

Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen

Felix Hübner, Georg von Grone, Frank Schultmann

No. 18 | März 2017

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen

Felix Hübner, Georg von Grone and Frank Schultmann

Chair of Business Administration, Production and Operations Management,
Institute for Industrial Production (IIP),
Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Hertzstr. 16, building 06.33, 76187 Karlsruhe,
Tel.: +49 721 608-44677, email: felix.huebner@kit.edu

Der beschlossene Atomausstieg der Bundesregierung wird zu einem erheblichen Anstieg an kerntechnischen Rückbauprojekten führen. Der Rückbau kerntechnischer Anlagen muss dabei den Anforderungen des Strahlenschutzes gerecht werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Dekontaminations- und Zerlegetechnologien, die für die Einhaltung der strahlenschutzrechtlichen Anforderungen zur Verfügung stehen. Das Ziel der Arbeit ist es, den Stand der Technik im Bereich der Dekontaminations- und Zerlegetechnologien beim kerntechnischen Rückbau zu ermitteln. Außerdem werden die Trends bei der Entwicklung und der Anwendung solcher Technologien aufgedeckt. Eine ausführliche Recherche aktueller Literatur gewährt einen Überblick gängiger Technologien. Für eine praktische Einschätzung wurden zu diesem Thema darüber hinaus Experten befragt. Aus der Expertenbefragung geht hervor, dass im Bereich der Dekontamination (abgesehen von der chemischen Primärkreisdekontamination) der Einsatz mechanischer Verfahren im Allgemeinen bevorzugt wird. Abrasive Verfahren werden als besonders effizient bewertet. Neue Dekontaminationstechnologien könnten Experten zufolge in Zukunft den Dekontaminationsprozess effizienter gestalten. Es wird allerdings bezweifelt, dass eine solche Technologie in nächster Zeit kostengünstig auf den Markt kommt. Bei den Zerlegetechnologien haben sich ebenfalls die mechanischen Verfahren als am effektivsten erwiesen. Die Bandsäge wird als Standardwerkzeug im Rückbau identifiziert. Außerdem hat die Befragung ergeben, dass zurzeit die Entwicklung neuartiger Zerlegetechnologien nicht notwendig ist. Die Optimierung bestehender Verfahren bietet genügend Potential. In Bezug auf fernhantierte Systeme gehen die Meinungen der Experten auseinander. Ob in Zukunft mehr Aufgaben fernhantiert durchgeführt werden, konnte in der Befragung nicht eindeutig geklärt werden. Ein Optimierungsbedarf herrscht allerdings bei der Vergabe und beim Management von Rückbauprojekten.

Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen

Felix Hübner • Georg von Grone • Frank Schultmann

Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Institute for Industrial Production (IIP)
Hertzstraße 16,
D-76187 Karlsruhe, Germany

felix.huebner@kit.edu

Vorbemerkung:

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Georg von Grone in Zusammenarbeit mit seinem Betreuer, Herrn Felix Hübner, im Frühjahr 2016 erarbeitet.

Kurzfassung

Der beschlossene Atomausstieg der Bundesregierung wird zu einem erheblichen Anstieg an kerntechnischen Rückbauprojekten führen. Der Rückbau kerntechnischer Anlagen muss dabei den Anforderungen des Strahlenschutzes gerecht werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Dekontaminations- und Zerlegetechnologien, die für die Einhaltung der strahlenschutzrechtlichen Anforderungen zur Verfügung stehen. Das Ziel der Arbeit ist es, den Stand der Technik im Bereich der Dekontaminations- und Zerlegetechnologien beim kerntechnischen Rückbau zu ermitteln. Außerdem werden die Trends bei der Entwicklung und der Anwendung solcher Technologien aufgedeckt. Eine ausführliche Recherche aktueller Literatur gewährt einen Überblick gängiger Technologien. Für eine praktische Einschätzung wurden zu diesem Thema darüber hinaus Experten befragt. Aus der Expertenbefragung geht hervor, dass im Bereich der Dekontamination (abgesehen von der chemischen Primärkreisdekontamination) der Einsatz mechanischer Verfahren im Allgemeinen bevorzugt wird. Abrasive Verfahren werden als besonders effizient bewertet. Neue Dekontaminationstechnologien könnten Experten zufolge in Zukunft den Dekontaminationsprozess effizienter gestalten. Es wird allerdings bezweifelt, dass eine solche Technologie in nächster Zeit kostengünstig auf den Markt kommt. Bei den Zerlegetechnologien haben sich ebenfalls die mechanischen Verfahren als am effektivsten erwiesen. Die Bandsäge wird als Standardwerkzeug im Rückbau identifiziert. Außerdem hat die Befragung ergeben, dass zurzeit die Entwicklung neuartiger Zerlegetechnologien nicht notwendig ist. Die Optimierung bestehender Verfahren bietet genügend Potential. In Bezug auf fernhantierte Systeme gehen die Meinungen der Experten auseinander. Ob in Zukunft mehr Aufgaben fernhantiert durchgeführt werden, konnte in der Befragung nicht eindeutig geklärt werden. Ein Optimierungsbedarf herrscht allerdings bei der Vergabe und beim Management von Rückbauprojekten.

Abstract

The German Government's decision to phase-out nuclear power will lead to a substantial increase of the number of nuclear decommissioning and dismantling projects. The decommissioning of nuclear facilities must meet the requirements of the radiation protection ordinance. This study deals with the decontamination and dismantling technologies available to meet radiation protection requirements. The aim of this study is to determine the state of the art in the field of decommissioning and dismantling technologies. Furthermore, future trends in the development and application of such technologies should be identified. A detailed study of current literature provides an overview of established decommissioning technologies. Moreover, experts were consulted in order to facilitate a practical assessment. The experts' statements indicate that (apart from the chemical decontamination of the primary circuit) the use of mechanical methods is generally preferred. Abrasive methods are rated as particularly efficient. According to the experts, the development of new decontamination technologies may allow a more efficient decontamination. However, the success of a new technology will be subject to its application costs. Mechanical technologies are preferred for the dismantling of nuclear facilities. The band saw has been identified as a standard tool in nuclear dismantling. The survey has concluded that there is no need for new dismantling technologies. The potential lies in the optimization of existing processes and techniques. With regard to remotely operated systems, experts' opinions vary on whether the use of these systems will increase in future. Most areas inside a nuclear facility have low radiation levels that allow the use of human labour for the dismantling. However, there is a need for an improvement in the allocation and management of decommissioning projects.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	1
2 Technologien zur Dekontamination	3
2.1 Chemische Dekontaminationsverfahren	4
2.1.1 Rein chemische Dekontaminationsverfahren	5
2.1.2 Elektrochemische Dekontaminationsverfahren	6
2.1.3 Sonstige chemische Dekontaminationsverfahren	7
2.2 Mechanische Verfahren	8
2.2.1 Verfahren ohne definierten Schneidwinkel	8
2.2.2 Verfahren mit definierten Schneidwinkel	9
2.2.3 Verfahren mit Aufprallwirkung	9
2.2.4 Sonstige Verfahren	10
2.3 Thermische Verfahren	11
2.4 Sonstige Verfahren	12
2.5 Fernhantierte Dekontaminationssysteme	13
3 Technologien zum Zerlegen und zur Demontage	14
3.1 Thermische Verfahren	14
3.1.1 Thermische Verfahren mit chemischer Energiequelle	15
3.1.2 Thermische Verfahren mit elektrischer Energiequelle	16
3.1.3 Thermische Laserschneidverfahren	17
3.2 Mechanische Verfahren	17
3.2.1 Verfahren mit definiertem Schneidwinkel	18
3.2.2 Verfahren ohne definierten Schneidwinkel	18
3.2.3 Abrasivverfahren	19
4 Expertenbefragung	21
4.1 Methodik	21

4.2	Vorbereitung und Durchführung der Expertenbefragung	22
4.3	Auswertung	25
4.3.1	Zerlegetechnologien	25
4.3.2	Dekontaminationstechnologien	28
4.3.3	Fernhantierte Technologien	30
4.3.4	Schwierigkeiten und Verbesserungspotentiale beim Rückbau	33
5	Zusammenfassung	36
	Anhang 1	38
	Anhang 2	39
	Anhang 3	46
	Literaturverzeichnis	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bevorzugte Zerlegetechnologien für verschiedene Bauteile (Borchardt, 2003)	38
Tabelle 2: Eigenschaften verbreiteter chemischer Dekontaminationsverfahren	41
Tabelle 3: Eigenschaften verbreiteter mechanischer Dekontaminationsverfahren	44
Tabelle 4: Eigenschaften verbreiteter thermischer Dekontaminationsverfahren.....	45
Tabelle 5: Eigenschaften verbreiteter mechanischer Zerlegeverfahren	47
Tabelle 6: Eigenschaften verbreiteter thermischer Zerlegeverfahren	50

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

In den nächsten Jahren wird die Anzahl an kerntechnischen Stilllegungsprojekten in Deutschland und weltweit ansteigen. In Deutschland stellen bis zum Jahr 2022 alle Kernkraftwerke ihren Leistungsbetrieb ein und werden anschließend stillgelegt und rückgebaut. Auch auf internationaler Ebene wird die Anzahl der stillzulegenden Kernkraftwerke stark wachsen. Ein Grund dafür ist der Beschluss einiger Staaten wie zum Beispiel Spanien und der Schweiz, in Zukunft auf die Erzeugung von Strom aus Kernenergie zu verzichten und stattdessen stärker auf erneuerbare Energien zu setzen. Außerdem haben die Kernkraftwerke der ersten Generation ihre vorgesehene maximale Betriebslebensdauer erreicht. Ein Großteil dieser kerntechnischen Anlagen wurde in den 1970er und 1980er gebaut. Bei einer Durchschnittslebensdauer von rund 40 Jahren wird ein starker Anstieg der globalen Rückbauprojekte zwischen 2020 und 2040 erwartet (Laraia, 2012).

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Der Rückbau eines Kraftwerks ist ein langwieriger Prozess, der bis zu einigen Jahrzehnten dauern kann. Grund dafür ist insbesondere der Umgang mit radioaktiv kontaminierten und aktivierten Materialien. Während den Rückbauarbeiten muss sichergestellt werden, dass es nicht zu Querkontaminationen kommt. Außerdem muss das Arbeitspersonal bestmöglich vor der Strahlung geschützt werden. Der Rückbau kerntechnischer Anlagen weicht daher stark vom konventionellen Rückbau ab. Der Einsatz von Dekontaminationstechnologien soll die radioaktive Abfallmenge minimieren und den personellen Einsatz erleichtern. Aber auch der Einsatz von Zerlege- und Demontagetechnologien erfordert eine besondere Untersuchung der Gegebenheiten. Dem kerntechnischen Rückbau steht hierzu eine große Vielfalt an Technologien zur Verfügung. Viele der Dekontaminations- und Zerlegetechnologien stammen aus dem konventionellen Rückbau. Einige Verfahren müssen allerdings speziell angepasst werden, um den Einsatz im radioaktiven Umfeld zu ermöglichen. Andere Verfahren wiederum befinden sich noch in Entwicklung oder sind erst seit kurzem auf dem Markt. Hinzu kommt, dass viele Arbeiten nur aus der Ferne erledigt werden können. Zu diesem Zweck werden fernhantierte Systeme eingesetzt. Die Auswahl an verschiedenen Dekontaminationsverfahren und Zerlegetechnologien ist groß. Ziel der Arbeit ist es, den Stand der Technik im Bereich der Rückbautechnologien aufzuzeigen.

Hierzu wird anhand einer Expertenbefragung festgestellt, welche Technologien von besonderer Relevanz sind und wo aus Sicht der Experten die Stärken und Schwächen dieser Technologien liegen. Des Weiteren wird mit Hilfe der Befragung der Trend des Einsatzes neuer Technologien und fernhantierter Systeme aufgezeigt.

2 Technologien zur Dekontamination

Eine der Hauptaufgaben des kerntechnischen Rückbaus ist die Dekontamination der Anlagenteile. Der Begriff Dekontamination bezieht sich dabei auf das Entfernen radioaktiver Verunreinigungen. Beim Kernkraftwerk Würgassen mussten beispielsweise über 100.000 m² Oberfläche dekontaminiert werden (Gentes et al., 2015, S. 40). Auf metallischen Oberflächen entstehen unter anderem korrodierte, dünnwandige Kontaminationsschichten. Betonstrukturen werden in der Regel wegen ihres porösen Gefüges weit tiefer penetriert als Metalle. Die Kontamination kann bis zu einer Tiefe von einigen Zentimetern ins Material eindringen (Europäische Kommission, 2009, S. 9). Bevor mit dem eigentlichen Abbau der Anlage begonnen werden kann, müssen stark verstrahlten Bereiche von Kontaminationen befreit werden. Gründe für die Dekontamination sind (NEA, 1999, S. 7):

- Die radioaktive Strahlung soll reduziert werden, um die Dosis, der Personen ausgesetzt sind, zu verringern.
- Die Wiederverwertung von Anlagenteilen und Materialien soll ermöglicht werden.
- Die Abfallmenge, die in speziellen und lizenzierten Entsorgungsanlagen beseitigt werden muss, soll reduziert werden.
- Das kontaminierte Material soll zur anschließenden Beseitigung gebündelt werden.
- Es soll die uneingeschränkte Nutzung des Geländes und der dazugehörigen Bauten wiederhergestellt werden.

Der Grad der Kontamination hängt stark vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit ab. Außerdem haben die Betriebsparameter Temperatur, Druck und pH-Wert einen Einfluss darauf. Es kann zwischen folgenden Arten der Kontamination unterschieden werden (Gentes et al., 2015, S. 40):

- Oberflächenkontamination: Hierbei handelt es sich um einfache Ablagerungen, die durch Wischen oder Spülen entfernt werden können.
- Kontamination in Oberflächenschichten: Kontaminierte Lack-, Farb- und Korrosionsschichten.
- Kontamination im Bauteil: Kontamination, die sich im Inneren des Bauteils befindet.

Im Gegensatz zur Kontamination erfolgt die Neutronenaktivierung in den oberflächennahen Schichten des Werkstoffs. Der Grad der Aktivierung nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Bei der Dekontamination handelt es sich um die Entfernung oberflächlicher radioaktiver Stoffe (Gentes et al., 2015, S. 40). Dies kann mittels chemischer, mechanischer oder thermischer Verfahren geschehen. Dabei wird die Radioaktivität nicht eliminiert, sondern sie wird lediglich entfernt und anschließend außerhalb der Anlage in Form von Schlamm, Staub oder in gebundener Form in speziellen Behältern aufbewahrt (Europäische Kommission, 2009, S. 9-10).

Es existieren verschiedene Gruppen an Dekontaminationsverfahren. Diese werden in die Gruppen der chemischen, mechanischen, thermischen und sonstigen Dekontaminationsverfahren unterschieden.

2.1 Chemische Dekontaminationsverfahren

Chemische Dekontaminationsverfahren nutzen konzentrierte oder verdünnte chemische Lösungen, um metallische Oberflächen abzutragen. Der Einsatz chemischer Dekontaminationsverfahren ist bei porösen Materialien ineffizient. Verdünnte chemische Verbindungen lösen lediglich die oberen Metallschichten. Diese verdünnten Verfahren werden jedoch häufig bei laufendem Leistungsbetrieb zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen genutzt. Bei Rückbaumaßnahmen können aggressivere Mittel eingesetzt werden. Diese Verbindungen lösen nicht nur die oberen Oxidschichten, sondern auch das Metall selbst (Steiner, 2012, S. 325). Der Einsatz chemischer Verfahren hat sich insbesondere bei größeren Komponenten mit einer komplizierten Geometrie bewährt. Auch innenliegende und schlecht zu erreichende Flächen wie Innenflächen von Rohrleitungen können mittels chemischer Verfahren dekontaminiert werden. Ein Nachteil beim Einsatz von Chemikalien ergibt sich aus der verminderten Recycling-Fähigkeit. Dadurch fallen große Mengen an sekundären Abfällen an, die es zu beseitigen gilt (NEA, 1999, S. 16). Ihre Effizienz kann stark variieren. Hauptparameter sind die Konzentration, die Anwendungsdauer und die Prozesstemperatur. Die Anwendungsdauer kann die Effizienz in beide Richtungen beeinflussen. Es kann vorkommen, dass nach einer bestimmten Zeitspanne die chemische Lösung gesättigt ist und die Dekontaminationswirkung nachlässt (Noynaert, 2012, S. 324).

Bei den rein chemischen Verfahren kann zwischen drei verschiedenen Wirkmechanismen unterscheiden werden. Zum einen existieren chemische Verfahren, bei denen das Lösungsmittel zirkuliert wird. Als Alternative können die kontaminierten Komponenten in ein chemisches Bad getaucht werden. Dies ist jedoch nur möglich,

wenn eine bestimmte Größe nicht überschritten wird. Bei der zweiten Gruppe handelt es sich um elektrochemische Verfahren. In der dritten Gruppe werden die restlichen Verfahren zusammengefasst, die nicht in die vorigen Gruppen fallen. Hierzu gehören unter anderem Verfahren, die mit chemischen Pasten, Gelen und Nebel arbeiten. Einen Überblick gängiger Verfahren findet sich im Anhang 2 dieser Studie. Im Folgenden werden die Hauptmerkmale dieser Verfahren erörtert und anhand von Beispielen verdeutlicht.

2.1.1 REIN CHEMISCHE DEKONTAMINATIONSVERFAHREN

Bei jedem Rückbauprojekt wird zu Beginn der Primärkreislauf mittels chemischer Verfahren dekontaminiert. Dabei werden chemische Lösungen entlang des Primärkreislaufs zirkuliert. Diese Lösung gelangt selbst an schwer zu erreichende Stellen innerhalb des Kreislaufs. Während des Dekontaminationsprozesses werden nicht nur oberflächliche Kontaminationen entfernt, sondern es werden auch die stark kontaminierten und teilweise aktivierten oberen Schichten abgetragen. Die dabei anfallende Schlacke ist hochradioaktiv und muss dementsprechend entsorgt werden. Durch mehrmaliges Wiederholen kann die Aktivität um mehr als 70% reduziert werden (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 128). Bei kleineren Komponenten besteht die Möglichkeit, diese in ein chemisches Bad einzutauchen. Zurzeit existiert auf dem Markt eine große Anzahl verschiedener chemischer Verfahren. Ausschlaggebend bei der Wahl des chemischen Verfahrens sind unter anderem die Geometrie und das Material der zu dekontaminierenden Komponente. Es müssen außerdem die Art der Kontamination und die vorherrschende Infrastruktur berücksichtigt werden (NEA, 1999, S. 17f). Unter den rein chemischen Verfahren wird zwischen den „weichen“ und den „harten“ Verfahren unterschieden.

Die „weichen“ Dekontaminationsverfahren spielen insbesondere bei der Dekontamination während des Anlagenbetriebs eine wichtige Rolle. Diese sind in der Lage, Kontaminationen zu entfernen ohne das eigentliche Material zu beschädigen. Wegen der geringen chemischen Konzentrationen ist die Effizienz dieser Verfahren vergleichsweise niedrig. Jedoch gibt es die Möglichkeit die Effizienz zu erhöhen. So konnte durch eine Erhöhung der Umgebungstemperatur auf bis zu 90°C eine Steigerung der Effizienz beobachtet werden (NEA, 1999, S. 18). Zu den am häufigsten eingesetzten „weichen“ chemischen Verfahren gehören (Noynaert, 2012, S. 324-325):

- Canadian Decontamination and Remediation Process (CANDEREM)
- Low Oxidation State Metal Ion (LOMI)
- Chemical Oxidizing Reducing Decontamination (CORD)

„Harte“ Dekontaminationsverfahren nutzen aggressivere Chemikalien, um die Effizienz des Verfahrens zu erhöhen. Diese Verfahren dringen bis ins Grundmaterial ein, wobei die Funktionsfähigkeit des Materials stark beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund werden aggressive Verfahren lediglich bei Rückbaumaßnahmen angewendet (NEA, 1999, S. 18). Ein großer Nachteil gegenüber den „weichen“ Verfahren besteht durch die große Menge an anfallenden sekundären Abfällen. Zu den verbreitetsten Verfahren gehören unter anderem (Noynaert, 2012, S. 326-332):

- REDOX-Prozess: Benutzt Ce^{4+} in einer Salpetersäurelösung bei ca. 60-80°C zur Oxidierung. Das Cerium wird hier in einem separaten Behälter elektrochemisch regeneriert.
- MEDOC-Prozess: Dieses Verfahren ist durch die kontinuierliche Regenerierung des Ce^{4+} mit Ozon auf Prozesstemperatur charakterisiert. Geringe Mengen an Sekundärabfällen und eine hohe Effizienz können hierdurch erreicht werden.
- HNO₃/HF-Prozess: Die Lösung wird in einem Bad oder in Form einer ätzenden Paste aufgetragen. Hiermit lassen sich Oxidschichten von Edelstahlkomponenten entfernen. In einer ersten Phase der Reaktion findet eine Oxid-Reduzierung statt. Anschließend lösen sich die Metalloxide und bleiben in der Lösung. Die Effizienz des Verfahrens kann durch höhere Prozesstemperaturen verbessert werden.

2.1.2 ELEKTROCHEMISCHE DEKONTAMINATIONSVERFAHREN

Eine weitere Effizienzsteigerung kann durch das Anlegen einer elektrischen Spannung erreicht werden. Dabei wird das zu dekontaminierende Teil als Anode angeschlossen. Als Kathode dient entweder eine Kupfer- oder Edelstahlelektrode oder der Elektrolyttank selbst. Anode und Kathode sind in einem Elektrolyten getaucht. Durch das Anlegen einer Spannung wird die Oberfläche der Anode abgetragen. Mit dem abgetragenen Material löst sich auch die dortige Kontamination. Übersteigt die Eisenkonzentration im Elektrolyten einen Wert von 100g/dm³, so sinkt die Effizienz der Dekontamination. Der Elektrolyt wird kontinuierlich zirkuliert, um die abgetragenen Eisenpartikel herauszufiltern. Elektrochemische Methoden lassen sich jedoch nur auf elektrisch leitende Materialien wie Eisenlegierungen, Kupfer, Aluminium, Blei und Molybdän anwenden (NEA, 1999, S. 21-22). Durch elektrolytisches Polieren lässt sich eine hohe Effizienz erreichen. Die Effizienz hängt dabei von der Konzentration des Elektrolyten, der Prozesstemperatur, der Stromdichte und dem Elektrodenpotential ab. Ölschichten, Rost und Farbschichten sind vor dem Einsatz elektrochemischer Verfahren zu entfernen, da sonst die oberste Oxidschicht nicht im direkten Kontakt mit dem Elektrolyten steht und somit der Abtrag nicht möglich ist. Die Effizienz dieser

Methode ist auch durch die Geometrie der zu dekontaminierenden Komponenten beschränkt und ist bei kurzen Entfernungen zwischen Anode und Kathode am höchsten. Somit sind geometrisch-komplexe Bauteile nur sehr schlecht zu dekontaminieren (Noynaert, 2012, S. 329-332). Beim elektrolytischen Polieren können verschiedene Elektrolyten zum Einsatz kommen. Folgende Elektrolyten sind am weitesten verbreitet (Europäische Kommission, 2009, S. 20-23):

- Phosphorsäure-Prozess: Das Verfahren kommt bei der Dekontamination von Stahl und Edelstahl zum Einsatz. Dieser Elektrolyt ist wegen des geringen Sicherheitsrisikos und seiner vielseitigen Einsatzmöglichkeiten am weitesten verbreitet. Hierbei wird besonders das Radionuklid Co-60 ausgeschieden.
- Salpetersäure-Prozess: Verfahren zur Dekontamination von Edelstählen. Bei diesem Verfahren werden die Titanelektroden eingesetzt, um die Entstehung von Wasserstoff zu minimieren. Als Elektrode dient ein Titankorb, in den die zerkleinerten Teile hineingelegt und anschließend in Salpetersäure getaucht werden. Mit diesem Verfahren ist eine sehr hohe Effizienz möglich.

2.1.3 SONSTIGE CHEMISCHE DEKONTAMINATIONSVERFAHREN

Neben den rein chemischen und elektrochemischen Verfahren existieren auch andere chemische Verfahren, die bei Dekontaminationsarbeiten zum Einsatz kommen. Im Folgenden sollen lediglich zwei explizit beschrieben werden:

Bei der Schaumdekontamination handelt es sich um eine Mischung aus Schaumreinigungsmittel und Benetzungsmittel. Der Schaum dient als Trägermaterial für die Dekontaminationslösung. Ihre Konsistenz erlaubt den Einsatz an Wänden und Decken. Geometrisch schwierige Stellen können ebenfalls erreicht werden. Das Verfahren ist für metallische Oberflächen geeignet. Jedoch wurde festgestellt, dass die Effizienz bei einmaligem Einsatz relativ gering ist. Aus diesem Grund ist eine Wiederholung des Prozesses von Vorteil. Da der Schaum nach dem Abziehen nur ein geringes Volumen einnimmt, spielen die dadurch erzeugten Sekundärabfälle keine große Rolle (Europäische Kommission, 2009, S. 23-24).

Dekontaminations-Gele werden auf die kontaminierten Flächen gesprüht. Das Gel dient als Trägersubstanz für die Dekontaminationschemikalien. Nach der Anwendungsdauer kann das ausgehärtete Gel abgezogen werden. Dadurch lassen sich insbesondere großflächige Komponenten unmittelbar vor Ort dekontaminieren, wobei nur geringe Mengen an Sekundärabfall anfallen. Auch bei diesem Verfahren ist die Wiederholung der Prozedur nötig, um gute Ergebnisse erreichen zu können. Mit dem Einsatz von Dekontaminationsschäumen und Dekontaminationsgelen konnte eine

70%ige Reduktion der Abfallerzeugung nachgewiesen werden (Europäische Kommission, 2009, S. 23-24).

2.2 Mechanische Verfahren

Mechanische Dekontaminationsverfahren sind durch das Abtragen oberflächennaher Kontaminationen charakterisiert. Dabei können Rückstellkräfte entstehen, die bei der Auswahl der einzusetzenden Technologie berücksichtigt werden müssen. Die Verfahren reichen von einfachen Reinigungsverfahren (z.B. Wischen, Schrubben) bis hin zu Methoden, bei denen die Oberfläche abgetragen wird (z.B. Fräsen, Abrasivstrahlen). Im Vergleich zu chemischen Verfahren sind mechanische Verfahren weniger aggressiv. Ihr Vorteil liegt aber in der einfachen Handhabung. Oft werden sie komplementär zu chemischen Verfahren eingesetzt, um besonders gute Ergebnisse zu erreichen (Boing, 2006, S. 33). Ihr Einsatz wird allerdings in zweifacher Hinsicht beschränkt. Zum einen müssen die Flächen für die Dekontamination zugänglich sein. Außerdem erzeugen mechanische Verfahren große Mengen an kontaminierten Stäuben. Durch entsprechende Vorkehrungen muss verhindert werden, dass diese radioaktiven Partikel nach außen gelangen. Es muss für die Gesundheit der Arbeiter gesorgt werden. Spezielle Filteranlagen und Schutzbekleidung sorgen dafür, dass sich die Kontamination nicht weiter ausbreitet. In vielen Fällen lohnt es sich, auf dem Kraftwerksgelände Dekontaminationszentren zu errichten, in denen ein oder mehrere Techniken eingesetzt werden können. Dort können zerkleinerte Komponententeile effektiv und sicher dekontaminiert werden (NEA, 1999, S. 23).

Mechanische Dekontaminationsverfahren lassen sich grob in vier Gruppen unterteilen:

- Mechanische Verfahren ohne definierten Schneidwinkel
- Mechanische Verfahren mit definiertem Schneidwinkel
- Mechanische Verfahren mit Aufprallwirkung
- Sonstige Verfahren

Im Anhang 2 findet sich ein Überblick der gängigsten mechanischen Dekontaminationsverfahren. Des Weiteren werden die mechanischen Dekontaminationsverfahren im Folgenden kurz vorgestellt.

2.2.1 VERFAHREN OHNE DEFINIERTEN SCHNEIDWINKEL

Charakteristisch für diese Gruppe ist die Geometrie ihrer Schneidelemente. Diese besitzen keinen einheitlichen Schneidwinkel und können unter anderem aus Körnern oder Metallborsten bestehen. Klassische Verfahren dieser Kategorie sind das

Schleifen, das Polieren und das Bürsten von Oberflächen. Diese sind besonders für das Entfernen lokaler Kontaminationen auf metallischen Oberflächen geeignet. Es entstehen dabei große Mengen an feinen Staubpartikeln. Aus diesem Grund ist die Anwendung nur im luftundurchlässigen Einschluss und mit spezieller Schutzbekleidung möglich. Auf dem Markt gibt es zahlreiche Anbieter mit unterschiedlichen Modellen, die für den Einsatz in Frage kommen. Eine Anpassung der Maschinen ist nicht erforderlich. Eventuell müssen vor dem eigentlichen Dekontaminationsprozess lediglich die Arbeitsbereiche luftundurchlässig gemacht werden. Hierzu zählen die Errichtung einer Einhausung und die Installation von Filteranlagen (Boing, 2006, S. 42).

2.2.2 VERFAHREN MIT DEFINIERTEN SCHNEIDWINKEL

Für die Dekontamination von Betonoberflächen werden grobe Technologien benötigt. Hier kommen Betonfräsen, Betonmeißel und Pressluftschlämmer zum Einsatz. Diese Technologien können zentimetertiefe Betonschichten abtragen (Noynaert, 2012, S. 338-340). Bei Bedarf können auch feinere Technologien wie das Nadeln oder das Stocken eingesetzt werden. Wände und Decken lassen sich mit diesen Verfahren ebenfalls dekontaminieren. Größere Maschinen besitzen allerdings ein hohes Eigengewicht. Das benötigen sie, um den starken Rückstellkräften entgegenwirken zu können. Aus diesem Grund werden zur Dekontamination von Wänden und Decken Manipulatoren oder andere Vorrichtungen benötigt, die das hohe Gewicht und die Rückstellkräfte bewältigen können. Bei der Fräse handelt es sich um einen mit Fräslamellen oder Fräsmeißeln bestückten Fräskopf. Für eine bessere Leistung können diese mit Diamanten beschichtet sein. Die Rotation des Werkzeugs führt zu einem Oberflächenabtrag. Mit diesem Verfahren lassen sich in der Regel Schichten bis zu einem Zentimeter entfernen (Noynaert, 2012, S. 340). Eine Fräse ist in der Lage, Schrauben und Metallbolzen im Beton zu durchtrennen. Das hohe Arbeitstempo der Fräse erlaubt den großflächigen Einsatz. Außerdem generiert es 30% weniger Abfall als der Einsatz von Stemmwerkzeugen und ist wegen der wesentlich geringeren Vibration besser für den manuellen Einsatz geeignet (Boing, 2006, S. 53-57). Die positiven Eigenschaften des Fräsens ermöglichen den Einsatz fernhantierter Systeme.

2.2.3 VERFAHREN MIT AUFPRALLWIRKUNG

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen werden neben den mechanischen Verfahren auch verschiedene Strahltechnologien eingesetzt. Bei diesen Verfahren wird die Aufprallenergie eines Stoffes genutzt, um die Oberflächenkontaminationen abzutragen. Ein Strahlmedium wird stark beschleunigt und über eine Düse auf die Oberfläche projiziert. Strahlverfahren werden meist zur Dekontamination von metallischen

Oberflächen eingesetzt. Wegen der starken Aerosolbildung benötigen die Verfahren eine Einhausung. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich anhand ihrer Strahlmittel.

Das Hochdruckwasserstrahlen ist die einfachste Form des Strahlens. Bei dem Verfahren wird mit einem Einsatzdruck von bis zu 15MPa gearbeitet. Es werden hauptsächlich Vordekontaminationsarbeiten stark kontaminierter Teile durchgeführt (z.B. Beckenwand). Ab einem Druck von über 70MPa lassen sich Oberflächenschichten abtragen. Die Effizienz dieser Verfahren lässt sich durch die Zugabe von Additiven oder dem Einsatz von Heißwasser steigern. Solche Anlagen sind aber vergleichsweise teuer. Die Abwässer werden nicht gefiltert, sodass sehr große Mengen an kontaminiertem Abwasser anfallen. Während des Strahlens entstehen außerdem tropfenförmige Aerosole, die aufgefangen werden müssen (Noynaert, 2012, S. 334).

Es existiert die Möglichkeit Strahlungsverfahren mit der Zugabe von Abrasivmitteln zu nutzen. Zwei weitverbreitete Technologien sind das Abrasiv-Sandstrahlen (trocken) und das Abrasiv-Hochdruckwasserstrahlen (nass). Die Wahl des Abrasivmittels hat einen großen Einfluss auf die Effizienz des Verfahrens. Es existiert eine große Vielfalt solcher Abrasivmittel. Edelstahlgranulat gehört dabei zu den härteren Abrasivmitteln. Der Einsatz ist jedoch recht kostenintensiv (Noynaert, 2012, S. 334-336). Andere Strahlmittel sind beispielsweise Glasperlen, Keramikugeln oder Mineralien. Es sollte darauf geachtet werden, dass das Abrasivmittel nicht zu schnell verschleißt, da sonst die Sekundärabfallmenge stark wächst. Der Verbrauch kann durch Recyceln des Abrasivmittels minimiert werden (Kaulard et al., 2010, S. 45). Es sollte allerdings darauf geachtet werden, dass durch die im Strahlmittel vorhandenen Partikel keine Rekontamination des Werkstücks stattfindet. Eine weitere Gefahr besteht darin, dass die Kontaminationen durch den Aufprall tiefer in das Material getrieben werden. Aerosole müssen zudem aus dem hermetisch abgeschlossenen Arbeitsbereich gefiltert werden. Ein großer Vorteil dieser Verfahren ist das große kommerzielle Angebot effektiver Anlagen (Boing, 2006, S. 37-41).

2.2.4 SONSTIGE VERFAHREN

Andere Strahlverfahren nutzen einen gänzlich anderen Wirkmechanismus. Eine Methode ist das Sponge-Jetting, bei dem kleine, mit Abrasivmittel imprägnierte, Urethan-Schwämme gegen die Oberfläche geschmettert werden. Durch das Expandieren und das Kontrahieren der Schwämmchen entsteht ein Scheuereffekt. Dieser Effekt erlaubt es, Schutzbeschichtungen und Farbschichten effektiv entfernen

zu können (IAEA, 1999, S. 48). Ein weiteres Strahlverfahren, das zur Entfernung loser Kontaminationen entwickelt wurde, ist das Freon-Jetting. Freon ist ein Halogenkohlenwasserstoff mit sehr geringer Viskosität und Oberflächenspannung. Daher kann es selbst in kleinste Risse und Poren eindringen und Kontaminationen entfernen.

2.3 Thermische Verfahren

Ein Überblick über die verschiedenen thermischen Dekontaminationsverfahren ist dem Anhang 2 zu entnehmen. Diesem lassen sich auch die jeweiligen Vor- und Nachteile entnehmen.

Unter den thermischen Verfahren existieren zwei unterschiedliche Wirkprinzipien. Auf der einen Seite gibt es hybride Verfahren, die nicht rein thermisch arbeiten. Hierzu zählt das Trockeneisstrahlen, welches bei oberflächlicher Kontamination eingesetzt wird. Dabei werden kleine Trockeneispellets mit sehr hoher Geschwindigkeit und einem Druck von 18bar auf die zu dekontaminierende Oberfläche geschossen. Beim Aufprall sublimiert das Trockeneis schlagartig zu CO_2 , wobei sich das Volumen auf das 540-fache ausdehnt. Der Sublimationsschock und in geringem Maße auch die kinetische Energie des Aufpralls sorgen für ein Abplatzen der Oberflächenkontaminationen (Europäische Kommission, 2009, S. 26). Der Effekt ist nicht abrasiv, weshalb die Oberfläche dabei nicht beschädigt wird. Es bleiben ebenfalls keine Strahlmittelrückstände zurück. Die vereinfachte Form des CO_2 -Strahlens ist das Eisstrahlen mit gewöhnlichem Wassereis. Dieses Verfahren besitzt ähnliche Eigenschaften wie das CO_2 -Strahlen. Der Sublimationsabtrag ist allerdings geringer. Außerdem fällt Sekundärabfall in Form von Schmelzwasser an (Europäische Kommission, 2009, S. 26). Eine Weiterentwicklung des CO_2 -Strahlens ist das Trockeneis-Laserstrahlen. Hierbei wurde die Anlage um einen Laser erweitert. Der Laser erhitzt die Oberfläche auf über 300°C , wodurch die Thermospannung verstärkt wird. Dies sorgt für einen stärkeren Materialabtrag. Das Verfahren ist für Beton-, Keramik- und Metalloberflächen geeignet (Bach und Brüggemann, 2007, S. 7-17).

Neben den Eisstrahlverfahren existieren auch Technologien, die lediglich durch die Zuführung von Wärme wirken. Hierzu zählen verschiedene Laserdekontaminationsverfahren. Ein Laserstrahl wird dabei frei von Rückstellkräften gleichmäßig auf eine Betonoberfläche projiziert. Dieser schmilzt die obere Betonschicht auf. Mit Hilfe von Druckluftdüsen wird die Schmelze über ein Absaugsystem entfernt. Im Luftstrom erstarrt die Schmelze in verglaste Form. Die Radioaktivität wird in der verfestigten Schmelze eingeschlossen. Ein großer Vorteil dieser Technologie ist das

Entfallen von Sekundärabfällen. Es müssen lediglich die abgetragenen und kontaminierten Schmelzreste entsprechend entsorgt werden. Der Prozess lässt sich außerdem hervorragend automatisieren (Anthofer et al., 2013, S. 2-9). Eine weitere Lasertechnologie ist die Laser-Ablation. Diese kann bei der Entfernung von Betonoberflächen eingesetzt werden. Die Oberfläche wird dabei stark erhitzt. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Beschichtung und des Grundmaterials führen zu einem Aufplatzen der Oberfläche. Dieser Schock reicht aus, um Beschichtungen abplatzen zu lassen (O'Sullivan et al., 2010, S. 28).

2.4 Sonstige Verfahren

Neben den chemischen, mechanischen und thermischen Methoden existieren auch Verfahren, die auf anderen Wirkprinzipien beruhen. Ein häufig eingesetztes Verfahren ist die Dekontamination in einem Ultraschallbad. Dabei wird hochfrequente Energie innerhalb einer Flüssigkeit in eine Vibration umgewandelt. Es entstehen kleinste Dampfblasen, sogenannte Kavitationen, die auf der Oberfläche einen Scheuereffekt auslösen. Durch das Zumischen chemischer Stoffe und Erhöhung der Temperatur kann die Effizienz des Verfahrens erhöht werden. Wegen des beschränkten Tankvolumens wird das Verfahren meist für schwach kontaminierte Kleinteile eingesetzt (IAEA, 1999, S. 56).

Eine weitere Methode der Dekontamination ist das radiologisch kontrollierte Einschmelzen metallischer Überreste. Das Einschmelzen ermöglicht die Freigabe metallischer Reststoffe. Es können verschieden Metalle in der Anlage eingeschmolzen werden. Somit bietet es eine wichtige Alternative zur (unmittelbaren) Freigabe und zur Entsorgung als radioaktiver Abfälle (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 89-90). Während des Rückbaus fallen große Mengen an Altmetallen (z.B. Wärmetauscher, Dampferzeuger) an. Solche großen und geometrisch komplexen Komponenten sind oft schwierig zu dekontaminieren. Durch das Einschmelzen wird der Lagerplatzbedarf minimiert. Während des Schmelzvorgangs werden die Oberflächenkontaminationen gleichmäßig in der Schmelze verteilt, sodass sich die örtliche Kontamination insgesamt verringert (NEA, 1999, S. 26). Das Schmelzen führt außerdem zu einem zweiten Dekontaminationseffekt. Während des Schmelzvorgangs sammeln sich alphastrahlende Radionuklide in der Schlacke an und werden durch das Entfernen der Schlacke beseitigt. Elemente mit niedrigem Siedepunkt wie Cäsium entweichen über die Abgase und können durch spezielle Filteranlagen eingefangen werden. Co-60 (Halbwertszeit: 5,3 Jahre) ist nach dem Schmelzen das vorherrschende Radionuklid im

Metallbarren. Nach einer kürzeren Lagerzeit können die Metallbarren ohne Vorbehalt recycelt werden (Noynaert, 2012, S. 337-338).

2.5 Fernhantierte Dekontaminationssysteme

Es existieren bereits einige fernhantierte Systeme zur Dekontamination. Ein solches System ist das Shaver-System des schwedischen Rückbauunternehmens Studsvik. Der Wandshaver ist in der Lage, kontaminierte und beschichtete Betonoberflächen abzutragen, um die Freimessbarkeit der Gebäudestruktur zu ermöglichen. Die Anlage besteht aus zwei Fräsköpfen, in denen auf einer Trommel bewegliche Werkzeuglamellen rotieren. Diese werden pneumatisch an die Wand gepresst. Das Shaver-System wird an einem Aluminiumbaugerüst angebracht. Das Gerüst ist modular aufgebaut und lässt sich der Geometrie der Räumlichkeiten anpassen (Plessing, 2004). Zwischen den Fräsköpfen findet die Energiezufuhr für den Antrieb und die Absaugung Platz. Der Abstand der Fräsköpfe ist außerdem so gewählt, dass bei einem maximalen Versatz der Fräsköpfe entlang der Linearführung die verbliebene unbearbeitete Fläche aus den vorhergehenden Arbeitsschritten überstrichen wird (Gentes et al., 2015, S. 53-54). Die Fräsköpfe können bei Bedarf auch an einen Stapler montiert werden. Das gibt dem Shaver-System eine große Flexibilität. Die Anlage ist besonders für das Abtragen großer Betonoberflächen geeignet. Bei einer Abtragstiefe von 3 mm schafft das System eine Dekontaminationsgeschwindigkeit von 15 m²/h. Dabei sind Metallobjekte wie Stahlbolzen kein Hindernis (van Wickeren, 2012).

3 Technologien zum Zerlegen und zur Demontage

Während des Rückbaus kerntechnischer Anlagen müssen an verschiedenen Stellen Zerlegearbeiten durchgeführt werden. Meistens handelt es sich dabei um Stahlbetonstrukturen oder Metallkomponenten. Ihre Größe und ihre Geometrie variieren stark, sodass im Rückbau eine Auswahl verschiedener Zerlegetechnologien zum Einsatz kommt. Viele eingesetzte Technologien stammen aus dem konventionellen Rückbau. Für den Einsatz in kerntechnischen Anlagen müssen allerdings Anpassungen vorgenommen werden. Der sichere Lufteinschluss und die Installation von Filteranlagen sind Voraussetzungen, die bei einigen Technologien anfallen. Somit existiert eine große Menge von verschiedenen Verfahren und Verfahrensvarianten. Im Folgenden sollen nur einige gängige Zerlegetechnologien näher beschrieben werden.

Grundsätzlich wird zwischen thermischen und mechanischen Zerlegetechnologien unterschieden.

3.1 Thermische Verfahren

Unter die thermischen Trennverfahren fallen solche, die durch die Einwirkung von Wärme ein thermisches Phasengleichgewicht erzeugen. Dabei wird das geschmolzene oder sublimierte Material entfernt und mit Hilfe eines Mediums aus der Kerbe entfernt. Als Ausstoßmedium wird meist Wasser oder ein Gas eingesetzt. Die Schwerkraft kann aber auch zur Entfernung der Schmelze genutzt werden. Ein großer Vorteil dieser Verfahren ist der berührungsfreie Trennvorgang. So werden Rückstellkräfte vermieden (Europäische Kommission, 2009, S. 39).

Thermische Trennverfahren werden meist bei metallischen Komponenten eingesetzt. Einige Verfahren sind außerdem in der Lage Bauwerkstoffe zu zertrennen (z.B. die Sauerstofflanze). Wegen der hohen Temperaturen sind die meisten dieser Verfahren auch für den Unterwassereinsatz geeignet. Dabei entsteht allerdings Ruß, welcher die Sichtverhältnisse stark beeinträchtigt. Beim Unterwassereinsatz ist darauf zu achten, dass die Kameras stets freien Blick haben. Thermische Verfahren zeichnen sich allgemein durch hohe Schnittgeschwindigkeiten und ihre universelle Einsetzbarkeit aus. Es ist jedoch mit einer erhöhten Aerosolbildung zu rechnen (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 138).

Bei den thermischen Trennverfahren werden die Technologien nach ihrer Energiequelle unterschieden (Europäische Kommission, 2009, S. 39):

- Chemische Energieträger: Brenngase (z.B. Propan) dienen als Energiequelle. Zusätzlich können zur Steigerung der Brenntemperatur Reaktionsmittel wie Sauerstoff oder Metallpulver hinzugefügt werden.
- Elektrische Energiequelle: Die Energie wird in Form von elektrischem Strom zur Verfügung gestellt. Durch Ionisation entsteht dabei ein Lichtbogen mit einer Temperatur von über 5.000°K.
- Laserschneidverfahren: Die Energie wird durch eine Laserstrahlquelle bereitgestellt. Ein stark fokussierter Strahl hoher Intensität wird als Schneidwerkzeug genutzt.

Der Einsatz thermischer Verfahren führt immer auch zur Bildung von Brenngasen, Aerosolen und Schmelzresten. Diese müssen mittels Filteranlagen und anderer Vorrichtungen aufgefangen werden (Noynaert, 2012, S. 294).

3.1.1 THERMISCHE VERFAHREN MIT CHEMISCHER ENERGIEQUELLE

Ein Standardverfahren ist das autogene Brennschneiden. Ein Brenngas-Sauerstoffgemisch versorgt die Flamme mit Energie, welche für den Trennprozess unlegierter und niedriglegierter Stähle, aber auch bei Molybdän und Titan eingesetzt wird. Im Rückbau findet dieses Verfahren besonders bei der Zerlegung austenitisch-plattierter und ferritischer Werkstoffe Anwendung (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 130). Das austretende Gasgemisch sorgt gleichzeitig für den Ausstoß der Schmelze. Durch das Zumischen von Eisen- oder Magnesiumpartikeln kann die Brenntemperatur soweit angehoben werden, dass auch Betonstrukturen zerlegt werden können. Dieses Verfahren findet unter dem Namen „Pulverbrennschneiden“ Anwendung. Für den Einsatz muss ein freier Raum hinter der Schnittfläche vorhanden sein. Vor dem Beginn des Schneidens muss ein durchgehendes Loch geschaffen werden. Dieses dient dem Abfluss der Schlacke. Die Sauerstofflanze ist mit über 2.500°C das Werkzeug mit der höchsten Brenntemperatur. Der Brennprozess findet hierbei zwischen Drähten, die in einem Metallrohr liegen, statt. Dabei wird unter Hochdruck Sauerstoff durch das innenliegende Rohr geleitet, welches als zusätzliche Energiequelle dient. Durch die Zugabe von Metallpulver kann ebenfalls eine höhere Brenntemperatur erreicht werden (Noynaert, 2012, S. 296-297).

3.1.2 THERMISCHE VERFAHREN MIT ELEKTRISCHER ENERGIEQUELLE

Das Plasmaschmelzschnitten ist eine weit verbreitete und ausgereifte Schneidtechnologie. Durch die Ionisation eines ausströmenden Arbeitsgases entsteht zwischen der Werkzeugelektrode und dem metallischen Werkstück ein bis zu 10.000°C heißes Plasma. Das geschmolzene Material wird durch den Gasdruck aus der Fuge getrieben. Dieses Verfahren ist wegen der kompakten Bauweise sehr gut für den manuellen Einsatz geeignet. Aber auch der fernhantierte Unterwassereinsatz kann problemlos mit dieser Technologie durchgeführt werden. Ein anderes Prinzip ist das Trennen mittels Lichtbogen. Im Unterschied zum Plasmaschneiden fehlt hier ein Arbeitsgas. Der Lichtbogen wird durch Berührung der Elektrode mit dem Werkstück erzeugt. Bei schwierigen geometrischen Verhältnissen hat sich der Einsatz der Funkenerosion bewährt. Die Funkenerosion ist die Grundtechnologie der CAMX-Verfahren. Durch den Vorschub einer Elektrode wird wiederholt Kontakt mit dem Werkstück hergestellt. Der dabei entstehende impulsartige Lichtbogen schmilzt und entfernt das Material. Die große Schwäche dieses Verfahrens ist jedoch die geringe Schnittgeschwindigkeit. Das Verfahren wird insbesondere beim Bohren von Löchern eingesetzt (Kaulard et al., 2010, S. 33).

Zum Trennen wird zwischen sechs verschiedenen Lichtbogenschneidverfahren unterschieden (Kaulard et al., 2010, S. 32-33):

- Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden/-Bohren (CAMC & CAMD): Bei CAMC entsteht zwischen einer schwertförmigen Graphitelektrode und dem unter Wasser liegenden Werkstück ein Lichtbogen. Dieser schmilzt die Metalloberfläche, wobei die Elektrode verbraucht wird. Ein Wasserstrom entfernt die entstandene Schmelze. Bei CAMD wird dasselbe Prinzip zum Bohren genutzt. Ein Wasserstrahl wird hierbei durch die Elektrode geleitet, um die Schmelze aus dem Bohrloch zu entfernen.
- Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG): Eine schnell rotierende, scheibenförmige Elektrode erzeugt unter Wasser einen Lichtbogen. Die Schnitttiefe ist durch den Scheibendurchmesser beschränkt. Anders als bei CAMC und CAMD wird hierbei die Elektrode nicht verschlissen.
- Lichtbogen-Wasserstrahlschneiden: Ein Schneidverfahren zum Trennen dickwandiger Werkstoffe. Eine abschmelzende Elektrode wird mitgeführt. Dadurch kann das mitgeführte Gewicht sehr hoch sein. Ein Wasserstrahl entfernt die Schlacke.
- Lichtbogen-Luftschneiden: Schneidverfahren, bei dem die Fuge mit Druckluft von der Schmelze befreit wird.

- Lichtbogen-Sauerstoffschneiden: Ein unterwassergeeignetes Schneidverfahren, bei dem unter Hochdruck Sauerstoff durch die Elektrode geleitet wird. Dadurch wird zusätzliche Energie frei und die Schlacke aus der Fuge entfernt.

3.1.3 THERMISCHE LASERSCHNEIDVERFAHREN

Laserschneidverfahren sind in der Industrie wegen ihrer hohen Präzision und Schnittgeschwindigkeit sehr gefragt. Im Rückbau sind sie zurzeit nicht weit verbreitet. Es gibt aber Anstrengungen, ihren Einsatz weiter voranzutreiben. Neben ihrer Präzision bietet diese Technologie den Vorteil der Mobilität. Der Laserschneidkopf kann in einiger Entfernung von der Laserquelle eingesetzt werden. Der Laserstrahl wird über Lichtleiter zum Schneidkopf geleitet. Dadurch ist das eigentliche Schneidwerkzeug klein und handlich und für den fernhantierten Einsatz besonders gut geeignet. Außerdem fällt so die anschließende Dekontamination des Werkzeugs weitestgehend aus. Unter den Laserschneidverfahren werden drei Prozessarten unterschieden. Beim Laserstrahlschmelzschnneiden wird der Werkstoff aufgeschmolzen und mittels Inertgas aus der Kerbe geblasen. Das Inertgas verhindert zudem ein Oxidieren der Oberfläche. Hierbei werden hohe Schnittqualitäten erreicht. Ein weiteres Verfahren ist das Laserstrahlbrennschneiden. Hierbei wird das Werkstück an der Schnittfuge erhitzt und mit Hilfe eines Sauerstoffstrahls verbrannt. Die hohe Schneidtemperatur ermöglicht im Vergleich zum Laserstrahlschmelzschnneiden eine höhere Schnittgeschwindigkeit. Das dritte Laserschneidverfahren ist das Laserstrahlsublimationsschneiden. Der Laser sublimiert das Material möglichst schmelzarm. Die Expansion des Dampfes generiert einen Druck, der die Schmelze ausschleudert. Wie beim Laserstrahlschmelzschnneiden schützt auch hier ein Schutzgasstrom die Oberflächen vor Oxidation. Erfolgreich wurde das Verfahren bereits bei der Entfernung von metallischen Raumauskleidungen im Kernkraftwerk Greifswald eingesetzt. Der hohe technische Aufwand steht einer weiten Anwendung allerdings entgegen (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 131-132).

3.2 Mechanische Verfahren

Durch den direkten Kontakt mit dem Werkstück erzeugen mechanische Zerlegeverfahren eine Schnittfuge. Das Material des Werkzeugs wird entsprechend dem zu zerlegenden Werkstoff gewählt. Durch den Zerlegevorgang entstehen unterschiedlich große Partikel, die aufgefangen werden müssen. Anders als die thermischen Verfahren, die berührungsfrei arbeiten, benötigen viele mechanische Verfahren eine stabile und robuste Konstruktion, um die Rückstellkräfte aufzufangen. Mechanische Verfahren können bei allen Materialien eingesetzt werden. Ihr Vorteil liegt

in ihrer robusten und ausgereiften Funktionsweise. Bei komplizierten Geometrien stoßen mechanische Verfahren allerdings an ihre Grenzen (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 138).

Die mechanischen Verfahren können anhand ihrer Schneidwinkel in drei Gruppen unterteilt werden (Noynaert, 2012, S. 301):

- Verfahren mit definiertem Schneidwinkel
- Verfahren ohne definierten Schneidwinkel
- Abrasivverfahren

3.2.1 VERFAHREN MIT DEFINIERTEM SCHNEIDWINKEL

Werkzeuge mit definiertem Schnittwinkeln sind unter anderem Bandsägen, Stichsägen und Bügelsägen. Die beim Sägen anfallenden Späne und Partikel sind wegen ihrer Größe einfach aufzufangen. Vorteil dieser Technologien ist ihre hohe Zuverlässigkeit (Kaulard et al., 2010, S. 34). Sägeverfahren werden in fast allen Rückbauprojekten eingesetzt. Jedoch benötigen diese viel Platz. Bandsägen eignen sich besonders für den Einsatz bereits demontierter Komponenten. In beengten Bereichen kommen spezielle Stichsägen zum Einsatz (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 134). Sägeverfahren sind für die Zerkleinerung großer Komponenten (z.B. Dampferzeuger) unerlässlich. Für gute Schnittgeschwindigkeiten benötigt die Bandsäge allerdings ein Kühlmedium. Dieses muss aufgefangen werden und als radioaktiv kontaminierter Abfall entsorgt werden. Andere Vertreter dieser Gruppe sind Scheibenfräsen und Kreissägen. Beide Verfahren bestehen aus einer mit Klingen bestückten Scheibe. Durch die Dreh- und Vorschubbewegung wird eine Schnittfuge erzeugt. Während des Schneidevorgangs entstehen ebenfalls große Rückstellkräfte. Diese müssen durch eine entsprechende Konstruktion aufgefangen werden (Kaulard et al., 2010, S. 34). Die Kreissäge hat sich als besonders präzise herausgestellt. Trennscheren sind im Rückbau ebenfalls weit verbreitet. Hierbei wird das Material durch den Einsatz von hohen Schneidkräften getrennt. Es entstehen keine Späne. Das Verfahren benötigt daher keine Kühlung. Mit Scheren lassen sich Rohre und Bleche gut zertrennen. Die mechanischen Schneidverfahren lassen sich im Allgemeinen problemlos unter Wasser einsetzen (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 134-136).

3.2.2 VERFAHREN OHNE DEFINIERTEN SCHNEIDWINKEL

Zu den Werkzeugen ohne definierte Schneidwinkel zählen Schneidtechnologien wie sie bei Diamantbandsägen oder Trennschleifern zum Einsatz kommen. Das Material wird dabei nicht durch einen Schneideffekt abgetragen. Die Fuge entsteht durch

ständiges Schleifen des Trennmediums. Die Umlaufgeschwindigkeit der Schnittwerkzeuge muss aus diesem Grund besonders hoch sein, um eine akzeptable Trenngeschwindigkeit zu erhalten. Das Sägeseil muss ständig gekühlt werden, damit es trotz der hohen Umlaufgeschwindigkeiten nicht überhitzt. Hierzu wird meist eine Kühlflüssigkeit eingesetzt. Diese Kühlflüssigkeit fällt als zusätzlicher Sekundärabfall an. Wird eines dieser Verfahren im Trockenen eingesetzt, so entsteht eine große Menge an feinen Aerosolen. Dabei ist auf die Gefahr der Querkontamination zu achten. Es gibt praktisch keine Größenbegrenzung beim Einsatz von Seilsägen. Ein typisches Einsatzgebiet ist die Zerkleinerung von großen Stahl-Beton-Komponenten. Zuvor müssen Löcher gebohrt werden, durch die das Stahlseil geführt wird. So wird beispielsweise der Dampferzeuger häufig mittels Seilsäge zerlegt (Kaulard et al., 2010, S. 34-35).

3.2.3 ABRASIVVERFAHREN

Beim Wasserabrasiv-Strahlschneiden werden kleine mineralische Partikel mittels Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl auf das zu zerteilende Werkstück projiziert. Dieses Verfahren eignet sich für jede Art von Material. Anders als bei den anderen mechanischen Verfahren treten hierbei keine Rückstellkräfte auf. Das erleichtert den fernhantierten Einsatz (Kaulard et al., 2010, S. 36). Aufgrund ihrer kompakten Bauweise lassen sich diese Werkzeuge besser handhaben. Die geringe Fugenbreite reduziert die Primärabfallmenge. Das Abrasivmittel und das Wasser fallen jedoch zusätzlich als Abfall an. Wie bei den abrasiven Dekontaminationsverfahren lässt sich beim Wasserabrasiv-Strahlschneiden die Sekundärabfallmenge ebenfalls durch Recyceln verringern (Thierfeldt und Schartann, 2009, S. 136-137). Zurzeit werden zwei Verfahrensvarianten eingesetzt. Zum einen existiert das klassische Wasserabrasiv-Injektorstrahlschneiden (WAIS). Hierbei wird das Abrasivmittel in einem Mischkopf einem reinen Wasserstrahl zugemischt. Der Schneidstrahl besteht aus drei verschiedenen Bestandteilen: Wasser, Luft und Abrasivmittel. Die Luft besitzt mit ca. 90% den größten Volumenanteil. Eine effizientere Wasserstrahltechnologie ist das Wasserabrasiv-Suspensionsstrahlschneiden (WASS). Der Unterschied liegt in der Abwesenheit von Luft im Strahl. Dies führt zu einer verbesserten Beschleunigung der Abrasivpartikel. Das Abrasivmittel wird in einem Druckbehälter in Form einer hochkonzentrierten Suspension aufbewahrt. Über ein Leitungssystem wird die Suspension in einem Mischstück mit dem Wasserhauptstrom vermischt. Der Suspensionsstrahl besteht ausschließlich aus Wasser und Abrasivmittel. Die Abwesenheit von Luft erlaubt eine große Entfernung zwischen Erzeugungs- und Einsatzort der Suspensionsdüse. Über Schlauchleitungen wird das Strahlmittel zur

Düse befördert. Die Hochdruckpumpe und die Mischstation können außerhalb des Kontrollbereichs platziert werden (Europäische Kommission, 2009, S. 50).

4 Expertenbefragung

Die Auswahl an Technologien für den Rückbau kerntechnischer Anlagen ist groß. Für eine Aufgabe stehen oft zahlreiche Methoden zur Verfügung. Die Entscheidung über den Einsatz wird oft anhand von Erfahrungen gefällt. Einige Technologien können also als Standardtechnologien des Rückbaus angesehen werden. Andere wiederum finden trotz der theoretischen Anwendbarkeit kaum Anwendung in Rückbauprojekten. Anhand einer Befragung ausgewählter Personen sollen solche Standardwerkzeuge identifiziert werden. Die persönlichen Erfahrungen der Experten können außerdem helfen, allgemeine Probleme beim Einsatz und bei der Auswahl der Rückbautechnologien festzustellen. Des Weiteren sollen die Trends beim Einsatz und bei der Entwicklung von Dekontaminations- und Rückbautechnologien ergründet werden.

4.1 Methodik

Ausgangspunkt für die qualitative Befragung liegt bei der Frage nach der Relevanz der einzelnen Dekontaminations- und Zerlegetechnologien für den kerntechnischen Rückbau. Um einen möglichst praxisnahen Einblick zu erhalten, wurde hierzu eine Gruppe von Experten befragt. Laut Miegl und Näf (2005) ist ein Experte „eine Person, die aufgrund einer besonderen Ausbildung gesellschaftlich anerkannten Zugang zu einem bestimmten Tätigkeitsfeld hat und aufgrund ihrer Stellung in einer Institution/einem Unternehmen an Entscheidungsprozessen beteiligt ist“ (Miegl und Näf, 2005, S. 6). Das können wissenschaftliche Mitarbeiter und Forscher an Hochschulen oder Personen des mittleren Managements eines Unternehmens sein. Für die Expertenbefragung hat sich die Herangehensweise des schriftlichen qualitativen Interviews als passend erwiesen. Dabei handelt es sich um eine vom Forscher stimulierte schriftliche Textproduktion, die der Interviewpartner unter Abwesenheit des Interviewers und in einer deutlich verzögerten Kommunikation vollzieht (Schiek, 2014, S. 380). Obwohl schriftliche Interviews in der qualitativen Datenerhebung zurzeit eher eine rückständige Rolle spielen, besitzen diese positive Eigenschaften, die für die Expertenbefragung von Vorteil sind. Die schriftliche Befragung erlaubt es dem Interviewer, eine größere Menge von Experten in kürzerer Zeit zu erreichen. Außerdem ist das mit geringerem finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden. Die Transkriptionszeit fällt ebenfalls weg. Diese trivialen Vorteile sind allerdings nicht die einzigen Gründe, die für eine schriftliche Befragung sprechen. Durch die schriftliche Formulierung der Informationen hat der Interviewte die Möglichkeit seine Gedanken in

geordneter Form niederzuschreiben, das Geschriebene zu prüfen und gegebenenfalls wieder umzuformulieren oder gar zu löschen. Das wirkt sich positiv auf die Präzision der Formulierungen aus. Zudem können durch die Zuhilfenahme von Zeichen (z.B. Überschriften, Absätze, Unterstreichungen) indirekte Informationen an den Interviewer weitergegeben werden. Die Abwesenheit des Interviewers hat ebenfalls einen Einfluss auf die Antworten. Da er unter keinerlei Zeitdruck steht, hat der Experte keinen Grund, eine erzwungene Antwort zu formulieren. Er muss sich auch nicht gegenüber dem Interviewer rechtfertigen. Dadurch kommen meist ehrlichere Antworten zustande. Außerdem findet die Befragung anonym statt (Schiek, 2014). Das Fehlen des Interviewpartners bedeutet jedoch auch, dass der Interviewer keinen Einfluss auf die Antworten hat. Er kann das Gespräch bei Bedarf nicht lenken. Das birgt die Gefahr, bei unpräzisen Fragen unbrauchbare Antworten zu erhalten. Aus diesem Grund ist es bei der Erstellung des Fragebogens besonders wichtig, auf komplizierte Fragestellungen zu verzichten.

4.2 Vorbereitung und Durchführung der Expertenbefragung

Zu Beginn der Vorbereitung steht die Formulierung der Forschungsfrage im Vordergrund. Diese muss darauf gerichtet sein, dem „[...] Wissensbestand etwas hinzuzufügen. Dazu muss sie eine Lücke in diesem gemeinsamen Wissensbestand beschreiben, die geschlossen werden soll“ (Gläser und Laudel, 2010, S. 63). Im Fall der Expertenbefragung lässt sich die Forschungsfrage in zwei Teilfragen unterteilen.

1. Stand der Technik: Welche Dekontaminations- und Zerlegetechnologien finden häufig in kerntechnischen Rückbauprojekten Verwendung?
2. Künftige Entwicklung: Welche Trends und Entwicklungen sind beim Rückbau zu beobachten?

Nachdem die Forschungsfrage definiert wurde, konnte ein passender Leitfaden entwickelt werden. Der Leitfaden soll eine stimmige Folge von Fragen sicherstellen. Anhand des Leitfadens wurden 15 Fragen formuliert. Anhand der Expertenantworten soll die Forschungsfrage gelöst werden.

Zu Beginn wird anhand einer kurzen Einstiegsfrage der berufliche Hintergrund des Experten festgestellt. Der Experte soll sich anhand dieser Frage an den Fragetypus vertraut machen.

1. Beschreiben Sie bitte kurz, in welchem Bereich Ihr Unternehmen/Ihr Institut etwas mit dem Thema der Dekontaminations- und Rückbautechnologien zu tun hat und was Ihre Aufgaben in dem Bereich sind?

Im Anschluss soll beiden Forschungsfragen nachgegangen werden. Hierzu wurde der Fragebogen nach Themenbereichen unterteilt. Der erste Teilbereich bezieht sich lediglich auf die Zerlege- und Demontagetechnologien im Rückbau.

2. Welche Zerlege- und Demontagetechnologien werden heutzutage speziell für den Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt?
3. Welche bestehenden Zerlege- und Demontagetechnologien, die sich speziell auf den Rückbau kerntechnischer Anlagen beziehen, werden Ihrer Meinung nach in Zukunft an Bedeutung gewinnen?
4. Für welche Bereiche des kerntechnischen Rückbaus sind neue Zerlege- und Demontagetechnologien notwendig?
5. Für welche Bereiche des kerntechnischen Rückbaus sind neue Entwicklungen von Zerlege- und Demontagetechnologien zu erwarten?

Im zweiten Block wurde auf die Technologien zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen eingegangen werden. Die Abfolge der Fragen ist identisch mit der Fragefolge bei den Zerlege- und Demontagetechnologien. Diese Konsistenz soll den Experten den Überblick über die Fragen erleichtern.

6. Welche Dekontaminationsverfahren werden heutzutage speziell für den Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt?
7. Welche bestehenden Dekontaminationstechnologien, die sich speziell auf den Rückbau kerntechnischer Anlagen beziehen, werden Ihrer Meinung nach in Zukunft an Bedeutung gewinnen?
8. Für welche Bereiche des kerntechnischen Rückbaus sind neue Dekontaminationstechnologien notwendig?
9. Für welche Bereiche des kerntechnischen Rückbaus sind neue Entwicklungen von Dekontaminationstechnologien vorherzusehen (evtl. welche Technologien)?

Der dritte Block bezieht sich nicht direkt auf die Technologien zur Dekontamination und zum Rückbau. Die Fragen konzentrieren sich mehr auf Bereiche, die mit dem Thema Rückbau in Zusammenhang stehen.

10. Welcher Trend ist bei der Entwicklung fernhantierter Systeme zu beobachten?

11. Wie weit lassen sich Ihrer Meinung nach Dekontaminations- und Rückbauprozesse vollautomatisieren?
12. Was sind Ihrer Meinung nach die größten Schwierigkeiten bei der Auswahl der richtigen Dekontaminations- und Rückbautechnologien?
13. In welchem Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen sehen Sie bzgl. der Dekontaminations- und Rückbautechnologien noch große Verbesserungspotentiale?
14. In welchen Bereichen des Rückbaus kerntechnischer Anlagen sehen sie allgemein noch große Verbesserungspotentiale?

Bei der schriftlichen Befragung besteht die Gefahr, dass die Fragen falsch verstanden werden oder dass die Antworten unzureichend und unpräzise formuliert wurden. In diesem Fall ist es von Vorteil, den Experten im Nachhinein zu kontaktieren und die Bedenken zu klären. In einer letzten Frage wird dafür nach der Erlaubnis für eine spätere Nachbefragung gebeten.

15. Falls ich noch Fragen zu Ihren Antworten haben sollte, würde ich Sie gerne kontaktieren. Sofern Sie damit einverstanden sind, tragen Sie bitte unten Ihre Kontaktdaten ein.

Da eine zu lange Umfrage auf den Experten abschreckend wirken kann, wird auf weitere Fragen verzichtet. In einem ersten Pretest wird die benötigte Dauer auf ca. 20 Minuten geschätzt.

Schriftliche Interviews lassen sich in verschiedenster Weise durchführen. Die Servicestelle „MethodenLabor“ des House of Competence (HoC) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bietet für solche Fälle einen Beratungsdienst an. Ziel der Beratung ist die Festlegung des weiteren Vorgehens. Auch die Formalitäten eines schriftlichen qualitativen Interviews werden dabei besprochen. Zur Durchführung der Befragung wird vom MethodenLabor das Umfragetool LimeSurvey empfohlen. LimeSurvey ist eine Umfrage-Serviceplattform, mit der Online-Umfragen vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden können. Ein großer Vorteil der Software ist die intuitive Benutzeroberfläche. Zudem besitzt LimeSurvey eine große Vielfalt an Funktionen und Individualisierungsmöglichkeiten. Die SSL-Verschlüsselung von LimeSurvey erlaubt außerdem eine sichere Übertragung der Daten. Nach der Erstellung der Umfrage wurden erneut einige Pretests durchgeführt. Das MethodenLabor führte ebenfalls einen Pretest durch. Hierbei stellte sich heraus, dass die Bearbeitungsdauer und die Verständlichkeit der Fragen angemessen sind. Außerdem wurden letzte Verbesserungsvorschläge in die Befragung eingearbeitet.

Die Auswahl der Experten fand in Absprache mit dem Betreuer Herrn Felix Hübner statt. Die Experten kommen aus zwei verschiedenen Bereichen. Der Großteil der Experten stammt aus der Industrie. Es nahmen aber auch wissenschaftliche Mitarbeiter von technischen Universitäten an der Befragung teil. Die Kontaktaufnahme geschah über eine Einladungs-E-Mail. In dieser Mail war der URL-Link zur Umfrage enthalten. Den Experten wurde zudem angeboten, die Umfrage bei Verlangen persönlich oder telefonisch durchzuführen. Der Fragebogen stand den teilnehmenden Experten vier Wochen lang zur Verfügung.

Wie sich bei der Durchführung herausgestellt hat, wurde die persönliche Befragung der schriftlichen häufig vorgezogen. Es hat sich herausgestellt, dass die Befragung im Rahmen eines persönlichen Gesprächs wesentlich aussagekräftiger ist. Die Möglichkeit Antworten zu hinterfragen, ermöglichte es, die Expertenaussagen durch Begründungen zu ergänzen.

4.3 Auswertung

Nach Ablauf der Teilnahmefrist wurde die Onlineumfrage deaktiviert und die persönlich durchgeführten Interviews wurden transkribiert. Die Antwortbögen wurden mit Hilfe der qualitativen Analysesoftware MaxQDA für die weitere Auswertung aufbereitet. MaxQDA ist eine Software für die qualitative Analyse von unstrukturierten Daten wie Interviews, Umfragen, Video- und Audioaufnahmen, bibliographischen Datenbanken und Ähnlichem. Dabei wurden die verschiedenen Expertenaussagen thematisch kategorisiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Befragung in aufbereiteter Form vorgestellt. Die vier verschiedenen Themenbereiche der Befragung werden nacheinander vorgestellt.

4.3.1 ZERLEGETECHNOLOGIEN

Bei der Frage nach den häufig eingesetzten Zerlegetechnologien herrscht unter den Experten weitestgehend Konsens. Die Wahl der Technologie hänge hauptsächlich vom Material und der Schwere der Kontamination der zu zertrennenden Anlagenkomponente ab.

Zu den am stärksten kontaminierten Komponenten gehöre der Reaktordruckbehälter. Dieser wird meist unter Wasser zerlegt. Die verschiedenen Sägeverfahren eignen sich den Umfrageteilnehmern zufolge besonders gut. Sie seien sehr zuverlässig und besäßen eine gute Schnittgeschwindigkeit. Bandsägen seien die am häufigsten eingesetzten Sägen. Aber auch andere Varianten wie Kreissägen und Stichsägen kämen zum Einsatz. Der Einsatz thermischer Verfahren habe einen großen Nachteil,

der den Unterwassereinsatz stark behindere: Während des Trennvorgangs generieren thermische Verfahren große Mengen an Rußpartikeln. Diese beeinträchtigen die Sichtverhältnisse, wodurch die Fernhantierung stark beeinträchtigt wird. Sofern dennoch thermische Verfahren eingesetzt würden, sei die Verwendung des autogenen Brennschneiders (für unlegierte Stähle) und des Plasmaschneiders (für Edelstähle) sinnvoll. Das CAMC-Schwert komme unter Wasser zum Einsatz, wenn dickeres Metall zerlegt werden muss.

Innerhalb des Kontrollbereichs würden Technologien bevorzugt, die keine Aerosole und Dämpfe freisetzen. Als Grund dafür gaben die Befragten den zusätzlichen Aufwand an, der durch das Errichten einer Einhausung entsteht. In den beengten Räumlichkeiten des Kraftwerksgebäudes sei dies nicht immer einfach. Zudem müsse eine Ablufteinrichtung inklusive Filteranlage installiert werden. Aus diesem Grund würden bei der Zerlegung von Betonstrukturen vorzugsweise Sägeverfahren eingesetzt. Band- und Seilsägen kämen bei fast allen Rückbauprojekten zum Einsatz. Beim Zerlegen stark kontaminierter Materialien sollte jedoch auf die Kühlung verzichtet werden. Wird beispielsweise der biologische Schild des Reaktors zerlegt, so bestünde beim nassen Zersägen die Gefahr der Querkontamination. Wenn das Kühlmittel aufgefangen wird, so muss die anfallende Schneide-Emulsion nach dem Schneidprozess teuer und aufwendig wiederaufbereitet werden. Das Sägen ohne Kühlmittel habe zur Folge, dass das Sägeblatt schnell stumpf wird und überhitzt. Darunter leide die Effizienz. Außerdem stoße das trockene Sägen bei armiertem Beton an seine Grenzen. Beim Einsatz von Seilsägen müsse daher nass vorgebohrt werden. Dies sei notwendig, um das Sägeseil hindurch zu führen. Werden schwach kontaminierte Anlagenteile zertrennt, so würde standardmäßig nass gesägt. Neben den Band- und Seilsägeverfahren würden auch andere Sägetechnologien eingesetzt. So finden sich nach Aussagen der Experten im kerntechnischen Rückbau auch Stichsägen, Kreissägen und Bügelsägen. Deren Einsatz hänge immer von den gewünschten Anforderungen und der gegebenen Geometrie ab. Andere mechanische Verfahren, die von den Befragten genannt wurden, sind das Stemmen und das Schneiden. Für das Trennen von Kleinteilen aller Art sei der Einsatz von Trennschleifmaschinen möglich. Ihr Vorteil liege in ihrer universellen Einsatzmöglichkeit. In der Befragung wurde jedoch die Gefahr des Wärmeeintrags angesprochen. Die Schnittflächen müssten wegen des Einschlusses der Kontaminationen nachbearbeitet werden. Außerdem fallen durch den Funkenflug große Mengen an Aerosolen und Stäuben an. Der Einsatz thermischer Verfahren innerhalb des Kontrollbereichs sei den Experten zufolge unerwünscht. Die Aussage lässt sich durch zwei Argumente begründen. Zum einen fallen beim Zerlegen mit

thermischen Verfahren Dämpfe und Aerosole an. Deren Ausbreitung müsse durch eine Einhausung und durch geeignete Filteranlagen verhindert werden. Außerdem müssten die Schnittflächen thermisch zerlegter Komponenten aufwändig nachbearbeitet werden. Die Kontaminationen würde in der Schmelze eingeschlossen. Damit seien die Schnittflächen nicht mehr freimessbar. Diese Schmelzregionen müssten entfernt und als radioaktiver Abfall entsorgt werden. Wegen der hohen Schnittgeschwindigkeit kämen thermische Verfahren gelegentlich bei Metallen zum Einsatz. Die häufigsten Vertreter der thermischen Verfahren seien das Plasmaschneiden und das autogene Brennschneiden.

In den zentralen Bearbeitungszentren herrschten andere Bedingungen als im Kontrollbereich. Die Gefahr der Querkontamination sei wegen der geschlossenen Bearbeitungskabinen stark reduziert. Das erlaube den problemlosen Einsatz thermischer Zerlegetechnologien. Für unlegierte Stähle eigne sich besonders das autogene Brennschneiden unter Einsatz eines Acetylen-Sauerstoff-Gemischs. Bei Edelstählen sei der Einsatz von Plasmaschneidbrennern üblich. Jedoch würden deren Möglichkeiten auch im Bearbeitungszentrum durch Kontaminationsverfestigung eingeschränkt. Stark kontaminierte Teile würden deshalb bevorzugt mechanisch zerlegt. Dabei kämen ebenfalls Bandsägen zum Einsatz. Nach Meinung der Befragten seien Diamantseilsägen aufgrund der höheren Seilkosten im Bearbeitungszentrum weniger gefragt. Im Idealfall würden Komponenten aus dem Kraftwerksgebäude mechanisch herausgetrennt und anschließend im Bearbeitungszentrum mechanisch oder thermisch zerlegt. Häufig stünden metallische Teilkomponenten unter einer inneren Spannung, die bei der mechanischen Zerlegung zu Problemen führen kann. So würden beispielsweise die Sägeblätter beim Trennen ringförmiger Anlagenteile eingeklemmt. In solchen Fällen sei der Einsatz thermischer Verfahren von Vorteil.

In zukünftigen Rückbauprojekten würde sich beim Einsatz hinsichtlich der Wahl der passenden Zerlegetechnologie wenig ändern. Den Experten zufolge habe sich der Einsatz konventioneller Technologien als effizient herausgestellt. Das existierende Technologieangebot sei groß genug, um alle möglichen Situationen zu bedienen. Die Auswahl sei heutzutage vielmehr eine Kostenfrage. Gelingen es, durch ein völlig neues Verfahren die Kosten der anderen Technologien zu unterbieten, dann könnte sich diese Technologie sicherlich durchsetzen. Jedoch wird von den meisten Befragten stark bezweifelt, dass es dazu kommen wird. Wahrscheinlicher sei es, bestehende Zerlegetechnologien soweit zu optimieren, dass sie nachweislich eine Einsparung bringen. Das könne über die Anschaffungskosten erfolgen, durch eine Verringerung der Arbeitszeit oder durch die Reduzierung des größten Kostentreibers, des

Bedienpersonals. Eine weitere Möglichkeit, die Effizienz einer Technologie zu verbessern, bestünde in der Einsparung der Endlagerkosten. In diesem Zusammenhang spielen die Generierung von sekundären Abfällen eine große Rolle. So ließen sich beispielsweise die Kosten für Sägeverfahren reduzieren, wenn bei gleichbleibender Schnittgeschwindigkeit keine Schneidemulsion generiert würde.

Zusammenfassung: Die Befragung hat aufgezeigt, dass die Bandsäge entlang des gesamten Rückbauprojekts häufig Anwendung findet. Die Technologie ist wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit, der positiven Erfahrung und der hohen Praktikabilität weit verbreitet. Aber auch andere Sägeverfahren finden ihre Einsatzgebiete. So besitzt die Diamant-Seilsäge eine höhere Schnittgeschwindigkeit bei armierten Betonstrukturen. Thermische Verfahren sind trotz der Aerosole und Brenndämpfe ebenfalls unabdingbar für den Rückbau von Kernkraftwerken. Das autogene Brennschneiden und das Plasmabrennschneiden sind die Standardwerkzeuge für die thermische Zerlegung. Es existieren allerdings Situationen, in denen nur der Einsatz bestimmter Technologien in Frage kommt. Die größten Neuerungen sind in Bezug auf die Optimierung konventioneller Technologien zu erwarten. Dies kann unter anderem durch den Einsatz hybrider Verfahren erreicht werden. Wie die Befragung ans Licht gebracht hat, ist der Kostenfaktor bei der Wahl der Technologie ausschlaggebend. Erst durch eine Reduzierung der Gesamtkosten können neue Technologien effizient eingesetzt werden.

4.3.2 DEKONTAMINATIONSTECHNOLOGIEN

Ausschlaggebend für die Wahl der Dekontaminationstechnologie sei den Experten zufolge in erster Linie das zu dekontaminierende Material. Unter den Befragten herrschte bei der Einschätzung der Technologien weitestgehend Einigkeit.

Der erste Schritt jedes Rückbauprojekts besteht den Befragten zufolge in der chemischen Primärkreisdekontamination. In diesem Bereich befindet sich der Großteil der Aktivität. Mit der chemischen Primärkreisdekontamination lasse sich die Aktivität um über 90% senken. Die radioaktiven Elemente der chemischen Lösung würden nach dem Dekontaminationsprozess komprimiert, sodass lediglich der hochradioaktive Metallschlamm aufwändig entsorgt werden müsse. Trotz der hohen Entsorgungskosten der hochradioaktiven Abfälle würden durch die starke Dosisreduktion die Gesamtkosten des Rückbaus verringert.

Für nachfolgende Dekontaminationsarbeiten müssten die Technologien entsprechend der Gegebenheiten gewählt werden. Bei einer Technologie herrsche unter den Befragten Einigkeit: Der Einsatz von Abrasivverfahren sei im heutigen Rückbau

unverzichtbar. Es habe sich über die Zeit als sehr effizient und funktional erwiesen. Außerdem sei es im Zuge der Reststoffverarbeitung ein großes Thema und würde in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen. Das Verfahren könne jedoch nur auf bereits zerlegte Teile in Dekontaminationsboxen oder Einhausungen angewendet werden. Der Einsatz von Hochdruckwasserstrahlern sei ebenfalls weit verbreitet. Ihr Einsatzgebiet beschränke sich jedoch auf das Entfernen von Beschichtungen und Farbschichten innerhalb von Einhausungen. Zur Dekontamination von zerlegten Metallteilen eigneten sich auch chemische Bäder. Einem Experten nach findet deren Einsatz insbesondere in dezentralen Bearbeitungszentren statt. Die eingesetzte Phosphorsäure könne auf bis zu 90°C erwärmt werden, sodass die Effizienz des Dekontaminationsprozesses erhöht wird. Aufgrund der erhöhten Verdunstung würde allerdings in der Regel eine Temperatur von rund 65°C gewählt. Der Einsatz elektrochemischer Verfahren sei ebenfalls weit verbreitet. Ihre Relevanz nähme allerdings nach Meinung einiger Experten ab und würde in Zukunft auch weiter abnehmen. Die Dekontamination von Betonstrukturen benötige aggressivere Technologien. Dabei komme es besonders auf die Größe und die Lage der Dekontaminationsflächen an. Die Fräse, insbesondere die Bodenfräse, eigne sich für den großflächigen Einsatz. Sie komme auch häufig bei der Wanddekontamination zum Einsatz. Für einen gröberen Abtrag eigneten sich Stemmwerkzeuge wie Meißel oder Hämmer. Schleifmaschinen würden ebenfalls regelmäßig eingesetzt. Hiermit lassen sich Beschichtungen gut entfernen. Der Einsatz von Schleifwerkzeugen erzeuge allerdings große Mengen an Aerosolen. Somit sei die Errichtung einer Einhausung empfehlenswert. In Bearbeitungszentren würden zudem konventionelle Drehbänke und Metallfräsen zur Dekontamination eingesetzt. Deren Einsatz sei allerdings zeit- und arbeitsintensiv, weshalb der Einsatz chemischer oder elektrochemischer Verfahren bevorzugt würde.

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. Ein vielversprechendes Verfahren sei einem Experten zufolge die Dekontamination mit dem Sponge-Jetting Verfahren. Der Vorteil dieses Verfahrens läge in der Abfallminimierung. Andere neue Verfahren werden von den Experten hingegen skeptisch betrachtet. Demzufolge besitzt das Trockeneisstrahlen trotz der Sublimation der Pellets eine zu hohe kinetische Energie. Beim Aufprall würde die Radioaktivität tiefer ins Material getrieben. Außerdem sei CO₂ ab einer bestimmten Konzentration schädlich. Dieser Faktor müsse bei der Auslegung der Anlage zusätzlich beachtet werden.

Zusammenfassung: Der Rückbau eines Kernkraftwerks benötigt eine große Vielfalt an verschiedenen Dekontaminationstechnologien. Bestimmte Dekontaminationsarbeiten können nur mit bestimmten Verfahren durchgeführt werden. Von Beginn an ist deshalb ein ganzes Portfolio an Technologien notwendig. Einige Technologien sind in der alltäglichen Rückbauarbeit weiter verbreitet als andere. So hat sich den Befragten zufolge das Abrasivstrahlen als besonders effizient und funktional erwiesen. Der Einsatz neuer Technologien ist in Zukunft durchaus möglich. Es ist aber wie bei den Zerlegetechnologien eine Kostenfrage, ob sich eine neue Technologie behaupten werden kann. Der mögliche Dekontaminationserfolg muss im Verhältnis zum Aufwand abgeschätzt werden. Zurzeit ist die Dekontamination mittels Laser eine mögliche Zukunftstechnologie. Der Meinung der Experten zufolge hat die Technologie das Potential, in Zukunft effizient eingesetzt zu werden.

4.3.3 FERNHANTIERTE TECHNOLOGIEN

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen gilt es, die Personendosis zu minimieren. Die Minimierung der radioaktiven Personendosis wird durch das Einhalten des ALARA-Prinzips (As Low As Reasonably Achievable) sichergestellt. Das ALARA-Prinzip folgt drei Grundsätzen.

1. Die Zeit, die eine Person der Strahlung ausgesetzt ist, soll minimiert werden. Gemäß der International Atomic Energy Agency (IAEA) darf die jährliche effektive Dosis einer Arbeitskraft den Grenzwert von 50mSv nicht überschreiten (IAEA, 1999 S. 19). Wird dieser Wert erreicht, darf eine Person nicht mehr im Kontrollbereich¹ der Anlage eingesetzt werden. Dementsprechend wird bei Stilllegungsarbeiten oft mehr Personal eingesetzt, als es beim konventionellen Rückbau nötig ist.

¹ Zum Kontrollbereich gehören die Gebäudestrukturen, die möglicherweise radiologisch belastet sind (E.ON, 2008, S. 10).

2. Die Entfernung zur Strahlenquelle soll möglichst groß sein.
3. Abschirmung der Strahlenquelle

Der Einsatz fernhantierter Systeme verringert die Expositionszeit und erhöht die Entfernung zur Strahlungsquelle. Das erlaubt die Bearbeitung stark aktivierter Teile.

Je nach Automatisierungsgrad kann zwischen ferngesteuerten und vollautomatisierten Geräten (Robotern) unterschieden werden. Laut ISO 8373:1994 ist ein Roboter ein automatisch kontrollierter und programmierbarer Manipulator. Im Rückbau finden vollautomatische Systeme bisher kaum Anwendung. Meist werden fernhantiertere Systeme wie Master-Slave-Manipulatoren oder ferngesteuerte Industrieroboter eingesetzt. Bei der Entwicklung fernhantierter Geräte müssen die vorherrschenden Gegebenheiten berücksichtigt werden. Insbesondere gilt es, eine Kosten-Nutzen-Analyse zu erstellen, um die Vorteilhaftigkeit gegenüber dem personellen Einsatz zu überprüfen. Es ist auch darauf zu achten, dass das Gerät in der Lage ist, das gewünschte Einsatzziel zu erreichen und sich in der dortigen Umgebung bewegen zu können (Michal, 2012, S. 351-353).

Um die Kosten niedrig zu halten, ist es von Vorteil, bei einfacheren Aufgaben schon existierende und in der Industrie mit Erfolg eingesetzte Geräte so zu modifizieren, dass sie den Anforderungen gerecht werden. Die Einsatzgebiete solcher Maschinen werden grob in vier Aufgabenbereiche aufgeteilt (Michal, 2012, S. 354-364):

1. Charakterisierung: Um den radiologischen Zustand in Kraftwerken bestimmen zu können, werden in bestimmten Bereichen ferngesteuerte Messstationen eingesetzt. Diese mobilen Anlagen müssen unter anderem in der Lage sein, Apparate zur Kontaminationsmessung, zur Probenaufnahme und zur Bildaufnahme mit sich zu führen. Dazu eignen sich insbesondere kleine und flexible Geräte, die trotz der schweren Last der Messgeräte überall hinkommen.
2. Abfallbeseitigung: Fernhantiertere Geräte zur Abfall- und Schuttbeseitigung müssen in der Lage sein, diesen aufzunehmen und anschließend aus dem kontaminierten Bereich zu entfernen. Hierzu benötigen sie einen Aufnahmeapparat (z.B. Kran, Greifarm, Saugschlauch bei Flüssigkeiten) und eine Ladefläche oder Tank für den Abtransport der Abfälle. Die Größe und Form der Maschine hängt sehr stark vom abzutragenden Material ab.
3. Dekontamination: Einige Dekontaminationstechnologien erlauben den Einsatz fernhantierter Apparate. Die Form und Art hängt von der einzusetzenden Dekontaminationstechnologie ab. Eine häufig eingesetzte Variante ist die Bedienung mit Hilfe eines Multifunktionsmanipulators.

4. Zerlegung: Bei Abriss- und Zerlegungsarbeiten können ebenfalls fernhantierte und vollautomatische Maschinen eingesetzt werden. Wie bei der Dekontamination hängt die Wahl des ferngesteuerten Apparates stark von der einzusetzenden Zerlegetechnologie ab.

Die Befragten gaben an, dass der Einsatz fernhantierter Systeme zurzeit fast ausschließlich bei der Handhabung stark aktivierter Teile eingesetzt wird. Hierzu gehörten der Reaktordruckbehälter und jene Komponenten, die sich in der unmittelbaren Umgebung des Reaktordruckbehälters befinden. Mit manuellen Methoden ließen sich die Dosisgrenzwerte nicht einhalten. In anderen Bereichen des Rückbaus würden hauptsächlich manuelle Verfahren angewendet. Der Einsatz fernhantierter Systeme sei zu aufwändig. Neben zahlreichen Tests müsse außerdem festgelegt werden, was im Falle einer Störung zu tun sei und wie die Störung ohne den Einsatz von Personal behoben werden könne. All das generiert Kosten. Ein weiteres Problem sei nach Ansicht einiger Experten die Vergabe der Dekontaminationsaufträge. Innerhalb eines Rückbauprojekts würden viele kleinere Teilaufgaben an verschiedene Unternehmen verteilt. Aufgrund der geringen Flächengröße lohne sich der Einsatz fernhantierter Systeme nicht. Um wirtschaftlich zu arbeiten, müssten gleichbleibende Aufgaben auf größeren Flächen zur Verfügung stehen. Hinzu kommt, dass die fernhantierte Bearbeitung häufig gar nicht nötig sei. Die Personendosis ließe sich oftmals durch einfachste Verfahren reduzieren. So könnten beispielsweise Bleimatten oder Abschirmwände zur Dosisreduktion eingesetzt werden. Im Bereich der zentralen Bearbeitungszentren würden ebenfalls kaum fernhantierte Systeme eingesetzt. Ein Grund dafür sei, dass meist manuell nachbearbeitet werden muss. Dieser zusätzliche Aufwand ließe sich durch den direkten Einsatz manueller Verfahren vermeiden.

Den Experten zufolge seien 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 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 Potential. In stark aktivierten Bereichen würden weiterhin fernhantierte Systeme unerlässlich bleiben. Jedoch sei ein Rückgang der klassischen Master-Slave-

Manipulatoren zu beobachten. Diese würden in Zukunft von Standardindustrierobotern substituiert.

Die Automatisierung von Rückbauprozessen lasse sich zurzeit kaum realisieren. Für eine effiziente und wirtschaftliche Automatisierung würden großflächige Abtragsflächen oder große Mengen an geometrisch gleichbleibenden Teilen benötigt. Während eines Rückbauprojektes variierten die Anforderungen ständig. Gleichbleibende Aufgaben seien kaum vorhanden. Es existierten dafür zu viele unbekannte Faktoren. In diesem Punkt sind sich die Befragten weitestgehend einig. Teilautomatisierte Systeme könnten innerhalb eines Rückbauprojektes eingesetzt werden. Diese beschränkten sich dann aber auf andere Bereiche wie die Reststoffbearbeitung. Einige der Befragten können sich allerdings den Einsatz teilautomatisierter Systeme in Zukunft vorstellen. Voraussetzung dafür sei eine flexiblere Anwendung der Systeme. Wenn das realisiert werden kann, wäre der Einsatz solcher Verfahren möglich, wobei die Kosten weiterhin als Hauptentscheidungskriterium herangezogen würden.

Zusammenfassung: Zurzeit werden fernhantierte Systeme lediglich im Bereich des Reaktordruckbehälters eingesetzt. Die hohen Kosten und der zusätzliche Aufwand machen das fernhantierte Arbeiten in schwach radioaktiven Bereichen kaum lohnenswert. In Zukunft besteht die Möglichkeit, dass sich ihr Einsatzbereich hingegen ausweitet. Voraussetzung dafür ist eine Optimierung der Systeme und eine gleichzeitige Kostensenkung solcher Anlagen. In diesen Fragen sind sich die Experten jedoch uneinig. Schließlich ist in den meisten Bereichen des Kontrollbereichs die Personendosis so niedrig, dass die Arbeiten problemlos manuell durchgeführt werden können. Was eine mögliche Automatisierung einzelner Dekontaminations- und Zerlegeprozesse angeht, so ist auch hier eine Diskrepanz zwischen den Expertenaussagen zu beobachten. Das Fehlen geometrisch gleichbleibender Bearbeitungsflächen lässt den Einsatz automatisch gesteuerter Anlagen nicht zu. Der Rückbau kerntechnischer Anlagen ist durch wechselnde Anforderungen charakterisiert. Einige Experten sehen aber durch die Entwicklung flexibler und kostengünstiger Anlagen eine Möglichkeit, Teilprozesse zu automatisieren.

4.3.4 SCHWIERIGKEITEN UND VERBESSERUNGSPOTENTIALE BEIM RÜCKBAU

Den Experten zufolge werden die Dekontaminationsziele in der Regel mit den gängigen Technologien erreicht. In diesem Punkt sind sich die Befragten weitestgehend einig. Die Wahl der einzusetzenden Zerlege- und Dekontaminationstechnologie verlange immer ein Abwägen zwischen den jeweiligen

Vor- und Nachteilen. Hinzu komme der wirtschaftliche Aspekt. Im Vorhinein lasse sich oft kaum sagen, welches Verfahren die beste Lösung für eine Aufgabe ist.

Probleme treten aus Sicht einiger Experten bei der Vergabe von Aufträgen auf. Die Teilaufgaben werden oft an verschiedene Rückbauunternehmen vergeben. Die Gesamtfläche würde dabei in kleinere Teilflächen unterteilt. Bei kleinen Flächen lohne sich der Einsatz moderner Dekontaminationstechnologien kaum. Dasselbe gelte für Zerlegetechnologien. Bei wenigen Aufgaben gleicher Art amortisierten sich die Investitionskosten nicht. Das sei ein großes Hemmnis für den Einsatz neuer Technologien. Die Tatsache, dass die Aufträge aufgeteilt werden, erschwere zudem die Planbarkeit des Gesamtprojektes. In Zukunft müssten die Aufträge großteiliger ausgeschrieben werden. Es sei allerdings ein Trend bei der Vergabe der Aufgaben zu beobachten. Aufgaben, die thematisch zusammen gehören, würden bereits des Öfteren gebündelt und als ein großes Projekt vergeben. Die Kooperation zwischen verschiedenen Rückbauunternehmen fände auch immer häufiger statt. Jedes Unternehmen habe seine Kernkompetenzen. Die Bündelung des Wissens führe zu Synergieeffekten und kurbele auch den Wettbewerb an. Ein weiteres Hindernis für neue Technologien sei laut eines Befragten der künftige Atomausstieg der Bundesrepublik. Die Entwicklung und Anschaffung neuer Technologien sei kostenintensiv. Bis zur Einsatzreife neuer Technologien könne viel Zeit vergehen. Die Tatsache, dass 2022 das letzte Kernkraftwerk abgeschaltet wird, hemme so die Investitionsfreudigkeit von Unternehmen. Neben den Hemmnissen für neue Technologien fehle es auch an Anreizen, den Rückbau eines Kernkraftwerks schnell zu gestalten. Ein Grund dafür sei einem Experten zufolge die Einstellung der verschiedenen Interessengruppen. So profitierten beispielsweise Gutachter und Behörden von längeren Rückbauzeiten. Zudem wurde in der Befragung erwähnt, dass in den Betreiberunternehmen oft ineffizient und unwirtschaftlich gearbeitet wird. Durch die Vergabe von Aufträgen an billige Anbieter fehle es beim Rückbau oft am nötigen Know-How. Das führe letztendlich zu einer Steigerung der Kosten und der Rückbauzeit.

In der Befragung wurden einige Punkte genannt, die es in Zukunft zu verbessern gilt. So wurde in einem Gespräch der Faktor Geschwindigkeit erwähnt. Es gelte das Kraftwerksgebäude so schnell wie möglich aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes zu entlassen. Es existierten zwei Möglichkeiten, um das zu realisieren. Zum einen sieht der Befragte die Möglichkeit, durch eine effizientere Organisation die Rückbaugeschwindigkeit zu erhöhen. So ließen sich beispielsweise einige Prozesse parallel durchführen. Zum anderen seien die Arbeitsgeschwindigkeit und die

Zuverlässigkeit der eingesetzten Technologien beschränkende Faktoren. Soll der Rückbau beschleunigt werden, so könne das durch schnellere Technologien erreicht werden. In dieser Hinsicht sei in Zukunft noch Potential vorhanden. Die Optimierung der vorhandenen Technologien sollte in Zukunft weiter vorangetrieben werden. Zudem wird eine stärkere Vereinheitlichung eingesetzter Standards als vorteilhaft für den Rückbauprozess angesehen.

Zusammenfassung: Mit den heute eingesetzten Technologien können die vom Strahlenschutz vorgegebenen Anforderungen erfüllt werden. Dennoch gab die Mehrheit der Befragten an, dass eine Optimierung der existierenden Technologien von Vorteil wäre. Die Effizienzsteigerung der vorhandenen Technologien und deren Anwendung sollten in Zukunft im Fokus der Forschung stehen. Aber auch die Planung und Durchführung des Rückbaus bergen Probleme. Solange die Rückbauaufgaben kleinteilig ausgeschrieben werden, wird sich der Einsatz neuer Technologien nicht lohnen. Hinzu kommt die erschwerte Planung des Gesamtprojektes. Zusammen mit dem fehlenden Anreiz, den Rückbau zügig zu beenden, sind das die größten Hindernisse, die es in den Augen der Experten zu beseitigen gilt.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden zunächst die Ergebnisse einer Literaturrecherche bzgl. eingesetzter Technologien zur Dekontamination und zum Zerlegen in kerntechnischen Anlagen aufgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass jeweils vielfältige Verfahren sowohl zum Zerlegen und zur Dekontamination existieren. Darüber hinaus wurden fachkundige Experten zu den Entwicklungen im Bereich der Rückbautechnologien befragt.

Die Ergebnisse der Expertenbefragung zeigen, dass die Wahl der Zerlegetechnologie stark vom Ort abhängig ist, in dem die Zerlegearbeit stattfindet. So werden im Kontrollbereich bevorzugt mechanische Verfahren eingesetzt, da diese keine Aerosole generieren. Die Bandsäge ist wegen ihrer hohen Funktionalität besonders weit verbreitet. In den Bearbeitungszentren finden ebenfalls thermische Zerlegeverfahren Anwendung, wobei Plasmaschneider und autogene Brennschneider standardmäßig eingesetzt werden. Die eingesetzten Technologien sind ausgereift, sodass die Entwicklung neuer Trennverfahren den Experten zufolge nicht nötig ist. Die konventionellen Verfahren sind kostengünstig und nicht aufwändig. Das sind zwei wichtige Voraussetzungen für den industriellen Einsatz. Was die Dekontaminationstechnologien angeht, so konnte anhand der Umfrage festgestellt werden, dass das eingesetzte Verfahren von der Lage der Kontamination abhängig ist. Während die chemische Primärkreisdekontamination eine Standardprozedur im Rückbau ist, kommen bei der Dekontamination anderer Metallteile verschiedene abrasive Strahlverfahren zum Einsatz. Diese sind laut der Experten für den Rückbau unentbehrlich. Für Betonstrukturen sind mechanische Verfahren wie das Fräsen erfolgsversprechend. In Bezug auf die Entwicklung und den Einsatz neuer Technologien sehen die Experten Potential. Dies betrifft etwa die Dekontamination mittels Laser. Ob sie sich auch erfolgreich durchsetzen kann, wird letztendlich eine Kostenfrage sein. Die Expertenbefragung konnte bezüglich der Entwicklung im Bereich der fernhantierten Systeme keine eindeutige Meinung identifizieren. Eine knappe Mehrheit war der Meinung, dass die Menge an fernhantierten Arbeiten in Zukunft nicht zunehmen wird. Andere waren allerdings der Meinung, dass es künftig eine stärkere Einbeziehung der Robotertechnologie geben wird. Eine Automatisierung wird von allen als unwahrscheinlich angesehen.

Die dargestellten Ergebnisse rechtfertigen die Aussage, dass der gesamte Rückbau mit den zur Verfügung stehenden Technologien problemlos durchgeführt werden kann.

Das bedeutet allerdings nicht, dass der Rückbauprozess auch mit maximaler Effizienz durchgeführt wird. Weitere Optimierungen im Bereich der Dekontaminations- und Zerlegetechnologien können in Zukunft die Effizienz steigern und die Mengen an radiologisch belasteten Abfällen weiter minimieren. Es scheint allerdings als unwahrscheinlich, dass sich im Rückbau künftig neue Technologien durchsetzen werden. Laut der Befragung existiert noch eine weitere Möglichkeit zur Effizienzsteigerung. Diese liegt im Bereich der Organisation und des Managements. Um diesen Aspekt tiefer zu ergründen bedarf es allerdings weiterer Untersuchungen.

Anhang 1

	Reaktorkomponente	Technologie erster Wahl	Technologie zweiter Wahl
Trocken	RDB (stark aktiviert)	Bandsäge	Autogener Brennschneider
	Reaktorgrube, Zylinderring (schwach aktiviert)	Bandsäge	Plasmaschneider
	Steuerstäbe (schwach aktiviert)	Bandsäge	Plasmaschneider
Nass	Reaktorgrube, Zylinderring (stark aktiviert)	Bandsäge	Plasmaschneider
	Reaktorgrube, Boden (stark aktiviert):		
	• Obere Bodenplatte	CAMC	Nicht geplant
	• Untere Bodenplatte	Plasmaschneider	CAMC
	• Rohre	Plasmawinkelschneider	Bügelsäge/ CAMC
	• Kleine Rohre	CAMC/ Plasmaschneider	Scherwerkzeuge
	Kassettenkorb (stark aktiviert):		
	• Untere Platte	CAMC	Nicht geplant
• Zylinderring	Bandsäge	Plasmaschneider	
Ringförmiger Wassertank (aktiviert)	Drahtsäge	Nicht geplant	
RDB Isolierung (nicht aktiviert)	Winkelschleifer	Scherwerkzeuge	
RDB Stützen			
• Kühlstützen	Fräse	Nicht geplant	
• Messstützen	Bandsäge	Fräse	

Tabelle 1: Bevorzugte Zerlegetechnologien für verschiedene Bauteile (Borchardt, 2003)

Anhang 2

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Fernhantierter Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Flüssig-chemische Verfahren (Multi-Step, weich)	CORD (Chemical Oxidizing Reducing Decontamination)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Dekontamination in 3 Schritten • Primärkreislauf-Dekontamination • Organische Säuren werden im Anschluss durch UV-Licht zu CO₂ und Wasser zersetzt • Typische Prozesstemperatur: ca. 95°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfahren ist weit verbreitet • Große Palette an verschiedenen CORD-Varianten • Hohe Materialkompatibilität • Hohe Effizienz • Relativ geringe Abfallmengen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineffektiv bei porösen Oberflächen • Erhöhte interkristalline Korrosion bei einigen Materialien nach CORD-Anwendung 	(Noynaert, 2012) (IAEA, 1999, S. 41-42) (Kinnunen, 2008, S. 16-22)
	LOMI (Low Oxidation State Metal Ion)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Primärkreislauf-Dekontamination • Wird insbesondere bei Baustählen und rostfreien Stählen eingesetzt • Insbesondere für Chromfreie Stähle • Entwickelt in Großbritannien • Prozesstemperatur: 80-90°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Besonders für SWR geeignet • Hohe Effizienz bei Fe₃O₄ Oberflächen 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz ist wegen der geringen Aggressivität des Verfahrens beschränkt • Relativ große Menge an Sekundärabfall • Ineffektiv bei porösen Oberflächen 	(Noynaert, 2012, S. 325-326) (IAEA, 1999, S. 41-42) (Kinnunen, 2008, S. 16-22)
	CANDEREM (Canadian Decontamination and Remediation Process)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Oxalsäure-freie Variante von LOMI mit besserer Materialverträglichkeit • Typische Prozesstemperatur: 85-125°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine erhöhte Korrosion der Systemkomponenten nach der CANDEREM-Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> • DF ist wegen der geringen Aggressivität des Verfahrens beschränkt • Ineffektiv bei porösen Oberflächen 	(Noynaert, 2012, S. 325-326) (IAEA, 1999, S. 41-42) (Kinnunen, 2008, S. 16-22)

Flüssig-chemische Verfahren (Single-Step, hart)	REDOX (Reducing Oxidation)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Dekontamination findet durch das Eintauchen des Bauteils in ein Bad statt • Löst die Kontamination durch Zersetzen der Oberfläche • Prozesstemperatur: 60-80°C • Elektrochemische Regenerierung des Reaktionsmittels 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Effizienz • Geringe Mengen an sekundärem Abfall • Einsetzbar bei geometrisch-komplexen Bauteilen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstört die Oberfläche des Metalls 	(Fujita et al., 1988) (Europäische Kommission, 2009, S. 17)
	MEDOC (Metal Decontaminat ion by Oxidation with Cerium)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Regeneration der Cerium-Lösung mittels Ozon-Gas auf Dekon-Temperatur • Einsatz bei der Dekontamination von segmentierten Teilen aus rostfreiem Stahl • Kann auch bei der Dekontamination des Primärkreislaufs eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Durch die Regenerierung entsteht eine geringe Menge an Abfällen • Steigerung der Aggressivität durch erhöhte Prozesstemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstört die Oberfläche des Metalls 	(Europäische Kommission, 2009, S. 17)
	HNO₃/ HF	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Insbesondere zum Ätzen rostfreier Stähle • Entfernt Oxyd-Schichten durch Reduktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Einsatz durch Pulverisierung der Lösung ist wegen geringerer Sicherheitsbedenken und Abwasservolumina besonders vorteilhaft 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstört die Oberfläche des Metalls 	(Europäische Kommission, 2009, S. 18) (Noynaert, 2012, S. 326)
Elektrochemische Verfahren	mit Phosphor- säure	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz nur bei leitenden Metallen • Insbesondere bei Bau- & rostfreien Stählen • Effizienz sinkt ab einer bestimmten Eisenkonzentration im Elektrolyt • Hohe Effizienz • Benötigt zusätzliche Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller Dekon-Prozess (ca. 2h) • Geringe Menge an Sekundärabfall • Hohe Zuverlässigkeit & Effizienz • Stabiles und sicheres Elektrolyt • Einsetzbar bei verschiedenen Legierungen 	<ul style="list-style-type: none"> • H₂ entweicht, Explosionsgefahr • Einsatz beschränkt durch Größe und Geometrie der Komponenten • Beschichtungen müssen zuvor entfernt werden • Oxidschichten behindern den Prozess 	(Noynaert, 2012, S. 329-332) (Europäische Kommission, 2009, S. 20-23) (Boing, 2006, S. 27-32)

	mit Salpetersäure	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz nur bei leitenden Metallen • Insbesondere bei rostfreien Stählen • Effizienz sinkt ab einer bestimmten Eisenkonzentration im Elektrolyt • Hohe Effizienz • Benötigt zusätzliche Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller Dekon-Prozess (ca. 2h) • Geringe Menge an Sekundärabfall • Hohe Zuverlässigkeit & Effizienz • Hohe Penetrationsfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung beschränkt durch Größe und Geometrie der Komponenten • Beschichtungen müssen zuvor entfernt worden sein • Oxidschichten behindern den Prozess 	<p>(Noynaert, 2012, S. 329-332)</p> <p>(Europäische Kommission, 2009, S. 20-23)</p> <p>(Boing, 2006, S. 27-32)</p>
Sonstige	Dekon-Schaum	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz steigt mit der Kontaktzeit • In-Situ Anwendung zur Beseitigung von loser Oberflächenkontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz ist unabhängig von der Ausrichtung der Fläche (z.B. Decken & Wände) • Effektiv bei großen Komponenten mit komplexer Geometrie • Geringe Abfallmengen • Schlichte und günstige Anlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Effizienz bei einmaligem Einsatz • Ungeeignet bei rissiger Oberfläche 	<p>(Europäische Kommission, 2009, S. 23-24)</p> <p>(IAEA, 1999, S. 43)</p> <p>(Noynaert, 2012, S. 337)</p>
	Dekon-Gel	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Effektiv bei Beta/Gamma-Strahlern • Erfolgreicher Einsatz bei ferritischen Rohrleitungen mit einfacher Geometrie • In-Situ Anwendung zur Beseitigung von loser Oberflächenkontamination • Hohe Effizienz 	<ul style="list-style-type: none"> • Effektiv bei langer Kontaktzeit • Generiert geringe Mengen an sekundären Abfällen • Effektiv beim Entfernen großflächiger loser Kontaminationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Effizienz bei einmaligem Einsatz • Komponenten benötigen anschließend weitere Nachbehandlungen 	<p>(Europäische Kommission, 2009, S. 24)</p> <p>(IAEA, 1999, S. 44)</p> <p>(Noynaert, 2012, S. 337)</p>
	Dekon-Pasten	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Insbesondere bei rostfreien Stählen • Abrasivmittelhaltige Paste, die Beschichtungen entfernen kann 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ geringe Abfallmengen 		<p>(Europäische Kommission, 2009, S. 25)</p> <p>(IAEA, 1999, S. 44)</p> <p>(Noynaert, 2012, S. 337)</p>
	Abziehbare Folie	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Beste Ergebnisse bei nichtporösen Oberflächen • Kontaktzeit: 4-12h (bei Bedarf bis zu einigen Tagen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine flüssigen Abfallprodukte • Kapselt und bindet lose Kontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächen müssen zugänglich sein • Manuelles Entfernen der ausgehärteten Beschichtung 	<p>(Europäische Kommission, 2009, S. 30-31)</p> <p>(IAEA, 1999, S. 46-48)</p>

Tabelle 2: Eigenschaften verbreiteter chemischer Dekontaminationsverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Fernhantierter Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Undefinierter Schneidwinkel	Wischen Schrubben	Metall, Beton	Nein	<ul style="list-style-type: none"> Einfachste Form der Dekontamination Kann mit Reinigungsmittel eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> Günstig und einfach einzusetzen 	<ul style="list-style-type: none"> Entfernt lediglich Stäube und Aerosole Hoher personeller Aufwand 	(IAEA, 2001, S. 92-93)
	Schleifen Polieren Bürsten	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugt feine Aerosole 	<ul style="list-style-type: none"> Es existiert eine große Auswahl an konventionellen Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> Wegen feiner Aerosole sind besondere Sicherheitsbestimmungen notwendig Geringe Effizienz 	(Noynaert, 2012, S. 336)
Definierter Schneidwinkel	Betonfräsen	Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Die oberen Millimeter des Materials werden abgetragen Geeignet für weiträumige Flächen Durch Staubaufnahmesysteme lässt sich die Staubgenerierung verringern 	<ul style="list-style-type: none"> Können Bolzen und andere Metallobjekte durchtrennen Hohe Dekon-Geschwindigkeit Geringe Abfallerzeugung, keine Sekundärabfälle Arbeitet vibrationsfrei, eignet sich gut für den fernhantierten Einsatz Kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> Bei kleinen Räumen mit ungleichmäßigen Formen nicht geeignet Erzeugt feine Staubpartikel Hohe Personendosis möglich Der Aufbau der Ausrüstung ist zeitintensiv 	(Europäische Kommission, 2009, S. 34-35) (Noynaert, 2012, S. 340) (NEA, 1999, S. 32-33) (IAEA, 2001, S. 92-93)
	Hämmern	Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Arbeitsgeschwindigkeit ist abhängig von der Betonart, etc. Es existieren verschiedene Werkzeuge Einsatz bei beschränkten Räumlichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Für den Abtrag dünner Betonschichten (bis 25mm) Geeignet für spröde Materialien Ausgereifte Technologie Effektiv zur Dekontamination von Böden Keine Sekundärabfälle 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe körperliche Belastung Hohe Geräuschkulisse Geringe Abtragsleistung Absaugvorrichtung notwendig 	(NEA, 1999, S. 31-32) (Noynaert, 2012, S. 338-339) (Europäische Kommission, 2009, S. 34)
	Nadeln	Beton	Nein	<ul style="list-style-type: none"> Nadelpistole wird von Hand geführt Besonders leichte Geräte 	<ul style="list-style-type: none"> Für die Bearbeitung unterschiedlicher Oberflächenformen (Ecken, Kanten, Vertiefungen) Geeignet für den Einsatz bei beengten Platzbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Abtragsgeschwindigkeit 	(Gentes et al., 2015, S. 48)
	Hydraulik- & Pressluft-hammer	Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz für tiefere Kontaminationen (bis zu einigen 10cm) Arbeitsgeschwindigkeit ist abhängig von der Betonart, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Entfernt tiefe Kontaminationen Sehr effizient Schutt einfach einzusammeln Ausgereifte Technologie, vielen Anbietern Relativ günstig 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Stauberzeugung Ungeeignet für große Flächen Hohe Personendosis möglich 	(NEA, 2011, S. 31-33) (Noynaert, 2012, S. 340-341) (IAEA, 2001, S. 92-93)

Aufprall-wirkung	Hochdruck Wasser-Strahlen	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung durch Additive und Erhöhung der Temperaturen • Unterscheidung zwischen Low-Pressure (> 15MPa), Medium-pressure (15MPa bis 70MPa) und High-pressure Jetting (< 70MPa) 	<ul style="list-style-type: none"> • Low-pressure Jetting zur Vordekontamination • Medium-pressure Jetting zur Reduzierung der Strahlendosis • High-pressure Jetting zur vollständigen Dekontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Während des Vorgangs entstehen kontaminierte Aerosole und Hydrossole • Hoher Wasserverbrauch, wenn das Abwasser nicht recycelt und gefiltert wird 	(Noynaert, 2012, S. 334) (Europäische Kommission, 2009, S. 27-28 & 55) (NEA, 2011, S. 23)
	Abrasive-strahlen (trocken)	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiedene Strahlmittel mit unterschiedlichen Eigenschaften • Recyceln des Strahlmittels minimiert die sekundäre Abfallmenge • Etwas effizienter als nasse Verfahren • Einsatz meist in Einhausung 	<ul style="list-style-type: none"> • Es lassen sich schwer erreichbare Flächen dekontaminieren • Am effektivsten auf flachen Oberflächen • Ausgereifte Technologie • Stahlgranulat ist sehr effizient bei der Entfernung von dünnen Betonschichten 	<ul style="list-style-type: none"> • Es besteht die Gefahr, die Kontamination tiefer ins Material einzubringen • Fett- und Ölschichten müssen zuvor entfernt werden • Es müssen Maßnahmen zur Staubbeseitigung ergriffen werden • Erzeugt große Abfallmengen 	(NEA, 1999, S. 23-26) (Europäische Kommission, 2009, S. 28-30) (Gentes et al., 2015, S. 49-50) (Noynaert, 2012, S. 334-336) (NEA, 2011, S. 18-19)
	Abrasive-strahlen (nass)	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernt sowohl abwaschbare als auch feste Kontaminationen • Verschiedene Strahlmittel mit unterschiedlichen Eigenschaften • Recyceln des Strahlmittels minimiert die Menge an Sekundärabfällen • Einsatz meist in Einhausung 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwer erreichbare Flächen lassen sich Dekontaminieren • Ausgereifte Technologie • Keine Gefahr der luftübertragenen Kontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Es besteht die Gefahr, die Kontamination tiefer ins Material einzubringen • Es müssen Maßnahmen zur Abwasserbehandlung ergriffen werden • Erzeugt große Abfallmengen 	(NEA, 1999, S. 23-26) (Europäische Kommission, 2009, S. 28-30) (Gentes et al., 2015, S. 49-50) (Noynaert, 2012, S. 334-336)
Sonstige	Sponge-Jetting	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Mit Abrasivmittel imprägnierte Urethan-Schwämme • Scheuereffekt • Einsatz bei schwachkontaminierten Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Menge an Stäuben und Aerosolen • Geringe Abfallmengen • Schwämme können unkompliziert recycelt werden • Entfernt auch Beschichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Effizienz 	(IAEA, 1999, S. 48)
	Freon-Jetting	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Findet in der Regel in einer Glovebox statt • Strahl wird mit 15MPa projiziert • Wegen der niedrigen Viskosität und Oberflächenspannung dringt die Lösung in kleine Risse ein 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Dekon-Mittel dringt tief in Spalten und Risse ein • Das Freon-Mittel lässt sich durch nachgeschaltetes Filtern recyceln 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Einsatz von Freon-Jetting ist wegen der rechtlichen Auflagen limitiert • Das Dekon-Mittel ist umwelt- und gesundheitsschädlich 	

	Ultraschall-Bad	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz bei loser Kontamination • Wird oft zur Folgebehandlung von chemisch dekontaminierten Komponenten eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Synergie-Effekt mit chemischer Dekontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Ungeeignete für starke Kontaminationen • Geringe Effizienz 	<p>(Noynaert, 2012, S. 332-333)</p> <p>(Europäische Kommission, 2009, S. 26)</p> <p>(IAEA, 1999, S. 56)</p>
--	------------------------	--------	------	--	--	---	---

Tabelle 3: Eigenschaften verbreiteter mechanischer Dekontaminationsverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Fernhand- lierter Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Hybride Verfahren (Strahlverfahren)	Eis-Strahlen	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Ähnlich dem CO₂-Strahlen • Geeignet für lose Oberflächen-dekontaminationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher als Trockeneisstrahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schmelzwasser nimmt die Kontamination auf und muss als Sekundärabfall entsorgt werden 	(Europäische Kommission, 2009, S. 26)
	Trockeneis-Strahlen	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz bei leicht kontaminierten Komponenten • Dekontamination durch Sublimationsschock der CO₂-Pellets • Einsatz in abgeschirmter Kabine 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel einsetzbar • Nicht abrasiv • Keine Strahlmittelrückstände 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht für harte Materialien geeignet 	(Noynaert, 2012, S. 333) (Europäische Kommission, 2009, S. 26) (NEA, 2011, S.23)
	Trockeneis-Laserstrahlen	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der thermischen Belastung durch Laser 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Abfallvolumens • Keine Rückkontamination • Höhere Abtragleistung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Investitionskosten 	
Rein thermische Verfahren (Laser)	Laser-Dekontamination	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz mittels Manipulator • Oberfläche wird geschmolzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Sekundärabfälle • Hohe Genauigkeit • Einfach zu automatisieren • Arbeitet berührungslos und staubfrei 	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Technologie • Wenige Erfahrungswerte 	(IAEA, 1999, S. 57) (Anthofer et al., 2013, S. 2-9)
	Laser-Ablation	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Oberfläche platzt ab • Laser mit geringer Energiedichte • Gut geeignet bei der Entfernung von Beschichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gezielter Abtrag dünner Verunreinigungen 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Entwicklung 	(O'Sullivan et al, 2010, S. 28)
Sonstige	Ein-schmelzen	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Radionuklide werden über Dämpfe und Schlacke ausgestoßen • Andere Radionuklide (Co-60) werden gleichmäßig über das gesamte Volumen verteilt 	<ul style="list-style-type: none"> • Metallbarren können nach kurzer Abklingzeit recycelt werden • Geometrie und Größe der Komponenten spielen keine Rolle • Große Volumenreduktion • Kommerzielle Anwendung 		(NEA, 1999, S. 26-28) (Europäische Kommission, 2009, S. 31-32)

Tabelle 4: Eigenschaften verbreiteter thermischer Dekontaminationsverfahren

Anhang 3

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Umfeld, in dem Technologie anwendbar	Fernhand- tierter Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Mit definiertem Schneidwinkel	Bandsäge	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe wird durch die Länge des Sägeblattes begrenzt Bei stark kontaminierten Teilen wird trocken gesägt 	<ul style="list-style-type: none"> Sandwich- und komplexe Strukturen gut schneidbar Keine Aerosolbildung Steuerung aus der Distanz möglich Sehr zuverlässig 	<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Schnittführung Geringe Schneidgeschwindigkeit Hoher Anteil an Sekundärabfall (Sägeblätter) Benötigen in manchen Fällen viel Platz 	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34)
	Scher- maschine	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Werden vornehmlich zur Zerlegung von Stäben, Rohren und Blechen eingesetzt Keine Aerosolbildung 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Rückstellkräfte Es entstehen keine Späne oder Stäube 	<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Anwendung 	(Kaulard et al., 2010, S. 35)
	Fräsen	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schneidtiefe ist beschränkt durch die Dimensionen der Frässcheibe 	<ul style="list-style-type: none"> Präzise Schnittkante Flexible Schnittfugen möglich Keine Aerosolbildung Steuerung aus der Distanz möglich Große Späne, die gut handhabbar sind Universell einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> Kühlung notwendig Mittlere Schneidgeschwindigkeit Hohe Rückstellkräfte welche mit entsprechenden Konstruktionen aufgefangen werden müssen Auf Funkenflug ist zu achten 	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34)
	Kreissäge	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe ist abhängig vom Scheibendurchmesser 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Vibration Präzise und glatte Schnitte 	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe ist beschränkt Erzeugt Staub/Schlamm als Abfall 	(Kaulard et al., 2010, S. 34)

Ohne definiertem Schneidwinkel	Diamant-seilsäge	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz meist nass • Bei stark kontaminierten Teilen wird trocken gesägt 	<ul style="list-style-type: none"> • Sandwich- und komplexe Strukturen gut schneidbar • Steuerung aus der Distanz möglich • Geeignet für besonders große Strukturen • Wartungs- und Reparaturzeiten sind relativ kurz 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingeschränkte Schnittführung • Aufwendige Seilführung • Sehr geringe Schneidgeschwindigkeit • Hohe Kosten für Diamantseile • Erzeugt Staub/Schlamm als Abfall 	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34)
	Trennschleifer	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Universell einsetzbar bei geringeren Wanddicken • Wird praktisch in allen Rückbauprojekten eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Präzise Schnittführung • Großes Angebot an konventionellen Werkzeugen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Temperaturen und Funkenflug, sodass Schnittflächen nachbehandelt werden müssen • 200-mal mehr Stäube und Aerosole als beim Sägen • Hohe Rückstellkräfte und Schwingungen, die bei Fernhandlung aufgefangen werden müssen 	(Kaulard et al., 2010, S. 35)
Abrasive Verfahren	Wasser-Abrasive-Injektionsstrahlen (WAIS)	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiedene Abrasivmittel mit verschiedenen Eigenschaften • Durch Recyceln des Strahlmittels lässt sich die Menge an Sekundärabfällen verringern • Trennstrahl besteht aus Luft, Wasser und Strahlmittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr kompakter Schneidkopf • Kleine Schnittfuge • Schneiden komplexer Geometrien möglich • Keine Aerosolbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr geringe Schneidgeschwindigkeit • Hoher Anteil an Sekundärabfällen 	(Bienia, 2015) (Europäische Kommission, 2009, S. 50-54)
	Wasser-Abrasive-Suspensionsstrahlen (WASS)	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiedene Abrasivmittel mit verschiedenen Eigenschaften • Durch Recyceln des Strahlmittels lässt sich die Menge an Sekundärabfällen verringern • Trennstrahl besteht aus Wasser und Strahlmittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Platzbedarf • Kleine Schnittfuge erzeugt geringen Abfallmengen • Schneiden komplexer Geometrien möglich • Geringe Rückstellkräfte • Höhere Effizienz als WAIS • Keine Aerosolbildung • Größere Schnitttiefe als WAIS 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr geringe Schneidgeschwindigkeit • Hoher Anteil an Sekundärabfällen 	(Bienia, 2015) (Europäische Kommission, 2009, S. 50-54)

Tabelle 5: Eigenschaften verbreiteter mechanischer Zerlegeverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Umfeld, in dem die Technologie anwendbar	Fernhand- tierter Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Mit chemischer Energiequelle	Autogenes Brennschneiden	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Keine Rückstellkräfte Material wird verbrannt Insbesondere für große Wandstärken (>30mm) 	<ul style="list-style-type: none"> Einfach zu handhaben Keine Vibrationen Geringer Energieverbrauch Steuerung aus der Distanz möglich Hohe Schnittgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Für hochlegierte Metalle nicht geeignet Langsam beim Schneiden von Beton Erzeugt viele Aerosole und Brenngase Sandwich- und Komplexe Konturen schwer schneidbar 	(IAEA, 2001, S. 96-100) (Gentes et al., 2015, S. 61-62) (Noynaert, 2012, S. 294-296) (Bienia, 2015)
	Pulver-Brennschneiden	Metall, Beton	Luft	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Effizienzsteigerung des autogenen Brennschneidens durch Zugabe von Metallpulver 	<ul style="list-style-type: none"> Bei sehr vielen Materialien einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugt viele Aerosole und Sekundärabfälle Benötigt aufwendiges Filtersystem Wird beim Rückbau selten eingesetzt 	(Noynaert, 2012, S. 296-297) (Gentes et al., 2015, S. 62) (Europäische Kommission, 2009, S. 40)
	Sauerstoff-Lanze	Metall, Beton	Luft, Wasser	Nein	<ul style="list-style-type: none"> Schlacke wird durch Handbewegungen und Sauerstoff aus der Fuge entfernt 	<ul style="list-style-type: none"> Geringer Verschleiß Hohe Prozesssicherheit Hiermit lassen sich alle gängigen Materialien zerlegen Ausgereifte Technologie 	<ul style="list-style-type: none"> Lediglich zum Bohren von Löchern Beim Rückbau sind die Einsatzmöglichkeiten begrenzt Erzeugt starke Verschmutzung 	(Noynaert, 2012, S. 297) (Europäische Kommission, 2009, S. 40-41)

Mit elektrischer Energiequelle	Plasma-schneiden	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz bei Edelstählen Schlacke wird durch das Plasmagas aus der Fuge geblasen Unter Wasser sinkt die Schneidleistung mit zunehmender Tiefe 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Schnittgeschwindigkeit (bis zu 500mm/min) und-qualität Geringer Verschleiß Hohe Prozesssicherheit Geringe Prozesskosten Steuerung aus der Distanz möglich Wird auch beim Bohren von Löchern eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> Ist nur in der Lage, elektrisch leitende Werkstücke zu zerlegen Sandwich- und Komplexe Konturen sind schwer schneidbar Erzeugt große Mengen an Aerosolen(bzw. Hydrosolen) 	(Europäische Kommission, 2009, S. 41) (Gentes et al., 2015, S. 64-66) (Bienia, 2015)
	Funken-erosion	Metall	Dielektrikum	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Wird nur eingesetzt, wenn eine hohe Präzision gefragt ist Der Trennprozess ist stark von der Qualität des Dielektrikums abhängig Grundlagentechnologie der CAMX-Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> Die Geometrie der Elektrode kann jede Form annehmen 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Prozessgeschwindigkeit 	(Thierfeldt und Schartmann, 2009)
	CAMC (Contact Arc Metal Cutting)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Zerlegt alle elektrisch leitfähigen Materialien Schlacke wird durch eine Wasserdüse aus der Fuge entfernt Elektrode wird verbraucht Schneidgeschwindigkeit: 1500mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Einschränkung hinsichtlich der Werkstückgeometrie Keine Rückstellkräfte Große Wandstärken schneidbar 	<ul style="list-style-type: none"> In der Entwicklung Erzeugt viele Hydrosol Einsatz nur unter Wasser 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44) (Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 32-33)
	CAMG (Contact Arc Metal Grinding)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Zerlegt alle elektrisch leitfähigen Materialien Elektrode wird nicht verbraucht Schneidgeschwindigkeit: 4000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Extrem hohe Schnittgeschwindigkeit Keine Einschränkung hinsichtlich der Werkstückgeometrie Keine Rückstellkräfte Scheibendurchmesser limitiert Schnitttiefe 	<ul style="list-style-type: none"> In der Entwicklung 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44) (Kaulard et al., 2010, S. 32-33)
	CAMD (Contact Arc Metal Drilling)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Bohrt Löcher in alle elektrisch leitfähigen Materialien Elektrode wird verbraucht Schneidgeschwindigkeit: 1000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Rückstellkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> In der Entwicklung 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44) (Kaulard et al., 2010, S. 32-33)

	Lichtbogen-Wasserstrahlschneiden	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrode wird verbraucht • Schlacke wird durch Wasserstrahl entfernt • Für das Zerlegen von Werkstücken mittlerer Dicke • Schneidgeschwindigkeit: 2700mm/min (bei 2400A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Rückstellkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerätegewicht wegen der mitgeführten Drahtrolle relativ hoch 	(Kaulard et al., 2010, S. 32-33) (Europäische Kommission, 2009, S. 42)
	Lichtbogen-Sauerstoffschneiden	Metall	Luft, Wasser	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Handgeführter Einsatz bei kleineren Aufgaben • Schlacke wird mittels Sauerstoff ausgeblasen • Einsatz meist unter Wasser • Elektrode wird verbraucht • Schneidgeschwindigkeit: 100-500mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Vielseitig einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung im Rückbau ist zurzeit beschränkt • Geringe Präzision 	(Kaulard et al., 2010, S. 32-33) (Europäische Kommission, 2009, S. 42)
Laserstrahlschneiden	Laserstrahlschmelzschnneiden	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Schlacke wird durch ein Inertgas (z.B. Stickstoff oder Argon) aus der Fuge getrieben 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Oxidation an der Schnittkante 	<ul style="list-style-type: none"> • Es bilden sich Schnittriefen • Schneidprozess ist vom Gasstrom abhängig • Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)
	Laserstrahlbrennschnneiden	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Als Schneidgas wird Sauerstoff eingesetzt, welches mit dem Material exotherm reagiert 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Schneiden größerer Blechdicken ist möglich • Hohe Schnittgeschwindigkeit möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidation an den Schnittkanten (kann bei anschließendem Schweißen zu Schwierigkeiten führen) • Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)
	Laserstrahlsublimationschnneiden	Kunststoff, organische Materialien	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Schutzgas sorgt dafür, dass der Werkstoff nicht verbrennt 	<ul style="list-style-type: none"> • Glatte Schnittkanten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Laserintensität erforderlich • Geringe Schnittgeschwindigkeit • Wird selten bei Metallen eingesetzt • Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)

Tabelle 6: Eigenschaften verbreiteter thermischer Zerlegeverfahren

Literaturverzeichnis

Anthofer, A.; Lippmann, W.; Peise, O.; Voss, S.; Trimis, D.; Hurtado, A. (2013): Lasertechnologie zur Entfernung radioaktiver und chemisch-toxischer Kontaminationen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. Proceedings Kontec 13.-15.03.2013.

Bach, Fr.-W.; Brüggemann, P. (2007): Laserunterstütztes Trockeneisstrahlen Grundlagen, Anwendungen, Leistungspotenzial. Online im Internet: URL <http://www.strahlverfahren.de/content/dam/strahlverfahren/de/documents/04_Brueggemann_IWHannoverlaser Trockeneistcm885-60339.pdf> (Stand: November 2007, Abfrage am: 12.12.2016).

Bienia, Harald (2015): Rückbautechniken im Einsatz – Vergleich von thermischen und mechanischen Trennverfahren. Proceedings Experten-Roundtable 06.-07.10.2015, Köln.

Boing, Lawrence E. (2006): Decommissioning of Nuclear Facilities Decontamination Technologies. Online im Internet: URL <<http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/r2d2/workshop2/lectures/decontamination-technologies.pdf>> (Stand: Oktober 2006, Abfrage am: 12.12.2016).

Borchardt, Ralf (2003): Results of the full scale testing of the remote dismantling in Greifswald NPP. Online im Internet unter URL <https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/IDN/idnfiles/CuttingTechniqueWkp-Germany2011/EWN_Results_of_the_Modeldismantling.pdf> (Stand: 2003, Abfrage am 28.02.2017).

E.ON Kernkraft GmbH (2008): Stade - Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks – vom Kernkraftwerk zur „Grünen Wiese“. Online im Internet unter URL <https://www.eon.com/content/dam/eon-com/Geschaeftsfelder/Nuclear/asset-profiles/stade-power-plant/kernkraft-rueckbau_Stade_de.pdf> (Stand: März 2008, Abfrage am 28.02.2017).

Europäische Kommission (2009): Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how. Final Report. Online im Internet: URL <<http://cordis.europa.eu/pub/fp6->

euratom/docs/cnd-wp7-decontamination-dismantling-techniques-finalreport.pdf>
(Stand: Juni 2009, Abfrage am: 12.12.2016).

Fujita, Reiko; Enda, Masami; Morisue, Tetsuo (1989): REDOX decontamination technique development. (II). REDOX decontamination system using pilot plant. In: Journal of Nuclear Science and Technology 26 (4), S. 449–458. DOI: 10.3327/jnst.26.449.

Gentes, Sascha; Aminy, Akramullah; Gabor, Nadine; Reinhardt, Steffen (2015): Internationale Rückbautechniken und Managementmethoden für kerntechnische Anlagen - Eine wissenschaftliche Analyse aufbauend auf dem internationalen Stand der Technik (IRMKA). Endbericht des Forschungsprojekts mit dem Förderkennzeichen 02S8851.

Gläser, Jochen; Laudel, Grit (2010): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. 4. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

IAEA – International Atomic Energy Agency (2001): Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities. Vienna: International Atomic Energy Agency (Technical Reports Series, no. 401).

IAEA – International Atomic Energy Agency (1999): State of the art technology for decontamination and dismantling of nuclear facilities. Vienna: International Atomic Energy Agency (no. 395).

ISO 8373 (1994): Manipulating industrial robots.

Kaulard, Jörg; Brendebach, Boris; Strub, Erik (2010): Strahlenschutzaspekte gängiger Abbau- und Dekontaminationstechniken. Informationen und Erfahrungen aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Köln [u.a.]: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (270).

Kinnunen, Petri (2008): ANTIOXI - Decontamination techniques for activity removal in nuclear environments. Research Report NO VTT-R-00299-08 of the project FP6-036367. Online im Internet: URL <<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-00299-08.pdf>> (Stand: 12.03.2008, Abfrage am: 21.12.2016).

Laraia, Michele (2012): Introduction to nuclear decommissioning: definitions and history. In: Michele Laraia (Hg.): Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 1–10.

- Michal, V. (2012): Remote operation and robotics technologies in nuclear decommissioning projects. In: Michele Laraia (Hg.): Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 346–374.
- Mieg, Harald A.; Näf, Matthias (2005): Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung. Online im Internet: URL <http://www.metropolenforschung.de/download/Mieg_Experteninterviews.pdf> (Stand: April 2005, Abfrage am: 12.12.2016).
- NEA – Nuclear Energy Agency (1999): Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities – A Report by the NEA Task Group on Decontamination. Online im Internet: URL <<https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/1999/decontec.pdf>> (Stand: 1999, Abfrage am: 12.12.2016).
- Noynaert, L. (2012): Decontamination processes and technologies in nuclear decommissioning projects. In: Michele Laraia (Hg.): Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 319–345.
- O’Sullivan, P.; Nokhamzon, J. G.; Cantrel, E. (2010): Decontamination and dismantling of radioactive concrete structures. NEA News 2010 – No. 28.2. Online im Internet: URL <<https://www.oecd-nea.org/pub/newsletter/2010/28-2/NEA-News-28-2-8-updates.pdf>> (Stand: 2010, Abfrage am: 12.12.2016).
- Plessing, Jürgen (2004): Neue Maschine für neue Ansprüche. Studsvik SINA NEWS. 50, 2004. Online im Internet: URL <<https://www.yumpu.com/de/document/view/8848126/studsvikrsina-news>> (Stand: März 2004, Abfrage am: 12.12.2016).
- Thierfeldt, Stefan; Schartmann, Frank (2009): Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen. Erfahrungen und Perspektiven. 4. Neu bearbeitete Auflage, Brenk Systemplanung GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.
- Schiek, Daniela (2014): Das schriftliche Interview in der qualitativen Sozialforschung. Zeitschrift für Soziologie, Jg. 43, Heft 5, Oktober 2014, S. 379–395.
- Steiner, H. (2012): Dismantling and demolition processes and technologies in nuclear decommissioning. In: Michele Laraia (Hg.): Nuclear decommissioning. Planning,

execution and international experience. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 293–318.

van Wickeren, Jan (2012): Bolero - Flexible decontamination system for walls and ceilings with subsequent contamination measurement. Online im Internet: URL <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073609.pdf?r=1> (Stand: 2012, Abfrage am: 12.12.2016).

Working Paper Series in Production and Energy

recent issues

- No. 7** Tobias Jäger, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Onshore wind energy in Baden-Württemberg: a bottom-up economic assessment of the socio-technical potential
- No. 8** Axel Ensslen, Alexandra-Gwyn Paetz, Sonja Babrowski, Patrick Jochem, Wolf Fichtner:
On the road to an electric mobility mass market - How can early adopters be characterized?
- No. 9** Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im Wettbewerb Energieeffiziente Stadt
- No. 10** Hannes Schwarz, Valentin Bertsch, Wolf Fichtner:
Two-stage stochastic, large-scale optimization of a decentralized energy system – a residential quarter as case study
- No. 11** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:
Development of a multi-energy residential service demand model for evaluation of prosumers' effects on current and future residential load profiles for heat and electricity
- No. 12** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:
Energy autonomy in residential buildings: a techno-economic model-based analysis of the scale effects
- No. 13** Johannes Schäuble, Silvia Balaban, Peter Krasselt, Patrick Jochem, Mahmut Özkan, Friederike Schellhas-Mende, Wolf Fichtner, Thomas Leibfried, Oliver Raabe:
Vergleichsstudie von Systemansätzen für das Schnellladen von Elektrofahrzeugen
- No. 14** Marian Hayn, Valentin Bertsch, Anne Zander, Stefan Nickel, Wolf Fichtner:
The impact of electricity tariffs on residential demand side flexibility
- No. 15** Erik Merkel, Robert Kunze, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Modellgestützte Bewertung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2016 anhand ausgewählter Anwendungsfälle in Wohngebäuden
- No. 16** Russell McKenna, Valentin Bertsch, Kai Mainzer, Wolf Fichtner:
Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimisation to develop feasible energy concepts in small communities
- No. 17** Tilman Apitzsch, Christian Klöffler, Patrick Jochem, Martin Doppelbauer, Wolf Fichtner:
Metaheuristics for online drive train efficiency optimization in electric vehicles

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstr. 16
D-76187 Karlsruhe

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Working Paper Series in Production and Energy
No. 18, März 2017

ISSN 2196-7296