaspekte abschätzen lassen und Unsicherheiten somit minimiert werden können. Eine hier übergeordnete Rolle nimmt der Aspekt der Betriebsbewahrung ein.

Tab. 3.1 Auswahlkriterien für Trenn- und Dekontaminationsverfahren

Kategorisierung der Kriterien und ihre jeweilige Relevanz für Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen

Kategorie / Kriterium	Relevanz für Trenn- maßnahmen	Relevanz für Dekonta- minationsmaßnahmen
Materialaspekte		
Materialart	X	X
Materialoberfläche		X
Höhe und Art der Kontamination (Isotopi- sche Zusammensetzung)		X
Materialdicke	X	
Personalaspekte		
Strahlenexposition für das Personal	X	X
Arbeitssicherheit	X	X
Personalbedarf	X	X
Qualifikationsbedarf	X	X
Technische Anwendungsaspekte		
Handhabbarkeit	X	X
Bedienbarkeit aus der Ferne	X	X
Verwendbarkeit unter Wasser	X	
Werkzeugverschleiß	X	X
Dekontaminierbarkeit der Werkzeuge	X	
Potenzielle Aktivitätsfreisetzung	X	
Konventionelle Schadstofffreisetzung	X	X
Verfahrensbedingte Erschütterungen	X	
Geschwindigkeit / Trennleistung	X	
Stand- und Rüstzeiten der Werkzeuge und Einsatzmittel	X	X

Tab. 3.2 Auswahlkriterien für Trenn- und Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung)

Kategorisierung der Kriterien und ihre jeweilige Relevanz für Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen

Kategorie / Kriterium	Relevanz für Trenn- maßnahmen	Relevanz für Dekonta- minationsmaßnahmen
Entsorgungsaspekte		
Produktion von Sekundärabfällen	X	X
Überprüfung des Dekontaminationserfolgs		X
Kompatibilität der entstehenden Trennteile mit Entsorgungspfaden	X	
Entsorgungskosten für Sekundärabfälle	X	X
Dekontaminationsziel (z. B. ausgedrückt durch Dekontaminationsfaktor)		X
Projektplanungs- und wirtschaftliche Aspekte sowie behördliche Verfahrensaspekte		
Erfahrungen aus vergleichbaren Maßnahmen	X	X
Betriebsbewährung	X	X
Sicheres Trennergebnis	X	
Verwendung von Industriestandards	X	X
Anforderungen an den Brandschutz	X	
Anforderungen an den Strahlenschutz	X	X
Führung des Sicherheitsnachweises	X	X
Zeitlicher und finanzieller Aufwand / Wirtschaftlichkeit	X	X
Randbedingungen		
Platzbedarf am Einsatzort	X	X
Zugänglichkeit der zu dekontaminierenden Oberfläche		X
Logistik- und Transportanforderungen	X	X
Zeitliche Aspekte / Einschränkungen	X	X
Nutzung nach erfolgter Dekontamination (z. B. hinsichtlich Materialintegrität)		X

Das Auswahlverfahren stellt in der Praxis eine Verknüpfung von grundsätzlichen Bedarfsanforderungen mit diversen (auch wirtschaftlicher) Optimierungsproblemen dar, die wiederum mit unterschiedlichen Risiken einhergehen können. Eine objektive Wichtung der Kriterien ist allgemein nicht möglich und hängt stark vom individuellen Fall und dem aufgebauten Erfahrungsschatz ab.

Zudem ist die empirische Datenlage (z. B. Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeiten und Verschleiß), die für den Verfahrensvergleich genutzt werden könnte, oftmals zu lückenhaft als das sich hieraus ein belastbares Bild ergibt. Erschwerend kommt hinzu, dass es zu einem Verfahren eine Vielzahl unterschiedlicher Werkzeuge, Verbrauchsmaterialien und Betriebsmittel gibt, welche die Komplexität weiter erhöhen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in der Stilllegungsdurchführung bevorzugt auf betriebsbewährte Verfahren zurückgegriffen wird, für die im besten Fall ein eigener Erfahrungsschatz vorliegt. Auch wenn so nicht zwingend das optimale Verfahren gewählt wird, überwiegen hier die Vorteile des Wissens über bewährte Techniken und einer besseren Abschätzung der Risiken bei gleichzeitiger Gewährleistung der Sicherheit. Nur sehr selten verlangen Maßnahmen im Rahmen des geplanten Rückbaus innovative Herangehensweisen, so dass bewährte Verfahren, die sich zudem einfach und mit geringer Personenstärke bedienen lassen, oftmals – gemäß der Devise „*keep dismantling simple*“ – bevorzugt werden /IAEA 99/.

3.2 Trennverfahren

In diesem Abschnitt werden zunächst etablierte Trennverfahren (Abschnitt 3.2.1) beschrieben, bevor im Abschnitt 3.2.2 dann ausgehend von ausgewählten Kriterien eine qualitative Eignungseinschätzung erfolgt.

3.2.1 Beschreibung etablierter Verfahren

Obschon mit der DIN 8580 eine Norm existiert, in der u. a. relevante Verfahren kategorisiert werden hat sich in der kerntechnischen Stilllegungslandschaft eine duale Einteilung in *mechanische Verfahren* und *thermische Verfahren*, ggfs. unter Berücksichtigung sonstiger Verfahren, bewährt. Aufgrund dieser Etablierung wird auch im Folgenden dieses Kategorisierungssystem aufgegriffen. Es wurden zunächst die thermischen Verfahren (Abschnitt 3.2.1.1) beschrieben, bevor anschließend im Abschnitt 3.2.1.2 der Fokus auf die mechanischen Trennverfahren gelegt wird. Eine Übersicht der hier diskutierten Trennverfahren findet sich in Abb. 3.1.

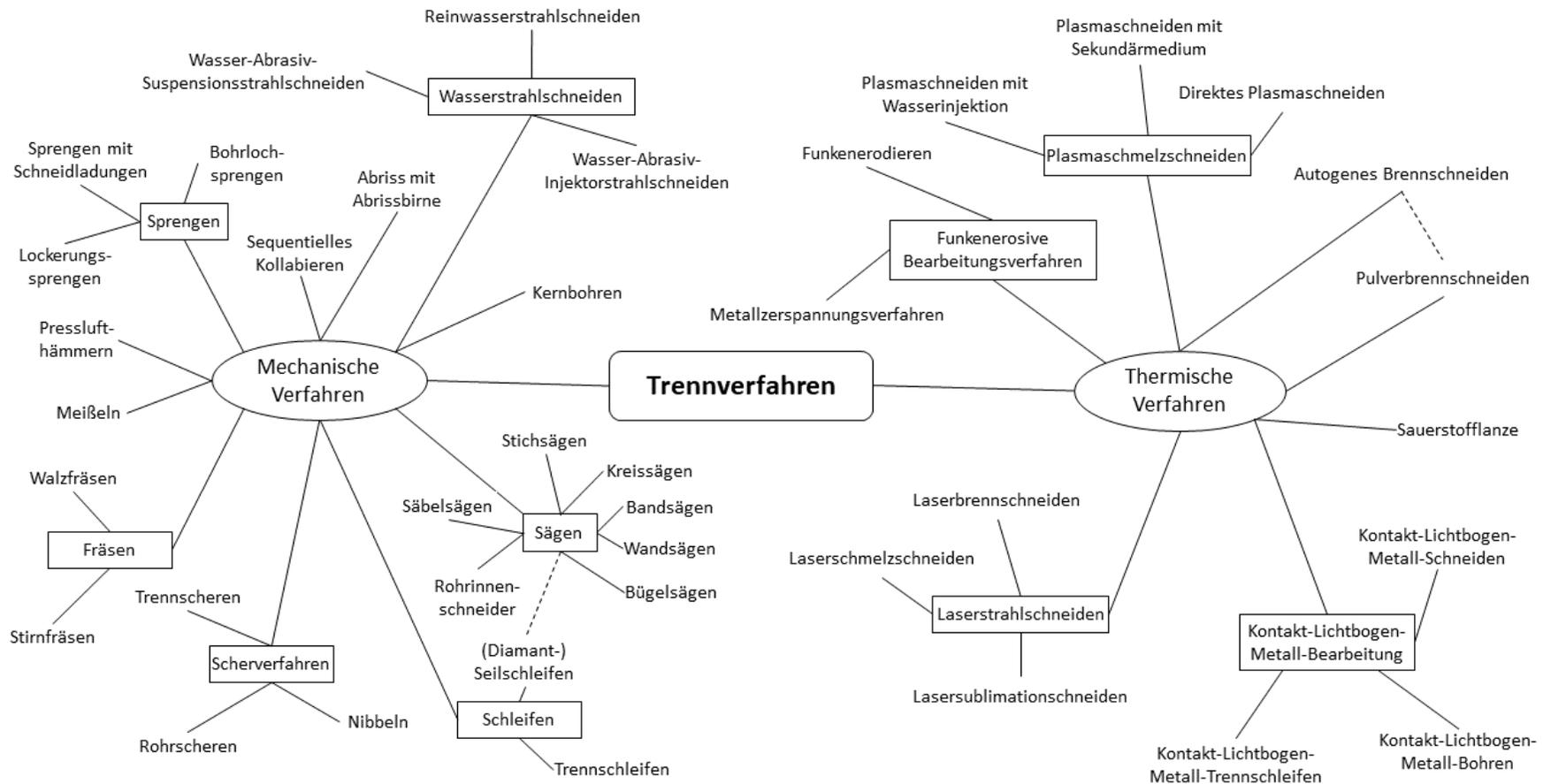


Abb. 3.1 Übersicht über die berücksichtigten etablierten Trennverfahren

Die Verfahren sind unterteilt in mechanische und thermische Trennverfahren und weitestmöglich in Klassen (Kästen) eingruppiert. Sofern Querverbindungen existieren, sind diese mit gestrichelten Linien angedeutet.

3.2.1.1 Thermische Trennverfahren

Bei den thermischen Trennverfahren wird das zu zerkleinernde Werkstück mittels einer Flamme, eines Lichtbogens bzw. eines Laserstrahls oder mittels (periodischer) Funkenschläge thermisch aufgeschmolzen und der geschmolzene Anteil aus der Schnittfuge ausgetrieben. Dies geschieht je nach Verfahren relativ einfach durch die Schwerkraft oder durch einen Gas- bzw. Wasserstrom. Thermische Trennverfahren werden häufig für Metalle eingesetzt, kommen aber auch bei Beton und anderen konventionellen Werkstoffen zum Einsatz.

Im Vergleich zu den spanenden Trennverfahren (z. B. Sägen) haben thermische Trennverfahren den Vorteil, dass deutlich geringere Rückstellkräfte auftreten, was grundsätzlich eine einfachere Handhabung und weniger massive Konstruktionen erfordert. Dies ist insbesondere in beengten Raumbereichen von Vorteil, vereinfacht aber auch die grundsätzliche Bedienbarkeit aus der Ferne. Im Vergleich zu den mechanischen Verfahren erreichen thermische Verfahren in der Regel höhere Schnittgeschwindigkeiten, was zum Beispiel auch bei manueller Anwendung kürzere Aufenthaltszeiten des Personals im Strahlenfeld erlaubt. Bei dem Einsatz thermischer Verfahren entstehen in der Regel Aerosole bzw. Hydrosole (ggfs. giftige Gase und Dämpfe), so dass insbesondere in Strahlenschutzbereichen Absaug- und Filteranlagen unabdingbar sind. Zudem können sich aufgrund der häufig hohen Temperaturen spezielle Anforderungen des Brandschutzes ergeben.

In den folgenden Unterabschnitten werden die einzelnen Verfahren näher vorgestellt.

3.2.1.1.1 Autogenes Brennschneiden

Das *autogene Brennschneiden* (englisch: *oxy-fuel cutting*) ist ein – in den Grundzügen – seit über 100 Jahren existierendes Verfahren, das obschon seines Alters auch weiterhin zu den wichtigsten Trennverfahren in der Materialbearbeitung gehört und kontinuierlich weiterentwickelt wurde.

Bei diesem Verfahren reagiert ein Heizgas (z. B. Acetylen, Propan oder flüssiger Brennstoff) mit Sauerstoff (aus der Umgebung), wodurch sich eine Heizflamme ausbildet. Die Heizflamme erhitzt den zu bearbeitenden Werkstoff bis zum Überschreiten der Zündtemperatur. Durch die Zufuhr von Sauerstoff (Schneidsauerstoff) verbrennt der Werkstoff im Flammenbereich in einer exothermen Reaktion. Durch die freiwerdende Verbrennungswärme erhitzt sich die darunterliegende

Werkstoffschicht wiederum auf Zündtemperatur, so dass sich der Prozess selbständig, d. h. autogen, in die Tiefe fortsetzt. Der Strom des Schneidsauerstoffs treibt die flüssige Schlacke aus der Fuge. Das Verfahren ist schematisch in Abb. 3.2 dargestellt.

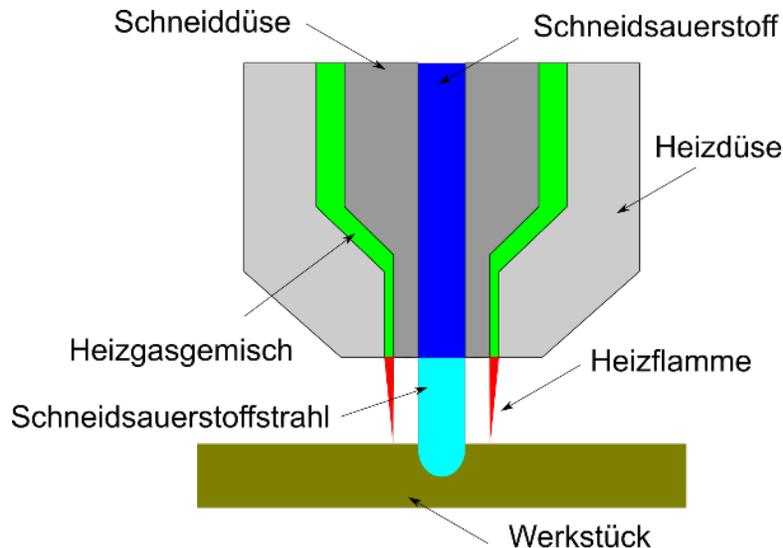


Abb. 3.2 Schematische Darstellung des autogenen Brennschneidens

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Zwingende Voraussetzung für die Eignung des Verfahrens zum Trennen eines bestimmten Werkstoff ist eine Zündtemperatur, die geringer als die Schmelztemperatur ist. Bei einfachem Baustahl liegt die Zündtemperatur bei etwa 1.150 °C und die Schmelztemperatur bei etwa 1.250 °C, so dass das autogene Brennschneiden hierfür geeignet ist. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt im Stahl steigt die Zündtemperatur bei gleichzeitiger Reduzierung der Schmelztemperatur, so dass das Verfahren nur für Baustahl mit Kohlenstoffgehalten bis etwa 0,3 % gut angewendet werden kann. Für Gusseisen (Kohlenstoffanteil von etwa 3 %) wiederum ist das Verfahren ungeeignet, weswegen hier auf andere Verfahren wie z. B. dem Pulverbrennschneiden (siehe Abschnitt 3.2.1.1.2) ausgewichen werden muss. Auch Legierungen erhöhen in der Regel die Zündtemperatur, so dass das autogene Brennschneiden insbesondere für hochlegierte Stähle praktisch ungeeignet ist.

Des Weiteren müssen die bei dem Verfahren entstehenden Oxide in der Regel einen niedrigeren Schmelzpunkt haben als der Werkstoff. Dies ist beispielsweise für Aluminium oder Chrom-Nickel-Stähle nicht der Fall, auch hier muss auf andere Verfahren ausgewichen werden. Mit dem

autogenen Brennschneiden können neben diversen Baustählen auch Betonstrukturen getrennt werden. Selbst mit kleinen handgeführten Brennern ist das Zerlegen dickwandiger Komponenten aus niedriglegierten Stählen und Werkstoffen mit Materialstärken von bis zu etwa 600 mm möglich.

Die bei der Verbrennung entstehende Schlacke sollte möglichst dünnflüssig sein, um gut aus der Schnittfuge herausgetrieben werden zu können. Zudem sollte der Werkstoff eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, damit der Verbrennungsprozess auch in die Tiefe möglichst selbständig ablaufen kann.

Das Verfahren kann auch für den Einsatz unter Wasser adaptiert werden (z. B. Zündung mittels Zündkerzen und dedizierte Sauerstoffzuführung), wodurch die effektive Aerosolfreisetzung verringert werden kann. Das Erwärmen des Werkstücks bis zur notwendigen Zündtemperatur ist aufgrund der deutlichen höheren Wärmekapazität des Wassers sowie einer besseren Wärmeleitung (im Vergleich zu Luft als umgebendes Medium) deutlich aufwendiger. Effektiv sinkt auch die Schneidtiefe bei Arbeiten unter Wasser auf ca. 300 mm ab /IAEA 99/. Wird Acetylen als Brenngas eingesetzt, kann das Verfahren in einer Wassertiefe von bis zu 15 m praktiziert werden – größere Tiefen sind nicht möglich da Acetylen ab etwa 1,6 bar einem druckabhängigen Selbstzerfall unterliegt /SCH 19/. Bei Nutzung kompressibler Kohlenwasserstoffgase wie Propan als Brenngas kann das Verfahren auch für größere Wassertiefen (bis zu 100 m) eignen.

Wird das autogene Brennschneiden mit einer mechanischen Führung betrieben, können höhere Schneidgeschwindigkeiten, ein feinerer Schnitt und eine kleinere Schnittfuge erreicht werden. An Beton können Schneidtiefen von ca. 1.200 mm erreicht werden /IAEA 02/.

Das autogene Brennschneiden kann auch als Hybrid-Schneidverfahren mit anderen thermischen Verfahren wie dem Plasmabrennschneiden bzw. dem Lichtbogen-Wasserstrahlschneiden genutzt werden /SCH 19/.

Das autogene Brennschneiden kennzeichnet sich durch einen gleichmäßigen Verbrennungsprozess in der Tiefe und entlang der Vorschubrichtung aus. Als thermisches Verfahren gehört es zudem zu den Verfahren mit einer schnellen Schnittgeschwindigkeit. Durch eine grundsätzlich hohe Automatisierbarkeit und eine einfache Handhabbarkeit gehört das autogene Brennschneiden zu den etabliertesten Trennverfahren in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Dadurch, dass es nicht zum direkten Kontakt zwischen Werkstoff und Schneidbrenner kommt; treten nur

vergleichsweise geringe Rückstellkräfte auf, so dass das Verfahren leicht für einen fernhantierten Einsatz adaptiert werden kann. Durch den autogenen Prozess sind – auch im Vergleich zum Plasmaschneiden - sehr hohe Schnittdicken möglich, so dass es sehr gut zum Zerlegen dickwandiger Komponenten eingesetzt werden kann. Der übliche Einsatzbereich des Verfahrens liegt von 20 mm bis 200 mm Stahldicke, mit Sonderanlagen können auch Materialstärken bis etwa 800 mm zerlegt werden.

Der Einsatz unter Wasser ist möglich, obschon sich hierdurch die erreichbaren Schnitttiefen reduzieren. Die bei der Anwendung an Luft vergleichsweise großen Mengen aufgewirbelter bzw. erzeugter Aerosole /VER 08/ sorgen dafür, dass entsprechende Filter- und Absaugvorrichtungen benötigt werden. Als Konsequenz dieser hohen Aerosolfreisetzung wird das Verfahren bei Anwendungen an der Luft bevorzugt bei kontaminationsfreien bzw. nur schwach kontaminierten Teilen und Komponenten eingesetzt. Wie beschrieben, ergeben sich aus den Verfahreneigenschaften grundsätzliche Einschränkungen hinsichtlich der bearbeitbaren Werkstoffe.

Wesentliche Verfahreneigenschaften sind in Tab. 3.3 hinterlegt.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Dadurch, dass Baustähle bzw. niedrig-legierte Stähle zu den für Kernkraftwerke häufig genutzten Materialien gehören, ist das Verfahren in der Stilllegung weit verbreitet /LAR 12/. Das Verfahren wird u. a. zur Trennung ferritischer Materialien genutzt, insbesondere wird es auch für austenitisch-plattierte, ferritische Werkstoffe bzw. Stähle genutzt /KAU 10/. Solche ferritischen Stähle mit austenitischer Plattierung, wie sie zum Beispiel für Reaktordruckbehälter (die innenliegende austenitische Plattierung dient hier dem Korrosionsschutz) genutzt werden, werden von der Ferritseite durch das Verfahren getrennt, die austenitische Plattierung wird hierbei abgeschmolzen und ausgeblasen.

Das Verfahren ist gut für das Trennen von Komponenten mit komplexer Geometrie und großer Wandstärke geeignet. Es wurde unter anderem zur Zerlegung von Rohrleitungen, Stahlträgern, Turbinen und Turbinengehäusen eingesetzt /LAR 12/. Auch für dickwandige kohlenstoffarme Stahlkomponenten, welche mit Edelstahl ausgekleidet sind, wie bspw. Reaktordruckbehältern, Dampferzeugern und Druckhaltern kann es eingesetzt werden.

Tab. 3.3 Wesentliche Charakteristiken für das autogene Brennschneiden

Umgebung	Anwendbar an der Luft und unter Wasser (mit Acetylen bis zu einer Tiefe von etwa 15 m, größere Einsatziefen sind beispielsweise mit Propan möglich)
Schnittgeschwindigkeit	Ca. 630 mm/min (Acetylen) bzw. 510 mm/min (Propan) für 10 mm Baustahl Ca. 395 mm/min (Acetylen) bzw. 390 mm/min für 40 mm Baustahl
Schnittdicken	Ca. 25 mm – 800 mm mit Standardwerkzeugen, bis 300 mm unter Wasser, in Beton bis zu 1200 mm
Sekundärabfall	Eisenoxid und Schmelzrückstände
Verbrauchsmaterialien	Sauerstoff und brennbare Substanzen (Acetylen, Benzin und Butan)
Formschnitt	Möglich
Fernhantierung / Automatisierung	Möglich
Freisetzungen (Aerosole/Hydrossole)	Hohe Freisetzung, auch bedingt durch die Arbeitsgase
Platzbedarf	Gering
Materialien	<ul style="list-style-type: none"> - Limitiertes Materialspektrum: Beton, Baustahl, Karbonstahl, unlegierte und niedrig legierte Stähle, Titan Molybdän. - Ungeeignet für hochlegierte Stähle.
Charakteristiken	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Rückstellkräfte - Auch für komplexe Schnitte an dickwandigen Materialien einsetzbar - Filter und Absaugeinrichtungen notwendig - Schmelztemperatur des Werkstoffs muss oberhalb der Entzündungstemperatur des Sauerstoffs liegen

In Deutschland wurde das autogene Brennschneiden beispielsweise bei der Zerlegung des Reaktordruckbehälters (Materialstärken von bis zu 390 mm) des Kernkraftwerks Gundremmingen A eingesetzt. Die Zerlegung wurde in Atmosphäre durchgeführt, die Werkzeuge wurden durch ein geeignetes Führungssystem gesteuert. Hinsichtlich der Schneidgeschwindigkeit werden Werte von 200 mm/min für eine 131 mm dicke Materialschicht aufgeführt /VER 08/. Das Verfahren wird sowohl in-situ als auch ex-situ (Nachzerlegung) genutzt. So sind beispielsweise auch für das Reststoffbehandlungszentrum im Kernkraftwerk Grohnde Brennschneidcaissons vorgesehen, die u. a. mit autogenen Brennschneidgeräten ausgestattet werden sollen /SCH 23a/.

3.2.1.1.2 Pulverbrennschneiden

Das *Pulverbrennschneiden* (englisch: *powder cutting*) kann als Sonderverfahren des autogenen Brennschneidens betrachtet werden. Durch die Zuführung eines meist kohlenstoffarmen Eisenpulvers zur Heizflamme kann im Vergleich zum autogenen Brennschneiden mehr Wärme freigesetzt und eine höhere Schmelztemperatur erreicht werden. Ziel des Pulverbrennschneidens ist das direkte Erreichen der Schmelztemperatur des zu trennenden Werkstoffs ohne Ausnutzung des Zündprozesses. Zudem hat Eisenpulver eine abrasive Wirkung, was den Trennvorgang zusätzlich unterstützt. Des Weiteren verdünnt Eisenoxid die Schlacke, die dadurch eine geringere Viskosität aufweist und so im Sauerstoffstrom leichter aus der Schnittfuge getrieben werden kann.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Pulverbrennschneiden erlaubt im Gegensatz zum autogenen Brennschneiden insbesondere das Schneiden von Gusseisen oder hochlegierten Chrom-Nickel-Stählen. Für Stahl werden in /BAC 02/ Trennarbeiten bis zu einer Wanddicke von etwa 320 mm präsentiert, für Beton werden in /VER 05/ Wandstärken von ca. 1.200 mm aufgeführt.

Die in der Praxis erreichbaren Schnittdicken sind vergleichbar zu jenen des autogenen Brennschneidens. Im direkten Vergleich ist der auffälligste Vorteil des Pulverbrennschneidens gegenüber dem Brennschneiden das breitere Spektrum der für das Verfahren geeigneten Materialien, das insbesondere auch hoch legierte Stähle einschließt. Zudem ergeben sich sekundäre Vorteile wie das im Vergleich leichtere Austreiben der Schlacke.

Das benötigte Pulver wirkt sich nachteilig auf die laufenden Kosten und die Menge freigesetzter Aerosole aus. Die benötigten Werkzeuge sind komplexer, woraus sich im Vergleich Nachteile für die Prozesssicherheit ergeben können.

Wesentliche Verfahrenseigenschaften sind in Tab. 3.4 zusammengefasst.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Bei der Zerlegung des Druckbehälters des Windscale Advanced Gas-cooled Reactors (WAGR), einem Prototypreaktor der im Vereinigten Königreich eingesetzten gasgekühlten Reaktoren,

konnte mit dem Pulverbrennschneiden der Druckbehälter, welcher mit einer dicken Keramikschicht ausgekleidet war, zerlegt werden /LAR 12/.

Grundsätzlich wird das Pulverbrennschneiden meist für Materialien eingesetzt, bei denen andere Technologien an ihre Grenzen stoßen bzw. ungeeignet sind. Die Vorzüge des Verfahrens kommen in der regulären Stilllegungspraxis oftmals nicht zur Geltung, da sich auch andere Verfahren – wie das Plasmaschneiden – für das Trennen von hochlegierten Stählen, eignen. In den vorbereitenden Stilllegungsunterlagen (z. B. dem Sicherheitsbericht im Rahmen der Beantragung der 1. SAG des Kernkraftwerk Brunsbüttel (KKB) /VAT 15/) wird das Pulverbrennschneiden daher in der Regel nicht zu den anzuwendenden Standardverfahren gezählt.

Tab. 3.4 Wesentliche Charakteristiken des Pulverbrennschneidens

Umgebung	Anwendbar an der Luft und unter Wasser
Schnittgeschwindigkeit	Vergleichbar zum autogenen Brennschneiden
Schnittdicken	320 mm für hochlegierte Stähle 1500 mm bei Beton
Sekundärabfall	Metallpulver, Eisenoxid und Schmelzrückstände
Verbrauchsmaterialien	Sauerstoff und brennbare Substanzen (Acetylen, Benzin und Butan) sowie Pulver
Formschnitt	Möglich
Fernhantierung/Automatisierung	Möglich
Aerosole/Hydrossole	Sehr hohe Freisetzungen, auch bedingt durch die Prozessgase und die Pulververbrennung
Platzbedarf	Gering
Materialien	Für fast alle Materialien einsetzbar
Charakteristiken	<ul style="list-style-type: none"> - Effizienzsteigerung des autogenen Brennschneidens - Gehört nicht zu den häufig genutzten Verfahren - Aufwendiges Filtersystem notwendig

3.2.1.1.3 Sauerstofflanze

Die *Sauerstofflanze* (auch *thermische Lanze* genannt, englisch: *thermal lance*) ist der wesentliche Bestandteil eines Verfahrens, bei dem gasförmiger Sauerstoff mit hohem Druck zunächst durch ein Metallrohr strömt und am Ausgang des Rohrs mit dem Rohrmaterial nach Entzündung in einem Brennvorgang (exotherme Reaktion) reagiert. Die Lanze ist ein kompaktes, einfach handzuhabendes Werkzeug mit einem Durchmesser von etwa 10 mm. Zur Oberflächenvergrößerung

wird das Rohr meist mit (Stahl-)Drähten ausgefüllt. In Abhängigkeit des eingesetzten Materials ergeben sich sehr hohe Temperaturen, die zur Schmelztrennung praktisch aller Materialien genutzt werden können. Im Falle von Stahl werden Temperaturen von bis zu 2500 °C erreicht, mit einer zusätzlichen Einspeisung von thermischem Pulver, einer Mischung aus Aluminium und Eisen, können Temperaturen von ungefähr 4000 °C erreicht werden.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die hohen Temperaturen sind ausreichend, um auch Werkstoffe mit hohem Schmelzpunkt zum Schmelzen zu bringen, so dass das Verfahren für ein sehr breites Materialspektrum genutzt werden kann. Zudem ist die thermische Lanze ein sehr kompaktes und grundsätzlich leicht zu bedienendes Werkzeug. Es kann auch unter Wasser eingesetzt werden, sofern entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, die ein übermäßiges Auskühlen des Stahlrohrs vermeiden, da dies den Verbrennungsprozess ggfs. unterbrechen könnte.

Eine fachgerechte Handhabung (vergleichsweise hohe Trenngeschwindigkeiten, gute Schnittqualität) benötigt jedoch Erfahrung um gerade und saubere Schnitte zu erreichen, da das Verfahren im Grunde nur eine Reihe von Löchern im zu bearbeitenden Werkstoff erzeugt /LAR 12/, /CND 09/. Das Werkzeug muss also kontinuierlich nachgeführt werden, was sich auch nachteilig auf die Schnittgeschwindigkeit auswirkt.

Durch den Brennprozess gehört auch das Rohr am Brennschneidegerät zum Verbrauchsmaterial und muss somit regelmäßig ausgetauscht werden. Dies wirkt sich ebenfalls nachteilig auf eine Bedienung aus der Ferne aus, da entsprechende Rüstzeiten zu berücksichtigen sind. In Verbindung mit dem nicht-kontinuierlichen Prozess bestehen somit nur geringe Möglichkeiten zur Automatisierung.

Dadurch, dass bei der Zerlegung eine große Menge Aerosole erzeugt wird, eignet sich die thermische Lanze nicht zum Trennen kontaminierter Strukturen /EUR 95/. Mittels einer einfachen Sauerstofflanze können Materialien mit Wandstärken bis etwa 250 mm getrennt werden. Mit der Zugabe von thermischen Pulvern ist es möglich Edelstähle bis zu 320 mm und Betonstrukturen mit Materialstärken von bis zu 1200 mm zu trennen /IAEA 02/.

Neue Ansätze des Verfahrens umfassen bspw. die Hochdruck-Sauerstofflanze als auch Schneidverfahren mit einer mechanisierten Sauerstofflanze welche für den Einsatz bei mit Edelstahl beschichteten Baustahlstrukturen vorgesehen sind /BAC 01/, /LAR 12/.

Wesentliche Verfahrenseigenschaften sind in Tab. 3.5 aufgeführt.

Tab. 3.5 Wesentliche Charakteristiken der Sauerstofflanze

Umgebung	Anwendbar in Luft und unter Wasser
Schnittgeschwindigkeit	Sehr langsames Verfahren 200 mm/min für Wandstärken von 20 mm, 1 mm/min für Wandstärken von ca. 250 mm
Schnitttiefe	320 mm für Edelstähle; 2000 mm für Beton /LAR 12/
Sekundärabfall	Feste Form: Metalloxide
Verbrauchsmaterialien	Sauerstoff, Lanze
Formschnitt	Limitiert und geringe Präzision
Fernhantierung	Ein fernhantierter Einsatz ist zwar grundsätzlich nicht ausgeschlossen, wird praktisch aber nicht beobachtet
Aerosole/Hydrossole	Sehr hoher Anteil an Aerosolen, nicht für kontaminierte Strukturen geeignet
Platzanspruch	Sehr gering
Materialien	Fast alle Metalle und Betonstrukturen
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Klein und grundsätzlich leicht handhabbar; ausgeübt • Benötigt seitens des Operateurs viel Erfahrung für ein effektives Trennen • Geringe Präzision • Einsatz bei nicht kontaminierten Oberflächen, • Begrenzte Einsatzmöglichkeiten in der Stilllegung • Effektiv wird das Trennen durch aneinandergereihte Bohrungen erreicht

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Verfahren fand unter anderem für Abbauarbeiten am Heißdampfreaktor-Großweltsheim (HDR) als auch für die Zerlegung des biologischen Schildds des WAGR Verwendung /IAEA 99/.

Aufgrund der Nachteile gegenüber anderen gängigen Verfahren sind die Einsatzmöglichkeiten beim Rückbau limitiert. Gemäß /LAR 12/ kommt es nur dann zum Einsatz, wenn andere Techniken versagen.

3.2.1.1.4 Laserstrahlschneiden

Beim *Laserstrahlschneiden* (englisch: *laser cutting*) trifft ein fokussierter Laserstrahl auf den zu trennenden Festkörper, wodurch dieser lokal stark erhitzt und aufgeschmolzen wird. Über einen coaxial ausströmenden Gasstrahl wird die Schmelze aus der Schnittfuge ausgetrieben. Eine schematische Darstellung der Schneiddüse für das Laserstrahlschneidverfahren ist in Abb. 3.3 gegeben.

Die Breite der Schnittfuge kann durch die Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl justiert werden. Die Fokusslage des Laserstrahls wird materialabhängig eingestellt und hat einen starken Einfluss auf die Schnittqualität. So befindet sich diese bei der Bearbeitung von Blechen zumeist 2 bis 7 mm oberhalb des zu bearbeitenden Werkstoffs. Bei Edelstählen wird die Fokusslage in das Material hinein verlagert um hochwertige Schnitte zu erreichen /SCH 13/.

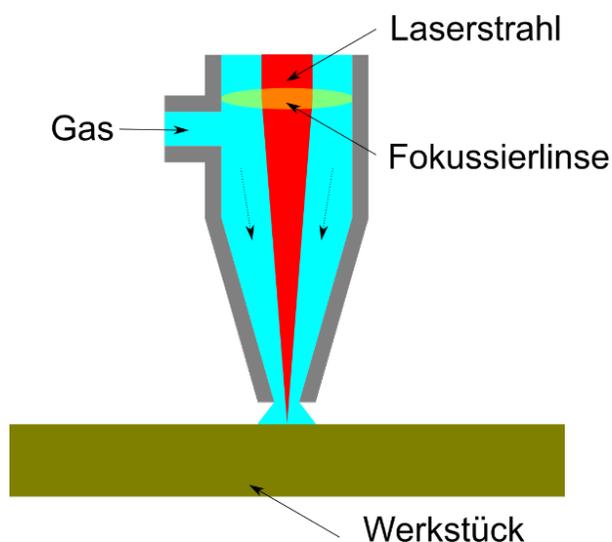


Abb. 3.3 Schematische Darstellung der Schneiddüse beim Laserstrahlschneiden

Je nach Art wie das Schnittfugenmaterial erhitzt und ausgetrieben wird, werden die Laserschneidverfahren unterteilt. Die am häufigsten eingesetzten Prozesse sind das sauerstoffunterstützte Laserstrahlbrennschneiden, Laserschmelzschnneiden und das Lasersublimationsschnneiden, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

(Sauerstoffgestütztes) Laserstrahlbrennschneiden

Beim Laserstrahlbrennschneiden (englisch: *laser cutting with oxygen*) muss zunächst der Werkstoff am Einstechpunkt (durch Absorption des Laserlichts) auf Entzündungstemperatur erwärmt werden. Anschließend wird Sauerstoff als Blasgas hinzugegeben, wodurch das Metall oxidiert. Dieser Oxidationsprozess beschleunigt den Schmelzvorgang im Material deutlich, so dass sich insbesondere die Schnittgeschwindigkeit erhöht und die Schneiddicke zunimmt. Die Schlacke wird durch den Sauerstoffstrom aus der Schnittfuge getrieben.

Das Verfahren weist somit gewisse Ähnlichkeiten zum autogenen Brennschneiden auf. Auch hier wird eine Zündtemperatur unterhalb der Schmelztemperatur vorausgesetzt, weswegen es in der Praxis insbesondere für niedrig legierte Stähle genutzt wird.

Mit einem 4 kW CO₂ Laser können bei 20 mm dickem Baustahl Schnittgeschwindigkeiten von etwa 80 cm/min erzielt werden.

(Stickstoffunterstütztes) Laserschmelzschnneiden

Beim Laserstrahlschmelzschnneiden (englisch: *melt-and-blow laser cutting*) wird das Werkstück durch den Laser kontinuierlich aufgeschmolzen und die Schnittfuge durch Ausblasen mit einem reaktionsträgen Gas ausgebildet. Als Gas wird häufig auf Stickstoff zurückgegriffen, seltener auf Argon oder Helium. Bei diesen Gasen handelt es sich um inerte Gase, so dass im Schnittbereich keine chemischen Reaktion mit dem aufgeschmolzenen Metall auftreten.

Das Verfahren wird in Abhängigkeit des zu trennenden Materials mit unterschiedlichen Lasertypen verwendet: CO₂ Laser können gut für Nichtmetalle (z. B. Holz, Kunststoff oder Papier) genutzt werden, wohingegen sich z. B. Faserlaser deutlich besser für Metalle eignen (siehe auch Abb. 3.4).

Die Schnittgeschwindigkeit hängt bei diesem Verfahren stark von der Laserleistung und dem verwendeten Laser ab. So können mit 5 kW Laserschneidanlagen 10 mm dicker Edelstahl 1.4301 mit Geschwindigkeiten von etwa 1,1 Meter pro Sekunde geschnitten werden. Durch die Nutzung reaktionsträger Gase können oxidfreie Schnittfugen erreicht werden. Auch Baustähle, Aluminiumlegierungen und Nichteisenlegierungen können mit diesem Verfahren geschnitten werden, es wird aber vor allem für Edelstähle genutzt.

Lasersublimationsschneiden

Beim Lasersublimationsschneiden (englisch: *vaporization laser cutting*) wird – vorausgesetzt, das Material verfügt über keinen ausgeprägten Schmelzpunkt – das durch den Laserstrahl erhitzte Material sublimiert. Es bildet sich somit keine Schlacke in der Schnittfuge und die Dämpfe werden durch das Prozessgas aus der Schnittfuge ausgeblasen. Ähnlich wie beim Laserstrahlschmelzschnitten wird ein Inertgas eingesetzt, durch welches die Oberfläche vor Oxidation geschützt wird /HÜB 17/. Typische Werkstoffe, die mit diesem Verfahren in der Praxis getrennt werden, sind Holz oder Kunststoffe.

Durch den Einsatz von gepulsten Lasern mit hoher Leistung (d. h. Systeme mit einer sehr hohen Leistungsflussdichte) kann das Materialspektrum auf Materialien ausgeweitet werden, die normalerweise nicht sublimieren.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Ein entscheidender Parameter – nicht nur für materialspezifische Schnitte, sondern auch für die Fernhantierbarkeit – ist die Wellenlänge des Lasers bzw. des laserfähigen Mediums. Mit einem Kohlenstoffdioxid-Laser (CO₂ Gas als laserfähiges Medium im Resonator) wird Licht mit einer Wellenlänge von 10,6 µm erzeugt, das nur über Spiegelsysteme geleitet werden kann. Licht geringerer Wellenlänge, für das eine Glasfaser-gestützte Leitung des Laserlichts zur Fokussieroptik ggfs. möglich ist, kann beispielsweise mit einem Nd:YAG Festkörperlaser (Wellenlänge von 1,06 µm) erzeugt werden. Eine solche räumliche Trennung von dem eigentlichen Laser und der Schneiddüse erleichtert insbesondere eine Bedienung aus der Ferne und reduziert drastisch den Platzbedarf am Einsatzort.

Die Einkopplung des Laserlichts (Absorption) ist bei Wellenlängen um 1 µm für (reflektierende) Metalle höher als bei Laserlicht mit größerer Wellenlänge, so dass das Verfahren z. B. hinsichtlich

der Schnittgeschwindigkeit und der Breite der Schnittfuge effizienter (z. B. im Vergleich zu einem CO₂ Laser gleicher Energie) verläuft. Hieraus ist ersichtlich, dass die Absorptionswahrscheinlichkeit für Metalle meist mit fallender Energie zunimmt. Materialien wie Kupfer sind – insbesondere mit CO₂ Lasern – schwer mit dem Laser zu trennen, was insbesondere durch ein entsprechend hohes Reflexionsverhalten erklärt werden kann. Allgemein besteht aber kein eindeutiger, materialübergreifender Zusammenhang zwischen Absorptionswahrscheinlichkeit und Wellenlänge: Für Glas ist die Absorptionswahrscheinlichkeit mit einem CO₂ Laser deutlich höher als mit einem Nd:YAG Laser.

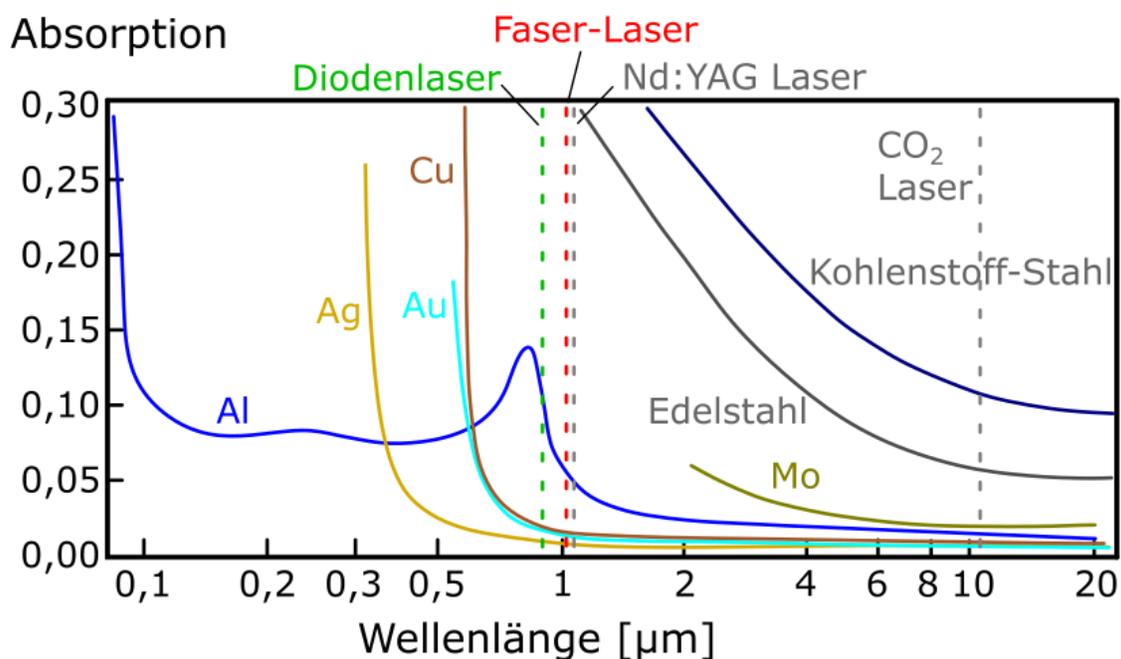


Abb. 3.4 Abhängigkeit der Absorptionswahrscheinlichkeit von der Wellenlänge für ausgewählte Metalle

Der CO₂ Laser galt ausgehend von den späten 1980er Jahren bis zur Mitte der 2010er Jahre als Stand der Technik im industriellen Betrieb. Schnitte bis 25 mm Dicke in Stahl sind mit CO₂ Laser-Anlagen mit einer Leistung von 6 kW möglich. In vielen Bereichen wurde der CO₂ Laser zwischenzeitlich durch moderne Faserlaser (spezieller Festkörperlaser) verdrängt. Faserlaser benötigen im Vergleich zu den CO₂ Lasern eine geringere Leistung (etwa ein Drittel) für vergleichbare Schnittergebnisse, weisen einen hohen Wirkungsgrad auf und sind auch aufgrund der nicht benötigten Spiegelsysteme wartungsärmer. Insbesondere in Stahl lässt sich das Licht des Faserlasers gut einkoppeln und erlaubt hier hohe Schnittgeschwindigkeiten und Schnittdicken. Die Schnittqualität

des Faserlasers ist tendenziell im Vergleich zum CO₂ Laser etwas schlechter, was aber mehr für die Fertigung als für die Stilllegung relevant ist. Faserlaser eignen sich auch für Buntmetalle, CO₂ Laser können aufgrund der größeren Wellenlänge gut für Nichtmetalle – beispielsweise Holz, Kunststoffe und Stein – genutzt werden.

Grundsätzlich können beim Laserschneiden verhältnismäßig viele Prozessgrößen das Trennergebnis beeinflussen. Neben der Art des Lasers und der Laserleistung, sind dies u. a. optische Parameter (Brennweite, Fokusposition), Düsenparameter (z. B. Düsengröße, Düsengeometrie), Schneidgas (Art und Druck) und der Arbeitsabstand.

Durch die hohen Energien, welche beim Laserstrahlschneiden erreicht werden, können – verfahrensabhängig – nahezu alle Materialien bearbeitet und getrennt werden. Das Laserstrahlschneiden zeichnet sich vor allem durch seine hohe Präzision, eine hohe Effizienz, geringe Schnittfugenbreiten und eine hohe Schnittgeschwindigkeit aus.

Je nach eingesetztem Laser lässt sich das Laserlicht mittels Glasfaserleitung zum Einsatzort schicken. Dies in Verbindung mit den fehlenden Rückstellkräften sorgt dafür, dass das Verfahren sich sehr gut für eine Bedienung aus der Ferne eignet. Mobile Handgeräte zum Bearbeiten von rostfreiem Stahl /KIS 99/ als auch der Einbau von Lichtleitern in Industrierobotern /KAU 10/ machen das Laserschneiden zu einem vielfältig einsetzbaren Werkzeug.

Je nach Art und Leistung des Lasers sowie der Verfahrensart können unterschiedliche Schnitttiefen erreicht werden. Laut /IAEA 99/ waren bereits vor über 20 Jahren für unlegierte Stähle Schnitttiefen von 100 mm möglich. Mit einem 20 kW Faserlaser konnten im Rahmen von Testmessungen jeweils 120 mm Edelstahl (SUS304) und 160 mm Kohlenstoffstahl (SM490A) mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/min getrennt werden /JAE 20/. In beiden Fällen wurde Luft als Prozessgas (Volumenstrom 320 Liter pro Minute) verwendet /TAM 16/. Grundsätzlich ist eine starke Abhängigkeit der möglichen Materialstärken und der Schnittgeschwindigkeiten von der Laserleistung und der genutzten Art des Lasers zu beobachten /DAG 23/.

Grundlegende Charakteristiken des Laserstrahlverfahrens sind in Tab. 3.6 aufgeführt.

Ein entscheidender Vorteil des Laserschneidens sind die – insbesondere für geringe Schnitttiefen - vergleichsweise geringen Mengen an Sekundärabfällen, vgl. Tab. 3.7. Dies liegt unter anderem an der geringen Schnittfugenbreite, die allerdings mit zunehmender Materialdicke zur

Rückseite hin sukzessive zunimmt. Im Rahmen von Testmessungen in Japan wurden beispielsweise für 100 mm Edelstahl eine Fugenverbreiterung von etwa 1 mm (Frontseite) auf etwa 18 mm (Rückseite) beobachtet /TAM 16/.

Tab. 3.6 Wesentliche Charakteristiken des Laserstrahlschneidens

Umgebung	Anwendbar an Luft und unter Wasser (mit Einschränkung)
Schnittgeschwindigkeit	Stark abhängig von der Laserleistung /DAG 23/ Etwa 175 (700) mm/min für 20 mm Edelstahl mit 4 (14) kW Etwa 7.5 (50) mm/min für 100 mm Edelstahl mit 4 (14) kW
Schnittdicken	Grundsätzlich abhängig von der Laserleistung Bis etwa 120 mm für Edelstahl mit 10 kW Laserleistung Bis etwa 160 mm für Kohlenstoffstahl
Sekundärabfall	Im Wesentlichen ausgetriebene Schlacke (im Vergleich zu anderen thermischen Verfahren eher gering)
Verbrauchsmaterialien	Prozessgase
Formschnitt	Komplexe Schnitte möglich
Fernhantierung/Automatisierung	Sehr gut für eine Bedienung aus der Ferne zu adaptieren
Aerosole/Hydrossole	Mittlere bis hohe Aerosolfreisetzung, Absaug- und Filtereinrichtung an Luft notwendig Deutliche Reduzierung beim Einsatz unter Wasser
Platzbedarf	Gering (bei Faserlasern und Nd:YAG Lasern)
Materialien	Grundsätzlich für fast alle Materialien geeignet, aber materialspezifische „Optimierungen“ notwendig
Charakteristiken	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelles Verfahren - Hohe Mobilität, auch aufgrund des geringen Platzbedarfs - Hohe (Investitions-)Kosten - Geringe Schnittfugenbreite, insbesondere bei dünnen Materialien - Schnittergebnis wird von verhältnismäßig vielen Parametern beeinflusst

Der Einsatz unter Wasser ist möglich, jedoch derzeit mit deutlichen Einschränkungen in der Materialstärke der zu bearbeitenden Werkstoffe verbunden. Ein wesentlicher Vorteil des Laserschneidens unter Wasser ist eine deutlich geringere Aerosolfreisetzung um einen Faktor von etwa 10.

Tab. 3.7 Vergleich der Mengen an Sekundarabfällen pro getrennten Meter Edelstahl (1.4301) für das Laserschneiden, das Bandsägen und das Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahlschneiden.

Die Werte wurden der Referenz /LES 21/ entnommen.

Materialdicke	Laserschneiden	Bandsäge (1,5 mm Breite)	Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahlschneiden (WASS)
3mm	1,6 – 2,4 g/m	35,5 g/m	470 - 1130 g/m
6 mm	5,8 g/m	70 g/m	500 – 1160 g/m
15 mm	36 g/m	177,76 g/m	560 – 1230 g/m

Ähnlich wie die anderen thermischen Verfahren werden insbesondere an Luft durch das teilweise Verdampfen des Schnittmaterials signifikante Aerosolmengen freigesetzt, so dass in der Regel Absaugvorrichtungen und Filter notwendig sind.

Einer weitverbreiteten Anwendung im Kontext der Stilllegung steht dem Verfahren neben verhältnismäßig hohen (Investitions-)Kosten auch ein hoher technischer Aufwand entgegen. Eine weitere Problemstellung, insbesondere im Falle von in-situ Zerlegungen an Luft, ist der Umgang mit dem Laserstrahl nach Durchtrennung des Werkstücks. Einige der Problemstellungen werden in aktuellen Forschungs- und Entwicklungs- (F+E) Tätigkeiten aufgegriffen, auf die im Kapitel 5 näher eingegangen wird.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Die Mobilität und Flexibilität von Faserlaser-Systemen sind ein wichtiger Grund für ihren Einsatz bei der Stilllegung kerntechnischer Einrichtungen – ein Beispiel ist das System *LaserSnake*, das mit einem 5 kW Faserlaser arbeitet /NEI 17/.

Das Verfahren wurde erfolgreich beim Entfernen von metallischen Abdeckungen von Betonwänden in Speicherbecken im Kernkraftwerk Greifswald eingesetzt /IAEA 02/.

3.2.1.1.5 Plasma-Schmelzschneiden

Das *Plasma-Schmelzschneiden* (auch: Plasmaschneiden, englisch: *Plasma cutting*) ist ein auf einem geschlossenen Stromkreis basierendes thermisches Verfahren, bei dem die sehr hohe Temperatur eines Plasmas zur lokalen Materialverflüssigung genutzt wird. Ein schematisches Bild der für das Verfahren genutzten Plasmadüse ist in Abb. 3.5 dargestellt.

Da das Werkstück und die Elektrode der Schneiddüse einen geschlossenen Stromkreis bilden, ist das Verfahren nur für leitende, metallische Werkstücke geeignet – durch ein indirektes Verfahren unter Zuhilfenahme einer sogenannten Opferanode kann das Verfahren aber für das Trennen von nicht-leitenden Materialien genutzt werden.

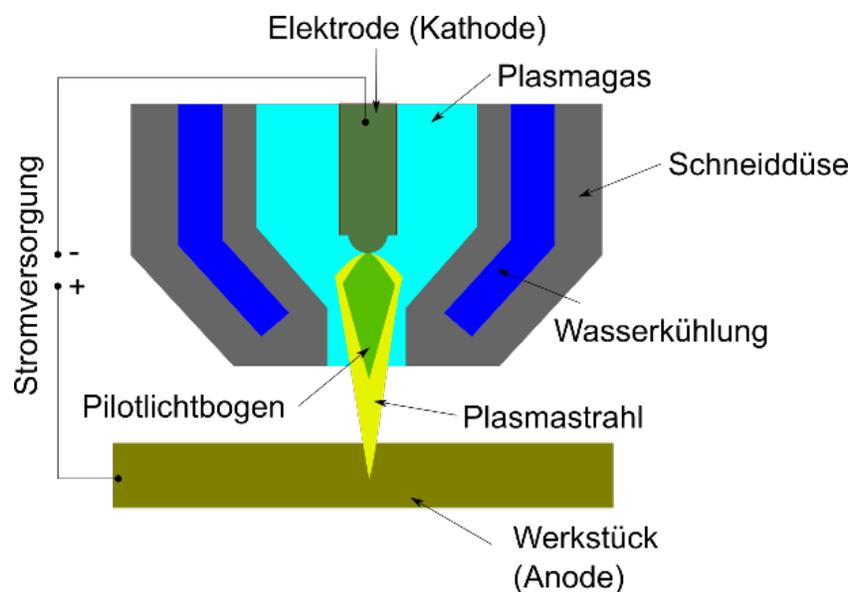


Abb. 3.5 Schematisches Bild des (direkten) Plasma-Schmelzschneidens mit Fokus auf die Düsengeometrie

Bei der Verfahrensanwendung wird zunächst zwischen der Elektrode und der Düse durch Hochspannung ein energiearmer Pilotlichtbogen gezündet. Dieser Lichtbogen ist dazu da, um die Gasstrecke zwischen Kathode und Werkstück teilweise zu ionisieren, so dass sich entlang dieser Wegstrecke ein (elektrisch leitfähiges) Plasma ausbilden kann. Sobald der Pilotlichtbogen das zu schneidende Werkstück erreicht, wird der eigentliche Stromkreis geschlossen und ermöglicht so die Ausbildung des eigentlichen Schneidlichtbogens mit deutlich höherer Leistung. Als Arbeitsgas wird häufig auf Argon, Stickstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Luft oder etwaige Gemische zurückgegriffen.

Das Plasma bezeichnet hierbei eine Sonderform des Lichtbogens, welcher beim Plasmaschmelzschnitten in eingeschnürter Form und dabei mit deutlich gesteigerter Energiedichte vorliegt /KRE 08/. Eine räumliche Konzentration des Lichtbogens bewirkt neben einer signifikant erhöhten Energiedichte (und damit höheren Temperaturen) auch eine deutlich verbesserte Lagestabilität /RUG 93/. Die Einschnürung des Lichtbogens erfolgt beim Plasmaschneiden durch eine gekühlte Düse und den sog. Pincheffekt. Die hohe Temperatur des eingeschnürten Lichtbogens (10.000 - 24.000 K /OECD 14/) in Verbindung mit der kinetischen Energie der Plasmagasströmung sorgt dafür, dass das Werkstück nicht nur aufgeschmolzen, sondern die Schmelze gleichzeitig aus der zu bearbeitenden Zone getrieben wird.

Grundsätzlich wird zwischen dem *direkten Plasma-Schmelzschnitten* (Hauptlichtbogen zwischen Kathode und Werkstock) und dem *indirekten Plasma-Schmelzschnitten* (Hauptlichtbogen zwischen Kathode und Düse bzw. einer Opferanode) unterschieden, wobei in der Praxis vorwiegend auf das direkte Verfahren zurückgegriffen wird. Das indirekte Verfahren ist unabhängig vom Werkstück und erlaubt somit auch die Zerlegung elektrisch nichtleitender Werkstücke. Des Weiteren haben sich für das direkte Plasmaschmelzschnitten mehrere Verfahrensvarianten etabliert, die im Folgenden beschrieben werden.

Wesentliche Charakteristika des Verfahrens sind in Tab. 3.8 zusammengefasst.

Konventionelles (direktes) Plasmaschneiden

Bei dieser einfachsten Verfahrensart wird Luft als Plasmagas genutzt, die Bündelung des Hauptlichtbogens erfolgt durch den Innendurchmesser der Plasmadüse. Die Schnittqualität ist bei diesem Verfahren von untergeordneter Rolle.

(Direktes) Plasmaschneiden mit Sekundärmedium

Bei diesem Verfahren wird ein Sekundärmedium genutzt, durch das um den Lichtbogen herum eine definierte Atmosphäre erzeugt wird, wodurch eine Einschnürung des Lichtbogens erzielt werden kann. Der Plasmastrahl wird somit kleiner und die lokale Energiedichte nimmt zu, was zu einer höheren Schnittgeschwindigkeit beiträgt.

Tab. 3.8 Wesentliche Charakteristiken des Plasmaschmelzschneidens

Umgebung	Anwendbar an Luft und unter Wasser
Schnittgeschwindigkeit	Sehr schnell Etwa 2000 mm/min für Baustahl mit einer Dicke von 10 mm Etwa 250 mm/min für Edelstahl mit einer Dicke von 150 mm
Schnitttiefe	Edelstahl: Etwa 150 mm an Luft bzw. 100 mm unter Wasser
Sekundärabfall	Schlacke und Prozessgase
Verbrauchsmaterialien	Düsen und Prozessgase
Formschnitt	Möglich
Fernhandierung	Gut möglich, auch aufgrund fehlender Rückstellkräfte
Aerosole/Hydrossole	Hohe Freisetzung
Platzanspruch	Sehr gering
Materialien	Leitfähige Materialien (insbesondere hochlegierte Stähle)
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Schnittgeschwindigkeit • Für die Praxis häufig ausreichende, aber limitierte Schnitttiefe • Verhältnismäßig große Schnittfugenbreite • Sehr hohe Aerosolfreisetzung • Reduzierte Trennleistung beim Einsatz unter Wasser

(Direktes) Plasmaschneiden mit Wasserinjektion

Bei dieser Verfahrensart wird ein nach vorne gerichteter Wassermantel um den Lichtbogen erzeugt. Dies bedingt eine Einschnürung und hat zudem eine kühlende Wirkung auf das Werkstück, wodurch der Effekt thermisch bedingter Verformungen reduziert wird.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die Vorteile beim Plasmaschmelzschneiden liegen in der – auch im Vergleich zum autogenen Brennschneiden - hohen Schnittgeschwindigkeit. Diese ist zum einen materialabhängig (Materialart und Materialstärke) und hängt zum anderen von Prozessparametern wie den Plasmastrom ab. Typische Geschwindigkeitsrichtwerte für das Trennen von Baustahl mit einer Dicke von 10 mm bzw. 40 mm sind 200 cm/min bzw. 100 cm/min. Die trennbaren Materialstärken sind hoch: Rostfreie Stähle mit einer Materialstärke von 150 mm (Schneiden an Luft) bzw. 100 mm (Schneiden

in Wasser) stellen kein Problem dar. Mit steigenden Materialstärken steigt auch der Strom bzw. Leistungsbedarf: Mit einer 600 Ampere starken Plasmastrahlquelle (Anschlussleistung: 190 kVA) kann z. B. 150 mm dicker Edelstahl mit einer Schnittgeschwindigkeit von 250 mm/min geschnitten werden.

Darüber hinaus ist das Verfahren aufgrund vernachlässigbarer Rückstellkräfte und kompakten Werkzeugen gut für einen fernhantierten Einsatz geeignet /EUR 95/. Die maximale Tiefe, in welcher das Plasmaschmelzschnitten möglich ist, ist abhängig vom hydrostatischen Druck, welcher den Gasdurchsatz beeinflusst und liegt bei ungefähr 10,5 m /OECD 14/.

Das Plasmaschneiden ist je nach gewählter Verfahrensart auch gut unter Wasser einsetzbar. Das Wasser bedingt zum einen eine Einschnürung des Plasmastrahls, zum anderen hat es eine abschirmende Wirkung und reduziert somit u. a. die (nicht unwesentliche) Lärm- und Strahlungsbelastung. Durch die kühlende Wirkung ist aber zum Schneiden von Material gleicher Stärke im Vergleich zum Schneiden an der Luft ein höherer Energieeintrag notwendig.

Bei der Anwendung entstehen große Mengen an Aerosolen, Rauch und Staub mit geringer Korngröße (typischerweise kleiner als 3 μm) /LAI 16/. Aus diesem Grunde müssen bei Arbeiten an Luft entsprechende Vorkehrungen (insbesondere Lüftungsanlagen, Filter und ggfs. Einhausungen) getroffen werden. Auch für Arbeiten unter Wasser müssen Filteranlagen genutzt werden, da sich ansonsten aufgrund der Partikelbildung die Sicht auf das zu trennende Werkstück eintrübt.

Für die Breite der beim Plasmaschneiden entstehenden Schnittfuge gilt die Faustformel, gemäß der die Breite ungefähr das Doppelte der Düsenbohrung ist. Die Düsenbohrung wiederum bestimmt die Höhe der zulässigen Stromstärke: Ein Bohrungsdurchmesser von 1,4 mm ist beispielsweise ausgelegt für eine Stromstärke von 120 A, während ein Durchmesser von 6 mm für 1000 A ausgelegt ist. Der Düsendurchmesser vergrößert sich mit der Zeit aufgrund von Verschleiß. Auch weitere Parameter wie ein zu hoher Brennerabstand, eine zu hohe Spannung oder eine zu niedrige Schneidgeschwindigkeit können die Schnittfuge aufweiten. Im Allgemeinen ist die Schnittfuge im Vergleich zum autogenen Brennschneiden beim Plasmaschneiden breiter.

Praktische Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

In der Stilllegung gehört das Plasmaschneiden zu den etabliertesten Verfahrenen. Es findet vor allem dort Anwendung, wo Materialien bearbeitet werden müssen, bei denen das autogene Brennschneiden versagt. Dies trifft beispielsweise auf hochlegierte Stähle, Kupfer oder Aluminium zu.

Es wurde bzw. wird u. a. häufig bei hoch aktivierten Komponenten bspw. im Inneren des RDB (in Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN) und Kernkraftwerk Gundremmingen A (KRB A) eingesetzt /IAEA 02/. Darüber hinaus kam bzw. kommt das Verfahren für viele kleinere Maßnahmen zum Einsatz, z. B. wurde es im Kernkraftwerk Greifswald (KGR) für die Zerlegung eines Gullywasserbehälters genutzt.

Bei Zerlegungsarbeiten des RDB im Kernkraftwerk Yankee Rowe (USA) kam es aus Sicht des Strahlenschutzes zu Problemen. Dadurch, dass das Plasma feine Partikel generiert, welche aufgrund der durch die Hitze erzeugten thermischen Strömung schwer zu kontrollieren sind, kam es bei Abbauarbeiten im Inneren des RDB zu hohen Dosisraten an der Wasseroberfläche /EPRI 07/. Des Weiteren führten im Wasser generierte Gasblasen zu einer signifikanten Kontaminationsfreisetzung, welche den Einbau von Filtereinlagen nötig machten.

3.2.1.1.6 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung

Bei der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung erfolgt der Materialabtrag auf thermische Weise mit Hilfe lokaler Lichtbögen, die zwischen dem Werkstück und einer Elektrode entstehen. Das Material des Werkstücks schmilzt und verdampft lokal und wird anschließend durch eine geeignete Spülströmung aus dem Arbeitsbereich entfernt. Da das Verfahren eine elektrische Potentialdifferenz zwischen Werkstück und Elektrode voraussetzt ist es nur für metallische Gegenstände geeignet. Das Verfahren ist grundsätzlich unter Wasser einsetzbar bzw. ist dort sogar vorteilhaft oder sogar ausschließlich einsetzbar.

Obschon erste Verfahrensentwicklungsarbeiten bereits in den 1950er Jahren (insbesondere auf dem Gebiet der ehemaligen Sowjetunion aufgenommen) und seitdem in weiteren Ländern fortgesetzt wurden, ist der Verfahrensansatz auch weiterhin Gegenstand aktueller F+E-Tätigkeiten, siehe z. B. Abschnitt 5.1.3. Dies begründet sich durch die grundsätzliche Eignung für stilllegungsorientierte Trennarbeiten bei gleichzeitigem noch vorhandenem Potenzial für Verfahrensverbesserungen bzw. Weiterentwicklungen (z. B. vor dem Hintergrund des Elektrodenverschleißes).

In der Praxis haben sich drei Verfahrensvarianten etabliert, die im Folgenden näher beschrieben werden. Obschon diese in ihren Bezeichnungen Begriffe wie Schneiden, Trennen und Bohren nutzen, die ein mechanisches Verfahren nahelegen, handelt es sich bei allen drei Varianten um thermische Verfahren.

Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC)

Beim *Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden* (englisch: *Contact-Arc-Metal-Cutting (CAMC)*) wird eine planparallele, plattenförmige Elektrode über einen Schweißgleichrichter¹⁰ mit Spannung versorgt. Das Verfahren ist für den Einsatz unter Wasser konzipiert und schematisch in Abb. 3.6 dargestellt. Über den beim Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück entstehende Lichtbogen kann das Werkstückmaterial oberflächennah aufgeschmolzen werden. Rechts und links neben der Elektrode angebrachte Spüldüsen sorgen dafür, dass eine Wasserströmung erzeugt wird, durch welche die Schmelze nach unten aus der Schnittfuge heraus abgetragen wird /KRE 08/.

Das Verfahren nutzt geringe Spannungen (< 60 V) und hohe Stromstärken (bis 4000 A). Der Verbrauch der Elektrode hängt wesentlich von der Elektrodenspülung ab, die typischerweise einem Volumenstrom von einigen Kubikmetern pro Stunde aufweist. Die Spülung kühlt zum einen die Elektrode, zum anderen werden aber auch freigesetzte Partikel aus der Schnittfuge getrieben.

Der Elektrodenverschleiß bzw. die mechanische Belastung der Elektrode steigt im Allgemeinen mit der Materialstärke. Aufgrund der Belastungen werden die Elektroden häufig aus Metall oder Grafit bzw. faserverstärktem Grafit gefertigt. Der Vorteil von faserverstärktem Grafit ist eine deutlich höhere mechanische Festigkeit, so dass die Wahrscheinlichkeit von Elektrodenbrüchen reduziert wird. Grafit hat als Elektrodenmaterial gegenüber Metall zudem den Vorteil, dass sich die Elektrode nicht selbst in der Schnittfuge verschweißen kann /LAR 12/.

¹⁰ Ein Schweißgleichrichter wird üblicherweise für Schweißarbeiten genutzt und wandelt Drehstrom in Gleichstrom um.

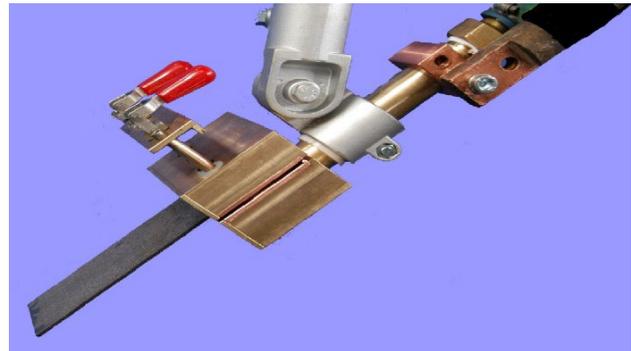
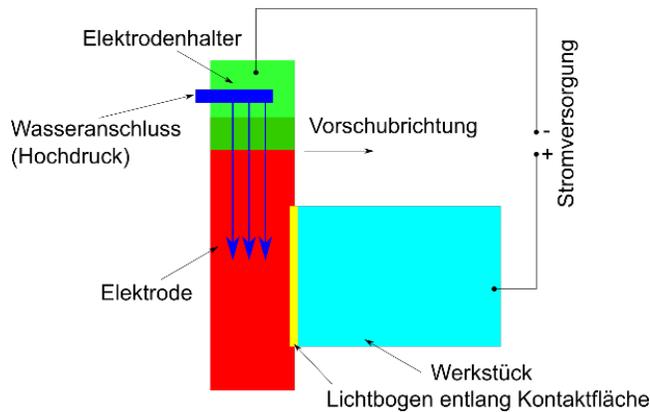


Abb. 3.6 Links: Schematische Darstellung des Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneidens Rechts: Bild eines CAMC-Elektrodenhalters (Bildquelle: Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, Abteilung Unterwassertechnikum Hannover)

Die durch CAMC zerlegbaren Werkstücke können Materialstärken von bis zu 300 mm aufweisen. /KRE 08/. Für korrosionsbeständigen Stahl mit einer Materialstärke von 70 bis 130 mm wurde ein relative Werkzeugverschleiß¹¹ von etwa 2,5 % beobachtet /KRE 08/. Die Wandstärke hat wesentlichen Einfluss auf die Schnittgeschwindigkeit. Mit Verfahrenstechniken der späten 1990er Jahren wurden Schnittgeschwindigkeiten von 1 mm/min (Wandstärke von ca. 250 mm) bzw. 200 mm/min für (Wandstärken von ca. 20 mm) erreicht /BAC 98/.

Wesentliche Faktoren, die die Anwendbarkeit des Verfahrens in Abhängigkeit der Materialstärke signifikant beeinflussen, sind die Elektrodenspülung und die Prozessstabilität. So wurde in /KRE 08/ für die Verfahrenstechnik auf dem Stand der frühen 2000er Jahre festgehalten, dass ab Materialstärken von ca. 40 mm keine reproduzierbaren und prozesssicheren Schnitte mehr möglich sind und in der Praxis häufig Dauerkurzschlüsse, Überlastungen und ein Abschalten der Stromquelle beobachtet werden.

Im Rahmen der Dissertation von Kremer wurden grundlegende Arbeiten an der Verfahrenstechnik durchgeführt. Wesentliche Ziele waren hierbei eine Erhöhung der Spüldrücke und Volumenströme sowie ein vereinfachter Wechsel/Austausch der Spüldüsen und Elektroden. Der hierbei

¹¹ Der relative Werkzeugverschleiß ist definiert als das Verhältnis des verschleißbedingten Volumenverlustes des Werkzeuges zum Volumenverlust des Werkstücks durch Abtrag und wird für gewöhnlich in % angegeben.

entwickelte Prototyp konnte, wie weiter unten beschrieben wird, erfolgreich bei der Stilllegung des Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR) eingesetzt werden /KRE 08/.

Die Eignung des Verfahrens für das Trennen unter Wasser ist gegeben. Für dickwandige bzw. mehrwandige Bauteile gehört es zurzeit jedoch nicht zu den Standardverfahren, was insbesondere auf den hohen Elektrodenverschleiß zurückzuführen ist.

Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG)

Das *Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen Verfahren* (englisch: *Contact-Arc-Metal-Grinding (CAMG)*) funktioniert über eine sich schnell drehende Elektrodenscheibe, welche mit dem Werkstück in Kontakt kommt. Es ist für den fernhantierten Unterwassereinsatz konzipiert, kann aber auch (ggfs. mit Modifikationen) an Atmosphäre und/oder handgeführt genutzt werden /KRE 08/.

Das Verfahren ist schematisch in Abb. 3.7 dargestellt. Die geometrische Anordnung von Werkzeug zum Werkstück entspricht dabei dem Trennschleifen, die Materialtrennung erfolgt bei diesem Verfahren jedoch thermisch. Bei Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück werden lokale Lichtbögen erzeugt, welche den zu trennenden Werkstoff oberflächennah aufschmelzen. Durch die Rotation der Elektrode wird eine Spülströmung erzeugt, welche dafür sorgt, dass die schmelzflüssige Phase aus der zu bearbeitenden Zone direkt herausgespült wird.

Für die Rotationsbewegung muss die Elektrode mit einem geeigneten Antrieb versehen werden und wird zudem über einen Schweißgleichrichter mit Spannung versorgt. Die Übertragung der hohen Prozessströme auf die Antriebswelle erfordert entsprechende Stromüberträger, so dass entsprechende CAMG-Geräte aus anlagentechnischer Perspektive vergleichsweise aufwendig und komplex sind. Für die Stromübertragung wurden in der Praxis zunächst Kohlebürsten genutzt, Quecksilber für die Stromübertragung kam erstmals in der Dissertation von Philipp zum Einsatz, wodurch der benötigte Bauraum erheblich reduziert werden konnte /PHI 01/.

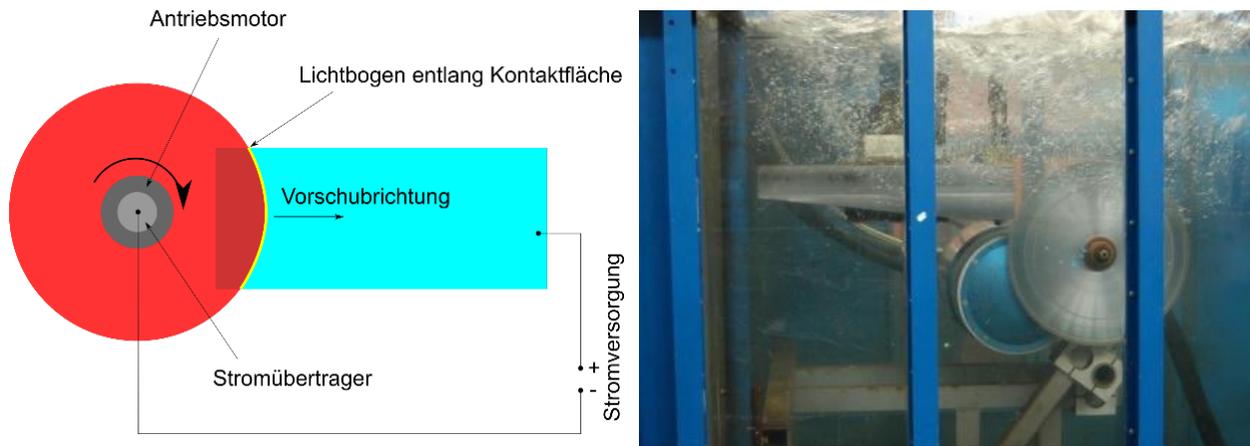


Abb. 3.7 Links: Schematische Darstellung Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifens Rechts: Fotoaufnahme einer Verfahrensanwendung (Bildquelle: Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, Abteilung Unterwassertechnikum Hannover)

Für CAMG-Geräte, die bis etwa zum Jahr 2000 entwickelt wurden, orientiert sich der Mindestarbeitsstrom an der Werkstückdicke: Für Materialstärken bis 200 mm (750 mm) betrug dieser 15.000 A (30.000 A) /KRE 08/. Durch verbesserte Prozessverständnisse und eine dadurch bedingte systematische Weiterentwicklung konnte der Strombedarf zwischenzeitlich erheblich reduziert werden, so dass – unabhängig von der Materialstärke – auch handelsüblich geregelte Stromquellen mit 500 bis 1.2000 A mittlerweile ausreichend sind /KRE 08/.

Das CAMG erlaubt das Auftrennen komplexer und dickwandiger Strukturen und ist insbesondere für Materialstärken größer als 100 mm gedacht. Die Schnitttiefen können somit durchaus 260 mm oder mehr betragen und werden lediglich durch den Scheibendurchmesser /KAU 10/ und relevanten Anlagenparametern begrenzt.

In der Dissertation von Philipp wurden für Blechdicken bis 20 mm Verschleißwerte von 6 bis 12 % für die Elektrode angegeben. Es wurde festgestellt, dass der Elektrodenverschleiß maßgeblich durch den zwischen der Elektrodenseitenfläche und der Schnittfuge brennende Lichtbogen beeinflusst wird. Erste Ansätze auf Basis einer elektrisch isolierenden Beschichtung der Elektrodenseitenflächen mit thermisch gespritzten keramischen Isolationsschichten führten zu keiner signifikanten Verbesserung /PHI 01/. In der Dissertation von Kremer wurden u. a. unterschiedliche Elektrodenkonzepte (z. B. konisch und gestuft) evaluiert /KRE 08/. Hierbei konnte gezeigt werden, dass sich bei der Verwendung gestufter Elektroden die Brennschmelzen auf die Elektrodensegmente

konzentrieren. Durch eine Reduzierung der Prozessströme und eine erhöhte Prozessstabilität konnte in dieser Arbeit der Elektrodenverschleiß um den Faktor 30 reduziert werden.

Als Elektrodenmaterialien sind in der Vergangenheit z. B. Metall, Graphit und faserverstärktes Graphit zum Einsatz gekommen /IAEA 02/. Im Vergleich zu CAMC ist die Schnittgeschwindigkeit von CAMG hoch. In der Literatur werden für Werkstoffe mit einer Stärke von 15 mm Schnittgeschwindigkeiten von 3 m/min aufgeführt /YOK 90/.

Wesentliche Herausforderungen bilden Verschleißwerte, die Prozessstabilität sowie der verhältnismäßig große apparative Aufwand. Obschon in den beiden vorangegangenen Dekaden deutliche Fortschritte erzielt wurden, werden auch weiterhin F+E Tätigkeiten verfolgt, die sich mit Verfahrensverbesserungen auseinandersetzen, siehe z. B. Abschnitt 5.1.3.

Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren (CAMD)

Das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren (englisch: *Contact-Arc-Metal-Drilling (CAMD)*) Verfahren wurde mit dem Ziel entwickelt, Anschlagpunkte in Bauteilen aus austenitischen Komponenten zu erzeugen /KRE 08/. CAMD ist ein verhältnismäßig neues technisches Verfahren mit dem – ohne wesentliche Rückstellkräfte – Bohrlöcher und Sackbohrungen erzeugt werden /IAEA 02/.

Beim Verfahren wird zwischen der Elektrode und dem Werkstück eine Strömungsbewegung durch in die Stabelektrode eingebrachte Spülkanäle erzeugt. Ein Lichtbogen, welcher durch Kontakt von Elektrode und Werkstück erzeugt wird, schmilzt das Werkstück auf und die entstehende Schmelze kann von der Wasserströmung aus dem zu bearbeitenden Bereich abgetragen werden. Eine schematische Darstellung des Verfahrens zeigt Abb. 3.8.

In der Praxis gehört dieses Verfahren derzeit nicht zu den Standardverfahren und ist höchstens als Hilfsmittel vorgesehen.

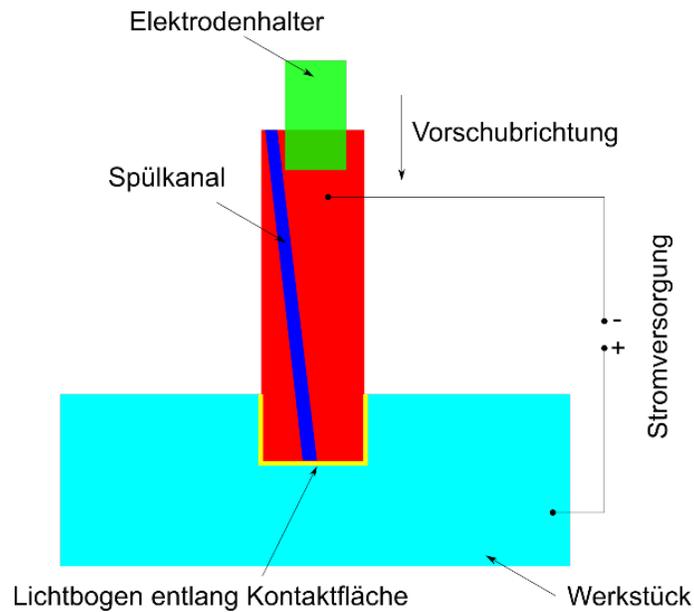


Abb. 3.8 Schematische Darstellung des Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohrens

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung ist grundsätzlich für den Einsatz unter Wasser ausgelegt, es wurden aber auch Werkzeuge für den Betrieb an Luft entwickelt /KRE 08/. Bei der Verwendung unter Wasser korrelieren die Schneidfähigkeiten nur schwach mit der Wassertiefe.

Das Anwendungsspektrum beschränkt sich verfahrensinhärent auf elektrisch leitfähige Werkstoffe. Die Methode kann, im Gegensatz zum Plasma- und Laserstrahlschneiden, auch gut für Strukturen mit Hohlräumen und Sandwichstrukturen genutzt werden.

Die Anwendbarkeit des CAMC-Verfahrens in Abhängigkeit der Materialstärke hängt entscheidend von der Wasserspülung und den Elektrodeneigenschaften ab. Insbesondere ein hoher Elektrodenverbrauch, klemmende Elektroden und Stromüberlastungen wurden in der Vergangenheit auf eine unzureichende Wasserspülung zurückgeführt. Die genutzte Verfahrenstechnik muss somit zum Trennen der vorgesehenen Materialstärken genügen.

Da das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennen zu den thermischen Verfahren gehört, ergibt sich eine relative hohe Hydrosolfreisetzung im Bereich von 6 % /PRI 97/. Durch diese Hydrosole wird das Wasser beim Schneiden eingetrübt, so dass eine entsprechende Wasserfilterung notwendig ist. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit beim CAMG-im Vergleich zum CAMC-Verfahren

ist der Anteil der im Wasser verweilenden Partikelmasse deutlich höher (19 % bzw. 7 % im Mittel) /KRE 08/. Die beim CAMG- im Vergleich zum CAMC-Verfahren erzeugten Sedimentpartikel sind tendenziell kleiner und haben Durchmesser von unter 1 mm /KRE 08/.

Die Verfahren CAMC und CAMG erlauben zwar nur lineare Schnitte, dafür sind sie aber auch für sehr komplexe Geometrien geeignet. Zudem ist das Verfahren gut für eine Fernbedienung geeignet, auch eine Handführung ist grundsätzlich möglich /KRE 08/. Eine Übersicht relevanter Verfahrenscharakteristika ist in Tab. 3.9 zu finden.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das CAMC-Verfahren wurde im Zuge der Stilllegung des MZFR- erfolgreich eingesetzt /BAC 06/,/KRE 08/. Hierbei wurde z. B. der untere Teil des thermischen Schildes im RDB zerlegt. Dieser bestand aus korrosionsbeständigem Stahl mit Materialstärken von 70 bis 130 mm. Dieser wurde fernhantiert in einer Wassertiefe von 8 Metern in 20 Segmente zerlegt. Eine besondere Herausforderung war die geringe Spaltdicke zwischen dem Bauteil und dem RDB, die stellenweise nur 20 mm betrug.

Eine erste Machbarkeitsstudie wurde 2003 durchgeführt. Hierbei wurde eine Elektrodenspülung von 2,5 m³/Stunde bei einem Wasserdruck von 0,15 MPa verwendet und unterschiedliche Elektrodenmaterialien (Grafit, kohlefaserverstärkter Kunststoff, Wolfram-Kupfer) evaluiert. Diese Studie stellte einen hohen Elektrodenverschleiß von bis zu 24 % fest. Zudem wurden Nebenlichtbögen, klemmende Elektroden und überlastete Stromquellen festgestellt.

Mit einem überarbeiteten Ansatz wurde 2005 eine weitere Machbarkeitsstudie durchgeführt. Hierbei wurde der Schneidstrom auf 700 A begrenzt und die Spüleigenschaften (Volumenstrom von 17 m³/Stunde bei einem Druck von 1,1 MPa) signifikant verbessert. Da bei dieser Anlagenkonfiguration ein Festklemmen der Elektrode nicht mehr beobachtet wurde, kam Grafit anstelle von kohlefaserverstärktem Grafit als Elektrodenmaterial zum Einsatz. Im Rahmen der Studie wurde ein deutlich geringerer Elektrodenverschleiß von 2,5 % festgestellt. Nach weiteren Erprobungen am Mock-Up konnte die Maßnahme Ende 2005 erfolgreich durchgeführt werden.

Darüber hinaus kam das CAMC Verfahren bei der Zerlegung von RDB-Einbauten des KGR, KRB-A und des Kernkraftwerks Rheinsberg (KKR) zur Anwendung /KAU 10/.

Perspektivisch soll das CAMC Verfahren für die Zerlegung des RDB des Nuklearschiffs Otto Hahn genutzt werden /HEL 20/, insbesondere für Schnitte durch komplexe Geometrien wie die Tragplatte oder Formrippen des Kernmantels. Hierfür soll ein versatiler Verpackungsmanipulator genutzt werden, an den das CAMC-Modul befestigt werden kann.

Das CAMG-Verfahren (im englisch-sprachigen Raum auch bekannt unter dem Begriff *arc saw*) wurde im kerntechnischen Bereich erstmals am *Japan Power Demonstration Reactor* (JPDR) eingesetzt /IAEA 99/. Der Durchmesser der genutzten Elektrode betrug 1.000 mm, das Gerät wurde mit Arbeitsströmen zwischen 20 und 40 kA eingesetzt, um plattierten Stahl mit Materialstärken zwischen 73 und 260 mm über eine Gesamtlänge von etwa 100 Metern zu trennen. Bei diesen Arbeiten wurden insgesamt 24 Elektroden verbraucht, was den (damaligen) Elektrodenverschleiß gut verdeutlicht.

Tab. 3.9 Wesentliche Charakteristiken der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung

	Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC)	Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG)	Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren (CAMD)
Umgebung	Für den Einsatz unter Wasser konzipiert. Für CAMC und CAMG wurden auch Werkzeuge für den Einsatz an Luft entwickelt.		
Schnittgeschwindigkeit	Etwa 1 mm/min für 10 mm Wandstärke Etwa 200 mm/min für 250 mm Wandstärke	Etwa 3 m/min für 15 mm	-
Schnittdicken	Bis etwa 300 mm, Wandstärke beeinflusst Werkzeugverschleiß	Im Wesentlichen beschränkt durch die Elektroden-scheibe	-
Sekundärabfall	Elektrodenmaterial, Sedimente, Filter		
Verbrauchsmaterialien	Elektroden und Prozesswasser		
Formschnitt	Aufgrund des Schwertes nur stückweise lineare Schnitte möglich	Lineare Schnitte	Stückweise Bohrungen
Fernhantierung/Automatisierung	Für eine Bedienung aus der Ferne konzipiert, eine manuelle Bedienung mit entsprechend angepassten Werkzeugen ist aber möglich		
Aerosole/Hydrossole	Geringe Aerosolfreisetzung unter Wasser / signifikante Hydrosolfreisetzung die zur Wassertrübung beiträgt		
Platzbedarf	Gering	Gering bis Mittel	Gering
Materialien	Elektrisch leitfähige Materialien		
Charakteristiken	<ul style="list-style-type: none"> - Verhältnismäßig geringe Prozessstabilität / Standzeiten - Mäßige Geschwindigkeit - Schnittfugenbreite wird durch die Schwertdicke bestimmt (einige mm) - Im Regelbetrieb geringe Rückstellkräfte - Geeignet für komplexe Geometrien 	<ul style="list-style-type: none"> - Mäßige Prozessstabilität - Schnelles Verfahren - Schnittfugenbreite aufgrund der Elektrodengeometrie im Bereich eines cm - Im Regelbetrieb geringe Rückstellkräfte - Anwendbar auch für sehr hohe Materialstärken 	<ul style="list-style-type: none"> - Einfach zu kontrollierendes (Hilfs-) verfahren

3.2.1.1.7 Funkenerosive Bearbeitungsverfahren

Das Funkenerodieren (englisch: *Electrical Discharge Machining* (EDM)) basiert auf einer Funkenentladung zwischen einer Elektrode und einem elektrisch leitenden Werkstück. Das Funkenerodieren ist ein hoch präzises Verfahren, welches insbesondere in der Fertigung als auch bei der Bearbeitung von harten Bauteilen genutzt wird.

Beim Funkenerodieren wird eine Grafitelektrode im Abstand der Funkenspaltweite (5 bis 400 µm) über dem zu bearbeitenden Materialwerkstoff angebracht. Der Prozess findet in Wasser oder einem öl-haltigem dielektrischem Medium statt. Ist das angelegte elektrische Feld ausreichend hoch, um den Widerstand des dielektrischen Mediums zwischen Werkstück und Elektrode zu überwinden (Überschreiten der Durchschlagsspannung) kommt es zu einem Funkenüberschlag. Durch diesen wird der Werkstoff lokal stark erhitzt. Die dabei entstehenden hohen Temperaturen und Energiedichten sorgen dafür, dass sowohl das Werkstück- als auch das Elektrodenmaterial aufschmelzen bzw. verdampfen. Im dielektrischen Medium breitet sich zeitgleich eine Gaskaverne aus. Beim Abschalten der Spannung wird die Entladung aktiv gestoppt und es kommt zu einer Implosion der Gaskaverne. Die Energie dieser Implosion zerstäubt das schmelzflüssige Material. Das dielektrische Medium sorgt zudem dafür, dass dieses abkühlt und aus dem zu bearbeitenden Bereich herausgewaschen wird /KRE 08/. Hierzu dient eine Fensterfilteranlage mit Ansaugung, durch welche Partikel in der Nähe der Schnittfuge abgesaugt werden können /THI 09/.

Dadurch, dass die Elektrode nie mit dem zu bearbeitenden Werkstoff in Verbindung steht, können die Materialanforderungen an die Elektrode bzgl. Festigkeit und Gewicht drastisch reduziert werden. Da die Brenndauer des Lichtbogens nur kurz und die übertragenen Ströme gering sind spricht man jedoch nicht von einem Lichtbogen, sondern von Funkenübertragung. Darüber hinaus sind die Verschleißerscheinungen deutlich geringer als bei den Lichtbogenverfahren /OECD 14/. Nach jedem Funkenübertrag wird die Spannung abgeschaltet, so dass sich kein kontinuierlicher Lichtbogen ausbilden kann. Eine hohe Entladefrequenz von etwa 10 bis 80 kHz sorgt dafür, dass die Materialabtragung quasi-kontinuierlich erfolgt.

Die Schneidgeschwindigkeit ist gering und die grundsätzlich hohe Genauigkeit des Prozesses ist abhängig von der Qualität des dielektrischen Mediums und der Abstandskontrolle zwischen Elektrode und zu bearbeitendem Werkstoff /KRE 08/.

Metallzerspannungsverfahren (MDM)

Das Metallzerspannungsverfahren (englisch: *Metal Disintegration Machining* (MDM)) ist dem EDM-Verfahren ähnlich, funktioniert jedoch über eine pulsierende Elektrode und benötigt eine Stromversorgung mit Wechselspannung. Wird die Elektrode nahe an ein Werkstück gebracht formt sich eine Ionensäule, welche einen Stromtransport über den Spalt zwischen Werkstück und Elektrode ermöglicht. Dies sorgt für eine hohe Energiedichte kurz bevor ein Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück zustande kommt. Die Anforderungen an die Elektronik sind im Vergleich zum EDM-Verfahren deutlich geringer, so dass das Verfahren im direkten Vergleich eine günstigere Alternative darstellt /OECD 14/. In der Präzision, der Oberflächenbeschaffenheit des zu schneidenden Werkstücks, als auch in der Abtragungsrate der Elektrode sind jedoch deutliche Abzüge gegenüber dem EDM-Verfahren festzustellen.

Für das MDM-Verfahren wird eine Stromversorgung (Wechselspannung) von 20 kVA benötigt. Die Elektrode vibriert ca. 3600-mal pro Minute. Kurz vor jedem Kontakt von Elektrode zu Werkstück kommt es zu einem Überschlag von Funken in dessen Folge das zu bearbeitende Material aufgeschmolzen wird. Hierbei werden Temperaturen von ungefähr 3100 °C erreicht /OECD 14/. Ähnlich zum EDM-Verfahren spült die Flüssigkeit des dielektrischen Mediums das aufgeschmolzene Material fort.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die funkenerosiven Bearbeitungsverfahren haben eine hohe Präzision und eine vergleichsweise geringe Schnittgeschwindigkeit. Zudem ist das Materialspektrum begrenzt, da sich das Verfahren nur für elektrisch leitfähige Materialien einsetzen lässt. Neben dem Trennen können die Verfahren auch für das Bohren von Löchern genutzt werden.

Ein Vorteil des Verfahrens stellt das geringe Aufkommen von Sekundärabfällen dar. Dies ist auch auf den periodischen und nicht-kontinuierlichen Bearbeitungsprozess zurückzuführen (Funkenüberschläge anstelle eines Lichtbogens). Das Verfahren kann sowohl an Luft als auch unter Wasser und auch in schwierigen geometrischen Verhältnissen, bspw. bei RDB-Inneneinbauten, eingesetzt werden /KAU 10/. Eine Übersicht relevanter Charakteristika ist in Tab. 3.10 zu finden.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das EDM-Verfahren ist als Instandsetzungs- bzw. Wartungsverfahren im Leistungs- als auch Stilllegungsbetrieb von Leistungsreaktoren geeignet. Beispielhaft sind hier Abbauarbeiten von nicht mehr funktionstüchtigen Materialien (Sägeband mit Tungsten Carbide Zahnsitzen, Entfernen bzw. Zersägen von Schrauben zur Demontage von Großkomponenten) /MAS 98/.

Tab. 3.10 Wesentliche Charakteristiken des Funkenerodierens

Umgebung	An Luft und unter Wasser
Schnittgeschwindigkeit	Sehr gering (EDM) bis gering (MDM)
Schnitttiefe	Bis etwa 80 mm in der Praxis
Sekundärabfall	Elektrodenmaterial, ggfs. Filter
Verbrauchsmaterialien	Elektroden, Dielektrikum
Formschnitt	Komplexe Schnitte möglich
Fernhandierung	Möglich
Aerosole/Hydrossole	Freisetzung von feinen Partikel/Sedimenten Freisetzung von Aerosolen/Hydrosolen, Filter- und Absaugvorrichtungen notwendig
Platzanspruch	Gering, auch für beengte Platzverhältnisse geeignet
Materialien	Leitfähige Materialien
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr präzise Schritte möglich, z. B. auch für das Abtrennen von Schraubköpfen geeignet • Vernachlässigbare Rückstellkräfte • Im Aufbau anspruchsvoll, aber leicht zu steuern • Sehr geringer Verschleiß

Dadurch, dass nur ein kleiner Werkzeugkopf benötigt, kann das EDM-Verfahren auch auf engem Raum, wie beispielsweise im Inneren der Reaktordruckbehälter, genutzt werden. Zudem eignet es sich auch für komplexe geometrische Werkstücke /THI 09/. Das EDM-Verfahren wurde in Deutschland für Trennarbeiten unter anspruchsvollen Randbedingungen genutzt und kam u. a. in den Anlagen KRB-A, KGR, KKR und im Versuchsreaktor Kahl (VAK) zum Einsatz.

MDM wurde u. a. für Stilllegungsarbeiten des Leistungsreaktors Big Rock Point (USA) eingesetzt /POS 13/. Die im Vergleich zu anderen Trennverfahren geringen Schnittgeschwindigkeiten limitieren jedoch das praktische Einsatzspektrum.

3.2.1.2 Mechanische Trennverfahren

Mechanische Trennverfahren beruhen auf einem mechanischen Abtrag des zu zerlegenden Materials. Die Anwendung mechanischer Verfahren erstreckt sich grundsätzlich auf alle Materialien, obschon sich in Abhängigkeit einzelner Verfahren Einschränkungen ergeben können. Die für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen relevanten Verfahren werden im Folgenden erläutert.

3.2.1.2.1 Sägeverfahren (Band-, Stich-, Kreis-, Wand-, Säbel- und Bügelsägen)

Das Sägen (englisch: *sawing*) gehört zu den spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Die trennende Wirkung entsteht durch die Bewegung der Sägezähne relativ zu dem zu trennenden Werkstück, die Trennfuge wird mit der Zeit durch den Vorschub gebildet. Für das Sägen haben sich unterschiedliche Verfahrensvarianten etabliert, die sowohl über als auch unter Wasser eingesetzt werden können. Es haben sich einige Sägeverfahren¹² etabliert, die sich hinsichtlich ihrer Charakteristika unterscheiden. Diese werden im weiteren Verlauf dieses Abschnittes näher beschrieben.

Das Sägen kann grundsätzlich sowohl trocken als auch nass erfolgen. In Abhängigkeit des Verfahrens und der Schnittgeschwindigkeit kann eine Wasserkühlung sinnvoll bzw. notwendig sein, insbesondere um den Materialverschleiß zu reduzieren. Grundsätzlich werden durch das Sägen von Metallen keine bis sehr geringe Mengen an Aerosolen bzw. Hydrosolen freigesetzt, wodurch der Aufwand für Strahlenschutzmaßnahmen reduziert werden kann. Beim Sägen von Beton kann durch den nassen Einsatz die Aerosolbildung deutlich reduziert werden. Hierbei sind Maßnahmen zur Konzentrierung des entstehenden Betonschlamm zu empfehlen, insbesondere um den Eintrag in betriebliche Wasseraufbereitungsanlagen zu minimieren. Ansonsten anfallende Späne lassen sich in der Regel gut auffangen bzw. sinken zum Beckenboden und sind dort leicht aufzunehmen.

¹² Informationen zum Seilschleifen, das in der Praxis häufig auch als Seilsägen bezeichnet wird, finden sich in Abschnitt 3.2.1.2.4.

Bandsägen

Bandsägen (englisch: *band sawing*) nutzen ein Sägeblatt in Form eines geschlossenen Ringes (Endlossägeblatt), das über mehrere (teilweise motorgetriebene) Rollen oder Räder geführt wird. Je nach Orientierung des Bandes (relativ zum Werkstück) und der Vorlaufrichtung sind Schnitte in Längs- oder Querrichtung möglich. In der Regel handelt es sich bei Bandsägen um stationäre Geräte, es existieren aber auch mobile Bandsägen sowie handgeführte Bandsägen.

Das Bandsägen ermöglicht sehr große Schneiddicken, die aber entsprechend große Apparaturen voraussetzen und somit hinsichtlich des Platzbedarfes hohe Ansprüche stellen. In der Praxis wurden Schnittdicken bis etwa 4 Meter erreicht – hierbei handelt es sich nicht um eine verfahrensinhärente Beschränkung, sondern vielmehr um eine Beschränkung, die sich aus der Größe der eingesetzten Bandsäge ergibt.

Aufgrund der Verwendung von Bandsägen für Großkomponenten werden sie häufig als stationäre Geräte in der Nähe von Kränen oder anderen Transportgeräten aufgebaut. Die typische Schnittfugenbreite ist gering und liegt im Bereich eines oder weniger mm. Eine spezielle Form der Bandsägetechnik ist das Eissägen. Hierfür werden spezielle Anlagenteile (bspw. Wärmetauscher) mit Wasser gefüllt und eingefroren. Das Einfrieren ermöglicht dabei das Fixieren der zu bearbeitenden Strukturen, ein verbessertes Fernhantieren sowie eine permanente Kühlung des Sägeblattes. Außerdem lassen sich dadurch die Ortsdosisraten und die Produktion von Aerosolen verringern.

Stichsägen

Die Stichsäge (englisch: *jigsaw*) verfügt über ein schmales, relativ kurzes und einseitig geführtes Sägeblatt. Das Schneiden erfolgt durch eine zyklische Hubbewegung (vertikale Richtung relativ zur Schnittachse) die gegebenenfalls noch durch eine Pendelbewegung in horizontaler Richtung überlagert wird. Das Stichsägen eignet sich für das Schneiden von Ausschnitten und ermöglicht geometrisch vielfältige Schnitte, so dass es sich auch für anspruchsvolle Geometrien genutzt werden kann. Beim Einsatz entsteht aufgrund der geringen Breite des Sägeblattes nur eine relativ schmale Schnittfuge. Die Schnitttiefe ist durch die Länge des Sägeblattes begrenzt, in der Praxis werden meist Schnitttiefen von etwa 100 mm erreicht. Die Rückstände sind meist größere Partikel, die leicht aufgesammelt werden können. Das Werkzeug kann entweder hand- oder maschinengeführt werden, häufig finden auch Spannvorrichtungen Verwendung.

Kreissägen und Wandsägen

Bei Kreissägen (auch: Scheibensägen; englisch: *circular sawing*) wird ein scheibenförmiges, außen gezahntes Sägeblatt direkt oder indirekt durch einen Motor angetrieben und in das zu trennende Werkstück geführt. Das Sägeblatt kann beim Trennen Umlaufgeschwindigkeiten von einigen tausend Umdrehungen erreichen. Durch Wahl einer geeigneten Zahnform kann das Verfahren für das zu schneidende Material angepasst werden. Die Durchmesser der Sägeblätter orientieren sich an den Dimensionen des zu bearbeitenden Werkstückes und können in der Praxis durchaus ein bis zwei Meter betragen.

Kreissägen lassen sich für typische Materialstärken von 200 mm für Metalle und 500 mm für Betonstrukturen einsetzen /IAEA 02/. Kreissägen kommen sowohl als handgeführte als auch als stationäre Geräte zum Einsatz. Für die Bearbeitung dünnwandiger Werkstücke werden nur geringe Scheibendurchmesser benötigt, so dass sich für diese das Verfahren auch für Arbeiten in räumlich beschränkten Arbeitsbereichen eignet. Das Verfahren wird insbesondere zum Zerlegen von Kunststoffen und Baustoffen (insb. Beton) genutzt, es wird jedoch auch für die Zerlegung metallischer Komponenten verwendet.

Beim Wandsägen (englisch: *wall saw*) werden Kreissägen in Verbindung mit Führungsschienen, die an das zu trennende Objekt befestigt werden, genutzt. Das Verfahren ist insbesondere für ebene oder gleichmäßig gekrümmte Oberflächen geeignet. Häufig wird das Verfahren für das Zerlegen von Betonflächen (sowohl mit als auch ohne Armierung) eingesetzt, weswegen sich in der Praxis auch der Begriff Betonsägen etabliert hat. Analog zum Kreissägen wird die erreichbare Schnitttiefe durch den Durchmesser des Sägeblattes bestimmt, die im Bereich eines Meters liegen kann.

Säbelsägen

Bei Säbelsägen (englisch: *sabre saw*) handelt es sich in der Regel um handgeführte Elektrosägen, bei denen ein Sägeblatt einseitig eingespannt wird. Die Säbelsäge weist grundsätzlich Ähnlichkeiten zur Stichsäge auf, der wesentliche Unterschied besteht in der Führung des Werkzeugs bzw. der Relativbewegung zwischen Sägeblatt und Ausrichtung des Werkzeugs. Das Sägeblatt hat typischerweise eine Länge von etwa 20 cm, die Breite des Blattes liegt häufig im Bereich eines oder weniger mm. Die zyklische Bewegung des Sägeblatts hat eine typische Frequenz von wenigen tausend Zyklen pro Minute.

Je nach Werkstoff existieren unterschiedlich gestaltete Sägeblätter. Grundsätzlich ist das Verfahren für die Bearbeitung von Metallen, Kunststoffen und Baustoffen (Beton/Stein) geeignet.

Bügelsägen

Bei Bügelsägen (englisch: *hacksaw*) wird das Sägeblatt beidseitig in einen U-förmigen, nach unten offenen Bügel eingespannt. Das Trennen erfolgt durch hin- und hergebende Bewegung. Das Verfahren kann sowohl manuell als auch maschinengeführt verwendet werden. Grundsätzlich ist das Verfahren für ein breites Spektrum fester Werkstoffe einsetzbar.

Rohrinnenschneiden

Mit Sägeblättern (Kreissägeblätter) ausgestattete Rohrinnenschneider (englisch: internal *pipe cutter*) können Rohre von innen zerlegt werden. Da das entsprechende Werkzeug von innen in das Rohr eingeführt wird, müssen diese ausreichend kompakt sein. Eine typische Anwendung bieten Rohre mit einem Durchmesser von etwa 20 cm und Wandstärken von etwa 1 cm. Aufgrund der beim Sägen auftretenden Rückstellkräfte werden die eingesetzten Schneidegeräte in einigen Fällen hydraulisch geklemmt.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Sägen gehört zu den am meisten eingesetzten Trennverfahren, für das sich im Verlauf der Zeit eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahrensvarianten etabliert haben, so dass das Trennspektrum – insbesondere bezüglich Schnitttiefen, Materialarten – sehr breit ist. Einige verfahrensübergreifende Vor- und Nachteile werden im Folgenden aufgeführt, eine Übersicht charakteristischer Größen für das Bandsägen, Stichsägen und Kreissägen findet sich in Tab. 3.11.

Das Sägen ist ein vergleichsweise einfaches, industrieerprobtes Trennverfahren und zeichnet durch eine hohe Zuverlässigkeit aus. Grundsätzlich sind die beim Sägen anfallenden Späne und Partikel (insbesondere, wenn es sich bei dem zu trennenden Material um etwas anderes als Beton handelt) ausreichend groß, so dass sie – gegebenenfalls durch einfache Filter – leicht aufzusammeln und aufzufangen sind. Zudem ist die Menge freigesetzter Aerosole (z. B. beim Bandsägen) in der Regel vernachlässigbar /IAEA 99/.

Der Platzbedarf einiger Sägeverfahren (z. B. Bandsägen) kann vergleichsweise hoch sein, was die Anwendbarkeit für in-situ Zerlegungen einschränken kann. Speziell eingerichtete Zerlegeplätze, z. B. für das Trennen von Großkomponenten, sind aber in der Regel auch für den Einsatz extensiver Verfahren ausreichend dimensioniert. Zudem existieren kompakte Sägeverfahren, z. B. das Kreissägen und das Stichsägen, die auch in beengten Arbeitsbereichen genutzt werden können, aber hinsichtlich ihrer Schnitttiefen beschränkt sind.

Mit steigender Sägegeschwindigkeit nimmt auch die Reibung zu, wodurch hohe Temperaturen entstehen können. Aus diesem Grunde müssen für hohe Schnittgeschwindigkeiten oft Kühlmittel eingesetzt werden, um z. B. die Langlebigkeit der Sägeblätter oder Sägebänder zu gewährleisten und um Standzeiten zu erhöhen. Falls eine Aktivierung oder Kontaminierung des zu bearbeitenden Werkstoffs nicht ausgeschlossen werden kann, muss das Kühlmittel aufgefangen und als radioaktiv kontaminierter Abfall entsorgt werden. Das Spektrum der verfügbaren Sägeblätter ist sehr breit, so dass sehr gut eine werkstoff- und materialspezifische Auswahl erfolgen kann.

Tab. 3.11 Wesentliche Charakteristiken ausgewählter Sägeverfahren

	Bandsägen	Stichsägen	Kreissägen
Umgebung	Anwendbar an Luft und unter Wasser		
Schnittgeschwindigkeit	Durchschnittlich	Langsam	Durchschnittlich
Schnitttiefe	Bis 4.000 mm	Etwa 100 mm (Praxisbezogen)	Etwa 200 mm für Metalle Etwa 500 mm für Beton
Sekundärabfall	Sägeblätter bzw. -bänder; Späne (an Luft) bzw. Sedimente (z. B. Betonschnitt unter Bewässerung zur Staubeindämmung)		
Verbrauchsmaterialien	Sägeblätter bzw. -bänder		
Formschnitt	Nur gerade Schnitte		
Fernhantierung	Fernhantierter Einsatz möglich, Rückstellkräfte sind zu beachten		
Aerosole/Hydrossole	Geringe Freisetzung für Metalle und Kunststoffe, Staubfreisetzung bei mineralischen Baustoffen		
Platzanspruch	Mittel bis hoch	Gering (Platzbedarf korreliert mit Schnittaufgaben)	Mittel (Platzbedarf korreliert mit Schnittaufgaben)
Materialien	Breites Materialspektrum (insbesondere Metalle, Baustoffe und Kunststoffe), materialabhängige Sägeblätter		
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Schnittfugenbreite • Geeignet auch für dickwandige Materialien • Horizontale als auch vertikale Schnitte • Verfahrensvariante: Eissägen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Schnittfugenbreite • Für die Praxis häufig ausreichende, aber limitierte Schnitttiefe • Verhältnismäßig große Schnittfugenbreite • Sehr hohe Aerosolfreisetzung <ul style="list-style-type: none"> • Reduzierte Trennleistung beim Einsatz unter Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Schnittfugenbreite • Häufig zusammen genutzt mit Schneidschienen • Verfahrensvariante: Wandsägen (häufig gekapselt zur Staubeindämmung)

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Bandsägen gehören, auch für Großkomponenten mit hohen Wandstärken, zu den häufig in der Stilllegung eingesetzten Trennverfahren. Das Bandsägen wurde beispielsweise im Kernkraftwerk Brunsbüttel genutzt, um ein Turbinengehäuse zu zerlegen. Die eingesetzte Bandsäge hatte eine Spannweite von 3,5 Metern und wog etwa 170 Mg /VAT 18a/. Eine vergleichbare Bandsäge mit einer Schnittbreite von 4,13 Metern und einer Schnitthöhe von 4,20 Metern wurde im Kernkraftwerk Gundremmingen genutzt, um die Turbinenwelle und Druckbehälterabdeckungen zu zerlegen /WEI 23/. Auch für die Zerlegung von Rohren, z. B. im Kernkraftwerk Isar (KKI), fand bzw. findet das Verfahren Verwendung /WEI 20b/. Weitere praktische Anwendungsbeispiele bieten die Zerlegung von Kernmänteln und entsprechende Einbauten unter Wasser (z. B. im Kernkraftwerk Stade (KKS)) oder die Zerlegung von Kerneinbauten unter Wasser (z. B. im KGR) /AUG 20/. Das Eissägen wurde erfolgreich beim Zerlegen des Dampferzeugers in KGR, KRB und bei Abbaumaßnahmen in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) eingesetzt /IAEA 99/, /KAU 10/.

Stichsägen sind trotz ihrer vergleichsweise geringen Schnittgeschwindigkeit und der limitierten Eignung für große Materialstärken vielfältig im Einsatz und können gut an geometrische Verhältnisse angepasst werden, so dass sie auch in beengten Bereichen eingesetzt werden können /THI 09/. Sie sind sowohl als tragbare Geräte als auch stationär im Einsatz, zudem können sie auch fernhantiert genutzt werden. Die verklammerte Stichsäge lässt sich bspw. am zu bearbeitenden Werkstück befestigen und kann in Folge selbstständig arbeiten /KAU 10/. Stichsägen sind vor allem für Werkstücke aus Metallen bzw. Plastik geeignet und sind unter Wasser einsetzbar. Stichsägen können für Werkstücke mit einer Stärke bis etwa 100 mm eingesetzt werden /EUR 95/. Das Stichsägen wurde u. a. für die Zerlegung von Rohrleitungen im Rahmen der Stilllegung des Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR)/VKTA 02/ und des Kernkraftwerks Obrigheim (KWO) genutzt /ENBW 16/. Auch international gehört es zu den Standardverfahren und wurde u. a. für Zerlegearbeiten am amerikanischen Reaktor *Shippingport* und am belgischen Reaktor BR3 (DWR) genutzt. Zudem wurde das Verfahren in Großbritannien fernhantiert bei Rückbauarbeiten an mit Plutonium kontaminierten Handschuhboxen genutzt /IAEA 99/.

Kreissägen und insbesondere Wandsägen werden im Rahmen der Stilllegung insbesondere für die Zerlegung von Betonflächen verwendet. Außerdem wird das Kreissägen auch bei der Trennung metallischer Komponenten (auch unter Wasser) eingesetzt. Bei der Stilllegung des

Kernkraftwerks GKN I wurde das Verfahren unter anderem für unter Wasser durchgeführte und fernhantierte Trennarbeiten an Einbauten des Reaktordruckbehälters genutzt /ENBW 24/. Auch in der Nachzerlegung gehört es zu den Standardverfahren /NUK 15/. Bei Rückbauarbeiten im belgischen Reaktor BR3 konnte das Verfahren unter Wasser für hoch radioaktive RDB-Einbauten eingesetzt werden /MAS 98/. Handbetriebene Kreissägen bzw. auf Robotern/Telemanipulatoren angebrachte Kreissägen wurden erfolgreich für die Zerlegung von Handschuhboxen des ehemaligen Unternehmens *British Nuclear Fuels plc* (BNFL) in Großbritannien sowie am *Argonne National Laboratory* (ANL, USA) eingesetzt /IAEA 99/.

Rohrinnenschneider gehören zur Standardausrüstung für Rohre mit ausreichenden Innendurchmessern, insbesondere wenn eine Zerlegung von außen nicht möglich ist. Als ein Beispiel dient ein Rohrinnenschneider, der im Kernkraftwerk Philippsburg (KKP) für das Zerlegen von Steuerstabsführungseinsatz-Stützen des oberen Kerngerüsts eingesetzt wurde. Der Innendurchmesser der hier durchtrennten Edelstahlrohre betrug etwa 250 mm, die Wandstärke 8,5 mm /BRA 23/.

3.2.1.2.2 Fräsen (Stirnfräsen, Walzenfräsen)

Das Fräsen (englisch: *milling*) gehört zu den spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Der Fräskopf dreht sich mit hoher Geschwindigkeit um seine Symmetrieachse und wird entweder durch das Werkstück geführt oder das Werkstück wird der gewünschten Trenntrajektorie entsprechend bewegt. Die Vorschubbewegung erfolgt somit in der Regel senkrecht zur Rotationsachse, in manchen Fällen auch schräg zu dieser. Die Schneiden des Fräswerkzeugs haben durch die Rotationsbewegung keinen kontinuierlichen Kontakt mit dem Werkstück, sondern lösen sich nach erfolgtem Spanabtrag wieder von dem Werkstück und können sich so abkühlen. Die thermische Belastung (auch des zu bearbeitenden Objektes) wird meist in der Praxis durch Gas oder Wasser reduziert. Das Fräsen erfolgt immer mit dem Einsatz von Maschinen. Die hohen Rückstellkräfte müssen durch eine entsprechende Konstruktion kompensiert werden können. Für lange Standzeiten muss das Fräswerkzeug aus einem harten und widerstandsfähigen Material sein.

Die Werkzeuge werden manuell bedient oder auch fernhantiert gesteuert /KAU 10/. Ein Einsatz unter Wasser ist prinzipiell möglich. Die Schneidtiefen sind durch die Ausmaße der Frässcheibe vorgegeben. Es haben sich mehrere technische Verfahrensweisen etabliert, zu den bekanntesten Verfahren gehören das Stirnfräsen, das Walzenfräsen und das Scheibenfräsen, siehe Abb. 3.9.

Oft wird bei der Verfahrensanwendung nur ein Materialabtrag beabsichtigt, so dass es auch zu den mechanischen Dekontaminationsverfahren zählt.

Stirnfräsen

Beim Stirnfräsen (englisch: *face milling* oder *end milling*) steht die Achse des Fräswerkzeugs zur Bearbeitungsfläche in einem rechten Winkel – der Materialabtrag erfolgt also mit der Stirnfläche des Fräswerkzeugs. Die Schnittfuge ist entsprechend breit. Die Schnitttiefe ist beschränkt durch die Länge des Fräskopfes und beträgt für gewöhnlich etwa 30 mm /NUK 15/.

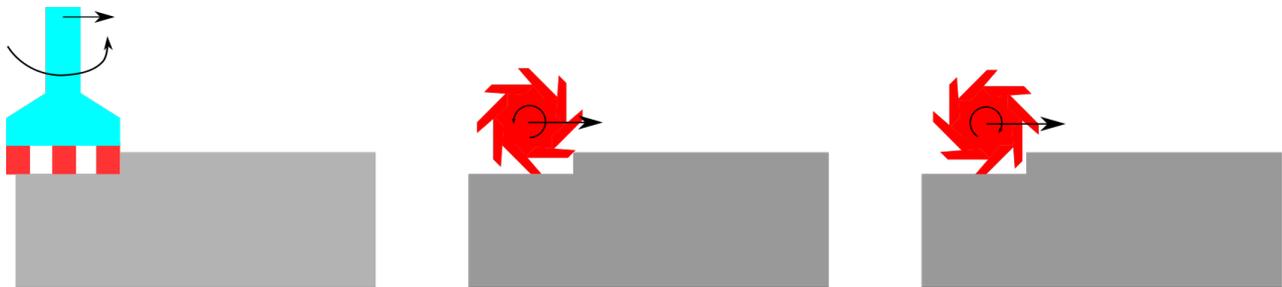


Abb. 3.9 Schematische Darstellung des Stirn- und Walzenfräsens

Die Schneiden sind in Rot dargestellt, das in Grau dargestellte Werkstück wird von links nach rechts abgefahren. Die Abbildungen zeigen das Stirnfräsen (*Links*), das Walzenfräsen in Gegenlaufrichtung (*Mitte*) und das Walzfräsen in Gleichlaufrichtung (*Rechts*). Wesentliche Unterschiede zwischen Gegen- und Gleichlaufräsen sind u. a. der Kraftaufbau (beim Gegenlaufräsen baut sich die Kraft pro Schneide sukzessive auf, beim Gleichlaufräsen ist sie bei Kontakt maximal und nimmt dann kontinuierlich ab) und das resultierende Schnittergebnisse (das Gleichlaufräsen ermöglicht glattere Oberflächen im Schnittbereich). Zudem sind beim Gleichlaufräsen höhere Vorschubgeschwindigkeiten möglich.

Walzenfräsen

Beim Walzenfräsen (englisch: *roll milling*, *peripheral milling* oder *contour milling*) liegt die Rotationsachse des Werkzeuges parallel zur Bearbeitungsfläche, so dass der Materialabtrag mit der Mantelfläche des Werkzeuges erfolgt. In Abhängigkeit der Vorschubrichtung wird hier zwischen Gleichlaufräsen und Gegenlaufräsen unterschieden.

Scheibenfräsen

Beim Scheibenfräsen (englisch: *side milling*) rotiert eine Scheibe mit außen liegenden Zähnen und wird über das Werkstück geführt. Der Materialabtrag erfolgt tangential. Durch eine Relativbewegung zwischen Frässscheibe und Werkstück wird die Trennwirkung erzielt. Im Vergleich zum Stirnfräsen ergibt sich somit eine schmalere Trennfuge im Bereich einiger mm, allerdings sind nur gerade Schnitte möglich.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Im Vergleich zu dem Sägen ist das Fräsen ein langsames Verfahren. Der wesentliche Vorteil ist eine sehr flexible Werkzeugführung, da die meisten Verfahrensvarianten grundsätzlich nicht an lineare Schnittführungen gebunden sind. Das Verfahren wird von hohen Rückstellkräften begleitet, so dass das Werkzeug hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt ist. Wesentliche Verfahrenscharakteristika sind in Tab. 3.12 zusammengefasst.

Tab. 3.12 Wesentliche Charakteristiken des Fräsens

Umgebung	Anwendbar an Luft und unter Wasser
Schnittgeschwindigkeit	Gering
Schnitttiefe	Typischerweise bis zu wenigen cm
Sekundärabfall	Gering, es entstehen verhältnismäßig grobe Späne, die leicht aufgesammelt werden können
Verbrauchsmaterialien	Frässscheiben bzw. Fräsköpfe
Formschnitt	Komplexe Schnitte grundsätzlich möglich
Fernhantierung	Gut möglich, Rückstellkräfte müssen aufgefangen werden
Aerosole/Hydrossole	Sehr gering
Platzanspruch	Mittel
Materialien	Breites Materialspektrum
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none">• Langsames Verfahren• Hohe Rückstellkräfte• Einsatz meist für speziellere Aufgaben, z. B. Materialabtrag an Verbindungsstellen• Präzise Schnitte möglich• Kühlung oft notwendig

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Fräsen wurde u. a. beim Rückbau des BR3, auf dem Gelände des SCK-CEN in Belgien, eingesetzt. Hier wurden Reaktorinneneinbauten sowie Teile des biologischen Schilds zerkleinert /MAS 98/, /MAS 96/. In /BIN 94/ finden sich Strategien zur Separation von RDB Bauteilen durch Fräsen. Das Verfahren wird außerdem genutzt um gezielt Verbindungsstellen, wie z. B. Schweißnähte, zu entfernen /NUK 15/. Das Fräsen wird auch für die Dekontamination (von Betonflächen) genutzt, siehe Abschnitt 3.3.2.5.6.

3.2.1.2.3 Scherverfahren (Trennscheren, Rohrscheren und Nibbeln)

Das Scheren oder Scherschneiden (englisch: *shearing*) beschreibt ein Verfahren, bei dem Werkstücke durch zwei sich zueinander bewegende Schneiden eingekerbt und zerteilt werden. Das Verfahren gehört zu den spanlosen Trennverfahren. Durch die Krafteinwirkung kommt es in der Regel zu Verformungen des zu zerkleinernden Werkstücks, wodurch es an den Oberflächen zu einem Materialabtrag (Abplatzen) kommen kann. Scheren können manuell, pneumatisch, elektrisch oder auch hydraulisch betrieben werden. In der Praxis haben sich einige Verfahrensvarianten etabliert, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Trennscheren

Trennscheren (englisch: *cutting shears*) gibt es in zahlreichen Ausführungen, das Spektrum reicht von flexiblen Handscheren bis zu stationären Geräten. Die Kraftwirkung erfolgt entweder mit Muskelkraft, elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch. Das Spektrum der zu zerkleinernden Werkstücke ist dementsprechend breit, konzentriert sich aber auf verhältnismäßig kleine Objekte mit geringen Wandstärken.

Rohrscheren

Rohrscheren (englisch: *pipe cutters*) sind häufig pneumatisch angetriebene Scheren für das Zerkleinern von Rohren von außen. Die Rohre werden an der Trennstelle signifikant verformt. Es sind hohe Kraftanwendungen notwendig, so dass das Verfahren insbesondere für dünnwandige Rohre mit einem Durchmesser bis etwa 10 cm genutzt wird.

Nibbeln

Das Nibbeln (auch: Knabberschneiden; englisch: *nibbling*) ist ein dem Stanzen und Scherschneiden verwandtes Trennverfahren, welches zum Bearbeiten und Zerkleinern von Metallplatten bspw. in Lüftungskanälen oder Becken eingesetzt wird. Durch eine periodische Auf- und Ab-Bewegung eines einseitig offenen Stanzwerkzeugs wird eine Trennfuge erzeugt. Der Schnittverlauf kann frei gestaltet werden und ist vom Werkzeug unabhängig. Es lassen sich mit entsprechenden Standardwerkzeugen Werkstücke mit Wandstärken von 1-30 mm zerkleinern /EUR 95/. Nibbler sind leicht und eignen sich auch für den manuellen Gebrauch. Außerdem können aufgrund kleiner Werkzeugköpfe Nibbler auch in beengten Platzverhältnissen eingesetzt werden /THI 09/.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Bei dem Verfahren entstehen keine Aerosole oder Späne, so dass sich die Sekundärabfälle auf Verbrauchsmaterialien beschränken. Ein Vorteil von Scherverfahren ist, dass keine Rückstellkräfte auftreten. Beim Scherschneiden entsteht kein Sekundärabfall. Abgetrennte Fragmente können zumeist ohne Probleme aufgesammelt und konditioniert werden. Dadurch, dass die zu bearbeitenden Bauteile zerdrückt werden kann es jedoch bei einem plötzlichen Spannungsabfall dazu kommen, dass sich Teile ablösen und mit hoher Geschwindigkeit davonfliegen könnten. Für kontaminierte Objekte sind somit entsprechende Vorkehrungen zu treffen.

Das Scheren benötigt keine Kühlung. Ebenfalls ist ein Einsatz unter Wasser über hydraulischen Manipulatoren möglich /KAU 10/. Scherwerkzeuge sind in der verhältnismäßig einfach hinsichtlich der Technik und einfach in der Anwendung, so dass Rüstzeiten – auch aufgrund geringer Wartungsansprüche – sehr gering ausfallen.

Wesentliche Verfahrenscharakteristika sind in Tab. 3.13 aufgeführt.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Scherverfahren werden zur Zerkleinerung metallischer Bauteile und Betonstrukturen eingesetzt /IAEA 99/. Dadurch, dass beim Einsatz keine hohen Rückstellkräfte auftreten, ist ein fernhantierter Einsatz grundsätzlich möglich. So konnten bspw. Hydraulikscheren mit einer hohen Leistung an Manipulatoren angebracht werden /THI 09/. Unterwasserschere wurden bei der Zerlegung von Brennelementkästen in diversen Brennelementlagerbecken eingesetzt. Außerdem werden

Scherverfahren vornehmlich zur Zerkleinerung von Stahlblechen, Rohren und Balken eingesetzt /IAEA 02/. Darüber hinaus lassen sich mit speziellen Rohrscheren Reaktorbehältereinbauten, welche außerhalb des Einbaubereichs liegen zerlegen /THI 09/. Das Verfahren wurde u. a. bei der Zerlegung des Dampferzeugers des KGR und bei Abbaumaßnahmen in der WAK eingesetzt /KAU 10/. Darüber hinaus kamen hydraulisch betriebene Scherverfahren bei Stilllegungsarbeiten in KWW zum Einsatz. Eine weitere Anwendung ist die Zerkleinerung von grafithaltigen Reaktor-komponenten.

Tab. 3.13 Wesentliche Charakteristiken der Scherverfahren

Umgebung	Anwendbar an Luft und unter Wasser
Schnittgeschwindigkeit	Gering bis Mittel
Schnitttiefe	Bis zu wenigen cm
Sekundärabfall	Sehr gering, es entstehen keine Stäube oder Späne. Es können sich, insbesondere bei spröden Materialien, größere Materialfragmente lösen.
Verbrauchsmaterialien	Keine
Formschnitt	Komplexe Schnitte grundsätzlich möglich, insbesondere mit dem Nibbeln
Fernhantierung	Gut möglich
Aerosole/Hydrossole	Keine
Platzanspruch	Gering
Materialien	Breites Materialspektrum
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Leichter Gebrauch • Verwendung bei der Trennung von Stäben, Rohren oder Blechen • Keine thermischen Belastungen

Das Nibbeln wurde beispielsweise am VAK für Trennarbeiten unter Wasser an RDB-Einbauten erfolgreich eingesetzt /IAEA 99/. Auch international fand bzw. findet es Anwendung, beispielsweise in der Anlage *Rocky Flats* (USA) bzw. am BR3 (Belgien).

Eine weitere Besonderheit stellen Rohrschneider dar, mit denen Rohre dünner bis mittlerer Wandstärke durchtrennt werden können. Diese verfügen über einen rotierenden Schneidkopf welcher von innen in das zu bearbeitenden Rohr eingeführt wird und mit mehreren Schneiden gegen die Rohrinne-seite presst /THI 09/. Bei diesem Verfahren entstehen keine Abfälle. Rohrschneiderverfahren können auch unter Wasser eingesetzt werden und können Materialien mit Durchmessern

in einem Bereich von 0,15 bis 6 m zerkleinern /EUR 95/. Es gibt kleine hydraulisch betriebene Rohrschneider welche sich bevorzugt zum Schneiden von Rohren, Kabeln und deren tragenden Strukturen einsetzen lassen /LAR 12/.

3.2.1.2.4 Schleifen (Trennschleifen und Diamantseilschleifen)

Im Kontext der DIN 8580 gehört das Schleifen (englisch: *grinding*) zu den spanenden Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Das durch die Verfahrensanwendung entstehende überschüssige Material wird in Form von Spänen abgetrennt. Der Antrieb der eingesetzten Werkzeuge kann elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch erfolgen. Die Trennwirkung erfolgt in der Regel durch kleine, harte Kristalle, die an den Kanten des Schleifwerkzeugs angebracht sind. Das Schleifen eignet sich insbesondere auch für harte Werkstoffe wie diverse Hartmetalle, es können aber auch Bauteile aus Beton und Stahlbeton zerlegt werden.

Grundsätzlich können Schleifverfahren sowohl an Luft als auch unter Wasser eingesetzt werden. Für die Stilllegung ist insbesondere das Trennschleifen und das Diamantseilschleifen relevant.

Trennschleifen

Beim Trennschleifen (englisch: *cut-off grinding*) wird eine schnell rotierende Trennschleifscheibe an das zu trennende Objekt gesetzt. Die Schleifscheibe besteht aus einem harten Schleifmaterial, die trennende Wirkung kommt durch die kontinuierliche Schleifbewegung zustande.

Um eine passable Schnittgeschwindigkeit zu erzielen, muss die Rotationsgeschwindigkeit der Schleifscheibe sehr hoch sein. Dadurch, dass beim Trennschleifen hohe Rückstellkräfte auftreten ist ein fernhantierter Eingriff nur unter Einschränkung möglich /KAU 10/. Mobile Trennschleifgeräte eignen sich für dünnwandige Materialien mit Stärken von bis zu 30 mm /THI 09/. Standardanwendungen umfassen das Zerkleinern von Stahlkabeln, das Abtrennen scharfer Kanten sowie das Zerschneiden bzw. Einebnen von Betonstrukturen.

(Diamant-)Seilschleifen

Das Seilschleifen¹³ (englisch: *wire sawing*) nutzt mit Schleifkörpern umhüllte Seile, die um das zu trennende Werkstücke gelegt werden, siehe Abb. 3.10. Das Seil wird durch Stahlhülsen, die über das Seil geschoben werden, geschützt. In der Regel werden die Hülsen mit Hartstoffen (z. B. Diamant¹⁴ oder diversen Carbiden) besetzt.

Das mit den Hülsen versehene Seil hat typischerweise einen Durchmesser von etwa 10 mm. Die Seilenden werden bearbeitet, mit Verbindungsstücken versehen und diese anschließend miteinander verbunden. In manchen Fällen werden auch Endlosseile eingesetzt. Das Seil wird mechanisch an das zu schneidende Objekt gepresst (z. B. mit einem Zylinder) und anschließend mit einem Motor (typische Leistung von etwa 15 kW) über eine Antriebsrolle auf etwa 20 m/s beschleunigt. An den Kontaktstellen zwischen dem Seil und dem Werkstück kommt es zu einem Materialabtrag. Die Seilspannung muss während des Trennvorgangs möglichst konstant gehalten werden; diese Seilspannung bestimmt zudem die Vorschubgeschwindigkeit /KNE 14/.

Aufgrund der oft großen Kontaktflächen ergibt sich für das Seilschleifen eine hohe Schnittleistung. Die erreichbare Schnittleistung und Standzeit ist grundsätzlich stark von der Technologie abhängig, insbesondere die Wahl des Seils spielt eine erhebliche Rolle für die Leistung und Prozessstabilität.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Im Vergleich zu den Sägeverfahren entstehen beim Trennschleifen an Luft Aerosole und Staubpartikel. Die freigesetzten Partikel sind zunächst heiß, diese kühlen, aber zügig ab. Bei kontaminierten Werkstücken können diese Partikel radioaktiv sein und somit zu einer Kontaminationsausbreitung führen. Arbeiten an kontaminierten bzw. aktivierten Werkstoffen sind demzufolge nur eingeschränkt oder mit entsprechenden Vorkehrungen möglich. Für die Bearbeitung von Stahlbeton als auch von Beton werden Werkzeuge mit metallisch gebundenen Diamanten eingesetzt.

¹³ Da bei dem Seilschleifen geometrisch unbestimmte Schneiden zum Einsatz kommen, handelt es sich um ein Schleifverfahren. Der Begriff des Seilsägens, insbesondere für das Werkzeug, hat sich aber in der Praxis etabliert.

¹⁴ Bei Verwendung von Diamantfragmenten als Härtematerial spricht man auch oft von Diamantseilsägen oder Diamantseilschleifen.

Wasser ist zur Kühlung als auch zum Entfernen der beim Schleifen in der Schnittfuge auftretenden Partikel nötig /LAR 12/.

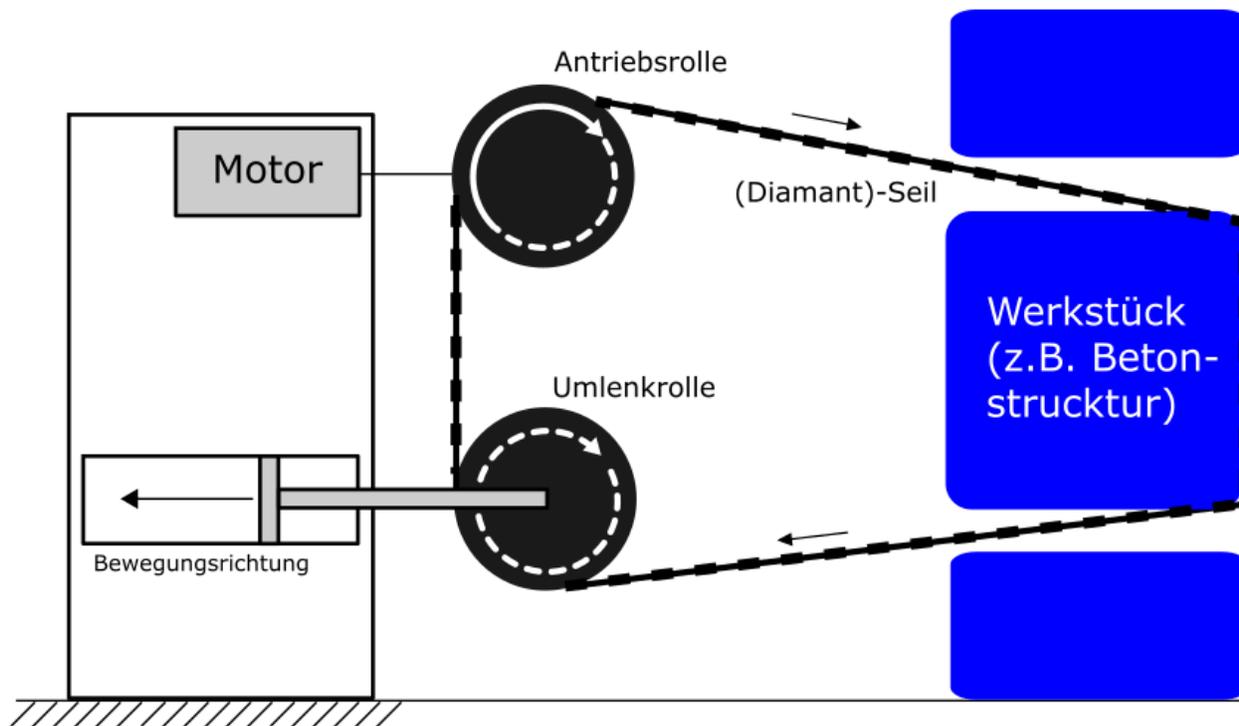


Abb. 3.10 Funktionsweise einer Seilsäge

Das (Diamant-)Seilschleifen wird in der Stilllegung häufig eingesetzt, insbesondere bei der Zerlegung dickwandiger Betonstrukturen mit Wandstärken von bis zu 1750 mm, aber auch bei Stahlbetonstrukturen mit Wandstärken bis 300 mm (biologischer Schild) /FIS 92/, /BEC 91/, /IAE 02/. Wesentliche Vorteile des Verfahrens sind seine hohe Flexibilität und die Eignung auch für komplexe Geometrien. So findet es auch zum Trennen von Großkomponenten mit extensiven Hohlräumen wie z. B. Druckbehältern, Verwendung. Dadurch, dass manuell durchgeführte Reparaturen und Wartungsarbeiten (z. B. Wechseln des Seils) meistens kurz ausfallen, eignet sich das Verfahren auch für Arbeiten in Umfeldern mit höheren Ortsdosisleistungen, da das Personal für das eigentliche Trennen nicht zwingend vor Ort sein muss /KAU 10/. Nachteilig sind eine breite Schnittfuge, da der Perlendurchmesser typischerweise im Bereich von einem Zentimeter liegt, und die bei der Zerkleinerung anfallende Dispersion kontaminierter Stäube. Neuere Maschinen verfügen über eine integrierte Absaugvorrichtung. Die Wärmeerzeugung ist aufgrund der Seillänge meist vernachlässigbar, bei größeren Eingriffslängen kann eine Kühlung des Seils nötig sein, zudem wird Wasser auch zur Staubeindämmung genutzt. Das Kühl- bzw. Prozesswasser

muss dabei aufgefangen und entsorgt werden. Bei neueren Verfahren entfällt teilweise die Notwendigkeit zur Kühlung /GÖD 07/. In einigen Fällen sind Vorbereitungen notwendig, beispielsweise durch Bohrungen am Werkstück oder das Setzen von Ankerpunkten.

Wesentliche Charakteristika des Trennschleifens und Seilsägens sind in Tab. 3.14 zusammengefasst.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Seilsägen findet oft bei der der Zerlegung von Betonstrukturen Verwendung und gehört für solche Maßnahmen zu den etabliertesten Verfahren. Es wurde beispielsweise am Kernkraftwerk Greifswald eingesetzt, um einen Abluftkamin schrittweise zu zerlegen. Auch für metallische Großkomponenten werden Seilsägen verwendet, im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich wurde beispielsweise eine Portalseilsäge für die in-situ Zerlegung der Dampferzeuger verwendet /BIL 23/.

Diamant-Seilsägen wurden bei der Zerlegung des Dampferzeugers in KGR erfolgreich eingesetzt /KAU 10/. Darüber hinaus kam die Technik z. B. in KKN als auch im HDR erfolgreich zum Einsatz. Im KKP 1 wurde das Seilsägen für das Abtrennen des oberen Teils des RDB genutzt /MIC 21/. International wurde das Diamant-Seilsägeverfahren u. a. am *National Research Experiment Reactor* in Kanada eingesetzt /IAEA 99/. Zudem wurde es auch für die Zerlegung des Dampferzeugers im Kernkraftwerk *Rancho Seco* (USA) eingesetzt /OECD 14/. Erst kürzlich nutzte Orano USA das Verfahren zum Schneiden (horizontale Schnitte) des Reaktordruckbehälters des Reaktors *Crystal River Unit 3* (USA), wobei auch auf den patentierten *Optimized Segmentation Process* zurückgegriffen wurde /ORA 23/.

Tab. 3.14 Wesentliche Charakteristiken der Schleifverfahren

Technik	Trennschleifen	Seilschleifen
Umgebung	An Luft und unter Wasser	In der Stilllegung für Arbeiten an Luft ausgelegt, grundsätzlich auch unter Wasser zu nutzen
Schnittgeschwindigkeit	Gering	Hohe Schnittleistung, für Baustahl beispielsweise 20 mm ² /s
Typische Schnitttiefen	Bei mobilen Geräten ca. 30 mm	Bei Stahl ca. 300 mm Bei Beton ca. 1750 mm
Sekundärabfall	Produziert große Menge Staub	Große Schnittfugenbreite. Es werden feine Späne bzw. Stäube erzeugt, die gefiltert bzw. aufgefangen werden müssen. Ggfs. Prozesswasser
Verbrauchsmaterialien	Trennscheibe	(Diamant-)Seil
Formschnitt	Möglich	Für komplexe Geometrien geeignet, lineare Schnittführung
Fernhantierung	Nur eingeschränkt möglich da hohe Rückstellkräfte auftreten, mobile Trennschleifgeräte eignen sich nur für dünnwandige Werkstücke	Fernhantierbar während des Betriebs
Aerosole/Hydrossole	Sehr hoch (etwa 200-mal mehr Aerosole als beim Sägen) /HÜB 17/	Hoch
Platzanspruch	Großer Platzbedarf	Großer Platzbedarf
Materialien	Metalle, Edelstahl, Beton, Stahlbeton	Alle (Standard-)Materialien trennbar
Charakteristika	Antrieb elektrisch, hydraulisch pneumatisch, eignet sich wenig bei eingeschränkten Platzverhältnissen, zum Arbeiten an kontaminierten Strukturen ungeeignet	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibles Verfahren - Schnitttiefe nahezu unbeschränkt - Mobile Maschinen - Große Mengen an Sekundärabfall - Relativ kostenintensives Verfahren (Anschaffung und Werkzeugverschleiß)

3.2.1.2.5 Wasserstrahlschneiden

Das Wasserstrahlschneiden (englisch: *water-jet cutting*) nutzt einen Hochdruckwasserstrahl (ggfs. unter Verwendung von Abrasivmitteln) um durch erosive Wirkung eine Trennung zu erzielen. Grundsätzlich erfolgt eine Unterscheidung zwischen dem *Reinwasserstrahlschneiden (RWS)* (englisch: *pure-water cutting*) und Varianten des *Wasser-Abrasiv-Strahlschneidens (WAS)*, für die dem Wasserstrahl ein Abrasivmittel zugefügt werden. Die wichtigsten Komponenten einer Wasserstrahlschneideinrichtung sind eine Hochdruck-Wasserpumpe (je nach Aufgabenstellung mit einem Wasserdruck von etwa 200 – 600 MPa), Wasserleitungen, eine Spritzdüse und ggfs. eine Einheit durch die dem Schneidstrahl das Abrasivmittel zugeführt wird /LAR 12/. Als Abrasivmittel wird vor allem scharfkantiger Sand mit einer spezifischen Korngröße eingesetzt. Ein Wiederverwenden des Abrasivmittels ist grundsätzlich möglich, wird in der Stilllegung jedoch zumeist nicht eingesetzt, da die Sandpartikel während des Schneidens in Bruchstücke zerfallen oder aber auch kontaminierte und aktivierte Partikel des zu zerlegenden Werkstoffes forttragen.

Für das Wasser-Abrasiv-Strahlschneiden werden das *Wasser-Abrasiv-Injektorstrahlschneiden (WAIS, englisch: Abrasive Water Injector Jet Cutting)* und das *Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahlschneiden (WASS, englisch: Abrasive Water Suspension Jet Cutting)* unterschieden. Die Verfahrensvarianten sind in Abb. 3.11 schematisch dargestellt.

Wasser-Abrasiv-Injektorstrahlschneiden (WAIS)

Bei diesem Verfahren wird dem reinen Wasserstrahl das Abrasivmittel über einen Mischkopf zugeführt, das Abrasivmittel wird hierbei durch den sog. Venturi-Effekt¹⁵ in den Wasserstrahl gesogen. Um einen schnellen Verschleiß der Düse zu vermeiden, werden diese aus besonders harten Materialien wie Saphir oder Diamant hergestellt. Der Schneidstrahl besteht neben Wasser und Abrasivmittel zu ungefähr 95 % aus Luft (Drei-Komponenten-Gemisch) /LUH 21a/. Die hohe kinetische Energie des Strahls und der Partikel wirkt auf mikroskopischer Ebene spanabhebend und führt so zur trennenden Wirkung. Das Verfahren eignet sich für nahezu alle Werkstoffe und schließt Materialien wie diverse Stahlarten, Aluminiumlegierungen, technische Keramiken oder Faserverbundwerkstoffe ein. Das Verfahren kann auch unter Wasser eingesetzt werden.

¹⁵ Der Effekt bezeichnet die Abnahme des statischen Drucks in strömenden Fluiden mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit

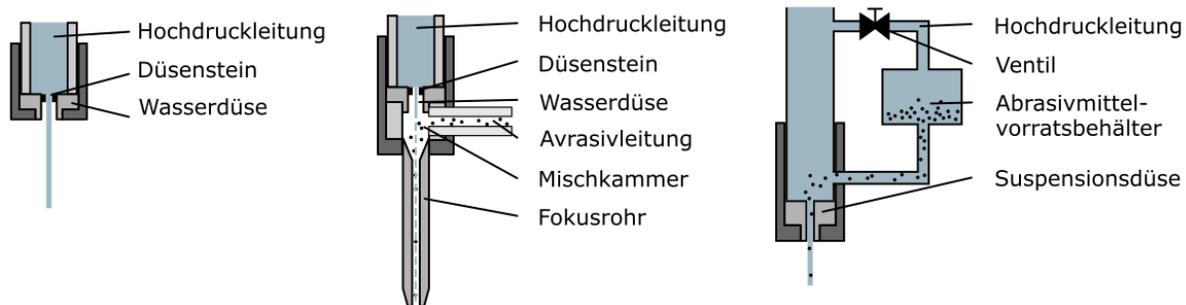


Abb. 3.11 Verfahrensvarianten des Wasserstrahlschneidens

Das linke Bild zeigt das Reinwasserstrahlverfahren. Das mittlere bzw. rechte Bild zeigt das Wasser-Abrasiv-Injektorstrahlenschneiden (WAIS) bzw. das Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahlenschneiden (WASS). Der wesentliche Unterschied zwischen dem WAIS und dem WASS ist das Vorgehen zur Beimischung des Abrasivmittels.

Als Abrasivmittel werden harte Materialien wie z. B. Glasperlen (Mohs Härte 5 bis 6), Granatsand (Mohs Härte 7 bis 8) oder Stahlpartikel (Mohs Härte 7 bis 9) verwendet /LLA 21/. Der Außendurchmesser der Abrasiv-Teilchen liegt im Bereich 50 bis 500 μm /ALA 21/.

Eine japanische Arbeitsgruppe führte eine Machbarkeitsstudie durch, bei der eine Hochdruckpumpe für eine Verdichtung auf 370 MPa eingesetzt wurde. Bei dieser Studie konnte Stahl mit einer Dicke von 270 mm Dicke (an Luft) bzw. 220 mm Dicke (in Wasser) erfolgreich zerlegt werden /TEZ 14/. Für den Volumenabtrag sind in der Literatur Raten von etwa 2 mm^3 pro Sekunde zu finden /LLA 21/.

Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahlenschneiden (WASS)

Der grundsätzliche Unterschied zu dem WAIS liegt in der Umsetzung der Beimischung des eingesetzten Abrasivmittels. Bei dem WASS gelangt ein Teil des Druckwassers über ein Bypass-Ventil in eine Zumischeinheit in dem sich das Abrasivmittel befindet. Hier bilden das Wasser und Abrasivmittel eine Suspension die anschließend wieder zur Schneiddüse geleitet wird. Der resultierende Strahl besteht somit aus zwei Phasen mit einer effektiven Volumenzusammensetzung von etwa 97,5 % Wasser und 2,5 % Abrasivmittel – der Strahl ist somit insbesondere (nahezu) frei von Luft. Auch dies sorgt dafür, dass das WASS im Vergleich zu dem WAIS in der Regel mit niedrigeren Drücken arbeitet. Das Verfahren ist auch für den Einsatz unter Wasser geeignet. Die Vorschubgeschwindigkeit ist im Vergleich zum WAIS meist etwas höher, für Edelstahl mit einer Dicke von 10 mm stellt 200 mm/min einen Richtwert für die Vorschubgeschwindigkeiten dar.

Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes gegenüber WAIS ist die mögliche räumliche Trennung zwischen Düsen- und Mischeinheit, so dass die Mischvorrichtungen beispielsweise außerhalb des Kontrollbereiches platziert werden kann.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das RWS kann insbesondere für das Trennen verhältnismäßig weicher Materialien wie Holz oder Gummi genutzt werden. Für die WAS-Verfahren umfasst das Anwendungsspektrum alle relevanten harten Materialien, zudem ist keine signifikante Geräteanpassung an das zu trennende Material notwendig. Zur Erzeugung der Wasserstrahlen werden Hochdruckpumpen eingesetzt, die typischerweise bis etwa 600 MPa verdichten /LUH 21/.

Durch den Einsatz der Abrasivmittel können bei den WAS Verfahren höhere Schnittdicken und Schnittgeschwindigkeiten erreicht werden. Durch das Abrasivmittel ist die Düse einer stärkeren Belastung ausgesetzt und verschleißt schneller. Beim WASS werden im Vergleich zu dem WAIS geringere Arbeitsdrücke genutzt, auch hieraus ergibt sich ein größerer Anteil recycelbares Abrasivmittel.

Im Gegensatz zu den meisten anderen mechanischen Trennverfahren treten nur geringe Rückstellkräfte auf, wodurch die Verfahren auch sehr gut für den fernhantierten Gebrauch einsetzbar sind /KAU 10/. Durch eine kompakte Bauweise sind die Geräte leicht in der Handhabung, was zum Beispiel auch die Rohrintrennung bei Rohren mit ausreichenden Innendurchmessern erlaubt.

Für hinreichend dünne Werkstücke sind saubere Schnitte mit geringen Fugenbreiten möglich. Bei dickeren Werkstücken divergiert der Schneidstrahl zunehmend (Ablenkung), wodurch sich die Schnittfuge in die Tiefe vergrößert und die Effektivität des Verfahrens reduziert wird. Grundsätzlich liegt die Fugenbreite im Bereich eines Millimeters und ist somit verhältnismäßig schmal, dementsprechend ist auch die durch den Schnitt freigesetzte Materialmenge gering /POS 13/. Die Schnittführung ist sehr flexibel, so dass sich die Verfahren auch für eine komplexe Schnittführung (beispielsweise bei komplexen Geometrien) in räumlich beschränkten Arbeitsbereichen eignen.

Als Sekundärabfall fällt insbesondere das Prozesswasser an /HÜB 17/, das in der Regel gefiltert werden muss. Der typische Wasservolumenstrom liegt im Bereich einiger Liter pro Minute. Für die

WAS-Verfahren fallen zusätzlich die Abrasivmittel an – typischerweise werden 200 g/min oder mehr Abrasivmittel verbraucht. Zudem können bei der Trennung Späne entstehen.

Wesentliche Verfahrenscharakteristika sind in Tab. 3.15 aufgeführt.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Im Kernkraftwerk Würgassen kam das WAIS beim Rückbau der RDB-Kuppel zum Einsatz /IAE 02/. International wurde das WAIS u. a. zur Zerlegung des biologischen Schildes des JPDR (Japan) genutzt, auch in den USA wurde es z. B. für die Zerlegung von RDB und RDB-Einbauten verwendet /POS 13/. Im Kernkraftwerk Connecticut wurde das abrasive Wasserstrahlschneiden für das Trennen von RDB-Einbauten verwendet. Der generierte Sekundärabfall bestand aus einer Mischung des Abrasivmittels mit hoch aktivierten Spänen, pro Minute wurden etwa 4 kg erzeugt /OECD 14/.

Das WASS kam beim Rückbau des RDBs des Versuchsreaktors Kahl zum Einsatz /MOO 19/. Für Zerlege-Arbeiten an Reaktoreinbauten im KKB wurde der Roboter TX200 eingesetzt, der mit dem Düsenkopf einer WASS-Anlage ausgestattet wurde. Der Roboter wurde zum Zerlegen von RDB-Einbauten (Dampftrockner) unter Wasser eingesetzt /HÖG 19/. Auch im KKS wurde das Verfahren genutzt und für das Trennen metallischer Bauteile (z. B. Mantel des oberen Kerngerüsts, Deckplatte, oberer Rost und Kernschemel) mit Stärken von bis zu 200 mm verwendet /SCH 09/.

Derzeit gibt es einige Bestrebungen zur Weiterentwicklung des WASS, siehe Abschnitt 5.1.2.

Tab. 3.15 Wesentliche Charakteristiken der Wasserstrahlverfahren

Verfahren	RWS	WAIS	WASS
Umgebung	An Luft und unter Wasser		
Schnittgeschwindigkeit	10 mm Stahl: Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich 10 (RWS) bis etwa 200 mm/min (WASS)		
Schnitttiefe		Stahl: Bis ca. 130 mm Beton: Bis ca. 500 mm	Stahl: Bis etwa 300 mm Beton: Bis etwa 500 mm
Sekundärabfall	Große Mengen (Gemisch aus Wasser und Schnittfugenmaterial)	Sehr große Mengen (Gemisch aus Wasser, Abrasiv- und Schnittfugenmaterial)	
Verbrauchsmaterialien	Wasser (und Düsenköpfe)	Wasser, Abrasivmittel, Düsenköpfe	
Formschnitt	Komplexe Schnitte möglich		
Fernhantierung	Gut möglich		
Aerosole/Hydrossole	Geringe Freisetzung		
Platzanspruch	Mittel	Mittel	Gering bis Mittel
Materialien	Insbesondere weiche Materialien	Alle Materialien	
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Rückstellkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Rückstellkräfte • Breites Materialspektrum • Flexibel in Bezug auf Einsatz und Geometrien 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Rückstellkräfte • Breites Materialspektrum • Sehr flexibel in Bezug auf Einsatz und Geometrien • Abrasivmittel kann teilweise wiederverwendet werden

3.2.2 Qualitative Einschätzung etablierte Trennverfahren

Im Abschnitt 3.1 wurde dargelegt, welche Kriterien der praktischen Verfahrensauswahl zugrunde gelegt werden können. Für eine solche Einschätzung sind insbesondere die Verfahrenscharakteristika zu beachten – neben dem Aspekt der grundsätzlichen Eignung finden auch die Wirtschaftlichkeit und die Performance eine Berücksichtigung.

Für belastbare Verfahrensbewertungen, die bei der Verfahrensauswahl als objektive Kriterien dienen könnten, fehlen in der Literatur allerdings übergreifende Arbeiten, die für einzelne Verfahren aussagekräftige und auf praktische Erfahrungen stützende Kennwerte abbilden. Publierte Vergleichsstudien betrachten in der Regel nur eine beschränkte Verfahrensauswahl für bestimmte (wenige) Aufgabenstellungen. Auch publizierte Werte für Verfahrenseigenschaften (z. B. Schnittgeschwindigkeiten) sind in einem hohen Maß aufgabenspezifisch und stellen häufig sehr konservative Werte dar, da zur Risiko- und Abfallminimierung bei den Trennprozessen die grundsätzliche Verfahrensleistungen nicht ausgeschöpft werden. Erschwerend kommt hinzu, dass insbesondere Performanceaspekte nicht nur verfahrensabhängig, sondern in einem hohen Maße auch werkzeughabhängig sind. Weiterhin zeigen Parameter wie Schnittleistung und erzeugte Sekundärabfälle starke Korrelationen, so dass man quantitative Kriterien meist nur als mehrdimensionales Problem eruieren kann. Grundsätzlich wäre es wünschenswert, wenn möglichst umfangreiche und qualitätsgesicherte Informationen zur Verfügung stünden, die man als allgemein nachvollziehbare Datengrundlage für Auswahlentscheidungen nutzen könnte.

Nichtsdestotrotz sind auch qualitative Kriterien, die sich auch auf Erfahrungswerte stützen, für die Verfahrensauswahl enorm hilfreich. Diese führen zwar nicht zwingend zu einer optimalen Verfahrensauswahl, können aber – z. B. im Kontext von Ausschlusskriterien – die Liste der in Frage kommenden Verfahren deutlich einschränken.

Die in diesem Abschnitt näher betrachteten Bewertungsfaktoren werden in Abschnitt 3.2.2.1 dargelegt und erläutert. In Abschnitt 3.2.2.2 werden anschließend grundsätzliche Eigenschaften thermischer und mechanischer Trennverfahren verglichen, bevor in Abschnitt 3.2.2.3 eine Bewertungsmatrix erstellt und diese diskutiert wird.

3.2.2.1 Auswahl von Einschätzungsfaktoren

Auf Basis der Verfahrensbeschreibungen in Abschnitt 3.2.1 werden folgende qualitative Bewertungskriterien betrachtet:

- Anwendungsumgebung
- Material
- Flexibilität bzw. Universalität
- Schnittgeschwindigkeit
- Schnitttiefen
- Sekundärabfall
- Eignung für die Fernhandlung

Die genannten Aspekte werden im Folgenden näher erläutert. Die Zuordnungen für die einzelnen Verfahren sind in Tab. 3.17 bis Tab. 3.19 zusammengefasst.

Anwendungsumgebung

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Anwendbarkeit eines Verfahrens an Luft und/oder unter Wasser. Für die meisten Verfahren ist grundsätzlich beides – wenn auch nicht gleichermaßen gut – möglich. Wie sich allerdings die Schnittparameter durch einen Umgebungswechsel ändern und ob (und in welchem Umfang) Vorkehrungen zu treffen sind, ist grundsätzlich verfahrensabhängig. Insbesondere lassen sich allgemeingültige Aussagen (z. B., dass die Schnittperformance unter Wasser schlechter sei als an Luft) nicht treffen. Neben der grundsätzlichen Eignung wird zudem berücksichtigt, wofür die Verfahren standardmäßig ausgelegt sind. Für die Kontakt-Lichtbogen-Metallbearbeitung ist beispielsweise eine Anwendung an Luft möglich, konzipiert sind die Verfahrenstechniken aber in der Regel für den Einsatz unter Wasser.

Material

Die Verfahren zeigen eine unterschiedlich stark ausgeprägte Eignung für bestimmte Materialien. Für die Stilllegung sind Stahl (sowohl niedrig- als auch hochlegierte Stahlsorten) und (bewehrter) Beton die mit Abstand wichtigsten Materialien, aber auch andere Metalle (z. B. Kupfer), Verbundstoffe und Kunststoffe sind im Rahmen der Stilllegung zu trennen. Sofern sich wesentliche Einschränkungen für einzelne Verfahren ergeben, sind diese in den zusammenfassenden Tabellen

hinterlegt. Die Kategorie „breites Materialspektrum“ wird genutzt, wenn das entsprechende Verfahren für die meisten in der Stilllegung anfallenden Materialien grundsätzlich geeignet ist.

Flexibilität bzw. Universalität

Die Universalität hängt von einigen Größen ab, zu denen u. a. die folgenden drei Faktoren gehören: Zum einen gehört hierzu die Objektgeometrie (erster Faktor), da z. B. die Oberflächenbeschaffenheit (ebene Flächen sind für einige Verfahren leichter zu trennen bzw. die Werkzeuginstallation ist für solche Flächen mit weniger Aufwand verbunden) die Anwendbarkeit eines Verfahrens beeinflusst. Zudem stellen zusammengesetzte Materialien mit Sandwichstrukturen oder Materialien mit Leerräumen für einige Verfahren eine Herausforderung dar (zweiter Faktor). Zu diesen gehören insbesondere die thermischen Verfahren, da deren Wirkprinzip in der Regel einen annähernden Oberflächenkontakt voraussetzen. Zum anderen können unterschiedliche Materialien oder Materialstärken Änderungen an den Werkzeugen notwendig machen (was mit entsprechenden Rüstzeiten verbunden ist), worunter die Universalität leiden kann (dritter Faktor).

Die Einschätzung verläuft hier über drei Stufen:

- Kategorie „hoch“

Diese Kategorie wird für Verfahren verwendet, die a.) für ein breites Spektrum an Objektgeometrien geeignet sind, b.) für Leerraum umschließende Materialien (die ggfs. auch eine Sandwich-Struktur aufweisen können) geeignet sind und für die c.) nur kleinere material-spezifische Adaptionen durchgeführt werden müssen, die zudem nur mit geringen Rüstzeiten verbunden sind. Verfahren, bei denen das Schneidmittel beispielsweise an den Werkstoff (z. B. Seilsägen) angepasst werden muss, gehören somit nicht zu dieser Kategorie.

- Kategorie „mittel“

Für Verfahren dieser Kategorie treffen mindestens zwei der oben genannten Faktoren wesentlich zu.

- Kategorie „gering“

Für Verfahren dieser Kategorie trifft eines der oben genannten Faktoren im Wesentlichen zu.

Schnittgeschwindigkeit

Die Schnittgeschwindigkeit gehört zu den wesentlichen Parametern, die die Performance beschreiben. Für die Bewertung werden typische Werte aus der Anwendung aufgegriffen. In vielen Fällen erlauben die Verfahren zwar auch höhere Schnittgeschwindigkeit, dies bedingt allerdings meist erhöhte Verschleißwerte, reduzierte Standzeiten und/oder eine geringe Prozessstabilität bzw. -sicherheit. Die Schnittgeschwindigkeit ist keine universelle Größe, da die Materialstärke für die einzelnen Verfahren einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Schnittgeschwindigkeit nimmt. So fällt beispielsweise die Schnittgeschwindigkeit für das Plasmaschmelzschneiden im Vergleich zum autogenen Brennschneiden deutlich stärker mit zunehmender Materialstärke ab. Auch aus diesem Grunde ist die Aussagekraft zwar beschränkt, eine grundsätzliche Einschätzung kann aber vermittelt werden. Die Einschätzung nutzt drei Stufen:

- Kategorie „gering“
Zu dieser Kategorie gehören langsame Verfahren, für die beispielsweise Schnittgeschwindigkeiten von 10 mm/min für 10 mm Stahl nicht überschritten werden.
- Kategorie „mittel“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, die beispielsweise 10 mm Stahl mit Geschwindigkeiten zwischen 10 mm/min und 200 mm/min typischerweise trennen können.
- Kategorie „hoch“
Zu dieser Kategorie gehören schnelle Verfahren, für die typischerweise Schnittgeschwindigkeiten von 200 mm/min oder mehr für 10 mm Stahl erreicht werden.

Schnitttiefen

Die mit einem Verfahren mögliche Schnitttiefe ist ein weiterer wichtiger Parameter in der Planung, der oft auch als Ausschlusskriterium dienen kann. Für manche Verfahren ist die Schnitttiefe materialspezifisch beschränkt, andere Verfahren sind nahezu materialunabhängig. Für eine Bewertung ist erschwerend zu berücksichtigen, dass die Schnitttiefe von anderen Prozessparametern abhängen kann – bei den Wasser-Abrasiv-Strahlverfahren beeinflusst beispielsweise der Wasserdruck die mögliche Schnitttiefe.

Die Einschätzung verläuft anhand dreier Kategorien:

- Kategorie „gering“
Für diese Kategorie sind Schnitttiefen bis etwa 100 mm möglich. Zu dieser Kategorie von Verfahren mit geringen Schnitttiefen gehört beispielsweise das Funkenerodieren oder das Trennschleifen (aufgrund der in der Praxis beschränkten Scheibendurchmesser gängiger Werkzeuge).
- Kategorie „mittel“
Verfahren dieser Kategorie weisen (beispielsweise für Stahl) typischerweise Schnitttiefen bis 300 mm auf.
- Kategorie „hoch“
Verfahren dieser Kategorien eignen sich für Werkstücke mit Stärken von mehr als 300 mm.

Sekundärabfall

Als Sekundärabfälle werden Abfälle definiert, welche durch die Verfahrensanwendung entstehen /THI 09/. Zu diesen Sekundärabfällen gehören neben Verschleißteilen (z. B. Trennscheiben) auch Filter (zum Sammeln von Aerosolen oder kleiner Partikel), Prozessflüssigkeiten, Arbeitsmittel (z. B. Kühlmittel) sowie durch das Trennen entstandenen Aerosole, Stäube, Partikel oder Fragmente (z. B. Späne). Aufgrund der teilweise enorm hohen Entsorgungskosten und beschränkten Entsorgungskapazitäten (für radioaktive Abfälle), kommt den Sekundärabfällen bei der Verfahrensauswahl somit eine entscheidende Rolle zu.

Grundsätzlich wird eine möglichst geringe Generierung von (radioaktiven) Sekundärabfällen angestrebt. Die Bewertung diesbezüglich kann jedoch kompliziert sein und lässt sich nicht immer von der Quantität des erzeugten Abfallaufkommens ableiten. Laut /KAU 10/ kann ein technisches Verfahren, das zu einem höherem Abfallaufkommen führt, trotzdem sachgerecht sein, wenn hierdurch Expositionen in der Nachzerlegung vermieden werden können. Das gleiche gilt für Fälle, für die eine Nachzerlegung logistisch aufgrund fehlender Arbeitsplätze für den Umgang mit kontaminierten Werkstücken nicht möglich ist. Grundsätzlich lässt sich jedoch feststellen, dass Verfahren, bei deren Anwendung Sekundärabfälle erzeugt werden, das gesamte Abfallaufkommen und die mit der Entsorgung verbundenen Mehrkosten signifikant erhöhen können. Das Aufbereiten und Konditionieren von Sekundärabfällen kann mitunter deutlich teurer sein, als die Investitionskosten für ein kostenintensives Trennverfahren, dessen Anwendung jedoch weniger

Sekundärabfälle erzeugt /IAEA 99/. Bei der Betrachtung der Sekundärabfälle müssen somit auch deren Eigenschaften betrachtet werden.

Die Einschätzung verläuft hier über eine dreistufige Kategorisierung:

- Kategorie „gering“

Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, die nur zu einem geringen und leicht handzuhabenden Sekundärabfallaufkommen führen. Voraussetzung hierfür sind z. B. schmale Trennfugen oder geringe Freisetzungen in Form kleiner Partikel oder Aerosole.

- Kategorie „mittel“

Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, die in der Regel zu erhöhten Sekundärabfallmengen führen. Dies kann beispielsweise durch einen erhöhten Verschleiß, großen Schnittfugen oder zusätzlichen Prozessmitteln einhergehen.

- Kategorie „hoch“

Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, bei deren Anwendung erhebliche Mengen Sekundärabfall erzeugt werden, beispielsweise aufgrund von Prozessflüssigkeiten, Abrasivmitteln oder einem hohen Werkzeugverschleiß.

Eignung für die Fernhantierung

Die Verfahrensauswahl berücksichtigt auch den Grad der Kontamination, da bei stark kontaminierten/aktivierten Komponenten (wie RDB-Einbauten) aufgrund der hohen Ortsdosisleistungen auch ein Einsatz unter Wasser möglich sein muss. Mit der Eignung zum Unterwassereinsatz eng verknüpft sind die Möglichkeiten zum fernhantierten Einsatz der benötigten Werkzeuge. Fernhantierbare bzw. fernbedienbare Werkzeuge lassen sich für Arbeiten einsetzen, bei denen aufgrund von hohen Ortsdosisleistungen manuelle Tätigkeiten unmöglich sind. Laut /SÜß 07/ gibt es keine Vorgaben ab welcher Dosisleistung ein fernhantierter Rückbau vorgesehen ist. Maßgebend ist jedoch immer das ALARA Prinzip, das ein Minimierungsgebot der abschätzbaren Kollektivdosis fordert, die signifikant von der lokalen Ortsdosisleistung und der Aufenthaltszeit abhängt. Erfahrungsgemäß wird ab einer Ortsdosisleistung von 0,5 mSv/h fernhantiert zurückgebaut /SÜß 07/. Fernhantierbare Trennverfahren sollten leicht bedienbar sein, aber auch hohe Standzeiten und geringen Rüstzeiten aufweisen, insbesondere wenn sie in Bereichen mit hoher Ortsdosisleistung eingesetzt werden. Auch weitere Faktoren wie das Gewicht, die Werkzeuggröße, die aufzufangenden Rückstellkräfte, trennbedingte Eintrübungen (unter Wasser) beeinflussen die

Fernbedienbarkeit. Eine negative Einschätzung im Sinne dieser Faktoren ist aber keine zwingendes Ausschlusskriterium, ggfs. ist eine Fernhantierbarkeit durch zusätzliche Planung, zusätzliche technische Investitionen oder einem erhöhten Zeitaufwand grundsätzlich trotzdem möglich.

Die Einschätzung verläuft hier über eine dreistufige Kategorisierung:

- Kategorie „gering“
Verfahren dieser Kategorie sind in der Regel sind nur mit hohem Aufwand aus der Ferne zu bedienen oder zu steuern, beispielsweise aufgrund der für den händischen Betrieb ausgelegten Werkzeugführung oder einem hohen Werkzeugverschleiß.
- Kategorie „mittel“
Für Verfahren dieser Kategorie ist der Aufwand für eine Bedienung oder Hantierung aus der Ferne im durchschnittlichen Rahmen. So sind gegebenenfalls Führungsschienen o. ä. zu installieren oder spezifische Anforderungen zu erfüllen, beispielsweise zum Auffangen hoher Rückstellkräfte.
- Kategorie „hoch“
Verfahren dieser Kategorie sind sehr gut für eine Bedienung oder Steuerung aus der Ferne ausgelegt.

3.2.2.2 Grundsätzlicher Vergleich thermischer und mechanischer Trennverfahren

Thermische und mechanische Trennverfahren weisen aufgrund ihrer Wirkweise grundlegende Eigenschaften auf, die – im Vergleich zur jeweils anderen Verfahrensklasse – als Vor- bzw. Nachteile ausgelegt werden können. Diese werden in Tab. 3.16 zusammengefasst und im Folgenden erläutert.

Ein wesentlicher Punkt betrifft die beim Trennvorgang erzeugten Partikel. Bei den thermischen Verfahren werden – neben der Schlacke aus der Trennfuge– vergleichsweise große Mengen an Aerosolen (bzw. Hydrosolen) erzeugt. Aufgrund ihrer radiologischen Relevanz aber auch aus grundsätzlichen Gesundheitsaspekten (Prozessgase) ist in der Praxis eine entsprechende Filterung notwendig, häufig in Verbindung mit Absaugvorrichtungen, Einhausungen und/oder Lüftungsanlagen. Unter Wasser führen thermische Verfahren häufig zu einer signifikanten Eintrübung des Wassers im Arbeitsbereich, so dass auch hier für eine sichere Schnittführung neben einer Wasserzirkulation auch eine rasche Filterung notwendig ist. In beengten Räumlichkeiten – was

häufig auf Kontrollbereiche zutrifft – können solche Sekundärkomponenten mitunter schwer zu realisieren sein, zudem sind sie mit teilweise erheblichen Investitions- und Entsorgungskosten verbunden. Bei den mechanischen Verfahren werden in der Regel größere Partikel (z. B. Späne) freigesetzt (Betragschnitt stellt hier eine wesentliche Ausnahme dar), die sich meist auf dem Boden sammeln /BER 98/ und verhältnismäßig leicht einsammeln lassen. Dementsprechend sind die Anforderungen an Lüftungs- und Filter-Anlagen deutlich geringer, so dass in Kontrollbereichen für Arbeiten an Luft häufig auf mechanische (Säge-)Verfahren zurückgegriffen wird.

Aufgrund der bei thermischen Verfahren entstehenden hohen Temperaturen sind Brandschutzvorkehrungen zu treffen, die mitunter die Anwendbarkeit, insbesondere in beschränkten Räumlichkeiten, einschränken können. Zudem ergibt sich bei handgeführten Arbeiten auch ein zusätzliches Verletzungsrisiko (Verbrennungen), so dass auch hierfür adäquate Vorkehrungen zu treffen sind. Auch mechanische Verfahren weisen verfahrensspezifische Gefahren auf. Beim Seilschleifen stellt z. B. ein gerissenes Seil ein Szenario dar (Peitscheneffekt), das mit einer Gefahr für Mensch und Maschine einhergeht. Vorkehrungen, wie eine entsprechende Dimensionierung von Arbeitsbereichen, können flächenextensiv sein. Moderne Seilsägen haben meist entsprechende Einhausungen, die das Risiko reduzieren und eine Verkleinerung der Arbeitsbereiche erlauben.

Tab. 3.16 Übersicht zu allgemeinen Vor- und Nachteilen thermischer und mechanischer Trennverfahren

	Thermische Verfahren	Mechanische Verfahren
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Schnittgeschwindigkeit, dadurch werden u. a. kürzere Aufenthaltszeiten ermöglicht - Geringe Rückstellkräfte - Genutzte Werkzeuge haben in der Regel einen geringen Platzbedarf - Häufig Geringe Rüstzeiten und hohe Standzeiten - Komplexe Schnittführung in der Regel möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Erzeugte Partikel (insb. Späne und Stäube) sind verhältnismäßig groß und leicht durch Abscheider oder Filter aufzufangen - Geringere Aerosolfreisetzung im Vergleich zu thermischen Verfahren - Geeignet für breites Materialspektrum - In der Regel geeignet für viele Objektgeometrien (z. B. Objekte mit innenliegenden Wandstrukturen) - Einsatz unter Wasser wirkt sich in der Regel nicht negativ auf die möglichen Schnitttiefen auf.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Sekundäre Anlagen (z. B. Einhausungen und Filtereinrichtungen) können flächenextensiv sein - Oftmals hohe Schutzmaßnahmen bei Aerosolbildung (z. B. mobile Absaugungen, Einhausungen) - Arbeiten unter Wasser führen oftmals zur Eintrübung der z. B. mit Filteranlagen begegnet werden muss - Zusätzliche Anforderungen bedingt durch den Brandschutz - Bildung von giftigen Gasen und Dämpfen ist zu berücksichtigen - Einige Verfahren haben nur ein eingeschränktes Materialspektrum - Ggfs. Nachbearbeitung der Schnittkanten notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - In der Regel geringere Schnittgeschwindigkeit - Meist nur lineare Schnittführung - Vergleichsweise hohe Rückstellkräfte, die insbesondere bei der Bedienung aus der Ferne aufzufangen sind - Rüstzeiten in der Regel und im Vergleich zu thermischen Verfahren höher - Standzeiten oft geringer aufgrund von Werkzeugverschleiß

Einige thermische Verfahren erlauben im direkten Vergleich oftmals hohe bis sehr hohe Schnittgeschwindigkeiten. Dies kann dazu führen, dass Trennarbeiten mit thermischen Verfahren manuell durchgeführt werden können, während dies – aufgrund der geringeren Schnittgeschwindigkeiten – mit mechanischen Verfahren nicht möglich wäre.

Das Materialspektrum mechanischer Verfahren ist in der Regel breit, wohingegen einige thermische Verfahren deutliche Materialeinschränkungen (z. B. das autogene Brennschneiden)

aufweisen die nur zum Teil durch Verfahrensanpassungen (im Falle des autogenen Brennschneidens z. B. das Pulverbrennschneiden) kompensiert werden können.

Sägeverfahren nutzen in der Regel lineare Schnitte und sind für ein breites Spektrum an Objektgeometrien – Objektgrößen ausgenommen – geeignet. Insbesondere Werkstücke mit innenliegenden Wandstrukturen (Einschluss von Leerräumen) können die Anwendung einiger thermischer Verfahren ausschließen. Komplexe Schnittführungen – die z. B. für die Materialkonditionierung und/oder Verpackung wünschenswert sein können – sind mit thermischen Verfahren gut und mit vergleichsweise wenigen Schnitten möglich. Komplexe Schnittführungen sind zwar auch mit mechanischen Verfahren nicht ausgeschlossen, benötigen aber in der Regel mehrere (zeitintensivere) Schnittansätze.

Thermische Verfahren haben vergleichsweise geringe Rückstellkräfte, da bei ihnen der Materialabtrag auch ohne direkten mechanischen Kontakt bewerkstelligt wird. Dies kann insbesondere für fernbediente Anwendungen den Aufwand (z. B. Rüstaufwand) reduzieren. Für die mechanischen Verfahren ist oftmals ein höherer Werkzeugverschleiß¹⁶ zu beobachten, was sich negativ auf die Standzeiten auswirken kann.

Häufig werden Trennverfahren auch unter Wasser eingesetzt. Hinsichtlich der erreichbaren Schnitttiefen zeigen die mechanischen Verfahren nur eine geringe Abhängigkeit vom umgebenden Medium auf, eine solche Abhängigkeit ist bei einigen thermischen Verfahren deutlich ausgeprägter.

3.2.2.3 Darstellung und Diskussion der Bewertungsmatrix

Die Einschätzungen sind in Tab. 3.17 bis Tab. 3.19 hinterlegt.

Bei den Brennschneidverfahren, zu denen das autogene Brennschneiden, das Pulverbrennschneiden und die Sauerstofflanze gehören, ist die Temperatur ein entscheidender Parameter für die Materialeignung. Aus diesem Grund weist beispielsweise das autogene Brennschneiden nur eine eingeschränkte Materialeignung auf. Die Sauerstofflanze ist als stanzähnliches Verfahren

¹⁶ Die Verfahren der Kontakt-Lichtbogen-Verarbeitung stellen derzeit auf Seite der thermischen Verfahren noch oft eine Ausnahme dar und weisen einen verhältnismäßig hohen Werkzeugverschleiß auf.

anspruchsvoll in der Handhabung und ist für die nationalen Stilllegungsprojekte auch aufgrund der niedrigen Trenngeschwindigkeit quasi irrelevant. Das Plasmaschmelzschnneiden kann nur für leitfähige Materialien genutzt werden, ist dafür aber im Gegensatz zu dem autogenen Brennschnneiden auch für hochlegierte Stähle geeignet. Das Laserstrahlschnneiden findet derzeit noch selten in der Stilllegung Verwendung, aufgrund der vorteilhaften Eigenschaften (z. B. hinsichtlich der Schnittqualität und geringer Sekundärabfallmengen im Vergleich zu anderen thermischen Verfahren) werden dem Verfahren mittelfristig aber gute Etablierungschancen eingeräumt. Die meisten thermischen Verfahren können auch sinnvoll unter Wasser eingesetzt werden, es ist allerdings festzuhalten, dass sich die Schnitteigenschaften dadurch unterschiedlich stark verschlechtern.

Die Kontaktlichtbogenverfahren sind zuvorderst für den Unterwassereinsatz konzipiert, einer breiteren Verwendung stehen derzeit aber noch hohe Sekundärabfallmengen entgegen. Das Funken-erodieren nimmt eine Sonderrolle ein und wird unter anspruchsvollen Randbedingungen genutzt, für die die nachteiligen Trenneigenschaften (hervorzuheben sind die geringe Schnittgeschwindigkeit bzw. Schnitttiefe) keine entscheidende Rolle spielen.

Sägeverfahren eignen sich für ein breites Materialspektrum, unterschiedlichste Objektgeometrien und können sowohl an Luft als auch unter Wasser eingesetzt werden. Die Sekundärabfallmengen sind gering. Die möglichen Schnitttiefen sind hoch und werden oftmals durch die Dimensionierung der verwendeten Sägen beschränkt (siehe Bandsägen). Das Seilschleifen verursacht größere Mengen an Sekundärabfall, hauptsächlich aufgrund der breiteren Schnittfuge. Zudem weisen die eingesetzten Seile eine hohe Materialspezifität auf, insbesondere hinsichtlich des Verschleißes. Gerade für hochbewehrte Betonstrukturen mit Stahlkugeleinlagerungen können sich in der Praxis Probleme ergeben. Eine charakteristische Eigenschaft, die sowohl für das Sägen als auch für das Seilschleifen zutrifft, ist eine konstante Schnittfugenbreite – dies ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal im Vergleich zu den thermischen Verfahren, bei denen eine Verbreiterung der Fugenbreite mit zunehmender Tiefe beobachtet werden kann.

Das Fräsen ist ein eher langsames, lokal eingesetztes Trennverfahren und wird genutzt, wenn sich andere Verfahren als ungeeignet werden, z. B. aufgrund des Platzangebots.

Das Wasserstrahlschnneiden ist ein flexibles Verfahren mit breitem Materialspektrum und ermöglicht feine Schnittfugen sowie teils hohe Schnitttiefen (verfahrensabhängig). Durch die Anwendung

werden jedoch insbesondere bei den Wasserabrasivverfahren teils hohe Mengen Sekundärabfall erzeugt, zudem wird (für Arbeiten an Luft) eine dedizierte Wasserbehandlung benötigt.

Tab. 3.17 Einschätzungsmatrix für thermische und mechanische Trennverfahren

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.2.1

Verfahren	Umgebung	Material	Flexibilität & Universalität	Schnittgeschwindigkeit	Schnitttiefen	Sekundärabfall	Fern-Eignung
Thermische Verfahren							
Autogenes Brennschneiden	an Luft und unter Wasser	insb. un- bzw. niedriglegierte Stähle auch Beton und einige weitere Metalle möglich (z. B. Ti oder Mo)	mittel	hoch	hoch	mittel bis hoch	hoch
Pulverbrennschneiden	an Luft	breites Materialspektrum, insb. auch hochlegierte Stähle	mittel	hoch	hoch	mittel bis hoch	hoch
Sauerstofflanze	an Luft	breites Materialspektrum	mittel	langsam bis mittel	hoch	mittel bis hoch	gering
Laserstrahlschneiden	an Luft und unter Wasser	breites Materialspektrum, insb. Metalle	gering bis mittel	mittel bis hoch	mittel bis hoch	gering bis mittel	hoch
Plasma-Schmelzschnneiden	an Luft und unter Wasser	leitfähige Materialien, insbesondere hochlegierte Stähle	mittel	hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch	hoch

Tab. 3.18 Einschätzungsmatrix für thermische und mechanische Trennverfahren (Fortsetzung)

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.2.1

Verfahren	Umgebung	Material	Flexibilität & Universalität	Schnittgeschwindigkeit	Schnitttiefen	Sekundärabfall	Fern-Eignung
CAMC	unter Wasser	leitfähige Materialien	mittel	mittel	mittel	mittel bis hoch	mittel bis hoch
CAMG	unter Wasser	leitfähige Materialien	mittel	hoch	hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch
Funkenerodieren	unter Wasser	leitfähige Materialien	gering bis mittel	gering	gering	mittel bis hoch	hoch
Mechanische Trennverfahren							
Bandsägen	an Luft und unter Wasser	breites Materialspektrum	mittel bis hoch	mittel bis hoch	hoch	gering	hoch
Stichsägen	an Luft und unter Wasser	breites Materialspektrum	mittel bis hoch	gering bis mittel	gering bis mittel	gering	hoch
Kreissägen / Wandsägen	an Luft und unter Wasser	breites Materialspektrum	mittel bis hoch	mittel	mittel bis hoch	gering	hoch
Fräsen	an Luft und unter Wasser	breites Materialspektrum	hoch	gering	gering	gering	mittel
Scheren	an Luft und unter Wasser	breites Materialspektrum	mittel	gering bis mittel	gering	gering	hoch
Trennschleifen	an Luft und unter Wasser	breites Materialspektrum	mittel	gering	mittel	mittel bis hoch	hoch
(Diamant-)Seilschleifen	in der Regel an Luft	breites Materialspektrum	mittel	hoch	hoch	hoch	mittel bis hoch

Tab. 3.19 Einschätzungsmatrix für thermische und mechanische Trennverfahren (Fortsetzung)

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.2.1

Verfahren	Umgebung	Material	Flexibilität & Universalität	Schnittgeschwindigkeit	Schnitttiefen	Sekundärabfall	Fern-Eignung
Reinwasserstrahlschneiden	an Luft und unter Wasser	überwiegend weichere Materialien	hoch	gering	gering	hoch	hoch
WAIS	an Luft und unter Wasser	Breites Materialspektrum	hoch	hoch	mittel bis hoch	hoch	hoch
WASS	an Luft und unter Wasser	Breites Materialspektrum	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch

3.3 Dekontaminationsverfahren

Die Dekontamination von Anlagenteilen, Gebäuden und Bodenflächen¹⁷ stellt eine der Hauptaufgaben in der Stilllegung dar. Der Begriff Dekontamination beschreibt hierbei gemäß dem IAEA Glossar die vollständige oder teilweise Entfernung von Kontaminationen durch einen bewusst eingesetzten physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgang /IAEA 22a/. Mit der Durchführung von Dekontaminationsmaßnahmen werden vorrangig die folgenden Ziele verfolgt (siehe z. B. Stilllegungsleitfaden /BMU 21/), die auch bei der Verfahrensauswahl Berücksichtigung finden:

- Reduzierung der Exposition (der Arbeiter);
- (Wieder-)verwertung von Geräten und Materialien;
- Verringerung des Volumens von Ausrüstungen und Materialien für die (Zwischen-)Lagerung und Endlagerung;
- Oftmals Erfüllung der Voraussetzungen für einen Freigabepfad;

Eine Kontamination ist gemäß StrlSchG eine „*Verunreinigung mit Stoffen, die eine Radionuklid oder mehrere Radionuklide enthalten.*“ Kontaminationen sind das Ergebnis zahlreicher physikalischer (insbesondere Adsorptionsprozesse) und/oder chemischer Prozesse (z. B. Ionenaustausch). Die zu Kontaminationen führenden Prozesse zeigen zudem eine sehr starke Materialabhängigkeit. Bei (glatten) Metallen sind Kontaminationen oft in einer sehr dünnen Oberflächenschicht von wenigen Mikrometern zu finden, während bei Betonstrukturen Kontaminationen durchaus auch einige Zentimeter und mehr in die Matrix eindringen können; für Beton sind tief eingedrungene Kontaminationen insbesondere auf Risse und Grenzschichten (z. B. zwischen Betonmatrix und Durchdringungen) zurückzuführen /BER 23/. Neben dem Basismaterial nehmen zudem die Rauigkeit der Oberfläche, der Korrosionsgrad bei Metallen, die Oberflächenporosität Einfluss auf die Kontamination und Kontaminationsverteilung. Im Falle kontaminierender Flüssigkeiten wirken sich auch deren physikalisch-chemischen Eigenschaften (z. B. Druck, Temperatur, pH-Wert) auf den Kontaminationsprozess auf.

¹⁷ Auch in der Betriebsphase werden Dekontaminationsverfahren eingesetzt, beispielsweise zur Systemdekontamination. Der Fokus dieses Abschnitts liegt aber auf stilllegungsgerichteten (aggressiveren) Dekontaminationsverfahren.

Grundsätzlich wird in der Praxis zwischen losen Kontaminationen und fixierten Kontaminationen unterschieden werden /LIU 22/. Zur Quantifizierung loser Kontaminationen, die in der Regel leicht (z. B. durch Abwischen) zu entfernen sind, werden oftmals Wischproben ausgewertet. Fixierte Kontaminationen sind hingegen in der Matrix gebunden (z. B. in der Korrosionsschicht bei Metallen oder in porösen Betonstrukturen) oder haften am Basismaterial – zur Entfernung solcher Kontaminationen sind oftmals aggressivere Methoden notwendig.

Für die Trennverfahren (siehe Abschnitt 3.2) bot sich eine Einteilung in thermische und mechanische Verfahren an. Analog lassen sich die Dekontaminationsverfahren grob in chemische, mechanische und sonstige Dekontaminationsverfahren gliedern. Gerade die chemischen Dekontaminationsverfahren lassen sich weiter unterteilen in einstufige, mehrstufige (hierzu gehören in der Regel auch die Verfahren für Systemdekontaminationen), elektrochemische und sonstige chemische Dekontaminationsverfahren. Grundsätzlich lässt sich im Vergleich zu den Trennverfahren bei den Dekontaminationsverfahren eine stärker ausgeprägte Materialabhängigkeit beobachten, so dass man in der Praxis auch häufig eine Unterscheidung auf Basis des zu behandelnden Materials findet (z. B. Dekontaminationsverfahren für Metalle, Beton und andere Werkstoffe), zudem kann auch zwischen einer Oberflächen- und einer Volumendekontamination unterschieden werden.

In Abhängigkeit der Einrichtung, der verwendeten Materialzusammensetzungen und der Betriebscharakteristika setzen sich die Kontaminationen aus bestimmten Radionukliden zusammen. Zu den in der Praxis geläufigen Radionukliden gehören unter anderem Fe-55, Co-60, Sr-90, Zr-93, Zr-95, Nb-94, I-129, I-131, U-238 und Am-241. Das Eindringverhalten der Kontamination ist sowohl von dem chemischen Element der Kontamination als auch von der Matrix abhängig /LIU 22/.

Die Effektivität einer Dekontamination wird häufig durch den Dekontaminationsfaktor (DF) ausgedrückt:

$$DF = \frac{\text{Kontaminationsniveau vor Anwendung der Dekontaminationsmaßnahme}}{\text{Kontaminationsniveau nach Anwendung der Dekontaminationsmaßnahme}}$$

Das Kontaminationsniveau kann durch die Aktivität, die flächenbezogene Aktivität, die Aktivitätskonzentration oder die spezifische Aktivität quantifiziert werden.

Es ist insbesondere festzustellen, dass kein Verfahren existiert, das universell einsetzbar ist und gleichermaßen zu hohen Dekontaminationsfaktoren führt. Auch für auf den ersten Blick vergleichbare Problemstellungen ist eine präzise Auseinandersetzung mit der Art der Kontamination in Kombination mit dem jeweils kontaminierten Material / Oberfläche notwendig, bevor ein bestimmtes Dekontaminationsverfahren für die vorgesehene Maßnahme sachkundig ausgewählt werden kann. Als ein Beispiel dienen Metallkomponenten in Druck- oder Siedewasserreaktoren, bei denen sich die Korrosionsschichten grundsätzlich unterscheiden, siehe auch Abschnitt 3.3.1. Zudem spielen weitere Faktoren bei der Verfahrensauswahl eine Rolle (z. B. die Strahlenexposition des Personals, der Zeitbedarf oder die Eignung zum fernhantierten Einsatz) hierfür sei auf Abschnitt 3.1 verwiesen.

Im folgenden Abschnitt 3.3.1 wird einleitend erläutert, wie chemische Prozesse für die Dekontamination von Metallen genutzt werden können, was es zu beachten gilt und welche Dekontaminationsansätze hierfür genutzt werden. Anschließend werden dann im Abschnitt 3.3.2 etablierte Verfahren zunächst beschrieben, bevor sie im Abschnitt 3.3.3 einer qualitativen Einschätzung unterzogen werden.

3.3.1 Wirkweise chemischer Verfahren für die Dekontamination von Metallen

Relevante Werkstoffe im Rahmen der Dekontamination von geschlossenen Systemen oder von metallischen Komponenten sind insbesondere diverse Edelstahlvarianten und Kohlenstoffstahl, so dass – obschon auch weitere Metalle wie Aluminium oder Kupfer vorzufinden sind – diese Materialien oftmals einen gewissen Fokus (z. B. bei Verfahrensoptimierungen) erfahren. Stähle bestehen überwiegend aus Eisen, korrosionsbeständige Stähle haben zudem einen hohen Chromanteil. Diese Elemente wiederum lösen sich durch Korrosion im Laufe der Zeit – insbesondere in den Kühlsystemen – und verteilen sich in den geschlossenen Systemen der Anlage.

Bei vielen Dekontaminationsanwendungen, bei denen eine Korrosion unedler Metalle¹⁸ vermieden werden soll, werden schwache Säuren (vergleichsweise hoher pH-Wert) in Verbindung mit Chelatbildnern verwendet, um abgetrennte Metallpartikel in Lösung zu halten. Für die Dekontamination in der Stilllegung besteht der Ansatz oft darin, einen möglichst niedrigen pH-Wert zu

¹⁸ Unedle Metalle reagieren mit Sauerstoff aus der Umgebung und oxidieren somit leicht.

verwenden, um eine gleichmäßige Korrosion des Grundmetalls zu fördern. Der Abtrag einer dünnen Schicht des Grundmetalls erhöht den erzielten Dekontaminationsfaktor in der Regel deutlich. Ein pH-Wert von etwa zwei ist das Minimum, das für eine saure Reinigungslösung bei der Dekontamination eines großen Reaktorsystems verwendet werden. Grund hierfür ist, dass für die weitere Verringerung des pH-Wertes eine unverhältnismäßig große Menge an Chemikalien nötig wären, die wiederum nicht alle am Ende des Prozesses abgetrennt werden können und als Teil des radioaktiven Abfalls entsorgt werden müssen /EPRI 98/.

Die Oxidschichten (siehe Abb. 3.12), die sich auf den metallischen Oberflächen des Wasserkreislaufs bilden (vgl. Abb. 3.13), werden in zwei Hauptkategorien unterteilt:

- Abgelagerte Oxide (englisch: *deposited oxides*)
- Gewachsene Oxide (englisch: *grown-on oxides*)

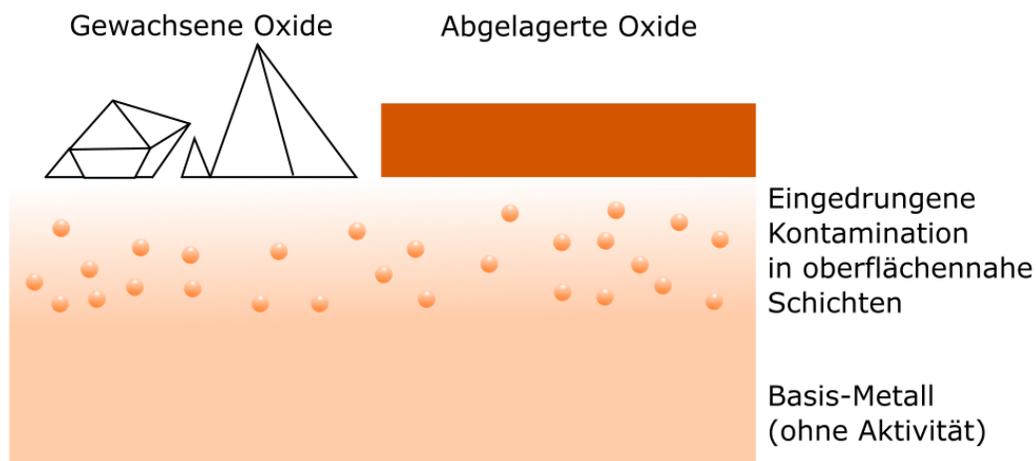


Abb. 3.12 Schematische Darstellung gewachsener und abgelagerter Oxide auf Metallflächen

Diese beiden Arten kommen zwar in allen Wasserreaktorsystemen vor, die relativen Mengen der beiden Arten sind allerdings bei SWR und DWR und sogar bei verschiedenen Anlagen desselben Typs sehr unterschiedlich. In Abb. 3.14 sind wesentliche Oxide aufgeführt, die sich auf den Oberflächen wasserführender Systeme in SWR und DWR ablagern. Radioaktive Oxide können sich auf Brennelementen und auf Oberflächen außerhalb des Kerns durch verschiedene Mechanismen bilden, z. B. durch Ausfällung aus einer Lösung oder durch Ablagerung von Partikeln aus dem Kühlmittel. Durch den Kühlmittelkreislauf können Partikel, die sich im Reaktorkern befunden haben, transportiert werden. Sobald sie sich als Oxid abgelagert haben, können sie zusätzliche

Aktivität durch Ionenaustauschreaktionen mit gelöster Aktivität aus dem Kühlmittel aufnehmen. Gewachsene Oxide (ortsfest) entstehen punktuell, insbesondere an angegriffenen (korrodierten) Stellen der Kühlkreisoberfläche. Sie bleiben dort, wo sie gebildet werden, und wachsen durch Ablagerung mobiler Partikel aus der Lösung.

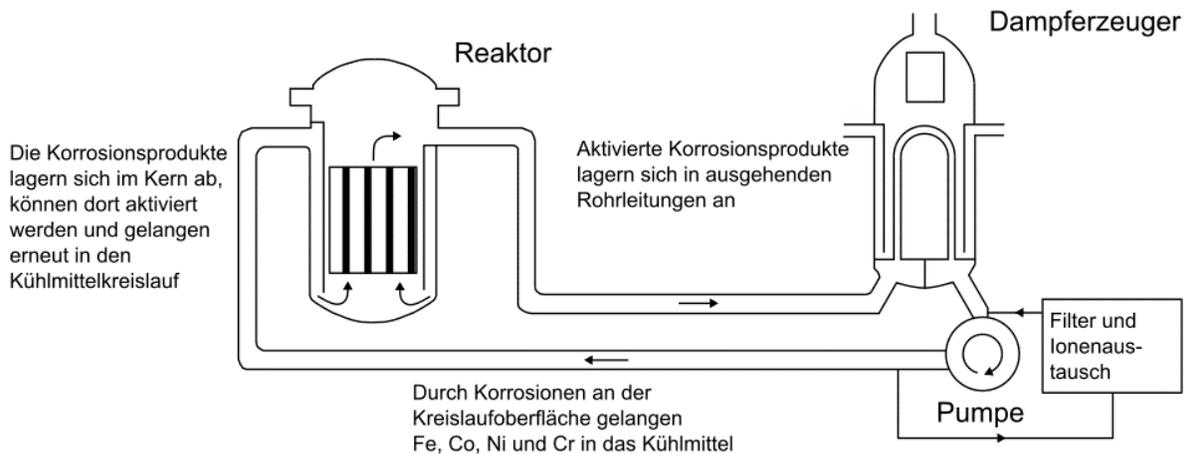


Abb. 3.13 Schematische Darstellung zur Illustration des Wasserkreislaufes und zur der Migration der Korrosionsprodukte (Abbildung in Anlehnung an /BNL 83/)

Bei DWR haben die (abgelagerten) Verunreinigungen auf den Oberflächen des Reaktorkerns, im Kühlmittel bzw. auf den Oberflächen der Brennelemente eine chemisch stöchiometrische Form ähnlich der von Nickelferrit und werden gewöhnlich beschrieben als $Fe_{3-x-y}Ni_xCr_yO_4$. (d. h. ein gemischter Ferrit/Chromit). Bei SWR, die mit einer sauerstoffhaltigen Primärkreislaufchemie betrieben werden, kann das abgelagerte Oxid aus mehr als einer Schicht bestehen. Typische SWR-Oxide haben eine äußere Schicht aus Eisenoxid in der höchsten Oxidationsstufe, entweder Fe_2O_3 (α -Hämatit) oder $FeOOH$ (Goethit oder Lepidochrokit). Darunter befindet sich eine Schicht aus Fe_3O_4 (Magnetit), die teilweise durch Ni oder Cr ersetzt sein kann und dem lockeren Oxid in DWR ähnelt.

Oxid Arten

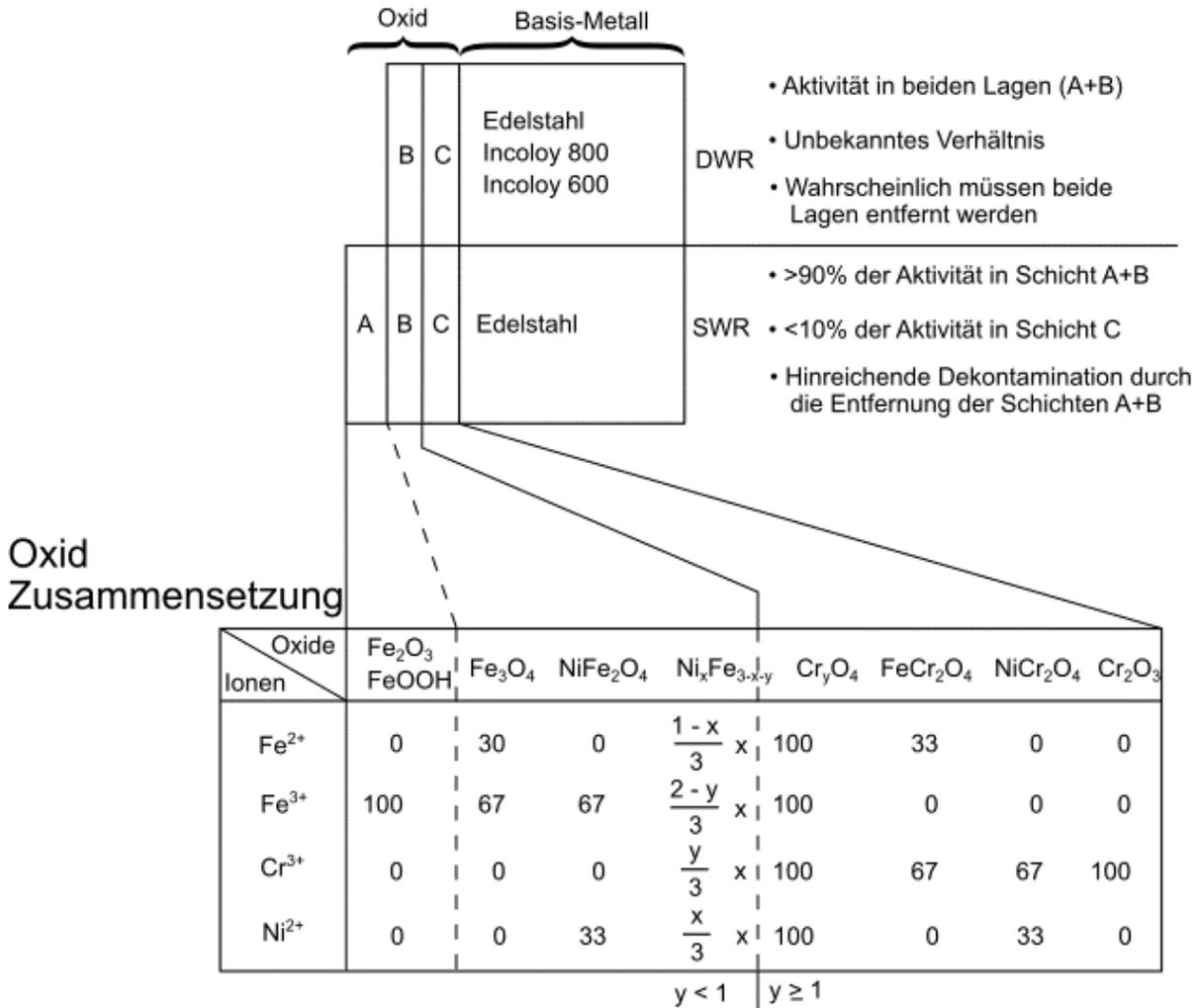


Abb. 3.14 Zusammensetzung der erwartbaren Oxide im Primärkreislauf von Leichtwasserreaktoren vom Typ DWR und SWR (Abbildung in Anlehnung an /BNL 83/)

Untersuchungen zu gewachsenen Oxidschichten deuten darauf hin, dass diese – sowohl bei SWR als auch bei DWR – in der Regel reich an Chrom sind. Eisen- und Nickelchromite sind oft die Hauptbestandteile von nichtrostendem Stahl bzw. der korrosionsbeständigen Nickelbasislegierung Inconel¹⁹. Die abgelagerten Oxide sind dadurch gekennzeichnet, dass Fe(III) stets das vorherrschende Eisenkation ist. In gewachsenen Oxidschichten ist hingegen Cr(III) das vorherrschende Chromkation.

¹⁹ Datenblatt des Inconel 600 – <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-600.pdf>

Bei einem DWR, bei dem alle Korrosionsprodukte im Primärkreislauf entstehen, hängen die relativen Mengen an abgelagerten und gewachsenen Oxiden mit dem Verhältnis von Korrosions-/Freisetzungsraten für die betreffenden Legierungen zusammen. Bei Freisetzungsraten im Bereich von 30 – 60 % sollten die Gesamtmengen etwa gleich groß sein. Bei einem SWR ist die Hauptquelle für den Eintrag von Korrosionsprodukten der Speisestrang, daher übersteigt das abgeschiedene Oxid das gewachsene Material um ein Vielfaches /BNL 83/. Die zielführenden Dekontaminationsverfahren sind somit abhängig vom Reaktorkonzept.

Der allgemeine Ansatz für eine chemische Dekontamination umfasst drei Schritte:

- Oxidation
- Reduktion / Komplexbildung
- Reinigung / Rückgewinnung

In der Regel muss das Cr(III) zu Cr(VI) oxidiert werden, da dieses deutlich leichter in Lösung zu bringen ist /KIN 08/.

3.3.2 Beschreibung etablierter Verfahren

In diesem Abschnitt werden etablierte Dekontaminationsverfahren beschrieben und Beispiele für ihre praktische Anwendung angeführt. Die Dekontaminationsverfahren lassen sich grob in chemische Dekontaminationsverfahren, mechanische Dekontaminationsverfahren und sonstige Dekontaminationsverfahren unterteilen.

Bei den chemischen Dekontaminationsverfahren lassen sich zunächst einstufige Verfahren (Abschnitt 3.3.2.2) und mehrstufige Verfahren (3.3.2.1) unterscheiden, die jeweils in einem Zyklus oder mehreren Zyklen angewendet werden können. Mehrstufige Verfahren werden meist im Rahmen der Dekontamination des Primärkreislaufes eingesetzt, wohingegen einstufige Verfahren häufig für die Dekontamination einzelner, bereits vorzulegender Komponenten in Bädern eingesetzt werden. Die elektrochemischen Dekontaminationsverfahren (Abschnitt 3.3.2.3) nutzen eine Kopplung von elektrischer Energie an chemische Reaktionen zur Erzielung oder Verstärkung der Dekontaminationswirkung. Des Weiteren gibt es sonstige chemische Verfahren, die sich nicht sinnvoll einer der beiden voran genannten Kategorien zuweisen lassen – diese werden in Abschnitt 3.3.2.4 beschrieben.

Bei den mechanischen Dekontaminationsverfahren (Abschnitt 3.3.2.5) wird die Kontamination auf physikalischem Wege vom Material abgetrennt. Diese Verfahren sind in der Regel leichter in der Anwendung und hinsichtlich des generierten Abtrags unspezifischer. Des Weiteren existiert mit dem Einschmelzen (Abschnitt 3.3.2.6) ein weiteres (physikalisches) Verfahren, dass sich dediziert mit der Dekontamination von Metallen beschäftigt. Dieses erfolgt mit dem Ziel, große Anteile der Metalle wiederverwenden zu können (Freigabepfad), um im Umkehrschluss die als radioaktiven Abfall zu entsorgenden Anteile zu reduzieren.

Eine Übersicht der in diesem Abschnitt vorgestellten Dekontaminationsverfahren findet sich in Abb. 3.15.

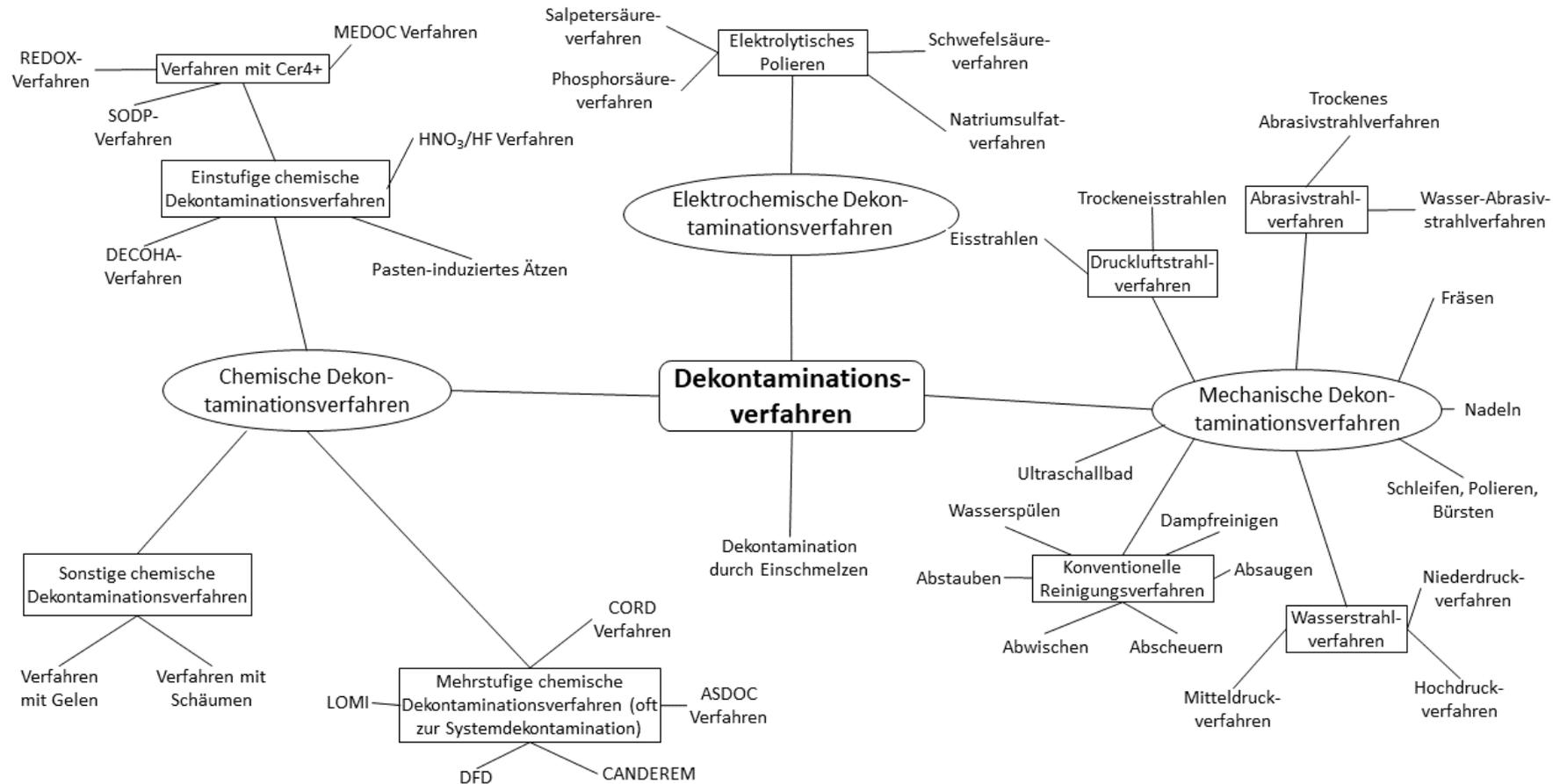


Abb. 3.15 Übersicht zu etablierten Dekontaminationsverfahren

Die Verfahren sind kategorisiert in mechanische, chemische, elektrochemische und sonstige Dekontaminationsverfahren. Sofern es sinnvoll erscheint, werden die Verfahren zudem in Klassen (Kästen) kategorisiert.

3.3.2.1 Mehrstufige chemische Dekontaminationsverfahren

Diese Verfahrensklasse umfasst flüssig-chemische Verfahren, bei denen sich ein Iterationsschritt (Zyklus) aus mehreren, sequenziell abgearbeiteten Verfahrensschritten zusammensetzt. Auch aufgrund der oft niedrigen Konzentration der eingesetzten Chemikalien gehören diese Verfahren häufig zu den weichen Dekontaminationsverfahren²⁰ mit geringer Abtragungstiefe. Mehrstufige Verfahren werden in der Praxis häufig zur Dekontamination des Primärkreislaufes (Primärkreislaufdekontamination oder aus dem englischen abgeleitet, vollständige Systemdekontamination²¹ (englisch: *full system decontamination* (FSD))), sowohl in der Betriebsphase als auch zu Beginn der Stilllegung, eingesetzt. Die Systemdekontaminationen im Rahmen der Stilllegung verfolgen das Ziel, die Aktivität im (geschlossenen) Primärkreis zu reduzieren, um so die Exposition für die folgenden Abbauarbeiten zu minimieren bzw. manuelle Tätigkeiten in nahegelegenen Arbeitsbereichen zu ermöglichen bzw. zu erleichtern. Oft lassen sich die dafür eingesetzten Verfahren aber auch in adaptierter Form für die Dekontamination anderer Metallkomponenten nutzen.

Im Leistungsbetrieb werden auf den Oberflächen der wasserführenden Systeme, auch bedingt durch die hohen Betriebstemperaturen, oxidische Schutzschichten gebildet. Die Aktivität, die im Wesentlichen auf Co-60 zurückzuführen ist, sammelt sich während des Betriebs in den Oxidschichten innerhalb der Systeme auf den (austenitischen) Oberflächen an. Durch die Systemdekontamination werden die gebildeten Oxide zunächst mit Hilfe chemischer Lösungen in Lösung gebracht und anschließend mit den verwendeten Dekontaminationslösungen abtransportiert. Zum Abschluss werden die metallischen Ionen mit Hilfe von Ionen-Austauscharzen extrahiert und, ggfs. nach diversen Aufbereitungsschritten, der Entsorgung zugeführt /PRÜ 19/.

Die eingesetzten Dekontaminationslösungen sind häufig nur schwach konzentriert um einen signifikanten Abtrag des Basismaterials, der im schlimmsten Fall zu Leckagen führen könnte, zu vermeiden. Die FSD erfolgt in der Regel in mehreren Iterationen (Zyklen), so dass – obschon sie eher gering konzentrierte Chemikalien verwenden – in der Praxis Dekontaminationsfaktoren von 80 oder höher erreicht werden /EPRI 98/. Bei der Angabe von Dekontaminationsfaktoren ist zu

²⁰ Diese werden auch als *weiche flüssig-chemischen* Verfahren zusammengefasst.

²¹ Bei der Systemdekontamination muss nicht zwingend der gesamte Primärkreislauf (z. B. inklusive der Nachkühlsysteme) dekontaminiert werden. Entsprechende Berichte über erfolgte Primärkreisdekontaminationen führen in der Regel auf, über welche Systeme sich die Dekontamination erstreckt. Auch im Falle der vollständige Dekontamination kann in der Praxis der Primärkreis nicht restlos dekontaminiert werden.

beachten, dass es sich hierbei in der Regel um einen Mittelwert über mehrere Messungen an unterschiedlichen Messpunkten handelt. Die Dekontaminationswirkung erfolgt – bezogen auf die Innenoberflächen – nicht homogen, sondern hängt von mehreren Faktoren (z. B. Materialien und Betriebstemperaturen) ab, die die Dekontaminierbarkeit von Komponenten deutlich beeinflussen können. Zudem kann der Abtrag materialabhängig sein, was insbesondere bei Systemen, für die mehrere Werkstoffe verwendet wurden, berücksichtigt werden muss. Informationen zu sicherheitstechnisch bedeutsamen Aspekten bei der Primärkreisdekontamination als auch zusammengestellte Informationen zu Anwendungen der Primärkreisdekontaminationen in Deutschland finden sich in /FAU 18/.

Eine Dekontamination mit aufkonzentrierten Chemikalien führt im Vergleich zu verdünnten Chemikalien zu einem deutlich höheren Abfallaufkommen (Sekundärabfall). Grund hierfür ist zum einen die höhere Materialabtragung als auch der erhöhte Aufwand für die chemische Neutralisierung. Für (vollständige) Systemdekontaminationen werden daher derzeit fast ausschließlich weiche Verfahren eingesetzt /CND 09/, mit denen nur wenige Mikrometer des Basismaterial (wesentliche aktivitätstragende Schicht) abgetragen werden.

Zu den (international) etablierten bzw. für die deutschen Stilllegungsprojekte genutzten mehrstufigen chemischen Verfahren für die (vollständige) Systemdekontamination gehören:

- Das von Framatome entwickelte Verfahren CORD (*chemical oxidizing reducing decontamination*),
- das von der NIS Ingenieurgesellschaft mbH entwickelte Verfahren ASDOC_D(-MOD),
- das kanadische Dekontaminations- und Sanierungsverfahren CANDEREM (*canadian decontamination and remediation process*),
- das Verfahren LOMI (*low oxidation state metal ion*), und
- das Verfahren DFD (*decontamination for decommissioning*).

Die aufgeführten Verfahren werden im Allgemeinen in zwei oder mehr Zyklen durchgeführt. Für die deutschen Kernkraftwerke wurden in den letzten Jahren die beiden erstgenannten Verfahren genutzt. Die genannten Verfahren werden in den folgenden Unterabschnitten näher erläutert.

Zudem wurden international auch weitere Verfahren für die Primärkreisdekontamination genutzt, z. B. Citrox, Nitrox-E, MOPAC oder EMMAC, die aber aufgrund der fehlenden Nutzung in den kerntechnischen Anlagen Deutschlands im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

3.3.2.1.1 HP/CORD UV und HP/CORD D UV

Das Verfahren HP/CORD UV (die Abkürzung steht – ins Deutsche übersetzt - für Permangan-säure (HP), Chemische Oxidation Reduktion Dekontamination und Ultraviolettes Licht) ist Teil des von Framatome GmbH (ehemals Areva NP GmbH) entwickelten Konzepts CORD (*Chemical Oxidation Reduction Decontamination*). Die CORD-Familie umfasst mehrere Verfahrensprozesse für unterschiedliche Dekontaminationsanwendungen, siehe Tab. 3.20. Die einzelnen Verfahrensvarianten berücksichtigen die Besonderheiten einzelner Reaktortypen, deren Betriebshistorie sowie der Zweck der Dekontamination. Alle Verfahren haben jedoch gemeinsam, dass die verwendete Dekontaminationssäure im Prozess zu Kohlendioxid und Wasser zersetzt wird. Es entstehen somit keine chelathaltigen Abfälle.

Tab. 3.20 Wesentliche Verfahren der CORD-Familie

Weitere Informationen sind in der Referenz /FAU 18/ zu finden.

Verfahren	Anwendungsbereich	Reaktoren
HP/CORD UV	DWR, SWR	Weltweit
HP/CORD	HKMP (DWR)	Weltweit
HP/CORD D UV ^{a)}	Rückbau	Weltweit
HP/CORD N UV	Inconel 600 - DE; FSD	Westinghouse DWR
CORD C UV	Cu-Legierungen	Japan
CORD CS UV	C-Stahl, Hilfssysteme	GE SWR
HP/CORD 2000 UV	Edelstahl < 0,06 % C	SWR
Alpha CORD UV	Hohes Alpha-Inventar	Weltweit
CORD P	Abwischbare Restkontamination	Weltweit

Das Ende der 1990er Jahre entwickelte Verfahren HP/CORD UV wird in Verbindung mit dem mobilen AMDA-Dekontaminationsprozess (*Automated Mobile Decontamination Appliance*) für die Dekontamination von Komponenten, Systemen und Teilsystemen sowie insbesondere für vollständige Systemdekontaminationen eingesetzt.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Verfahren HP/CORD UV wird in mehreren Iterationen angewendet, wobei in jedem Zyklus im Wesentlichen drei Schritte bei einer Temperatur von 80 °C – 100 °C angewendet werden:

- In einem ersten Schritt (Oxidationsschritt) werden die zu lösenden Metallbestandteile, z. B. Chrom, mit Permanganat (typische Konzentration: 200 ± 50 ppm) auf eine höhere Oxidationsstufe (Cr(III) zu Cr(VI)) gebracht.
- Diese werden dann in einem zweiten Schritt (Reduktionsschritt) mit Hilfe von Oxalsäure (typische Konzentration: 2000 ± 200 ppm) in Lösung gebracht. Neben der grundlegenden Dekontamination wird hier auch das Mangan reduziert (von Mn(VII) zu Mn(IV)).
- Im letzten Schritt (Reinigungsschritt) wird überschüssige Oxalsäure mit Hilfe von Permanganat oder Wasserstoffperoxid (Konzentration von etwa 30 %) zerstört, und die gelösten Korrosionsprodukte über Ionenaustauscherharzen aus der Lösung entfernt und fixiert. Dieser Vorgang kann durch den Einsatz von ultra-violettem Licht verstärkt werden /KIN 08/.

Das HP/CORD UV Verfahren dient der Abtragung der aktivitätstragenden Oxidschicht, ohne das Basismetall anzugreifen, so dass es insbesondere für die FSD im Rahmen des Betriebs eingesetzt wird bzw. wurde. Für die Stilllegung wurde das modifizierte Verfahren HP/CORD D UV entwickelt, bei dem auch tiefere, bis in das Basismaterial hineinreichende Schichten, abgetragen werden, siehe Abb. 3.16. Dies wird durch eine gezielte Reduzierung des elektrochemischen Potentials der verwendeten Dekontaminationslösung nach Entfernen der Oxidschicht erreicht /KIN 08/.

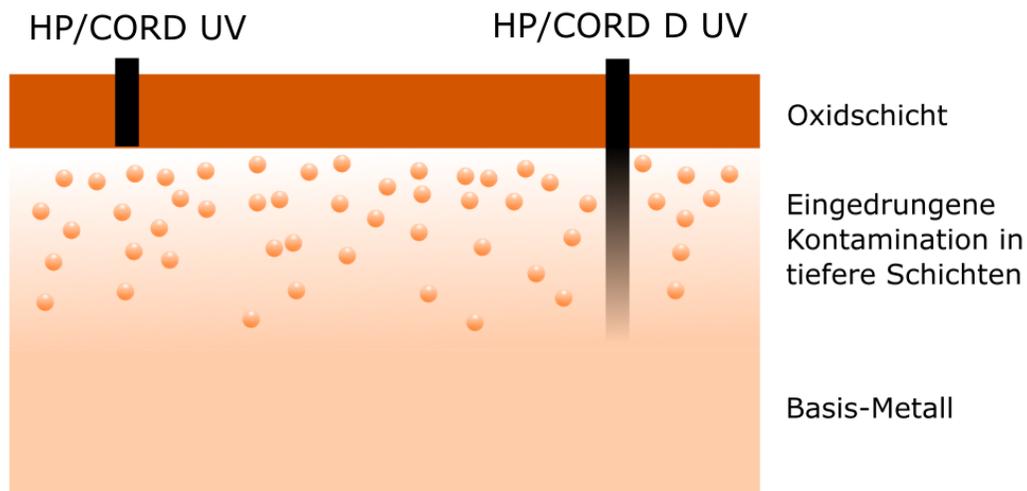


Abb. 3.16 Prinzip der Verfahren HP/CORD UV und HP/CORD D UV (Abbildung in Anlehnung an /TOP 08/)

Im Anschluss an eine FSD kann das CORD P-Verfahren nachgeschaltet werden, bei dem mittels langkettiger Alkylphosphonsäuren die abwischbare Restkontamination, die nach der Dekontamination zurückbleibt, mobilisiert und zu großen Teilen entfernt werden kann. Vorteile dieses Prozesses sind der neutrale pH-Wert und die hohe Materialverträglichkeit /FIS 15/.

Bei empfindlicheren Werkstoffen kann es bei Abweichungen von den vorgegebenen Prozessbedingungen zu interkristalliner Korrosion kommen. Während der Dekontamination können außerdem bei einer Oxidauflösungsgeschwindigkeit, die nicht an die Reinigungsrate angepasst ist, Oxalate gebildet werden, die die Reinigung der Dekontaminationslösung erschweren /KIN 08/.

Wesentliche Eigenschaften des Verfahrens sind in Tab. 3.21 zusammengestellt.

Tab. 3.21 Wesentliche Charakteristiken des Verfahrens HP/CORD (D) UV

Umgebung	Anwendbar für die FSD sowohl im Leistungsbetrieb als auch in der Stilllegung
Temperatur	Vergleichsweise hohe Temperaturen von etwa 90 – 100°C
Abtragungsrate	Geringer Abtrag im Bereich von einigen 1 µm nach mehrere Spülzyklen, kann aber durch das HP/CORD D UV Verfahren erhöht werden (inklusive Abtrag von Basismaterial)
Sekundärabfall	Harze und ggf. Chelate, wenn diese nicht ausreichend neutralisiert wurden
Chemikalien	Permangansäure, Oxalsäure; bei HP/CORD D UV zudem Wasserstoffperoxid
Fernhantierung / Automatisierung	Möglich
Freisetzungen	Geringe Freisetzung von Wasserstoffgas
Platzbedarf	Für das Verfahren wurde eine eigenständige Anlage entwickelt, welche aus Pumpen, Durchlauferhitzer, Ausgleichsbehälter und UV-Modulen besteht (AMDA – Automatische Mobile/Modulare Dekontaminations-Anlage)
Charakteristiken	<ul style="list-style-type: none">- Geeignet für FSD auch mit einem beladenen Kern- Schonend für Materialien welche anfällig für chemische Korrosion sind

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Verfahren HP/CORD (D) UV kann sowohl für Primärkreislaufdekontaminationen im Leistungsbetrieb als auch für eine stilllegungsvorbereitende Dekontamination angewandt werden. Der Reaktorkern muss nicht zwingend entladen sein, Brennelemente können bei Bedarf mit dekontaminiert werden. Üblicherweise werden zur Verbesserung des Dekontaminationsergebnis mehrere Dekontaminationszyklen genutzt.

Falls gewünscht oder notwendig, z. B. zum Erreichen bestimmter Dekontaminationsfaktoren, kann durch Verwendung des HP/CORD D UV Verfahrens auch die oberste Schicht des Grundwerkstoffes abgetragen werden, um die dort enthaltene Aktivität ebenfalls zu entfernen. Dies kann insbesondere dann von Vorteil sein, wenn die Aktivität lediglich oberflächlich in den Grundwerkstoff eingedrungen ist und dieser nicht auch in die Tiefe aktiviert wurde /KIN 08/.

In Deutschland kam das HP/CORD (D) UV-Verfahren für die vollständige Systemdekontamination in mehreren Stilllegungsprojekten zum Einsatz, beispielhaft werden im Folgenden zwei Anwendungen vorgestellt.

Im Kernkraftwerk Stade wurde die vollständige Systemdekontamination in den Jahren 2006 und 2007 durchgeführt. Die dabei zu dekontaminierende Oberfläche betrug etwa 17.000 m², die hierbei zu berücksichtigenden Basismaterialien waren die Legierung Incoloy 800 (etwa 12.000 m²), austenitische Schweißplattierungen (1.000 m²) und austenitische Chrom-Nickelstähle (etwa 4.000 m²). Das HP/CORD UV Verfahren wurde in vier Zyklen eingesetzt. Hierbei wurden insgesamt 609 kg an Korrosionsprodukten und eine Gesamtaktivität von 2,7E13 Bq zu mehr als 90 % Co-60 entfernt. Der durchschnittliche Dekontaminationsfaktor der Systemdekontamination wurde mit 58 angegeben. Insgesamt entstanden radioaktive Abfälle (überwiegend in Form von Ionenaustauscherharzen) mit einem Volumen von 15,4 m³. Die durch die Primärkreisdekontamination verursachte Exposition betrug 96,5 mSv /STI 05/.

Im KWO wurde im Rahmen der im Jahr 2007 durchgeführten vollständigen Systemdekontamination eine Gesamtoberfläche von 8.000 m² dekontaminiert. Das Basismaterial bestand zum größten Teil aus der Legierung Incoloy 800 (etwa 6.200 m²), des Weiteren wurden austenitische Schweißplattierungen (etwa 1.100 m²) und austenitische Chromnickelstähle (etwa 700 m²) behandelt. Insgesamt konnten Korrosionsprodukte mit einer Masse von 313 kg und einer Aktivität von 5,6E12 Bq (zu mehr als 95 % Co-60) entfernt werden. Die bei der Dekontamination entstandenen radioaktiven Abfälle (Ionenaustauscherharze) beliefen sich auf etwa 6,7 m³. Der mittlere Dekontaminationsfaktor lag bei etwa 625 /TOP 08/.

3.3.2.1.2 ASDOC_D und ASDOC_D-MOD Verfahren

Das ASDOC_D (*Advanced System Decontamination by Oxidizing Chemistry* für DWR) Verfahren bzw. das modifizierte Verfahren ASDOC_D-MOD²² ist ein relativ neues Dekontaminationsverfahren, was von der NIS Ingenieursgesellschaft mbH für die Dekontamination von Primärsystemen entwickelt wurde /SIE 23/.

²² Die Modifikation besteht im wesentlichen in der Verwendung einer weiteren Säure zur Stabilisierung des pH-Wertes (notwendig zur Korrosionsvermeidung in unedlen Metallen) und um ein Ausfällen der Lösung zu verhindern /TCE 18/.

Der ASDOC_D-MOD Prozess nutzt zur Vermeidung einer Ausfällung von Eisenionen aus der Lösung Methansulfonsäure (MSA), mit der der pH-Wert der Dekontaminationslösung reguliert werden kann. Permangansäure (HMnO_4) wird als starkes Oxidationsmittel und Oxalsäure ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) als Chelatbildner verwendet /PRÜ 19/. Der verwendete Verfahrenszyklus ist schematisch in Abb. 3.17 dargestellt.

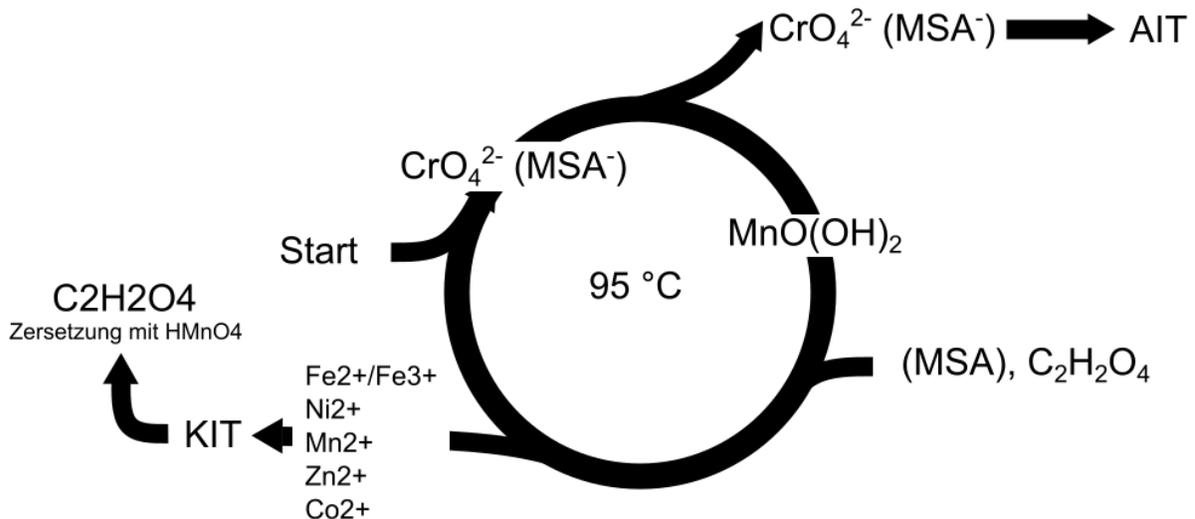


Abb. 3.17 Schematische Darstellung eines Zyklus des ASDOC-D_MOD Verfahrens (Abbildung in Anlehnung an /PRÜ 19/)

Der Zyklus beginnt (Start) mit dem Einbringen der Methansulfonsäure und der Zugabe der Permangansäure (HMnO_4). Das gelöste Chrom wird im Anschluss mit Hilfe von Anionenaustauscherharzen (AIT) entfernt. Im nächsten Schritt wird Oxalsäure hinzugefügt, wodurch sich Metallionen lösen, die zum Abschluss des Zyklus mit Hilfe von Kationenaustauscherharzen (KIT) aus der Lösung entfernt werden.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Charakteristisch für das Verfahren ist zum einen, dass die Prozesse weitestgehend mit den kraftwerkseigenen Betriebssystemen durchgeführt werden, zum anderen werden freiverfügbare Prozesschemikalien genutzt. Im Vergleich zu anderen Verfahren für die Systemdekontamination ist der Bedarf an zusätzlichem Equipment (z. B. Dosierungssysteme oder gesonderte Systeme zur Temperaturkontrolle oder für den Flüssigkeitsumlauf) gering.

Bei der Verfahrensentwicklung wurde darauf Wert gelegt, dass für chemische Korrosion anfällige Materialien nicht geschädigt werden (weiches Verfahren) und dass zudem die verfahrensbedingte Freisetzung von Wasserstoff reduziert wird. Das Verfahren eignet sich für die Dekontamination

von Systemen mit Oberflächen aus austenitischen Stählen, ferritischen Stählen, martensitisch Chromstähle und weiteren Materialien, die sich nicht für andere organische oder anorganische Dekontaminationslösungen eignen /PRÜ 19/. Typischerweise wird das Verfahren mit 15 – 20 Iterationen eingesetzt, wobei ein Zyklus (siehe /PRÜ 19/) aus den folgenden vier Schritten besteht:

- Im ersten Schritt wird Methansulfonsäure in das System gegeben.
- Im zweiten Schritt wird Permangansäure mit einer niedrigen Konzentration von 40 – 70 ppm zugegeben, die in der Regel vor Ort mit Hilfe einer mobilen Einrichtung erzeugt wird /KRA 18/. Diese oxidiert das in der Chromoxidschicht enthaltene Cr(III) zu Cr(VI), dessen Oxidverbindungen gut in Wasser löslich sind. In diesem Oxidationsschritt, der ungefähr sechs bis acht Stunden dauert, fällt zunehmend Mangandioxid an. Die Dekontaminationslösung wird anschließend über einen Zeitraum von 12 bis 16 Stunden chromatographisch unter Verwendung von Ionenaustauscherharzen aufgereinigt.
- Im dritten Schritt wird Oxalsäure mit einer Konzentration von weniger als 100 ppm zugeführt, mit der die Metallionen (insb. Eisen, Nickel, Mangan und Zink) aus der Oxidschicht in die flüssige Phase überführt und gelöst werden können /KRA 18/. Dieser Schritt dauert etwa fünf bis sieben Stunden.
- Im vierten Schritt werden die gelösten Ionen und die mobilisierte Aktivität (im Wesentlichen Co-60) in einem Bypass-Reinigungsprozess mit Hilfe von (Kat-)Ionenaustauscherharzen aus der Dekontaminationslösung entfernt. Dieser Reinigungsprozess, in dessen Verlauf auch die Konzentration der Oxalsäure durch chemische Prozesse und thermische Zersetzungsprozesse abnimmt, dauert etwa 20 – 24 Stunden. Im System verbliebene Oxalsäure wird durch Hinzufügen von Permangansäure zersetzt.

Wesentliche Verfahrenseigenschaften sind in Tab. 3.22 zusammengefasst.

Tab. 3.22 Wesentliche Charakteristiken für das ASDOC_D Verfahren

Umgebung	Anwendbar bei Systemen aus austenitischen Stählen, ferritischen Stählen, martensitisch Chromstähle und weiteren Materialien, die sich nicht für andere organische oder anorganische Dekontaminationslösungen eignen
Temperatur	Vergleichsweise hohe Temperaturen von etwa 95°C
Abtragsrate	Geringer Abtrag im Bereich von 1 µm nach mehrere Spülzyklen
Sekundärabfall	Harze
Chemikalien	Methansulfonsäure (MSA), Permangansäure und Oxalsäure
Fernhantierung / Automatisierung	Möglich
Freisetzungen	Geringe Freisetzung von Wasserstoffgas
Platzbedarf	Gering, viele betriebliche Systeme können genutzt werden
Charakteristiken	<ul style="list-style-type: none">- Geeignet für FSD auch mit Brennelemente (BE) im Kern- Schonend für Materialien welche anfällig für chemische Korrosion sind

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das ASDOC_D-MOD Verfahren wurde im Kernkraftwerks Biblis (KWB) qualifiziert und erstmalig zur Systemdekontamination angewendet. In Block A wurden über einen Zeitraum von 39 Tagen insgesamt 13 Dekontaminationszyklen eingesetzt, wobei ein durchschnittlicher Dekontaminationsfaktor von etwa 90 erzielt werden konnte. In Block B wurden über einen Zeitraum von 51 Tagen insgesamt 19 Dekontaminationszyklen und eine abschließende Systemspülung durchgeführt, wobei ein Dekontaminationsfaktor von etwa 85 erreicht werden konnte. Die durch die Durchführung der Primärkreisdekontaminationen bedingten Kollektivdosen betragen 25 mSv (Block A) bzw. 7,7 mSv (Block B). Es sind Abfallvolumina von insgesamt 6,65 m³ (Block A) bzw. 12,75 m³ (Block B) entstanden. Insgesamt wurden 143 kg (Block A) bzw. 220 kg (Block B) Metallionen extrahiert /PRÜ 19/, /SIE 23/.

Bei der Verfahrensanwendung im KWB wurde auch an mehreren Stellen und Materialien (auch an Komponenten aus relativ korrosionsanfälligen Stählen) der verfahrensbedingte Abtrag in Abhängigkeit des Verfahrenszyklus untersucht. Die Referenz /PRÜ 19/ führt für den Chromstahl

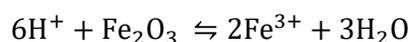
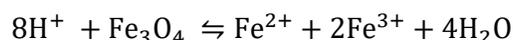
1.4923 einen Abtrag von 1,08 µm auf, was deutlich weniger als der genehmigte Abtrag von maximal 150 µm gewesen ist.

3.3.2.1.3 CAN-DEREM

Das Verfahren CAN-DEREM stellt eine Weiterentwicklung des Verfahrens CAN-DECON dar, nachdem es mit diesem zu unerwartet starken Metallabtragungen gekommen war /SER 96/. Das Verfahren CAN-DECON wurde in den frühen 1970'er Jahren von *Atomic Energy of Canada Limited* für den Einsatz in CANDU-Reaktoren entwickelt und verwendete zur Erzielung der Dekontaminationswirkung Zitronensäure, Oxalsäure und EDTA. Aufgrund einer großflächigen, Abtragung von Material (sowohl von Ablagerungen als auch von der Basislegierung) bei der Systemdekontamination im Kraftwerk Peach Bottom-2 im Jahr 1984, bei der Abtragungen bis zu einer Tiefe von 50 µm beobachtet werden konnten, wurde das Verfahren derart modifiziert, dass beim CAN-DEREM Verfahren keine Oxalsäure eingesetzt wird. In mehreren Studien wurde in Anschluss gezeigt, dass das Verfahren grundsätzlich eine vergleichbare Dekontaminationswirkung erreicht, jedoch im Hinblick auf das Lösen von chromhaltigen Eisenoxiden Abstriche gemacht werden mussten /SER 96/. Ein schematischer Aufbau für die Dekontamination eines Dampferzeugers ist in Abb. 3.18 dargestellt.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die Extraktion von Eisenoxidverbindungen aus der Materialmatrix ist ein entscheidender Schritt im CAN-DEREM-Verfahren (siehe Abb. 3.18) und erfolgt durch folgende Mechanismen:



Die Eisen(III)-Ionen bilden jedoch sehr stabile EDTA-Komplexe, die durch Perkolations durch stark saure Kationenaustauscherharze nicht leicht aufgespalten werden. Dies führt zu einem höheren Abfallaufkommen der Austauscherharze, besonders im Vergleich zu dem früher eingesetzten CAN-DECON Prozess /SER 96/.

Die Lösung wird bei einer Temperatur von 85 °C – 120 °C in einem Zeitraum von 24 – 72 Stunden mehrfach durch das Reaktorsystem gespült und dabei immer wieder gefiltert. Bei dieser Prozedur

werden vor allem Metalle abgetragen, darunter Eisen, Chrom, Kupfer, Nickel, Mangan und Natrium. Zu den gelösten Radionukliden zählen primär Cr-51, Mn-54, Fe-59, Co-58, Co-60, Zn-65, Sb-122, I-131 und Cs-137 /SER 96/.

Das Verfahren lässt sich auf Anlagen in der Stilllegung sowie auf Anlagen im Betrieb anwenden, auch eine Systemdekontamination für beladene Reaktorkerne ist möglich. Es wurde beobachtet, dass chromhaltige Schichten / Verbindungen (CRUD-Partikel) schwer (SWR) bis kaum (DWR) gelöst werden und dies auf die Verfahrensanpassung zurückzuführen ist /BNL 83/.

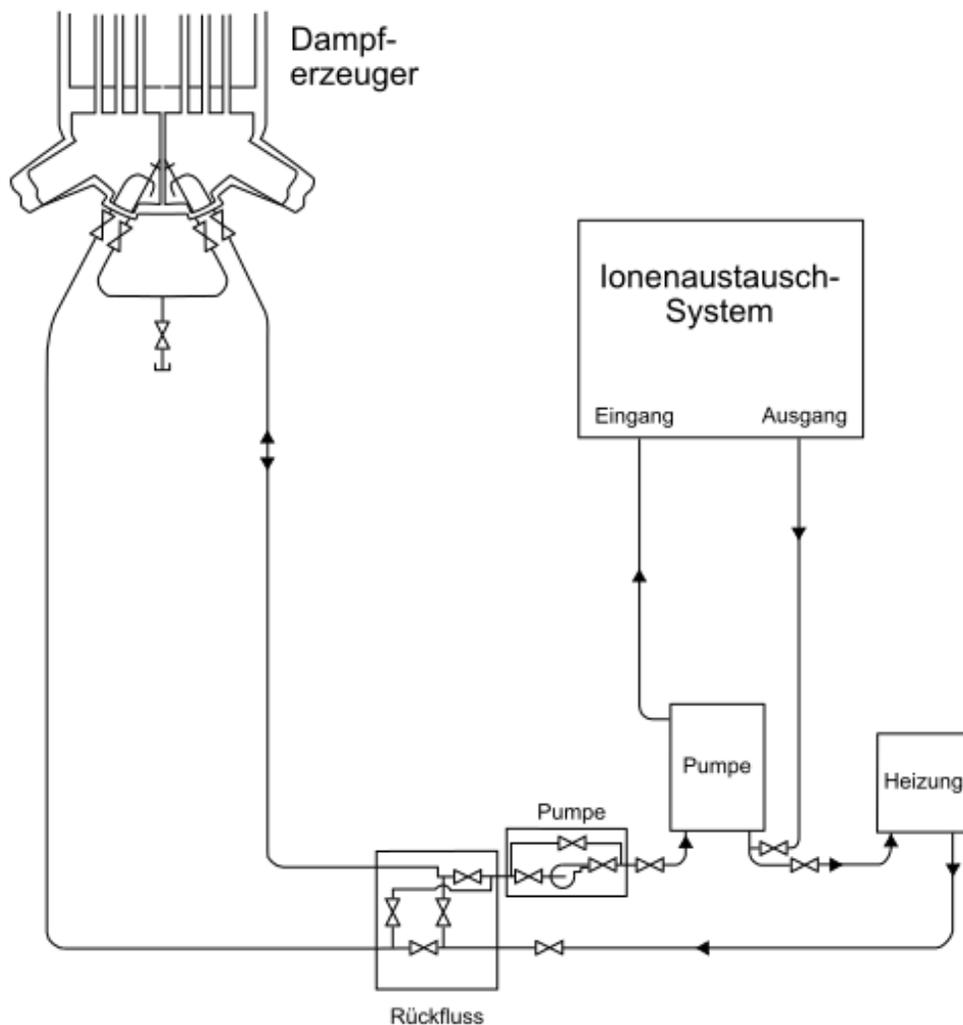


Abb. 3.18 Vereinfachte Darstellung eines Dekontaminationsaufbaus (mit dem CANDEREM-Verfahren) für einen Dampferzeugers in Beaver Valley 1 (Abbildung in Anlehnung an /SPE 91/)

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Die vorrangige Einsatzmöglichkeit dieses Verfahrens ist die FSD sowie die Dekontamination einzelner Bestandteile der Hauptkreisläufe sowohl in CANDU, SWR als auch in DWR. Da das Verfahren mit dem Ziel einer niedrigeren Abtragsrate des Basismetalls optimiert wurde, sind auf der anderen Seite auch die erreichbaren Dekontaminationsfaktoren vergleichsweise niedrig und liegen oft in einem Bereich von 5 bis 20 /EPRI 99/. Die Konzentration der Dekontaminationschemikalien ist generell sehr gering (ca. 0,1 Gew.-%) /EPRI 99/.

3.3.2.1.4 LOMI

Das LOMI-Verfahren (*Low-Oxidation-state transition-Metal-Ion*) wurde im Jahr 1983 im Auftrag von EPRI von den als Ergebnis eines Forschungsvorhabens der *Berkeley Nuclear Laboratories* (Großbritannien) entwickelt. Ziel des Vorhabens war es, die Probleme und Nachteile der bis zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Verfahren für eine FSD (Niedrige Dekontaminationsfaktoren, zu hohe Materialkorrosion und umfangreiche Sekundärabfälle) zu reduzieren /BNL 83/.

Im LOMI-Verfahren werden Lösungen bestehend aus Pikolinsäure, Natriumhydroxid oder Ammoniumhydroxid auf 80 °C – 95 °C erhitzt und durch die Reaktorleitungen zirkuliert. Sobald das wässrige System sauerstoffarm ist, wird 0,25 M Vanadiumformiatlösung eingespritzt, bis die Gesamt-Vanadium-Konzentration 0,005 bis 0,03 M beträgt. Anschließend wird ein pH-Wert, durch Zugabe einer Base zwischen, 3,5 – 4,5 eingestellt. Die Vanadium-Ionen reduzieren und lösen daraufhin die Oxid-Korrosionsprodukte innerhalb von Minuten bis Stunden. Die Pikolinsäure bildet mit den gelösten Metallen und dem verbrauchten V(III) lösliche Komplexe. Die verbrauchte Lösung wird durch eine Folge von Kationen- und Anionenaustauscherharzbetten zirkuliert. Das Kationenaustauscherbett entfernt verbrauchte V(III)-Korrosionsprodukte (Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , usw.). Das Anionenaustauscherharz entfernt Formiat- und Picolinat-Anionen /SER 96/.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das LOMI-Verfahren eignet sich nur bedingt für chromhaltige Korrosionsfilme, insbesondere solche von DWR. Ein Nachteil des LOMI-Verfahrens ist die vergleichsweise große Menge radioaktiven Abfalls, der aus den verbrauchten Ionenaustauscherharzen besteht und üblicherweise in Beton vergossen eingelagert wird. Die Abfälle sind zudem chelathaltig, was eine Sonderbehandlung erforderlich macht.

Ein weiterer Nachteil des LOMI-Verfahrens ist, dass es kein regenerativer Prozess ist, d. h. die aufgelösten Radionuklide reichern sich in der Lösung an, was zu erhöhter Ortsdosisleistung entlang der Dekontaminationsleitungen führt. Des Weiteren ist die Gesamtmenge der auflösbaren Beläge begrenzt aufgrund der Löslichkeit des Vanadiumsalzes. Somit ist LOMI vor allem für Systeme geeignet, bei denen das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen klein ist. Die erreichbaren Dekontaminationsfaktoren liegen etwa zwischen 5 und 20. Die innere Oxidschicht wird dabei nicht abgetragen /EPRI 99/.

Um einigen dieser Nachteile zu begegnen, wurde als Weiterentwicklung das LOMI-2-Verfahren entwickelt. Dieses ist regenerativ und erzeugt daher deutlich weniger Sekundärabfälle als das ursprüngliche Verfahren, jedoch ist es deutlich komplexer und schwieriger in der Anwendung. Das entstehende V(III) wird über Kationen-Austauschharze aus der Lösung entfernt und im Gegenzug kontinuierlich neues Vanadium(II)-formiat zur Dekontamination zugegeben. Der pH-Wert wird dabei durch Zugabe von Natriumhydroxid eingestellt. Durch die kontinuierliche Zugabe von des Vanadiumformiat entstehen jedoch vermehrt Formiat-Komplexe in der Lösung, welche wiederum mit Hilfe von Anionen-Austauschharzen entfernt werden müssen /EPRI 99/. Zudem adressierte das EPRI bei der Entwicklung des DFD-Verfahren ausgewählte Nachteile des LOMI Verfahrens, insbesondere hinsichtlich der erreichbaren Dekontaminationsfaktoren /EPRI 98/.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

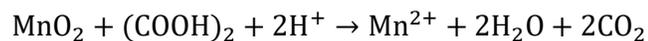
Das LOMI-Verfahren gehörte in den 1980er Jahren zu den etabliertesten chemischen Verfahren für Dekontaminationen in SWR (insbesondere in den Vereinigten Staaten) und wurde überwiegend für im Betrieb befindliche US-amerikanische Anlagen wie dem Kernkraftwerk Monticello (in Betrieb seit dem Jahr 1971) genutzt /RIE 09/, es gibt aber auch Beispiele für Anwendungen in der Stilllegung (z. B. im US-amerikanischen Kernkraftwerk Yankee Rowe /DEM 16/). Gerade für stilllegungsgerichtete Primärkreisdekontaminationen wurden die erreichbaren Dekontaminationsfaktoren allerdings als zu niedrig eingeschätzt, so dass das LOMI-Verfahren vor dem Hintergrund neuerer Verfahren wie das DFD-Verfahren zunehmend an Bedeutung verloren hat /EPRI 98/.

3.3.2.1.5 DFD

Das Verfahren DFD (*Decontamination For Decommissioning*) wurde 1995 in den Vereinigten Staaten von Amerika von EPRI und Bradtec entwickelt. Ziel des Verfahrens ist die

uneingeschränkte Freigabe von Bauteilen aus Edelstahl und Alloy 600, einer Nickel-, Chrom-, Eisen-Legierung mit hoher Temperaturbeständigkeit²³. Das Verfahren kann jedoch auch auf andere Metalle angewendet werden. Mit dem Verfahren wurden Dekontaminationsfaktoren größer 1000 erzielt. Das Verfahren ist im Vergleich zu anderen in den 1990er Jahren eingesetzten Verfahren oftmals langsamer, sorgt aber für eine gleichmäßige Materialabtragung. Es richtet sich insbesondere an die Dekontamination von schwerzugänglichen Innenflächen und eignet sich für die Dekontamination von Kühlwasserkreisläufen, ist aber nicht auf diese beschränkt. Es verläuft in sechs Schritten /EPRI 98/, /EPRI 01/, /EPRI 03/:

- Erster Schritt: Mischung von konzentrierter Fluorborsäure mit demineralisiertem Wasser und anschließende Zirkulation der verdünnten Fluorborsäure, wodurch Eisen- und Nickeloxide gelöst werden.
- Zweiter Schritt: Entfernung von aktivierten und nicht-aktivierten Kationen (Ionenaustausch) und Regenerierung der Fluorborsäure
- Dritter Schritt: Zugabe von Permanganat (100 ppm) und anschließende Zirkulation dieser Lösung. Hierbei werden Chromoxide gelöst und MnO₂ abgeschieden.
- Vierter Schritt: Zugabe von Oxalsäure und anschließende Zirkulation dieser Lösung. Hierbei wird das MnO₂ zersetzt und die zugegebene Oxalsäure wieder zerstört. Als Abfallprodukte entstehen CO₂ und H₂O:



- Fünfter Schritt: Zerstörung verbliebener Oxalsäure mittels der Zugabe von Permanganat und Entfernung von Kationen, Fe, Ni, Co und Regeneration der Fluorborsäure. Zudem Entfernung von Mn und K.
- Sechster Schritt: Entfernung aller Kationen und Anionen (Ionenaustausch) und Rückführung zu demineralisiertem Wasser.

Die Verfahrensschritte drei bis fünf werden in der Praxis bis zum Erzielen der erzielten Dekontaminationswirkung wiederholt durchgeführt. Bei dem DFD-Verfahren fallen als Abfallprodukt insbesondere Ionenaustauscherharze an.

²³ Datenblatt des Alloy 600 – Werkstoff-Nr.: 2.4816 – <https://www.metalcor.de/datenblatt/108/>

Durch die Reaktion von Fluorborsäure (HBF_4) mit Metallen entstehen metallische Fluorborate und Wasserstoffgas /ROL 92/:

Hierbei bezeichnet n die Valenz des betrachteten Metalls (M). Zudem reagiert die Fluorborsäure in ähnlicher Weise auch mit Metalloxiden. Hierbei entsteht aber anstelle des Wasserstoffs flüssiges Wasser als Endprodukt /ROL 92/:

Die Effektivität der chemischen Reaktionen hängt zu wesentlichen Teilen von der Lösbarkeit der Metalle in Fluorborsäure ab. Für einige Metalle wie Eisen liegt die Löslichkeit bei mehr als 200 g pro Liter in 50-prozentiger Fluorborsäure und ist damit sehr hoch.

Das DFDX²⁴-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des DFD-Verfahrens. Bei dieser Weiterentwicklung wurde insbesondere das Ziel verfolgt, die Menge der zu entsorgenden Ionenaustauscherharze zu reduzieren, mit dem Ziel die Entsorgungskosten zu minimieren. Als zusätzliches Abfallprodukt fallen metallische Sekundärabfälle an /EPRI 03/.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Bei der Anwendung des Verfahrens wird das zu dekontaminierende System zunächst mit Reinstwasser gefüllt und die Zirkulation hergestellt. Das System wird auf etwa 90°C erhitzt. Wenn die Temperatur und der Durchfluss eingestellt sind, wird dem System Tetrafluoroborsäure in einer Konzentration von 10 mM (0,88 Gramm pro Liter) zugesetzt. Der pH-Wert wird nun in einem Bereich von 2,0 bis 2,4 gehalten. Die Lösung wird anschließend durch Kationenaustauschersäulen geleitet, um einen anfänglichen Ausbruch von Metallen oder Radioaktivität, die durch die erste chemische Zugabe freigesetzt wurden, zu entfernen. Im Anschluss wird dem System Kaliumpermanganat zugesetzt. Hierbei ist das Ziel, eine Konzentration von 100 ppm aufrechtzuerhalten. Permanganat verbleibt in den späteren Zyklen länger im System. Anschließend wird dem System Oxalsäure zugesetzt. Hierdurch werden die, aus der Reduktion des zugegebenen Kaliumpermanganats resultierende Mangandioxid gelöst. Dieser Vorgang wird wiederholt durchgeführt. Für eine Dekontamination sind in Abhängigkeit von der Art und Höhe der Kontamination etwa acht Iterationen erforderlich. Diese dauern jeweils etwa sechs Stunden /EPRI 98/.

²⁴ Das Akronym DFDX steht für *Decontamination For Decommissioning, electrochemical ion eXchange*

Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass keine Chelate als Abfallprodukt anfallen (komplette Zersetzung der Oxalsäure), und die Sekundärabfälle zu weiten Teilen aus Ionentauscherharzen bestehen, da auch die Fluorborsäure über Anionentauscher aus dem System entfernt werden kann. In der Praxis sind Dekontaminationsfaktoren von 1.000 und mehr erreicht worden /EPRI 99/.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das DFD-Verfahren wurde speziell für die Stilllegung entwickelt und führt an bestimmten Legierungen (z. B. Zirkonium-Legierungen, bestimmte Chromstähle) zu erheblichen Korrosionen, so dass für bestimmte Reaktortypen Verfahrensmodifizierungen vorgenommen wurden. Im Fall von Druckrohren aus Zirkonium-Legierungen (in CANDU-Reaktoren) wird ein Teil der Tetrafluorborsäure durch Salpetersäure ersetzt, um den Materialabtrag des Grundmetalls auf das gewünschte Maß zu reduzieren. Für andere Legierungen und Werkstoffe wurden andere Varianten entwickelt, bei denen beispielsweise auf Kaliumpermanganat verzichtet werden kann. Diese Verfahren werden auch als „EPRI DFD Lite“ bezeichnet.

Das DFD-Verfahren eignet sich, insbesondere unter Berücksichtigung der vorhandenen Abwandlungen, für die Dekontamination im Rahmen der Stilllegung aller gängiger Reaktortypen. Der Grund hierfür ist, dass der gewollte Abtrag des Grundmetalls die vorhandenen Kontaminationen effektiv entfernt und die eingesetzten Chemikalien nur geringen Sekundärabfall verursachen.

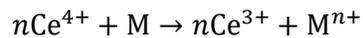
Das DFD-Verfahren wurde z. B. zur vollständigen Systemdekontamination im amerikanischen Kernkraftwerk *Big Rock Point* (SWR) eingesetzt /EPRI 01/.

3.3.2.2 Beschreibung einstufiger chemische Dekontaminationsverfahren

Diese Verfahrensklasse umfasst (meist flüssig-)chemische Verfahren, die im Wesentlichen nur einen Verfahrensschritt nutzen, der aber grundsätzlich auch wiederholt eingesetzt werden kann. Die Konzentration der eingesetzten Chemikalien ist oftmals hoch, so dass diese Verfahren relativ aggressiv zu dem Basismaterial sind und sich der Materialabtrag meist nicht nur auf die obersten Oxidschichten beschränkt. Einige Verfahrensvarianten werden im Folgenden beschrieben.

3.3.2.2.1 Verfahren mit Ce⁴⁺ (SODP, REDOX, MEDOC)

Das Ce⁴⁺-Verfahren nutzt das hohe Oxidationspotenzial von Ce⁴⁺ um sowohl die Oxidschicht als auch geringe Mengen des Basismetalls zu entfernen und aufzulösen. Die grundlegende chemische Reaktionsgleichung ist somit /PON 03/:



Hierbei bezeichnet n die Valenz des betrachteten Metalls (M). Die typische Materialtiefe, bis zu der ein Abtrag erfolgt, beträgt etwa 10 µm – dies ist in der Praxis oftmals ausreichend, um die massenbezogenen Freigabewerte einzureichen. Je nach Verfahren wird die mit Ce⁴⁺ angereicherte Lösung erwärmt und in Zirkulation gebracht, ggfs. werden Methoden zur Regenerierung des Ce⁴⁺-Reservoirs angewendet. In der Praxis haben sich mehrere Verfahrensvarianten etabliert, die im Folgenden näher erläutert werden sollen.

ODP und SODP-Verfahren

Das ODP bzw. SODP (*(Strong) Ozone Decontamination Process*)-Verfahren wurde in den 1980ern von Studsvik RadWaste AB als ein-stufiges Verfahren für geschlossene Systeme entwickelt und nutzt salpetersaure Ce(IV)-Lösung (Katalysator) mit Ozon als Oxidationsmittel. Die Verfahrensanwendung erfolgt bei Raumtemperatur. Das ODP-Verfahren findet auch bei Anlagen im Leistungsbetrieb Verwendung, das SODP-Verfahren wurde hingegen speziell für die Stilllegung entwickelt. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich des verwendeten pH-Wertes (pH-Wert von 2 (ODP) bzw. 0,6 (SODP)) und der Ce-Konzentration (im Falle des SODP-Verfahrens ist diese höher). Durch das Verfahren werden in der Regel neben der Oxidschicht auch eine gewisse Menge des Basismaterials abgetragen, im direkten Vergleich ist dieser Abtrag im Falle des SODP-Verfahrens aber größer. Die Anwendung des Verfahrens dauert mit etwa 50 – 75 Stunden aufgrund der niedrigen Prozesstemperatur relativ lange und wird mit der Einleitung von Reduktionsmitteln beendet /FAU 18/.

REDOX-Verfahren

Das REDOX-Verfahren (*Reduction Oxidation*) wurde in Japan von der JAEA als Eintauchverfahren für metallische Komponenten entwickelt /FUJ 89/, /FUJ 89a/. Es ähnelt in seinen Grundzügen dem (S)ODP-Verfahren (auch das REDOX-Verfahren nutzt Salpetersäure), wird aber bei höheren

Temperaturen von etwa 80 °C eingesetzt. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich durch eine Erhöhung der Temperatur der Prozess zunächst beschleunigt. Im Gegensatz zu dem (S)ODP-Verfahren regeneriert sich beim REDOX-Verfahren das Ce^{4+} -Reservoir durch Elektrolyse, siehe Abb. 3.19. Als Eintauchverfahren eignet sich das Verfahren auch für offene Komponenten mit verhältnismäßig komplexen Geometrien (z. B. Pumpen, Armaturen oder Rohre) /EPA 06/.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Um eine kontinuierliche und gleichmäßige Dekontamination zu ermöglichen ist eine stetige Regeneration des eingesetzten Ceriums nötig. Die Regeneration von Ce(III) zu Ce(IV) wird über ein Elektrolysebad erreicht. Hierbei sind besonders das Material der Anode und Kathode, sowie deren Abstand wichtige Prozessparameter. So eignen sich Platin, Gold und Titan etwa sehr gut im Hinblick auf ihre Korrosionsbeständigkeit. Im Falle von Titan ist jedoch eine erhöhte Produktion von Wasserstoffgas zu beobachten, was zu Problemen führen kann /FUJ 89/.

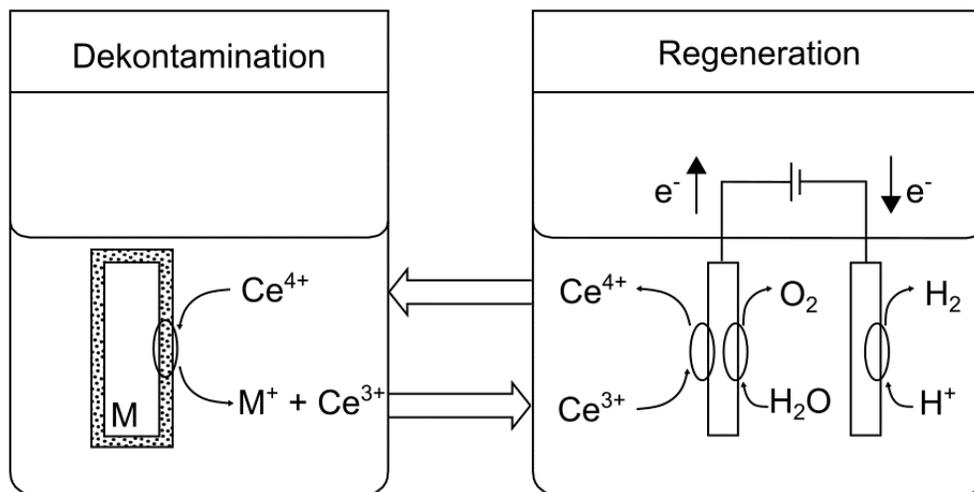
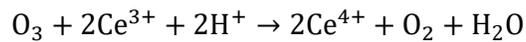


Abb. 3.19 Darstellung des REDOX-Verfahrens und der elektrolytischen Ce^{4+} -Regeneration (in Anlehnung an /FUJ 89/)

MEDOC-Verfahren

Im Gegensatz zu den (S)ODP- und REDOX-Verfahren nutzt das MEDOC²⁵-Verfahren Schwefelsäure anstelle von Salpetersäure als Träger des Oxidationsmittels Ce⁴⁺. Wie bei dem REDOX-Verfahren wird auch bei dem MEDOC-Verfahren das Ce⁴⁺-Reservoir regeneriert (siehe Abb. 3.20), hierfür wird allerdings anstelle eines elektrolytischen Ansatzes des REDOX-Verfahrens ein Austausch mit Ozon genutzt /PON 03/:



Wie das REDOX-Verfahren wird auch das MEDOC Verfahren bei erhöhten Temperaturen von etwa 80 °C eingesetzt.

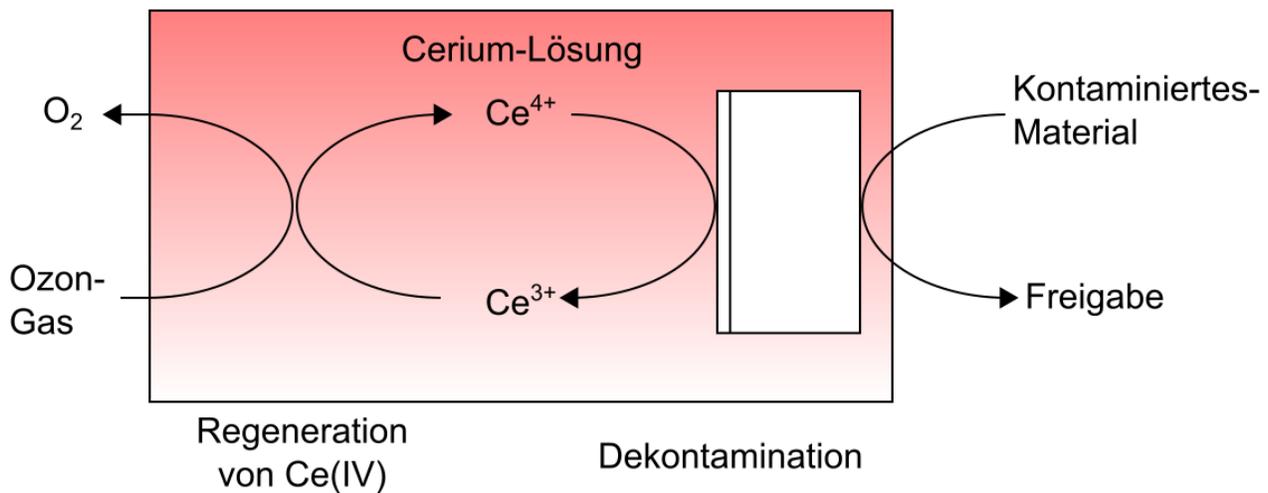


Abb. 3.20 Darstellung des MEDOC Verfahrens und der Ce⁴⁺ Regeneration durch den Austausch mit Ozon (Abbildung in Anlehnung an /PON 03/)

Der Wechselwirkungen des Ce⁴⁺ mit Ozon erfolgt in einem Gas-Flüssigkeits-Schütz, die Erzeugung des Ozons erfolgt außerhalb des Kontrollbereiches /PON 03/

²⁵ Das Akronym steht für „Metal Decontamination by Oxidation with Cerium“

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das MEDOC-Verfahren wird vor allem in Form von Bädern zur Dekontamination von metallischen (Groß-)Komponenten eingesetzt. Dazu gehören, Behälter, Wärmetauscher, Dampferzeuger, Primärleitungen, Hilfskreisläufe, Ausrüstungen und Rohrleitungen aus rostfreien Stählen oder Kohlenstoffstählen (mit oder ohne Edelstahlverkleidung oder mit Teilen aus rostfreiem Stahl). Wie bei anderen chemischen Verfahren ist zu beachten, dass die zu behandelnden Materialien für den Umgang mit derart aggressiven Chemikalien ausgelegt sind. Darüber hinaus muss das überschüssige Ozon thermisch zersetzt werden, bevor es in das Abluftsystem gelangt. Aus diesem Grund ist es erforderlich neben Wasserstoff- auch Ozondetektoren in der Anlage zu installieren /PON 03/.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Für das SODP-Verfahren gibt Studsvik an, dass mit diesem eine Reduzierung der spezifischen Aktivität auf Werte unterhalb von 1 Bq/g möglich seien. Das Verfahren wurde u. a. für die Dekontamination von Dampferzeugern des schwedischen Kernkraftwerks Ågesta eingesetzt. Mit diesem Verfahren dekontaminierte Metalle können anschließend eingeschmolzen (siehe Abschnitt 3.3.2.6) werden, wodurch sich eine weitere Reduzierung der Aktivität erzielen lässt /NEI 98/.

Das SODP-Verfahren wurde an Edelstahlkomponenten (Rohre des Dampferzeugers) des Kernkraftwerks Greifswald getestet. Hierbei konnten ausreichend hohe Dekontaminationsfaktoren für eine Einhaltung der Freigabebedingungen erzielt werden /IAEA 03/.

Das MEDOC-Verfahren wurde u. a. bei der Stilllegung des belgischen Druckwasserreaktors BR3 eingesetzt. Hierfür wurde zunächst eine eigenständige Anlage errichtet, in der etwa 0,5 Mg pro Tag hochkontaminierter Metalle (z. B. dickwandige Rohre) mit Oberflächenaktivitäten von bis zu 20.000 Bq/cm² dekontaminiert werden konnten. Es konnten Dekontaminationsfaktoren von 10.000 und mehr erreicht werden, so dass Restaktivitäten oftmals unterhalb von 0,1 Bq/g nachgewiesen werden konnten. Die typische Materialabtragungsrate betrug etwa 2,5 µm pro Stunde /PON 03/.

Auch große Komponenten, wie z. B. der Dampferzeuger des BR3, wurden erfolgreich dekontaminiert. Hierzu wurde das Verfahren in insgesamt 30 zweistündigen Dekontaminationszyklen

angewendet, so dass insgesamt ein Oberflächenabtrag von etwa 10 µm (dies entspricht einer Masse von etwa 41 kg) erreicht werden konnte /PON 03/.

Vorteile des MEDOC-Verfahrens sind neben einer – bei hohen Prozesstemperaturen – vergleichsweise hohe Materialabtragungsrate auch der einfache Regenerationsprozess. Das sekundäre Abfallaufkommen ist gering und beträgt etwa 11,5 l bituminierte Abfälle für 20 m² behandelte Fläche, wobei von einer abgetragenen Schichtdicke von 10 µm ausgegangen wird. Durch das Recycling der Schwefelsäure kann das Abfallaufkommen weiter reduziert werden. Dies kann z. B. durch Elektrodialyse der Lösungen geschehen. Erreichbar sind hierbei Dekontaminationsfaktoren von mehr als 10.000 /LAR 12/.

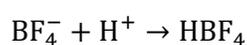
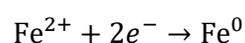
3.3.2.2 DECOHA-Verfahren

Das DECOHA-Verfahren basiert auf dem Einsatz von Fluorborsäure (HBF₄). Beim Verfahren entstehen Flusssäure und flüchtige Borsäure. Da die Flusssäure jedoch äußerst aggressiv ist, wird zudem ein neutrales Salz hinzugegeben /ROL 92/.

Das DECOHA-Verfahren vereint zwei Prozesse – die Auflösung von Metall in Fluorborsäure sowie eine mögliche elektrochemische Rückgewinnung der Säure – zu einem geschlossenen Gesamtprozess. Das Verfahren wird typischerweise bei Temperaturen zwischen 30 °C und 98 °C eingesetzt. Die Temperatur wird in Abhängigkeit des zu behandelnden Metalls gewählt, für manche metallischen Werkstoffe (z. B. Zircalloy, Aluminium oder Kohlenstoffstähle) wird das Verfahren auch bei Raumtemperatur genutzt, höhere Temperaturen werden für Edelstähle oder Nickellegierungen verwendet. Typische Abtragungsraten liegen bei 3 – 4 µm pro Stunde bei 80 °C für Nickellegierungen (50-prozentige Fluorborsäure) oder bei 20 – 25 µm pro Stunde bei 21 °C für Aluminium (5-prozentige Fluorborsäure).

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die verbrauchte Lösung kann elektrochemisch regeneriert, wobei auch die gelösten Metallionen aufkonzentriert werden. Für das Beispiel Eisen finden an der Kathode bzw. der Anode folgende Prozesse statt:



Das Isotop Co-60 wird mit den Metallen an der Anode abgeschieden. Die Regeneration ermöglicht keine 100 %-ige Eliminierung der Kationen und endet im Allgemeinen, wenn 98 % der Kationen abgeschieden sind. Das Isotop Cs-137 wird nicht an der Kathode abgeschieden und verbleibt in der Lösung.

Für einige Radioisotope (z. B. Pu-, Cs-, Ce-, Ru- und Sr-Isotope) sind zusätzliche Verfahrensschritte notwendig, da sich diese ohne weitere Vorkehrungen nicht bei der elektrochemischen Regeneration abscheiden lassen. Diese zusätzlichen Verfahrensschritte erhöhen den generierten radioaktiven Abfall um wenige Prozent /ROL 92/.

Hinsichtlich der radioaktiven Abfälle nennt die Referenz /ROL 92/ - unter der Annahme einer 10 m² großen Oberfläche und einer Abtragungstiefe von 1 µm – für ein 1 Mg kontaminierten Metalls eine Masse von 160 g bzw. 300 g (nach Verfestigung).

Die Erzeugung von Wasserstoff während der Reaktion erfordert eine Belüftung und eine Überwachung der Abgase, um sicherzustellen, dass diese unterhalb der explosiven Konzentration eines H₂-Luft-Gemisches bleiben.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Ein Beispiel für die Anwendung des DECOHA-Verfahrens im industriellen Maßstab ist die Behandlung kontaminierter Metallteile im havarierten Kernkraftwerk Tschernobyl. Die dort eingesetzte Anlage wurde 1990 in Deutschland gebaut und ist für einen täglichen Durchsatz von 5 Mg kontaminierten Stahls konzipiert /ROL 92/.

3.3.2.2.3 Salpeter- / Flusssäure-Verfahren

Das Salpetersäure (HNO₃) / Flusssäure (HF)-Verfahren nutzt einen oxidreduzierenden Prozess in Verbindung mit einer anschließenden Auflösung des darunter liegenden Metalls. Dies geschieht durch das Durchdringen der Chemikalien durch die Oxidschicht. Nach dem Angriff auf das (unedle) Metall lösen sich die Oxide ab und verbleiben in der Lösung. Die Lösung reichert sich nach und nach mit unlöslichen Oxiden in Form von Partikeln und mit gelösten Salzen an, die aus der teilweisen Auflösung der Oxide und der Reaktion des unedlen Metalls stammen. Die Geschwindigkeit und die Effizienz der Reaktion nehmen mit der Temperatur, der HF-Konzentration und der Reaktionszeit zu.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Verfahren wird im Falle großer Komponenten (z. B. Innenflächen von Behältern) bei niedriger Temperatur und hoher Konzentration genutzt, die Chemikalien werden in Pulverform aufgetragen (in-situ). Im Falle kleiner Komponenten wird es meist in Form eines Bades (ex-situ) genutzt, die Temperatur hierbei ist hoch und die Konzentration gering. Die Gesamteffizienz des Verfahrens wird verbessert, wenn die Komponenten nach der Behandlung in einem Ultraschallbad gespült werden.

Ein Teil der Oxide bleibt unlöslich und kann durch Filtration entfernt werden. Auf der anderen Seite nimmt die Effizienz des Prozesses mit zunehmender Konzentration der gelösten Salze in der Lösung ab. Im Laufe des Dekontaminationsprozesses sinkt die Konzentration der Flusssäure kontinuierlich durch Chelatisierung der Fluoridionen mit dem gelösten Metall. Daher muss der Lösung neues HF zugesetzt oder das Bad erneuert werden. Die Behandlung der fluorhaltigen Lösung besteht im Allgemeinen in einer neutralisierenden und chelatbildenden Behandlung der verbleibenden freien Fluoride /CND 09/.

Die Anwendung als Bad bringt jedoch einige Nachteile mit sich, da sie spezielle Materialien, hauptsächlich Kunststoffe, erfordert und erhebliche Probleme hinsichtlich der Arbeitssicherheit mit sich bringt. Außerdem nimmt die Effizienz des Bades recht schnell ab und führt zu einer schnellen Erschöpfung der Reagenzien. Im Gegensatz dazu kann die Pulverisierung eines Films an den Wänden eines zu dekontaminierenden Geräts sehr vorteilhaft sein. Hierbei ist die Menge der benötigten Reagenzien begrenzt, die Anwendung bei niedriger Temperatur wirft weniger Sicherheitsprobleme auf und das Volumen der entstehenden Abwässer ist geringer.

Das Verfahren lässt sich auch in Form von Ätzpasten nutzen, die auf die Objekt Oberfläche aufgetragen werden. Nach wenigen Stunden ist die Paste trocken und kann mechanisch entfernt werden. Die Behandlung wird durch Abspülen mit einem Druckwasserstrahl beendet. Diese Technik wird hauptsächlich für Außenflächen oder hoch kontaminierte Stellen verwendet /LAR 12/.

Durch die Entfernung einer Oxidschicht mit einer Stärke von 10 – 20 µm können Kontaminationen äußerst effektiv beseitigt werden. Auf diese Weise sind Dekontaminationsfaktoren im Bereich von 10.000 möglich.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Verfahren wurde bereits erfolgreich in Italien, Frankreich und Belgien (BR3) eingesetzt /CND 09/.

3.3.2.3 Elektrochemische Dekontaminationsverfahren

Bei elektrochemischen Dekontaminationsverfahren entsteht die Dekontaminationswirkung durch die Wirkung einer Säure bei gleichzeitiger Anwendung eines elektrischen Feldes, wodurch es möglich ist, die freigesetzten Ionen von dem zu behandelnden Werkstück zu entfernen und an Kathoden zu sammeln.

Beim elektrolytischen Polieren (auch: Elektropolieren – englisch: *electrolytic polishing / electropolishing*) wird das zu behandelnde metallische Werkstück in ein Elektrolytbad gelegt, in dem sich zudem zwei Kathoden befinden. Je nach Material haben sich unterschiedliche Säuren als Elektrolyt etabliert. Zwischen diesen Kathoden und dem anodisch geschalteten Werkstück wird eine Spannung angelegt, wodurch sich eine kontrollierte Menge des oberflächennahen Metalls auflöst und in den Oberflächenschichten gebundene Verunreinigen mit fortgetragen werden. Bei dem Verfahren handelt es sich also um ein anodisches Auflösungsverfahren. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abb. 3.21 dargestellt.

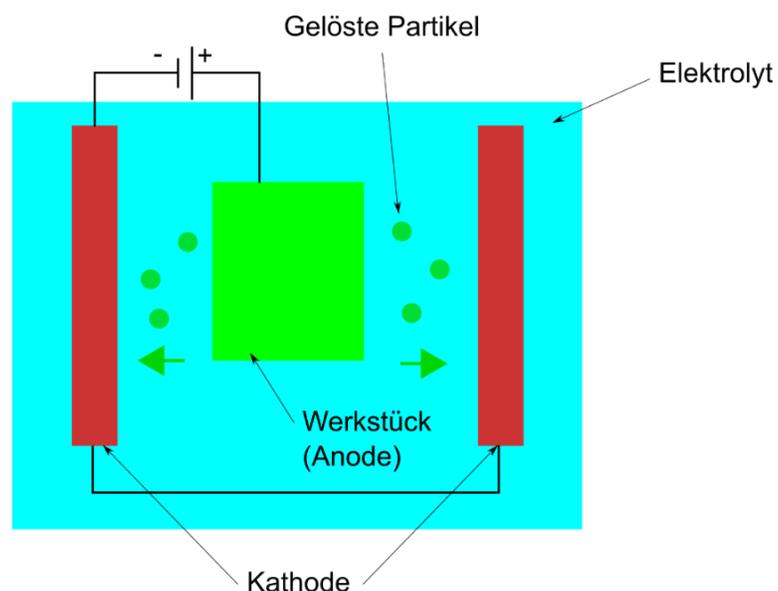


Abb. 3.21 Schematische Darstellung des Elektropolierens

Phosphorsäureverfahren

Das Verfahren findet Anwendung bei der Dekontamination von Edelstählen und Kohlenstoffstählen. Gängige Parameter dieses Verfahrens sind eine Phosphorsäurekonzentration von 40 – 80 vol.%, eine Temperatur von 40 – 80 °C, eine Spannung von 8 – 12 V und eine Stromdichte von 60 – 500 mA/cm².

Das Phosphorsäure-Verfahren ist hinsichtlich der Behandlung von Sekundärabwässern anspruchsvoll, da das Vorhandensein von Oxalaten in den konditionierten Abfällen vermieden werden sollte. Das Verfahren setzt außerdem Wasserstoff frei, so dass entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen sind.

Eine Anwendung im industriellen Maßstab wurde im KKW Gundremmingen durchgeführt. Mehrere hundert Tonnen ferritischen Stahls wurden nach Entfernung einer 100 – 500 µm dicken Oberflächenschicht vollständig dekontaminiert.

Salpetersäureverfahren

Im Falle des Salpetersäure-Verfahrens wurden zwei sehr ähnliche Verfahrensvarianten in Großbritannien durch das AEA (*Atomic Energy Research Establishment*) bzw. in Frankreich durch das CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) entwickelt. Salpetersäure wird wegen ihrer Verträglichkeit mit der Behandlung von Abwässern aus der Dekontamination oder der Wiederaufbereitung von plutoniumhaltigen Reststoffen gewählt.

Bei dem Verfahren des AEA werden die einzelnen Teile in einen Titankorb gelegt und bei Umgebungstemperatur in 1 M Salpetersäure behandelt. Die angelegte Stromdichte ist mit 2 – 3 mA/cm² gering. Titan wird hierbei zur Reduzierung der Bildung von Wasserstoffgas und Stickoxiden (NO_x) genutzt. Nach einer zweistündigen Behandlung können DF von bis zu 10.000 erreicht werden. Hierbei werden etwa 5 µm des Materials abgetragen wodurch etwa 0,6 dm³/m² Abfallprodukte entstehen. /LAR 12/

Bei dem von CEA entwickelten Verfahren handelt es sich um eine anodische Auflösung in einem Fass in einer 2 M, HNO₃-Umgebung zur Behandlung von plutoniumkontaminierten Metallabfällen. Die zu behandelnden Abfälle werden hierzu lose in einen perforierten Titanbehälter gegeben, an der Anode polarisiert und in Bewegung versetzt. Die Kathoden sind aus rostfreiem Strahl gefertigt.

Die Stromdichte beträgt etwa 10 bis 30 mA/cm². Die Abtragungsrate bei dieser Methode beträgt etwa 16 µm/h für rostfreien Stahl, 20 µm/h für Aluminiumlegierungen und 500 µm/h für unlackierten ferritischen Stahl. Die Behandlung dauert in der Regel etwa 1 – 3 Stunden. /LAR 12/

Die größte Beschränkung hinsichtlich der Verwendung dieses Verfahrens ist die Größe der zu dekontaminierenden Bauteile.

Schwefelsäureverfahren

Diese Verfahrensvariante wurde von Toshiba in Japan zur Dekontamination von Edelstählen entwickelt. Die Abtragungsrate sinkt im Verfahrensverlauf aufgrund der Verarmung von H⁺ von 240 µm/h zu Beginn der Behandlung auf 60 µm/h. Auch die Stromeffizienz nimmt mit der Konzentration der gelösten Ionen ab und sinkt von 40 % auf 20 %. Der Säuregehalt muss hierbei zur Optimierung der Abtragungsrate und des Wirkungsgrades auf einem bestimmten Niveau gehalten werden. Die Behandlung umfasst die Neutralisierung der Lösung und die Ausfällung der Hydroxide. Bei Vorhandensein von Cs-137 wird eine Behandlung mit Ferrocyanid in Kombination mit der Ausfällung der Hydroxide durchgeführt.

Natriumsulfat-Verfahren

Für das Natriumsulfat-Verfahren existieren mehrere Verfahrensvarianten, zu denen u. a. das A-EDSS-Verfahren und das ELDECON-Verfahren gehören.

Das von Toshiba entwickelte AEDSS-Verfahren basiert auf der Verwendung von Natriumsulfat als Elektrolyt und der alternierenden Polarisierung der Elektroden. Bei der anodischen Elektrolyse wird das Metall oxidiert und löst sich auf, aber die Oxide (z. B. Eisenoxide) bleiben intakt. Der Angriff auf das unter der Oxidschicht befindliche Metall kann nur erfolgen, wenn der Elektrolyt durch die Schicht hindurchdringt. Bei der kathodischen Elektrolyse wird die Oxidschicht an der Oberfläche reduziert, wodurch Eisen(III) zu Eisen(II) reduziert wird und das unedle Metall unverändert bleibt. Eine Kombination der beiden Techniken, d. h. eine regelmäßige Änderung der Polarisierung der Elektroden, beschleunigt die Abtragung erheblich. Dieses Verfahren ist besonders interessant für Teile aus ferritischem Stahl, die mit einer dicken Schicht von Eisenoxiden bedeckt sind. Das Eisen in der Lösung fällt in Form von Eisenhydroxiden aus, welche das Co-60 mitreißen. Der Wirkungsgrad ist mit 6 % relativ gering, was zu einem hohen Energieverbrauch von etwa 4000 kWh/Mg führt. Das entspricht 200 kWh/m² bei einer Erosion von 50 µm. Auf der anderen

Seite ist der entstehende Sekundärabfall bei dieser Methode, mit etwa 10 kg/Mg, sehr gering /LAR 12/.

Auch das von dem schwedischen Unternehmen ABB Atom kommerziell angebotene ELDECON-Verfahren basierte ebenfalls auf der Verwendung von Natriumsulfat als Elektrolyt. Die Abtragsrate beträgt etwa 60 $\mu\text{m}/\text{h}$ bei einer Stromdichte von 400 mA/cm^2 . Auch bei diesem Verfahren fällt das gelöste Eisen in Form von Eisenhydroxid aus und nimmt dabei Co-60 mit sich /LAR 12/.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die Wahl des Elektrolyts ist abhängig von dem zu bearbeitenden Metall, beispielsweise werden für (Edel-)stähle und Aluminiumlegierungen oftmals Gemische aus Phosphorsäure und Schwefelsäure eingesetzt /BUH 17/. Übersteigt die Eisenkonzentration im Elektrolyt einen Wert von 100 g/dm^3 , sinkt die Effizienz der Dekontamination. Der Elektrolyt wird kontinuierlich zirkuliert, um die abgetragenen Eisenpartikel herauszufiltern.

Da sich die zu behandelnde Oberfläche in der Nähe der Elektrode befinden muss, ist die Behandlung auf zugängliche Oberflächen beschränkt. Eventuelle Farb- oder Oxidschichten müssen vor der elektrochemischen Behandlung entfernt werden. Geeignete Bauteile für diese Technik sind das Primärkreislaufsystem und andere dickwandige, stark kontaminierte Bauteile.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Dieses Verfahren wird entweder zur Verringerung der Dosisleistung oder zur Dekategorisierung von Abfällen aus demontierten Teilen (z. B. von einer hochaktiven in eine niedrigaktive Kategorie) eingesetzt.

Bei der Stilllegung des Kernkraftwerk Gundremmingen A wurde das Phosphorsäureverfahren für die Dekontamination einiger hundert Mg ferritischer Stähle genutzt. Hierbei betrug der typische Oberflächenabtrag zwischen 100 und 500 μm /LAR 12/.

3.3.2.4 Verfahren mit Dekontaminationsschäumen und -gelen

Schäume und Gele werden als Trägermedium für andere chemische (flüssige) Dekontaminationsmittel eingesetzt, sie selbst haben in der Regel nur eine verschwindende Dekontaminationswirkung. Die wesentliche Aufgabe dieser Schäume und Gele ist eine lokalisierte Fixierung der eigentlichen Dekontaminationsmittel, um z. B. ein Abtropfen oder Verrinnen des Mittels an vertikalen Flächen zu vermeiden. Sie erlauben einerseits eine Maximierung der Wirkung, andererseits können sie aber auch helfen, die Menge der verwendeten Dekontaminationsmittel zu minimieren. Die so entstehenden Dekontaminationsschäume (englisch: *decontamination foams*) und Dekontaminationsgele (englisch: *decontamination gels*) eignen sich z. B. für Großkomponenten mit komplexen Geometrien und können unabhängig von der Orientierung der zu dekontaminierenden Fläche aufgebracht werden.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Dekontaminationsverfahren mit Schäumen eignen sich für die Entfernung loser oder schwach gebundener Kontaminationen. Es werden nur geringe Mengen Abwasser erzeugt. In Abhängigkeit des Materials und der Kontamination werden unterschiedliche Schäume genutzt. Entfettende Schäume sind für ein sehr breites Materialspektrum geeignet; oxidierende Schäume eignen sich für diverse Edel- und Kohlenstoffstähle, sind aber z. B. für Komponenten aus Bronze oder auf Polymerbasis ungeeignet. Das Verfahren ist leicht und schnell in der Anwendung. Es findet kein Oberflächenabtrag statt, bei geeigneter Anwendung können DF zwischen 20 und 100 erreicht werden.

Dekontaminationsverfahren mit Gelen erzeugen nur geringe Mengen Abwasser, die aber in seltenen Fällen problematisch aufzubereiten sind. Das Verfahren ist für einige Materialien ungeeignet, beispielsweise für Bronze, Polymere oder schwarze Stähle. Ähnlich wie die Schaumverfahren sind auch die Gelverfahren leicht und schnell in der Anwendung. Typischerweise wird das Gel etwa zwei Stunden nach der Anwendung durch Wasserstrahlen entfernt. Alternativ kann das Gel aber auch austrocknen und die Oberfläche anschließend durch Absaugen gereinigt werden. Bei geeigneter Anwendung können in der Praxis DF bis etwa 100 erreicht werden.

3.3.2.5 Mechanische Dekontaminationsverfahren

Mechanische Dekontaminationsverfahren beruhen auf mechanischen/physikalischen Prozessen zur Entfernung von Kontaminationen. Durch die notwendigen Werkzeuge beschränken sich die Anwendungen auf leicht zugängliche Oberflächen, z. B. Wand- und Bodenflächen. Je nach Verfahren können lose und/oder fixierte Kontaminationen entfernt werden, zudem zeigen sich unterschiedlich stark ausgeprägte Materialeignungen.

Das Aufkommen an Sekundärabfällen variiert je nach Verfahren und Anwendung. Abfallreduzierungen sind oftmals möglich, beispielsweise im Falle von Abrasiv-Verfahren durch Wiederverwendung der verwendeten Strahlmittel. Auch eine partielle Dekontamination von Oberflächen zur Entfernung von *hot spots* ist im Gegensatz zu den meisten chemischen Dekontaminationsverfahren möglich. Einige etablierte mechanische Dekontaminationsverfahren werden im Folgenden beschrieben. Die Dekontamination mit mechanischen Verfahren kann auch in Verbindung mit chemischen Dekontaminationsverfahren eingesetzt werden. Ausgewählte Verfahren werden in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt.

3.3.2.5.1 Konventionelle Reinigungsverfahren (Abstauben, Absaugen, Abwischen, Abscheuern, Wasserspülen, Dampfreinigen)

Bei den konventionellen Reinigungsverfahren werden lose oder nur schwach-anhaftende Partikel, insbesondere in Form von Stäuben, von Oberflächen durch Abstauben (englisch: *dusting*), Absaugen (englisch: *vacuuming*), Abwischen (englisch: *wiping*), Scheuern (englisch: *scrubbing*), Spülen (englisch: *flushing*) oder durch Dampfreinigen (englisch: *steam cleaning*) entfernt.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die Anwendung der Verfahren erfolgt trocken (Abstauben, Absaugen) oder nass (Abwischen, Scheuern, Spülen) bzw. mit Dampf (Dampfreinigen).

Bei der Nassanwendung ist der Feuchtigkeitsanteil in der Regel zur Minimierung der Sekundärabfälle und des Prozesswasser relativ gering.

Für das Wischen werden z. B. in Zitronensäure, Oxalsäure oder andere praktisch bewährte Dekontaminationsreiniger getränkte Putztücher genutzt /HZG 16/. In diesem Fall erfolgt die Dekontamination also sowohl durch mechanische als auch chemische Wirkung.

Beim Spülen wird die Dekontaminationswirkung erzielt, indem chemische Strukturen aufgelöst werden oder indem kontaminationstragende Partikel ausgewaschen werden. Je nach Art der Kontamination kann sich die Wassertemperatur als freier Parameter auf den erzielbaren Dekontaminationsfaktor auswirken.

Grundsätzlich sind die Verfahren sehr leicht in der Anwendung, gegebenenfalls entstehende Prozesswässer oder Dämpfe müssen entsprechend gefiltert bzw. aufgefangen/aufbereitet werden.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Diese Verfahren werden insbesondere zur Vorbehandlung eingesetzt, wobei neben der Dekontaminationswirkung auch die Entfernung von Schmutz, Fett(filmen), u. ä. im Vordergrund steht, um so eine bessere Grundlage für die Anwendung weiterer Dekontaminationsverfahren zu bilden.

Das Wasserspülen findet Anwendung bei Flächen, deren Ausdehnung für andere konventionelle Methoden wie dem Wischen oder dem Abbürsten zu groß sind.

Grundsätzlich gehören die konventionellen Verfahren aufgrund ihrer einfachen Anwendung zu den Standardverfahren und stellen für viele Fälle einen pragmatischen Ansatz dar. Konkrete Anwendungsbeispiele finden sich zum Beispiel für das Helmholtz-Zentrum Geesthacht, wo das Abwischen mit feuchten Putztüchern beispielsweise für Dekontaminationen im Rahmen der Zerlegung des Reaktordruckbehälters des ehemaligen Reaktor-angetriebenen Schiffs Otto Hahn vorgesehen ist /HZG 16/. Auch bei der Stilllegung der Leistungsreaktoren werden konventionelle Verfahren standardmäßig eingesetzt, beispielsweise im Kernkraftwerk Brokdorf (KBR) /PEL 22a/.

3.3.2.5.2 Schleifen, Polieren und Bürsten

Das Abschleifen (englisch: *grinding*), Polieren (englisch: *polishing*) und Abbürsten (englisch: *brushing*) stellen weitere einfache Dekontaminationsverfahren dar, die mit einem geringen Investitionsbedarf eingehen. Das Spektrum der zur Verfügung stehenden Werkzeuge ist sehr breit, so dass die Werkzeugwahl aufgabenbezogen erfolgen kann. In den meisten Fällen stammen diese

ursprünglich aus anderen Industriezweigen und wurden an die vorliegenden kerntechnischen Anforderungen adaptiert (z. B. Absaugvorrichtungen). Durch die Verfahren werden im Gegensatz zu den vorab präsentierten konventionellen Reinigungsverfahren auch (sehr) geringe Mengen des Oberflächenmaterials abgetragen.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Bei den Verfahren entstehen in der Regel kleine Partikel und/oder Stäube, so dass sich die Anwendung oftmals zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen auf entsprechend ausgestattete (beispielsweise Filter- und Ventilationsanlagen) Kabinen beschränkt. Ferner sind bei der Anwendung Masken bzw. belüftete Schutzanzüge zu tragen.

Die Verfahren können sowohl für die Flächendekontamination als auch für die Dekontamination von *hot spots* genutzt werden.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Die Verfahren gehören u. a. aufgrund ihrer leichten Verwendung und geringen Kosten zu den Standardverfahren zur Entfernung von losen bis schwach haftenden Kontaminationen (beispielsweise im KBR /PEL 22a/).

3.3.2.5.3 Druckluftstrahlverfahren

Bei den Druckluftstrahlverfahren (englisch: *air jetting*) werden feste Strahlmittel mit niedriger Härte mittels Druckluft durch eine Düse gepresst und auf die zu reinigende Oberfläche gerichtet beschleunigt. Die Reinigungswirkung kommt durch den Aufprall des Strahlmittels auf die zu bearbeitende Oberfläche des Werkstücks und ggfs. weiteren Prozesse (z. B. thermische Prozesse) zustande. Die Verfahren führt, im Gegensatz zu den Abrasivstrahlverfahren (siehe Abschnitt 3.3.2.5.5) aufgrund der in der Regel niedrigen Härte des beigefügten Strahlmittels zu keinem substantziellen Abtrag des Basismaterials, die Wirkung beschränkt sich auf die oberen, relativ schwach fixierten Schichten (z. B. Stäube, Farbe, ggfs. Beschichtung). Zwei Verfahrensvarianten werden im Folgenden beschrieben.

Trockeneisstrahlen

Beim Trockeneisstrahlverfahren (englisch: *dry-ice blasting*) wird als Strahlmittel festes CO₂ (Trockeneis) mit einer Temperatur von rund -80 °C verwendet. Das verwendete Trockeneis wird zu kleinen Presslingen (*pellets*) mit Durchmessern von 1 bis 3,5 mm und einer Länge von 2 bis 10 mm gepresst /VER 08/. Das Trockeneis geht bei Normaldruck und bei einer Temperatur von -78,5°C von der festen in die gasförmige Phase über (Sublimation).

Die Presslinge werden in einem Injektionssystem mit einem Luftdruck von etwa 2 MPa zu einem Volumenstrom von etwa 20 m³/min beschleunigt. Der Gasstrom weist Geschwindigkeiten von etwa 300 m/s auf, die Geschwindigkeit der Presslinge bewegt sich im Bereich 190 – 300 m/s. Die kinetische Energie der Presslinge stellt einen ersten dekontaminationsfördernden Faktor dar. Aufgrund der niedrigen Härte der Trockeneispellets von etwa 2 bis 3 Mohs²⁶ wirkt das Verfahren nicht abrasiv und konzentriert sich auf Oberflächenabtragungen /VER 08/.

Durch das auftreffende Trockeneis wird die Oberfläche des Materials (häufig Metall) auf -60 °C abgekühlt, mit steigender Materialtiefe normalisiert sich die Temperatur aber rasch, so dass in einer Tiefe von 0,5 mm die Temperatur bereits -10 °C beträgt. Durch diesen Temperaturgradienten wird das Material thermisch belastet, was die Dekontaminationswirkung unterstützt (zweiter dekontaminationsfördernder Faktor). Der Effekt wird im Falle von Beschichtungen noch verstärkt da sich die Ausdehnungskoeffizienten der Beschichtung bzw. des (metallischen) Basiswerkstoff unterscheiden. Zudem wird durch den Phasenwechsel eine Volumenausdehnung um den Faktor 700 beobachtet, wodurch sich auf der Oberfläche des zu reinigenden Werkstoffs eine Schockwelle ausbreitet (Sublimationsschock), die einen dritten dekontaminationsfördernden Faktor darstellt²⁷.

In Summe sorgen diese drei Prozesse – Umwandlung der kinetischen Energie, thermische Spannungsinduktion und Sublimationsschock – dafür, dass die Verunreinigungen aus der Oberfläche herausgeschlagen und von dem Luftstrom weggetragen werden. Das verdampfte Trockeneis und die entfernten Verunreinigungen sammeln sich (am Boden) an oder werden durch die Belüftung

²⁶ Die Mohs-Skala reicht von 1 (weich) bis 10 (hart). Ein weiches Mineral mit einem Mohs-Wert von eins ist beispielsweise Talk. Diamant ist hingegen ein hartes Mineral und hat einen Mohs-Wert von 10.

²⁷ Das Trockeneisstrahlen stellt streng genommen ein hybrides Verfahren dar, da die Dekontaminationswirkung sowohl thermisch als auch mechanisch erfolgt.

abgeführt. Die Belüftung (der Arbeitskabine) muss ausreichend sein, um die Ansammlung von CO₂ zu vermeiden und um Kontaminationen in der Luft zu entfernen. Das Personal muss in belüfteten Anzügen arbeiten, der Lärmpegel kann zwischen 75 – 125 dB liegen.

Eisstrahlen

Die Technik des Eisstrahlens (englisch: *ice jetting*) ähnelt in wesentlichen Punkten der des Trockeneisstrahlens, ist jedoch durch die Nutzung von gewöhnlichem Wassereis einfacher in der technischen Umsetzung und der Anwendung. Bei dem Prozess werden Eiskristalle mit Hochdruck auf die zu behandelnde Oberfläche geschossen und lösen dabei schwach haftende Kontaminationen. Die entfernten Verunreinigungen befinden sich anschließend in Suspension oder Lösung im Wasser, das sich beim Schmelzen der Eiskristalle bildet. Im Vergleich zum Trockeneisstrahlen ist die Temperatur des Eises höher, die thermisch-bedingten Faktoren sind somit schwächer ausgeprägt sind.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Je nach Verfahrensvariante ergeben sich Anforderungen für die Luftfilterung (Trockeneisstrahlverfahren) bzw. an die Wasserbehandlung (Eisstrahlen). Die gerätetechnischen Anforderungen sind gering, so dass z. B. auch der Kostenaufwand für die Druckluftstrahlverfahren vergleichsgering ist. Die laufenden Kosten sind im direkten Vergleich beim Trockeneisstrahlen durch die benötigten Trockeneispresslinge etwas höher.

Das Verfahren eignet sich für ausreichend harte Basismaterialien (insbesondere Metalle, aber auch Stein, Holz oder Kunststoff), für sehr weiche Materialien ist es allerdings ungeeignet (Materialdurchschlag). Auch für kälteempfindliche Oberflächen ist das Verfahren nicht geeignet.

Die zu behandelnden Oberflächen müssen gut zugänglich sein, das Verfahren eignet sich aber auch für Bereiche, die andere Verfahren gegebenenfalls vor Herausforderungen stellen, beispielsweise für Arbeiten in Kerben und Ecken.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Aufgrund der geringen Härte des Strahlmittels wird das Basismaterial nicht abgetragen, so dass es ein entsprechend schonendes Verfahren darstellt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass das

Verfahren insbesondere für die Entfernung loser/schwach-haftender Kontaminationen genutzt werden kann. Zudem lassen sich auf den Basismaterialien aufgetragene Schichten (z. B. Farben, Lacke, Öle) gut entfernen. Zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen finden Arbeiten mit diesem Verfahren in der Regel in abgeschlossenen und entsprechend ausgestatteten (Luftfiltration, Wassersammlung, Wasseraufbereitung, etc.) Arbeitsbereichen statt, dementsprechend ist es insbesondere ein Verfahren für die Nachzerlegung ausgebaute Teile und Komponenten (ex-situ Anwendung).

3.3.2.5.4 Wasserstrahlverfahren

Bei dem Wasserstrahlverfahren (englisch: *water jetting*) wird ein verdichteter Wasserstrahl auf die zu dekontaminierende Oberfläche gerichtet. Der verwendete Wasserdruck beeinflusst die Abtragwirkung und die Abtragtiefe, so dass dieser passend – auch unter Berücksichtigung des Materials – für die gewünschte Maßnahmen gewählt werden muss, so dass in der Praxis zunächst eine gestufte Einordnung in Abhängigkeit des verwendeten Wasserdrucks vorgenommen wird, wobei die jeweiligen Grenzen allerdings je nach Einordnung gewissen Unschärfen unterliegen. Grob lassen sich vier Druckbereiche voneinander trennen /NED 18/:

- Wasserstrahlverfahren im Niederdruckbereich (etwa 5 – 15 MPa)
- Wasserstrahlverfahren im mittleren Druckbereich (etwa 15 – 100 MPa)
- Wasserstrahlverfahren im Hochdruckbereich (etwa 100 – 250 MPa)
- Wasserstrahlverfahren im Ultrahochdruckbereich (>250 MPa)

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Die Komplexität, der Platzbedarf und die Kosten für die eingesetzten Geräte nimmt grundsätzlich mit dem Verfahrensdruck zu. Das Verfahren kann zwar grundsätzlich in-situ genutzt werden, zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen eignet es sich aber insbesondere für die Nachbehandlung. Geeignete Dekontaminationskammern erzeugen im Arbeitsbereich einen Unterdruck und sorgen für einen stetigen Austausch der Luft. Dieser Austausch gewährleistet zudem eine klare Sicht des Personals auf die zu behandelnden Werkstücke.

Grundsätzlich handelt es sich bei den Wasserstrahlverfahren um ein effektives und effizientes Dekontaminationsverfahren /IAEA 99/, das aber verfahrensinhärente Nachteile aufweist, die in der Praxis berücksichtigt werden müssen.

Für das Verfahren ist eine Wasseraufbereitungsanlage erforderlich, welche in der Lage ist auch große Mengen an leicht kontaminiertem Wasser aufzureinigen. Die Menge an Sekundärabfällen ist vergleichsweise hoch. Während des Strahlvorgangs entstehen Aerosole, welche ebenfalls Kontaminationen forttragen können. Daher ist bei handgeführter Verfahrensanwendung eine Vollschutzausrüstung nötig.

Kontaminationen können, begünstigt durch den hohen Arbeitsdruck, in Risse und Fugen des zu dekontaminierenden Werkstücks eindringen. Das Verfahren eignet sich somit insbesondere für geschlossene Oberflächen (z. B. Dekontamination von Metallteilen). Zudem können durch die Anwendung des Verfahrens auch Kontaminationen über die Oberflächen verteilt /NED 18/.

In manchen Fällen wurde ein „Ausschwitzern“ von Kontaminationen, d. h. ein Anstieg des Kontaminationsniveaus nach erfolgter Dekontamination im Verlauf weniger Stunden bis zu einigen Tagen, beobachtet /NED 18/. Zu den Isotopen, für die ein solches Verhalten beobachtet wurde, gehören z. B. Co-60 und Cs-137.

Eine Reihe von Betriebsparametern können die Dekontamination maßgeblich beeinflussen. Zu diesen Parametern gehören u. a. /NED 18/:

- Wasserdruck

Neben dem Staudruck ist auch der Druckstoß relevant /SHI 11/. Für eine ebene Flächen kann der Druckstoß durch folgende Formel beschrieben werden:

$$p = c \cdot \rho \cdot v$$

Hier beschreibt c die Schallgeschwindigkeit in Wasser (etwa 1430 m/s), ρ die Dichte von Wasser (0,992 g/cm³) und v die Aufschlagsgeschwindigkeit. Zu einem Materialabtrag kommt es, wenn die Summe der Drücke die Festigkeit des Materials überschreiten.

Grundsätzlich nimmt demnach der Abtrag mit steigendem Wasserdruck (und somit steigender Aufschlagsgeschwindigkeit) zu.

- Art der Düse

Die Geometrie der Düse bestimmt die Verteilung des Wasserstrahls. In der Praxis werden häufig Düsen für runde oder aufgefächerte Wasserstrahlen genutzt, zudem werden auch rotierende Düsen verwendet. Im Falle rotierender Düsen nimmt die

Dekontaminationswirkung mit steigender Rotationsfrequenz zu /DOR 08/. Zudem steigt der Materialabtrag mit zunehmendem Düsendurchmesser /LEU 98/, /MOM 03/.

- Abstand zwischen Düse und Oberfläche

Untersuchungen haben gezeigt, dass es einen bestimmten Abstand gibt, bei dem der Materialabtrag maximiert wird. Dieser hängt von mehreren material- und strahlabhängigen Faktoren ab, z. B. dem zu behandelnden Basismaterial, der Düsengröße und dem Wasserdruck ab.

- Verfahrensgeschwindigkeit
- Einfallswinkel

Gemäß /NED 18/ kam eine Studie von Zimon und Pikalov zu dem Ergebnis, dass die Dekontamination unter Einfallswinkeln von 30° bis 45° am besten gelingt. Die schlechtesten Ergebnisse wurden für einen senkrecht einfallenden Wasserstrahl beobachtet.

Die Dekontaminationswirkung kann durch eine Erhöhung der Wassertemperatur (60 °C bis 80 °C) und chemischen Zusätzen verbessert werden.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Wasserstrahlverfahren im Niederdruckbereich werden oftmals zur Vordekontamination stark kontaminierter Objekt genutzt. Hierzu gehören z. B. Beckenwände und Beckenteile.

Wasserstrahlverfahren im mittleren Druckbereich werden u. a. zur Dekontamination von Ausrüstungsteilen und Werkzeugen eingesetzt, um deren Dosisleistung zu verringern und anhaftende Kontaminationen zu entfernen. Zudem wird es für die Dekontamination von Beckenauskleidungen und Rohrleitungen genutzt. Der typische Wasserverbrauch liegt im Bereich von 60 bis etwa 6000 Liter pro Stunde. In den meisten Fällen kommt Wasser bei Raumtemperatur zum Einsatz, was die Anforderungen an Handhabung und die nötige Technik reduziert. Es ist aber auch möglich dem Wasser Zusätze beizumischen oder die Prozesstemperatur auf bis zu 60 °C anzuheben.

Im Bereich der hohen (oberhalb von ca. 100 MPa) und ultrahohen Drücke (oberhalb von ca. 250 MPa) werden Wasserstrahlverfahren meist zum Trennen von Metallen oder auch Betonstrukturen eingesetzt. Aber auch eine Dekontamination ist hiermit möglich, z. B. durch das Abtragen einzelner Wandschichten oder Beschichtungen. Der Wasserverbrauch liegt in diesem Fall bei

etwa 120 – 240 Liter pro Stunde, die Wassermoleküle erreichen eine Geschwindigkeit von bis zu 900 m/s. Der Kostenaufwand für diese Techniken ist jedoch vergleichsweise hoch, da es zu sehr deutlichen Abnutzungserscheinungen der druckführenden Systeme besonders aber der Düsen kommt.

Das Verfahren gehört zu den Standardverfahren im Rahmen der Nachbearbeitung. Ein Beispiel ist das System ROBBE, bei dem für die automatisierte Entschichtung von Metallteilen das Ultra-hochdruckwasserstrahlen (Nenndruck von 2.500 bar bei einem Wasserstrom von 24 Liter pro Minute) bei einer Wassertemperatur von etwa 80 °C genutzt wird /REC 23/.

3.3.2.5.5 Abrasivstrahlverfahren

Das Abrasivstrahlverfahren (englisch: *abrasive blasting*) basiert auf dem Abschleifen von Oberflächen mittels eines gekörnten Schleifmittels mittlerer bis hoher Härte, welches unter hohem Druck auf die zu dekontaminierende Fläche gerichtet wird. Das Verfahren kann sowohl trocken (Gemisch aus Druckluft und Abrasivmittel) als auch nass (Gemisch aus Druckluft, Wasser und Abrasivmittel) angewendet werden.

Mit dem Verfahren können Beschichtungen und äußerste Oberflächenschichten abgetragen werden, grundsätzlich steigt der Materialabtrag mit der Behandlungsdauer. Bei der Anwendung muss darauf geachtet werden, dass die Kontamination nicht tiefer in das Material eindringt. Durch die Düse können auch schwer zugängliche Bereiche dekontaminiert werden, aufgrund des grundsätzlich sprühenden Prozesses eignen sich ebene Oberflächen am besten für das Verfahren. Ggfs. ist eine Vorbehandlung des Materials notwendig um Störstellen, Öle und Fette zu entfernen.

Zu den eingesetzten Strahlmitteln gehören:

- Mineralien (z. B. Magnetit oder Sand)
- Stahlgranulat
- Glasperlen/Glasfritte
- Kunststoffgranulat
- Naturprodukte (z. B. Reishülsen oder gemahlene Nussschalen)

Besonders wichtig ist hierbei – in Abhängigkeit der Oberfläche und des Materials – eine Berücksichtigung der Langlebigkeit und der Effektivität des verwendeten Strahlguts. Nicht geeignet ist dieses Verfahren im Allgemeinen für Objekte und Oberflächen, die durch die Verfahrensanwendung splintern könnten.

Wird das Schleifmittel mittels Wasser abtransportiert und gebunden sind weitere Maßnahmen zu ergreifen. Hierzu gehören eine Arbeitskabine mit Belüftung (welche mit HEPA-Filtern ausgestattet ist) sowie ein Abwasserauffang- und Abwasserbearbeitungssystem. Andere Anforderungen ergeben sich, wenn Druckluft zum Abtransport des Strahlguts und der gelösten Partikel eingesetzt wird. Hierfür ist eine Unterdruckkabine mit einem Filtersystem aus Vorfilter und Abscheider sowie HEPA-Luftfilter nötig.

Trockenes Abrasivstrahlverfahren

Das trockene Abrasivstrahlverfahren (englisch: *dry-abrasive blasting*) wird bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts industriell eingesetzt. Oft wird auch von Sandstrahlen gesprochen, auch wenn es sich bei dem Abrasivmittel um ein anderes Schleifmittel handelt. Das abgetragene Material und das verwendete Abrasivmittel werden eingesammelt (z. B. durch eine Saugvorrichtung), ggfs. wird das Abrasivmittel für eine erneute Anwendung aufbereitet, um so die Menge an Sekundärabfällen zu reduzieren

Wasser-Abrasivstrahlverfahren

Das Wasser-Abrasivstrahlverfahren (englisch: *wet-abrasive blasting*) nutzen eine dreiphasige Mischung – bestehend aus Luft, Wasser und Abrasivmitteln – die auf hohe Geschwindigkeiten gebracht wird. Die Wiederverwertung des Strahlmittels muss gewährleistet sein, um die Produktion von Sekundärabfällen zu begrenzen.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Abrasivstrahlverfahren ist für die meisten festen, nicht splitternden Oberflächen geeignet. Aufgrund des Abrasivmittels können Sekundärabfälle in nicht unerheblichen Mengen erzeugt werden. Eine Wiederverwendung von bereits genutztem Abrasivmittel wird in der Regel angestrebt, ist aber begrenzt da sich die Korngröße verfahrensbedingt reduziert.

Bei trockenen Abrasivstrahlverfahren sollte eine Erdung genutzt werden, da sich die behandelten (Metall-)Komponenten aufladen können. Manche Abrasivmittel können die Gefahr von Staubexplosionen fördern, weswegen im Falle brennbarer Kontaminationen geeignete Vorkehrungen getroffen werden müssen. Zudem sollte die Anwendung für Komponenten aus Aluminium oder Magnesium aufgrund der Gefahr von Staubexplosionen vermieden werden.

Verwendetes Abrasivmittel wird in der Praxis wieder eingesammelt (z. B. durch eine Saugvorrichtung) und wiederaufbereitet. Bei Wasser-Abrasivstrahlverfahren wird eine Wasseraufbereitung benötigt. Aus diesem Grunde eignen sich die Verfahren zuvorderst für eine ex-situ Dekontamination in gesonderten Trocken- oder Nassstrahlboxen.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Abrasivstrahlverfahren gehört für die konventionelle Nachbearbeitung (z. B. Entfernung von Lacken) zu den Standardverfahren, zur Dekontamination wird das Verfahren aufgrund der Sekundärabfälle hingegen nur begrenzt eingesetzt.

3.3.2.5.6 Fräsverfahren

Die Fräsverfahren wurden bereits im Kontext der Trennverfahren vorgestellt, siehe Abschnitt 3.2.1.2.2.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Boden- und Wandfräsen eignen sich für die Dekontamination großer (Beton-)Flächen. Wichtig bei der Anwendung ist zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen ein Auffangen (Absaugen) des abgetragenen Materials und ein Sammeln (Filter) freigesetzter Stäube.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Fräsen wird insbesondere für den Abtrag der obersten Betonschicht an Böden, Wänden und Decken genutzt. Das Walzfräsen findet z. B. bei der Abtragung von Beton an Wänden oder Böden Verwendung und wurde u. a. bereits bei der Stilllegung des KKR genutzt, siehe Abb. 3.22 /EWN 16/. Bei solchen Boden- oder Wandfräsarbeiten steht häufig eine Dekontamination durch Abtragung im Vordergrund. Hierfür gibt es spezielle Lösungen für Anwendungen im

kerntechnischen Bereich wie z. B. BOLERO (Studsvik), die insbesondere eine direkte Absaugung des freigesetzten Materials nutzen /VAN 12/.



Abb. 3.22 Fräsen des Fußbodens im Rahmen der Stilllegung des KKR (Quelle: EWN GmbH) /EWN 16/

3.3.2.5.7 Nadelverfahren

Beim Nadelverfahren treffen pneumatische angetriebene Nadeln (englisch: *needle gun*) in einem zyklischen Prozess auf die zu behandelnde Oberfläche. Durch das Aufschlagen der Nadeln auf die Oberfläche platzen Teile des Oberflächenabtrags ab. Das Verfahren wird meist manuell angewendet, wofür z. B. ein Nadelhammer oder eine Nadelpistole genutzt wird.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Als Verfahren ist das Nadeln nicht für das Behandeln großer Flächen geeignet. Vielmehr wird es in schwer zugänglichen Bereichen, z. B. in Ecken und Kanten oder an Übergängen, genutzt. Die Werkzeuge existieren über ein breites Ausführungsspektrum, so dass die Werkzeugwahl in Abhängigkeit sehr spezifisch in Abhängigkeit der Aufgabenstellung erfolgen kann.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Nadelverfahren wird z. B. in schwer zugänglichen und begrenzten Bereichen zum Entfernen von Auftragungen (z. B. Schutzlacke) auf Metallen genutzt, zu dem findet es bei der Betondekontamination in Ecken und Kanten Verwendung.

3.3.2.5.8 Ultraschallbad

Durch Ultraschall (englisch: *ultrasonic cleaning*) können starke Druckschwankungen erzeugt werden, die in Wasser zu Kavitationen führen können. Hierbei werden dampfgefüllte Hohlräume (Dampfblasen) gebildet die später wieder kollabieren. Durch die entstehenden Turbulenzen können lose Kontaminationen vom Werkstück entfernt werden, für fest anhaftende Kontaminationen ist das Verfahren nicht geeignet.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Verfahren ist auf sehr vielen Oberflächen anwendbar, der zu erreichende Dekontaminationsfaktor hängt wesentlich von der Haftung der Kontamination am Basismaterial ab. Das Verfahren ist leicht anzuwenden, die Sekundärabfälle beschränken sich auf die Prozessflüssigkeit. Die Größe der zu behandelnden Bauteile ist durch den Flüssigkeitsbehälter, in den die Ultraschallwellen eingekoppelt werden, beschränkt.

Das Verfahren kann auch mit chemischen Zusätzen oder bei höheren Temperaturen durchgeführt werden, wodurch die Wirksamkeit erhöht werden kann.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Verfahren ist aufgrund geringer Anforderungen und Kosten weitverbreitet. In der Regel wird es für kleine Gegenstände verwendet, beispielsweise Werkzeuge und kleine (Anlagen-)Teile. Das Verfahren wird in praktisch allen Stilllegungsprojekten insbesondere im Rahmen bei der Reststoffbearbeitung genutzt, beispielsweise ist für das Reststoffbearbeitungszentrum im Kernkraftwerk Grohnde eine weitestgehend automatisierte Ultraschallreinigungsstraße vorgesehen /SCH 23a/. Zudem können einige chemische Verfahren mit Ultraschall gekoppelt werden um die Dekontaminationswirkung zu steigern.

3.3.2.6 Dekontamination durch Einschmelzen

Das Einschmelzen (englisch: *melting*) metallischer Reststoffe stellt eine besondere Form der Dekontamination (Volumendekontamination) dar. Im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Dekontaminationsfaktoren, ermöglicht das Einschmelzen in Verbindung mit nachfolgenden Metallaufreinigungen in einigen Fällen auch die Entfernung von Aktivierungen. Die Dekontaminationswirkung wird hierbei durch Partitionierungsprozesse erzielt, so dass sich aufgrund physikalischer Prozesse die Radionuklide in den unterschiedlichen Fraktionen (Schmelze, Schlacke, Stäube, Abluft) ansammeln. Grundsätzlich gewünscht ist hier eine Konzentrierung der Kontaminationen in der Schlacke, so dass das Metall wiederverwendet werden kann – die Freigabe für den überwiegenden Teil des Metalls ist somit das Ziel. In der zurückbleibenden Schmelze ist die Aktivität nach dem Schmelzvorgang meist nahezu gleichverteilt.

Die Gießlinge können je nach verbliebener Aktivität dem Freigabepfad oder der Abklinglagerung zugeführt werden. Entstehende Prozessabfälle wie Schlacken, Filterstäube und Sekundärabfälle werden als radioaktiver Abfall entsorgt.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Verfahren funktioniert nicht gleichermaßen gut für alle Radionuklide. Insbesondere für das (flüchtige) Cs-137 ergeben sich gute Ergebnisse, da es sich beim Schmelzprozess sehr gut ablagert und in Filtern aufgesammelt werden kann. Häufig bleibt Co-60 zurück, so dass sich aufgrund dessen geringer Halbwertszeit von 5,3 Jahren eine Abklinglagerung anbieten kann.

Die sekundären Abfälle (Schlacke, Staub, Filter) belaufen sich in der Regel auf 1 bis 4 % der Masse des Ausgangsmaterials. Durch den Schmelzprozess und die Entfernung der Schlacke und Stäube ändert sich neben der Isotopenzusammensetzung auch die geometrische Verteilung der Radionuklide zu einer annähernden Gleichverteilung. Ein Vorteil des Verfahrens ist zudem die Unabhängigkeit von der Ursprungsform des Werkstücks /OECD 11/.

Grundsätzlich ist es möglich, vor dem Schmelzen einen anderen Dekontaminationsschritt mit einem anderen Verfahren zu nutzen, um z. B. den Beitrag von Co-60 zu reduzieren /OECD 11/.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Einschmelzen erfolgt meist bei einem externen Dienstleister in Deutschland und in Europa, es werden aber auch am Standort mobile Anlagen (z. B. für Blei) zum Einschmelzen eingesetzt, siehe z. B. /PEL 22b/. Im Rahmen der Stilllegungsplanung für das KBR wurde u. a. vorgesehen, neben metallischen Komponenten auch Hauptkomponenten (z. B. RDB mit Deckel, Hauptkühlmittelpumpe, Dampferzeuger oder Druckhalter) teilweise durch Einschmelzen zu dekontaminieren. Für den RDB mit Deckel wird beispielsweise angenommen, dass von den gesamten 501 Mg etwa 114 Mg für die Dekontamination durch Einschmelzen geeignet sind. Grundsätzlich stellt das Einschmelzen für alle Stilllegungsprojekte eine – auch oft genutzte – Option dar.

Das Einschmelzen findet auch international – auch im Kontext von Aspekten der Kreislaufwirtschaft – viel Beachtung. Die steigende Relevanz zeigt auch die Errichtung neuer Einrichtungen, die u. a. auch Anlagen für das Einschmelzen von Metallen zu Dekontaminationszwecken umfassen, z. B. die Einrichtung SMART (*Springfield Melter for Advanced Recycling and Treatment*) in Großbritannien, in der jährlich insgesamt (d. h. nicht ausschließlich Schmelzen) 4.500 Mg behandelt werden sollen /CAB 23/.

3.3.3 Qualitative Einschätzung etablierter Dekontaminationsverfahren

Analog zu den Trennverfahren wurden in Abschnitt 3.1 auch für die Dekontaminationsverfahren Kriterien dargelegt, die der Verfahrensauswahl zugrunde gelegt werden können. Für den Auswahlprozess sind insbesondere auch die Verfahrenscharakteristika zu berücksichtigen – neben dem Aspekt der grundsätzlichen Eignung finden auch die Wirtschaftlichkeit und die Performance eine Berücksichtigung.

Grundlegende Unterschiede finden sich trotz der breiten Verfahrensspektren insbesondere für die chemischen Dekontaminationsverfahren einerseits und den mechanischen Dekontaminationsverfahren andererseits. Diese beiden Verfahrensklassen werden im folgenden Abschnitt 3.3.3.1 gegenübergestellt.

Für belastbare Verfahrensbewertungen, die bei der Verfahrensauswahl als objektive Kriterien dienen könnten, fehlen in der Literatur für die Dekontaminationsverfahren – wie die auch für die Trennverfahren der Fall ist – übergreifende Arbeiten, die für die einzelnen Verfahren belastbare, vergleichbare und auf praktische Erfahrungen stützende Kennwerte aufführen. Obschon mit den

Dekontaminationsfaktoren eine vermeintliche Quantifizierung der Effektivität möglich erscheint, ist deren Aussagekraft beschränkt. Dies ist schon daran ersichtlich, dass einige Verfahren für die Dekontamination fest anhaftender Kontaminationen und andere für die Entfernung loser Kontaminationen gedacht sind. Zudem ist in den meisten Fällen die Freigabe das Ziel der Dekontamination – eine darüberhinausgehende Dekontamination (mit höheren Dekontaminationsfaktoren) ist somit nicht notwendig.

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass die Datenlage (z. B. in Form von Veröffentlichungen oder Konferenzbeiträgen) mit der Größe des Dekontaminationsprojektes steigt, so dass man insbesondere zu Systemdekontaminationen (im Nachbetrieb bzw. zu Beginn der Stilllegung) häufig sehr detaillierte Informationen zu erreichten Dekontaminationsfaktoren, Aufwand oder zu erzeugten Sekundärabfällen findet. Hierbei spielen sicherlich auch wirtschaftliche Kriterien der entsprechenden Dienstleister eine wesentliche Rolle. Je etablierter ein Verfahren in der praktischen Anwendung, desto weniger werden diese Verfahren im fachlichen Austausch (beispielsweise auf Konferenzen) diskutiert. Einfache Verfahren wie das Spülen und Bürsten gehören sicherlich zu den am meisten verwendeten Verfahren, die Informationslage zu tatsächlichen Anwendungszahlen oder Erfahrungswerten ist aber beschränkt und spiegelt die Relevanz für die tagtägliche Arbeit nicht wider.

Grundsätzlich wäre es für den Erfahrungsaustausch wünschenswert, wenn möglichst umfangreiche und qualitätsgesicherte Erfahrungswerte, die man als transparente Datengrundlage für Auswahlentscheidungen nutzen könnte, festgehalten werden würden. Nichtsdestotrotz sind auch qualitative Aspekte, die sich auf einfache Erfahrungswerte stützen, für die Verfahrensauswahl hilfreich. Diese führen zwar nicht zwingend zu einer optimalen Verfahrensauswahl, können aber – z. B. im Kontext von Ausschlusskriterien – die Liste der in Frage kommenden Verfahren deutlich einschränken. Die in diesem Abschnitt näher betrachteten Kriterien zur Einschätzung werden in Abschnitt 3.3.3.2 dargelegt und erläutert. Abschließend werden die Einschätzungen im Abschnitt 3.3.3.3 in Form einer Matrix dargestellt und diskutiert.

3.3.3.1 Grundsätzliche Gegenüberstellung chemischer und mechanischer Dekontaminationsverfahren

Obschon sowohl die chemischen Verfahren als auch die mechanischen Dekontaminationsverfahren jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahrensvarianten mit entsprechend unterschiedlichen Verfahrenseigenschaften umfassen, lassen sich gewisse Charakteristika der beiden

Verfahrensklassen identifizieren. Entsprechende Aussagen zu diesen Charakteristiken sind nicht universell, erlauben aber trotzdem eine grundsätzliche Einschätzung der Anwendungen bzw. von Faktoren, die bei der Anwendung zu berücksichtigen sind. Je nach Auslegung können diese auch für eine grundsätzliche Diskussion der Stärken bzw. Schwächen dienen. Im Folgenden werden einige dieser Charakteristika diskutiert, zudem sind die wesentlichen Faktoren auch in Tab. 3.23 zusammengefasst.

Chemische Dekontaminationsverfahren sind oftmals für die Entfernung fixierter Kontaminationen (man denke z. B. an vollständige Systemdekontaminationen) konzipiert. Das Verfahrensspektrum ist breit, auch aggressive Chemikalien werden genutzt, mit denen auch in kontrollierter Weise die Oberfläche des Basismaterials abgetragen wird bzw. werden kann. Viele der mechanischen Verfahren sind hingegen für die Entfernung loser bzw. schwachhaftender Kontaminationen gedacht (z. B. konventionelle Reinigungsverfahren), mit einigen Verfahren (z. B. Wasserstrahlverfahren) ist aber auch die Entfernung von Auftragungen wie z. B. Farben und Schutzlacken möglich. Insbesondere für die Dekontamination von Betonstrukturen existieren auch Verfahren (z. B. Fräsen), mit denen Teile des Basismaterials in kontrollierter (wenn auch nicht mit vergleichbarer Präzision) Weise abgetragen werden können.

Je nach Verfahrensvariante können mechanische Dekontaminationsverfahren sowohl für die Entfernung lokaler *hot spots* als auch für die Dekontamination großer Flächen genutzt werden. Viele der chemischen Verfahren werden in Bädern oder als Spülung eingesetzt, so dass sich deren Wirkung auf komplette Bauteile oder Strukturen erstreckt – lokal aufgetragene Chemikalien (z. B. in Form von Dekontaminationsschäumen oder Dekontaminationsgelen) bilden hier eine Ausnahme.

Mechanische Verfahren sind oftmals leicht in der Anwendung und können insbesondere zur Entfernung loser Kontaminationen mit vergleichsweise einfachen Werkzeugen umgesetzt werden. Bei einigen Verfahren werden Aerosole freigesetzt die entsprechend zu filtern und zu sammeln sind, andere mechanische Verfahren benötigen zudem eine Wasseraufbereitung (Kühlwasser, Prozesswasser). Abgeschlossene Arbeitsbereiche bieten sich somit zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen für einige mechanische Dekontaminationsarbeiten an.

Tab. 3.23 Übersicht allgemeiner Vor- und Nachteile chemischer und mechanischer Dekontaminationsverfahren

	Chemische Verfahren	Mechanische Verfahren
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - (Spülende) Verfahren vergleichsweise gut für die Dekontamination schlecht zugänglicher, innenliegender Flächen geeignet - Geeignet auch zur Entfernung schwer haftender Kontaminationen - Geringer und gut kontrollierbarer Abtrag des Basismaterials, typischerweise im Mikrometerbereich 	<ul style="list-style-type: none"> - Oft geeignet sowohl für die Flächendekontamination und/oder Entfernung von <i>hot spots</i> geeignet - Einige Verfahren lassen sich leicht und schnell anwenden und benötigen wenig Equipment - Breites Materialspektrum, insb. geeignet für Metalle und Beton - Im Regelfall keine Chemikalien im Sekundärabfall - Einfache Verfahren eignen sich für die Entfernung loser Kontaminationen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Der überwiegende Teil der Verfahren ist primär für die Dekontamination von Metallen geeignet - (Aggressive) Chemikalien im Sekundärabfall - In der Regel anspruchsvoller in der Vorbereitung und Durchführung (z. B. aufgrund verhältnismäßig vieler Prozessparameter, zusätzlichem Equipment, (in Teilen) Umgang mit Gefahrstoffen und dadurch bedingte Vorkehrungen und Unterweisungen) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zu dekontaminierende Flächen müssen meist von außen zugänglich sein (Innenflächen z. B. von Rohren problematisch) - Sofern ein Oberflächenabtrag des Basismaterials erfolgt, fällt dieser oft größer aus als bei chemischen Verfahren. Zudem erfolgt der Abtrag nicht mit vergleichbarer Präzision und erzeugt somit größere Sekundärabfallvolumen - Freisetzung von Aerosolen ist bei einigen Verfahren zu beachten - Manche Verfahren benötigen eine Wasseraufbereitung

Chemische Verfahren nutzen zum Teil aggressive Chemikalien und stellen hinsichtlich der einzustellenden Prozessparameter (z. B. Konzentrationen oder Verfahrenstemperatur) höhere Ansprüche, die es für eine effiziente Anwendung zu erfüllen gilt. Zudem sind gegebenenfalls Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, die auch von Sicherheitsunterweisungen begleitet werden. Bei den meisten chemischen Verfahren sind die Kontaminationen in den Prozessflüssigkeiten gebunden, Ansprüche an Filteranlagen werden trotzdem gestellt (z. B. aufgrund von Prozessgasen oder Wasserstofffreisetzungen).

Einige mechanische Verfahren erzeugen nur geringe Mengen an Sekundärabfällen, der im Vergleich auch weitestgehend unproblematisch ist (z. B. Filter, gesammelte Stäube). Ausnahmen bilden hier insbesondere die Wasserstrahl- und Abrasivstrahlverfahren. Bei den chemischen

Verfahren ergeben sich durch die verwendeten Chemikalien (die teilweise in Harzen gesammelt werden) Sekundärabfälle, die hinsichtlich ihrer Handhabung höhere Ansprüche stellen, bei einigen Verfahren entstehen zudem chelathaltige Sekundärabfälle, deren Entsorgung eine Herausforderung darstellen kann.

3.3.3.2 Auswahl von Einschätzungsfaktoren

Auf Basis der Verfahrensbeschreibungen in Abschnitt 3.3.2 werden folgende Kriterien zur Verfahrenseinschätzung herangezogen:

- Anwendungsumgebung
- Materialeignung
- Komplexität
- Dekontaminationszweck
- Verfahrenstemperatur
- Sekundärabfallmenge
- Abtragung des Basismaterials

Die genannten Aspekte werden im Folgenden näher erläutert. Die Zuordnungen für die einzelnen Verfahren sind in Tab. 3.24 bis Tab. 3.29 zusammengefasst.

Anwendungsumgebung

Grundsätzlich lässt sich zwischen einer Anwendung vor Ort (in-situ), meist in Einbaulage oder an der stehenden Struktur, und einer Anwendung an einem dedizierten Bearbeitungsplatz (ex-situ) nach vollzogener Demontage unterscheiden. Einen entscheidenden Einfluss auf die Anwendungsumgebungen haben die Prozessmittel und verfahrensbedingte Freisetzen. Verfahren, bei denen Aerosole und/oder Stäube freigesetzt werden, bieten sich insbesondere²⁸ für abgeschlossene Arbeitsbereiche an, die über ein ausreichendes Filter- und Belüftungssystem verfügen. Analoge Rückschlüsse lassen sich für die Verfahren ziehen, die in einem erheblichen Maß Wasser nutzen. Für diese Verfahren muss das Prozesswasser gesammelt und aufbereitet

²⁸ Grundsätzlich lassen sich die Anforderungen mit temporären und mobilen Hilfsmitteln lösen (z. B. Einhausungen und mobile Filteranlagen), der Aufwand in Relation zu der Anzahl an Maßnahmen spricht allerdings oft gegen diese Herangehensweise.

werden, bevor es entweder wiederverwendet oder entsorgt werden kann. Auch dies lässt sich in entsprechend ausgestatteten Arbeitsbereichen leichter bewerkstelligen. Bei der verfahrensspezifischen Einschätzung wird aufgeführt, für welche Anwendungsumgebung das jeweilige Verfahren bevorzugt genutzt wird.

Materialeignung

Der Großteil der chemischen Verfahren wurde für die Dekontamination metallischer Werkstücke entwickelt, insbesondere Stahlbauteile (niedrig- und hochlegiert) sowie Bauteilen mit einem hohen Eisenanteil. Für die mechanischen Verfahren ist das Materialspektrum oftmals breiter, insbesondere eignen sich einige Verfahren auch für (bewehrte) Betonstrukturen. Die Kategorie „breites Materialspektrum“ wird genutzt, wenn das entsprechende Verfahren für die meisten in der Stilllegung anfallenden Materialien grundsätzlich geeignet ist. Sollten sich besondere Anforderungen (z. B. hinsichtlich Härte oder Temperaturbeständigkeit) ergeben, ist dies entsprechend in der Matrix hinterlegt.

Komplexität

Die Komplexität eines Verfahrens wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Zunächst einmal bezieht sich der Begriff auf die unmittelbar eingesetzte Werkzeugtechnik. Gerade bei den mechanischen Dekontaminationsmethoden finden sich oft einfache Werkzeuge wie Bürsten, Dampfreiniger oder Abrasivstrahler. Ein weiterer Aspekt der Komplexität betrifft die Verfahrensanwendung, die z. B. entsprechende Qualifikationen zur Voraussetzung haben können. Zudem sind bei einer Vielzahl der Verfahren zusätzliche Hilfssysteme notwendig, beispielsweise in Form von Lüftungsanlagen, Filteranlagen, Wasseraufbereitungen, Aufbereitungsanlagen für Chemikalien, Pumpen oder Heizungen. Für die folgende Verfahrenseinschätzung wird auf ein dreistufiges System zurückgegriffen:

- Kategorie „gering“

Zu dieser Kategorie gehören Verfahren mit sehr geringer Komplexität. Die eingesetzten Werkzeuge sind technisch verhältnismäßig simpel, ihre Bedienung leicht und intuitiv. Größere Hilfsmittel werden in der Praxis nicht benötigt.

- Kategorie „mittel“

Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, die z. B. anspruchsvolle Verfahrenstechniken benötigen oder für die gewisse Hilfsmittel mit übersichtlichem Anforderungsprofil benötigt werden.

- Kategorie „hoch“

Zu dieser Kategorie gehören Verfahren hoher Komplexität, z. B. durch anspruchsvollen Verfahrenstechniken und/oder Bedienungen. Des Weiteren sind für Verfahren dieser Kategorie oftmals Hilfsmittel oder dedizierte Anlagen in einem erheblichen Umfang notwendig.

Dekontaminationszweck

Grundsätzlich lassen sich Verfahren hinsichtlich ihrer Auslegung für die Dekontamination von Flächen oder für die lokale Dekontamination (*hot spots*) unterscheiden. Die meisten chemischen Verfahren nutzen Bäder und Spülungen, so dass sich ihre Dekontaminationswirkung grundsätzlich auf alle erreichbaren Oberflächen erstreckt. Bei den mechanischen Verfahren existieren Varianten, die konzeptionell für die lokale Dekontamination ausgelegt sind. Das Nadeln und das Einschmelzen nehmen hier eine gewisse Sonderrolle ein, da sie für die sehr lokale Dekontamination von Ecken, Kanten oder Störstellen (Nadeln) genutzt werden bzw. weil sie für die Volumendekontamination gedacht sind (Einschmelzen).

Verfahrenstemperatur

Die Verfahrenstemperatur kann einen erheblichen Einfluss auf das Dekontaminationsergebnis haben. Bei chemischen Verfahren fördern höhere Temperaturen in vielen Fällen die Reaktivität und damit auch den Austrag von Kontaminationen, allerdings vergrößert eine höhere Verfahrenstemperatur den technischen Aufwand und bedingt oft auch einen erhöhten Abtrag von Basismaterial. Aus der Verfahrenstemperatur können sich zusätzliche Anforderungen für den Arbeitsschutz ergeben (z. B. Nutzung entsprechender persönlicher Schutzausrüstung). Die Einstufung verläuft hier über eine dreistufige Kategorisierung:

- Kategorie „gering“

Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, welche bei einer Temperatur von unter 60 °C eingesetzt werden.

- Kategorie „mittel“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, welche bei einer Temperatur zwischen 60 °C – +90 °C eingesetzt werden.
- Kategorie „hoch“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, welche bei einer Temperatur von über 90 °C eingesetzt werden.

Sekundärabfallmenge

Die Anwendung von Dekontaminationsverfahren führt zu Sekundärabfällen, die verfahrensabhängig, in unterschiedlichen Mengen und Arten (z. B. Flüssigkeiten, Filterharze, Stäube, etc.) anfallen und sich zudem unterschiedlich zusammensetzen. Problematisch sind grundsätzlich insbesondere Chemikalien (oftmals Gefahrstoffe) und radioaktive Chelate (Endlagerung) im Speziellen. Chelatbildner sind bedenklich, weil sie mit den meisten Schwermetallen und Radionukliden hochlösliche Komplexe bilden. Sollte Grundwasser in das (End-)Lager gelangen, ist die Möglichkeit, dass Schwermetalle und Radionuklide in die Wasserversorgung gelangen, deutlich größer, wenn Chelatbildner im Abfall enthalten sind /EPRI 99/.

Einige dieser Sekundärabfälle lassen sich durch weitere Schritte reduzieren bzw. wiederverwenden. Eine Mengenreduzierung ist beispielsweise für flüssige Abfälle durch Abscheiden, Fällern oder Filtern möglich. Die Menge der Sekundärabfälle ist zudem eng korreliert mit der Abtragung des Basismaterials. Die qualitative Einschätzung verläuft hier über eine dreistufige Kategorisierung:

- Kategorie „gering“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, die nur zu einem geringen und/oder leicht handhabbaren Sekundärabfall führen oder bei denen sich der radioaktive Abfall gut weiter reduzieren lässt.
- Kategorie „mittel“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, die in der Regel mit einem erhöhten Sekundärabfall einhergehen. Dieser kann Flüssigkeiten, Filter, Harze und andere Dinge beinhalten.
- Kategorie „hoch“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, bei deren Anwendung (problematische) Sekundärabfälle in einem erheblichen Umfang erzeugt werden. Dies sind insbesondere

Verfahren bei denen große Mengen chemischer Dekontaminationslösungen eingesetzt werden müssen.

Abtragung des Basismaterials

Einige Dekontaminationsverfahren sind nur für die Entfernung loser Kontaminationen geeignet, so dass mit ihnen das Basismaterial praktisch nicht angegriffen wird. Andere Verfahren entfernen oberflächliche Farben, Lacke, o. ä. – hierbei kann es passieren, dass auch das Basismaterial minimal abgetragen wird. Chemische Verfahren sind oftmals gut in ihrer Wirkung zu steuern und können das Basismaterial geringfügig (Abtragtiefen von wenigen Mikrometern) abtragen. Für die Kategorisierung wird auf drei Stufen zurückgegriffen.

- Kategorie „gering“
Bei Verfahren dieser Kategorie ist eine Abtragung des Basismaterials nicht beabsichtigt bzw. eine Abtragung ist praktisch auszuschließen.
- Kategorie „mittel“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, bei denen das Basismaterial nur in geringem Umfang im μm -Bereich abgetragen wird. Eine Abtragung wird in einigen Fällen beabsichtigt, beispielsweise im Falle der Verfahren für die vollständige Systemdekontamination. Die Abtragung erfolgt mit hoher Präzision.
- Kategorie „hoch“
Zu dieser Kategorie gehören Verfahren, bei deren Anwendung das Basismaterial im makroskopischen Bereich (einige Hundert Mikrometer oder mehr) abgetragen wird.

3.3.3.3 Darstellung und Diskussion der Einschätzungsfaktoren

Die Einschätzungen sind in Tab. 3.24 bis Tab. 3.29 hinterlegt.

Bei den mehrstufigen Verfahren zur vollständigen Systemdekontamination wurden in der vergangenen Dekade für die deutschen Stilllegungsprojekte meist das Verfahren HP/CORD (D) genutzt, in Biblis kam zudem das ASDOC_D-MOD Verfahren zum Einsatz. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale ergeben sich durch den Bedarf an zusätzlichem (externen) Personal und Equipment, da das Verfahren ASDOC_D-MOD im Gegensatz zu den Verfahren HP/CORD weitestgehend mit

dem kraftwerkseigenen Personal und Equipment durchgeführt werden kann. Den Verfahren LOMI und CAN-DEREM ist gemein, dass sie zu chelat-haltigen Sekundärabfällen führen.

Die vorgestellten einstufigen chemischen Verfahren sind zuvorderst für die Dekontamination von Metallflächen gedacht. Unterschiede ergeben sich z. B. bei der Verfahrenstemperatur, da einige Verfahren zur Unterstützung der chemischen Prozesskomponente höhere Temperaturen nutzen (z. B. REDOX oder MEDOC). Ein weiterer wesentlicher Unterschied betrifft die Regenerierung der Prozesschemikalie, die z. B. im Vergleich zu (S)ODP bei den Verfahren REDOX und MEDOC (mit unterschiedlichen Prozessen) verfolgt wird. Hierdurch können beispielsweise die Sekundärabfallmengen reduziert werden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal betrifft die Abtragung des Basismaterials, die z. B. im Falle des Salpetersäureverfahrens einige Mikrometer betragen kann.

Das elektrochemische Polieren ist ein effektives Verfahren, das insbesondere für die ex-situ Bearbeitung genutzt wird und mit dem hohe Materialabträge möglich sind. Verfahren mit Dekontaminationsschäumen bzw. -gelen eignen sich für die einfache in-situ Anwendung zur Entfernung loser Kontaminationen, zeigen aber eine ausgeprägte Abhängigkeit bezüglich des Basismaterials.

Einfache mechanische Verfahren wie das Abwischen eignen sich für ein breites Materialspektrum, das nicht nur Metalle einschließt. Grundsätzlich können mit ihnen nur lose Kontaminationen entfernt werden, ein Materialabtrag wird in der Regel nicht erreicht. Die Anwendung erfolgt meist in-situ, ist aber nicht darauf beschränkt. Da in der Regel nur geringe Mengen Sekundärabfälle erzeugt werden und diese oftmals leicht handzuhaben sind, werden solche Verfahren häufig für eine Vordekontamination genutzt. Die Strahlverfahren setzen ausreichend harte Materialien voraus, zudem erfolgt die Anwendung in der Regel an entsprechend ausgestatteten Arbeitsplätzen, die über die notwendigen Filter- bzw. Aufbereitungsmöglichkeiten verfügen. Typische Prozessparameter führen zu keinem signifikanten Materialabtrag, meist wird die Entfernung von Oberflächenbeschichtungen, Farben oder Lacken beabsichtigt.

Mechanische Verfahren wie das Schleifen oder Polieren sorgen typischerweise für einen geringen bis durchschnittlichen Materialabtrag. Die Verfahren dienen oft der Entfernung lokaler *hot-spots* (haftende Kontaminationen), für die Bearbeitung großer Flächen sind sie nur bedingt geeignet. Das Fräsen gehört zu den Standardverfahren für die Dekontamination von Wänden und Böden durch makroskopische Abtragung.

Die Dekontamination im Ultraschallbad hat sich insbesondere in der Materialnachbearbeitung etabliert. Neuere Reststoffbearbeitungszentren verfügen über dedizierte Ultraschallstraßen, mit denen insbesondere lose Kontaminationen von Metallteilen entfernt werden können. Die Verfahrenseffizienz kann durch Zusätze noch erhöht werden, zudem nutzen manche chemische Verfahren zur Mobilisierung gelöster Kontaminationen Ultraschall.

Das Einschmelzen von Metallteilen nimmt eine Sonderrolle ein. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren ermöglicht es eine Volumendekontamination, die Wiederverwendung eines Teils des Metalls steht im Sinne der Kreislaufwirtschaft im Vordergrund. Für manche Metalle (wie z. B. Blei) existieren flexible Systeme, in der Regel werden aber größere Metallchargen in dedizierten, ortsfesten Großanlagen eingeschmolzen.

Tab. 3.24 Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.3.2

Verfahrensbezeichnung	Bevorzugter Einsatzort	Materialien	Komplexität	Dekontaminationsart	Temperatur Betriebsmittel	Sekundärabfall	Abtragung Basismaterial
Einstufige chemische Verfahren							
ODP / SODP	in-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	gering	mittel	mittel
REDOX	in-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	mittel	mittel	mittel
MEDOC	in-situ / ex-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	mittel	gering	gering
DECOHA	in-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	gering bis mittel	gering (durch Rückgewinnung)	gering bis mittel
Salpeter- / Flusssäure	in-situ / ex-situ	Metalle	sehr hoch	(Innen)Flächen	gering	gering - hoch (Paste gering, Bad hoch)	mittel bis hoch
Mehrstufige chemische Verfahren							
ASDOC_D / -MOD	in-situ	Metalle	mittel	(Innen)Flächen	hoch	gering	gering
HP/CORD (D) UV	in-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	hoch	gering	gering
CAN-DEREM	in-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	hoch	hoch	gering

Tab. 3.25 Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung)

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.3.2

Verfahrensbezeichnung	Bevorzugter Einsatzort	Materialien	Komplexität	Dekontaminationsart	Temperatur Betriebsmittel	Sekundärabfall	Abtragung Basismaterial
LOMI	in-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	hoch	hoch	gering
DFD	in-situ	Metalle	hoch	(Innen)Flächen	hoch	mittel	gering
Sonstige chemische Dekontaminationsverfahren							
Elektrochemische Verfahren	ex-situ	Metalle	mittel	(Innen)Flächen	gering bis mittel	gering bis hoch	hoch
Verfahren Dekontaminationsschaum	in-situ	bestimmte Metalle (Stähle)	gering	Flächen	gering	gering	gering
Verfahren mit Dekontaminationsgelen	in-situ	bestimmte Metalle (Stähle)	gering	Flächen	gering	gering	gering
Mechanische Verfahren							
Trockeneisstrahlen	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	gering	Flächen	gering	gering	gering
Eisstrahlen	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	gering	Flächen	gering	gering bis mittel	gering

Tab. 3.26 Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung)

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.3.2

Verfahrensbezeichnung	Bevorzugter Einsatzort	Materialien	Komplexität	Dekontaminationsart	Temperatur Betriebsmittel	Sekundärabfall	Abtragung Basismaterial
Wasserstrahlverfahren (Niederdruck)	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	gering	Flächen	gering bis mittel	gering bis mittel	gering
Wasserstrahlverfahren (Mitteldruck)	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	gering	Flächen	gering bis mittel	gering bis mittel	gering
Wasserstrahlverfahren (Hochdruck)	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	mittel	Flächen	gering bis mittel	gering bis mittel	gering
Wasserstrahlverfahren (UHD)	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	mittel bis hoch	Flächen	gering bis mittel	gering bis mittel	gering
Trockene Abrasivverfahren	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	gering	Flächen	gering	mittel bis hoch	gering
Nasse Abrasivverfahren	ex-situ	Ausreichend harte Materialien	gering	Flächen	gering bis mittel	mittel bis hoch	gering
Abstauben	ex-situ	Breites Materialspektrum	gering	Flächen	gering	gering	gering

Tab. 3.27 Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung)

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.3.2

Verfahrensbezeichnung	Bevorzugter Einsatzort	Materialien	Komplexität	Dekontaminationsart	Temperatur Betriebsmittel	Sekundärabfall	Abtragung Basismaterial
Absaugen	in-situ	Breites Materialspektrum	gering bis mittel	Flächen	gering	gering	gering
Abwischen	in-situ	Breites Materialspektrum	gering	Flächen	gering	gering	gering
Abscheuern	ex-situ	Breites Materialspektrum	gering	Flächen	gering	gering	gering
Wasserspülen	ex-situ	Breites Materialspektrum	gering	Flächen	gering bis mittel	gering bis mittel	gering
Schleifen	in-situ / ex-situ	Insbesondere Metalle, grundsätzlich aber breites Materialspektrum	gering	Entfernen von <i>hot spots</i>	gering	gering	gering bis hoch
Polieren	in-situ / ex-situ	Metalle	gering	Entfernen von <i>hot spots</i>	gering	gering	gering bis mittel

Tab. 3.28 Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung)

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.3.2

Verfahrensbezeichnung	Bevorzugter Einsatzort	Materialien	Komplexität	Dekontaminationsart	Temperatur Betriebsmittel	Sekundärabfall	Abtragung Basismaterial
Bürsten	in-situ / ex-situ	Insbesondere Metalle, grundsätzlich aber breites Materialspektrum	gering	Entfernen von <i>hot spots</i>	gering	gering	gering bis mittel
Fräsen	in-situ	Insbesondere Beton	mittel	Flächen	gering	mittel bis hoch	hoch
Dampfreinigen	ex-situ	Breites Materialspektrum (Oberfläche muss temperaturbeständig sein)	gering	Flächen	hoch	gering	gering
Nadeln	in-situ	Insbesondere Beton und Beschichtungen	gering	Dekontamination von Ecken, Kanten	gering	mittel bis hoch	hoch
Ultraschallbad	ex-situ	Insbesondere Metalle	gering	Flächen	gering bis mittel	gering bis mittel	gering

Tab. 3.29 Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung)

Grundlage für die Bewertungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen im Abschnitt 3.3.2

Verfahrensbezeichnung	Bevorzugter Einsatzort	Materialien	Komplexität	Dekontaminationsart	Temperatur Betriebsmittel	Sekundärabfall	Abtragung Basismaterial
Sonstige Verfahren							
Einschmelzen	ex-situ	Metalle	mittel bis hoch	Volumendekontamination	hoch	gering bis mittel	-

3.4 Abbruchverfahren und Hilfsmittel bei der Anwendung von Trenn- und Dekontaminationsverfahren

Für den Rückbau von Gebäude- und Betonstrukturen sind neben bestimmten Trennverfahren (insbesondere das Seilschleifen) gesonderte Abbruchverfahren etabliert, auf die im folgenden Abschnitt 3.4.1 näher eingegangen wird. Zudem werden bei der Anwendung von Abbruch-, Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen oftmals auch Hilfsmittel wie z. B. mobile Einhausungen genutzt, die in den weiteren Abschnitten des Kapitels erläutert werden.

3.4.1 Abbruchverfahren

In den folgenden Abschnitten werden etablierte Abbruchverfahren beschrieben und praktische Anwendungsbeispiele aufgeführt.

3.4.1.1 Sprengen

Beim Sprengen (englisch: *blasting*) wird ein festes Material durch Einbringen (schlagartig) expansiv wirkender Substanzen (insb. Sprengstoff) getrennt. Aufgrund des breiten Materialspektrums der zu sprengenden Gegenstände, der Anbringung und Verteilung der Substanzen an diese Gegenstände und die zeitliche Abfolge von Sprengkaskaden kann zwischen einer Vielzahl an Verfahren unterschieden werden. Viele Verfahren haben einen militärischen Hintergrund, haben sich im Verlauf der Zeit aber für Maßnahmen im zivilen Bereich bewährt, z. B. für die Sprengung von Brücken, Schornsteinen oder Kühltürmen.

Sprengungen eignen sich besonders dann, wenn andere Zerlege-/Abbruchverfahren aufgrund eingeschränkter Platzverhältnisse versagen oder nicht ausreichend effektiv genutzt werden können.

Sprengen mit Schneidladungen

Eine Schneidladung (englisch: *cutting charge*) ist eine bestimmte Bauart eines Sprengsatzes, die durch eine sehr hohe und gezielt gerichtete (entlang einer Linie) Durchschlagskraft charakterisiert ist. Schneidladungen bestehen aus einem Metallkörper (häufig Kupfer und Blei) mit einseitig V-förmigem Querschnitt (*Liner*), über dessen gesamte Länge Sprengstoff aufgebracht wird. Durch die Detonation verformt sich dieser Liner und bildet eine Schneidebene in Form eines Plasmastrahls. Dieser Strahl trifft auf das zu schneidende Objekt und spaltet dieses. Als Sprengstoff wird

oft Mittel wie Hexogen oder Nitropenta verwendet. Die Lademengen betragen etwa 1,5 Gramm pro cm² des zu durchtrennenden Querschnitts. Der Materialverbrauch ist im Vergleich zu anderen Sprengverfahren gering, durch beidseitiges Anlegen von Schneidladungen kann die Sprengstoffmenge noch reduziert werden. Das Verfahren ist durch eine klar definierte Trennleistung und eine exakte Schnitfführung charakterisiert. Schneidladungen können sowohl über als auch unter Wasser angebracht werden /WEB 08/.

Das Verfahren benötigt wenig Platz und ist mit geringen Rüstzeiten verbunden. Analog zu anderen Sprengverfahren, ist das Verfahren aufgrund der Personalanforderungen (Qualifikation) und Planungsanforderungen aber bei einem umfangreichem Einsatz verhältnismäßig kostenintensiv /CND 09/.

Bohrlochsprengen

Bei der Bohrlochsprengung (englisch: *borehole blasting*) wird die Sprengladung in eigens dafür vorbereitete Bohrlöcher eingebracht und die weitestgehend vollständige Zertrümmerung des Bauteils beabsichtigt. Durch die Einbringung des Sprengstoffs in Bohrlöcher reduziert sich im Vergleich zur Auflagerungssprengung, bei der der Sprengung auf das zu sprengende Material gelegt wird, die Menge des benötigten Sprengstoffs um etwa das Vierfache. Zudem sind die sich durch die Bohrlochsprengung ergebenden Bruchstücke in der Regel deutlich kleiner.

Lockerungssprengen

Bei der Lockerungssprengung (englisch: *loosening blasting*) wird eine Zerstörung des Gefüges eines Bauteils (z. B. hochbewehrter Beton, für den eine der Armierungsstahl im Betonkomplex gelockert werden soll) beabsichtigt, nicht dessen komplette Zertrümmerung. Das Verfahren eignet sich somit insbesondere für bewehrte Tiefgründungen und ermöglicht im Nachgang einen emissionsärmeren Abbruch. Zur Vorbereitung des Verfahrens werden zunächst Sprengbohrlöcher gebohrt und diese mit Sprengstoff bestückt. Anschließend wird das Sprengfeld zum Schutz vor Abwurf und zur Eingrenzung des freigesetzten Staubs geeignet abgedeckt. Nach erfolgter Sprengung wird loses Material (Beton) abgeräumt und die Arbeiten an der freigelegten Bewehrung fortgesetzt.

Sprengen mit Quellsprengstoffen

Quellsprengstoffe (auch: Expansivzement, englisch: *non-explosive demolition agent*) dienen der Zerkleinerung von (großen) Betonstücken. Sie bestehen im Wesentlichen aus ungelöschtem Kalk und Zement die mit Wasser zu einem Mörtel angerührt werden. In das zu zerkleinernde Betonstück werden Bohrlöcher gebohrt und diese mit dem flüssigen Mörtel verfüllt. Beim Abbinden des Mörtels dehnt sich dieser aus und sorgt durch den radialen Druck für das Zerschneiden des Betons (hydraulisches Sprengen). Mit den Abständen zwischen den Bohrlöchern kann die Größe der Betonbruchstücke beeinflusst werden. Das Verfahren nutzt aus, dass (unbewehrter) Beton eine geringe Zugfestigkeit und gleichzeitig eine hohe Druckfestigkeit (etwa das Zehnfache der Zugfestigkeit) aufweist.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das Sprengen (siehe Tab. 3.30) ist ein vergleichsweise aufwendiges Verfahren mit teilweise hohen Rüstzeiten, so dass es insbesondere für kontaminationsfreie Strukturen – in der Regel (bewehrter) Beton – eingesetzt wird. In Abhängigkeit der baulichen Struktur kann der Abbruch sehr schnell erfolgen, wie die Erfahrungen aus dem Sprengen von Kühltürmen zeigen. Insbesondere beim Sprengen von Betonstrukturen entstehen im hohen Maß Stäube und Partikel mit einem breiten Größenspektrum. Der Platzbedarf ist gering, so dass das Verfahren auch für schwer zugängliche Strukturen genutzt werden kann.

Insbesondere das Sprengen großer Strukturen ist mit einem verhältnismäßig hohen Planungsaufwand und je nach Verfahren mit nennenswerten Rüstzeiten verbunden. Durch regulatorische Anforderungen, die sich für das Sprengen ergeben, nimmt auch die Zahl der Projektbeteiligten (z. B. Sprengberechtigte, Abbruchstatiker, hinzugezogene Sachverständige) zu. Die Anwendung benötigt qualifiziertes und erfahrenes Personal, was sich auch in den Kosten widerspiegelt. Aufgrund des hohen Planungsbedarfs kann sich ein Versagen einzelner Sprengladungen signifikant auf das Sprengergebnis auswirken.

Tab. 3.30 Wesentliche Charakteristiken des Sprengens zum Zwecke des Abbruchs

Umgebung	Meist an Luft, Sprengen unter Wasser sind grundsätzlich möglich
Sekundärabfall	Verfahrensabhängig. Bei Betonabbruch können in einem erheblichen Maße Stäube entstehen.
Verbrauchsmaterialien	Sprengstoff und Zuleitungen
Fernhantierung	Auslösung aus der Ferne
Aerosole/Hydrossole	Hoch, insbesondere bei Beton
Platzanspruch	In der Regel gering, Vorarbeiten ggfs. notwendig (Bohrlöcher)
Materialien	Insbesondere Stahl, Beton und (hoch)bewehrter Beton
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none">• Hochqualifiziertes Personal wird benötigt• Vergleichsweise zeitaufwendige Vorbereitung• Verwendung insbesondere für kontaminationsfreie Betonstrukturen

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Sprengen mit Schneidladungen wird in der Regel für den Abbruch von Stahlkonstruktionen mit Wandstrukturen bis etwa 150 mm verwendet, kann aber auch für den Abbruch dünnwandiger Stahlbetonkonstruktionen genutzt werden.

Mit dem Bohrlochsprengverfahren wurden z. B. die zwei Kühltürme am Standort KKP mit einer Gesamtmasse von 65.000 Mg /MIC 21/ abgerissen. Zur Vorbereitung der Sprengung wurden Fall- und Vertikalschlitze in den Außenschalen der Kühltürme eingebracht und je Kühlturm etwa 1.100 Bohrlöcher gebohrt, in die anschließend der Sprengstoff eingebracht wurde. Durch nahezu gleichzeitige Sprengung (Ablauf von unten nach oben) einzelner V-förmiger Stahlbetonstützen sowie Sprengungen in der Kühlturmschale kollabierten die beiden Kühltürme schließlich und fielen in sich zusammen, siehe /ENBW 20/.

Das Lockerungssprengen wurde u. a. bei der Stilllegung des Kernkraftwerks Niederaichbach an Teilen des biologischen Schildes eingesetzt. Hierbei wurden insgesamt 10 Bohrlöcher in zwei Reihen mit Sprengstoff (Ammon-Gelit und Nitropenta) bestückt. Der Bohrlochabstand betrug – bei einer seitlichen Versetzung der beiden Reihen – zwischen 25 cm und 50 cm pro Reihe. Nach der Sprengung wurde der freigelegte Bewehrungsstahl abgebrannt und die gelockerte Betonstruktur mit einem Hydraulikbagger abgerissen /VAL 98/. Im Rahmen der Stilllegungsplanung wurde das

Verfahren u. a. als mögliches Verfahren für den biologischen Schild in Betracht gezogen /VAT 18b/.

3.4.1.2 Sequenzielles Kollabieren

Das sequenzielle Kollabieren (englisch: *sequential collapsing*) bezeichnet den bewusst herbeigeführten Einsturz von Gebäuden durch gezielte Schwächung der Gebäudestruktur mit dem Ziel des Gebäudeabbruchs. Zur Schwächung des Gebäudes können z. B. Schlitze in die Struktur eingebacht werden, Teilabbrüche durchgeführt oder stützende Elemente entfernt werden. Auf den Einsatz von Sprengstoffen wird bei diesem Verfahren verzichtet /MBS 19/.

Bei der Anwendungsplanung wird zunächst die Einsturzgeometrie festgelegt. Stützend auf statischen Berechnungen wird dann die genaue Vorgehensweise festgelegt und ermöglicht so die präzise Bestimmung des Einsturzzeitpunktes. Der Kollaps wird z. B. durch Sägen, Einziehen/Eindrücken von Elementen oder durch den Einsatz ferngesteuerter Bagger ausgelöst.

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Verfahrensanwendung

Das sequenzielle Kollabieren setzt voraus, dass die zu kollabierenden Strukturen mit verhältnismäßig wenig Aufwand in eine statisch instabile Position zu bringen sind. Hieraus ergeben sich signifikante Einschränkungen für die Anwendung, die sich meist auf bauliche Strukturen erstreckt.

Das Verfahren ist zur Optimierung des Einsturzprozesses mit einem gewissen Planungsaufwand verbunden.

Anwendungsbeispiele aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Das Verfahren wurde u. a. für den Abbruch von Kühltürmen verwendet. Am Kernkraftwerk Mühlheim-Kärlich (KMK) wurde nach vorbereitenden Abbrucharbeiten mit einem automatisierten Abbruchroboter die Struktur des Kühlturms zunächst vorbereitet und dieser abschließend durch gezieltes Druckversagen der tragenden Stützstruktur zum Einsturz gebracht /MBS 19a/. Auch am KWB wurde das Verfahren für den Abbruch eines Kühlturms eingesetzt /RWE 23/.

Tab. 3.31 Wesentliche Charakteristiken des sequenziellen Kollabierens

Umgebung	an Luft
Sekundärabfall	Verfahrensabhängig. Bei Betonabbruch können in einem erheblichen Maße Stäube entstehen.
Verbrauchsmaterialien	Gering, verfahrensabhängig
Fernhantierung	Auslösung aus der Ferne
Aerosole/Hydrossole	Hoch, insbesondere bei Beton
Platzanspruch	In der Regel gering, Vorarbeiten ggfs. notwendig (z. B. Erstellung von Schnitten)
Materialien	Insbesondere Beton
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr einfaches Verfahren • Enges Anwendungsspektrum • Vergleichsweise zeitaufwendiges Vorbereitung hinsichtlich der Planung und Vorbereitung • Verwendung insbesondere für kontaminationsfreie Betonstrukturen

3.4.1.3 Weitere mechanische Abbruchverfahren

Presslufthämmern sind ein für die Zerlegung von Betonstrukturen gängiges Werkzeug und wurden bspw. bei Stilllegungsarbeiten in KKN sowie im Forschungsreaktor FRJ-1 für die Zerlegung des biologischen Schilts eingesetzt /THI 09/. Bei verstärkten Betonstrukturen kann auch das Kernbohren verwendet werden. Das Kernbohren eignet sich auch bei besonders dickwandigen Komponenten. Ähnlich wie der Einsatz von Presslufthämmern ist das Kernbohren ein aus dem konventionellen Bereich übernommenes Verfahren, welches erfolgreich bei Stilllegungsarbeiten in HDR und KRB-A Anwendung gefunden hat /THI 09/. Weiterhin zu nennen ist das Meißeln, was auch fernhantiert eingesetzt werden kann. Ein Nachteil ist, dass die anfallenden Teilstücke mitunter grob ausfallen. Das Meißeln kam beispielsweise bei der Zerlegung des Reaktorblocks im FRJ-1 zum Einsatz /KAU 10/. Ein weiteres aus der konventionellen Abbautechnik übernommenes Verfahren ist der Abbruch mittels Abrissbirne. Dieses Verfahren eignet sich besonders für den Abbruch nicht-kontaminierter (ggfs. nach erfolgter Freigabe) Betonstrukturen (z. B. Sicherheitsbehälter).

3.4.2 Brecheranlagen für die Vor-Ort Zerkleinerung

Die beim Betonabbruch entstehenden Betonfragmente haben zum Teil große Korngrößen, was für den Abtransport zu Problemen und höhere Kosten (höhere Volumen) führen kann. Mit (mobilen) Brecheranlagen können die Betonfragmente im Rahmen der Nachbearbeitung zerkleinert und die Korngrößen reduziert werden.

Eine Verfahrensvariante ist das sogenannte Backenbrechen. Das zu zerkleinernde Gut gelangt durch einen Trichter in eine keilförmige Brechkammer. Eine Seite dieser Kammer bildet die Brechbacke, die sich durch eine Exzenterwelle periodisch bewegt werden kann. Das Schüttgut wird zerdrückt, nach unten transportiert und gelangt dann in einen Auffangbehälter.

Backenbrecher werden standardmäßig für die Aufbereitung mineralischer Rohstoffe verwendet, werden aber auch in der kerntechnischen Stilllegung genutzt. Ein Anwendungsbeispiel ist der Abbruch der Betonstrukturen innerhalb der AVR-Anlage, siehe auch Abschnitt 4.1.2.2. Diese wurden mit einem Abbruchroboter von oben nach unten abgebaut und der anfallende Schutt anschließend in einem Backenbrecher zerkleinert, siehe Abb. 3.23.

Im KKS wurde eine Kompaktbrecheranlage im Kontext von Abbrucharbeiten am Sicherheitsbehälter (SHB) genutzt. Ein Abbruchbagger hat dort zunächst den Beton aus der Betonstruktur des SHBs abgebrochen und zerkleinert. Anschließend wurde das vorpulverisierte Material mit einem batteriebetriebenen Radlader aufgenommen und zu der Brecheranlage verbracht. Dort wurde es auf die gewünschte Korngröße zerkleinert und das pulverisierte Material anschließend in *Big Bags* gefüllt. Die Brecheranlage war ausgelegt für einen Durchsatz von etwa 5 Mg pro Stunde. Die Baustelleneinrichtung ist schematisch in Abb. 3.24 abgebildet /KOB 23/.



Abb. 3.23 Backenbrecher in der AVR Anlage (Quelle: JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH) /STE 23/

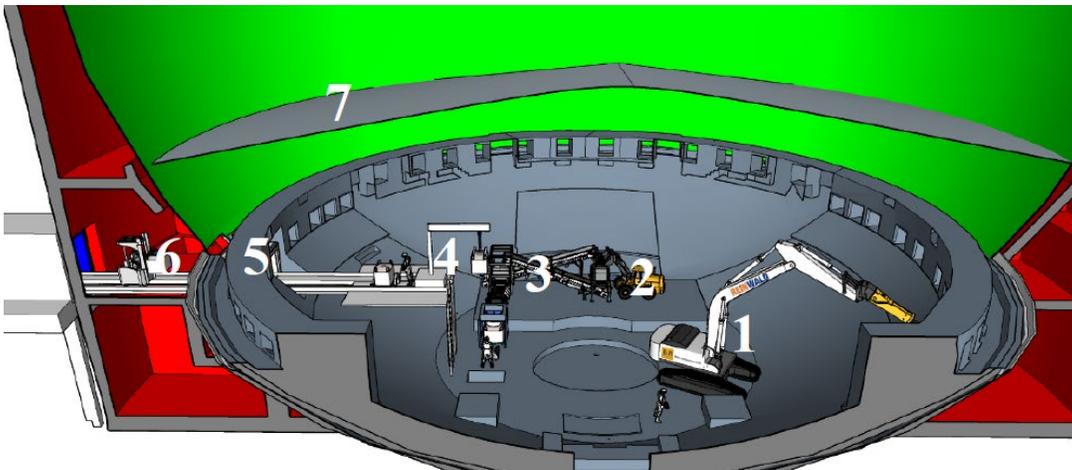


Abb. 3.24 Baustelleneinrichtung der Abbrucharbeiten am SHB im KKS (Quelle: Reinwald GmbH) /KOß 23/

Das durch den Elektrobagger (1) abgebrochene Material wird durch den Elektroradlader (2) aufgehoben und zur Brecheranlage (3) gebracht. Dort wird das Material pulverisiert, in *Big Bags* gefüllt und aus den SHB herausgeschleust (4-6).

3.4.3 Mobile Einhausungen

Bei Trenn- und Abbrucharbeiten an Luft werden Aerosole und Stäube freigesetzt, mit denen gegebenenfalls auch radioaktive Partikel fortgetragen werden können. Zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen und zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe werden zur räumlichen Abgrenzung in der Praxis oft Einhausungen genutzt, für die – je nach Ausgestaltung – auch mobile Filteranlagen vorgesehen sind. Bei diesen Einhausungen kann es sich z. B. um Kabinen mit Schleusenzugang handeln, aber – insbesondere bei Betonabbrucharbeiten – können auch textile Einhausungen, gegebenenfalls mit einem leichten Metallgerüst, genutzt werden. Bei der Wahl der Textilien ist sicherzustellen, dass diese leicht zu reinigen sind, auch um eine Wiederverwendung zu ermöglichen. Bei der Materialauswahl wird aus Gründen der Endlagerung auf organische Bestandteile verzichtet /GRS 21/.

Ein Anwendungsbeispiel stellen die Betonabbrucharbeiten im Sicherheitsbehälter des Kernkraftwerk Stade dar, siehe Abb. 3.25. Dort wurde z. B. der Abbruchbereich mit einer robusten Einhausung aus BULLFLEX® versehen. Für die Abbrucharbeiten wurde ein Elektrobagger genutzt. Für Arbeiten in kontaminierten Bereichen wurde die Einhausung zusätzlich mit einer Tülle versehen, durch die der Ausleger des Baggers geführt wurde /KOß 23/.

3.4.4 Mobile Filter- und Lüftungsanlagen

Die wesentliche Aufgabe von Filteranlagen stellt die Filterung von Luft bzw. Wasser dar. Häufig wird insbesondere die Sammlung radioaktivitatstragender Aerosole im Vordergrund, bei Trennarbeiten unter Wasser werden Filteranlagen aber auch eingesetzt, um eine Trübung des Wassers im Arbeitsbereich zu vermeiden. Die eingesetzten Filter werden unter Berücksichtigung der spezifischen Erfordernisse ausgewählt. In Abhängigkeit des Trennverfahrens ergeben sich beispielsweise Unterschiede hinsichtlich der freigesetzten Stäube oder Aerosole (z. B. Größe), so sind z. B. Filter mit der HEPA-Kennzeichnung für die Filterung (Abscheidegrad von mindestes 99,5 %) von Partikeln mit einer Größe im Bereich 0,1 bis 0,3 Mikrometer gedacht. Dies bedeutet auch, dass innovative (Trenn-)Verfahren ein anderes Anforderungsprofil an das Filtersystem stellen können, dass sich insbesondere aus dem Größenspektrum der Aerosole bzw. Stäube ergibt /SAU 24/. Für eine effiziente Filterung an Luft ist zudem eine gerichtete Luftströmung notwendig, die z. B. in den Arbeitsbereichen mit mobilen Lüftungsanlagen gewährleistet werden kann. Häufig werden solche mobilen Filter- und/oder Lüftungsanlagen in Verbindung mit (temporären)

Einhausungen genutzt. Weiterführende Informationen zu Lüftungssystemen im kerntechnischen Bereich und in der Stilllegung finden sich in /GRS 21/.



Abb. 3.25 Textile Einhausung im Rahmen von Abbrucharbeiten am SHB im KKS (Quelle: Reinwald GmbH) /KOß 23/

3.5 Zusammenfassung

Für Trenn- und Dekontaminationsaufgaben haben sich in der Praxis eine Vielzahl an Verfahren etabliert, mit denen nachweislich eine sichere Stilllegung nach Beendigung des regulären Leistungsbetriebes gewährleistet werden kann. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass es weder bei den Trenn- noch bei den Dekontaminationsverfahren unter Berücksichtigung von Aspekten wie Trennleistung, Materialeignung oder Sekundärabfällen ein universell gleichermaßen gut funktionierendes Verfahren existiert. Aus diesem Grund trägt eine sorgfältige, nachvollziehbare und aufgabenbezogene Verfahrensauswahl maßgeblich zu einer erfolgreichen Durchführung der Maßnahme bei.

Bei den Trennverfahren haben sich – auch im Hinblick auf anspruchsvolle Trennaufgaben – insbesondere das Brennschneiden (niedriglegierte Stähle), das Plasmaschneiden (Metalle), das Wasserstrahlschneiden (insbesondere Nutzung in separaten Schneidcaissons im Rahmen der Nachzerlegung) und das Seilsägen (Metalle und Baustrukturen) bewährt. Eine allgemeine Bewertung etablierter Trennverfahren ist nur bedingt möglich, da u. a. die zugrunde liegenden Faktoren in ihrer Gewichtung je nach zu zerkleinernden Komponente und vorliegenden Randbedingungen (z. B. Ortsdosisleistung) eine quantifizierende Einschätzung deutlich beeinflussen können. In Kontrollbereichen werden beispielsweise bevorzugt Verfahren eingesetzt, bei deren Anwendung relativ wenig Aerosole und Dämpfe freigesetzt werden /HÜB 17/. Dadurch, dass die Platzverhältnisse innerhalb eines Kraftwerks mitunter beschränkt sind, ist das Errichten von Filteranlagen und Ablufteinrichtungen mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Mechanische Trennverfahren, bei denen wenig bzw. leicht zu filternde Sekundärabfälle anfallen, sind vor diesem Hintergrund zum Beispiel von Vorteil. Des Weiteren müssen thermisch zerlegte Komponenten oftmals nachbearbeitet werden. Für Werkstücke, die nicht bzw. nur schwach kontaminiert sind, können thermische Verfahren unter Berücksichtigung des Brandschutzes jedoch unbedenklich eingesetzt werden. Hier spielen ökonomische Aspekte wie bspw. Anschaffungskosten, Werkzeugverschleiß bzw. die Schnittgeschwindigkeit eine größere Rolle als für kontaminierte Werkstücke, für die oft auch eine Minimierung der anfallenden Sekundärabfälle sowie der Exposition des Personals im Vordergrund steht.

Auf Grundlage der Einschätzung der Trennverfahren konnte festgestellt werden, dass thermische Verfahren wie z. B. das Plasmabrennschneiden eine sehr hohe Schnittgeschwindigkeit erreichen. Ein weiterer Vorteil von thermischen Verfahren ist, dass diese vor allem bei komplizierten Geometrien eingesetzt werden können. Thermische Verfahren benötigen jedoch aufgrund der erheblichen Aerosolfreisetzung aufwendige Absaug- und Filtereinrichtungen. Auch beim Einsatz unter Wasser ergeben sich durch Rußbildung, und eine dadurch eingeschränkte Sichtbarkeit, Probleme. Wasserstrahlverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie präzise Schnitte produzieren und sich auch unter beengten Platzverhältnissen einsetzen lassen. Das grundsätzliche Problem dieser Verfahren ist zum einen die teils sehr hohe Generierung von Sekundärabfällen, zum anderen werden aufwendige Filtersysteme für das Prozesswasser benötigt. Mechanische Band- und Sägeverfahren kommen bei fast allen Rückbauprojekten zum Einsatz /HÜB 17/. Mechanische Trennverfahren produzieren zwar Sekundärabfälle wie bspw. Späne, diese lassen sich jedoch im Vergleich zu thermischen Verfahren einfach aufsammeln. Auch für den Einsatz unter Wasser sind mechanische Verfahren gut geeignet da sie die Wasserqualität nicht übermäßig beeinträchtigen

(größere Partikel). Die Trenngeschwindigkeit ist geringer als bei den thermischen Verfahren, doch weisen sie eine sehr hohe Zuverlässigkeit auf. Spezielle Verfahren wie das Diamant-Seilschleifen eignet sich besonders für Komponenten mit einer großen Wandstärke, die Kosten für Verbrauchsmittel können aber hoch sein. Für verschraubte Verbindungen können auch speziellere Verfahren wie EDM und MDM genutzt werden. Da Band- und Sägeverfahren oft mit Wasser gekühlt werden, wird bei stark kontaminierten Bauteilen oft trocken zerlegt, um die Gefahr der Querkontamination beim nassen Zerlegen zu vermeiden. Kühlmittel und die anfallende Schneideemulsion, welche beim nassen Zersägen anfallen, müssen aufwendig aufgefangen und behandelt werden. Wird trocken gesägt, kommt es jedoch schnell zur Überhitzung bzw. dazu, dass das Sägeblatt abstumpft (erhöhter Materialverschleiß). Auch für Bauteile, welche unter einer inneren Spannung stehen, eignen sich thermische Verfahren besser. Bei mechanischen Verfahren kommt es gelegentlich zu Schwierigkeiten, beispielsweise durch ein eingeklemmtes Sägeblatt. Das Laserschneiden ist ein vielversprechendes Verfahren, was sich in der Stilllegung aber insbesondere für in-situ Zerlegungen noch nicht etabliert hat.

Für die (vollständige) Systemdekontamination als (vorbereitende) Stilllegungsmaßnahme wurde in den letzten beiden Dekaden häufig auf das Verfahren HP/CORD UV zurückgegriffen, die erzielten Dekontaminationsfaktoren lagen je nach Anwendungsfall bei etwa 100. Vergleichbare Dekontaminationsfaktoren wurden auch für die Anwendungen des ASDOC_D-MOD Verfahren im Kernkraftwerk Biblis beobachtet, es fand aber seitdem keine weitere Anwendung in Deutschland.

Die einstufigen chemischen Dekontaminationsverfahren werden in der Regel für die Flächendekontamination von Metallteilen, häufig in Form von Prozessbädern, genutzt. Obschon grundsätzliche Ähnlichkeiten hinsichtlich des Wirkprinzips bestehen, zeigen sich im Detail deutliche Abweichungen (z. B. bei Prozesstemperaturen, Regenerierung der Prozesschemikalien) die das Dekontaminationsergebnis teilweise erheblich beeinflussen können.

Einfache mechanische Verfahren wie das Wischen oder das Spülen ermöglichen die Entfernung loser Kontaminationen, es existieren aber auch Verfahren, die zu einem teilweise makroskopischen Materialabtrag führen. Hierbei ist insbesondere das Fräsen von Betonflächen zu erwähnen, dass häufig zur Wand- und Bodendekontamination genutzt wird. Zudem existieren einige Verfahren wie das Nadeln oder das Schleifen, die keine Flächendekontamination beabsichtigen, sondern die vielmehr für die Entfernung von *hot-spots* und/oder für Arbeiten in schwer zugänglichen Bereichen (z. B. Ecken/Kanten) gedacht sind.

Das Einschmelzen von Metallteilen richtet sich an eine Volumendekontamination, die insbesondere vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft (Wiederverwendung von Metallen) von Bedeutung ist. Einige europäische Unternehmen haben sich auf dieses Verfahren spezialisiert und werden auch für die Behandlung von Metallteilen aus den deutschen Stilllegungsprojekten genutzt. Dass das Einschmelzen auch zukünftig wirtschaftlich interessant sein wird, zeigt z. B. die Errichtung einer neuen Anlage in Großbritannien.

4 Ausgewählte branchenübergreifende Entwicklung und ihre Berücksichtigung im Bereich der Stilllegung

Innovationen sind ein wesentliches Kernelement der Wirtschaft, stellen sie doch einen entscheidenden Treiber für Investitionen und Produktivität dar. Innovationen beschränken sich nicht nur auf technische Lösungen, sondern umfassen auch innovative Verfahrensweisen und Konzeptinnovationen, beispielsweise auf Ebene der betrieblichen Organisationen. Innovationen können speziell auf spezifische Problemstellungen zugeschnitten sein, es existieren aber auch Beispiele für Innovationen mit sehr breiten Anwendungsradien über eine Vielzahl an Branchen hinweg. Zudem benötigen einige Innovationen ausreichend Zeit, um ihre Wirkung zu entfalten. In diesem Kapitel werden bestimmte und aktuell viel diskutierte branchenübergreifende Trendthemen zusammengefasst und ihre jeweilige Relevanz für die Stilllegung eingeschätzt. Hierzu gehören:

- Robotik und Automatisierung
- Bauwerksdatenmodellierung
- virtuelle und augmentierte Realität
- maschinelles Lernen und Aspekte künstlicher Intelligenz
- digitale Realitäten

Diese Trends werden in den Abschnitten zunächst beschrieben und anschließend ihre jeweilige Anwendung in der kerntechnischen Stilllegung eruiert.

4.1 Robotik und Automatisierung

Bei Robotern handelt es sich grundsätzlich erst einmal um technische Lösungen, die auf Basis von Sensoren, Aktoren und Informationsverarbeitung mit der realen Welt gemäß programmiertem Bewegungsablauf interagieren können, um so bestimmte Aufgaben zu erledigen. Zu diesem Zweck sind Roboter mit Werkzeugen, Greifern oder Spezialgeräten ausgestattet, um Handhabungsaufgaben an Materialien oder Werkstücken durchzuführen. Historisch wurden Roboter in der Industrie vor allem für starre Prozessabläufe mit festen Bewegungsprofilen genutzt, durch diverse Fortschritte, insbesondere in den Bereichen Sensorik und Informationsverarbeitung, hat sich das Anwendungsgebiet aber stetig weiterentwickelt.

Roboter werden zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt, das Spektrum umfasst hierbei – neben einer Produktivitätssteigerung – die Reduzierung des Gefährdungspotenzials für involvierte Arbeitskräfte, die Durchführung von Arbeiten in Bereichen, die für manuelle Tätigkeiten nicht zugänglich sind (z. B. aufgrund von Einsturzgefährdung, starker Strahlenfelder oder große Wassertiefe) oder auch die Übernahme repetitiver Tätigkeiten.

Ein wichtiger Aspekt für die Robotik stellt der Automatisierungsgrad dar, mit dem die gewünschten Aufgaben – oder Teile davon – bewältigt werden. Das Spektrum reicht hier grundsätzlich von Systemen, die von einem Leitstand gesteuert werden (Telemanipulatoren) bis zu vollständig autonomen Lösungen. Diese können im einfachsten Fall Befehle korrespondierend umsetzen, in fortschrittlicheren Anwendungen können aber auch Aufgaben vorgegeben werden, die dann autonom umgesetzt werden. In vielen Bereichen, wie zum Beispiel dem automatisierten Fahren, haben sich gestufte Herangehensweisen etabliert, mit denen die einzelnen Stufen des Automatisierungsspektrums differenziert werden können. In generischer Form sind diese Konzepte oft gut auf weitere Bereiche zu übertragen. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 4.1.1 näher betrachtet.

Neben dem derzeit sehr populären Feld des autonomen Fahrens werden Roboter insbesondere in der Industrie zur Fertigung eingesetzt. Erstmals wurde 1961 ein industrieller Roboter (*Unimate*) zur Fertigung bei General Motors eingesetzt /NOF 99/. Laut Schätzung der *International Federation of Robotics* waren Ende 2019 etwa 2,7 Millionen Industrieroboter im Betrieb /INT 20/. Weitere Anwendungsgebiete finden sich u. a. in den folgenden Bereichen:

- Militärische Anwendungen, z. B. Erkundungs- und Angriffsdrohnen
- Medizinische Anwendungen, z. B. chirurgische Roboter oder Roboter im Rahmen rehabilitierender Anwendungen
- Haushalt, z. B. Saugroboter
- Baugewerbe, z. B. zur Errichtung von Baustrukturen, zur Fortschrittsüberwachung oder zur Inspektion
- Landwirtschaft, z. B. zur Ernte oder auch – in geringerem Maße – in der Aussaat oder der Wachstumsüberwachung

Auch in der Nuklearindustrie werden seit vielen Dekaden Roboter genutzt, insbesondere in Form von Telemanipulatoren (Einsatz zu Fernhantierungszwecken seit den 1940ern /GOE 49/) oder

Telerobotern. Dies lässt sich vor allem auf das radiologische Gefährdungspotenzial zurückführen, weswegen Roboter auch für Arbeiten in havarierten Kernkraftwerken (Kernkraftwerk Tschernobyl und Kernkraftwerk Fukushima Daiichi) regelmäßig genutzt werden bzw. extra für diese Einsatzzwecke entwickelt wurden.

Ein weiterer Bereich, der auch der Robotik zugeordnet wird, stellen (motorisierte) Exoskelette dar. Dabei handelt es sich um äußere Stützstrukturen die je nach Komplexität als am Körper tragbare Roboter oder Maschinen betrachtet werden können. Neben dem medizinischen Bereich werden Exoskelette auch in der Industrie eingesetzt, wo sie überwiegend für körperlich anspruchsvolle Tätigkeiten genutzt werden, wie z. B. dem Heben von schweren Lasten oder zur Unterstützung von einseitig belastenden Tätigkeiten über Kopf. Grundsätzlich kann zwischen Exoskeletten mit Antrieb (aktive Systeme) und Exoskelette ohne Antrieb (passive Systeme) unterschieden werden. Bei aktiven Systemen dienen Elektromotoren als Kraft-/Energiequelle, während bei den passiven Systemen durch mechanische Komponenten die Belastung verteilt wird. Hinsichtlich Größe und Gewicht unterscheiden sich die beiden Konzepte deutlich voneinander.

4.1.1 Gestuftes Vorgehen zur Beschreibung des Automatisierungsgrades

Die international Gesellschaft der Automobilingenieure (Society of Automotive Engineers, SAE) definiert in dem Dokument „*Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*“ /SHI 21/ ein gestuftes Vorgehen zur Beschreibung des Automatisierungsgrades im Automobilbereich. Hierdurch werden mehrere Absichten verfolgt:

1. die Rolle des (menschlichen) Fahrers, falls vorhanden, während des Einsatzes von Fahrerautomatisierungssystemen zu klären,
2. Fragen des Geltungsbereichs bei der Entwicklung von Gesetzen, Vorschriften und Normen zu beantworten,
3. einen nützlichen Rahmen für die Festlegung von Automatisierungsspezifikationen und technischen Anforderungen bereitzustellen, und
4. für Klarheit in der Kommunikation zum Thema Automatisierung des Fahrens zu sorgen.

Das Automatisierungsspektrum umfasst hierbei die folgenden sechs Stufen:

- Stufe 0 – Keine Automatisierung

Der Fahrer bestreitet alle dynamischen Fahrsituation selbständig, ggf. mithilfe aktiver Sicherheitssysteme.

- Stufe 1- Fahrassistenz

Das Automatisierungssystem führt die Teilaufgabe einer permanenten Längs- oder Querverführung des Fahrzeugs aus. Der Fahrer leistet einen Beitrag.

- Stufe 2 – Partielle Automatisierung

Das Automatisierungssystem führt die Teilaufgabe einer permanenten Längs- und Querverführung des Fahrzeugs aus. Es wird erwartet, dass die Objekt- und Ereigniserkennung und entsprechende Reaktionen durch den Fahrer erfolgen und dieser das Automatisierungssystem permanent überwacht.

- Stufe 3 – Bedingte Automatisierung

Das Automatisierungssystem beherrscht die gesamte fahrdynamische Aufgabe. Der Fahrer muss für den Ausfall oder dem Verlassen des Aufgabenbereichs der Automatik bereit sein, um die Situation selbständig zu beherrschen.

- Stufe 4 – Hohe Automatisierung

Das Automatisierungssystem beherrscht alle fahrdynamischen Situationen im Rahmen des Aufgabenbereichs. In diesem wird die Interventionsmöglichkeit des Fahrers nicht vorausgesetzt.

- Stufe 5 – Volle Automatisierung (autonom)

Das Automatisierungssystem beherrscht ausnahmslos alle fahrdynamischen Situation. Der Fahrer muss nicht intervenieren.

Ein automatisiertes Fahrsystem für die Stufen 3 bis 5 wird hierbei definiert²⁹ als diejenige Hardware und Software, mit der die gesamte dynamische Fahraufgabe dauerhaft durchgeführt werden

²⁹ Im Wortlaut: „The hardware and software that are collectively capable of performing the entire DDT [Dynamic driving task] on a sustained basis, regardless of whether it is limited to a specific operational design domain (ODD); this term is used specifically to describe a Level 3, 4, or 5 driving automation system.“ (ISHI 21/)

kann – dies unabhängig davon, ob sie auf eine bestimmte „betriebliche Entwurfsdomäne“ beschränkt ist /SHI 21/.

Neben einer zuverlässigen Sensor- und Regelungstechnik (die beispielsweise ermöglichen soll, das gesamte Umfeld eines Fahrzeugs zu erfassen, um sicher auf verschiedene Situationen reagieren zu können) gelten weitere Fortschritte in der kommunikativen Vernetzung von Fahrzeugen als notwendige Voraussetzungen um höhere Stufen der Automatisierung zu erreichen. Derzeit ist eine Automatisierung der Stufe 4 im Rahmen der gesetzlichen Regelungen in Deutschland möglich.

Beispiele neuer Entwicklungen sind:

- 77-GHz Radartechnik für den Fern- und Nahbereich zur verbesserten Objekterkennung
- LIDAR für hochauflösende Nahfeldererkennung in Echtzeit
- Einsatz maschinellen Lernens zur verbesserten Reaktion auf bestimmte Verkehrssituationen
- Rechneinheiten zur zentralen Auswertung verschiedener Sensordaten mit der Fähigkeit zum maschinellen Lernen und hohem Schutz gegen Cyberangriffe

Mitarbeiter des *National Nuclear Laboratory* (NNL) in Großbritannien haben in Anlehnung an die Kategorisierung der SAE ein generisches gestuftes System erarbeitet, um den Automatisierungsgrad von Robotern in unstrukturierten Umgebungen zu beschreiben /CHA 23/. In einem weiteren Schritt könnten auf Basis dieser generischen Herangehensweise gestufte Konzepte für bestimmte und wiederkehrende Aufgabenstellungen (z. B. Dekontamination von Gebäudeflächen) konkretisiert werden.

4.1.2 Robotik-Anwendungen in der Stilllegung

Der Anwendungsbereich von Robotersystemen für die Stilllegung ist sehr breit gefächert und umfasst insbesondere die folgenden Aktivitäten:

- Physikalische und radiologische Charakterisierung
- Rückholung eingelagerter fester und flüssiger radioaktiver Abfälle
- Dekontamination von Gebäuden und Systemen

- Trennen von Komponenten
- Abbruch von Gebäuden
- Weitere Demontagetätigkeiten, wie z. B. die Demontage von Anlagen und Anlagenteilen

Durch den Einsatz von Robotern kann das ALARA-Prinzip in vielen Fällen sinnvoll angewandt werden, in denen eine Kombination aus manuellen und (partiell) ferngesteuerten Verfahren zum Einsatz kommen könnte. Die Entwicklung und der Einsatz von ferngesteuerten Systemen, die den Menschen in gefährlichen Arbeitsbereichen teilweise oder vollständig ersetzen können, stellen eine Möglichkeit dar, Expositionen zu verringern und die Sicherheit des Personals zu erhöhen. Zudem können sich weitere Vorteile durch den Einsatz von Robotern ergeben:

- Erhöhte Sicherheit, die sowohl den Strahlenschutz als auch die konventionelle (industrielle) Arbeitssicherheit umfasst. Zu den Gefahren gehören unter anderem ionisierende Strahlung, gefährliche (giftige) Stoffe, ein erhöhtes Verletzungsrisiko oder eine Brandgefahr.
- Ermöglichung von Arbeiten in schlecht zugänglichen Bereichen (z. B. aufgrund geringer Abmessungen)
- Gegebenenfalls Kostenreduzierung durch leichtere Durchführbarkeit der Maßnahmen und Senkung der Personalkosten
- Steigerung der Produktivität
- Die Wiederverwendung von Robotersystemen, die während des Betriebs der Anlage verwendet wurden (auch wenn bestimmte technische Änderungen erforderlich sind) kann zu einer Effizienzerhöhung und einer Kostenreduktion führen.
- Verwendung für verschiedene Stilllegungsaufgaben, sofern das System modular aufgebaut und ausreichend angepasst werden kann /LAR 12/

Die *Expert Group on the Application of Robotic and Remote Systems in the Nuclear Back-end* (EGRRS) beschäftigt sich unter dem *Radioactive Waste Management Committee* der *Nuclear Energy Agency* (NEA) mit ausgewählten Fragestellungen zur Optimierung der Abfallentsorgungs- und Stilllegungs-Programme durch den Einsatz von Robotern und fernhantierten Systemen /NEA 24/. Im Abschlussbericht zur ersten Mandatsperiode hat die EGRRS u. a. Barrieren und Hindernisse zusammengefasst, die einem breiten Einsatz von Robotern und fernbedienten Systemen entgegenstehen könnten, /OECD 23/. Hierbei wurden zwei übergeordnete Faktoren identifiziert:

- Zurückhaltung bei erstmaliger Nutzung von Technologien („*race to second place*“)
- Unzureichendes Vertrauen in Roboter, insbesondere aufgrund unzureichender Daten und fehlender Erfahrungswerte

Zudem sind für Roboter und fernbediente Systeme einige Aspekte zu berücksichtigen, die einer praktischen Nutzung entgegenstehen können:

- Die Investitions- und Betriebskosten, insbesondere von komplexen Robotersystemen, sind hoch. Es fallen zusätzliche Kosten für die Ausbildung des Personals, für Modellversuche, Wartung, Dekontaminierung und Reparatur an. Eine präzise Kosten-Nutzen-Analyse ist notwendig, um nachzuweisen, dass der Einsatz von Robotersystemen für konkrete Aufgabenstellungen wirtschaftlich ist.
- Der Operateur eines Teleroboters befindet sich in der Regel in gewisser Entfernung vom Arbeitsbereich und muss sich auf Kameras und andere Hilfsmittel verlassen. Aus diesem Grund kann die unmittelbare Reaktion des Operators nicht optimal und verzögert sein, insbesondere wenn ungeplante oder unvorhergesehene Situationen auftreten.
- Der Operateur von Robotersystemen muss über die notwendigen Qualifikationen verfügen und speziell für seine Aufgabe geschult sein.
- Fernbediente Robotersysteme sind in der Regel komplexe Geräte. Im Allgemeinen gilt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Geräteversagens mit der Komplexität des Gerätes korreliert /LAR 12/.

Die Wahl und die Anpassung der Technologie für geplante Stilllegungsmaßnahmen orientieren sich an den örtlichen Gegebenheiten. Bei der Auswahl der Technologie spielen insbesondere die Wirtschaftlichkeit, die Anwendbarkeit üblicher Geräte und Werkzeuge, sowie die Zugänglichkeit der Arbeitsumgebung eine entscheidende Rolle. Es ergeben sich einige technologische Anforderungen an einen Roboter zum Einsatz in der Stilllegung:

- Möglichst einfache Konstruktion mit hoher Zuverlässigkeit und Funktionalität
- Resistenz gegen ionisierende Strahlung
- Gegebenenfalls Widerstandsfähigkeiten gegen hohe Temperaturen, Staub, Feuchtigkeit und/oder chemische Einwirkungen
- Die Konstruktion muss den Einsatzanforderungen Rechnung tragen (z. B. Unterwasser-einsatz und vertikale Bewegung).

- Modulare Systeme mit entsprechenden Schnittstellen („Baukastenprinzip“) sind insbesondere vor dem Hintergrund unterschiedlicher Einsatzzwecke von Vorteil, insbesondere wenn sie für verschiedene Stilllegungsaufgaben eingesetzt werden sollen.
- Eine ausreichende visuelle Abbildung der Arbeitsumgebung muss gewährleistet sein. Dies schließt die Übertragung verschiedener Signale (Geräusche, Krafrückmeldung) an den Operateur ein
- Dekontaminierbarkeit der Geräteaußenflächen
- Das Gerät muss leicht zu installieren, zu warten, zu reparieren und zu bergen sein
- Das Steuerungssystem und die Mensch-Maschine-Schnittstellen müssen ausreichend flexibel und ergonomisch für allen normalen Arbeitssituationen und auch in ungeplanten Situationen ausreichend flexibel sein /LAR 12/.

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele für Roboter in der Stilllegung und deren Entwicklung vorgestellt.

4.1.2.1 Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen (ROBBE)

Die RWE Nuclear GmbH hat in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) im Rahmen des Förderprogramms FORKA einen Roboter zur autonomen Entschichtung von Metallteilen entwickelt. Das Projekt wurde im Jahr 2022 mit dem dritten Preis des *Nuclear Innovation Prize* der europäischen Union im Bereich Abfallmanagement ausgezeichnet /EC 22/. In der Praxis wurden bzw. werden solche Arbeiten häufig manuell mit Wasserstrahlverfahren durchgeführt, was aufgrund des Arbeitsschutzes (Lärm, Tragezeitbegrenzungen) und des radiologischen Strahlenschutzes (Kontaminationsschutz) eine körperlich anstrengende Tätigkeit darstellt. Durch die Automatisierung des Prozesses wurde u. a. eine Erhöhung der Sicherheit, eine Kostenoptimierung und eine Dosisminimierung beabsichtigt.

Eine wesentliche Herausforderung stellt das breite Geometriespektrum mit wenigen Wiederholungen dar. Aus technischer Sicht sind zudem reflektierende Oberflächen aufgrund des geringeren Absorptionsanteils, wie sie bei Metallen oft zu finden sind, herausfordernd. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungs-(F+E) Arbeiten wurde zunächst eine autonome Geometrieerkennung für beliebig geformte Bauteile entwickelt, um auf Basis der erkannten Geometrien und den Bewegungsmöglichkeiten des eingesetzten Industrieroboters eine Bearbeitungstrajektorie automatisch

zu berechnen und diese im Folgenden abzufahren. Das Entschichten selbst erfolgt mit Hilfe des Ultrahochdruckwasserstrahlens (siehe Abschnitt 3.3.2.5.4).

Das System nutzt folgende vier wesentliche Schritte in Vorbereitung des Reinigungsvorgangs:

- Das Objekt wird mittels Lasertriangulierung erfasst und eine Punktwolke erstellt.
- Die generierte Punktwolke wird diskretisiert und ein Volumenmodell des Bauteils erstellt.
- Anschließend werden für dieses Volumenmodell Bahnkandidaten bestimmt und optimiert.
- Vor der praktischen Durchführung wird der Reinigungsprozess in einem digitalen Zwilling geprüft und die Bahnkurven optimiert. Wichtiger Prüfaspekt ist hier eine Kollisionsvermeidung.

Die Roboteranlage wird im Produktivbetrieb innerhalb des Kontrollbereiches des KWB A genutzt (Stand: Mitte 2023).

4.1.2.2 Abbruchroboter in der Stilllegung

In einigen Stilllegungsprojekten werden aufgrund radiologischer und praktischer Erwägungen für den Abbruch größerer Betonstrukturen (z. B. Schutzbehälter) oder für die Schaffung von Wandöffnungen Abbruchroboter eingesetzt. Hierbei handelt es sich meist um modifizierte Industrieroboter, an deren Arme geeignete Anbauwerkzeuge (z. B. Abbruchhämmer, Meißel oder Zangen) installiert werden können.

Ein aktuelles Fallbeispiel hierfür liefert der Abbau von – teilweise stark bewehrten – Betonstrukturen im Schutzbehälter der AVR-Anlage. Diese haben eine Gesamtmasse von etwa 1.470 Mg und eine Strukturhöhe von etwa 14 m. Die Entscheidung für den Abbruchroboter war das Ergebnis von Vorversuchen, bei denen festgestellt wurde, dass sich aufgrund der Bewehrung andere Verfahren wie das Kernbohren oder das Seilsägen nicht eignen. Der Industrieroboter wurde mit einem Spinnengrundgerüst ausgestattet und auf die monolithische Stahlbetonstruktur gesetzt. Das Konzept hat einen Abbruch von oben nach unten vorgesehen. Hierzu wurden zunächst Betonstrukturen mit Hilfe des Meißels gelöst und anschließend die Stahlbewehrung mit Zangen abgeschnitten, siehe Abb. 4.1. Die Steuerung des Roboters erfolgte fernbedient /STE 23/. Heruntergefallene Abbruchstücke wurden im unteren Bereich gesammelt und in Brecheranlagen zerkleinert.

4.1.2.3 Kompetenzzentrum Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen (ROBDEKON)

Das nationale Kompetenzzentrum Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen (ROBDEKON) ist ein Konsortium, an denen sich u. a. das Fraunhofer IOSB, das KIT und das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) beteiligen (Stand: März 2024) /ROB 24/. Das Ziel des Konsortiums ist die Erforschung von autonomen oder teilautonomen Robotersystemen für Arbeiten in Bereichen mit einem erheblichen Gefährdungspotenzial, so dass nicht nur Lösungen für die Kerntechnik untersucht werden. Die Aktivitäten konzentrieren sich auf die folgenden Teilprojekte:

- Roboterplattformen zur Dekontamination
- Roboterbasierte Dekontaminationstechniken
- Telepräsenztechnologien für Robotersysteme
- Multisensorielle Umwelterfassung für Robotersysteme bei der Dekontamination
- Planungsalgorithmen für Dekontaminationsaufgaben

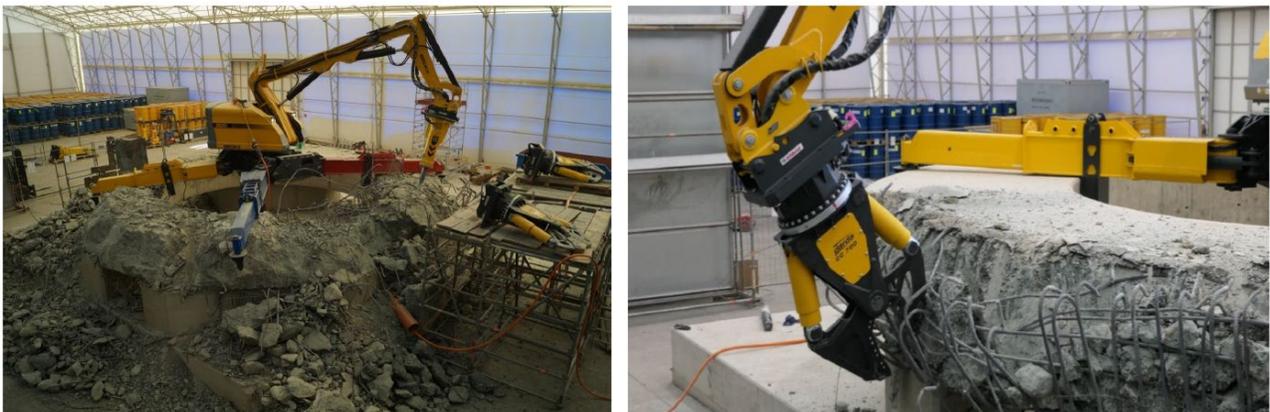


Abb. 4.1 Einsatz des Abbruchroboters zur Beseitigung der Betonstrukturen des Schutzbehälters der AVR Anlage (Quelle: JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH) /STE 23/

Das linke Bild zeigt den modifizierten Industrieroboter BROKK 800 auf dem Spinnengestell bei Meißelarbeiten. Das rechte Bild zeigt eine Detailaufnahme der Trennung der Stahlbewehrung mit Hilfe einer hydraulischen Zange.

Das Konsortium beschäftigt sich somit nicht nur mit den Robotern, sondern berücksichtigt auch wesentliche Aspekte wie die benötigte Infrastruktur, beispielsweise in Form von digitalen

Zwillingen oder Steuerungsmöglichkeiten in der virtuellen Realität. Zwischenzeitlich wurden mehrere Roboter für unterschiedliche Aufgaben entwickelt bzw. finden sich in der Entwicklung. Zu diesen gehören u. a. /WOO 22/:

- Gammabot, ein fahrbarer Roboter zur Strahlungsdetektion. Das System ist mit einem LIDAR zur Umgebungserkennung ausgestattet und kann autonom entscheiden, an welchen Positionen Messungen vorgenommen werden sollen.
- Ein System für die automatisierte Kontaminationsmessung im Rückbauprozess /WER 22/.
- Ein zweihändiger Roboter (ARMAR-6) für die Reinigung kontaminierter Komponenten. Der Roboter kann Objekte greifen und für die jeweilige Objektgeometrie eine Reinigungsstrategie entwickeln (Wasserstrahlverfahren).
- Ein autonomer 24 Tonnen Bagger, der durch die verbauten Sensoren, Recheneinheiten und der genutzten Software sich autonom an den Zielort bewegen kann, um dort innerhalb eines vordefinierten Gebiets Ausgrabungen bis zu einer gewünschten Tiefe vorzunehmen. Der Aushub kann bei Bedarf auf ein Transportgefährt geladen werden. Das System nutzt diverse Ansätze des maschinellen Lernens, beispielsweise im Rahmen der Bewegungen und der Umgebungsabbildung.

4.1.2.4 Automatisierte Zerlegung mittels Unterwasser-Robotertechnik

Am Kernkraftwerk Brunsbüttel setzte eine Konsortium der Firmen Orano und EWN für die Unterwasserzerlegung von RDB-Einbauten (z. B. Dampftrockner) den Roboter AZURo („Automatische Zerlegung von RDB-Einbauten mittels Unterwasser-Robotertechnik“) ein. Als Basis dient der industriell bewährte Roboter TX200 he der Firma Stäubli, der auf einer Unterwasserplattform montiert und in das Wasserbecken abgelassen wurde. Der Roboter soll für Wassertiefen von bis zu 30 Meter geeignet sein. Ein zusätzlicher TX200 Roboterarm soll dabei als Verpackungsroboter dienen und die Schnittstücke unter Wasser in Entsorgungsbehälter verpacken /HÖG 19/.

Als Arbeitswerkzeug wurde für die Zerlegung des Dampftrockners eine WASS-Anlage genutzt, die sich für Wandstärken bis etwa 200 mm eignet. Für die Unterwasserzerlegung kann der Roboter aber auch mit weiteren Werkzeugen ausgestattet werden /HÖG 20/.

Obschon der Roboter einen teilautomatisierten Betrieb grundsätzlich erlaubt, wurde der Roboter bei der Zerlegung (des Dampftrockners) weitestgehend von Hand gesteuert da sich der

teilautomatisierte Betrieb als nicht praktikabel erwiesen hatte. Der Roboter soll auch für die Stilllegung des Kernkraftwerks Krümmel eingesetzt werden /PER 20/.

4.1.3 Zusammenfassung

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Roboter für den Einsatz in der Stilllegung schon regelmäßig genutzt wurden bzw. werden. Der Automatisierungsgrad der genutzten Geräte ist in der Regel gering, höhere Automatisierungsgrade sind bevorzugt in geschlossenen Arbeitsbereichen mit eingeschränktem Gefährdungspotenzial zu finden (siehe z. B. ROBBE). Zukünftig besteht die Herausforderungen darin, technische Verbesserungen im Hinblick auf die Flexibilisierung der Einsatzmöglichkeit oder die Zuverlässigkeit zu etablierten, Einsatzparametern zu verbessern und die Mensch-Technik Schnittstelle zu optimieren.

Laut einer Umfrage unter (Stilllegungs-)Experten aus Industrie und Forschung im Jahr 2017 im Bereich der Stilllegung *„sien fernhantierte Systeme zurzeit mit hohen Kosten verbunden. Was deren Entwicklung anbelangt, so herrscht Uneinigkeit zwischen den Befragten. Die Mehrheit sieht eine Ausweitung der fernhantierten Arbeiten als unwahrscheinlich. Die manuelle Bearbeitung würde immer die günstigere (wirtschaftlichere) Alternative bleiben. So lange die Strahlendosis ein bestimmtes Ausmaß nicht übersteigt, gäbe es auch keinen Anlass, fernhantiert zu arbeiten. Andere Experten sehen allerdings in Zukunft eine stärkere Einbeziehung fernhantierter Systeme. Wenn die Systeme weiter optimiert werden können, bestünde die Möglichkeit, dass diese auch zum Einsatz kommen werden. In der Handhabungstechnik steckt den Experten zufolge noch ein großes Potenzial. In stark aktivierten Bereichen würden fernhantierte Systeme weiterhin unerlässlich bleiben. Jedoch sei ein Rückgang der klassischen Master-Slave-Manipulatoren zu beobachten. Diese würden in Zukunft von Standardindustrierobotern ersetzt werden.“* /HÜB 17/

4.2 Bauwerksdatenmodellierung

Die Bauwerksdatenmodellierung (*Building Information Modeling*, BIM) beschreibt eine Methode zur digitalen Bauwerksmodellierungen mit deren Hilfe der Lebenszyklus von Bauwerken abgebildet werden kann, d. h. insbesondere, dass es sich hierbei nicht um ein statisches, sondern um einen dynamischen Ansatz handelt. Der notwendige Detaillierungsgrad des Modells korreliert mit der Aufgabenstellung und den beteiligten Anwendern. Die Methode wird insbesondere für die Planung von Großprojekten wie dem Bau oder dem Rückbau von Bauwerken oder

Infrastruktureinheiten genutzt. Ein großer Vorteil der Methode ist die Möglichkeit zur Visualisierung von Ist-Zuständen und Änderungsmaßnahmen. Es findet in den unterschiedlichsten Bereichen Verwendung, beispielsweise existiert ein Masterplan BIM für Bundesbauten /BMI 21/ und auch die Deutsche Bahn AG verfolgt eine einheitliche BIM-Strategie /DB 22/.

4.2.1 Anwendung in der Kerntechnik

Das BIM ist eine Methode, die insbesondere aufgrund der präzisen Informationen (beispielsweise in Form von CAD-Modellen der fertigen Bauwerke) für den Neubau prädestiniert ist, aber auch für Bestandsbauwerke kann es aufgabenbezogen sinnvoll eingesetzt werden. Dazu ist allerdings eine Erfassung des Ist-Zustandes des gesamten Bauwerks oder einzelner Räume bzw. Raumbereiche notwendig um es anschließend digital modellieren zu können. Die Raumerfassung erfolgt üblicherweise auf Basis hochpräziser Laserscans, anschließend wird das Modell in Abhängigkeit des Anwendungszwecks mit weiteren Informationen (beispielsweise Materialzusammensetzungen, Rohrleitungen, Kabelführungen oder Lüftungskanäle) ergänzt. Für den kerntechnischen Rückbau bietet das BIM einige sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten /KRI 23/:

- Mit Hilfe des 3D Modells können alle wesentlichen Komponenten abgebildet werden. Auf dieser Basis können unterschiedliche Szenarien im Rahmen der Maßnahmenplanung vorab untersucht werden, so dass Konflikte frühzeitig erkannt und Maßnahmen optimiert werden können. Hierbei stellt insbesondere die Abbildung von Prozessen einen großen Vorteil dar.
- Die dreidimensionale Darstellung ermöglicht eine Kollisionsprüfung und eine Konfliktlösung.
- Das BIM kann für Zeit- und Ressourcenplanung genutzt werden. Sofern Informationen zu Materialien, Ressourcen und Arbeitsabläufen vorliegen, können Arbeitsabläufe und Maßnahmen somit effizienter geplant und koordiniert werden.
- Sofern im BIM-Modell Informationen zu Materialien und Kontaminationen vorliegen, können diese für ein effizientes Material- und Abfallmanagement genutzt werden. Beispielsweise kann zeitaufgelöst abgebildet werden, in welchem Umfang Pufferlager benötigt werden und wo diese platziert werden können.
- Aufgrund der zeitaufgelösten Abbildung erlaubt das BIM eine Dokumentation und Nachverfolgung. Hierfür ist allerdings eine akkurate (aufwendige) Pflege des BIM-Modells erforderlich.

Ein Anwendungsbeispiel des BIM liefert die JEN GmbH, die für die Planung der Stilllegung der Heißen Zellen (Inbetriebnahme 1969) ein präzises BIM-Modell erstellt hat. Hierzu wurden zunächst alle Räume des Gebäudes durch einen Laserscan erfasst, bevor diese Daten anschließend zur Erstellung eines 3D Modells genutzt wurden. Das Modell wurde anschließend um weitere Informationen – z. B. Raumnummern, ggfs. Kennzeichnung als Überwachungs- bzw. Kontrollbereich oder eine Verknüpfung weiterführender Dokumente wie beispielsweise Baupläne - erweitert. Das BIM Modell wird z. B. für Kollisionskontrollen oder zur Bestimmung von Abbaureihenfolgen genutzt. Zudem erleichtert es die Kommunikation mit externen Dienstleistern, da ausgehend von dem 3D-Modell benötigte Teilinformationen leicht zur Verfügung gestellt werden können. Zudem hat es sich als sehr hilfreich für die Darstellung komplexer Zusammenhänge erwiesen, siehe z. B. Abb. 4.2.

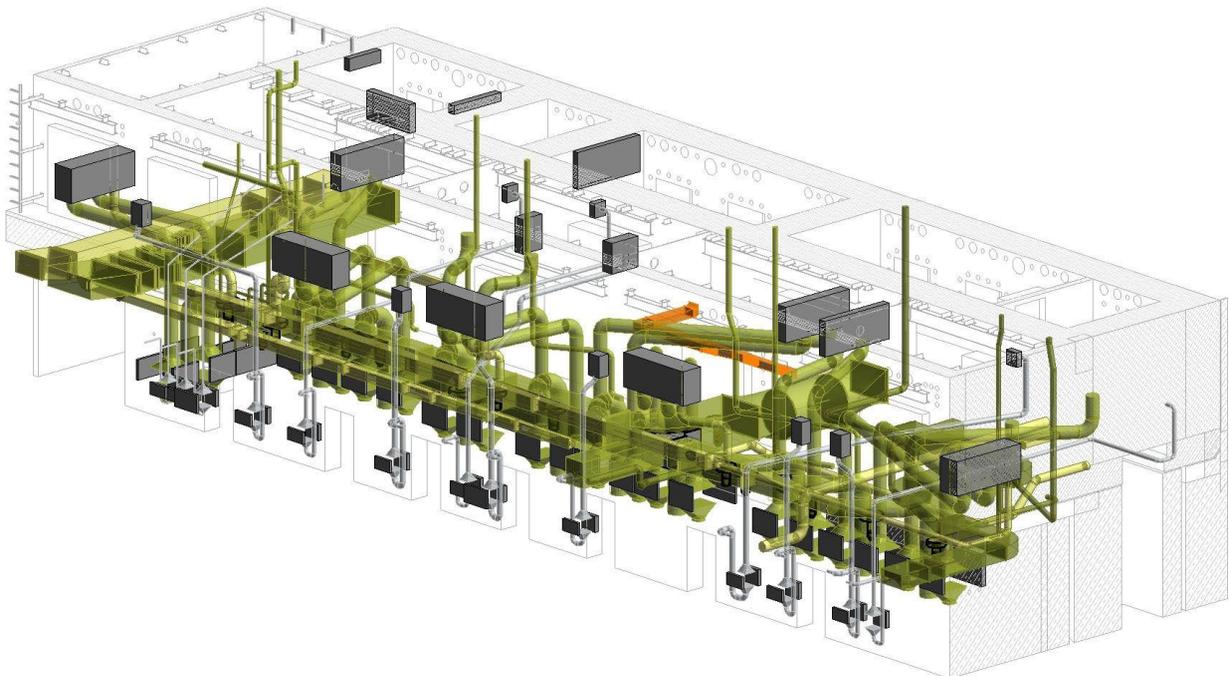


Abb. 4.2 Darstellung der Lüftungsreihe einer Zellenreihe der Großen Heißen Zellen (GHZ) mit Hilfe des BIM-Modells (Quelle: JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH) /PAU 23/

Grundsätzlich ist die Erstellung und Pflege eines BIM-Modells – insbesondere für Bestandsanlagen - mit einem hohen Aufwand verbunden, der in der Praxis im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Betrachtung eingeschätzt werden muss.

4.3 Maschinelles Lernen und Aspekte Künstlicher Intelligenz

Das maschinelle Lernen (ML) beschreibt ein Fachgebiet, in dem Verfahren entwickelt und untersucht werden, mit denen mit Hilfe statistischer Methoden (Algorithmen) bestimmte Muster in vorhandenen Datenbeständen erkannt und klassifiziert werden um darauf aufbauend Vorhersagen bzw. Aussagen zu treffen. Die wesentlichen Anwendungsbereiche, in denen das ML genutzt wird, sind Bild- und Videoanalyse, Text- und Sprachverarbeitung sowie die Verarbeitung von Audiodaten und heterogene Datenquellen. Die Relevanz dieser Anwendungen ist so grundlegend, dass die Methoden und Verfahren insbesondere auch in den Bereichen Robotik und digitale Realitäten genutzt werden.

ML ist eine Anwendung künstlicher Intelligenz (KI), womit die Fähigkeit bezeichnet wird, menschliche Fähigkeiten wie logisches Denken, Lernen, Planen und Kreativität zu imitieren. ML stellt hierbei die Methode dar, wie Computer anhand von Daten sich diese künstliche Intelligenz aneignen können. Die Grundlagen dieser Disziplin wurden bereits in den 1940er Jahren gelegt, jedoch wurden erst in den letzten Jahren, bedingt durch die eine hohe Verfügbarkeit von Rechenleistung und den Zugriff auf große Datenmengen, wesentliche Fortschritte erzielt und neue Teildisziplinen wie das *Deep Learning*, dem Lernen mithilfe sogenannter *Deep Neural Networks* (DNN), geschaffen (siehe Tab. 4.1).

Man unterscheidet bei den für ML angewendeten Algorithmen zwischen überwachtem, unüberwachtem und bestärkendem Lernen. Überwachtes Lernen ist eine Methode, bei der die Eingangs- und Ausgangsdaten bekannt sind und das System lernt, wie diese zusammenhängen. Hierbei wird das Ziel verfolgt eine Funktionsvorschrift zu finden, die es ermöglicht, Vorhersagen auf Grundlage neuer Eingangsdaten zu treffen. Unüberwachtes Lernen bezeichnet die Methode, bei der nur Eingangsdaten verwendet werden. Ziel ist es, in gegebenen Datensätzen Muster und Strukturen zu erkennen. Beim bestärkenden Lernen wird die Rückwirkung auf die Maschine aus der Interaktion mit der Umwelt genutzt, um zukünftige Aktionen zu optimieren und Fehler zu verringern. Ein Beispiel hierfür kann die Greifbewegung eines Roboterarms sein /DÖB 18/.

Inzwischen gibt es eine Vielzahl von Modelltypen und Lernverfahren, die für ML angewendet werden, hierzu zählen Lineare Regression, instanzbasiertes Lernen, Entscheidungs-Baum-Algorithmen, Bayes Statistik, Clusteranalyse, Neuronale Netzwerke, Support-Vektor-Maschinen und Verfahren zur Dimensionsreduktion. In einer Expertenbefragung von 2017 zählten logistische Regression und Entscheidungsbäume zu den am meisten verwendeten Verfahren /DÖB 18/.

Tab. 4.1 Ausgewählte Meilensteine im Einsatz von Maschinellem Lernen /DÖB 18/

Zeitraum	Meilenstein
1940er	Theorie der »Künstlichen Neuronalen Netze« (KNN)
1950er	Pionierarbeiten im Maschinellen Lernen (ML); Begriffsprägung der Künstlichen Intelligenz (KI)
1960er	Entwicklung: Bayes'sche Netze, probabilistisches ML und semantische Netze
1974-1980	Stagnation der F+E: Scheitern Neuronaler Netze (zu langsame Computer)
1980er	Boom der humanoiden Robotik (Japan)
1980er	Praktische Anwendung der »Back Propagation«-Methode für ML und KNN; Forschung an Expertensystemen
1985-1995	Stagnation der Forschung und Entwicklung: Aufgabe der Expertensysteme (zu hohe Komplexität und langsame Computer)
1990er	Durchbruch: Stützvektormaschinen (SVM)
1996	KI gewinnt im Schach gegen den Weltmeister Kasparow (IBM Deep Blue)
2000er	Popularitätsgewinn des ML: Revival der Neuronalen Netze (Big Data und schnelle Computer); Verbreitung der Kernel-Methoden des ML
2010er	Bedeutende Erfolge mit Deep Learning (v. a. in der Sprachverarbeitung, Objekterkennung, Mustererkennung, Bioinformatik)
2011	KI gewinnt im Quiz-Spiel (IBM Watson)
2017	KI (Alpha Go) gewinnt im Go-Spiel gegen den »besten Spieler der Weltrangliste« Ke Jie
heute	ML-basierte Systeme sind inzwischen in der Lage, radiologische Bilder vergleichbar gut wie Mediziner zu bewerten, automatisch unklare Bilder zu vervollständigen, selbst KI-Software zu schreiben und zu trainieren, Börsengeschäfte anhand eigener Prognosen selbstständig durchzuführen, in komplexen Spielen wie Go und Poker gegen Menschen zu gewinnen, sowie sich selbst Wissen, Spiele und Strategien beizubringen

Besonders in der Medizin, bei der Auswertung von MRT-, CT- oder Röntgen-Aufnahmen, aber auch bei anderen komplexen, unstrukturierten Daten kann ML (Bildanalyse, Videoanalyse) genutzt werden um die Sicherheit bei der Diagnose von Krebs, Herzerkrankungen oder Osteoporose zu verbessern. Datenschutzrechtliche Belange stellen hier aber noch eine Herausforderung dar. Neben Automobilindustrie, Maschinen- und Anlagenbau sowie Finanzdienstleistungen stellen Gesundheitswesen, Telekommunikation, Landwirtschaft, Kundendienst, Konsumelektronik und

intelligente Umgebungen (Smart Home) sowie Verteidigung, zivile Sicherheit und die öffentliche Verwaltung weitere (zukünftige) Anwendungsfelder dar.

Eine besondere Bedeutung erlangte die KI und das ML im Bereich der Industrie 4.0, also der Vernetzung gesamter Wertschöpfungsketten, der Automatisierung von Produktionsprozessen und in der Industrierobotik. Im Verkehrssektor stellt ML eine Schlüsseltechnologie dar (Automatisierung). Wichtige Aufgaben, die man hier mithilfe des ML beherrschen will, sind das Erkennen von Fußgängern, Verkehrszeichen und anderen Verkehrsteilnehmern. Auch auf zukünftige Sharing-Konzepte mit autonomen Fahrzeugen und deren Management wird sich ML maßgeblich auswirken.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine sinnvolle Anwendung des ML ist ein hinreichend großer Datensatz für die Lernphase – dies ist einer der Gründe warum ML, auch in der öffentlichen Wahrnehmung, insbesondere bei der Bild- und Videoauswertung genutzt wird.

4.3.1 Anwendung des Maschinellen Lernens in der Kerntechnik

Im kerntechnischen Umfeld wird ML in der Breite noch nicht als direktes Hilfsmittel genutzt, im Forschungsumfeld werden allerdings Anwendungsmöglichkeiten eruiert. Verwendung findet der Ansatz aber in Robotern und digitalen Realitäten, siehe Abschnitt 4.1 und Abschnitt 4.4.

Im Forschungsprojekt KernTrafo (Transformationskonzept für Personal von Kernkraftwerken im Rückbau, Förderkennzeichen 155S9419 (BMBF-Förderkonzept FORKA)) wurden Fragen untersucht, die das dynamische Anforderungspotenzial für das Personal in der Stilllegung betreffen. In diesem Projekt wurde ML eingesetzt, um ausgehend von unstrukturierten Daten und internen Datenbanken Kompetenzcluster zu identifizieren, mit denen notwendiges Wissen und Kompetenzen für den Abbau beschrieben werden können. Das daraus resultierende Anforderungsprofil wurde anschließend mit den Fähigkeiten der vorhandenen Mitarbeitenden abgeglichen. Das Forschungsprojekt ist zwischenzeitlich ausgelaufen, die Projektergebnisse wurden ausgewählten Unternehmen zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt /SEI 23/.

Die IAEA hat in einem aktuellen Bericht skizziert, inwieweit künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen derzeit und perspektivisch im nuklearen Sektor genutzt werden könnten /IAEA 22b/. Ein wesentliches Anwendungsfeld ist die Verwendung von ML zur automatischen Datenanalyse, insbesondere zur Erkennung von Anomalien. Auch für Drohnen mit hohem Automatisierungsgrad,

die z. B. für wiederkehrende Prüfungen oder Inspektionen genutzt werden, bieten sich ML-Methoden an.

Für wiederkehrende Prüfungen werden u. a. bildgebende Verfahren genutzt. Im Kontext der verlängerten Zwischenlagerung wird derzeit die Myographie, d. h. die Bildgebung mit Hilfe atmosphärischer Myonen, zur Behälter- und Inventarprüfung von Transport- und Lagerbehältern wie den CASTOR® V/19 aktiv diskutiert /BRA 21/. Derzeit setzen sich unterschiedliche Forschungsprojekte mit der Frage auseinander, inwieweit ML gewinnbringend für die die Bilderkennung im Rahmen der Myographie genutzt werden kann, beispielsweise zur Materialidentifizierung in Abfallbehältern /IAEA 22c/.

4.4 Digitale Realitäten – Virtuelle Realität und Erweiterte Realität

In den vergangenen zwei Dekaden haben sich Digitale Realitäten – insbesondere in Form der erweiterten (augmentierten) Realität (AR) und der virtuellen Realität (VR) – in vielen industriellen Bereichen etabliert. Die zugrundeliegenden Techniken haben sich rasch weiterentwickelt und zeichnen sich durch einen hohen Reifegrad aus.

Virtuelle Realität (*virtual reality*, VR) bilden realitätsnahe Umgebungen und Situationen vollständig digital ab. Veränderungen innerhalb dieser Umgebung und damit verbundene Auswirkungen sind somit rein digital und sind somit frei von realen Risiken. Aus diesem Grund eignet sich VR insbesondere für realitätsnahe Erprobungen und für Ausbildungszwecke. Der Benutzer kann diese virtuelle Realität visuell (z. B. 360° Monitore oder VR-Brillen) und ggfs. auch haptisch erfahren, Interaktionen sind mit Hilfe entsprechender Eingabegeräte möglich. Für eine möglichst gute Immersion wird die reale Welt in den meisten Fällen möglichst weitgehend ausgeblendet.

Ein wichtiges Konzept für einige VR-Anwendungen stellen digitale Zwillinge (*digital twin*, DT) dar. Hierbei handelt es sich um virtuelle Modelle (insbesondere von Prozesse und Objekten, z. B. Werkzeuge) von realen Gegenständen. Die digitalen Zwillinge werden oft mit mathematischen Modellen verknüpft, um das Original möglichst realitätsnah in der digitalen Umgebung zu simulieren. Der digitale Zwilling kann Informationen von Sensoren erhalten, z. B. von einem Gegenstück aus der realen Welt. Das reale Objekt kann somit in Echtzeit simuliert werden, wodurch Einblicke in die Leistung und mögliche Probleme gewonnen werden können.

Bei der erweiterten Realität (*augmented reality*, AR) besteht das Ziel darin, die unmittelbaren Informationen aus der realen Welt um synthetische Informationen (Visualisierungen oder Audioinformationen) zu erweitern. Der Benutzer ist also weiterhin Teil der unmittelbaren Realität und kann seine Umgebung sehen. AR-Anwendungen umfassen in der Regel die folgenden Komponenten:

- Mobile Geräte zur audiovisuellen Erfassung der Umgebung und zur kombinierten Abbildung der Umgebung und der zusätzlichen Inhalte (z. B. AR-Brille oder Handy/Tablet)
- Verbindung für die Datenübertragung
- Systeme zur Bereitstellung und Verarbeitung der Zusatzinformationen

Ein wichtiger Aspekt betrifft hierbei die computergestützte Identifizierung der Objekte in der aktuellen Umgebung, damit die AR-Anwendung eine Entscheidung hinsichtlich der zusätzlich abzubildenden Informationen treffen kann. Hierfür können z. B. Ortsinformationen (GPS-Koordinaten) in Verbindung mit ML/KI Algorithmen (Bildererkennung) genutzt werden.

Für VR-Anwendungen finden sich in der Industrie zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten, z. B.:

- Visualisierung und Simulation komplexer Prozesse und Abläufe mit dem Ziel, Effizienz und Produktivität zu erhöhen.
- Ausbildungszwecke, z. B. Bedienung komplexer Maschinen und Anlagen
- Prozessoptimierungen durch Simulation verschiedener Szenarien
- Technik- und Verfahrensoptimierungen mit Hilfe digitaler Zwillinge

Auch für AR-Anwendungen finden sich zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten, z. B.:

- Unterstützung bei Wartungs- und Reparaturarbeiten an Anlagen, z. B. in Form von Videotelefonaten mit interaktiven Elementen (z. B. Markierungen/Hervorhebungen durch einen entfernten Servicemitarbeiter) oder Abruf von zusätzlichen Informationen (z. B. Datenblätter)
- Fort- und Ausbildung, z. B. durch Visualisierung und Erklärung von Prozessen
- Optimierung von Laufwegen durch optische Vorgabe von Routen
- Intuitive Visualisierung von geplanten Änderungen, z. B. durch Einblendung neuer Anlagen an ihrer geplanten Sollposition

4.4.1 Anwendung Digitaler Realitäten in der Kerntechnik

VR-Lösungen können in der Kerntechnik insbesondere zu Trainings- und Schulungszwecken aber auch zu Prozessoptimierungen gewinnbringend eingesetzt werden. Insbesondere Großprojekte können von der Visualisierung profitieren und die damit verbundenen Prozesse und Werkzeuge optimieren. In der virtuellen Umgebung ist es möglich, Arbeitsabläufe so weit zu erproben und zu optimieren, dass die bei den tatsächlichen Arbeiten anfallenden Dosen minimiert werden können.

Aufgrund der einmaligen Randbedingungen spielt VR bei der Stilllegung des Kernkraftwerks Fukushima Daiichi eine besondere Rolle. Dort befindet sich im Forschungsverwaltungsgebäude ein 3D Projektionssystem, das u. a. von privaten Unternehmen für Entwicklungszwecke genutzt wird, beispielsweise um der Frage nachzugehen, inwieweit die geplanten Geräte und Werkzeuge für Stilllegungsmaßnahmen in die Reaktorgebäude eingeschleust werden können /MOR 24/. Auch zur Erprobung und Optimierung von Arbeitsabläufen zur Bergung havariierter Kernbrennstoffe werden VR-Anwendungen genutzt.

In der Kerntechnik sind hohe Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, die insbesondere bei AR-Anwendungen berücksichtigt werden müssen. So muss beispielsweise sichergestellt werden, dass die Nutzung einer AR-Lösung den Benutzer nicht so weit beeinflusst, dass Warnsignale gegebenenfalls nicht mehr wahrgenommen werden. Allerdings können auch hier AR-Anwendungen unterstützen, indem beispielsweise relevante Sicherheitsdaten dem Nutzer fortwährend als Zusatzinformation präsentiert werden. Gemäß KTA 3901 muss sichergestellt werden, dass die Anwendung vorhandene Kommunikationssysteme nicht stören darf. Zudem gebietet die SEWD-Richtlinie für den Schutz von IT-Systemen, dass Daten über die Struktur von kerntechnischen Anlagen grundsätzlich als vertraulich einzustufen sind – da für Teile dieser Daten absehbar ist, dass sie gewinnbringend für AR-Anwendungen genutzt werden können, müssen die AR-Systeme entsprechend geschützt werden. Ein weiteres wichtiges Kriterium für den Erfolg von AR-Anwendungen ist die Akzeptanz seitens der Nutzer. Die Akzeptanz steigt mit ergonomischen und angenehm zu tragenden Systemen, zudem müssen die zusätzlichen Funktionen auch subjektiv als Arbeits erleichterung wahrgenommen werden /LEN 22/.

In der Praxis können AR-Anwendungen z. B. für Reparatur-, Prüfungs- und Wartungsarbeiten sinnvoll eingesetzt werden. Externe Servicetechniker können das Geschehen virtuell verfolgen und den Monteur vor Ort auf unterschiedlichste Wege unterstützen, beispielsweise durch das Setzen von Markierungen. Auch ist es möglich, zusätzliche Informationen wie Dokumente des

Betriebshandbuchs oder des kerntechnischen Regelwerks einzublenden. AR-Anwendungen können auch gewinnbringend für kollaborative Projekte eingesetzt werden, beispielsweise wenn bauliche oder technische Veränderungen notwendig sind /LEN 22/.

4.5 Zusammenfassung

Viele aktuelle F+E Projekte umfassen Aspekte, die die Automatisierung von Prozessen im Allgemeinen oder Robotikanwendungen im Speziellen adressieren. Der in der Stilllegungspraxis derzeit genutzte Automatisierungsgrad ist gering, in der Regel werden die eingesetzten Roboter fernbedient oder ferngesteuert. Höhere Automatisierungsgrade sind insbesondere in der ex-situ Materialbearbeitung und dem Abfallmanagement zu beobachten.

Die Bauwerksdatenmodellierung ist ein etablierter Bestandteil aktueller Stilllegungsprojekte, allerdings beschränkt sich die Modellierung häufig zur Reduzierung des Aufwandes bei der Digitalisierung auf betroffene Raum- und Arbeitsbereiche. Die dabei generierten Modelle können auch im Kontext digitaler Realitäten genutzt werden, beispielsweise für Projektplanungen, die sich auf digitale Zwillinge stützen.

Maschinelles Lernen im Speziellen und künstliche Intelligenz im Allgemeinen wird z. B. für Roboter (Interpretation sensorischer Daten) genutzt. Wesentliche Aufgabenfelder sind derzeit Bilderkennung und die Auswertung größerer Datensätze. Es erscheint wahrscheinlich, dass diese Themen als Hilfsmittel auch in der Stilllegung mittelfristig an Bedeutung gewinnen werden.

5 Betrachtung von Trenn- und Dekontaminationstechniken im Entwicklungs- bzw. Prototypstadium mit perspektivischem Nutzen für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Innerhalb der kerntechnischen Branche ist Konsens, dass geplante Stilllegungsprojekte mit den zur Verfügung stehenden technischen Verfahren und Werkzeugen sicher und zuverlässig durchgeführt werden können. Ein grundsätzlich anderes Bild zeichnet sich für die Stilllegung havariierter Kernkraftwerke (zuvorderst sind hier Fukushima Daiichi und Tschernobyl aufzuführen) und komplexe Anlagen der Wiederaufarbeitung im internationalen Umfeld (z. B. Sellafield), für die entweder ein Innovationsbedarf besteht (z. B. Umgang mit Corium) bzw. Innovationen die notwendigen Arbeiten signifikant erleichtern und die Sicherheit erhöhen (z. B. Reduzierung der Exposition) würden. Wie in nahezu allen Industriezweigen, werden aber auch – trotz fehlender zwingender Notwendigkeit – für die regulären Stilllegungsprojekte diverse F+E Projekte mit dem Ziel der Prozessoptimierung durchgeführt, in deren Rahmen auch neue Verfahren entwickelt oder bestehende Verfahren signifikant weiterentwickelt werden.

Für diese Innovationen gibt es einige treibende Kräfte, zu diesen gehören u. a.:

- Reduzierung der maßnahmenbezogenen Personendosen, z. B. durch geringere Rüstzeiten, längere Standzeiten, reduzierten Personalbedarf, Fernsteuerung/Fernbedienung oder durch höhere Verfahrensgeschwindigkeiten
- Erhöhung der Sicherheit, z. B. durch eine effektive Reduzierung des Potenzials für Kontaminationsverschleppungen oder eine erhöhte Prozesssicherheit
- Effizientere Durchführung von Maßnahmen, z. B. erhöhte Prozessgeschwindigkeit, präzise Schnittführung oder höhere Standzeiten (geringere Kosten für Verbrauchsmaterial wie z. B. Diamantseile)
- Reduzierung von Sekundärabfällen, z. B. durch schmalere Schnittfugen, Wiederverwendung von Verbrauchsmaterial (z. B. beim Wasserstrahlabrasivverfahren) oder als Ergebnis von Verfahrensadaptionen
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, z. B. durch geringeren Personalbedarf, Reduzierung von Projektrisiken oder durch Reduzierung der Kosten (z. B. als Ergebnis eines geringeren Werkzeugverschleißes)

In diesem Kapitel werden einige dieser innovativen Verfahren bzw. Verfahrensmodifizierungen, insbesondere vor dem Hintergrund aktueller F+E Projekte in Deutschland (mit Unterstützung des Förderkonzeptes FORKA), in den Abschnitten 5.1 (Trennverfahren) und 5.2 (Dekontaminationsverfahren) zunächst vorgestellt und anschließend innovative Verfahren in Abschnitt 5.3. eingeschätzt.

5.1 Innovationen im Bereich der Trennverfahren

Innovative Trennverfahren adressieren insbesondere Optimierungsmöglichkeiten zur Reduzierung von Sekundärabfällen und Verbesserung bei der Bearbeitung unter bestimmten Randbedingungen. Zudem gehören zu den innovativen Verfahren auch solche, die zwar für vereinzelte Stilllegungsprojekte bereits genutzt wurden, für die aber eine weitreichende Etablierung noch nicht zu beobachten ist (z. B. aufgrund von i. A. zu hohen Sekundärabfallmengen). Einige Projekte versuchen solche Verfahren zu optimieren bzw. bestimmte Probleme zu lösen. In den folgenden Unterabschnitten werden einige F+E Tätigkeiten im Kontext innovativer Trennverfahren vorgestellt.

5.1.1 Laserstrahlschneiden

Das Laserstrahlschneiden ist industriell etabliert und findet auch im kerntechnischen Bereich bereits im Rahmen der Nachzerlegung Verwendung (siehe Abschnitt 3.2.1.1.4). Für die in-situ Zerlegung im kerntechnischen Bereich an Luft als auch unter Wasser befindet sich das Verfahren derzeit aber noch in der Etablierungsphase. Wesentliche Schwerpunkte aktueller F+E Projekte werden in den folgenden Unterabschnitten thematisiert.

5.1.1.1 LD-SAFE Konsortium

Das europäische F+E Projekt LD-SAFE (*Laser Dismantling Environmental and Safety Assessment*) verfolgt das Ziel, für das Laserschneiden eine Reifenachweis (TRL 7, siehe Abschnitt 5.3.1) zu erbringen, um so das Verfahren auch für das Trennen dickwandiger Reaktorkomponenten an Luft und unter Wasser zu etablieren /LDS 24/. Das LD-SAFE-Projekt ist ein Gemeinschaftsprojekt, das von den Mitgliedern des europäischen Konsortiums aus sechs europäischen Unternehmen (Onet Technologies CN (Frankreich), CEA (Frankreich), Equans „Energy Transition & Integrated Solutions“ (Belgien), Vysus Group (Schweden), Tecnatom S.A. (Spanien) und Institut de

Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN, Frankreich)) durchgeführt und von Onet Technologies koordiniert wird.

Im Rahmen des Vorhabens wurden Laserköpfe entwickelt, die für die Nutzung in anspruchsvollen Arbeitsbereichen angepasst wurden. Die (Festkörper-)Laser mit einer Leistung von etwa 10 kW erzeugen Licht mit einer Wellenlänge von etwa einem Mikrometer. Eine besondere Herausforderung zur Schadensvermeidung an Luft stellt der Umgang mit dem leistungsstarken Laserstrahl nach erfolgter Materialtrennung dar. Dies stellt unter Wasser aufgrund der Absorption im Wasser kein Problem dar. Im Vorhaben wurden des Weiteren die Wasserstoff- und Aerosolfreisetzung untersucht. Eine Besonderheit stellt die generische Sicherheitsbewertung für das Laserschneiden von Reaktorkomponenten dar, die im Rahmen des Vorhabens nach der Methodik der IAEA (siehe u. a. /IAEA 13/) entwickelt wurde /DAG 23/. Diese zielt darauf ab, leicht an zukünftige Endnutzerbedingungen angepasst werden zu können und den Genehmigungsaufwand zu verringern. Zudem wird im Rahmen des Vorhabens eine unabhängige Sicherheitsbewertung durch das IRSN vorgenommen.

5.1.1.2 Unterwasserlaserstrahlschneiden

Seit den 1980er Jahren wurden Untersuchungen zum Unterwasserlaserstrahlschneiden durchgeführt. Die Bedeutung des Laserschneidens nahm mit der erhöhten Verfügbarkeit von wesentlich flexibleren Festkörperlasern, die mit Glasfasern anstelle von Spiegeln zur Strahlführung verwendet werden, zu. Die verwendeten Systeme nutzen hierbei Gas, um eine Trockenzone auf der Metalloberfläche zu erzeugen. Zu den größten Vorteilen des Unterwasserlaserstrahlschneidens zählen:

- Trennprozess und Verfestigung (Schlacke) an Ort und Stelle (lokaler Prozess)
- Verringerung der Strahlenbelastung durch Verwendung einer Wasserabschirmung
- Einschluss des größten Teils der Radioaktivität im Wasser
- Externe Demontageeinrichtung nicht zwingend erforderlich

Neueste Untersuchungen konzentrieren sich auf das Trennen größerer Materialstärken und Optimierungen im Hinblick auf die Begrenzung der Menge an Sekundärabfällen, siehe z. B. /LAR 17/, /LES 21b/. Die Trennleistung nimmt grundsätzlich mit zunehmender Materialstärke ab. Der wesentliche Grund hierfür ist, dass es bei dicken Werkstücken aufgrund des Auftriebs schwierig ist,

eine lokale Trockenzone zu erzeugen, in der sich der Laser über weite Strecken bewegen kann, ohne vom Wasser absorbiert zu werden. Für den praktischen Einsatz sind daher fortschrittlichere Unterwasserschneidetechniken erforderlich, um dicke Werkstücke mit Stärken von 60 mm oder mehr zu schneiden /SHI 20/.

Im Gegensatz zu konventionellen Trennverfahren ermöglicht das Laserschneiden eine Vielzahl von Schnittfugenqualitäten. Durch Modifikation der angewandten Prozessparameter ist es möglich, aufgeschmolzenes Schnittfugenmaterial (Schlacke) auf der Rückseite des Werkstücks zu binden. Gegenwärtig werden Schnitttiefen von etwa 70 mm bis 150 mm mit 6 kW bis 9 kW Lasern erreicht, /SHI 20/, /SHI 18/. Im Rahmen des Forschungsvorhabens AZULa (Automatisierte Zerlegung von Reaktordruckbehältereinbauten mit Hilfe von Unterwasser-Lasertechnik) am Laser Zentrum Hannover wurden die Charakteristiken der entstehenden Schnittfugen und Schlacke unter Variation der Prozessparameter und der Verwendung von Luft als Schneidgas untersucht /LES 21/.

In den Untersuchungen am Laser Zentrum Hannover konnte gezeigt werden, dass für Edelstahl (Werkstoff 1.4301) mit 3 mm Stärke hohe Schneidgasströme zu dünnen Schnittfugen mit geringem Schlackenanteil führen, während niedrige Gasströme das Gegenteil hervorrufen. Aufgrund der anhaftenden Schlacke ist der Gewichtsverlust in letzterem Fall deutlich geringer. Neben dem (grundsätzlich wünschenswerten) geringeren Gewichtsverlust führen niedrige Gasströme auch zu einer geringeren Ausbreitung von freigesetzten Partikeln im umgebenden Wasser und in der Luft, was zu einem geringeren Filterungsaufwand führt. Im Vergleich zu konventionellen Methoden, wie dem Bandsägen, wurde der Gewichtsverlust des Werkstücks um bis zu 95 % reduziert. Zircaloy der gleichen Stärke wies in den Untersuchungen ein ähnliches Verhalten auf, wobei die hier betrachteten Schneidegeschwindigkeiten keinen Effekt auf den Gewichtsverlust oder die Oxidationsneigung zeigten /LES 21/.

Am *Korea Atomic Energy Research Institute* wird erwartet, dass mit einem Laser mit einer höheren Leistung von 20-30 kW eine Dicke von 100 mm unter Wasser mit höherer Geschwindigkeit geschnitten werden kann. Diese liegt für einen 9 kW Laser bei etwa 7 mm/min. Darüber hinaus wird erwartet, dass ein solcher Hochleistungslaser sogar 200-300 mm dicke Werkstücke unter Wasser schneiden kann. Dies würde das Laserschneiden für die meisten Strukturen von Kernkraftwerken ermöglichen /SHI 20/.

5.1.1.3 Fernbedientes, robotergestütztes Laserstrahlschneiden

Für die Stilllegung der kerntechnischen Anlage Sellafield, England, werden derzeit neue Konzepte zum fernbedienten Laserstrahlschneiden (in-situ und ex-situ) von kontaminierten Metallteilen erforscht. Dazu gehören:

Ex-situ Zerlegung von Abfallbehältern in der *Skip Size Reduction Facility* (SSRF)

Zur Abfallminimierung werden in der SSRF in einem eingehausten Bereich mit angeschlossenem Lüftungssystem Abfallbehälter mittels eines wassergekühlten 10 kW Ytterbium Lasers geschnitten. Das zu schneidende Objekt kann mithilfe eines Handhabungsroboterarms und eines Drehtisches bewegt werden. Nach dem Einbringen eines Behälters wird ein vollständiger 3D-Laserscan des Behälters durchgeführt, um zu prüfen, ob der Behälter mit dem Standardmodell übereinstimmt bzw. innerhalb der Toleranz liegt. Sobald dies bestätigt ist, wird die Schneidesequenz eingeleitet. Ein Magnetgreifer wird vom Handhabungsroboter eingesetzt, um das geschnittene Stück zu halten und es durch eine einziehbare Tür in einen Abfallbehälter zu befördern. Danach durchläuft der Handhabungsroboter eine Reinigungssequenz mittels Absaugung /HOP 22/.

Ex-situ Zerlegung von Handschuhkästen am *Alpha Active Demonstrator* (AAD)

Der ADD dient der Zerkleinerung von Handschuhkästen. Bezüglich der Einhausung, des Lüftungssystems und dem grundlegenden ex-situ Konzept weist die Anlage Ähnlichkeiten zur SSRF auf. Herausforderungen für das Zerlegen der Handschuhkästen stellen deren Verschiedenheit und die hohe Alphakontamination dar. Die Handschuhkästen müssen zur Volumenreduzierung (Einbringen in 200-Liter-Fässer) in viele Teile zerkleinert werden. Diese Zerkleinerung stellt für die Abfallbehandlung eine Herausforderung dar. Da Handschuhkästen in der Regel aus unmagnetischen Edelstahl-Sorten bestehen, ist der für das SSRF verwendete Magnetgreifer nicht anwendbar /HOP 22/.

Bevor eine Handschuhbox in den Schneidebereich eingebracht wird, wird ein Handlaserscan durchgeführt. Die erzeugten LIDAR-Daten werden für die Generierung eines 3D-Modells der Box genutzt, auf dessen Grundlage ein detaillierter Schnittplan erstellt wird. Der Schnittplan berücksichtigt die Aufrechterhaltung der Steifigkeit, die Richtung der fallenden Teile und die Ableitung der Sekundärabfälle. Der Handschuhkasten wird dann in den Schneidebereich eingebracht und auf dem Schneidetisch eingespannt, bevor die Schnittfolge ausgeführt wird. Verwendet wird ein

sechs-achsiger Roboterarm für den Einsatz des Laserschneidkopfes, sowie ein Drei-Achsen-Schneidetisch, so dass das System über neun Freiheitsgrade verfügt mit dem auch komplizierte Schnitte möglich sind. Die geschnittenen Teile werden im Abfallsammelsystem aufgefangen und regelmäßig in eine bereitstehende Trommel befördert. Bei Bedarf wird eine Raumreinigung durchgeführt, um die Kontaminationsrate zu beschränken und abgefallene Schnittteile aufzufangen /HOP 22/.

In-situ Fernzerlegung in unzugänglichen Bereichen mithilfe von Lasersnake

Die *LaserSnake* kombiniert Laserschneiden mit einem Schlangenarmroboter. Dieses System eignet sich für Trennarbeiten in beengten, unzugänglichen und unübersichtlichen Arbeitsbereichen. Der Schlangenarm, der Laser und die zugehörige Infrastruktur werden außerhalb des kontaminierten Bereichs installiert. Der Zugang zum Arbeitsbereich kann z. B. über Wanddurchbrüche erfolgen.

Die *LaserSnake2* nutzt einen 5 m langen, mit Überdruck beaufschlagten Gelenkarm, in dessen Mitte sich der optische Leiter und das Prozessgas befinden. Der Schlangenarm ermöglicht sehr flexible Bewegungen und Richtungsänderungen, was insbesondere in unübersichtlichen Umgebungen (z. B. in Rohrleitungen) von Vorteil ist, um an das zu trennende Werkstück zu gelangen. Der eingesetzte Laser hat eine Leistung von 5 kW. Mit dieser Leistung war es möglich schwer zugängliche Metallteile mit einer Dicke von bis zu 40 mm zu schneiden /HOP 22/.

5.1.2 Wasserstrahlschneiden

Wie in Abschnitt 3.2.1.2.5 beschrieben, fällt beim Wasserabrasivstrahlschneiden als Sekundärabfall eine Mischung aus verbrauchten Abrasivpartikeln und (radioaktiven) Partikeln aus der Schnittfuge an. Die hohe Menge an Sekundärabfall beim Einsatz dieser Trennverfahren stellt einen limitierenden Faktor für den ökonomischen Einsatz in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen dar und schränkt das Anwendungsfeld ein.

Gegenstand aktueller Forschung am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des KIT ist es daher, den Umgang mit den anfallenden Sekundärabfällen für das Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidverfahren (WASS) insoweit zu verbessern, dass ein ökonomischer Einsatz dieser Technik im Rückbau wahrscheinlicher wird – ein Umsetzungsansatz ist in /HEN 21/ beschrieben. Es wird aufgezeigt, wie in Kombination verschiedener Prozessschritte die

(magnetischen) Metallpartikel aus der Schnittfuge von den Abrasivpartikeln getrennt werden können, um im späteren Anwendungsfall das Volumen des anfallenden Sekundärabfalls zu reduzieren und um eine Abrasivfraktion erneut für das Trennen zu nutzen. Hierzu wurde das Gemisch zunächst charakterisiert, darauf aufbauend ein Separationsverfahren entwickelt und abschließend die Effizienz des Verfahrens an einem Teststand validiert /HEN 21/. Das Prinzip ist in Abb. 5.1 dargestellt.

Der Großteil der Abrasivpartikel bleiben nach dem Trennen intakt, nur wenige Partikel zerbrechen beim Auftreffen auf die Schnittfuge. Da eine ausreichende kinetische Energie für einen Beitrag zur Schnittwirkung notwendig ist, sind nur größere Abrasivpartikel sinnvoll wiederzuverwenden. Die Abtrennung kleiner Schleifmittelteile und großer Stahlpartikel aus der Schnittfuge ergeben in der wiederzuverwendenden Fraktion eine ähnliche Korngrößenverteilung und Zusammensetzung wie bei frischem Schleifmittel /HEN 21/.

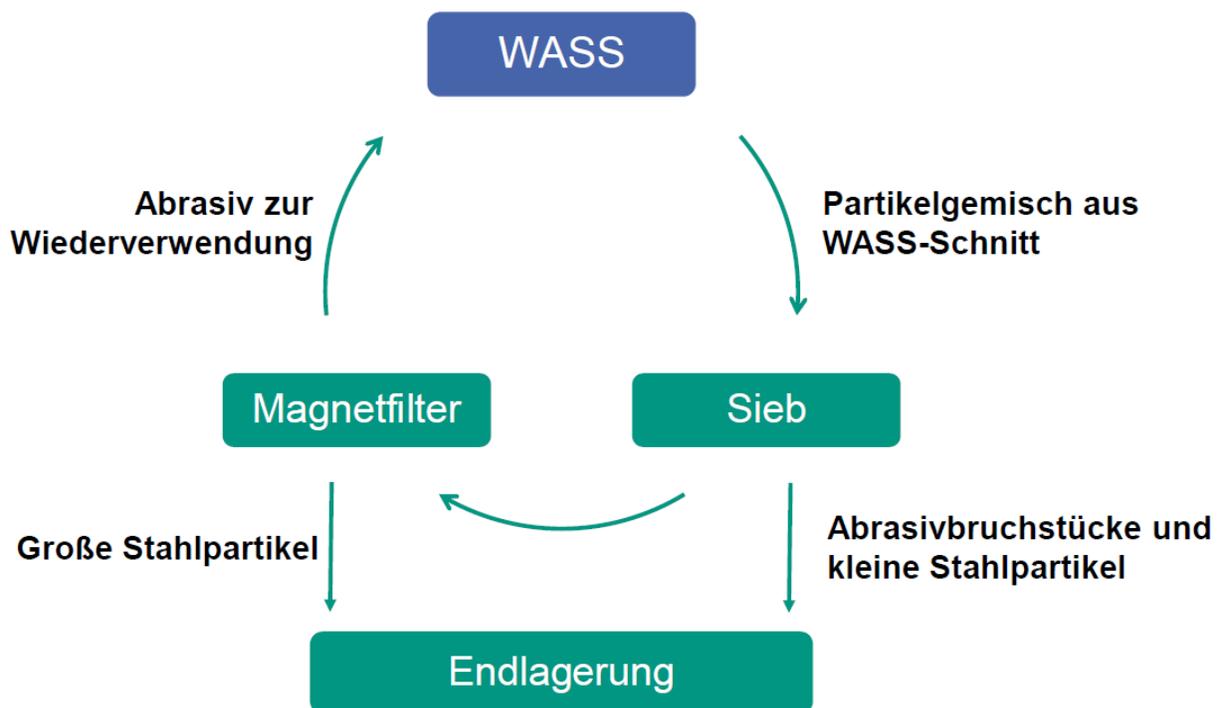


Abb. 5.1 Prinzip der Abscheidung von Stahl/Abrasivpartikeln und der Wiederverwendung von Abrasivmitteln (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /KRA 23/

Der erste Schritt ist die Abtrennung einer Fraktion feiner Schleifmittelbruchstücke und Stahlpartikel, die für die Wiederverwendung beim WAS(S)-Schneiden zu klein sind /KAN 02/. Dies

geschieht durch Nasssiebung, wobei ein gewisser Anteil des verwendeten Schleifmittels das Sieb passieren kann, da die Partikelgröße kleiner als die gewählte Maschenweite ist. Der Hauptanteil des Partikelgemischs besteht aus intakten Schleifpartikeln, die im Sieb gesammelt werden, es enthält jedoch auch (größere) Stahlpartikel aus der Schnittfuge. Da das Siebverfahren nur hinsichtlich der Partikelgröße selektiv ist, muss ein zusätzlicher Trennschritt folgen, um große Stahlpartikel aus dem Gemisch zu entfernen. Zu diesem Zweck wird ein Magnetfilter eingesetzt, siehe Abb. 5.2. Durch diesen zusätzlichen Separationsschritt mit Hilfe eines kontinuierlichen Magnetfilters kann der Stahlanteil im Gemisch minimiert werden. Nach dem Durchlaufen der Nasssiebung und des Magnetfilters erhält man eine gefilterte Siebung, die hauptsächlich aus intakten Schleifpartikeln besteht, welche in einem nachfolgenden Trennzyklus wiederverwendet werden können /HEN 21/.

Das Verfahren wurde an einem Teststand unter Verwendung nicht radioaktiver Materialien erprobt. Dieser Teststand sollte dabei vier Anforderungen erfüllen:

- Verringerung der Sekundärabfälle durch eine Kombination von Trennschritten
- Minimierung des verbleibende Stahlgehalts im Gemisch als Vorbedingung für die Wiederverwendung
- Anforderungen für die Nutzung in einer kerntechnischen Anlagen müssen erfüllt werden. Dazu gehören die Konstruktion des Prüfstands, sowie die verwendeten Komponenten, Werkstoffe, Verbindungen und Armaturen, die den Anforderungen der nuklearen Sicherheit entsprechen müssen.
- Der Prüfstand muss so kompakt sein, dass er in einem Handschuhbox installiert werden kann.

In den Experimenten wurden Abscheidegrade von mehr als 98 % erreicht, der verbleibende Stahlgehalt betrug weniger als 0,05 Gew.-%, was auf Stahleinlagerungen an den Schleifkörpern oder auf unvollständige Abscheidung zurückzuführen ist. Die Feinfraktion (Schleifmittelfragmente, Stahlpartikel) beträgt ca. 25 bis 50 Gew.-% des Ausgangsmaterials. Das gefilterte (wiederverwendende) Abrasivmittel beläuft sich somit auf etwa 50 bis 75 Gew.-% des Ausgangsmaterials, eine Reduzierung des Sekundärabfalls um den Faktor zwei bis vier erscheint somit möglich /HEN 21/.

Diese Verringerung der Sekundärabfälle durch den beschriebenen Ansatz birgt aus Sicht der an dem Projekt beteiligten Forschenden ein großes Potenzial zur Senkung der Entsorgungskosten. Eine Untersuchung des gegenwärtigen Trennverfahrens unter Verwendung kontaminierten Stahls ist im Folgeprojekt geplant /HEN 21/. Durchgeführte wirtschaftliche Betrachtungen kommen zu dem Ergebnis, dass – unter der Annahme, dass für eine Zerlegung von RDB-Einbauten mit dem WAS-Verfahren in einem Umfang von 100 Mg etwa 100 Mg Sekundärabfall erzeugt werden würden – die Sekundärabfälle durch die Nutzung der Separationsanlage um etwa 20 % reduziert werden könnten /KRA 21/.

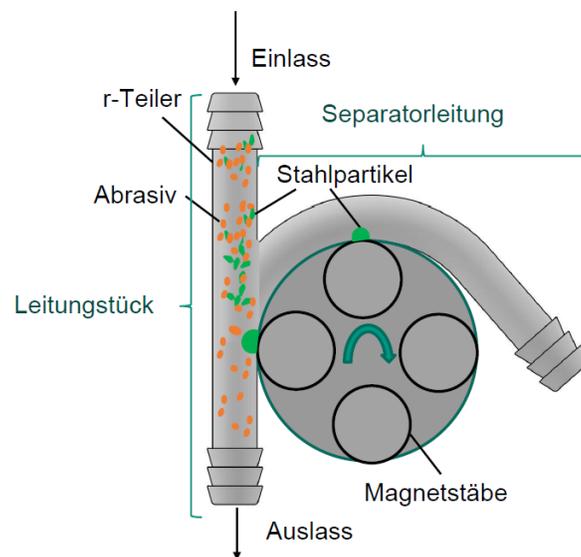


Abb. 5.2 Funktionsprinzip des kontinuierlichen Magnetfilters (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /KRA 23/

Nach Durchlaufen des Nasssiebes strömt das Gemisch von oben nach unten. Über eine Welle werden vier Magnetstäbe angetrieben und drehen sich im Uhrzeigersinn. Stahlpartikel werden angezogen und über den sogenannten r-Teiler abgetrennt.

Die Entwickler sehen weiteres Verbesserungspotenzial hinsichtlich des kontinuierlichen Magnetfilters, beispielsweise durch Anpassung der Form oder Nutzung mehrerer, parallel betriebener r-Teiler.

5.1.3 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schleifen (CAMG)

Derzeit wird dem CAMG-Verfahren (siehe Abschnitt 3.2.1.1.6) einen technologischen Reifegrad (Begriffserläuterung: siehe Abschnitt 5.3.1) im Bereich 4 bis 7 zugeordnet, siehe z. B. /GRS 23a/.

Im Rahmen eines FORKA Vorhabens³⁰ beabsichtigen die Verbundpartner, bestehend aus dem Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover und der EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH, die Etablierung und Weiterentwicklung des Verfahrens bis zu einem TRL Wert von mindestens acht. Zwei wesentliche Aspekte des Vorhabens betreffen die Aufbringung von verschleißfesten Schneidwerkstoffen auf die Elektrode mittels additiver Fertigung und die Optimierung der Stromübertragung auf die rotierende Elektrode.

Das Vorhaben nutzt Gallium anstelle von Quecksilber für die Stromübertragung auf die rotierende Scheibenelektrode. Im Gegensatz zu Quecksilber ist Gallium weder giftig (Gefahrenkennzeichnung T) noch umweltgefährdend (Gefahrenkennzeichnung N), so dass das Verfahren auch außerhalb geschlossener Wasserbecken (z. B. für *off-shore* Anwendungen) genutzt werden könnte /HAS 23/. Zudem weist Gallium im Vergleich zu Quecksilber eine bessere elektrische Leitfähigkeit auf.

Bei der Optimierung der Elektroden wird insbesondere eine Reduzierung der Nebenlichtbögen, die sich an den Seitenflächen der Elektrode ausbilden, beabsichtigt. Hierfür wurde zunächst die Geometrie der Elektrode derart modifiziert (stufenartig), dass die scheibenförmige Elektrode im Außenbereich eine größere Dicke aufweist. Der Elektrodenwerkstoff hat bestimmte Anforderungen zu erfüllen, dies sind neben einer Verschleißbeständigkeit (mechanisch als auch thermisch) eine hohe Schmelztemperatur und eine gute elektrische Leitfähigkeit. Am Institut für Werkstoffkunde wurden mehrere geeignete Werkstoffe identifiziert, z. B. verschleißfeste Stähle, Nickelbasiswerkstoffe oder Kupferbasiswerkstoffe. Für die Herstellung von Elektroden mit einem Durchmesser von 220 mm wurde ein additives Verfahren (*Laserauftragschweißen*) genutzt. Die Dicke des Grundmaterials der Trennscheibe beträgt 2,5 mm, im vorderen modifizierten Bereich steigt die Dicke auf etwa 4 bis 5 mm an. Für eine 12 mm dicke Stahlschicht wurden erreichbare Schnittlängen einer einfachen Elektrode (Kupferbasiswerkstoff CuAl8) und einer modifizierten Elektrode (Einsatzstahl 16MnCr5 mit seitlich aufgetragenem Kupferbasiswerkstoff CuAl8) bestimmt, siehe Abb. 5.3. Für die einfache Elektrode reduzierte sich der Elektrodendurchmesser von 220 mm auf etwa 200 mm bereits nach einer Schnittlänge von 800 mm, während dies für die modifizierte

³⁰ Vorhaben: „Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogenrennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen“, Förderkennzeichen 15S9430B, Laufzeit 1. Juni 2021 bis 31. Mai 2024.

Elektrode erst nach etwa 4.500 mm beobachtet wurde. Dies verdeutlicht, dass mit den vorgenommenen Elektrodenmodifizierungen der Verschleiß reduziert werden konnte, wodurch grundsätzlich höhere Standzeiten möglich sind.

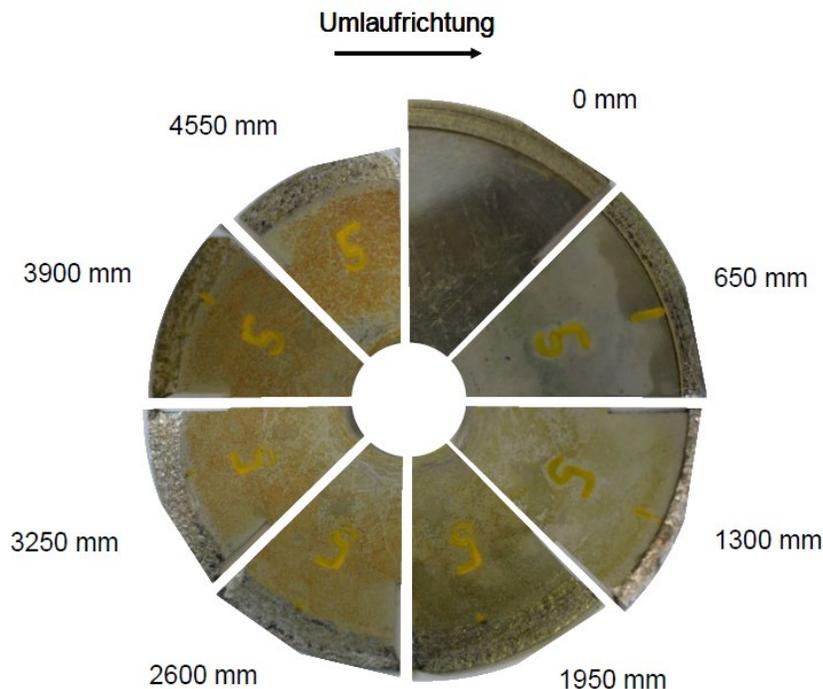


Abb. 5.3 Verschleiß einer modifizierten CAMG Elektrode mit zunehmender Schnittlänge (Bildquelle: Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, Abteilung Unterwassertechnikum Hannover) /SCH 23b/ec

RAIs Basiswerkstoff wurde Einsatzstahl 16MnCr5 als Werkstoff genutzt. Mittels additiver Fertigung wurde im Außenbereich der Elektrode Kupferbasiswerkstoff CuAl8 aufgetragen. Gut zu erkennen ist der mit der Schnittlänge zunehmende Verschleiß. Die trennende Materialstärke betrug 12 mm.

5.1.4 Rohrintrenner

Ziel eines weiteren Verbundvorhabens im Rahmen des Förderprogrammes FORKA war die Entwicklung einer innovativen Rohrintrennvorrichtung mit großem Anwendungsspektrum im Hinblick auf Rohrdurchmesser, Wandstärke und Material. Laut /BAC 21a/ ist zusätzlich zum eigentlichen Trennen und Abtransportieren diverser Rohrleitungen, eine Möglichkeit für einen vorlaufenden Reinigungsvorgang beabsichtigt. Die beim Trennvorgang anfallenden Späne sollen kontinuierlich abgesaugt werden. Der Rohrintrenner soll die Demontage schwer zugänglicher Rohrleitungen (bspw. einbetonierte, nicht auf voller Länge überbohrbare Leitungen) sowohl an

Luft als auch unter Wasser ermöglichen. Die Bedienung als auch das Einbringen in das zu trennende Rohr soll manuell oder fernhandiert erfolgen können. Das System sei dabei so konzipiert, dass es nach einer Anwendung dekontaminiert werden könne und grundsätzlich universell genutzt werden kann. Hierin sehen die Entwickler einen entscheidenden wirtschaftlichen Vorteil, da viele Arbeitsstunden für die Entwicklung und Konstruktion spezieller Einzellösungen eingespart werden könnten /BAC 21a/.

Die vorgesehenen Trennarbeiten des Rohrintrenners werden bislang häufig mit Wasser-Ab-
rasiv-Schneidsystemen, Rohraußenschneidern oder Rohrintenschneidern mit diversen Nachteilen durchgeführt. Hierzu zählen:

- Keine mobile Einsatzmöglichkeit
- Erschwerte Zugänglichkeit
- Entwicklung von Spänen und Stäuben während des Trennprozesses
- Kein integriertes Antriebs- und Haltesystem
- Hohe Rüst- und Montagezeiten
- Bisherige Rohrintrenner nur für Spezialanwendungen nutzbar

Beispiele für die Nutzung von Rohrintrennern sind das Zerlegen von Steuerstabführungsein-
satzstützen des oberen Kerngerüsts im Kernkraftwerk Philippsburg /BRA 23/ oder das Abtren-
nung von Steuerstabantriebsrohren im schwedischen KKW Barsebäck. Bei letzterem waren die
Antriebsrohre in einem Bereich hoher Dosisleistung möglichst nah an der Kalotte des RDB zu
schneiden. In einem Prozess sollten hierbei die Antriebsrohre abgetrennt, verpackt und abtrans-
portiert werden. Hierzu entwickelte man ein Schneidfutter, das an der Spitze einer Lanze geführt
und das im Innern des Antriebsrohrs axial verpresst wird /BRA 23/, /CRA 22/.

Der universelle Einsatz eines Rohrintrenners böte somit das wirtschaftliche Potenzial, Ent-
wicklungskosten für Spezialfälle einzusparen. Das Konzept nach /BAC 21a/ sieht dazu zunächst
ein zentrales Stützrohr vor, siehe Abb. 5.4. An diesem Stützrohr werden Rundplatten angebracht,
die sowohl die Lagerungen für die Antriebsgestänge enthalten also auch Befestigungsmöglichkei-
ten für die Spannmechanik bieten. Der Spannmechanismus besteht aus drei radial angeordneten
Gestängen mit Spannpratzen, welche synchron über Gewindespindeln angetrieben werden. So-
mit wäre eine Zentrierung als auch eine hohe Einsatzbandbreite für verschiedene

Rohrdurchmesser möglich. An der hinteren Halteplatte ist die Antriebseinheit mit den Motoren und der Antrieb für den Spannmechanismus montiert /BAC 21a/.

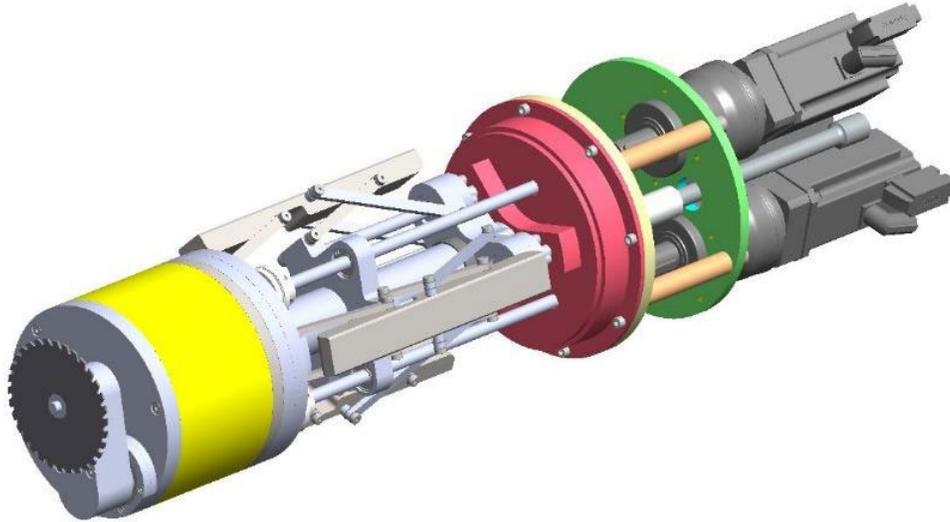


Abb. 5.4 Schematisches Konzept des Rohrinnentrenners (Quelle: Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH) /BAC 21a/

Nach ersten Tests sollen im Laufe weiterer Testreihen verschiedene Parameter optimiert und das am besten geeignete Trennwerkzeug zur Rohrinnentrennung identifiziert werden. Im Anschluss soll die Praxistauglichkeit des Rohrinnentrenners an einem Versuchstand des KIT geprüft werden /BAC 21a/.

5.1.5 Verbesserungen für das Seilschleifen

Obschon das Seilschleifen (siehe Abschnitt 3.2.1.2.4) zu den etablierten technischen Trennverfahren gehört und die Verfahrenstechnik durch die Vielzahl industrieller Anwendungen (auch außerhalb der Kerntechnik) sehr ausgereift ist, können mehrere F+E-Tätigkeiten beobachtet werden, die sich mit Verfahrensverbesserungen auseinandersetzen. Das Verfahren wird in der Anwendung oftmals aufgrund der Seilkosten (Verschleißteil) als teures Verfahren wahrgenommen, weswegen sich einige Anstrengungen auf die Erhöhung der Standzeiten bzw. eine Verschleißreduzierung konzentrieren.

Das FORKA-Projekt SiebSeil („Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie“, Laufzeit: 1. Juni 2021 bis 31. Mai 2024) untersucht unterschiedliche Ansätze zur

Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Seilschleifwerkzeugen für das Trennen von Stahlstrukturen. Bei dem Projekt wird ein Siebdruckverfahren genutzt, um mehrschichtige Seilschleifsegmente mit deterministischer Kornanordnung herzustellen. Basis für diesen Ansatz bilden frühere Arbeiten, bei denen nachgewiesen werden konnte, dass sowohl Prozesskräfte als auch Prozesstemperaturen durch eine regelmäßige Kornanordnung reduziert werden könnten. Kinematische Simulationsstudien mit Hilfe einer Materialabtragssimulation wurden zur Werkzeugevaluation genutzt, entsprechende Ergebnisse (z. B. optimierte Anordnung der Schleifkörner) dienen als Basis für die Entwicklung von Prototypen /DEN 23a/.

Im FORKA-Projekt ProSeil („Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung (ProSeil)“, Laufzeit: 01. Oktober 2020 – 30. September 2023) wurden zunächst thermomechanische Zusammenhänge zwischen Werkstück, Seilschleifwerkzeug und Umgebung – näher untersucht, um ein besseres Verständnis des Schleifprozesses zu erhalten. Gerade beim Trennen von Stahlbauteilen ist die thermische Belastung der Gummiummantelung ein entscheidender Faktor für die Standzeit. Anschließend wurde ein Seilschleifwerkzeug mit einer Druckluftkühlung erweitert und modellierte Betrachtungen der Kühlleistung mit empirischen Werten aus Schleifversuchen verglichen. Durch das angepasste Kühlsystem wurde in diesem Projekt eine geringe Erhöhung der Standzeit um etwa 16 % beobachtet /DEN 23b/.

5.2 Innovationen im Bereich der Dekontaminationsverfahren

Zu den innovativen Verfahrensansätzen gehören u. a. die Laserverfahren zur Dekontamination von Metalloberflächen. Das Verfahren selbst wird im konventionellen Bereich, z. B. zur Entfernung von Beschichtungen, seit einigen Jahren genutzt. Gerade international gibt es zudem ein Interesse an Verfahren für die Dekontamination von Böden/Erdreich. Zudem existieren Lösungen für ausgewählte Dekontaminationsaufgaben und Weiterentwicklungen etablierter Verfahrensansätze. Auch die Automatisierung bzw. Autonomisierung stellt einen wichtigen Aspekt für innovative Verfahrensansätze dar, insbesondere für Dekontaminationsaufgaben im Rahmen der (ex-situ) Materialbearbeitung. In den folgenden Unterabschnitten werden einige F+E Tätigkeiten im Kontext innovativer Dekontaminationsverfahren vorgestellt.

5.2.1 Laserdekontaminationsverfahren

Für eine Einschätzung der zukünftig im Bereich der Stilllegung eingesetzten technischen Verfahren befragte das KIT 2017 mittels eines anonym zu beantwortenden Fragebogens mehrere Experten auf dem Gebiet der Stilllegung /HÜB 17/. Die Teilnehmer der Umfrage schätzen den Bedarf an neuen technischen Verfahren für Dekontaminationszwecke im Vergleich zu Trennzwecken etwas größer ein, insbesondere hinsichtlich der Verwendung von Lasern für Dekontaminationszwecke. Hierzu heißt es:

„Die derzeit verwendeten Dekontaminationstechnologien seien weitestgehend ausgereift. Es würden dennoch Bemühungen unternommen, um den Prozess effizienter zu gestalten. Einerseits werde versucht, die Personalkosten weiter zu senken. Bei größeren Flächen könnten beispielsweise moderne Wandfräsen eingesetzt werden. Dies könne auch fernhantiert geschehen, wodurch die Dosisleistung des Personals weiter minimiert würde. Andererseits würden auch neue Dekontaminations-Technologien erforscht. Ein solches Verfahren sei die Dekontamination mittels Laser. Ein Großteil der befragten Experten sieht in der Technologie ein zukünftiges Potential. Bis die Technologie aber ausgereift sei, würden noch einige Jahre vergehen. Das Verfahren sei zurzeit zu leistungsschwach und besäße eine zu geringe Abtragsrate. Außerdem sei die Anlage sehr teuer und deren Einsatz aufwändig. Es wäre möglich, dass sich die Technologie zunächst nur bei Spezialanwendungen durchsetzen wird.“ (Quelle: /HÜB 17/)

Im Bericht *„R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities“* der OECD/NEA /OECD 14/ aus dem Jahr 2014 werden aktuelle Herausforderungen beim Abbau und der Dekontamination im Verlauf der Stilllegung und mögliche Anwendungsgebiete für neuere Innovationen aus dem technischen, wie auch wissenschaftlichen und forschenden Bereich diskutiert. Anhand mehrerer Beispiele wird der Stand von Wissenschaft und Technik bei der Dekontamination von Oberflächen mittels Laser aufgezeigt. Anhand der Beschreibung dieser Systeme kommt man zu der Einschätzung, dass diese für eine Anwendung im Kernkraftwerk bereit oder fast bereit seien. So hat beispielsweise die U. S. Navy einen Laser zur Ablation von Farbeschichtung und zum Entlacken von Stahl getestet. Die Laser deckten einen ausreichende Oberflächenbereich ab, verfügten über ein Vakuumsystem zum Auffangen von Dämpfen und partikelförmigen Verunreinigungen und schienen für die Fernhantierung anpassbar zu sein. /OECD 14/ Ein weiteres Beispiel für den Stand der Technik ist die interne Forschungs- und Entwicklungsarbeit von EWI zum laserbasierten Entfernen von Beschichtungen. Der Großteil dieser Arbeit wurde bislang an

Flugzeugbeschichtungen auf dünnen Aluminiumsubstraten durchgeführt. Es wurden jedoch auch einige Arbeiten an Stealthbeschichtungen, an Beschichtungen für die Schifffahrt und an Substraten aus Kohlefaserverbundwerkstoffen durchgeführt. Das System entferne die Beschichtung oder das Substrat und fang die Dämpfe in einer Abzugshaube auf. Im Jahr 2010 testete das EWI im Laserlabor das Abtragen einer mehr als 12 Jahre alten Epoxidbeschichtung von Betonböden. Die Epoxidfarbe wurde mit einem 15 kW-Faserlaser verdampft und durch ein Absaugsystem geleitet. Neben weiteren Testanwendungen und kommerziellen Entwicklungen im Luftfahrtbereich gab es ebenso mehrere Bestrebungen die Anwendung der Laserdekontamination mittels Robotern zu automatisieren, so soll beispielsweise das *Robotic Automated Coatings Removal System* (RACRS) von GLC (*General Lasertronics Corporation*), das sich im Jahr 2014 in der Entwicklung befand, die automatische Entlackung eines ganzen Flugzeugs vornehmen kann.

Neben dem Entfernen von Farbschichten wurden Entwicklungen zum Dekontaminieren von Betonoberflächen im Bereich der Kerntechnik angestoßen. Das in Cambridge ansässige TWI wurde von der britischen Behörde für die Stilllegung von Kernkraftwerken mit der Entwicklung von Verfahren zum Abtragen von Beton mittels Laser beauftragt. Bei der Bearbeitung wird der Laserstrahl auf die Oberfläche des Betons gerichtet und seine Energie absorbiert, wodurch die Betonmatrix und Zusätze erhitzt werden. Die Ausdehnung des Wasserdampfes, der sich wahrscheinlich sowohl in der Matrix als auch in den Zusätzen befindet sowie die unterschiedliche Ausdehnung zwischen Zusätzen und Matrix, führt dazu, dass der Beton aufbricht und eine raue verschorfte Oberfläche zurückbleibt. An der technischen Universität Dresden wurde in Versuchen zur Dekontamination von Betonoberflächen eine Flächenabtragsleistung von ca. 2,3 m²/h erzielt. Mit einer kontinuierlichen Laserleistung von 10 kW konnten an kalzitischen, quarzitäischen und Mischbeton mit Zuschlagstoffen von 4 mm bis 16 mm Korngröße Abtragtiefen von 1 bis 5 mm erzielt werden /KON 13/.

AREVA hat Forschungsarbeiten zur Partikelgröße und -verteilung in Aerosolen durchgeführt, die durch Laserablation erzeugt werden. Diese Untersuchungen sollten bei der effizienten Gestaltung von Ablufferfassungssystemen helfen, um Sekundärabfälle im Zusammenhang mit dem Abtragen von Laserabscheideschichten zu minimieren. Die Autoren kommen zu dem Fazit, dass derzeit fortschrittliche Systeme zur Verfügung stehen, die für weitere Feldversuche und den Einsatz in Stilllegungsanlagen geeignet seien und den Dekontaminationsprozess erheblich automatisieren könnten. /OECD 14/

Zielstellung aktueller Entwicklungen ist es u. a. die benötigten Werkzeuge zu verkleinern und damit für weitere Anwendungen nutzbar zu machen und die Prozessparameter wie die Auswahl der Laser und der Laserleistung zu qualifizieren und zu optimieren.

Aktuelle nationale Aktivitäten zur Laserdekontamination werden im Rahmen der Forschungsförderung des BMBF u. a. in einem Verbund (bestehend aus der TU Dresden, der TU Bergakademie Freiberg und der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (Ottobrunn)) vollzogen. In den drei aufeinander aufbauenden Forschungsprojekten LaColor, LaPlus und dem derzeit laufenden LaDeco wurde und wird das Ziel verfolgt, ein Gesamtsystem zur Laserdekontamination so zu qualifizieren, dass es die Anforderungen der kerntechnischen Stilllegung erfüllt. Nach umfangreichen Voruntersuchungen zur Dekontamination von Metalloberflächen im Labor wurde das Laserdekontaminationsverfahren kürzlich in einem Raumbereich der WAK mit präparierten Objekten durchgeführt. Dies stellt die erste Anwendung des Laserdekontaminierens in einer kerntechnischen Anlagen innerhalb Deutschlands dar. Die verwendeten Probenkörper hatten eine Oberfläche von 100 cm², die einer radioaktiven Flüssigkeit über eine Fläche von 54 cm² benetzt wurden. Als Radionuklide wurden Co-60, Cs-137, Sr-85 und Am-241 genutzt. Zur Dekontamination wurde ein handgeführtes Werkzeug genutzt, der eigentliche Laser (Nd:YAG Laser mit einer mittleren Strahlleistung von 150 W und einer Pulsdauer von 105 ns) befand sich in einem anderen Raumbereich. Der erreichte Dekontaminationsgrad betrug für alle betrachteten Radionuklide mindestens 97 % /FRI 23a/.

Im FORKA Projekt ARRIVE („Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung“, Laufzeit: 01. März 2023 bis 28. Februar 2025) wird zurzeit, ausgehend von den Erkenntnissen des Projektes ROBBE (siehe Abschnitt 4.1.2.1) ein automatisierter Roboter zur Dekontamination von Bauteiloberflächen und anschließender radiologischer Messung entwickelt. Als Dekontaminationsverfahren soll hierzu das robotergestützte Laserablationsverfahren genutzt werden /GRS 23b/

5.2.2 Elektrokinetisches Dekontaminationsverfahren

Die elektrokinetische Dekontamination (englisch: *electrokinetic remediation*, EKR) ist eine Umweltsanierungstechnologie, die Elektrizität nutzt, um Schadstoffe aus kontaminierten Materialien zu entfernen. Es handelt sich um ein energiearmes Verfahren, das in Materialien mit geringer Permeabilität (lehmige Böden, Zement usw.), die mit herkömmlichen Mitteln (z. B. Bodenwäsche, *Pump-and-Treat*) oft schwer zu sanieren sind, in- oder ex-situ angewendet werden kann. Die EKR

ist für Anwendungen in der kerntechnischen Stilllegung bislang auf den Labor- oder Pilotmaßstab beschränkt, Studien unter realen Betriebsumgebungen stehen noch aus /JAM 21/.

Bei der elektrokinetischen Dekontamination wird über eingebrachte Elektroden im Boden ein elektrisches Feld erzeugt, durch das Schadstoffe in einem Material oder einer Zelle mobilisiert werden können. Durch die Elektrolyse des Porenwassers entsteht ein pH-Gradient, durch den anodisch saure und kathodisch basische Bedingungen die Mobilisierung von Schadstoffen bewirken. Diese Stoffe werden dann durch eine Reihe von elektrokinetischen Prozessen (Elektromigration, Elektroosmose, Elektrophorese) transportiert, wodurch ionische, wässrige oder partikelförmige Verunreinigungen zu den gewünschten Punkten in der Sanierungszelle (in der Regel die Elektroden) wandern. Abb. 5.5 zeigt diese Prozesse in einer typischen, vereinfachten Zelle mit sauren und basischen Fronten, die sich – ausgehend von der Anode bzw. Kathode, entwickeln /JAM 21/.

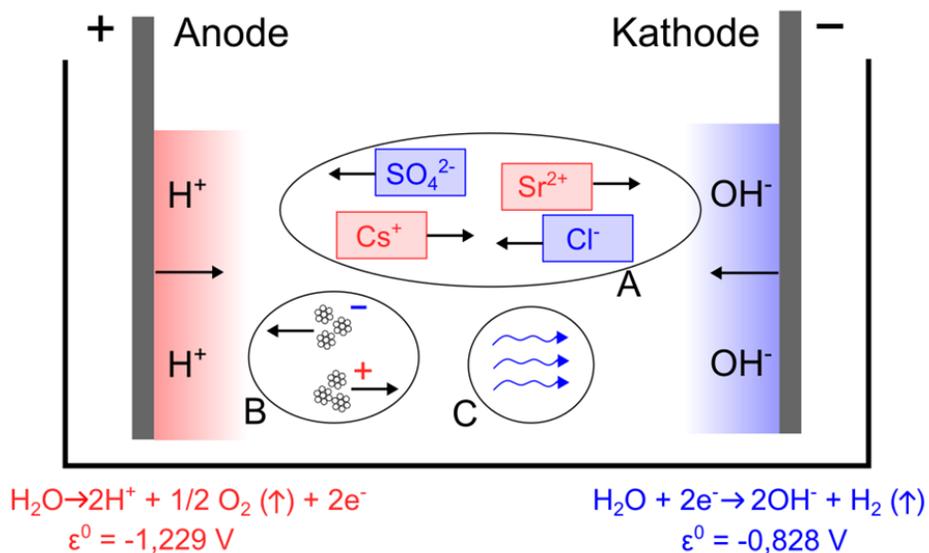


Abb. 5.5 Prinzip der elektrokinetischen Dekontamination (Abbildung in Anlehnung an /PUR 21/)

A zeigt den Prozess der Elektromigration von Ionen, B die Elektrophorese von Partikeln und C die Elektroosmose von Porenwasser.

Mit der Zeit akkumulieren die Verunreinigungen in bestimmten Teilen der Zelle und können anschließend entfernt werden. Diese Verunreinigungen können auch abgeschieden werden und

durch Barrierematerialien (in-situ) oder in undurchlässigen Membranen immobilisiert werden /JAM 21/.

Der Einsatz der EKR kann über verschiedenen Parameter beeinflusst werden, einen Überblick hierzu gibt Tab. 5.1. Nach dem derzeitigen Stand der Technik beschränkt sich die EKR für das kerntechnische Umfeld auf Studien im Labor- oder auf Pilotprojekte, die in den letzten 30 Jahren durchgeführt wurden. Im Jahr 1994 wiesen Buehler et al. /BUE 94/ mittels Gammaskopie nach, dass mit Cs-137 und Co-60 kontaminierter Boden am Standort Hanford nachweislich dekontaminiert werden konnte. Dieses Experiment wurde 2015 von Jung et al. /JUN 15/ erweitert. Nach einer Einsatzdauer von 68 Tagen bei 23 V in einer 25 cm langen Zelle (ca. 1 V/cm) wurde eine Verringerung von Cs-133 mittels Röntgenfluoreszenz um bis zu 55 % beobachtet.

Tab. 5.1 EKR Einflussparameter /JAM 21/

Parameter	Einfluss
Spannung	Höhere Spannungen erzeugen stärkere pH-Gradienten, können unerwartete Redoxeffekte verursachen (z. B. Pu ^V zu Pu ^{IV}) und den Energieverbrauch erhöhen. Die Einsatzdauer wird verkürzt.
Ort der Elektroden	Die Feldstärke ist nicht immer gleichmäßig; elektrische "Totzonen" sind üblich. Eine sorgfältige Platzierung der Elektroden kann dies vermeiden.
Material der Elektroden	Grafit ist üblich, aber auch Stahl wird verwendet; kann zur Erzeugung von durchlässigen reaktiven Barrieren (in-situ) und sorptiven Barrieren verwendet werden
Anzahl der Elektroden	Mehr Elektroden erhöhen die Kosten nur geringfügig und bieten eine bessere Kontrolle über die Schadstoffbewegung, zudem können größere Zellen verwendet werden
Einsatzdauer	Längere Einsatzzeiten können je nach Durchlässigkeit des Materials erforderlich sein (z. B. tonhaltige Böden mit Cs-137 Kontamination)
Elektrolyt und Additive	Grundwasser reicht oft aus, aber es können Zusätze wie Meerwasser oder Säuren erforderlich sein, um die Elektrolytstärke für starke Kontaminationen zu erhöhen.
In- oder ex-situ	In-situ ist aus Sicherheits- und Komfortgründen vorzuziehen, aber nicht immer möglich

Ein weiteres Anwendungsfeld der EKR bildet die Dekontamination von Beton. Die meisten Radionuklide in einer belasteten Betonmatrix sind entweder als gebundener Bestandteil oder in ausgefallter Form fixiert. Solche fixierten Stoffe können mit elektrokinetischer Dekontamination extrahiert werden, wenn sie chemisch aufgelöst werden. Mithilfe metalllösender Reagenzien werden die zu extrahierenden Bestandteile gelöst und ein elektrisches Gleichstromfeld über den kontaminierten Beton angelegt, um die gelösten Schadstoffe elektrokinetisch aus den Betonporen zu einem auf der Betonoberfläche platzierten Kollektor zu transportieren. In einem Forschungsvorhaben der Universität Lancaster wird diese Technik untersucht. Derzeit befindet sich die Technik im Versuchsstadium, /PAR 17/.

5.2.3 Automatisierte Dekontaminationskabine AuDeKa

Im Rahmen des Förderkonzepts FORKA wurde 2019 ein Projekt zur Entwicklung einer vollautomatisierten Dekontaminationskabine gestartet. Das Projekt zielt darauf ab, mehrere Schritte hin zu einem vollautomatischen Dekontaminationsprozess für Teile beliebiger Geometrien zu entwickeln und zu konzipieren und dabei eine vollständige, rechtskonforme Dokumentation zu erstellen. Die im Projekt eingesetzte Dekontaminationstechnologie ist das Hochdruckwasserstrahlen. Beteiligte Institutionen sind RST GmbH (RST), Mechatronik Institut Bocholt der Westfälischen Hochschule (MIB) und iUS Institut für Umwelttechnologien und Strahlenschutz GmbH (iUS). /BEC 21/

Ein Roboterarm ergreift das zu dekontaminierende Teil und befestigt es auf einer Haltevorrichtung. Die Geometrie des Teils wird gescannt und in einer Punktwolke bereitgestellt, aus der die Oberflächen extrahiert werden. Die Kontamination wird in ihrem räumlichen Bereich von Detektoren gemessen und der extrahierten Geometrie überlagert. Aus der Objektgeometrie werden Bahntrajektorien generiert, entlang dieser ein Roboterarm den Hochdruckwasserstrahl führt. Die Parameter des Wasserstrahls können an den ermittelten Kontaminationsgrad, aber auch an die geometrischen Erfordernisse angepasst werden. Anschließend bestätigt eine orts aufgelöste Freimessung die Dekontamination bei Erfolg oder führt zu einer Analyse der Restkontamination, die wiederum der beschriebenen Behandlung unterzogen wird. Alle Aktionen und Entscheidungsgrundlagen werden protokolliert und automatisch in die Dokumentation zusammengeführt. /BEC 21/

Das Projekt ist in drei Unterprojekte gegliedert:

- Entwicklung und Konstruktion der Dekontaminationskabine, des Robotersystems und der Anwendung der Höchstdruckwasserstrahltechnologie
- Entwicklung einer Methodik zur Erzeugung von Bahnlinien aus Punktwolken und Verifizierung mit Hilfe eines Robotersystems in Laborgröße
- Entwicklung eines auf Industrie 4.0 basierenden Dokumentationssystems

Der Aspekt der Kontaminationsmessung wurde zunächst auf eine spätere Projektphase verschoben, ebenso konnten erste Versuchsmessungen an nicht aktivierten Materialien aufgrund der Coronapandemie noch nicht durchgeführt werden /BOR 21/.

5.2.4 Automatisierte Wandflächendekontamination

Die Anwendung einer automatisierten Wandflächendekontamination bietet angesichts von über 100.000 m² /HÜB 17/ zu dekontaminierender Oberfläche je kerntechnischer Anlage, die Möglichkeit das Personal hinsichtlich der Exposition und der physischen Arbeitsbelastung zu entlasten. Einen Beitrag zum Erlangen der Anwendungsreife liefert die Forschung im Projekt ROBDEKON, ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt zur Entwicklung praxistauglicher Robotersysteme für Dekontaminationsarbeiten in menschenfeindlichen Umgebungen. Am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb („TMB“) wird an der Entwicklung (teil-) autonomer Lösungen für die Detektion radioaktiver Kontaminationen, für die Dekontamination sowie die daran anschließende Freimessung geforscht /WOO 22/.

Eine mobile Roboterplattform stellt die Grundlage zweier Systeme dar, einem Kontaminationsarray und einem Dekontaminationssystem, die derzeit im Rahmen des ROBDEKON Verbundes entwickelt werden. Das Kontaminationsarray misst die Oberflächenbelastung an der Wandfläche und übermittelt die ermittelten Daten zur zielgenauen Dekontamination an ein automatisiertes Fräswerkzeug. Dieses bearbeitet einen definierten Wandbereich, der anschließend hinsichtlich der Unterschreitung von Freigabewerten einer weiteren Oberflächenmessung unterzogen wird. Durch das Verfahren erwartet man eine erhebliche Reduktion der gesundheitlichen Belastung und die Reduktion von menschlichen Fehlern unter physisch belastender und monotoner Dekontaminationsarbeit./WER 21/.

5.2.5 Trocken-Mechanische Dekontamination von Innenkanten, Ecken und Störstellen mittels hand- sowie ferngesteuerten Geräten

Für die Freigabe von Gebäudestrukturen sind im Rahmen der Stilllegung ausgedehnte Betonoberflächen zu dekontaminieren. Die in Deutschland genutzten Kernkraftwerke verfügen über Betonoberflächen von bis zu 450.000 m² /REN 23a/. Die Dekontamination von Betonstrukturen erfolgt in der Regel durch einen Oberflächenabtrag mit geeigneten Werkzeugen (etwa 1 cm in der Tiefe). Für die Dekontamination ebener Flächen wurden in der Vergangenheit bereits angepasste Werkzeuge entwickelt (z. B. BOLERO /VAN 12/). Problematischer ist die Dekontamination von Ecken- und Innenkanten, wofür in der Praxis meist auf handgeführte Werkzeuge (z. B. Nadelpistolen) aus dem konventionellen Bereich zurückgegriffen wird, so dass hierfür meist Modifikationen (z. B. zusätzliche Absaugvorrichtungen) notwendig sind /REN 23a/.

Das im Rahmen des Förderkonzeptes FORKA unterstützte Projekt EKONT (FKZ 15S9416A, Laufzeit 01. August 2019 bis 31. Juli 2022) beschäftigte sich mit der Entwicklung technischer Lösungen für die Dekontamination von Ecken, Innenkanten und Störstellen. Es wurden funktionsfähige Demonstratorwerkzeuge entwickelt (siehe Abb. 5.6), die auf dem Prinzip eines Stufenfräasers basieren und die sowohl im Labor als auch im praktischen Umfeld (Kernkraftwerk Obrigheim) getestet wurden. Das Prinzip nutzt mehrere Frässcheiben mit unterschiedlichen Durchmessern, die nebeneinander angeordnet werden und einen Winkel von 90° bilden. Zudem wurde ein Werkzeug mit einem oszillierenden Kopf entwickelt, siehe Abb. 5.7.

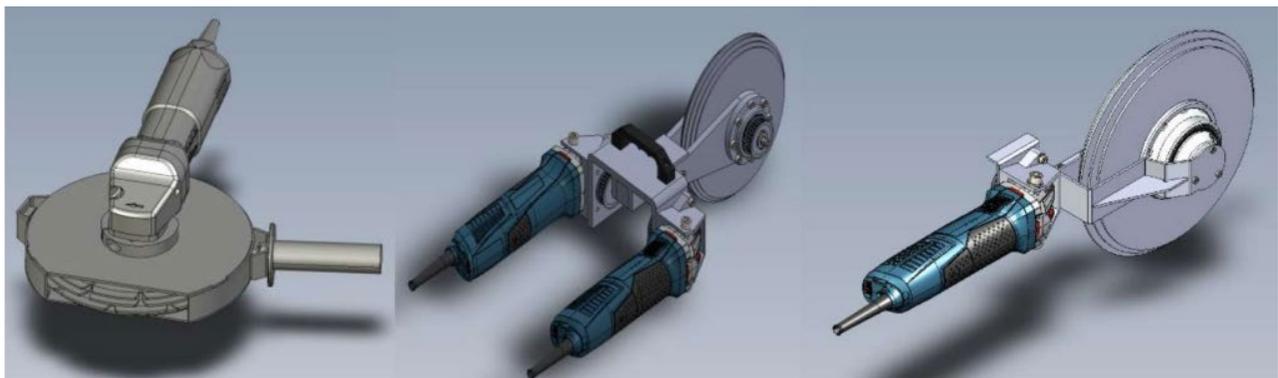


Abb. 5.6 CAD-Bilder der im Rahmen des Projektes EKONT entwickelten Prototypen (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /REN 23b/

Bei Erprobungen konnten Vorschubgeschwindigkeiten von etwa 120 cm pro Minute bei einer Bearbeitungstiefe von 10 mm erreicht werden. Das Bearbeitungsergebnis ist eine verhältnismäßig ebenmäßige Oberfläche. Mit dem Prototyp wurden an einem Versuchsstand einige Versuche durchgeführt, um beispielsweise Aspekte wie Staubentwicklung, Vibrationen und Schallpegel unter reproduzierbaren Randbedingungen zu untersuchen. Ein weiterer Aspekt der Untersuchungen betraf die notwendige Anpresskraft, die im Vergleich zur konventionellen Betonfräse beim handgeführten EKONT-Werkzeug deutlich geringer (etwa um den Faktor 4) ausfällt /REN 23a/.

Zudem wurden die entwickelten Geräte im Kernkraftwerk Obrigheim getestet. Hierbei wurde für zwei der drei entwickelten Fräswerkzeuge ein zu hohes Eigengewicht des Werkzeugs bemängelt, die Performance wurde als sehr gut eingeschätzt /REN 23b/.

Die Arbeiten werden in einem Folgeprojekt (EKont-2) fortgeführt /REN 23b/. Wichtige Aspekte bei der Weiterentwicklung sind unter anderem eine bessere Handhabbarkeit des Werkzeugs (Akkubetrieb, Gewichtsreduktion, Entwicklung eines kompakteren Werkzeugs, verstellbare Tiefenführung für einen präziseren Abtrag) und eine verbesserte Oberflächenbeschaffenheit /REN 23a/.

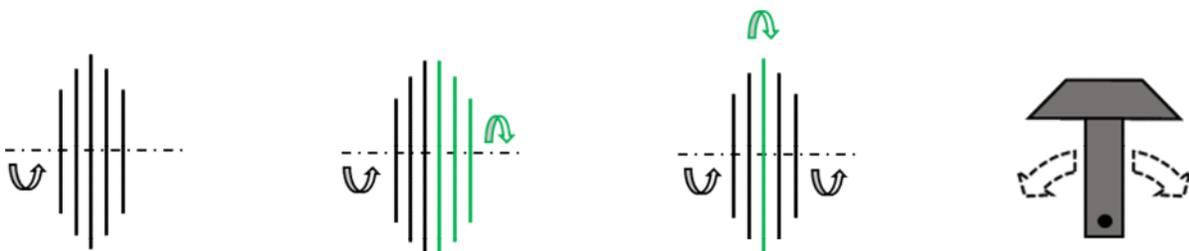


Abb. 5.7 Funktionsprinzip der im Rahmen von EKONT entwickelten Werkzeuge (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /REN 23b/

Die ersten drei Bilder zeigen das Fräsprinzip basierend auf fünf Frässcheiben mit gleicher bzw. entgegengesetzter Laufrichtung. Das rechte Bild zeigt das Werkzeugprinzip mit einem oszillierendem Werkzeugkopf.

5.2.6 Dekontamination von radioaktiv kontaminiertem Beton mittels elektrohydraulischer Fragmentierung

Auf der KONTEC 2021 wurde über ein BMBF-gefördertes Projekt (FKZ: 15S9413A) zur Dekontamination von mit radioaktiven Stoffen kontaminiertem Beton berichtet. Parallel hierzu wird in

diesem Projekt auch die Charakterisierung realer Betonproben, die Kontaminationsverteilung auf mineralische Bestandteile, die Fragmentierung von Beton und die Behandlung von Prozesswasser untersucht. /FRI 21/

In Abhängigkeit des Reaktoraufbaus kann kontaminierter Beton in einem Umfang von einigen Hundert Tonnen vorliegen. Der technologische Ansatz basiert zunächst auf einer elektrohydraulischen Zerkleinerung des Betons unter Zugabe von demineralisiertem Wasser (Kopplungsmedium, notwendig zur Einbringung der für den Prozess benötigten Energie) und einer anschließenden Siebung. Dabei bleibt neben der kontaminierten Trübe auch die Kiessandfraktion zurück. Die kontaminierte Trübe geht anschließend in die Sedimentation und wird dann mikrofiltriert. Die dadurch entstehende Zementsteinfraktion wird konditioniert, das Wasser wird entsalzt und anschließend zum Großteil wiederverwendet, während ein kleinerer Anteil (Konzentrat) als radioaktiver Abfall in die Konditionierung geht. Das Schema ist in Abb. 5.8 dargestellt.

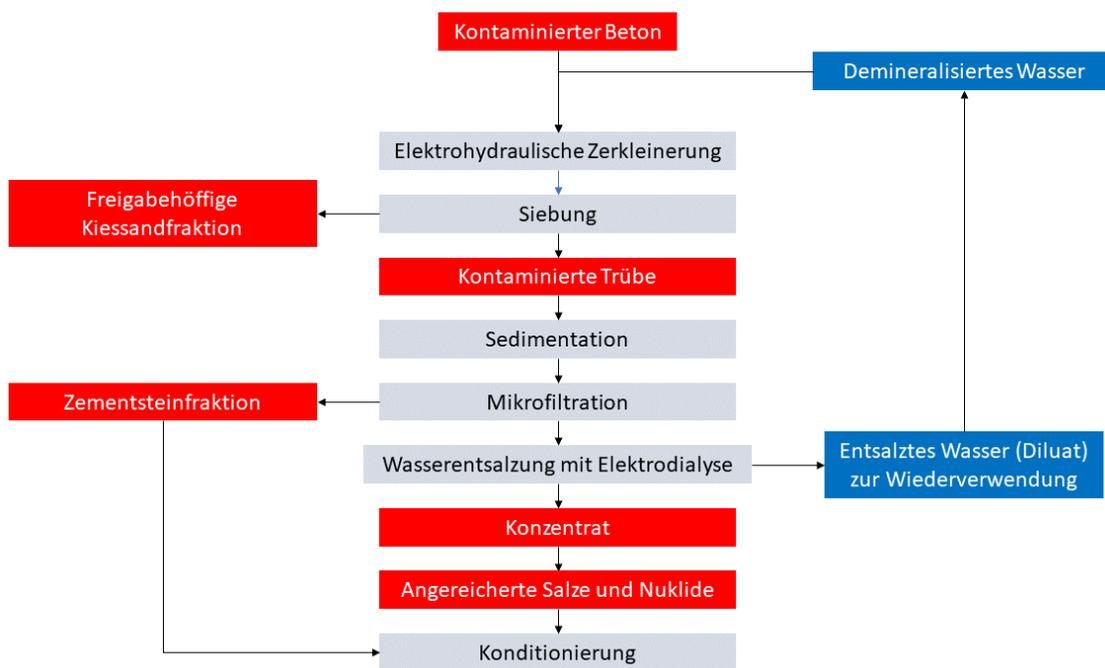


Abb. 5.8 Schema zur Dekontamination von kontaminiertem Beton

Die Forscher stellten fest, dass nur 20 % des bei der Herstellung des Betons verwendeten Wassers bei der Mineralisation (Bildung von C-S-H Gelphasen) gebunden wird, so dass 80 % für den Transport hydratisierter Ionen zur Verfügung stehen. Durch Kapillarkräfte werden zudem Nuklide wie Cs-137, Sr-90 und Co-60 nahezu ausschließlich über das Porensystem im Zementstein

transportiert und dringen so in den Beton ein. Hier wurden in experimentellen Studien selbst bei hochwertigem Beton Eindringtiefen von bis zu 20 cm beobachtet. Zudem würden Strukturstörungen (z. B. Risse oder Bohrlöcher) das Eindringen von Kontaminationen stark begünstigen.

Auf Basis von eigens hergestellten Betonproben, die denen in kerntechnischen Anlagen ähneln, wurde die Verteilung von Kontaminationen (Co, Cs, Eu, Sr) auf die mineralischen Bestandteile untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass am Kiessand nur sehr wenig haften bleibt. Der größte Teil der Kontaminationen bleibt am Zement haften. Cs wird generell nur schwach sorbiert, während Sr sogar aus den Zementen/Beton freigesetzt wird.

Die elektrohydraulische Zerkleinerung und Wasserbehandlung wurde anschließend an zwei Betonarten erprobt, die denen von Betonteilen spezieller kerntechnischer Anlagen ähneln. Die dabei entstehende Kornfraktion waren vergleichbar: Etwa 52 % hatte eine Korngröße von unter 0,8 mm, weitere ~43 % lagen zwischen 0,8 und 4 mm, der Rest wies eine größere Korngröße auf. Das dabei entstehende Prozesswasser wurde anschließend behandelt und untersucht, wie sich die Kontaminationen verhalten. Hier ist es gewünscht, dass die Kontaminationen sich entweder im Konzentrat oder in der Elektrodenspülung ansammeln.

In einer weiteren Projektphase wurde das Verfahren an radioaktive Betonproben aus dem Bereich der Reaktorkalotte aus dem KKW Stade und aus dem Bereich des biologischen Schildes des früheren RFR des VKTA Rossendorf e.V. erprobt. Mithilfe dieser Versuchsreihe konnte die Annahme bestätigt werden, dass radioaktive Kontaminanten in der Feinfraktion akkumulieren. In der verbleibenden körnigen Fraktion könnten, so die Vermutung der Forscher, durch Säurebehandlung Aktivitätswerte erreicht werden, die eine Deponierung erlauben würden. Durch das Verfahren sei es außerdem möglich, insbesondere eine Stahlfraktion abzutrennen, deren Aktivität fast ausschließlich auf Co-60 zurückgeführt sei /FRI 23b/.

5.2.7 Dekontamination von borsäurehaltigem Verdampferkonzentrat

Im Betrieb von Kernkraftwerken basieren die Verfahren zur Behandlung flüssiger Abfälle in der Regel aus Verdampfung, Filtration mit Ionenaustauschern und Verfestigung / Trocknung. Ziel dabei ist eine Reduzierung des Volumens der radioaktiven Abfälle (mit der Freigabe gereinigter Flüssigkeiten) und die Aktivitäten in einer stabilen Matrix (z. B. Zement, Bitumen) oder in einem Endlagerbehälter zu konzentrieren. Jedoch begegnet man der Schwierigkeit, dass sowohl die

Verdampfung als auch die Filtration mit Ionenaustauscherharzen unter hohem Salzgehalt mit dem Erreichen der Löslichkeitsgrenze begrenzt ist. Durch Verdampfung kann die Flüssigkeit nicht weiter aufkonzentriert werden da die Ionenaustauscherharze mit dem gelösten Salz gesättigt wären. Die Trocknung und Verfestigung der Flüssigkeit mit hohem Salzgehalt bieten dann keine zufriedenstellende Volumenreduzierung.

Bei NURES handelt es sich um ein auf anorganischen Ionenaustauschermaterial basierendes Reinigungssystem der Firma Fortum. Die Technologie stammt aus Finnland und wurde in Zusammenarbeit mit Forschern der Universität Helsinki entwickelt, um einen Engpass bei der Abfallbehandlung im KKW Loviisa zu beheben. Durch NURES könne laut Herstellerangaben Nuklide wie Cäsium, Strontium, Kobalt sowie andere Korrosionsprodukte oder Transurane (z. B. Plutonium) aus Flüssigkeiten entfernt werden, ohne dass dabei Salze zurückgehalten werden. Diese Eigenschaften ermöglichen die Behandlung von aggressiven Flüssigkeiten wie Verdampferkonzentrat in einer einfachen Durchflussanlage /ZHA 22/.

Die ursprüngliche NURES-Technologie wurde gemäß IAEA-TECDOC-1492 im KKW Paks (Ungarn) eingesetzt und dort erstmalig um eine Entfernung von Korrosionsprodukten und ein Bor-Rückgewinnungssystem ergänzt. Die Anlage wird als voll funktionsfähiges System entworfen, genehmigt, hergestellt und an den Betreiber übergeben. Die Anlage nimmt eine Fläche von ca. 40 m² ein. Pro Woche können etwa 20 bis 30 m³ Flüssigkeit behandelt werden /ZHA 22/.

5.2.8 Biodekontamination

Bei der Biodekontamination werden Mikroben oder Algen auf einen kontaminierten Bereich aufgebracht, so dass diese in die Oberfläche eindringen, mit der Kontamination in Kontakt kommen und sie aufnehmen können. Die Reaktionsprodukte können dann mit einem Reinigungs- oder Lösungsmittel abgewaschen werden. Die Biodekontamination wurde bereits in einem Bericht der IAEA /IAEA 99/ als eine in Zukunft möglicherweise nützliche Technik für die In-situ-Entfernung gefährlicher Rückstände von Wänden und Böden, stillgelegten Prozessanlagen, Lagertanks, Schächten, Rohrleitungen erkannt. Für gewöhnlich benötigen die Mikroben oder Algen Licht, Wasser, CO₂ und wenige gelöste Mineralien zum Wachsen. Sie müssen, um für die Biodekontamination genutzt werden zu können, eine hohe Resistenz gegen ionisierende Strahlung aufweisen und in der Lage sein Radionuklide schnell und effizient aufzufangen und zu konzentrieren. In den

letzten Jahren wurden Algen und Mikroben mit entsprechenden Eigenschaften entdeckt, Beispiele hierfür sind folgende:

Parachlorella sp. *binos* (*Binos*) *Parachlorella* sp. *binos* (*Binos*) zeigt eine lichtabhängige Aufnahme von I-131 und eine hocheffiziente, lichtunabhängige Aufnahme der radioaktiven Strontium- und Cäsium-Isotope. Darüber hinaus konnte die Anreicherung radioaktiver Nuklide durch *Binos* aus Wasser- und Bodenproben, die aus einem stark kontaminierten Gebiet in Fukushima stammten, gezeigt werden. /SHI 12/

Coccomyxa actinabiotis wurde in Brennelementlagerbecken entdeckt. Diese grüne Mikroalge könnte innerhalb von kerntechnischen Anlagen eingesetzt werden, um das Volumen radioaktiver Abfälle zu verringern und konventionelle Methoden zu ergänzen. Weiterhin könnte *Coccomyxa actinabiotis* zur Verringerung radioaktiver Emissionen in die Umwelt oder zur Dekontaminierung von unfallbedingt verschmutztem Wasser eingesetzt werden. Ein industrielles Pilotprojekt wurde von der französischen Atomenergiekommission (CEA) am Laue Langevin Institut entwickelt /RIV 13/.

Deinococcus radiodurans, eine äußerst strahlenresistente Mikroalge, die in der Lage ist, insbesondere C-14 aufzunehmen /RIV 13/.

5.2.9 Weiterentwicklung bei elektrochemischen Dekontaminationsverfahren

Die elektrochemische Dekontamination in ihrer etablierten Verfahrensform richtet sich zuvorderst an die ex-situ Dekontamination von Metallteilen in Bädern. International wurden bzw. werden innovative Weiterentwicklungen vorangetrieben, die sich u. a. an eine Verfahrensadaption für in-situ Anwendungen richten.

In Großbritannien wurde beispielsweise das Verfahren EASD® (*Electrolytically Assisted Surface Decontamination*) entwickelt, das drei Verfahrensvarianten umfasst /CAR 23/:

- EASD® JET wurde für die Dekontamination von Oberflächen im Reaktordruckbehälter, inklusive Rohren und Strukturelementen, konzipiert und entwickelt. Das Verfahren nutzt zwei Düsen, die an einem beweglichen Ausleger montiert werden und die in den zu dekontaminierenden Behälter eingebracht werden. Der Strom für den elektrolytischen Prozess kommt über den Ausleger zu den Düsen. Der Strom fließt von einer Düse, über den

Strahl zu dem behandelnden Teil der Gefäßstruktur und zurück zur zweiten Düse in einer kontinuierlichen Schleife.

- Das Verfahren EASD® In-Pipe wurde für die in-situ Dekontamination der inneren Oberflächen von Rohren entwickelt. Bei dem Verfahren kommt ein Crawler zum Einsatz, der für den elektrochemischen Verfahrensansatz mit zwei zylindrischen, voneinander getrennten Gegenelektroden ausgestattet ist. Die Dimensionierung der Elektroden erfolgt in Abhängigkeit der Rohrdimensionen.
- Das Verfahren EASD® Gel als dritte Verfahrensvariante dient der Dekontamination von *hot spots*. Die Verfahren wurden bis zu einem TRL von etwa 7 entwickelt (Stand: Oktober 2023)

Eine Kollaboration zwischen ORANO, Tech Y Tech und der Reuter GmbH & Co. KG führte zur Entwicklung eines mobilen Werkzeugs für die elektrochemische Dekontamination, bei dem eine Kohlenstoffbürste (bestehend aus bis zu 2 Millionen Kohlenstofffasern) als leitende Anode dient. Das Elektrolyt gelangt hierbei über einen zentriert gelegenen Kanal in die Bürste, mit der das zu dekontaminierende Metall überstrichen wird. Mit dem Werkzeug können auch wenige Mikrometer des Basismetalls entfernt werden. Einen wesentlichen Vorteil des Werkzeugs im Vergleich zu anderen mobilen Werkzeugen mit festen Elektroden stellen die sehr hohen Stromdichten von etwa 250 A/cm² dar, wodurch der Dekontaminationsprozess enorm beschleunigt wird. Grundsätzlich ist es auch gut für die Fernhantierung/Fernbedienung geeignet /GAL 23/.

5.3 Qualitative Einschätzung innovativer Verfahren

Analog zu der für die etablierten Verfahren genutzten Vorgehensweise werden zunächst im Abschnitt 5.3.1 Einschätzungsfaktoren vorgestellt bevor im Anschluss in Abschnitt 5.3.2 die Einschätzungsmatrix präsentiert und diskutiert wird.

5.3.1 Auswahl qualitativer Faktoren für die Einschätzung

Grundsätzlich lassen sich neue Verfahren oftmals nach Kriterien einschätzen, wie sie auch für etablierte Verfahrenstechniken genutzt wurden (siehe Abschnitt 3.2.2.1 und Abschnitt 3.3.3.2). Darüber hinaus sind insbesondere der Grad der technischen Reife und deren Wirtschaftlichkeit unter Einbeziehung höherer Sicherheitsmargen im Hinblick auf Strahlen- und Arbeitsschutz. Die Wirtschaftlichkeit ist notwendige Voraussetzung, wird aber dadurch bedingt, dass letzteres

Einfluss auf den Entwicklungsprozess nimmt. Ein absehbar unwirtschaftliches Verfahren wird wenig Interesse zur Weiterentwicklung finden. Trennt man beides zwecks einer zugänglichen Zuordnung, können folgende Faktoren zur Verfahrenseinschätzung herangezogen werden:

- Technischer Reifegrad im Sinne der TRL
- Bedarf
- Umgebung
- Materialspektrum
- Flexibilität/Universalität
- Eignung zur fernhantierten Anwendung und/oder Unterwasseranwendung
- Sicherheitsgewinn (aus Sicht des Strahlen- und Arbeitsschutzes)

Von den vorangegangenen Abschnitten abweichende Faktoren werden im Folgenden erläutert.

Technologischer Reifegrad

Der technologische Reifegrad (*Technology Readiness Level*, TRL) wurde ursprünglich von der NASA für die Bewertung von Raumfahrttechnologien etabliert und gibt mit einem neun-stufigen Konzept an, in welchem Entwicklungsstadium sich eine Anwendung, beginnend mit der einfachen Beobachtung und Beschreibung des Anwendungsprinzips bis zum qualifizierten Einsatz eines Systems unter realen Einsatzbedingungen, befindet. Die einzelnen Stufen der TRL-Skala werden in Tab. 5.2 erläutert.

Bedarf

Unter Innovationsbedarf wird die Notwendigkeit einer neuen technologischen Entwicklung aufgrund mangelnder, ineffizienter, unwirtschaftlicher oder unter Strahlenschutzaspekten unerwünschter aktueller Technologie verstanden.

Tab. 5.2 Gestuftes Konzept zur Einschätzung des technologischen Reifegrades

TRL	Definition nach /CAR 17/ (verallgemeinert)	Definition nach /HOR 14/
TRL 1	Überprüfung des ursprünglichen Konzepts anhand erster Grundsätze und Festlegung von Bewertungskriterien	Beobachtung der Grundprinzipien
TRL 2	Bewertung der technischen Optionen und Festlegung der Parameterbereiche für den Entwurf	Technologiekonzept formuliert
TRL 3	Nachweis des Konzepts im verkleinerten Maßstab	experimenteller Nachweis des Konzepts
TRL 4	Festlegung von Parametern und Merkmalen für das Systemdesign	Technologie im Labor validiert
TRL 5	Nachweis des Prinzips auf Prototypenebene	Technologie in relevanter Umgebung validiert (industriell relevantes Umfeld im Falle von Schlüsseltechnologien)
TRL 6	Basis für Systemsicherheit geschaffen	Technologie, die in einem relevanten Umfeld demonstriert wurde (im Falle von Schlüsseltechnologien in einem industriell relevanten Umfeld)
TRL 7	Demonstration von zugelassenem System im kommerziellen Maßstab	Demonstration des Systemprototyps in einer betrieblichen Umgebung
TRL 8	Anwendung des genehmigten Systems	System vollständig und qualifiziert
TRL 9	Routinebetrieb des genehmigten Systems	tatsächliches System, das sich im betrieblichen Umfeld bewährt hat (wettbewerbsfähige Herstellung im Falle von Schlüsseltechnologien; oder im Welt- raum)

Der Innovationsbedarf an einer neuen Technologie wird anhand einer dreistufigen Kategorisierung bewertet:

- Kategorie „gering“

Der Bedarf lässt sich überwiegend aus einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Effizienz ableiten. Entsprechende Aufgaben wären somit grundsätzlich auch mit existierenden Verfahren gut durchzuführen.

- Kategorie „mittel“

Der Bedarf besteht hinsichtlich der Erhöhung der Sicherheit, Reduzierung der Expositionen und /oder der Reduzierung von Abfallmengen/-volumen. Im Sinne des Strahlenschutzes besteht ein hohes Interesse an der Umsetzung der technologischen Entwicklung in der Praxis.

- Kategorie „hoch“

Der Bedarf besteht aufgrund mangelnder Technologien zur Bewerkstelligung der ange-dachten Trenn- oder Dekontaminationsaufgabe.

Die Bewertung erfolgt anhand der Zuordnung zu einer der drei Stufen, sowie einer kurzen Begründung.

Flexibilität & Universalität

Durch ein breites Einsatzspektrum und den flexiblen Einsatz einer Technologie erhöhen sich die möglichen Kosten- und Zeitersparnisse. Flexibilitäten ergeben sich beispielsweise durch den mobilen Einsatz der Technologie an unterschiedlichen Orten oder durch die Nutzung für unterschiedliche Anwendungsszenarien. Wie in Abschnitt 3.2.2.1 beschrieben ergeben sich hierdurch u. a. Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Personalschulung, aber auch etwaige Nachteile aufgrund erhöhter Anforderung an die Dekontamination zwischen verschiedenen Einsätzen.

Sicherheitsgewinn

Innovative Verfahren können auch von einem Zugewinn an Sicherheit begleitet werden. Dieser kann beispielsweise darin begründet sein, dass die neue Verfahren im Vergleich zur bisherigen Methode

- die Strahlenbelastung für Personen verringern,
- weniger Sekundärabfälle produzieren,
- eine geringere Komplexität aufweisen und damit z. B. fehlerresistenter sind, oder
- den tendenziell fehleranfälligen Zustand der Anlage bspw. Durch behindernde Aufbauten oder durch administrative Sondermaßnahmen, verkürzen.

Falls nur ein Aspekt außer der verringerten Strahlenbelastung für Personen zutreffen sollte, ist der Sicherheitsgewinn als „gering“ zu bewerten. Sofern zwei oder mehr Aspekte oder eine verringerte Strahlenbelastung für Personen allein zutreffend sind, ist der Sicherheitsgewinn als „mittel“ zu bewerten. Sofern alle Aspekte zutreffen sollten oder allein die Strahlenbelastung erheblich verringert werden kann, ist der Sicherheitsgewinn als „hoch“ zu bewerten.

5.3.2 Darstellung der Einschätzungsmatrix und Diskussion der Verfahren

Die in den vorangegangenen Abschnitten präsentierten Innovationen betreffen im Wesentlichen Modifizierungen bereits etablierter Verfahren – tatsächliche innovative Ansätze, zu denen insbesondere die Verwendung von Lasern zur in-situ Trennung dickwandiger Werkstücke bzw. zur Dekontamination gehören, finden sich nur wenige (siehe Tab. 5.3). Die lasergestützten Verfahren werden seit einigen Jahren international vorangetrieben, eine Etablierung ist hier mittelfristig – auch aufgrund der ständigen Weiterentwicklungen bei der Entwicklung leistungsstarker Laser – abzusehen. Im Vordergrund steht bei diesen Verfahren eine Effizienzsteigerung und eine Reduzierung von Sekundärabfällen durch reduzierte Schnittfugenbreiten bzw. durch einen wohldefinierten Oberflächenabtrag.

Innovative Trennverfahren

Im Bereich des Wasserabrasivstrahlschneidens liegt ein wesentlicher Fokus aktueller Entwicklungen auf einer Reduzierung von Sekundärabfällen, die durch eine partielle Wiederverwendung des Strahlmittels erreicht werden soll. Hierfür wurde bis dato ein Prototyp entwickelt, mit dem die Funktion des Verfahrensansatzes nachgewiesen werden konnte. Der Schritt zu einer industriellen Anwendung ist noch zu gehen, die F+E Partner haben einen denkbaren Weg skizziert.

Die Weiterentwicklungen am CAMG-Verfahren betreffen zuvorderst die Prozessstabilität und eine Erhöhung der Standzeiten durch Verschleißreduzierung. Es wurde gezeigt, dass mithilfe additiver Fertigung Trennelektroden produziert werden können, die hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe aufgabenbezogen angepasst werden können. Der Reifegrad ist hoch, die Anwendungsfälle sind klar umrissen. Mithilfe den vollzogenen F+E Tätigkeiten konnte eine deutliche Reduzierung des Elektrodenverschleißes nachgewiesen werden. Es ist davon auszugehen, dass im Vergleich zu den herkömmlichen Elektroden die Fertigungskosten für die additiv gefertigten Elektroden höher sind.

Die F+E-Arbeiten zum Seilschleifverfahren fokussieren sich auf eine Reduzierung des Seilver-
schleißes, insbesondere für das Trennen von Stahlteilen. Auch hier ist davon auszugehen, dass
durch die Weiterentwicklungen die Investitions- bzw. die Seilkosten erhöhen werden.

Der vorgestellte Rohrintrenner nutzt das etablierte Trennschleifen bzw. Trennsägen und rich-
tet sich an ein klar definiertes Aufgabenfeld, für das die bisherigen Methoden gewisse Schwach-
stellen aufweisen. Ausgehend vom entwickelten Prototyp steht hier eine Etablierung noch bevor.

Innovative Dekontaminationsverfahren

Gerade im internationalen Umfeld finden sich einige F+E Projekte, die sich mit der Dekontamina-
tion von Erdreich auseinandersetzen. Eine solche Dekontaminationsnotwendigkeit ist für die kern-
technischen Anlagen in Deutschland im Allgemeinen nur sehr begrenzt abzusehen. Ein Beispiel
für eine Anlage, bei denen Kontaminationen im Boden ein Problem darstellen könnten, ist der
AVR (Jülich). Dort sind durch ein Leck im Dampferzeuger im Mai 1978 insgesamt 27 m³ Wasser
in den Reaktor geflossen. Durch eine undichte Gebäudefuge gelangte im Rahmen von Reini-
gungsarbeiten kontaminiertes Wasser in das umgebende Erdreich und das unterirdische Beton-
kammersystem. Die entsprechenden Verfahren sind zum jetzigen Stand zeitintensiv, Dekontami-
nationsfaktoren zudem schwer abzuschätzen. Eine Etablierung ist zum jetzigen Stand nicht
abzusehen.

Die elektrochemischen Verfahren gehören bereits jetzt zu den etabliertesten chemischen Verfah-
ren, deren Anwendung zu hohen Dekontaminationsfaktoren und – im Vergleich zu anderen che-
mischen Verfahren – geringen bzw. verhältnismäßig unproblematischen Sekundärabfällen führt.
Innovative Ansätze richten sich hier insbesondere an die in-situ Anwendung dieser Verfahren so-
wohl für den Flächeneinsatz als auch für die Entfernung von *hot spots*. Die vorgestellten Verfahren
erscheinen für ausgewählte Anwendungen vielversprechend, beispielsweise könnte sich die
grundsätzliche Fernhantierbarkeit des von ORANO entwickelten Verfahrens für die Dekontamina-
tion von Metallflächen in (aus radiologischen Gründen) unzugänglichen Raumbereichen eignen.

Bei einigen innovativen Ansätzen stehen automatisierte Prozesse im Vordergrund, beispielsweise
bei AuDeKa oder der im Rahmen von ROBDEKON entwickelten Ansätze zur Flächendekontami-
nation.

Im Projekt EKONT wurden Werkzeuge zur Dekontamination von Beton in schwer zugänglichen Arbeitsbereichen (z. B. Ecken und Kanten) entwickelt. Die bereits entwickelten Lösungen (Werkzeuge) zu den klardefinierten Problemstellungen und deren Relevanz für die kerntechnische Stilllegung lässt eine mittelfristige Etablierung als wahrscheinlich erscheinen. Bei den bereits stattgefundenen Anwendungen in einer kerntechnischen Anlage konnten die Vorteile des Verfahrens dargelegt und Schwachstellen identifiziert werden. Diese gilt es im laufenden Projekt EKONT2 zu adressieren.

5.4 Zusammenfassung

Die Laser-gestützten Verfahren zur Trennung von (legierten) Stählen und zur Dekontamination von Oberflächen haben in den vergangenen Jahren ein hohes Maß an Aufmerksamkeit erhalten. Derzeit laufen sowohl national als auch international einige F+E-Projekte, die eine Etablierung der Verfahren in der Breite beabsichtigen. Eine wesentliche Triebfeder dieser Projekte stellt die fortwährende Entwicklung von immer leistungsfähigeren Lasersystemen dar, die z. B. im Falle des Lasertrennens unter Wasser erheblich die erreichbare Schnitttiefe beeinflusst.

Neben den laser-gestützten Verfahren gibt es eine Reihe an Weiterentwicklungen für bereits etablierte Verfahren zum Ausmerzen vereinzelter Verfahrensschwachstellen. Zwei häufig adressierte Punkte betreffen eine Reduzierung des Verschleißes und eine Reduzierung der Sekundärabfälle. Technische Lösungen sind oftmals komplexer hinsichtlich der Produktion, was in der Regel mit höheren Kosten einhergeht. Kosten-Nutzen-Betrachtungen werden voraussichtlich darüber entscheiden, inwieweit sich entsprechende Lösungen etablieren können. Weitere Innovationen adressieren ausgewählte Problemstellungen, z. B. dem Trennen von Rohren von innen oder die Dekontamination (durch Abtrag) von Beton in schwer zugänglichen Bereichen.

Abschließend ist zu beobachten, dass gerade im Bereich der innovativen Dekontaminationsverfahren ein großes Interesse an einer Automatisierung der Prozesse besteht.

Tab. 5.3 Qualitative Einschätzung für innovative Trenn- und Dekontaminationsverfahren

Grundlage für die Einschätzungen sind die Informationen im Rahmen der Verfahrensbeschreibungen in Abschnitt 5.1 bzw. Abschnitt 5.2

Verfahren	TRL	Bedarf	Umgebung	Materialien	Flexibilität & Universalität	Fern- & Unterwassereignung	Sicherheitsgewinn
Trennverfahren							
Laserstrahltrennverfahren für die in-situ Zerlegung dickwandiger Komponenten	7	gering	in-situ (an Luft und unter Wasser)	Stahl	hoch (breites Materialspektrum)	hoch	gering
Dekontaminationsverfahren							
Laserdekontaminationsverfahren	7	gering	in-situ (an Luft)	Beton, Metall	mittel	grundsätzlich gute Fernbedienbarkeit, kein Unterwassereinsatz	gering
Elektrokinetisches Dekontaminationsverfahren	4	anlagenabhängig gering bis hoch	Bodenflächen (in-situ und ex-situ)	Erdreich	mittel bis hoch	nicht zutreffend	gering
Biodekontaminationsverfahren	<=3	gering	in-situ	Beton, Metall	hoch	nicht zutreffend	gering

6 Transfer von Wissen und rückbaurelevanter Verfahren aus anderen Industriezweigen in die kerntechnische Industrie

Im Anschluss an die Einstellung des (Produktions-)Betriebs sind in den unterschiedlichsten Industrien meist Rückbau- oder signifikante Änderungsmaßnahmen vorgesehen, um eine Nachnutzung der Flächen – gegebenenfalls mit Nutzung existierender Gebäude oder Anlagen – zu ermöglichen. Der Rückbau stellt somit branchenübergreifend eine wesentliche Phase für die meisten Einrichtungen unabhängig vom jeweiligen Industriezweig dar. Generell ist zu beobachten, dass die Sichtbarkeit des Rückbaus bzw. der Stilllegung signifikant mit dem notwendigen Aufwand und Gefährdungspotenzial korreliert. Bezogen auf die zivile Nutzung der Kernenergie erklärt dies z. B. das öffentliche Interesse an der Stilllegung kerntechnischer Anlagen nach Atomgesetz (insbesondere an der Stilllegung von Leistungsreaktoren) im Vergleich zum Rückbau von genehmigungspflichtigen Einrichtungen nach Strahlenschutzgesetz oder dem Rückbau konventioneller Kraftwerke. Gerade aufwendige oder visuell besonders eindrucksvolle Maßnahmen (z. B. die Sprengung von Kühltürmen) werden von der Öffentlichkeit aufmerksam verfolgt. Zudem bieten anspruchsvolle Projekte auch für die beteiligten technischen Dienstleister und Technologieanbieter eine hervorragende Möglichkeit, ihr Portfolio und ihre Expertise diversen potenziellen Kunden und Interessensvertretern vorzustellen.

In der Regel ist der Rückbau die letzte Phase in der Historie einer Anlage oder Einrichtung, die meist unmittelbar auf die Betriebsphase folgt. Der Leistungsbetrieb wird kontinuierlich gedrosselt oder schlagartig beendet. Dieser Übergang von der Betriebs- in die Rückbauphase stellt in vielen Belangen einen singulären Punkt dar, der von einschneidenden Änderungen und Prioritätsverschiebungen begleitet wird. Aus industrieller Sicht wird dieser Punkt wesentlich mit der vollständigen Einstellung der originär angedachten Produktion in Verbindung gebracht, so dass einerseits keine produktionsbedingten Gewinne mehr generiert werden (können), andererseits aber durch den Rückbau Kosten entstehen, die aus betriebswirtschaftlicher Sicht möglichst geringgehalten werden sollen. Aus Sicht eines Betreibers ist die Entwicklung, die Erprobung sowie die finale Anwendung neuer Technologien, die in der Regel aufgrund der Kompetenzen in Forschung und Entwicklung nicht vom Betreiber, sondern von externen Dienstleistern/Entwicklern durchgeführt werden, zunächst mit Kosten und diversen Risiken verbunden, die sich ggfs. erst durch höhere Effektivität, Effizienz, Prozesssicherheit und Arbeitssicherheit amortisieren. Die Wahrscheinlichkeit einer Amortisierung steigt aufgrund von Skaleneffekten mit der Anzahl rückzubauender Einrichtungen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl kerntechnischer Anlagen, sind

entsprechende Skaleneffekte von Verfahrenstechniken für die Kerntechnik in ihrer Ausprägung stark limitiert. Dies trifft auch für industrielle Dienstleister und Technologieanbieter zu, die sich auf bestimmte Lösungen im kerntechnischen Bereich spezialisiert haben. Gerade für Dienstleister können sich aber Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, insbesondere bei universellen Verfahren, durchaus als lohnend herausstellen.

Ein anderer Ansatz für die Nutzung innovativer Technologien ergibt sich aus dem Wissens- und Technologietransfer im Austausch mit anderen Industriezweigen (d. h. außerhalb der kerntechnischen Industrie), in denen der Rückbau – zumindest vor dem Hintergrund ausgewählten Kriterien – von vergleichbaren Komplexitäten und Herausforderungen begleitet wird. Bezogen auf die Stilllegung kerntechnischer Anlagen sind das Trennen (insbesondere von Metallteilen und Betonstrukturen) und die Dekontamination zwei wesentliche Prozesse, die auch im Rückbau anderer Industriezweige Anwendung finden. Zudem gibt es gerade im digitalen Bereich mannigfaltige Möglichkeiten für einen Technologietransfer, da diese oft industrieunabhängige Vorteile bieten. Grundsätzlich ist es durchaus denkbar, dass in anderen Industriezweigen aufgrund höherer Amortisierungsmöglichkeiten im Bereich der Entwicklung neuer Verfahren bestehen, die auch an die spezifischen Anforderungen in der Kerntechnik adaptiert werden könnten. Dieses Kapitel befasst sich daher im Kern mit Möglichkeiten, wie ein „branchen-übergreifender“ Austausch mit dem Ziel, neue Verfahren für die Kerntechnik zu verwenden, genutzt wurde bzw. wird. Hierbei muss es sich nicht zwingend um Trenn- oder Dekontaminationsverfahren handeln.

In diesem Kapitel werden zunächst im Abschnitt 6.1 wesentliche Anforderungen an Trenn- und/oder Dekontaminationsverfahren für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen zusammengestellt. Anschließend werden im Abschnitt 6.2 einige Industriezweige identifiziert, für die hinsichtlich des Rückbaus partielle Übereinstimmungen mit den voran genannten Anforderungen bestehen bzw. bestehen könnten. Im Anschluss wird im Abschnitt 6.3 der branchenübergreifende Austausch in Deutschland und international skizziert, bevor in Abschnitt 6.4 der Fokus auf den Wissens- und Techniktransfer bzw. der Entwicklung innovativer Verfahrenstechniken in Deutschland gelegt wird, wofür insbesondere auch ausgewählte Beispiele aus der Praxis aufgegriffen werden. Abschließend werden im Abschnitt 6.5 die Erkenntnisse kurz zusammengefasst.

6.1 Zusammenstellung wesentlicher Anforderungen im Bereich der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Für die kerntechnischen Anlagen gelten besondere Anforderungen, die es hinsichtlich der einzusetzenden Verfahren zu berücksichtigen gilt und die sich unmittelbar aus den charakteristischen Randbedingungen ergeben. Diese Anforderungen selbst sind einzeln betrachtet nicht zwingend nur für kerntechnische Anlagen zutreffend, zusammengenommen ergeben sie aber einen Anforderungskatalog, der den eindeutigen Fingerabdruck der Kerntechnik trägt. Im Folgenden werden einige wesentliche Anforderungen, die insbesondere auf Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen zutreffen, zusammengefasst.

Eine wesentliche Randbedingung ergibt sich aus dem Potenzial ortsabhängiger Kontaminationen und/oder Aktivierungen. Kontaminationen beschränken sich meist auf die Oberflächen und sind möglichst weitgehend zu entfernen, insbesondere zur Vermeidung radioaktiver Abfälle oder zur Reduktion von Ortsdosisleistungen. Dekontaminationsmaßnahmen sind somit unabdingbar und zielen in den meisten Fällen auf radioaktive Kontaminationen. Diese Maßnahmen können für unterschiedliche Materialoberflächen (z. B. „glatte“ Metalloberflächen oder porösere Betonstrukturen) notwendig werden und müssen sich zudem für erschwerte Zugänglichkeit eignen (z. B. innenliegende Oberflächen). Die eingesetzten Werkzeuge selbst müssen zudem leicht zu reinigen bzw. zu dekontaminieren sein, um die Menge an Sekundärabfall einzuschränken. Hierfür existieren keine universell gleichermaßen gut funktionierenden technischen Verfahren und Werkzeuge, wie u. a. im Kapitel 3 dargelegt wurde.

Im Rahmen der Stilllegung kerntechnischer Anlagen sind zwar eine Vielzahl kleinerer Strukturen zu trennen, von wesentlichem Interesse sind allerdings – aufgrund der damit einhergehenden Herausforderungen – dickwandige Strukturen, die sowohl Metall- als auch Betonstrukturen umfassen. Unter den Metallstrukturen sind auch unterschiedlichste Komponenten in Sandwichbauweise sowie hochlegierte Stähle (Korrosionsbeständigkeit, mechanische Eigenschaften) zu berücksichtigen. Betonstrukturen sind zum Teil hochgradig bewehrt oder liegen als Schwerkton vor.

Aufgrund radiologischer Betrachtungen ist es in Bereichen hoher Dosisleistungen zwingend notwendig, (Trenn-)Maßnahmen unter Wasser durchzuführen und/oder auf eine Fernhantierung/Fernbedienung zurückzugreifen. Hierzu werden in der Regel existierende Becken verwendet, die für die Trennaufgaben ausgerüstet werden.

Insbesondere Kernkraftwerke umfassen große Anlagen- und Gebäudestrukturen, sodass Arbeiten oft in großen Höhen von 10 Metern und mehr durchzuführen sind. Diese Strukturen in ihrer Gänze zu bearbeiten ist aufgrund ihrer beschränkt vorliegenden Zugänglichkeit anspruchsvoll, so dass in der Praxis z. B. Gerüste o. ä. für die Durchführung von Dekontaminations- oder Trennmaßnahmen zwingend notwendig sind. Die Zugänglichkeit kann aber in anderen Bereichen stark eingeschränkt sein, beispielsweise bei (einbetonierten) langen Rohrleitungen mit geringen Innendurchmessern oder aufgrund radiologischer Randbedingungen.

Die Kerntechnik gehört zu den am stärksten regulierten Industriezweigen. In Verbindung mit den spezifischen Gefahrenquellen nehmen Risikobetrachtungen somit eine wesentliche Rolle ein. Neue Werkzeuge müssen nachweislich für die vorgesehenen Arbeiten qualifiziert sein (z. B. durch Durchführung von Kalterprobungen oder Tests an realitätsnahen *mock-ups*). Insbesondere bei Arbeiten in Bereichen erschwerter Zugänglichkeit muss sichergestellt sein, dass Schäden behoben oder Verbrauchsmaterial schnell ausgetauscht werden können. Grundsätzlich sollen Rüstzeiten möglichst gering und Standzeiten möglichst hoch und mit möglichst geringen Unsicherheiten ausfallen. Aufgrund regulatorischer Randbedingungen und Risikobetrachtungen ist es häufig ratsam, anstelle von Verfahren mit hohem Innovationscharakter auf weiterentwickelte Verfahren zurückzugreifen, die eine solide Basis als Bewertungsgrundlage nutzen können.

Zusammenfassend ergeben sich somit die folgenden Anforderungen:

- Eignung für Trennmaßnahmen an dickwandigen Strukturen aus unterschiedlichen Materialien (insbesondere auch hochlegierte Stähle und bewehrter Beton)
- Eignung der Trennverfahren sowohl für Fernhantierung bzw. Fernbedienung als auch in einigen Fällen für Arbeiten unter Wasser
- Anwendung von Dekontaminationsmaßnahmen an unterschiedlichen Materialien und Materialoberflächen mit teils hinderlicher räumlicher Anordnung
- Durchführung von Maßnahmen in nur erschwert zugänglichen Bereichen (z. B. Arbeiten in großen Höhen oder Bereichen hoher Ortsdosisleistung)
- Einsatz von Werkzeugen mit möglichst geringen Rüstzeiten und/oder hohen Standzeiten notwendig bzw. gewünscht

Bei der Erfüllung dieser Anforderungen werden zusätzlich die in der Kerntechnik erforderlichen Risikobetrachtungen durchgeführt, die z. B. risikoreduzierende Maßnahmen oder

Interventionsmaßnahmen im Falle eines nicht bestimmungsgemäßen Ablaufes festlegen. Diese Risikobetrachtungen werden zudem durch die zuständige Aufsichtsbehörde und ggf. den zugezogenen Sachverständigen geprüft, sodass in der Kerntechnik eine im Vergleich zum Konventionellen ausgeprägtere Regulierung vorliegt.

6.2 Industriezweige mit partiellen Übereinstimmungen hinsichtlich des Anforderungsprofils für den Rückbau

Der überwiegende Teil der für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen genutzten Werkzeuge und Techniken wurde ursprünglich nicht dediziert für die kerntechnische Industrie entwickelt. Die Adaption dieser Werkzeuge und Techniken erfolgte entweder ohne wesentliche Änderungen oder bedingte zunächst gewisse Adaptionen, um den spezifischen Anforderungen der kerntechnischen Industrie zu genügen. Auch zukünftig ist abzusehen, dass sowohl innovative Verfahren zunächst für andere Industriezweige entwickelt als auch etablierte Verfahren weiterentwickelt werden und diese auch gewinnbringend für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen genutzt werden können. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Verfahrensübernahme höher ausfällt, je größer die Übereinstimmungen hinsichtlich des Anforderungsprofils sind. Ein Trennverfahren, das sich beispielsweise im konventionellen Bereich zwar grundsätzlich bewährt, kann z. B. nur bedingt für eine Anwendung im kerntechnischen Bereich geeignet sein, beispielsweise wenn große Mengen an Sekundärabfällen entstehen. Aus diesem Grunde sollen in diesem Abschnitt zunächst einige Industriezweige aufgeführt werden, die sich für einen Technologietransfer eignen könnten bzw. für die ein solcher Transfer auch bereits stattgefunden hat.

Mögliche Synergien eines Wissens- oder Technologietransfers hängen nicht nur von technischen Verfahren ab, sondern umfassen auch Aspekte wie Risikowahrnehmung, Industriekultur und den praktischen Erfahrungsaustausch.

Auch konventionelle Kraftwerke zur Stromerzeugung mit fossilen Brennstoffen wie z. B. Kohlekraftwerke verfügen über ausgedehnte Betonstrukturen und dickwandige metallische Komponenten, die ähnliche Funktionen wie ihre kerntechnischen Analoga ausüben und die nach Beendigung der Betriebsphase in den Rückbau übergehen. Kohlekraftwerke verfügen in der Regel über vergleichbar dimensionierte Kühltürme, die oft durch Sprengen oder bewusstes Kollabieren (siehe Abschnitt 3.4) zerlegt werden.

Für den Bergbau wurden hocheffiziente und durchsatzstarke Verfahren zur Zerkleinerung von Abbruchmaterial entwickelt, z. B. Brecheranlagen. Solche Verfahren können auch in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen genutzt werden, beispielsweise um Betonstrukturen zu zerkleinern. Für den Einsatz von Brecheranlagen gibt es bereits einige Beispiele, insbesondere bei fortgeschritteneren Projekten, wo der Abbau von Beton zur bestimmenden Aufgabe wird, wie am Standort Stade oder Lubmin.

Für die Offshore Öl- und Gasförderung gelten hohe Sicherheitsanforderungen, die sich durch das hohe Gefährdungspotenzial ergeben. Bei der Stilllegung der Fördereinrichtungen müssen insbesondere die Bohrlöcher sicher verschlossen und abgedichtet werden und die komplette Infrastruktur (z. B. Förderplattformen) zurückgebaut werden /EC 21/. Hierfür müssen u. a. Rohrleitungen unter Wasser zerlegt werden.

In der chemischen und petrochemischen Industrie ist u. a. eine saubere und nachvollziehbare Trennung von Abfällen notwendig. Hier ergeben sich Möglichkeiten, Verfahren für die Abfalltrennung und -behandlung zu übernehmen, um radioaktive Abfälle zu handhaben und zu konditionieren. Im Rahmen des Rückbaus sind ggfs. auch in der chemischen Industrie Dekontaminationsmaßnahmen an unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften notwendig. Hier ergeben sich Möglichkeiten für einen gewinnbringenden Erfahrungsaustausch.

6.3 Industrieübergreifender Austausch

Im Rahmen des Projektes wurden Recherchen durchgeführt, um abzuschätzen, inwieweit und in welchem Rahmen ein industrieübergreifender Austausch (mit dem Ziel eines Technologietransfers) in und außerhalb Deutschlands stattfindet bzw. stattgefunden hat.

Gute Beispiele für einen dynamischen branchenübergreifenden Austausch finden sich für Großbritannien. Dort hat in den vergangenen Jahren die Behörde für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen (*Nuclear Decommissioning Authority, NDA*) erfolgreich den branchenübergreifenden Austausch (zivile Nuklearindustrie, Kerntechnik zu Verteidigungszwecken (insb. Atom-U-Boote), Öl und Gas-Industrie und Windindustrie (auf dem Meer)) gefördert, indem beispielsweise thematische Workshops durchgeführt wurden. Insgesamt haben sich bereits mehr als 150 Organisationen an diesem Austausch beteiligt. Bei diesem Austausch geht es nicht nur um technische Innovationen, sondern auch um Aspekte wie die Versorgungskette, Projektmanagement,

Standardisierungsmöglichkeiten, Sicherheit in der Stilllegung oder die Berücksichtigung der Stilllegung in der Designphase /BAR 22/. Zudem wurde in Großbritannien das Innovationsprogramm *Game Changers* etabliert, mit dem Lösungsmöglichkeiten für komplexe Fragestellungen innerhalb der kerntechnischen Industrie gefunden werden sollen. Zu diesem Zweck fördert das Programm den Austausch zwischen der kerntechnischen Industrie und anderen Industriezweigen und organisiert regelmäßig Veranstaltungen, wie z. B. Mittagsseminare, in denen technische Lösungen präsentiert werden. Die Internetseite des Programms umfasst auch eine Übersicht über geförderte Projekte (beispielsweise Techniken zur Detektion von Bodenkontaminationen) /GAM 24/.

Auch in weiteren Ländern gibt es Strukturen, die einen übergreifenden Austausch fördern. In den Vereinigten Staaten existiert das sogenannte Decommissioning Network, an dem Organisationen aus unterschiedlichsten Branchen beteiligt sind. In Frankreich gibt es mit GIFEN ein etabliertes Netzwerk der kerntechnischen Industrie /GIF 24/.

In Deutschland wurden im Rahmen der Recherche keine wesentlichen Plattformen, Förderprogramme oder ähnliches identifiziert, die beispielsweise mit den Angeboten in Großbritannien vergleichbar wären. Das VDI-Wissensforum bietet zwar regelmäßig Veranstaltungen mit Rückbau-bezug an, beispielsweise zu Themen wie „Schadstoff- und Abfallmanagement im Rückbau und Abbruch“, „Rückbau kerntechnischer Anlagen“, „Rückbau konventioneller Industrieanlagen“ oder „Vom Abbruch bis zur Flächennutzung industrieller Bauwerke“. Aus den Programmen dieser Veranstaltungen wird aber ersichtlich, dass zwischen der Stilllegung in der Kerntechnik und dem Rückbau von Industrieanlagen in anderen Branchen unterschieden wird /VDI 24/. Das bereits seit einigen Jahren existierende Förderkonzept FORKA (Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen) unterstützt (technische) Innovationen in den Bereichen Zerlege- und Dekontaminationsverfahren, Freigabe, Behandlung radioaktiver Abfälle, Abfalldeklaration und Zwischenlagerung, Umwelt- und Strahlenschutz sowie Mensch, Technik und Organisation und adressiert im wesentlichen Forschungsverbände aus Forschungseinrichtungen und Unternehmen der kerntechnischen Branche. Ein Austausch über unterschiedliche Industriezweige ist somit grundsätzlich zwar möglich, vordergründlich aber nicht vorgesehen /BMBF 23/. Auf den großen kerntechnischen Veranstaltungen wird der branchenübergreifende Austausch in einem bescheidenen Umfang punktuell, aber regelmäßig thematisiert, beispielsweise im Kontext von Eigenentwicklungen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es in Deutschland kein Programm gibt, dass systematisch den branchenübergreifenden Austausch unterstützt und diesen Austausch moderiert. In

einigen anderen Ländern gibt es Formate, die den branchenübergreifenden Austausch der Stilllegungsindustrie oder der kerntechnischen Industrie unterstützen. In Großbritannien existiert mit *Game Changers* ein Programm, das sich thematisch nicht nur auf Adaptionen technischer Verfahren stützt, sondern auch den Austausch in einem breiteren Rahmen fördert, um Synergien bestmöglich zu nutzen und um von den Erfahrungen anderer zu profitieren /GAM 24/. Grundsätzlich kann man zu der Einschätzung gelangen, dass ein branchenübergreifender Austausch insbesondere dann beabsichtigt wird, wenn a.) Skaleneffekte nutzbar sind, b.) besondere Herausforderungen in der Stilllegung zu adressieren sind und c.) nationale Industriezweige existieren, in denen sich der Rückbau auch als herausfordernd darstellt (beispielsweise in der Öl- und Gasförderung).

6.4 Fallbeispiele für einen Wissens- und Technologietransfer in die kerntechnische Industrie innerhalb Deutschlands

Obschon es keine übergeordnete Plattform in Deutschland zur Förderung des branchenübergreifenden Austauschs gibt, heißt dies nicht, dass ein solcher Austausch mit anderen Industriezweigen nicht stattfindet. Im Gegenteil – der Austausch ist grundsätzlich sehr hoch, insbesondere im Kontext digitaler Techniken. Hinsichtlich innovativer Verfahrenstechniken ist der Austausch in der Regel lösungsorientiert und fokussiert sich auf Kollaborationen mit wenigen Beteiligten, wie im Folgenden veranschaulicht werden soll. Als Basis für die Betrachtung dient Abb. 6.1, in der der Austausch zwischen diversen Organisationstypen plakativ – und somit insbesondere ohne den Anspruch auf allgemeine Gültigkeit – skizziert wird.

6.4.1 Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und Dienstleistern bzw. Technologieanbietern aus anderen Industriezweigen

In der Dienstleistungsbranche und bei Technologieanbietern, die zuvorderst nicht die kerntechnische Branche bedienen, ist oftmals ein geringes Wissen und Verständnis für die kerntechnischen Bereiche zu beobachten. Insbesondere in Industriezweigen mit geringeren regulatorischen Anforderungen fehlt die Erfahrung hinsichtlich des behördlichen Austauschs und der geltenden Sicherheitsanforderungen, z. B. im Rahmen technischer Änderungen. Solche Unternehmen, auf die diese Einschätzung zutrifft, nehmen die kerntechnische Industrie zudem oft als *black box* wahr, so dass z. B. das Wissen hinsichtlich des dort vorliegenden Technologiebedarfs nur unzureichend vorhanden ist. Dies erschwert es deutlich, die kerntechnischen Betreiber als potenziellen Kunden einzuschätzen und zu adressieren. Dieses Wissen aufzubauen, ist zeitintensiv und kostspielig,

was vor dem Hintergrund des beschränkten Umfangs der Kerntechnik in Deutschland als Herangehensweise oft nicht als langfristig tragfähiges Betätigungsfeld tragend eingeschätzt wird. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die fehlenden praktischen Erfahrungen die Risikoeinschätzung seitens des Betreibers erschwert wird. Eine gewisse Stellung des Unternehmens und Bewährtheit der Technologie wird oft erwartet – fehlt diese, kann dies als zusätzliches Risiko wahrgenommen werden, so dass man praktisch als Betreiber auf in der Kerntechnik etablierte Partner und Technologien zurückgreift, obschon dies unter objektiven Kriterien nicht zwingend die beste – auch aus ökonomischen Gesichtspunkten – sein muss.

Die Kultur in der kerntechnischen Industrie wird von einem sehr hohen Sicherheitsgedanken geprägt, was sich auch in der Wortwahl und der Tendenz zu etablierten technischen Verfahren ausdrückt und bevorzugt auf schrittweise Weiterentwicklungen zurückgegriffen wird. Dies kann insbesondere für innovative Dienstleister problematisch sein, bei denen die Außendarstellung (z. B. durch die Wortwahl) diesen innovativen Wesenszug unterstützt.

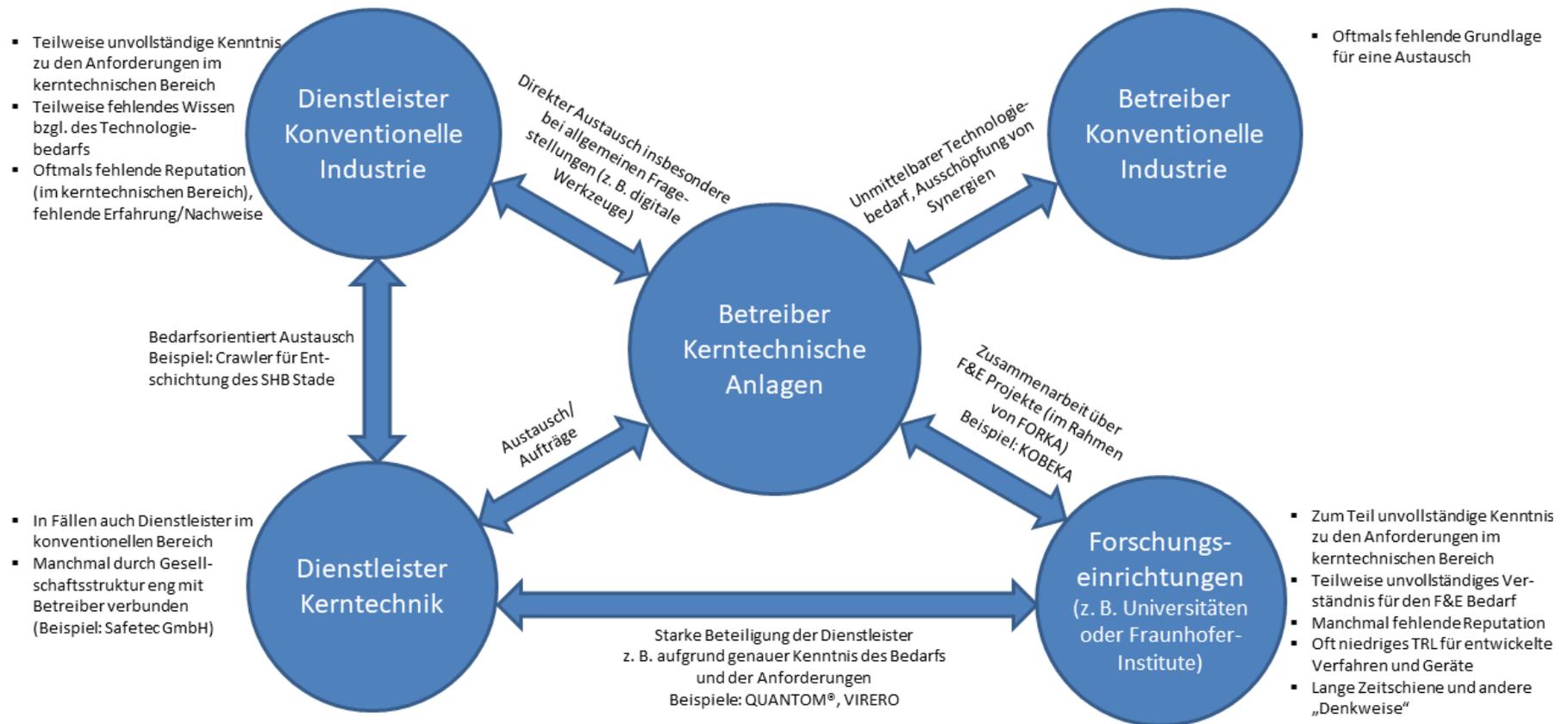


Abb. 6.1 Schematische Darstellung des übergreifenden Austausches vor dem Hintergrund eines Wissenstransfers und neuer technischer Verfahren in die kerntechnische Industrie und entsprechende Fallbeispiele

6.4.2 Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und Dienstleistern bzw. Technologieanbietern mit Bezug zur Kerntechnik

Bei den Dienstleistern und Technologieanbietern, die im kerntechnischen Bereich tätig sind, kann grundsätzlich von einem ausreichenden Verständnis der regulatorischen Rahmenbedingungen und den geltenden Sicherheitsanforderungen ausgegangen werden. Zudem verfügen diese Unternehmen in der Regel über eine Vielzahl praktischer Referenzen und sind mit der (Sicherheits-) Kultur der kerntechnischen Branche vertraut. Diese Faktoren wirken sich wesentlich auf die Risikoeinschätzung des Betreibers aus und begünstigen so die grundsätzliche Position dieser Unternehmen.

Aufgrund dieser Erfahrungen sind solche Unternehmen auch befähigt, als Verbindungsglied sowohl zu konventionellen Dienstleistern und/oder Technologieanbietern als auch zu den Forschungs- und Entwicklungsbereichen (z. B. Universitäten oder Institute der Fraunhofer-Gesellschaft) zu fungieren und diese in Aufträge einzubinden. Für solche Einbindungen gibt es in der Praxis diverse Fallbeispiele, von denen im Folgenden zwei aufgeführt werden sollen.

Im KKS wurden weite Teile der Oberflächen der sphärischen Metallstruktur des Sicherheitsbehälters (der Durchmesser beträgt etwa 48 m) mit einem Magnetcrawler ferngesteuert gereinigt und anschließend entschichtet. Im weiteren Verlauf wurden Magnetcrawler mit Messtechnik ausgestattet und Messungen für die Freigabe durchgeführt. Durch diese Herangehensweise konnte der Bedarf an Arbeitsgerüsten deutlich reduziert werden, was auch eine grundsätzliche Verkürzung der Rüstzeiten ermöglichte. Die Arbeiten wurden von einer im kerntechnischen Bereich etablierten Ingenieurgesellschaft (Brenk Systemplanung GmbH) in Kooperation mit einem Unternehmen (Tiefenbach Oberflächentechnik GmbH, Bereitstellung der Magnetcrawler) durchgeführt, das schwerpunktmäßig konventionelle Industriezweige bedient (siehe Abb. 6.2) /DEG 23/.

Die AiNT GmbH hat in Kooperation mit der Framatome GmbH und dem Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) und im Rahmen eines FORKA Projektes (Förderkennzeichen 15S9406B) eine innovative Messanlage für die zerstörungsfreie stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung von, in 200-Liter-Stahlfässer eingelagerten, radioaktiven

Abfällen entwickelt. Das System mit dem Namen QUANTOM®³¹ wurde als mobile Messanlage entwickelt, die in einem Standardcontainer integriert werden kann und kann somit für Vor-Ort Messungen genutzt werden und erweitert das Portfolio der Framatome GmbH im Bereich Abfallmanagement und Abfallbehandlung /COQ 23/.



Abb. 6.2 Das linke Bild zeigt den partiell entschichteten Sicherheitsbehälter im Kernkraftwerk Stade. Das rechte Bild zeigt den mit einem HPGe-Detektor ausgestatteten Magnetcrawler (Quelle: Brenk Systemplanung GmbH) /DEG 23/

6.4.3 Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und F+E-Einrichtungen (z. B. Universitäten)

Einige Universitäten, Fachhochschulen und weitere Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen in Deutschland beschäftigen sich auch weiterhin mit kerntechnischen Fragestellungen. Hierzu gehört beispielsweise die Technische Universität Dresden mit der Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik oder das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB). Solche F+E-Einrichtungen verfügen über eine ausreichende Kenntnis der kerntechnischen Branche und deren (Sicherheits-)Kultur. Außerhalb dieser Organisationen ist im Bereich der freien Forschung und Entwicklung allerdings häufig eine fehlende Kenntnis der spezifischen Anforderungen im kerntechnischen Bereich als auch eine fehlende Kenntnis zu dem tatsächlichen Entwicklungsbedarf zu beobachten.

³¹ Das Akronym QUANTOM steht für Quantitative Analyse Toxischer und Nicht-Toxischer Materialien

Oft beschäftigen sich universitäre Einrichtungen mit Verfahren und Technologien, die durch einen niedrigen TRL-Wert charakterisiert sind, so dass häufig Prototypen im Fokus stehen und das technische Regelwerk (z. B. DIN-Normen) nur eine stark untergeordnete Rolle spielen. Das Verständnis, dass möglichst Norm-konforme Technologien in der stark regulierten Branche von deutlichem Vorteil sind, fehlt an einigen Stellen. Zudem sind im universitären Umfeld Herangehensweisen etabliert, die im Konflikt mit einem zeitkritischen, pragmatischen und lösungsorientierten Ansatz stehen können.

Ein Beispiel für die Entwicklung innovativer Verfahren durch einen Betreiber im engen Austausch mit universitären bzw. Forschungseinrichtungen stellt das Projekt KOBKA dar, in dem derzeit Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonstrukturen im Sicherheitsbehälter von Druckwasserreaktoren entwickelt wird [BER 23]. Das Projekt wird durch das BMBF im Rahmen des Förderkonzepts FORKA (Förderkennzeichen 15S9434) gefördert und ist eine Kooperation zwischen der PreussenElektra GmbH, der Technischen Universität Dresden, dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, der Dornier Nuclear Services GmbH sowie der VKTA Strahlenschutz, Analytik und Entsorgung Rossendorf e. V. Ausgangspunkt dieses Projektes ist der im Jahr 2014 erfolgte Fund tief eingedrungener Kontaminationen in der Kalottenstruktur des Sicherheitsbehälters im Kernkraftwerk Stade. Bisherige Kartierungskonzepte nutzen kosten- und zeitaufwendige Kernbohrungen und anschließende Laboranalysen. Aufgrund baustatischer Randbedingungen ist zudem die Anzahl der Probenahmebohrungen beschränkt. Ziel des Projektes KOBKA ist die Entwicklung innovativer Messtechniken, die sich für deutlich kleinere Bohrlöcher für in-situ Messungen eignen. Hierzu werden mehrere Werkzeuge entwickelt, beispielsweise gammaspetroskopische oder laserbasierte Messsysteme.

6.4.4 Austausch zwischen kerntechnischen Betreibern und Betreibern anderer Industriezweige

Für Betreiber der nicht-kerntechnischen Industrie können sich aus dem Austausch mit Betreibern der kerntechnischen Industrie Synergien und Lösungsmöglichkeiten ergeben, die für beide Seiten von Relevanz sind. Wichtig hierfür sind allerdings Plattformen, die einen solchen Austausch fördern, beispielsweise durch Tagungen und Workshops zum Thema Rückbau im Allgemeinen. Zudem sind einige kerntechnischen Betreiber Teile größerer Konzerne, die sich nicht nur im kerntechnischen Bereich, sondern auch in konventionellen Industriezweigen betätigen. Hier ist es

durchaus denkbar, dass konzernintern Fragestellungen und Probleme eruiert werden, die mehrere Sparten betreffen können.

6.5 Zusammenfassung

Die für die Stilllegung etablierten Verfahrenstechniken wurden ursprünglich zum überwiegenden Teil nicht dediziert für die Kernindustrie entwickelt und wurden erst im Verlauf der Zeit für die Anforderungen der kerntechnischen Branche modifiziert. Dies unterstreicht bereits die Bedeutung eines branchenübergreifenden Austauschs hinsichtlich der technischen Verfahren. Grundsätzlich ergeben sich aus einem Wissens- und Technologieaustausch Möglichkeiten für Synergien und diverse Optimierungsmöglichkeiten – beispielsweise im Kontext effizienterer Verfahren oder möglichen Kostenreduzierungen – die auch der Sicherheit zuträglich sein können. Auch aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ergibt ein branchenübergreifender Austausch durchaus Sinn und bietet die Möglichkeit, neue Absatzmärkte zu erschließen und grundsätzliche Barrieren abzubauen.

Gerade in digitalen Bereichen finden derzeit sehr viele Entwicklungen statt, die branchenübergreifend von Bedeutung sind, beispielsweise das BIM, das sinnvoll für die Projektplanung genutzt werden kann oder auch diverse AR/VR Anwendungen. Aufgrund ihres nicht unmittelbaren Einflusses auf Sicherheitsaspekte ist auch für den kerntechnischen Bereich eine Adaption leicht möglich. Mit steigender Sicherheitsrelevanz gewinnt zunehmend auch ein solides Verständnis für die kerntechnische Branche und den dort geltenden Sicherheitsanforderungen an Relevanz und stellt eine wichtige Voraussetzung für einen gewinnbringenden Austausch dar. Liegt dieses Wissen nicht vor, kann dies einem branchenübergreifenden Austausch übermäßig entgegenstehen.

In einigen Ländern – Großbritannien spielt hier beispielsweise mit dem Förderprogramm *Game Changers* eine Vorreiterrolle – wird der branchenübergreifende Austausch von zentralen Stellen aktiv unterstützt. Zurzeit existieren in Deutschland keine vergleichbaren Strukturen oder Netzwerke. Dies bedeutet allerdings nicht, dass kein Austausch stattfindet. Die Praxis offenbart einige Fallbeispiele für einen erfolgreichen Austausch, dieser wird allerdings nicht zentral unterstützt, sondern ist vielmehr das Ergebnis (lösungsorientierter) Initiativen, an denen sich wenige ausgewählte Organisationen kooperativ beteiligen. In dem vorliegenden Kapitel wurden einige Faktoren aufgeführt, die einem branchenübergreifenden, intensiveren Technologietransfer im Wege stehen können. Viele dieser Faktoren sind zurückzuführen auf ein fehlendes Verständnis der kerntechnischen Branche und den dort geltenden Sicherheitsanforderungen und den Herausforderungen in

der Stilllegung. Für in der Kerntechnik etablierte Dienstleister und Technologieanbieter ist dies aufgrund fehlender Konkurrenz aus wirtschaftlicher Sicht sicherlich nicht zum Nachteil, ein Optimierungspotenzial besteht somit. Auch wenn die Stilllegung der deutschen Leistungsreaktoren innerhalb der kommenden zwei Dekaden abgeschlossen wird, wird die Stilllegung auch danach im internationalen Rahmen noch große Betätigungsfelder bieten. Die Erfahrungen, die derzeit in Deutschland gewonnen werden, stellen für die beteiligten Unternehmen somit einen Wettbewerbsvorteil dar.

Grundsätzlich wäre eine Austauschplattform wünschenswert, in denen unterschiedliche Industriezweige – d. h. nicht nur die kerntechnische Industrie – von ihrer Industriekultur, den regulatorischen Anforderungen und den Sicherheitsanforderungen berichten. Dies würde es außenstehenden Dienstleistern und Technologieanbietern einen Eindruck von Industriebereichen, in denen man derzeit nicht aktiv ist und, zu bekommen. Dies würde es ihnen grundsätzlich erleichtern, Kontakte aufzubauen und mögliche neue Absatzmärkte zu erschließen.

7 Zusammenfassung

Die Stilllegung einer kerntechnischen Anlagen stellt ein Großprojekt dar, das typischerweise zehn oder mehr Jahre in Anspruch nehmen kann. Gerade in den ersten Stilllegungsjahren ist das Arbeitsumfeld sehr dynamisch und geprägt von sich ständig verändernden Randbedingungen. Der Maßnahmenplanung kommt somit eine wesentliche Rolle zu und sichert einen kontinuierlichen fortschrittsorientierten Prozess mit möglichst minimalen Haltepunkten. Für den Fortschritt der Stilllegung sind Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen unabdingbar. Die Erfahrungen aus der Praxis haben gezeigt, dass mit den etablierten technischen Verfahren eine sichere Stilllegung nach regulärer Beendigung des Leistungsbetriebs gewährleistet werden kann. Dies ist ein wesentlicher Grund, weswegen sich im internationalen und nationalen Regelwerk (siehe Kapitel 0) eine gewisse Präferenz für etablierte Stilllegungstechniken zeigt, obschon das Regelwerk grundsätzlich technologie-offen ist. Die kerntechnische Industrie gehört zu den am stärksten regulierten Industriezweigen, was sich in den zusätzlichen Anforderungen widerspiegelt, die bei der (erstmaligen) Nutzung innovativer Verfahren zu erfüllen sind, beispielsweise in Form von Sicherheitsnachweisen oder Kalterprobungen.

Für die Verfahrensauswahl werden in der Praxis sowohl für Trenn- als auch Dekontaminationsmaßnahmen eine Vielzahl an Kriterien berücksichtigt. Die Wichtung dieser Kriterien für eine konkrete Maßnahme ist dabei allerdings nicht universell, sondern ist in der Regel von Fall zu Fall (auf nachvollziehbare Weise) verschieden. Wie in Kapitel 3 aufgeführt wird, ist das Spektrum der etablierten und in der Stilllegung tatsächlich genutzten Verfahren breit. Weder für das Trennen noch für das Dekontaminieren existieren jedoch universelle und gleichermaßen gut funktionierende Verfahren. Mit Blick auf Trennmaßnahmen bei großen Gewerken und Strukturen gehören insbesondere das Brennschneiden, das Bandsägen oder das Seilschleifen zu den oft genutzten Verfahren. Grundsätzliche Unterschiede ergeben sich für thermische Trennverfahren einerseits und mechanische Verfahren andererseits, z. B. hinsichtlich der Materialeignung, der Schnittgeschwindigkeiten oder der Freisetzung von Aerosolen. Gerade für kontaminierte Teile kann die Entscheidung für ein bestimmtes Trennverfahren deutliche Auswirkungen auf die Wahl und Notwendigkeit von sekundären Hilfsmitteln haben, wie z. B. Lüftungsanlagen oder Einhausungen.

Für die Dekontamination der Primärkreisläufe im Rahmen der Stilllegung stellt das Verfahren HP/CORD D UV das in Deutschland etablierteste Verfahren dar. Chemische Dekontaminationsverfahren eignen sich zuvorderst für die Dekontamination von Metallen, das elektrochemische

Verfahren vereint oftmals hohe Dekontaminationsfaktoren mit guten Eigenschaften der Sekundärabfälle (Menge und Zusammensetzung). Mechanische Verfahren sind in der Regel leicht in der Anwendung und können für ein breites Materialspektrum sowohl für die Entfernung loser als auch fixierter Kontaminationen (verfahrensabhängig) genutzt werden.

Obschon die Trenn- und Dekontaminationsaufgaben in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen nach regulärer Beendigung des Leistungsbetriebes grundsätzlich mit den etablierten technischen Verfahren möglich sind, gibt es nachvollziehbare Argumente für die Entwicklung und Verwendung neuer technischer Verfahren bzw. für die Weiterentwicklung existierender Techniken. Zu diesen Argumenten gehören beispielsweise diverse grundsätzliche Optimierungsmöglichkeiten (insbesondere hinsichtlich der durch die Arbeiten bedingten Personendosen oder hinsichtlich der erzeugten Sekundärabfälle) als auch eine gewisse Fokussierung auf bestimmte Problemfelder (beispielsweise das Trennen in Einbaulage oder das Dekontaminieren von Ecken und Kanten). Solche Innovationen versprechen nicht nur betriebswirtschaftliche Vorteile, sondern können auch zu einer Erhöhung der Sicherheit in der Stilllegung beitragen.

Im Kontext des Trennens gehören z. B. das Laserschneiden an Luft und unter Wasser (für das Zerlegen von RDB-Einbauten) sowie das CAMG-Verfahren zu jenen Verfahren, die derzeit in der Breite noch nicht genutzt werden, für die aber eine baldige Etablierung wahrscheinlich erscheint. Eine vergleichbare Rolle nimmt für das Dekontaminieren die Laserdekontamination ein. Zwei weitere Aspekte, die im Rahmen von Innovationen adressiert werden, betreffen zum einen die Entwicklung von Werkzeugen für spezifische Problemstellungen (z. B. Dekontamination von Ecken und Kanten), zum anderen die Weiterentwicklung von Verfahren mit dem Ziel, bestimmte nachteilige Faktoren abzuschwächen oder auszumerzen (z. B. Reduzierung des Seilverschleißes beim Seilschleifen).

Neben Innovationen auf Ebene einzelner technischer Verfahren sind industrieübergreifende Entwicklungen, Konzepte und Methoden zu beobachten, von denen eine Auswahl in diesem Bericht betrachtet wurde. Hierzu zählt beispielsweise das Thema Robotik, was insbesondere in der Fertigung seit mehreren Jahrzehnten verfolgt wird. Auch für die Stilllegung ist zum Teil eine Entwicklung hin zu zunehmend automatisierten Verfahren zu beobachten, z. B. für Anwendungen in geschlossenen Arbeitsbereichen (siehe ROBBE). Ein weiteres Themenfeld steht die Bauwerksdatenmodellierung (BIM) dar, das auch für Projekte in der Stilllegung Anwendung findet. Aufgrund des grundsätzlichen Aufwandes bei der Digitalisierung des Ist-Zustandes wird in der

Regel anwendungsorientiert gearbeitet, so dass nur die betroffenen Bereiche bei der Digitalisierung Berücksichtigung finden. Die Themenfelder des Maschinen Lernens im Speziellen und Künstliche Intelligenz im Allgemeinen werden derzeit industrieübergreifend diskutiert. Obschon das volle Potenzial für die Stilllegungslandschaft derzeit schwer abzuschätzen ist, lässt sich aber bereits feststellen, dass die Methoden bei der Auswertung (großer) Datensätze oder im Kontext automatisierter oder autonomer Roboter bereits Anwendung finden. Ein weiteres, gerade für die Robotik und der Steuerung von Robotern, wichtiges Themenfeld stellen Digitale Realitäten dar. Diese können z. B. auch in der Stilllegungslandschaft für Ausbildungszwecke und Detailplanungen (z. B. Digitaler Zwilling) mit den bereits existierenden Werkzeugen sinnvoll genutzt werden.

In einigen Ländern existieren sowohl dedizierte Netzwerke, die einen – auch industrieübergreifenden – Austausch zu Stilllegungsthemen unterstützen als auch Förderstrukturen, mit denen ein stilllegungsgerichteter Technologietransfer in die kerntechnische Industrie anvisiert wird. Vergleichbare, industrieübergreifende Austauschplattformen zu Stilllegungsthemen, an dem sich auch die kerntechnische Industrie wesentlich beteiligt, existieren in Deutschland nicht. In der Praxis wird häufig zwischen konventionellem Rückbau und kerntechnischer Stilllegung unterschieden. Trotzdem ist festzustellen, dass ein Austausch der kerntechnischen Industrie sowohl mit anderen Industriezweigen als auch mit Forschungseinrichtungen hinsichtlich der Entwicklung und Nutzung innovativer Verfahren stattfindet, der sich häufig allerdings an konkreten Problemstellungen orientiert.

8 Ausblick

Die Stilllegung kerntechnischer Anlagen nach regulärer Beendigung des Leistungsbetriebes kann mit den existierenden Trenn-, Abbau- und Dekontaminationstechniken nachweislich – d. h. auf Basis bisheriger Projekte – sicher bewerkstelligt werden. Für die Dienstleister, die maßgeblich an den entsprechenden Maßnahmen und Projekten beteiligt sind, stellt der Ausstieg Deutschlands aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung – auch weltweit gesehen – eine einmalige Möglichkeit zum Auf- und Ausbau von Kompetenzen dar, was perspektivisch auch deren internationale Wettbewerbsfähigkeit gewährleisten sollte. Grundsätzlich stellt der Umfang der deutschen Stilllegungsprojekte, insbesondere unter Berücksichtigung zeitlicher Aspekte, eine Herausforderung für alle Beteiligten dar. Es ist sowohl von nationalem als auch internationalem Interesse, dass das praktische *Know-how* und das aufgebaute Wissen kommuniziert und konserviert wird. Deutschland spielt hinsichtlich der Stilllegung derzeit eine Vorreiterrolle – viele Leistungsreaktoren in anderen Ländern nähern sich allerdings ihrem altersbedingten Betriebsende, so dass entsprechende Stilllegungsprojekte von den Erfahrungen profitieren könnten. Das Wissen aus den deutschen Stilllegungsprojekten kann dort zu einer sicheren Stilllegung beitragen, was die Bedeutung des internationalen Erfahrungsaustauschs unterstreicht.

Wie im Bericht aufgezeigt wurde, hängt die Auswahl eines Verfahrens für eine bestimmte Maßnahme von verschiedenen Faktoren ab. Grundsätzlich wäre es wünschenswert, wenn mehr Daten zu der Performance einzelner Verfahren (frei) zur Verfügung stünden. Dies ist derzeit nicht der Fall, was eine belastbare Bewertung einzelner Verfahren erschwert und ein grundsätzliches Problem für Auswahlhilfen darstellt. Ein denkbarer Ansatz wären *Benchmarking*-Studien zu konkreten Aufgabenstellungen, beispielsweise dem Trennen von bestimmten Stahlsorten mit unterschiedlichen Dicken. Diese Frage- bzw. Aufgabenstellung ist so grundlegend, dass sie nur im internationalen Kontext sinnvoll verfolgt werden sollte. Hilfreich hierzu wäre bereits eine leicht zugängliche Datenbank oder ein Wiki, in dem praktische Erfahrungswerte ohne signifikanten Aufwand hinterlegt werden könnten. Einer besonderen Bedeutung kommen hierbei Maßnahmen abseits von Großprojekten zu, da diese häufig nur peripher diskutiert werden.

Der Entwicklung und Nutzung innovativer Verfahren stehen oftmals praktische Bedenken und Probleme entgegen. Hierzu gehören zum Beispiel geringe Skaleneffekte zur Amortisierung der F+E Kosten, der Aufwand bei der Etablierung und der Nachweisführung und ein ausgeprägtes Risikobewusstsein (auch vor dem Hintergrund ambitionierter Zeitpläne). Insbesondere für

Großprojekte wie die Zerlegung von RDBs und RDB-Einbauten ist die Projektplanung, die auch die Wahl der technischen Trennverfahren einschließt, bereits abgeschlossen bzw. weit vorangeschritten, so dass innovative Verfahren für diese Großprojekte der deutschen Stilllegungslandschaft voraussichtlich nicht mehr von Belang sein werden. Für viele wiederkehrende Maßnahmen besteht aber durchaus noch die Möglichkeit, innovative Verfahren zu etablieren. Wichtig hierfür ist allerdings ein pragmatischer, bedarfs- und lösungsorientierter Einsatz – bei F+E Projekten ist entsprechend die Einbindung der Betreiber und/oder der kerntechnischen Dienstleister nahezu unabdingbar.

Neben den Trenn- und Dekontaminationsmaßnahmen stellen insbesondere die (radiologische) Charakterisierung und die Freigabe zwei weitere wesentliche Aufgaben in der Stilllegung dar, die insbesondere zum Ende der Stilllegung hin an Bedeutung gewinnen. Dementsprechend ist für diese Zwecke der zeitliche Druck bei der Umsetzung und Etablierung innovativer Verfahren etwas geringer. Gerade die radiologische Charakterisierung ist ein wesentlicher Bestandteil für die Projektplanung wie auch praktische Beispiele (z. B. Charakterisierung der Betonstrukturen des SHBs im KKS) eindrucksvoll demonstrieren. Die Freigabe ist wiederum nicht nur für die Dienstleister und Betreiber, sondern aufgrund des Umfangs eine enorme zeitliche bzw. personelle Herausforderung auch für die Behörden und hinzugezogenen Dienstleister. Hier bestehen durchaus noch Möglichkeiten zur Effizienzerhöhung, beispielsweise im Rahmen digitalisierter oder automatisierter Abläufe.

Das Wissen, wie eine sichere Stilllegung gewährleistet werden kann, wird auch nach Abschluss der laufenden Stilllegungsprojekte in Deutschland noch benötigt werden, da auch weiterhin kerntechnische Einrichtungen betrieben werden. Perspektivisch erscheint es aus heutiger Sicht als durchaus denkbar, dass die Kernfusion zur Stromerzeugung in den kommenden Dekaden etabliert werden könnte. Auch wenn das Gefahrenpotenzial und die Anforderungen an die Stilllegung nicht vergleichbar sind, erscheint es durchaus als wahrscheinlich, dass für deren Betrieb und Stilllegung innovative Konzepte benötigt werden. Dies ist ein Aspekt, der bei der Entwicklung innovativer Verfahren für die kerntechnische Stilllegung nicht vergessen werden darf – das Anwendungsspektrum ist nicht auf diese beschränkt; das Wissen und die Kompetenz die jetzt aufgebaut werden, können perspektivisch von Nutzen sein. Dies unterstreicht die gesamtgesellschaftliche Bedeutung von Innovationen, auch von jenen in der kerntechnischen Industrie.

Grundsätzlich ist es denkbar, dass ein verstärkter branchenübergreifenden Austausch zu Rückbau- bzw. Stilllegungsthemen Optimierungen ermöglichen könnte. Ein solcher Austausch könnte z. B. zur Darstellung industriespezifischer Problemstellungen und Randbedingungen genutzt werden, was es technischen Dienstleistern leichter machen könnte, neue Märkte zu erschließen und bedarfsorientierte Lösungen zu entwickeln. Wie dies gelingen kann, zeigen Beispiele im internationalen Umfeld.

Literaturverzeichnis

- /ALA 21/ Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Shawn, L. E., Al-Yacouby, A. M., Toloue, I., Rafiq, W., Farooq, W.: Multi-Nozzle Abrasive Water Jet for Oil and Gas Platforms Decommissioning: A Review. Civil Engineering and Architecture, Bd. 9, Nr. 6, S. 2062–2076, DOI 10.13189/cea.2021.090634, 2021.
- /ALT 18/ Altmann, U.: Erfahrungen aus dem Rückbau wirkungsvoll einbringen. Präsentation, VDI Fachkonferenz Rückbau kerntechnischer Anlagen, 2018.
- /AUG 20/ August Mössner GmbH + Co KG: Kerntechnikrückbau. Erreichbar unter <https://www.moessner-kg.de/produkte/sondermaschinenbau/kerntechnikrueckbau/>, abgerufen am 7. August 2023.
- /BAC 98/ Bach, F.-W.: Betriebsanleitung CAMC-Trenneinrichtung. Hrsg.: Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, Universität Dortmund: Dortmund, 1998.
- /BAC 01/ Bach, F.-W., Versemann, R.: Application of flame cutting under water. Welding in the World, Nr. 45, S. 27–31, 2001.
- /BAC 02/ Bach, F.-W., Versemann, R., Wilk, P.: Status and Development of Decontamination and Dismantling Techniques for Decommissioning of Nuclear Installations. Präsentation, International Conference on safe decommissioning for Nuclear activities, 2002.
- /BAC 06/ Bach, F.-W., Kremer, G., Rührenapp, T.: Leistungsfähige Rückbautechnologien - Plasmaschmelzschneiden, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC) und Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG). atomwirtschaft, Nr. 51, 2006.
- /BAC 21a/ Bachmann, M., Gentes, S., Krau, C. I., Konrad J., Greul, C.: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage (kontaminierter) Rohrleitungen (RoTre). Hrsg.: Kontec 2021, 6 S.: Dresden, 2021.
- /BAR 22/ Barton, Heather: Sharing Decommissioning Good Practices across Industrial Sectors. Präsentation, Waste Management Symposia 2022, 2022.

- /BEC 91/ Beckmann T.R., Bjerler, J.: Diamond wire cutting of heat exchangers. Tokio, 1991.
- /BEC 21/ Becker, M., Borrmann, F., Finkenberg, M., Demming, C., Horstmann, R., Nisch, A.: Development of an automated decontamination cabin with documentation based on industry 4.0 features. 8 S., 2021.
- /BER 98/ Bernard, J., Pilot, G., Grandjean, J. P.: Evaluation of various cutting techniques suitable for the dismantling of nuclear components, Nuclear Science and Technology. Hrsg.: European Commission, 1998.
- /BER 23/ Bertram, W., Hampel, U., Anthofer, A., Döhler, D. D., Herrmann, M., Jansen, S., Kahle, P., Kormoll, T., Kosowski, K., Lösch, H., Mechtcherine, V., Nurjahan, T., Rauf, A., Reinecke, A.-M., et al.: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonstrukturen im Sicherheitsbehälter von Druckwasserreaktoren während des Kraftwerksrückbaus (KOBKA). Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /BIL 23/ Bilfinger SE: Rückbau von kerntechnischen Großkomponenten. 4 S., erreichbar unter <https://www.bilfinger.com/de/rwe/>, abgerufen am 8. August 2023.
- /BIN 94/ Binner, W.: Early dismantling of retired reactor pressure vessels. Trans. Am. Nucl., Nr. 71, S. 659–661, 1994.
- /BMBF 23/ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Bekanntmachung - BMBF, Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Förderkonzept FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen, Bundesanzeiger vom 07.12.2023. Erreichbar unter <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2023/12/2023-12-07-Bekanntmachung-FORKA.html>, abgerufen am 27. Februar 2024.
- /BMI 21/ Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Masterplan BIM für Bundesbauten, Erklärungsbericht. 36 S., September 2021.
- /BMU 21/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Leitfa-
den zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder An-
lagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes. 16. September 2021.

- /BNL 83/ Berkeley Nuclear Laboratories: Development of LOMI Chemical Decontamination Technology. 196 S., 1983.
- /BOR 21/ Borrmann, F.: Development of an automated decontamination cabin, Results of the BMBF funded project AuDeKa. Präsentation, Institut für Umwelttechnologien und Strahlenschutz GmbH: Aachen, 16. November 2021.
- /BRA 21/ Braunroth, T., Berner, N., Rowold, F., Péridis, M., Stuke, M.: Muon radiography to visualise individual fuel rods in sealed casks. European Physical Journal Nuclear Science & Technologies, Bd. 7, 2021.
- /BRA 23/ BRAUN Rückbautechnologien GmbH: Rohrrinnenschneider für das Zerlegen von Steuerstabsführungseinsatz-Stützen beim oberen Kerngerüst. Stand vom 10. August 2023, erreichbar unter <https://www.braun-ddd.com/referenzen/deutschland-kernkraftwerk-philippsburg-und-neckarwestheim/>, 2023.
- /BUE 94/ Buehler, M. F., Surma, J. E., Virden, J. W.: In Situ Soil Remediation Using Electrokinetics. 1994.
- /BUH 17/ Buhlert, M.: Elektropolieren, Elektrolytisches Glänzen, Glätten und Entgraten von Edelstahl, Stahl, Messing, Kupfer, Aluminium und Titan. 2. Aufl., DOI 10.12850/9783874803052.fm, 2017.
- /CAB 23/ Cabborn, J., Lidar, P., Oxberry, D., Malone, K.: SMART - en enabler to delivering de-commissioning. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /CAR 17/ Carmack, W. J., Braase, L. A., Wigeland, R. A., Todosow, M.: Technology readiness levels for advanced nuclear fuels and materials development. Nuclear Engineering and Design, Bd. 313, S. 177–184, DOI 10.1016/j.nucengdes.2016.11.024, 2017.
- /CAR 23/ Carey, T.: Easd(R) Gel: An Innovative Technology for the Electrochemical Decontamination of Hotspots. Präsentation, ICEM 2023, 2023.

- /CHA 23/ Chapman, H., Richardson, J.-P., Fairbairn, C., Di Buono, A., Gale, A.: Best Practice Guidelines and Lessons Learned from Robotic System Deployment in Nuclear Decommissioning. *atw*, Bd. 68, Nr. 5, S. 53–59, 2023.
- /CND 09/ Co-Ordination Network on Decommissioning (EC-CND): Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-How. Hrsg.: EC-CND, 95 S., Juni 2009.
- /COQ 23/ Coquard, L., Georgi, M., Hummel, J., Krycki, K., Fu, B., Helmes, C., Heidener, M., Simons, F., Jesser, A., Köble, T., Schumann, O.: Zerstörungsfreie Plausibilitätsprüfung der stofflichen Beschreibung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM(R). Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /CRA 22/ Cramer, G.: Internal Pipe Cutting Machine for the Use in Boiling Water RPVs. Präsentation, TRAWEMA GmbH, iCOND 2022, Aachen Institute for Nuclear Training GmbH: Aachen, 16. November 2022.
- /DAG 23/ Daguin, P.: LD-SAFE, Laser technology for PWR/BWR RVI segmentation. Präsentation, International Conference on Nuclear Decommissioning, 16. Mai 2023.
- /DB 22/ Deutsche Bahn AG: Implementierung von Building Information Modeling (BIM) im Vorstandsressort Infrastruktur der Deutschen Bahn AG. 18 S., 2022.
- /DEG 23/ Degner, B., Lorenzen, F., Bergander, S., Willschütz, H.-G., Wörlen, S., Langmann, V.: Neue Technik für die Vorbereitung und Messungen zur Freigabe im KKS. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /DEM 16/ Demmer, R.: Decontamination Method Comparison Testing Using Simulated Contamination. 259 S., Lancaster University, Februar 2016.
- /DEN 23a/ Denkena, B., Bergmann, B., Puls, L.: Kinematische Simulation des Seilschleifens mit deterministisch besetzten Schleifsegmenten für den Rückbau von Kernkraftwerken. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.

- /DEN 23b/ Denkena, B., Bergmann, B., Heller, C.: Erhöhung der Lebensdauer von Seilschleifwerkzeugen durch analytische Betrachtung der thermomechanischen Prozessbelastung. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /DIN 03/ DIN: DIN 8580:2003-09. DIN 8580:2003-09, DOI 10.31030/9500683, Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2003.
- /DIN 03a/ DIN e. V.: DIN 8589-0:2003-09. DIN:2003-09, 01.040.25, 25.020, 25.100.01, 2003.
- /DIN 03b/ DIN e. V.: DIN 8590:2003-09.2003-09, 01.040.25, 25.020, 25.120.40, 2003.
- /DIN 03c/ DIN e. V.: DIN 8591:2003-09.2003-09, 01.040.25, 25.020, 25.120.99, 2003.
- /DIN 03d/ DIN e. V.: DIN 8592:2003-09.2003-09, 01.040.25, 25.020, 25.120.99, 2003.
- /DIN 13/ DIN e. V.: DIN 8588:2013-09.2013-08, 01.040.25, 25.020, 25.120.99, 2013.
- /DIN 22/ DIN e. V.: DIN 18007:2022-09.2022-09, 01.040.91, 91.200, 2022.
- /DÖB 18/ Döbel, I., Leis, M., Vogelsang, M. M., Neustroev, D., Petzka, H., Riemer, A., Rüping, S., Voss, A., Wegele, M., Welz, J.: Maschinelles Lernen, Eine Analyse zu Kompetenzen, Forschung und Anwendung. Fraunhofer-Gesellschaft, 56 S., DOI 10.1007/978-3-642-60452-2_3: München, 2018.
- /DOR 08/ Dornfeld, D., Mc-Mains, S., Arbelaez, D., Avila, M., Krishnamurthy, A., Li, W., Yasui, Y.: Cleanability of Mechanical Components. Proceedings of 2008 NSF Engineering Research and Innovation Conference, Knoxville, Tennessee, 2008.
- /EC 22/ European Commission: Nuclear Innovation Prize: seven applications awarded. Stand vom 31. Mai 2022, erreichbar unter https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/nuclear-innovation-prize-seven-applications-awarded-2022-05-31_en, abgerufen am 5. März 2024.
- /ENBW 16/ EnBW Kernkraft GmbH: Rückbau im Dialog. Präsentation, Bürgeldialog-Veranstaltungen in Neckarwestheim, 23. Februar 2016.

- /ENBW 20/ EnBW Energie Baden-Württemberg AG: Abbruch der Kühltürme in Philippsburg erfolgreich und sicher umgesetzt. Erreichbar unter <https://www.enbw.com/kuehltu-erme/>, abgerufen am 10. August 2023.
- /ENBW 24/ EnBW Energie Baden-Württemberg AG: Rückbau GKN I. Erreichbar unter <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/kernenergie/rueckbau/rueckbau-neckarwestheim.html>, abgerufen am 13. Februar 2024.
- /EPA 06/ Environmental Protection Agency (EPA): Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surface. 150 S., März 2006.
- /EPRI 98/ EPRI: EPRI DFD (Decontamination for Decommissioning) Process Evaluation: Overview of EPRI DFD Process Application. Hrsg.: Bradtec, Ltd., University of the West of England, Bristol, 58 S., 1998.
- /EPRI 99/ EPRI: Decontamination Handbook. Hrsg.: Bradtec, Ltd., University of the West of England, Bristol, 1999.
- /EPRI 01/ EPRI: Decontamination of Reactor Systems and Contaminated Components for Disposal or Refurbishment: Developments and Experience with the EPRI DFD Chemical Decontamination Process. 86 S., November 2001.
- /EPRI 03/ EPRI: Application of the EPRI DFDX Chemical Decontamination Process: Equipment for Application on Nuclear Systems and Components for Disposal or Refurbishment. 62 S., November 2003.
- /EPRI 07/ EPRI: Reactor Internals Segmentation Experience Report: Detailed Experiences 1993-2006,, Final Report. EPRI 1015122: Palo Alto, 2007.
- /ESK 20/ Entsorgungskommission (ESK): Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen, Empfehlung der Entsorgungskommission vom 05.11.2020. Entsorgungskommission (ESK), 5. November 2020.

- /ESK 22/ Entsorgungskommission (ESK): Freigabe radioaktiver Stoffe und Herausgabe nicht radioaktiver Stoffe aus dem Abbau von Kernkraftwerken, INFORMATIONSPAPIER - Langfassung mit ausführlichen Erläuterungen. 21 S., 1. September 2022.
- /EUR 95/ European Commission: Handbook on Decommissioning of Nuclear Installations. 16211. Aufl.: Luxembourg, 1995.
- /EWN 16/ Energiewerke Nord GmbH: Umweltbericht 2015. 22 S., Juli 2016.
- /EWN 24/ EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH: Zerlegehalle. Erreichbar unter <https://www.ewn-gmbh.de/projekte/zerlegehalle>, abgerufen am 13. März 2024.
- /FAU 18/ Faust, S., Fleck, I., Jendrich, U., Michel, F.: Untersuchungen zu sicherheitstechnisch bedeutsamen Aspekten bei der Dekontamination von Reaktorkühlkreisläufen in Kernkraftwerken. GRS, Bd. 492, GRS-492, 122 S., ISBN 9783946607779, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, März 2018.
- /FIS 92/ Fischer, A., Steiner, H.: Demontage des Siedewasserreaktors KRB-A - Pilotprojekt, 4. Periodischer Fortschrittsbericht. 2. Aufl.: Gundremmingen, 1992.
- /FIS 15/ Fischer, M., Sempere-Balda, L., Basu, A., Topf, C., Erbacher, T., Hiermer, T., Schnurr, B., Appeldorn, T. v., Volkmann, C.: Dekontamination des RDB inkl. der Einbauten wie Dampftrockner und Wasserabscheider sowie der an-geschlossenen Hilfssysteme im deutschen Siedewasserreaktor ISAR 1. atw, Bd. 2015, Nr. 12, 2015.
- /FRI 21/ Friedrich, H.-J., Eidert, S.: Entwicklung eines Verfahrens zur Dekontamination von radioaktiv kontaminiertem Beton. Fraunhofer-IKTS, impulstec GmbH, 6 S., 2021.
- /FRI 23a/ Friedrich, C.: Laserstrahldekontamination von Metalloberflächen im Kontrollbereich der WAK. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /FRI 23b/ Friedrich, H.-J., Viehweger, K.: Erprobung der elektrohydraulischen Zerkleinerungstechnologie zur Behandlung von radioaktiv kontaminiertem Beton. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.

- /FUJ 89/ Fujita, R., Enda, M., Morisue, T.: REDOX Decontamination Technique Development, (I). Journal of Nuclear Science and Technology, Bd. 26, Nr. 3, S. 339–349, DOI 10.1080/18811248.1989.9734315, 1989.
- /FUJ 89a/ FUJITA, R., ENDA, M., MORISUE, T.: REDOX Decontamination Technique Development, (II). Journal of Nuclear Science and Technology, Bd. 26, Nr. 4, S. 449–458, DOI 10.1080/18811248.1989.9734332, 1989.
- /GAL 23/ Gal, M., Reuter, O., Damerval, F.: Decreasing Level Activities and Releasing Wastes: It's now possible thanks to a new electrodecontamination implementation. Präsentation, ICEM 2023, 2023.
- /GAM 24/ Game Changers: Delivering innovation in the nuclear industry. Erreichbar unter <https://www.gamechangers.technology/>, abgerufen am 27. Februar 2024.
- /GIF 24/ GIFEN: GIFEN: The french nuclear industry. Erreichbar unter <https://www.gifen.fr/en>, abgerufen am 1. März 2024.
- /GÖD 07/ Gödickemeier, M., Bohn, K.-P., Moseley, P., Siegenthaler, E.: Trockenes Diamantschneiden von armiertem Beton beim Rückbau von Kernanlagen. Hrsg.: Kontec, 357. Aufl., 2007.
- /GOE 49/ Goertz, R. C.: Master-Slave Manipulator. Argonne National Laboratory, 7. März 1949.
- /GRS 21/ Foldenauer, M., Lambertus, C., Spanier, R., Heitsch, C.: Forschung zu Aufbau und Betriebswesen von Lüftungsanlagen in Kernkraftwerken und deren sicherheitstechnische Bedeutung während Betrieb und Rückbau. GRS, GRS Bericht, Nr. 663, Dezember 2021.
- /GRS 23a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Fortschrittsbericht, Forschungsvorhaben zum Förderkonzept "FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen" - Berichtszeitraum 1. Juli - 31. Dezember 2022. 2023.

- /GRS 23b/ GRS: Fortschrittsbericht Forschungsvorhaben zum Förderkonzept "FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen", Berichtszeitraum 1. Januar - 30. Juni 2023. 2023.
- /HAS 23/ Hassel, T.: Entwicklungsschritte des Elektrokontakttrennes (CAMG) unter Wasser für den kerntechnischen Rückbau, Aktuelles aus Forschung und Entwicklung. Präsentation, 10. Symposium Stilllegung und Abbau kerntechnischer Anlagen, 14. Juni 2023.
- /HEL 20/ Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material und Küstenforschung GmbH, Zentralabteilung Forschungsreaktor: Zerlegekonzept des Reaktordruckbehälters des Nuklearschiffs Otto Hahn. 2020.
- /HEN 21/ Heneke, A., Krauss, C., Gentes, S., Becker, F., Geckeis, H., Lützenkirchen, J., Plaschke, M., Schild, D., Tobie, W.: A New Technical Approach for the Minimization of Secondary Waste Produced by Water Abrasive Suspension Cutting During Disassembly of Nuclear Facilities. *atw*, Vol. 66, S. 34–40, 2021.
- /HÖG 19/ Högel, R.: Zerlegung von Reaktordruckbehälter-Einbauten im KKW, Extremer Roboterereinsatz. Stäubli, 2019.
- /HÖG 20/ Högel, R.: Automatisierte Zerlegung der Reaktordruckbehälter-Einbauten im KKW Brunsbüttel. Stäubli, 3 S., 2020.
- /HOP 22/ Hope, C., Cardwell, A.: Robots and Lasers for Safer, Faster, Better Value Decommissioning. Hrsg.: WM2022 Conference, March 6 – 10, 2022, Phoenix, Arizona, USA, 15 S., 2022.
- /HOR 14/ Horizon 2020: Technology readiness levels (TRL), Horizon 2020 - Work Programme 2014 - 2015 General Annexes, Extract from Part 19 - Commission Decision C(2014)4995. 1 S., 2014.
- /HÜB 17/ Hübner, F., Grone, G. von, Schultmann, F.: Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen. Working Paper Series in Production and Energy, Nr. 18, 65 S., DOI 10.5445/IR/1000067419, Karlsruhe, 2017.

- /HZG 16/ Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material und Küstenforschung GmbH, Zentralabteilung Forschungsreaktor: Sicherheitsbericht, Stilllegung des Forschungsreaktors FRG-1 und Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors sowie die Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Nuklearschiffs Otto Hahn. 215 S., 1. November 2016.
- /IAEA 99/ International Atomic Energy Agency (IAEA): State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities. Hrsg.: IAEA, Technical Report Series, Nr. 395, 1999.
- /IAEA 02/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.): Safe Decommissioning For Nuclear Activities, Proceedings of an International Conference. IAEA, 2002.
- /IAEA 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.): Safe Decommissioning For Nuclear Activities, Proceedings of an International Conference (Berlin, 14-18 October 2002). 2003.
- /IAEA 13/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety Assessment for Decommissioning. Safety Reports Series, Nr. 77, 2013.
- /IAEA 14/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Decommissioning of Facilities, General Safety Requirements Part 6. IAEA Safety Standards: Wien, 2014.
- /IAEA 18/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities, (SSG-47). Specific Safety Guide, Nr. 47, 2018.
- /IAEA 22a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Nuclear Safety and Security Glossary 2022 (Interim) Edition, Terminology used in nuclear... safety, nuclear security, radiation protection and. ISBN 978-92-0-141822-7, IAEA: [S.I.], 2022.
- /IAEA 22b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Artificial Intelligence for Accelerating Nuclear Applications, Science and Technology. 2022.

- /IAEA 22c/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Muon Imaging, Present Status and Emerging Applications. IAEA TECDOC, Nr. 2012, 2022.
- /INT 20/ International Federation of Robotics: Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots. September 2020.
- /JAE 20/ Jae Sung Shin, Seong Yong Oh, Seungkyu Park, Hyunmin Park, Taek-Soo Kim, Lim Lee, Yonghee Kim, Jonghwan Lee: Underwater laser cutting of stainless steel up to 100 mm thick for dismantling application in nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*, Nr. 147, 2020.
- /JAM 21/ Jamie Purkis: Electrokinetic Remediation for Nuclear Site Decommissioning - the UK's TRANSCEND Consortium. Präsentation, Waste Management Symposia: Phoenix, 8. - 12. März 2021.
- /JUN 15/ Jung, H. B., Yang, J.-S., Um, W.: Bench-scale electrokinetic remediation for cesium-contaminated sediment at the Hanford Site, USA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Bd. 304, Nr. 2, S. 615–625, DOI 10.1007/s10967-014-3852-0, 2015.
- /KAN 02/ Kantha Babu, M., Krishnaiah Chetty, O. V.: Studies on Recharging of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002.
- /KAU 10/ Kaulard, J., Brendebach, B., Strub, E.: Strahlenschutzaspekte gängiger Abbau- und Dekontaminationstechniken, Informationen und Erfahrungen aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. GRS, Bd. 270, GRS-270, 123 S., ISBN 9783939355465, GRS: Köln, 2010.
- /KIN 08/ Kinnunen, P.: ANTIOXI Decontamination techniques for activity removal in nuclear environments. 59 S., 12. März 2008.
- /KIS 99/ Kistmacher H, Loebnitz C, Scholz W, Haferkamp H, Goede G, and Drygalla D: Cutting method with low emission: hand-guided laser-cutting system for decommissioning. International symposium on conditioning of radioactive, 1999.

- /KKK 20/ Kernkraftwerk Krümmel: Genehmigungsverfahren Stilllegungs- und Abbaugenehmigung, Fachbericht U_1.2 Radiologisches Inventar. 6. Oktober 2020.
- /KNE 14/ Knecht, D.: Untersuchungen zum Seilsägeprozess an Stählen ausgewählter Geometrien im umschlingenden Verfahren. Dissertation, 173 S., Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Karlsruhe, 2014.
- /KON 13/ Kontec GmbH, Hamburg (Hrsg.): Kontec 2013, 11. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“. Dresden, 13. - 15. März 2013, 801 S., März 2013.
- /KOß 23/ Koß, A.: 22.000 Tonnen Stahlbeton im Sicherheitsbehälter - von der Konzeptidee bis zur Kalottendemontage mittels 30 Tonnen E-Bagger. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /KRA 18/ Krau, C. I.: Spezieller Überblick über aktuelle Projekte im Rückbau kerntechnischer Anlagen. Präsentation, 2018.
- /KRA 21/ Krauß, C.-O.: Experimentelle und numerische Untersuchungen eines Magnetfiltersystems zur Minimierung von Sekundärabfall beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. Dissertation, 152 S., KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Karlsruhe, 2021.
- /KRA 23/ Krauß, C.-O.: Weiterentwicklung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärabfalls aus der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /KRE 08/ Kremer, G.: Weiterentwicklung von Verfahren zur Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung, Doktorarbeit. Hrsg.: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2008.
- /KRI 23/ Kritzmann, M.: Logistische und bautechnische Planung im kerntechnischen Rückbau mittels 3D-BIM-Modell. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.

- /LAI 16/ Lainetti, P. E. O.: Cutting Techniques for Facilities Dismantling in Decommissioning Projects. *Journal of Energy and Power Engineering*, Bd. 10, Nr. 9, DOI 10.17265/1934-8975/2016.09.001, 2016.
- /LAR 12/ Laraia Michele (Hrsg.): Nuclear Decommissioning, Planning, Execution and International Experience. Woodhead Publishing Series in Energy, ISBN 978-0-85709-115-4, Elsevier Science & Technology, 2012.
- /LAR 17/ Laraia, M.: Advances and Innovations in Nuclear Decommissioning. Woodhead Publishing Series in Energy, 423 S., ISBN 978081012390, Woodhead Publishing: Duxford UK, Cambridge US, Kidlington UK, 2017.
- /LEN 22/ Lender, L., Schroeder, O., Langer, A.: Augmented and Virtual Reality in der Kerntechnik. *atw*, Bd. 67, Nr. 1, S. 7–12, 2022.
- /LES 21/ Leschke, J., Dr.-Ing Emde, B., Dr.-Ing. Hermsdorf, J., Dr.-Ing. Kaierle, S., Dr.-Ing. Overmeyer, L.: Optimization of the laser cutting of 1.4301 steel sheets under water for nuclear decommissioning purposes. 9 S., 2021.
- /LEU 98/ Leu, M. C., Meng, P., Geskin, E. S., Tismeneskiy, L.: Mathematical Modeling and Experimental Verification of Stationary Waterjet Cleaning Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Bd. 120, Nr. 3, S. 571–579, DOI 10.1115/1.2830161, 1998.
- /LIU 22/ Liu, S., He, Y., Xie, H., Ge, Y., Lin, Y., Yao, Z., Jin, M., Liu, J., Chen, X., Sun, Y., Wang, B.: A State-of-the-Art Review of Radioactive Decontamination Technologies: Facing the Upcoming Wave of Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities. *Sustainability*, Bd. 14, Nr. 7, S. 4021, DOI 10.3390/su14074021, 2022.
- /LLA 21/ Llanto, J. M., Tolouei-Rad, M., Vafadar, A., Aamir, M.: Recent Progress Trend on Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Materials: A Review. *Applied Sciences*, Bd. 11, Nr. 8, S. 3344, DOI 10.3390/app11083344, 2021.
- /LUH 21a/ Leibniz Universität Hannover: Wasserabrasivinjektorstrahlschneiden (WAIS). Erreichbar unter <https://www.iw.uni-hannover.de/de/forschung/>

forschungsschwerpunkte/unterwassertechnikum-hannover/wasser-abrasiv-injektorstrahl-schneiden-wais, abgerufen am 5. Juli 2023.

/LUH 21/ Leibniz Universität Hannover: Reinwasserstrahlschneiden (RWS). Erreichbar unter <https://www.iw.uni-hannover.de/de/forschung/forschungsschwerpunkte/unterwassertechnikum-hannover/reinwasserstrahl-schneiden-rss>, abgerufen am 5. Juli 2023.

/MAS 96/ Massaut, V.: The BR3 pilot decommissioning project. Radwaste and Decommissioning, 1996.

/MAS 98/ Massaut, V.: The BR3 pressurised water reactor pilot dismantling project – final report, Luxembourg. Hrsg.: Office for Official Publications of the European Communities, European Community, 18229. Aufl., 1998.

/MBS 19/ MB Spezialabbruch: Sequentielles Kollabieren. Erreichbar unter <https://www.mb-spezialabbruch.com/portfolio/sequentielles-kollabieren/>, Stand von 2019.

/MBS 19a/ MB Spezialabbruch: Projekt: AKW Mülhheim-Kärlich. Erreichbar unter <https://www.mb-spezialabbruch.com/3044/projekt-akw-muelheim-kaerlich/>, Stand von 2019.

/MIC 21/ Michels, J.: 10 Years of Phasing Out Nuclear Power, 10 Years of Decommissioning, Dismantling and Transformation. atw, Bd. 66, Nr. 4, S. 40–44, 2021.

/MOM 03/ Momber, A.: Hydroblasting & Coating of Steel Structures. 222 S., Elsevier, 2003.

/MOO 19/ Moon Jeikwon , Kim Seonbyung , Choi Wangkyu , Choi Byungseon , Chung Dongyong , and Seo Bumkyoung: The Status and Prospect of Decommissioning Technology Development at KAERI. JNFCWT, Bd. 17, Nr. 2, S. 139–165, 2019.

/MOR 24/ Morimoto, K., Ohno, T., Kakutani, S., Yoshida, M., Suzuki, S.: Japan Atomic Energy Agency: Contribution to the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and the Reconstruction of Fukushima Prefecture at the Naraha Center for Remote Control Technology Development. Journal of Robotics and Mechatronics, Bd. 36, Nr. 1, S. 125–133, 2024.

- /NED 18/ Nedyalkova, I.: Decontamination of Nuclear Plant Steels. Dissertation, 147 S., Universität Manchester, 2018.
- /NEI 98/ Nuclear Engineering International: Studsvik develops recycling process. 1 S., erreichbar unter <https://www.neimagazine.com/news/newsstudsvik-develops-recycling-process>, abgerufen am 17. August 2023.
- /NEI 17/ Nuclear Engineering International: LaserSnake: Getting innovation into decommissioning. Erreichbar unter <https://www.neimagazine.com/features/feature/lasersnake-getting-innovation-into-decommissioning-5752174/>, abgerufen am 19. Juni 2023.
- /NOF 99/ Nof, S. Y.: Handbook of Industrial Robotics. ISBN 978-0471177838, John Wiley & Sons, 1999.
- /NUK 15/ NUKEM Technologies: Cutting techniques for decommissioning nuclear facilities and conditioning of nuclear waste. 6 S., 2015.
- /OECD 11/ OECD Nuclear Energy Agency: Decontamination and Dismantling of Radioactive Concrete Structures, A Report of the NEA Co-operative Programme on Decommissioning (CPD). OECD, 144 S., 2011.
- /OECD 14/ OECD Nuclear Energy Agency: R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities. 318 S., ISBN 9789264222199, DOI 10.1787/9789264222199-en, OECD, 2014.
- /OECD 23/ OECD Nuclear Energy Agency: Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management. 166 S., 2023.
- /ORA 23/ Orano USA: Orano Finishes Segmentation and Packaging of Crystal River Unit 3 Reactor within Two Years on Accelerated Decommissioning Timeline. 7 S., Dezember 2023.
- /PAR 17/ Parker, A. J., Joyce, M. J., Boxall, C.: Remediation of ¹³⁷Cs contaminated concrete using electrokinetic phenomena and ionic salt washes in nuclear energy contexts.

Journal of hazardous materials, Bd. 340, S. 454–462, DOI 10.1016/j.jhazmat.2017.07.007, 2017.

- /PAU 23/ Pauls, L., Stoffels, L., Neugebauer, L.: Einführung BIM im kerntechnischen Rückbau und Baumanagement der JEN - strategische Vorbereitung und praktische Umsetzungserfahrungen in den Großen Heißen Zellen. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /PEL 21b/ PreussenElektra: E10Ausgangszustand, E-10 - Technischer und radiologischer Ausgangszustand der Anlage. 49 S., 22. November 2021.
- /PEL 22a/ PreussenElektra: KBR Stilllegung und Abbau, E-04 - Abfall und Reststoffkonzept. 71 S., 12. Januar 2022.
- /PEL 22b/ PreussenElektra: Stilllegung und Abbau des Kernkraftwerks Brokdorf (KBR), Abfall- und Reststoffkonzept Dokument E-04. 71 S., 12. Januar 2022.
- /PER 20/ Perspektive Brunsbüttel: AZURo macht Pause – Dampftrockner im Kernkraftwerk Brunsbüttel erfolgreich zerlegt - Perspektive Brunsbüttel. Stand vom 9. Februar 2023, erreichbar unter <https://perspektive-brunsbuettel.de/2020/07/21/azuro-macht-pause-dampftrockner-im-kernkraftwerk-brunsbuettel-erfolgreich-zerlegt/>, 2020.
- /PHI 01/ Philipp, E.: Beitrag zum Elektrokontakttrennen unter Wasser. Dissertation, Universität Hannover: Hannover, 2001.
- /PON 03/ Ponnet, M., Klein, M., Massaut, V., Davai, H., Aleton, G.: Thorough Chemical Decontamination With the MEDOC Process: Batch Treatment of Dismantled Pieces or Loop Treatment of Large Components Such as the BR3 Steam Generator and Pressurizer. Präsentation, Waste Management Symposia, Februar 2003.
- /POS 13/ Pospíšil, P.: Reactor Vessel Internals Segmentation Experience using Mechanical Cutting Tools. Technological Engineering, Bd. 10, Nr. 2, S. 6–10, DOI 10.2478/teen-2013-0012, 2013.

- /PRI 97/ Priesmeyer, U.: Thermische Schneidverfahren und Werkstoffreaktionen im Hinblick auf Entstehung von Staub und Aerosolen. Dissertation, 1997.
- /PRÜ 19/ Prüllage, A., Thoma, M., Schneider, L., Runge, H., Becker, M.: Full System Decontamination at PWR Biblis Unit A+B with ASDOC_D-MOD process. Präsentation, KONTEC 2019, 2019.
- /PUR 21/ Purkis, J. M., Warwick, P. E., Graham, J., Hemming, S. D., Cundy, A. B.: Towards the application of electrokinetic remediation for nuclear site decommissioning. Journal of hazardous materials, Bd. 413, S. 125274, DOI 10.1016/j.jhazmat.2021.125274, 2021.
- /REC 23/ Recknagel, J., Ritz, M.: Projekt "ROBBE" Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /REN 23a/ Rentschler, E., Villinger, M., Heppler, K., Gentes, S.: Entwicklung eines Werkzeugs zur mechanischen Innenkanten- und Eckendekontamination. atw, Bd. 68, Nr. 6, S. 51–55, 2023.
- /REN 23b/ Rentschler, E., Gentes, S., Villinger, M., Heppler, K., Stemmler, S., Greb, J.: EKONT-2: advancement of a demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners and inner edges in nuclear facilities. Safety of Nuclear Waste Disposal, Bd. 2, S. 15–16, DOI 10.5194/sand-2-15-2023, 2023.
- /RIE 09/ Riess, R., Odar, S., Kysela, J.: Decontamination and Steam Generator Chemical Cleaning. Hrsg.: Advanced Nuclear Technology International, Oktober 2009.
- /RIV 13/ Rivasseau, C., Farhi, E., Atteia, A., Couté, A., Gromova, M., Gouvion Saint Cyr, D. de, Boisson, A.-M., Féret, A.-S., Bligny, R.: An extremely radioresistant green eukaryote for radionuclide bio-decontamination in the nuclear industry. Energy & Environmental Science, Bd. 6, Nr. 4, S. 1230, DOI 10.1039/c2ee23129h, 2013.
- /ROB 24/ ROBDEKON: Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen. Erreichbar unter <https://robdekon.de/>, abgerufen am 5. März 2024.

- /ROL 92/ Rollor, M. A., Fiala-Goldiger, J., Hanulik, J.: Industrial-Scale Decontamination using the DECOHA Process at Chernobyl. Präsentation, Waste Management Symposia, 1992.
- /RUG 93/ Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik Band II: Verfahren und Fertigung. Berlin, 1993.
- /RWE 23/ RWE Nuclear GmbH: Rückbauanlage Biblis: Erster Kühlturm von Block A erfolgreich zu Boden gebracht. Erreichbar unter <https://www.rwe.com/presse/rwe-nuclear/2023-02-02-rueckbauanlage-biblis-erster-kuehlturm-erfolgreich-zu-boden-gebracht/>, abgerufen am 10. August 2023.
- /SAU 24/ Sauder, M.: Einfluss innovativer kerntechnischer Rückbaumethoden auf Schwebstoff-Filterssysteme. Präsentation, Kerntechnik 2024, 2024.
- /SCH 09/ Schmitz, A., Knoll, P.: Rückbau der Reaktordruckbehälter-Einbauten im Kernkraftwerk Stade - Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zur grünen Wiese ist realisiert. atw, Bd. 54, Nr. 8/9, S. 514–518, 2009.
- /SCH 13/ Schindhelm David: In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen, Dissertation. Hrsg.: Universität Stuttgart, 2013.
- /SCH 19/ Schmidt, E., Grünzel, O., Hassel, T., Brüggemann, P.: Hybride Schneidverfahren zum thermischen Trennen dickwandiger Reaktorbauteile unter Wasser. Präsentation, KONTEC 2019, 2019.
- /SCH 23a/ Schubert, J., Anthofer, A., Nester, A., Mohre, M., Taube, A.: Unterstützung bei der Planung des Reststoffbehandlungszentrums im Kernkraftwerk Grohnde. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /SCH 23b/ Schmidt, E., Mills, C., Wollermann, T., Hassel, T.: Anwendung des Elektrokontaktrennens unter Wasser mittels additiv gefertigten Elektroden im kerntechnischen Rückbau. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.

- /SEI 23/ Seif el Dahan, C., Wolf, V., Neubürger, F., Krügl, S., Saeid, Y., Kopinski, T., Lanwehr, R.: KernTrafo, Das Transformationskonzept für Personal von Kernkraftwerken im Rückbau. Präsentation, DOI 10.1016/j.leafqua.2021.101590, KONTEC 2023, 2023.
- /SER 96/ Serne, R. J., Felmy, A. R., Cantrell, K. J., Krupka, K. M., Campbell, J. A., Bolton, H., Fredrickson, J. K.: Characterization of Radionuclide-Chelating Agent Complexes Found in Low-Level Radioactive Decontamination Waste. Hrsg.: NRC, 178 S., März 1996.
- /SHI 11/ Shimizu, S.: Tribology in Water Jet Processes. In: New Tribological Ways. DOI 10.5772/15804.
- /SHI 12/ Shimura, H., Itoh, K., Sugiyama, A., Ichijo, S., Ichijo, M., Furuya, F., Nakamura, Y., Kitahara, K., Kobayashi, K., Yukawa, Y., Kobayashi, T.: Absorption of radionuclides from the Fukushima nuclear accident by a novel algal strain. PloS one, Bd. 7, Nr. 9, S. E44200, DOI 10.1371/journal.pone.0044200, 2012.
- /SHI 18/ Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, H., Chung, C.-M., Seon, S., Kim, T.-S., Lee, L., Lee, J.: Cutting performance of thick steel plates up to 150 mm in thickness and large size pipes with a 10-kW fiber laser for dismantling of nuclear facilities. Annals of Nuclear Energy, Bd. 122, S. 62–68, DOI 10.1016/j.anucene.2018.08.029, 2018.
- /SHI 20/ Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, S., Park, H., Kim, T.-S., Lee, L., Kim, Y., Lee, J.: Underwater laser cutting of stainless steel up to 100 mm thick for dismantling application in nuclear power plants. Annals of Nuclear Energy, Bd. 147, S. 107655, DOI 10.1016/j.anucene.2020.107655, 2020.
- /SHI 21/ Shi, E., Gasser, T. M., Seeck, A., Auerswald, R.: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. Hrsg.: SAE International, Bd. 3, Nr. 1, 41 S., DOI 10.4271/12-03-01-0003, 30. April 2021.
- /SIE 23/ Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH: ASDOC_D-MOD, Verfahren zur chemischen Dekontamination von Primärsystemen. 4 S., 2023.

- /SPE 91/ Speranzini, R., Voit, R., Helms, M.: Decontamination of Beaver Valley Steam Generators using the CAN-DEREM Process. Hrsg.: Atomic Energy of Canada Limited, August 1991.
- /STE 23/ Steinbusch, M., Seidel, D., Stahn, B.: Rückbauprojekt AVR - Eine Spinne frisst sich durch den Beton. Präsentation, KONTEC 2023, 2023.
- /STI 05/ Stiepani, C., Bertholdt, H.-O.: Full System Decontamination with HP/CORD UV für Decommissioning of the German PWR Stade. Hrsg.: 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 2005.
- /TAM 16/ TAMURA, K., YAMAGISHI, R.: Laser cutting conditions for steel plates having a thickness of more than 100 mm using a 30 kW fiber laser for nuclear decommissioning. Mechanical Engineering Journal, Bd. 3, Nr. 3, S. 15-00590-15-00590, DOI 10.1299/mej.15-00590, 2016.
- /TCE 18/ The Chemical Engineer: Siempelkamp develops new process for nuclear decontamination. Erreichbar unter <https://www.thechemicalengineer.com/news/siempelkamp-develops-new-process-for-nuclear-decontamination/>, Stand vom 14. März 2018.
- /TEZ 14/ Tezuka, M., Nakamura, Y., Iwai, H., Sano, K., Fukui, Y.: The development of thermal and mechanical cutting technology for the dismantlement of the internal core of Fukushima Daiichi NPS. Journal of Nuclear Science and Technology, Bd. 51, Nr. 7-8, S. 1054–1058, DOI 10.1080/00223131.2014.912969, 2014.
- /THI 09/ Thierfeldt, S., Schartmann, F.: Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, Erfahrungen und Perspektiven. Hrsg.: Brenk Systemplanung, 3. Aufl., 193 S., November 2009.
- /TOP 08/ Topf, C.: Full System Decontamination (FSD) with the CORD Family prior to Decommissioning Experiences at the German NPP Obrigheim 2007. Präsentation, AREVA NP GmbH, IYNC 2008, 26. September 2008.
- /VAL 98/ Valencia, L., Prectl, E.: Die Demontage und Beseitigung des Kernkraftwerkes Niederaichbach (KKN), Abschlussbericht. 110 S., April 1998.

- /VAN 12/ van Wickeren, J.: Bolero - Flexible decontamination system for walls and ceilings with subsequent contamination measurement. Präsentation, Workshop on Radiological Characterisation for Decommissioning, April 2012.
- /VAT 18a/ Vattenfall GmbH: Spezialsäge beim Rückbau Kernkraftwerk Brunsbüttel im Einsatz. Erreichbar unter <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/blog/2018/april/spezial-sage-beim-ruckbau-kernkraftwerk-brunsbuttel-im-einsatz>, abgerufen am 7. August 2023.
- /VAT 18b/ Vattenfall Europe Nuclear Energy: Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Krümmel, Sicherheitsbericht. Mai 2018.
- /VER 05/ Verseemann, R., Bach, F.-W., Kremer, G., Brüggemann, P.: Research and Development Results for Dismantling and Decontamination Application. Präsentation, Waste Management Symposia 2005, 2005.
- /VER 08/ Verseemann, R.: Decommissioning nuclear plants: experiences in Germany. Energy, Nr. 161, S. 101–113, DOI 10.1680/ener.2008.161.3.101, 2008.
- /VKTA 02/ Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.: VKTA Transparent. 8 S., 2002.
- /WEB 08/ Weber, W.: Einsatz von linearen Hohlladungen. die baustellen, Nr. 9, S. 41–42, 2008.
- /WEI 20b/ Weisser-Bärwinkel GmbH: Können wir: Mit der Rohrsäge TCI sind wir Spezialpartner der Nukleartechnik. Erreichbar unter <https://weisser-baerwinkel.de/journal/mit-der-rohrsage-tci-sind-wir-spezialpartner-der-nukleartechnik/>, abgerufen am 7. August 2023.
- /WEI 23/ Weisser-Bärwinkel GmbH: Wir machen große AKW's kurz und klein. Erreichbar unter <https://weisser-baerwinkel.de/journal/wir-machen-grosse-akws-kurz-und-klein/>, Stand vom 7. Juli 2023.

- /WER 21/ Wernke, A., Gentes, S. D.-I.: Entwicklung eines automatisierten Kontaminationsarrays für das Ausmessen radioaktiv kontaminierter Wandflächen. 6 S., 2021.
- /WER 22/ Wernke, A.: Automatisierung der Kontaminationsmessung im Rückbauprozess kerntechnischer Anlagen. atw, Bd. 67, Nr. 5, S. 44–48, 2022.
- /WOO 22/ Woock, P., Petereit, J., Frey, C., Beyerer, J.: ROBDEKON - competence center for decontamination robotics. at-Automatisierungstechnik, Nr. 70, S. 827–837, 2022.
- /YOK 90/ Yokota, M., Ishikawa, H.: Underwater arc saw gets to work on the vessel at Japan's JPDR. Nuclear engineering international, 1990.
- /ZHA 22/ Zhang, W., Lerche, M., Rahnasto, J., Ketolainen, A.: Experience on Radioactive Liquid Waste Treatment with the NURES® Technology: An Example in Recent Nuclear Decommissioning Project. Hrsg.: WM2022 Conference, March 6 – 10, 2022, Phoenix, Arizona, USA, 6 S., 2022.

Abkürzungsverzeichnis

AAD	<i>Alpha Active Demonstrator</i>
AEA	<i>Atomic Energy Research Establishment</i>
ALARA	<i>As Low As Reasonable Achievable</i>
AMDA	<i>Automated Mobile Decontamination Appliance</i>
ANL	<i>Argonne National Laboratory</i>
AtG	Atomgesetz
AR	<i>Augmented Reality</i> (Erweiterte Realität)
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich
AZULa	Automatisierte Zerlegung von Reaktordruckbehältereinbauten mit Hilfe von Unterwasser-Lasertechnik
AZUORo	Automatische Zerlegung von RDB-Einbauten mittels Unterwasser-Robotertechnik
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BE	Brennelement
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Bauwerksdatenmodellierung)
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BNFL	<i>British Nuclear Fuels plc</i>
CAMC	<i>Contact-Arc-Metal-Cutting</i> (Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden)
CAMD	<i>Contact-Arc-Metal-Drilling</i> (Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren)
CAMG	<i>Contact-Arc-Metal-Grinding</i> (Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen)
CANDEREM	<i>Canadian Decontamination and Remediation Process</i>
CANDU	<i>Canada Deuterium Uranium</i>
CEA	<i>Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives</i>
CORD	<i>Chemical Oxidizing Reducing Decontamination</i>
DF	Dekontaminationsfaktor
DFD	<i>Decontamination for Decommissioning</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung

DNN	<i>Deep Neural Network</i>
DT	<i>Digital Twin</i>
DWR	Druckwasserreaktor
EDM	<i>Electrical-Discharge-Machining</i> (Funkenerodieren)
EGRRS	<i>Expert Group on the application of Robotic and Remote Systems in the Nuclear Back-end</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ER	<i>Electrokinetic Remediation</i>
EWN	Entsorgungswerke Nord
F+E	Forschung und Entwicklung
FORKA	Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen
FSD	<i>Full System Decontamination</i> (vollständige Systemdekontamination)
GKN	Kernkraftwerk Neckarwestheim
HDR	Heißdampfreaktor Großwelzheim
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> (Internationale Atomenergie-Organisation)
IGD	(Fraunhofer) Institut für Graphische Datenverarbeitung
INT	(Fraunhofer) Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen
IOSB	(Fraunhofer) Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
JPDR	<i>Japan Power Demonstration Reactor</i>
KI	Künstliche Intelligenz
KBR	Kernkraftwerk Brokdorf
KGR	Kernkraftwerk Greifswald
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KKB	Kernkraftwerk Brunsbüttel
KKI	Kernkraftwerk Isar
KKN	Kernkraftwerk Niederaichbach
KKP	Kernkraftwerk Philippsburg
KKR	Kernkraftwerk Rheinsberg
KKS	Kernkraftwerk Stade
KKW	Kernkraftwerk

KMK	Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich
KORI	Korea Atomic Energy Research Institute
KRB	Kernkraftwerk Gundremmingen
kW	Kilowatt
KWB	Kernkraftwerk Biblis
KWO	Kernkraftwerk Obrigheim
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LD-SAFE	<i>Laser Dismantling Environmental and Safety Assessment</i>
LOMI	<i>Low Oxidation State Metal Ion</i>
MDM	<i>Metal-Disintegration-Machining</i> (Metallzerspannungsverfahren)
ML	Maschinelles Lernen
KSA	Methansulfonsäure
MZFR	Mehrzweckforschungsreaktor
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i>
NNL	<i>National Nuclear Laboratory</i>
ODP	<i>Ozone Decontamination Process</i>
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
RDB	Reaktordruckbehälter
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
ROBBE	Robotergetriebene- Bearbeitung von Baugruppen
ROBDEKON	Kompetenzzentrum „Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen“
RWS	Reinwasserstrahlschneiden
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (international Gesellschaft der Automobilingenieure)
SHB	Sicherheitsbehälter
SMART	<i>Springfield Melter for Advanced Recycling and Treatment</i>
SSRF	<i>Skip Size Reduction Facility</i>
SWR	Siedewasserreaktor

TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
VAK	Kernkraftwerk Kahl
VR	<i>Virtual Reality</i>
WAGR	<i>Windscale Advanced-Gas-cooled Reactor</i>
WAIS	Wasser-Abrasiv-Injektorstrahlschneiden
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WAS	Wasser-Abrasiv-Strahlschneiden
WASS	Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahlschneiden

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Das deutsche kerntechnische Regelwerk als Pyramide	10
Abb. 3.1	Übersicht über die berücksichtigten etablierten Trennverfahren	19
Abb. 3.2	Schematische Darstellung des autogenen Brennschneidens	21
Abb. 3.3	Schematische Darstellung der Schneiddüse beim Laserstrahlschneiden	29
Abb. 3.4	Abhängigkeit der Absorptionswahrscheinlichkeit von der Wellenlänge für ausgewählte Metalle.....	32
Abb. 3.5	Schematisches Bild des (direkten) Plasma-Schmelzschneiden mit Fokus auf die Düsengeometrie	36
Abb. 3.6	<i>Links:</i> Schematische Darstellung des Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneidens <i>Rechts:</i> Bild eines CAMC-Elektrodenhalters (Bildquelle: Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, Abteilung Unterwassertechnikum Hannover)	42
Abb. 3.7	<i>Links:</i> Schematische Darstellung Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifens <i>Rechts:</i> Fotoaufnahme einer Verfahrensanwendung (Bildquelle: Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, Abteilung Unterwassertechnikum Hannover)	44
Abb. 3.8	Schematische Darstellung des Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohrens.....	46
Abb. 3.9	Schematische Darstellung des Stirn- und Walzenfräsens.....	61
Abb. 3.10	Funktionsweise einer Seilsäge	68
Abb. 3.11	Verfahrensvarianten des Wasserstrahlschneidens	72
Abb. 3.12	Schematische Darstellung gewachsener und abgelagerter Oxide auf Metallflächen	94
Abb. 3.13	Schematische Darstellung zur Illustration des Wasserkreislaufes und zur der Migration der Korrosionsprodukte (Abbildung in Anlehnung an /BNL 83/)	95
Abb. 3.14	Zusammensetzung der erwartbaren Oxide im Primärkreislauf von Leichtwasserreaktoren vom Typ DWR und SWR (Abbildung in Anlehnung an /BNL 83/).....	96
Abb. 3.15	Übersicht zu etablierten Dekontaminationsverfahren.....	99

Abb. 3.16	Prinzip der Verfahren HP/CORD UV und HP/CORD D UV (Abbildung in Anlehnung an /TOP 08/)	104
Abb. 3.17	Schematische Darstellung eines Zyklus des ASDOC-D_MOD Verfahrens (Abbildung in Anlehnung an /PRÜ 19/)	107
Abb. 3.18	Vereinfachte Darstellung eines Dekontaminationsaufbaus (mit dem CANDEREM-Verfahren) für einen Dampferzeugers in Beaver Valley 1 (Abbildung in Anlehnung an /SPE 91/)	111
Abb. 3.19	Darstellung des REDOX-Verfahrens und der elektrolytischen Ce ⁴⁺ -Regeneration (in Anlehnung an /FUJ 89/)	118
Abb. 3.20	Darstellung des MEDOC Verfahrens und der Ce ⁴⁺ Regeneration durch den Austausch mit Ozon (Abbildung in Anlehnung an /PON 03/)	119
Abb. 3.21	Schematische Darstellung des Elektropolierens	124
Abb. 3.22	Fräsen des Fußbodens im Rahmen der Stilllegung des KKR (Quelle: EWN GmbH) /EWN 16/	140
Abb. 3.23	Backenbrecher in der AVR Anlage (Quelle: JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH) /STE 23/	167
Abb. 3.24	Baustelleneinrichtung der Abbrucharbeiten am SHB im KKS (Quelle: Reinwald GmbH) /KOß 23/	167
Abb. 3.25	Textile Einhausung im Rahmen von Abbrucharbeiten am SHB im KKS (Quelle: Reinwald GmbH) /KOß 23/	169
Abb. 4.1	Einsatz des Abbruchroboters zur Beseitigung der Betonstrukturen des Schutzbehälters der AVR Anlage (Quelle: JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH) /STE 23/	182
Abb. 4.2	Darstellung der Lüftungsreihe einer Zellenreihe der Großen Heißen Zellen (GHZ) mit Hilfe des BIM-Modells (Quelle: JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH) /PAU 23/	186
Abb. 5.1	Prinzip der Abscheidung von Stahl/Abrasivpartikeln und der Wiederverwendung von Abrasivmitteln (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /KRA 23/	201
Abb. 5.2	Funktionsprinzip des kontinuierlichen Magnetfilters (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /KRA 23/	203

Abb. 5.3	Verschleiß einer modifizierten CAMG Elektrode mit zunehmender Schnittlänge (Bildquelle: Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, Abteilung Unterwassertechnikum Hannover) /SCH 23b/ec.....	205
Abb. 5.4	Schematisches Konzept des Rohrintrenners (Quelle: Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH) /BAC 21a/.....	207
Abb. 5.5	Prinzip der elektrokinetischen Dekontamination (Abbildung in Anlehnung an /PUR 21/)	212
Abb. 5.6	CAD-Bilder der im Rahmen des Projektes EKONT entwickelten Prototypen (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /REN 23b/.....	216
Abb. 5.7	Funktionsprinzip der im Rahmen von EKONT entwickelten Werkzeuge (Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb) /REN 23b/.....	217
Abb. 5.8	Schema zur Dekontamination von kontaminiertem Beton.....	218
Abb. 6.1	Schematische Darstellung des übergreifenden Austausches vor dem Hintergrund eines Wissenstransfers und neuer technischer Verfahren in die kerntechnische Industrie und entsprechende Fallbeispiele.....	240
Abb. 6.2	Das linke Bild zeigt den partiell entschichteten Sicherheitsbehälter im Kernkraftwerk Stade. Das rechte Bild zeigt den mit einem HPGe-Detektor ausgestatteten Magnetcrawler (Quelle: Brenk Systemplanung GmbH) /DEG 23/	242
Abb. A.1	Übersicht über die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und Verfahrensgruppen innerhalb der Hauptgruppe Trennen.....	293

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Auswahlkriterien für Trenn- und Dekontaminationsverfahren	16
Tab. 3.2	Auswahlkriterien für Trenn- und Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung).....	17
Tab. 3.3	Wesentliche Charakteristiken für das autogene Brennschneiden	24
Tab. 3.4	Wesentliche Charakteristiken des Pulverbrennschneidens.....	26
Tab. 3.5	Wesentliche Charakteristiken der Sauerstofflanze.....	28
Tab. 3.6	Wesentliche Charakteristiken des Laserstrahlschneidens	34
Tab. 3.7	Vergleich der Mengen an Sekundarabfällen pro getrennten Meter Edelstahl (1.4301) für das Laserschneiden, das Bandsägen und das Wasser-Abrasiv- Suspensionsstrahlschneiden.....	35
Tab. 3.8	Wesentliche Charakteristiken des Plasmaschmelzschnneiden.....	38
Tab. 3.9	Wesentliche Charakteristiken der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung.....	49
Tab. 3.10	Wesentliche Charakteristiken des Funkenerodierens	52
Tab. 3.11	Wesentliche Charakteristiken ausgewählter Sägeverfahren	58
Tab. 3.12	Wesentliche Charakteristiken des Fräsens.....	62
Tab. 3.13	Wesentliche Charakteristiken der Scherverfahren.....	65
Tab. 3.14	Wesentliche Charakteristiken der Schleifverfahren.....	70
Tab. 3.15	Wesentliche Charakteristiken der Wasserstrahlverfahren.....	75
Tab. 3.16	Übersicht zu allgemeinen Vor- und Nachteilen thermischer und mechanischer Trennverfahren.....	84
Tab. 3.17	Einschätzungsmatrix für thermische und mechanische Trennverfahren	88
Tab. 3.18	Einschätzungsmatrix für thermische und mechanische Trennverfahren (Fortsetzung).....	89
Tab. 3.19	Einschätzungsmatrix für thermische und mechanische Trennverfahren (Fortsetzung).....	90
Tab. 3.20	Wesentliche Verfahren der CORD-Familie	102
Tab. 3.21	Wesentliche Charakteristiken des Verfahrens HP/CORD (D) UV	105

Tab. 3.22	Wesentliche Charakteristiken für das ASDOC_D Verfahren.....	109
Tab. 3.23	Übersicht allgemeiner Vor- und Nachteile chemischer und mechanischer Dekontaminationsverfahren.....	146
Tab. 3.24	Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren	154
Tab. 3.25	Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung).....	155
Tab. 3.26	Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung).....	156
Tab. 3.27	Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung).....	157
Tab. 3.28	Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung).....	158
Tab. 3.29	Qualitative Einschätzung der etablierten Dekontaminationsverfahren (Fortsetzung).....	159
Tab. 3.30	Wesentliche Charakteristiken des Sprengens zum Zwecke des Abbruchs	163
Tab. 3.31	Wesentliche Charakteristiken des sequenziellen Kollabierens.....	165
Tab. 4.1	Ausgewählte Meilensteine im Einsatz von Maschinellern /DÖB 18/	188
Tab. 5.1	EKR Einflussparameter /JAM 21/	213
Tab. 5.2	Gestuftes Konzept zur Einschätzung des technologischen Reifegrades.....	224
Tab. 5.3	Qualitative Einschätzung für innovative Trenn- und Dekontaminationsverfahren.....	229

Stichwortverzeichnis

A

Abbau	1
Abbürsten.....	132
Abrasive-Strahlverfahren.....	139
Trockenes Abstrahlverfahren	141
Wasser-Abrasive-Strahlverfahren	141
Abschleifen.....	132
ARRIVE (FORKA Projekt).....	216
AuDeKa (FORKA Projekt).....	219
Auswahlverfahren	13
Autogenes Brennschneiden	19
AZURo	187

B

Backenbrechen.....	169
Bauwerksdatenmodellierung (BIM)	188
Brecheranlage	185

C

Cer-basierte Dekontaminationsverfahren	118
MEDOC.....	120
ODP.....	119
REDOX.....	119
SODP	119

D

DECOHA-Verfahren	122
Dekontamination	3, 92
Harte Dekontaminationsverfahren.....	4
Oberflächendekontamination	93
Volumendekontamination.....	93
Weiche Dekontaminationsverfahren.....	4

Dekontamination mit Schäumen und Gelen	130
Dekontaminationsfaktor.....	93
Digitaler Zwilling	195
Druckluftstrahlverfahren	133

E

EGRS (OECD/NEA).....	182
Einschmelzen	145
Eisstrahlverfahren.....	135
EKONT (FORKA Projekt)	221
Elektrochemische Dekontamination	125, 227
Natriumsulfat-Verfahren	128
Phosphorsäureverfahren	126
Salpetersäureverfahren.....	127
Schwefelsäureverfahren	128
Elektrokinetische Dekontamination	217
Erweiterte Realität (AR)	195

F

Fernbedienung.....	4
Fernhantierung	4
Fernhantierung mit Verlängerungswerkzeugen....	4
Fernsteuerung	4
Teleoperation	4
FORKA	1
Fräsen	60, 142
Scheibenfräsen	62
Stirnfräsen	61
Walzenfräsen	61
Funkenerodien	
Metallzerspannungsverfahren (MDM).....	51
Funkenerodieren	50

K

KernTrafo	193
Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung	40
Konakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC)	41
Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren	45
Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG)	43, 208
Kontamination	92
Fixierte Kontamination	93
Lose Kontamination	93
Konventionelle Reinigungsverfahren	131
Abstauben	131
Abwischen	131
Dampfreinigen	131
Scheuern	131
Spülen	131

L

LaDeco (FORKA Projekt)	216
Laserdekontamination	214
Laserstrahlschneiden	28, 200
Laserschmelzschneiden	30
LaserSnake	35, 204
Laserstrahlbrennschneiden	29
Lasersublimationsschneiden	30
LD-SAFE-Projekt	200

M

Maschinelle Lernen	191
--------------------------	-----

N

Nadelverfahren	143
Nibbeln	64

O

ORANO Optimized Segmentation Process	70
--	----

P

Pincheffekt	37
Plasma-Schmelzschneiden	36
Direktes Plasma-Schmelzschneiden	37
Indirektes Plasma-Schmelzschneiden	37
Polieren	132
ProSeil (FORKA Projekt)	213
Pulverbrennschneiden	24

R

ROBBE	184
ROBDEKON	185
Roboter	176
Abbruchroboter	185
ARMAR-6	186
Gammabot	186

S

Sägen	53
Bandsägen	35, 54
Bügelsägen	56
Eissägen	54
Kreissägen	55
Rohrinnenschneiden	56
Säbelsägen	56
Stichsägen	55
Wandsägen	55
Salpetersäure/Flusssäure-Verfahren	124
Sauerstoffflanze	26
Scheren	
Rohrscheren	64
Trennscheren	63

Scheren, Scherschneiden	63
Schleifen	67
Seilschleifen (auch Seilsägen)	68
Trennschleifen	67
Sekundärabfall	81
Sequenzielles Kollabieren	167
SiebSeil (FORKA Projekt)	213
Sprengen	163
Bohrlochsprengen.....	164
Lockerungssprengen.....	164
Sprengen mit Quellsprengstoffen.....	165
Sprengen mit Schneidladung	163
Stilllegungsleitfaden.....	10
Stilllegungsleitlinien	9

T

Trennen	2
Thermische Trennverfahren	19
Trockeneisstrahlverfahren	134

U

Ultraschallbad (Dekontamination)	144
Uedle Metalle	95

V

Virtuelle Realität (VR)	194
Vollständige Systemdekontamination (FSD)	
ASDOC_D-Verfahren	107
CAN-DEREM.....	111
DFD.....	115
HP/CORD Familie.....	103
LOMI.....	113

W

Wasserstrahlschneiden	72
Reinwasserstrahlschneiden.....	72
Wasser-Abrasiv-Injektorstrahlschneiden	72
Wasser-Abrasiv-Strahlschneiden	72
Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahlschneiden	72
Wasser-Abrasiv-Suspensions-Strahlschneiden ...	35
Wasserstrahlverfahren (Dekontamination).....	136

Glossar

- Abbau** „Der Abbau einer kerntechnischen Anlage oder von Anlagenteilen umfasst die Beseitigung von Strukturen (Gebäude, Systeme, Komponenten), die Regelungsgegenstand der Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb der Anlage nach § 7 Absatz 1 AtG waren oder entsprechend zu bewerten sind. Die Beseitigung umfasst hierbei die Demontage, den Umgang mit den anfallenden Reststoffen sowie die Übergabe der anfallenden Reststoffe an eine anlageninterne oder- externe Einrichtung.“
Quelle: Stilllegungsleitfaden /BMU 21/
- Abtragen** „Flächiges Entfernen von Schichten, z. B. durch Fräsen, Abschälen, Schleifen oder Hochdruckwasserstrahlen“
Quelle: /DIN 22/
- Dekontamination** Beseitigung oder Verminderung einer Kontamination.
- Demontage** Die Demontage (beispielsweise eines Anlagenteils) bezeichnet die Entfernung aus der Einbaulage bzw. aus der entsprechenden Sollposition.
- Fernbedienung** Indirekte Steuerung von Geräten/Werkzeugen über mechanische oder elektronische Schnittstellen. Das Personal hat direkten Sichtkontakt zu den Geräten/Werkzeugen.
- Fernhantierung** Sammelbegriff für die nicht-manuelle Steuerung von Geräten und Werkzeugen, z. B. mittels Fernbedienung oder Teleoperation.
- Industrieroboter** „Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen bzw. menschlichen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“
Quelle: VDI-Richtlinie 2860

Rückbau	Der Abriss oder die Demontage von Strukturen mit dem Ziel, den ursprünglichen Ist-Zustand weitestgehend wiederherzustellen, Altstrukturen (vollständig) zu entsorgen oder durch vorbereitende Maßnahmen eine weitere Nutzung zu ermöglichen.
Rüstzeit	Benötigte Zeit, um die Betriebsmittel eines Arbeitssystems für einen bestimmten Arbeitsvorgang einzurichten.
Sekundärabfall	Abfälle, die bei der Anwendung von Dekontaminations- oder Trennmaßnahmen entstehen. Zu diesen gehören beispielsweise flüssige Abfälle (z. B. Prozesswasser), Ionenaustauscherharze, Filter und trockene Abfälle.
Standzeit	Die Zeit, mit der man mit einem Werkzeug ohne Unterbrechung arbeiten kann bis Verschleißerscheinungen zu einer Unterbrechung führen (z. B. Austausch von Betriebsmitteln wie Sägeblätter)
Stilllegung	Der Begriff „Stilllegung“ dient als Oberbegriff für sämtliche stilllegungsgerichteten Tätigkeiten nach endgültiger Beendigung des Leistungsbetriebes einer kerntechnischen Anlage genutzt, die den einstweiligen sicheren Abschluss ermöglichen oder den Abbau der Anlage beabsichtigen. Das Ziel der Stilllegung in Deutschland ist im Regelfall die Entlassung aus der atom- und strahlenschutzrechtlichen Überwachung.
Technik	Gemäß der VDI Richtlinie 3789 umfasst der Begriff Technik drei wesentliche Aspekte: Die Menge der nutzerorientierten, künstlichen, gegenständlichen Gebilde (z. B. Werkzeuge), die Menge menschlicher Handlungen und Einrichtungen, in denen Sachsysteme entstehen sowie die Menge menschlicher Handlungen, in denen Sachsysteme verwendet werden.
Technologie	Der Begriff bezeichnet die Wissenschaft von der Technik.
Trennen	Das Trennen beschreibt gemäß DIN 8580 das Ändern der Form eines festen Körpers, wobei der örtliche Stoffzusammenhalt aufgehoben wird.
Zerlegen	Das Zerlegen beschreibt die Entfernung von Bauteilen oder Inhalten von anderen Bauteilen.

A Anhang: Wesentliche Definitionen der Norm DIN 8580 und verwandter Normen im Kontext der Trennverfahren

Das Trennen, d. h. das Ändern einer festen Form durch lokales Aufheben des Zusammenhalts, stellt gemäß DIN 8580 die dritte Hauptgruppe der Fertigungsverfahren dar /DIN 03/. In dieser Norm wird für das Trennen eine Unterteilung in Gruppen vorgenommen (siehe Abb. A.1).

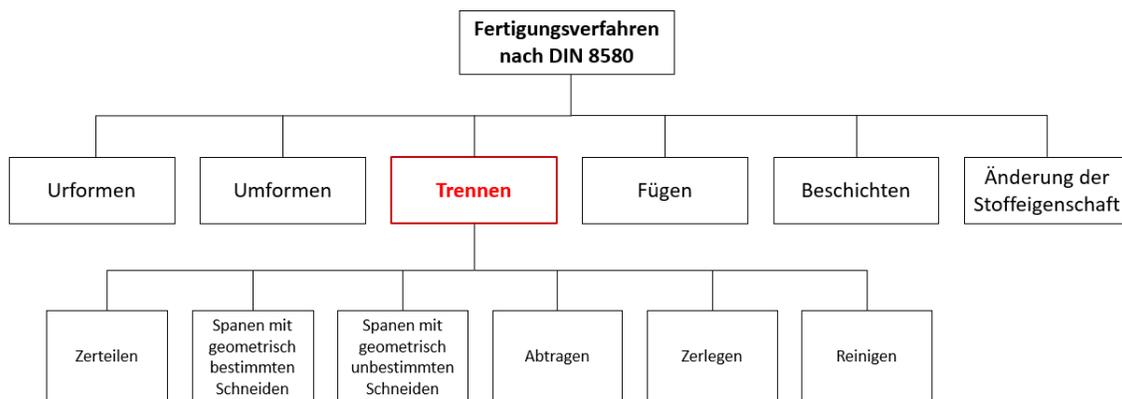


Abb. A.1 Übersicht über die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und Verfahrensgruppen innerhalb der Hauptgruppe Trennen

Zu diesen Gruppen für die zu diskutierenden Trennverfahren gehören die Folgenden:

- das *Zerteilen* (Gruppe 3.1, DIN 8588 /DIN 13/), also das teilweise oder vollständige Trennen eines Körpers oder Systems in zwei oder mehrere Teile. Zu dieser Gruppe gehört beispielsweise das Spalten und Brechen.
- das *Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden* (Gruppe 3.2, DIN 8589-0 /DIN 03a/) oder *Spanen mit unbestimmten Schneiden* (Gruppe 3.3, DIN 8589-0 /DIN 03a/). Beim Spanen wird überschüssiges Material von einem Rohteil oder bereits bearbeiteten Werkstück auf mechanischem Weg in Form von Spänen abgetrennt. Bei den Verfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden (z. B. Sägen oder Fräsen) ist die Anzahl und Geometrie der Schneiden bekannt, bei Verfahren mit unbestimmten Schneiden (z. B. Schleifen) ist weder die Schneidgeometrie noch deren Anzahl bekannt.
- das *Abtragen* (Gruppe 3.4, DIN 8590 /DIN 03b/) trennt auf nicht-mechanischem Weg und nutzt stattdessen thermische oder chemische Wege.

- das *Zerlegen* (Gruppe 3.5, DIN 8591 /DIN 03c/) beschreibt das Zerlegen von Teilen mit geometrisch definierter Form.
- Das *Reinigen* (Gruppe 3.6, DIN 8592 /DIN 03d/) meint das Trennen unerwünschter Schichten von der Oberfläche von Werkstücken im Kontext der Fertigung.

Das Trennen ist somit ein Überbegriff für mehrere Tätigkeiten und schließt insbesondere das Zerlegen ein. Die DIN 8580 erlaubt eine klare Kategorisierung, die aber in der kerntechnischen Stilllegung im praktischen Sprachgebrauch nicht vollumfänglich aufgegriffen wird. Ein wesentlicher Grund ist der abweichende Zweck: Die DIN 8580 ist auf die Fertigung fokussiert, während für das Trennen bzw. das Zerlegen in der Stilllegung klar die Entsorgung bezweckt werden soll.

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de