



BIW5-01: Projektarbeit

**DIGITALISIERUNG DER INFORMATIONSKETTE FÜR  
RÜCKBAUPLANUNGEN VON ATOM- UND  
KERNKRAFTWERKEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER  
BUILDING INFORMATION MODELING  
(BIM)-METHODIK**

Bearbeiter:

cand. Ing. Johannes Frank Schüler

Matrikelnummer: 4039308

Betreuer:

Dipl.-Ing. Al-Hakam Hamdan

Christoph Großmann, M.Eng. (IPROconsult GmbH)

Betreuender Hochschullehrer:

Prof. Dr.-Ing. Raimar J. Scherer

Eingereicht am: 01.02.2019



Technische Universität Dresden, 01062 Dresden

Prof. Dr.-Ing.

**Raimar J. Scherer**

Institutsleiter / Director of the institute

Bearbeiter:

Telefon: 0351 463-32966

Telefax: 0351 463-33975

E-Mail: Raimar.Scherer@tu-dresden.de

AZ:

## **Aufgabenstellung Projektarbeit (Modul BIW5-01)**

für Herrn Johannes Schüler, Bauingenieurwesen, Matrikel-Nr. 4039308

### **Thema:**

Digitalisierung der Informationskette für Rückbauplanungen von Atom- und Kernkraftwerken unter Berücksichtigung der Building Information Modeling (BIM)-Methodik.

(Digitisation of the information chain for the deconstruction of nuclear power plants under consideration of the Building Information Modeling (BIM) methodology)

### **Zielsetzung:**

Building Information Modeling (BIM) beschreibt unter anderem eine Methode des durchgängig digitalisierten Lebenszykluses eines Bauwerks. Die digitalen Prozesse im Bereich der Planung und Bewirtschaftung werden heute bereits in der Praxis angewandt und Schritt für Schritt optimiert. Für die letzte Lebenszyklusphase, dem Rückbau von Gebäuden, existieren wenige bis gar keine digitalen Prozesse.

Im Zuge der Energiewende in Deutschland und dem damit verbundenen Ausstieg aus der Kernenergie ab dem Jahr 2022, werden sämtliche Atom- und Kernkraftwerke in Deutschland abgeschaltet und sukzessive zurückgebaut. In Gesprächen mit Endkunden wurde deutlich, dass die Informationskette auch in diesem sensiblen Bereich gestört ist und nicht alle Informationen in der Prozesskette vorhanden sind.

Unter diesem Hintergrund ist es die Aufgabe, eine Prozesskette in einem digitalen Austauschformat abzubilden und den Rückbau virtuell zu begleiten. Dazu ist eine Untersuchung der realen Rückbauprozesse, eine Beleuchtung der aktuellen Informationsflüsse sowie eine Überprüfung von Möglichkeiten der Nachverfolgung

*Postadresse (Briefe)*

TU Dresden, 01062 Dresden

*Postadresse (Pakete u.ä.)*

TU Dresden  
Helmholtzstraße 10  
01069 Dresden

*Besucheradresse*

Sekretariat:  
Nürnberger Str. 31a  
Zimmer 204

*Steuernummer*

(Inland)  
203/149/02549  
*Umsatzsteuer-Id-Nr.*  
(Ausland)  
DE 188 369 991

*Bankverbindung*

Deutsche Bundesbank,  
Filiäle Dresden  
Konto 85 001 522  
BLZ 850 000 00

*Internet*

<http://tu-dresden.de>



von Bauteilen notwendig. Alle zurückzubauenden Realobjekte sollen eine Verknüpfung zu ihrer digitalen Repräsentation besitzen und über Sensoren oder Trackingsysteme verbunden bleiben, sodass zu jeder Zeit und an jedem Ort Informationen über das Bauteil abgerufen werden können (z.B. Kontaminationsgrad, Endlagerort, etc.).

**Arbeitsumfang:**

Die Arbeit umfasst die folgenden Schritte:

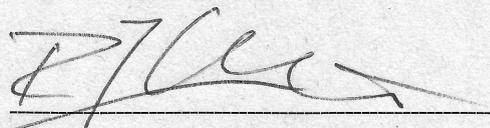
1. Untersuchung der vorherrschenden Rückbauprozesse für Atom- und Kernkraftwerke.
2. Erarbeitung einer Strategie zum virtuellen Rückbau der Kraftwerke unter Berücksichtigung vorhandener Datenquellen und Softwaresysteme.
3. Definition einer Prozesskette für den Rückbau der Kraftwerke in einem digitalen Austauschformat.
4. Beschreibung von Möglichkeiten zur Nachverfolgung von Bauteilen mittels Sensoren oder Trackingsystemen sowie Auslesen von Informationen der Bauteile.
5. Nachvollziehbare Dokumentation der Entwicklungsschritte und der Ergebnisse in einem schriftlichen Bericht.
6. Aufbereitung und öffentliche Präsentation der Ergebnisse.

Tag der Ausgabe: 25.10.2018 Tag der Abgabe: 14.02.2019

**Betreuer:**

TU Dresden: Al-Hakam Hamdan  
IPROconsult GmbH: Christoph Großmann

**Verantwortlicher Hochschullehrer:**



Prof. Dr.-Ing. R. J. Scherer

**Studierender:**



Johannes Schüler

---

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Problemstellung.....	1
1.2. Ziele und Abgrenzung .....	1
1.3. Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2. Grundlagen zum Kernkraftwerksrückbau .....</b>	<b>4</b>
2.1. Aufbau eines Kernkraftwerkes .....	4
2.2. Funktionsweise eines Kernkraftwerkes.....	5
2.2.1. Druckwasserreaktor .....	5
2.2.2. Siedewasserreaktor .....	7
2.3. Arten der Stilllegung.....	7
2.3.1. Gesicherter Einschluss.....	8
2.3.2. Sofortiger Rückbau .....	8
2.4. Genehmigungs- und Aufsichtsaspekte .....	9
2.5. Sicherheitsbetrachtungen .....	11
2.6. Arbeitsbereiche .....	12
2.6.1. Dekontamination .....	13
2.6.2. Demontage .....	13
2.6.3. Aufbereitung / Konditionierung.....	14
2.6.4. Freigabe .....	16
2.6.5. Transport .....	17
<b>3. Tracking der Bauteile .....</b>	<b>19</b>
3.1. Optische Identifikationssysteme .....	19
3.1.1. OCR-Schrift .....	20
3.1.2. Barcode.....	21
3.1.3. QR-Code .....	22
3.2. Elektronische Identifikationssysteme .....	23
3.2.1. RFID.....	23

3.2.2. GPS.....	25
3.3. Anwendungsmöglichkeit im Rückbau nuklearer Anlagen .....	26
<b>4. Digitalisierungskonzept .....</b>	<b>28</b>
4.1. Datenquellen.....	29
4.2. Planungssoftware .....	29
4.3. Simulationsablauf.....	31
4.4. Exemplarische Durchführung.....	33
4.5. Digitalisierung .....	35
4.5.1. Rückbauablauf .....	36
4.5.2. Digitalisierte Prozesskette .....	40
4.6. Bewertung .....	42
<b>5. Schlussbetrachtung.....</b>	<b>43</b>
5.1. Zusammenfassung.....	43
5.2. Ergebnisse der Arbeit.....	43
5.3. Ausblick .....	44
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>46</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>49</b>

---

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Kraftwerksgelände (Kernkraftwerk Leibstadt, 2018).....	4
Abbildung 2: Druckwasserreaktor (DATF, et al., 2013).....	6
Abbildung 3: Siedewasserreaktor (DATF, et al., 2013).....	7
Abbildung 4: Beteiligte im Genehmigungsverfahren (GRS, 2017) .....	11
Abbildung 5: Sicherheitsbereiche (GRS, 2017) .....	12
Abbildung 6: Entsorgungsschema (Krumpholz, 2016) .....	15
Abbildung 7: Schritte zur Freigabe (E.ON, 2008).....	17
Abbildung 8: Einfacher CCD-Handscanner (Metrologic Instruments Inc., 2008).....	20
Abbildung 9: Beispiel OCR-B-Schrift (eigene Darstellung) .....	21
Abbildung 10: Selbst erstellter Barcode (TEC-IT, 2018).....	21
Abbildung 11: Aufbau eines QR-Codes (Uitz, et al., 2012) .....	23
Abbildung 12: Prinzipieller Aufbau eines RFID-Systems (Jehle, et al., 2011) .....	24
Abbildung 13: Beziehungen eines GPS (Schelkshorn, 2007) .....	26
Abbildung 14: Vorhandene Software (eigene Darstellung) .....	30
Abbildung 15: Simulationskonzept (eigene Darstellung).....	31
Abbildung 16: Beispielhaus in Revit (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 17: Filterung der abgebauten Elemente (eigene Darstellung) .....	34
Abbildung 18: Datenbankstruktur und Beispielabfrage (eigene Darstellung).....	34
Abbildung 19: Einlesen der XML-Datei als Tabelle (eigene Darstellung) .....	35
Abbildung 20: Vorbereitungsprozess zum nuklearen Rückbau (eigene Darstellung) .....	36
Abbildung 21: nuklearer Rückbau (eigene Darstellung) .....	37
Abbildung 22: Prozesskette zum Rückbauablauf (eigene Darstellung) .....	39
Abbildung 23: Digitalisierter Planungsprozess (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 24: Digitalisierte Prozesskette (eigene Darstellung) .....	41

---

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AtG	Atomgesetz
AtVfV	Atomrechtliche Verfahrensverordnung
BIM	Building Information Modeling
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BPMN	Business Process Model and Notation
CCD	Charge-Coupled Devices
CSV	Comma-Separated Values
DAtF	Deutsches Atomforum e.V.
GPS	Global Positioning System
GRS	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH
GUID	Global Unique ID
HF	Hochfrequenz
IFC	Industry Foundation Classes
ISM	Industrial-Scientific-Medical
LF	Niederfrequenz
OCR	Optical Character Recognition
PCB	Polychlorierte Biphenyle
QR-Code	Quick-Response-Code
RFID	Radio Frequency Identification
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
UHF	Ultrahochfrequenz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

# 1. EINLEITUNG

## 1.1. PROBLEMSTELLUNG

Nach dem verheerenden Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl im Jahr 1986 beschloss Italien als einzige Nation auf dem europäischen Kontinent den kompletten Ausstieg aus der Atomenergie. Vier Kernkraftwerke wurden stillgelegt. (Büdenbender, 2009 S. 11). Erst 2011 mit dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi (Japan) wurde auch in Deutschland die Energiewende endgültig eingeläutet. Bis Ende 2022 sollen alle deutschen Atomkraftwerke abgeschaltet und das entstehende Energiedefizit mit erneuerbarer Energie ausgeglichen werden. Die Betreiber müssen nach § 7 AtG (Atomgesetz) mit in der Betriebszeit gebildeten finanziellen Rückstellungen für den Abbau aufkommen, sind aber nicht dazu verpflichtet, diesen unmittelbar nach Abschaltung durchzuführen.

Weltweit zählte die Internationale Atomenergie-Organisation im August 2017 über 600 Reaktoren und circa 300 kerntechnische Anlagen, die bisher abgeschaltet worden sind (GRS, 2017). Erfolgreich zurückgebaut sind erst wenige. Der Planungsaufwand für ein einziges Kraftwerk fällt durch die Dauer und den Detaillierungsgrad des Vorhabens sehr umfangreich aus. Hinzu kommt die aufwändige Dokumentation und Nachverfolgung des abgebauten Materials und der hierfür erforderlichen Prozesse. Für jedes Bauteil muss nachgewiesen werden, wo es abgebaut wurde, ob es kontaminiert ist, wie die Kontamination entfernt worden ist, ob es danach wirklich kontaminationsfrei ist und welche Bearbeitungsschritte durchlaufen wurden.

Zum Schutze der Umwelt ist besondere Vorsicht bei der Handhabung und Lagerung radioaktiver Reststoffe geboten. Um dies so ökonomisch wie möglich umzusetzen, müssen die Rückbaumaßnahmen ideal an den Kontaminationsgrad angepasst sein. Radioaktive Abfälle müssen aber nicht die einzigen Gefahrstoffe in ehemaligen Kernkraftwerken sein. Auch das Auftreten von Asbest, Teer, Schwermetallen, Altlasten oder PCB (Polychlorierte Biphenyle) ist möglich. Die nicht kontaminierten Stoffe können unaufwändiger und kostengünstiger verarbeitet werden. Verstrahlte Bauteile hingegen benötigen bei ihrer Verarbeitung erhöhte Sicherheitsbestimmungen. Schon ein einfacher Transport wird so durch umfangreiche Randbedingungen zu einer anstrengenden Logistikaufgabe. (EnBW Kernkraftwerke GmbH, 2014)

## 1.2. ZIELE UND ABGRENZUNG

Um das enorme Auftragsvolumen seitens der ausführenden Unternehmen fachgerecht, sicher und nach dem neusten Stand der Technik bewältigen zu können, ist eine digitale Prozesskette der gesamten Rückbauprozedur notwendig. Dazu sind die vorherrschenden Rückbauprozesse zu untersuchen und zu verknüpfen. Durch deren Digitalisierung sollen eine fehlerfreie Planung, ein erleichtertes Controlling sowie eine reibungslose Ausführung und Dokumentation ermöglicht werden, da die computergestützte Verarbeitung der

Planungsdaten schneller erfolgen kann. Die Prozesskette des Rückbaus soll direkt an die im Lebenszyklus verwendeten BIM-Daten aus Planung, Ausführung und Betrieb eines Objektes anknüpfen.

Um ausreichende Sicherheit beim Umgang mit Gefahrstoffen zu gewährleisten, muss der Verarbeitungsweg vom Abbau bis zur Endlagerung detailliert dokumentiert werden. Eine objektgebundene Informationsabfrage inklusive zugehöriger Positionsbestimmung würde sich dafür gut eignen. Gleichzeitig kann die Aufzeichnung nahezu automatisiert ablaufen. In diesem Sinne soll die Möglichkeit des Einsatzes von Trackingsystemen an abgebauten Bauteilen überprüft werden.

Für die Planung eines Rückbauvorhabens ist es sinnvoll die digitalen Bauwerksinformationen an verschiedene Programme zu übergeben und diese damit auszuwerten. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Strategie zum virtuellen Rückbau erstellt werden.

Die vorliegende Arbeit soll als Einleitung in das umfangreiche Thema des digitalen Rückbaus nuklearer Anlagen bei der IPROconsult GmbH dienen. In diesem Sinne soll sich der Leser einen ersten Überblick über die verschiedenen Thematiken verschaffen können. Diverse Problemstellungen zu Detailbereichen sollen offengelegt werden und damit als Ansatzpunkt für weitere wissenschaftliche Arbeiten dienen.

### **1.3. AUFBAU DER ARBEIT**

Um zu verstehen, wie ein Kernkraftwerk rückgebaut werden kann, muss man zuerst den Aufbau und die Funktionsweise kennenlernen. Dabei ist wichtig, zu wissen, in welchen Prozessen die Kernenergie entsteht, um einschätzen zu können, wo Bauteile während der Nutzung kontaminiert werden. Diese müssen später mit entsprechenden Verfahren zurückgebaut werden.

Im Anschluss daran beschäftigt sich die Arbeit mit den herkömmlichen Rückbauprozessen, welche bisher bei Kernkraftwerken zum Einsatz gekommen sind. Diese werden in Arbeitsbereiche unterteilt und später zu einer Rückbaureihenfolge zusammengesetzt. Nicht nur die bauverfahrenstechnischen Prozesse sollen hier eine Rolle spielen, sondern auch der Ablauf des Genehmigungsverfahrens. Weiterhin werden Techniken zur Demontage, Konditionierung und Dekontamination erläutert.

Um den realen Prozess digital nachvollziehen und unter Anwendung der BIM-Methode abbilden zu können, wird ein Trackingsystem für die einzelnen Bauteile benötigt. Hier werden nach der Ermittlung der Randbedingungen verschiedene Identifikationssysteme aus der Logistik vorgestellt. Nach der Abwägung ihrer Vor- und Nachteile wird eine Empfehlung ausgesprochen und deren Einsatz in groben Zügen skizziert.

Um den Abbau auch digital zu simulieren, soll ein Konzept für das Generalplanungsunternehmen IPROconsult GmbH entwickelt werden. Dazu sind die

bestehenden Daten und vorhandenen Softwaresysteme zu analysieren. Zur Beweisführung der Interoperabilität des Konzeptes wird ein selbst erstelltes Rückbauprojekt digital ausgeführt. Schließlich werden alle Grundlagen für die Digitalisierung der Prozesskette ermittelt sein und diese kann in der der digitalen Prozessmodellierungssprache BPMN erstellt und ergänzt werden.

## 2. GRUNDLAGEN ZUM KERNKRAFTWERKSRÜCKBAU

### 2.1. AUFBAU EINES KERNKRAFTWERKES

Die grundlegenden Einrichtungen einer kerntechnischen Anlage sind das Reaktorgebäude, das Turbinenhaus, eine Kühleinrichtung und ein Standortzwischenlager. Das Herzstück der gesamten Anlage ist der Reaktordruckbehälter samt Dampferzeuger. Diese Bauteile bilden den Primärkreislauf und befinden sich im Reaktorgebäude. In direkter Nachbarschaft liegt das Maschinenhaus, welches die Dampfturbinen, den Generator und den Kondensator beherbergt. Beide Gebäude sind über den Sekundärkreislauf miteinander verbunden. Die Kühleinrichtung in Gestalt eines Kühlturmes oder eines Gewässers ist durch den Kühlkreislauf an das Maschinenhaus angeschlossen. Die elektrische Energie wird aus dem Generator über einen Blocktransformator zur Freiluftschaltanlage geleitet, durch welche der Strom in das jeweilige Stromnetz eingespeist werden kann. Zusätzlich befinden sich noch ein Informationszentrum, Mitarbeiterparkplätze, ein Verwaltungsgebäude und einige Sicherheitseinrichtungen auf dem Gelände. Dieses wird eindeutig und sichtbar von der umliegenden Landschaft durch einen Sicherheitszaun mit Beschilderung und Wachpersonal getrennt. (Kernkraftwerk Leibstadt, 2018)

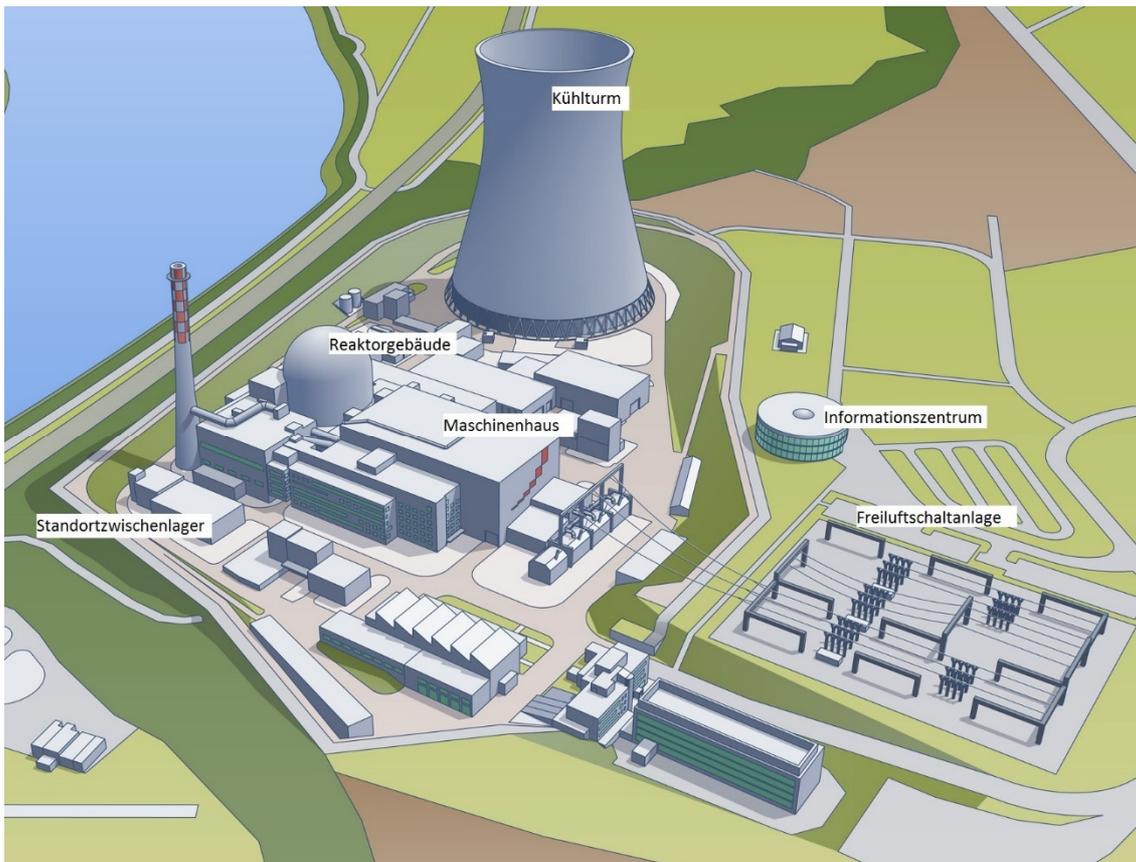


Abbildung 1: Kraftwerksgelände (Kernkraftwerk Leibstadt, 2018)

Das in der Nähe der Sicherheitsschleuse befindliche Standortzwischenlager dient zur temporären Lagerung der Brennelemente, da das Bundesendlager „Schacht Konrad“ erst ab Mitte 2027 (BGE, 2018) zur Verfügung stehen wird.

## **2.2. FUNKTIONSWEISE EINES KERNKRAFTWERKES**

Die Energie in einem Kernkraftwerk wird durch Kernspaltung freigesetzt. Dazu werden schwere Atomkerne (beispielsweise der Elemente Uran oder Plutonium) mit langsamen Neutronen beschossen. So entstehen instabile und schwingende Atomkerne, welche sich unter Freisetzung schneller Neutronen in verschiedene neue Elementkerne teilen. Die entstandenen Neutronen werden durch einen Moderator (Medium zum Abbremsen von Atomkernen) verlangsamt und können so den nächsten schweren Atomkern spalten. Als Moderator und Kühlflüssigkeit kommt dabei „leichtes Wasser“ zum Einsatz, in welchem hauptsächlich das leichteste Wasserstoffisotop Protium molekular gebunden ist. Vergleicht man die Massen der Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte, bemerkt man den sogenannten Massendefekt. Die Reaktionsprodukte wiegen weniger als die Ausgangsstoffe, da die fehlende Masse in Energie umgewandelt wurde. Diese erhitzt Wasser zu Wasserdampf, welcher durch seine thermodynamische Bewegung die nachfolgenden Turbinen rotieren lässt. Die daraus entstehende kinetische Energie wird von einem Generator in elektrischen Strom umgewandelt und in das angeschlossene Stromnetz abgeführt. (DATF, et al., 2013 S. 33, 49, 50)

Im Folgenden werden die zwei am häufigsten vorkommenden Funktionsweisen des Kernkraftwerkbetriebes erklärt. Diese unterscheiden sich hauptsächlich durch den Aufbau im Reaktorgebäude und damit in der Menge der kontaminierten Bauteile. Der Rest der Anlage welcher nicht mit radioaktivem Material in Berührung kommt, kann später konventionell zurück gebaut werden.

### **2.2.1. DRUCKWASSERREAKTOR**

Im Reaktordruckbehälter befinden sich die Brennelemente zur Wärmeerzeugung. Diese bestehen aus Paketen quadratisch angeordneter Brennstäbe mit einer Länge von bis zu 4 Metern, welche das konzentrierte Brennmaterial in Form von kleinen Brennstoff-Pellets beinhalten. Durch das Hoch- und Herunterfahren der Steuerstäbe reguliert man die Trefferfläche der abgegebenen Neutronen und damit die Energiefreisetzung durch erneute Kernspaltungen. Das umgebende Wasser kann nicht verdampfen, da es unter einem sehr hohen Druck von 155 Bar steht und sich auf über 330 °C erhitzt. Der Primärkreislauf enthält neben dem Druckausgleichsbehälter noch die Primärwasserpumpe. Alle verbauten Pumpen sind durch mehrere Notfalantriebssysteme abgesichert, um im Katastrophenfall eine Kühlung der Brennstäbe zu ermöglichen und die Kernschmelze zu verhindern. (Neles, et al., 2012 S. 66-70)

Im Dampferzeuger wird die thermische Energie aus dem Primärkreislauf über ein verzweigtes Geflecht aus dünnen Kapillarrohren an den Sekundärkreislauf übertragen. Der Wasserdampf strömt zuerst durch eine Hochdruckturbine und danach durch mehrere Niederdruckturbinen. Diese geben ihre Rotationsenergie an den Generator weiter, welcher dann elektrischen Strom abgibt. Der restliche Wasserdampf wird nun in einem Kondensator wieder in den flüssigen Aggregatzustand heruntergekühlt und mittels Sekundärwasserpumpe durch den Speisewasservorwärmer zurück in den Dampferzeuger geleitet. Das benötigte Kühlmedium fließt aus der Wasserhaltung durch den Kondensator, erwärmt sich und wird im Anschluss in einem Kühlturm versprüht. Durch den hohen Zerstäubungsgrad kühlt es sich schneller ab und kann zurück in die Wasserhaltung geleitet werden. Dieser sogenannte Kühlkreislauf wird durch eine Kühlwasserpumpe angetrieben. (DAtF, et al., 2013 S. 50-51)

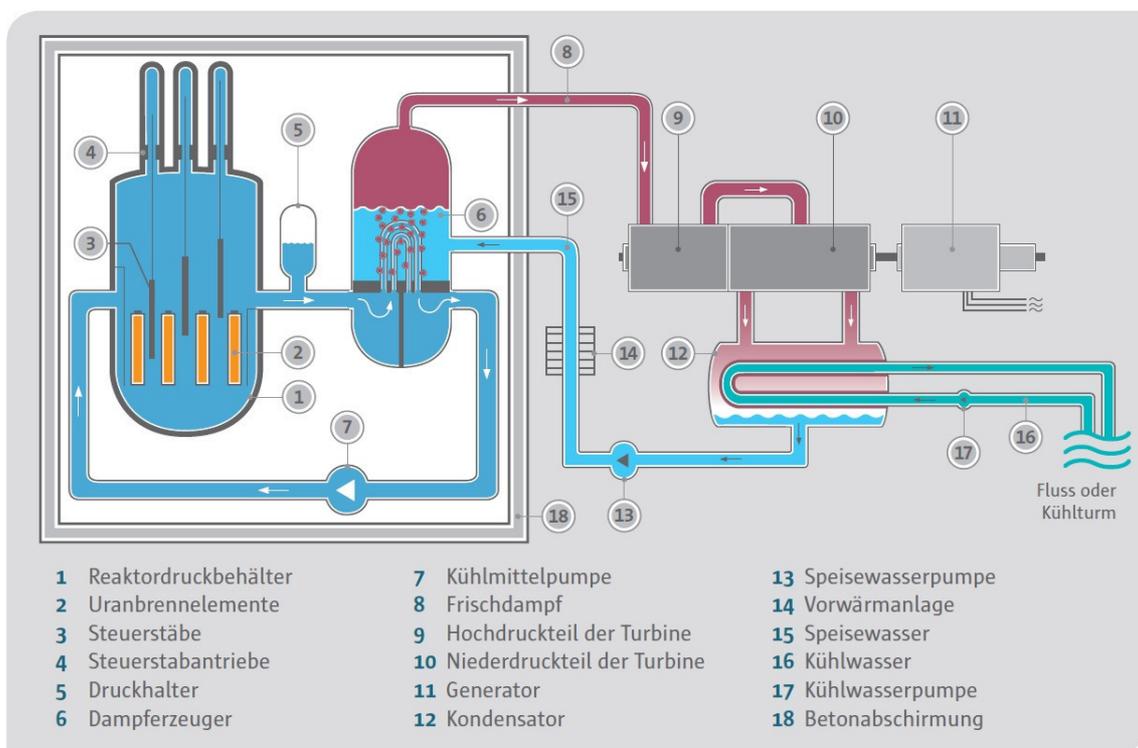


Abbildung 2: Druckwasserreaktor (DAtF, et al., 2013)

Durch die Nutzung des Dampferzeugers bleibt das kontaminierte Kühlmittel im Primärkreislauf, wodurch weniger radioaktiver Abfall entsteht. Allerdings kommt durch das zusätzliche Bauteil eine neue Fehlerquelle in das System. Weiterhin ist der Druckbehälter ständig sehr hohen Materialspannungen ausgesetzt und damit anfälliger für Beschädigungen.

## 2.2.2. SIEDEWASSERREAKTOR

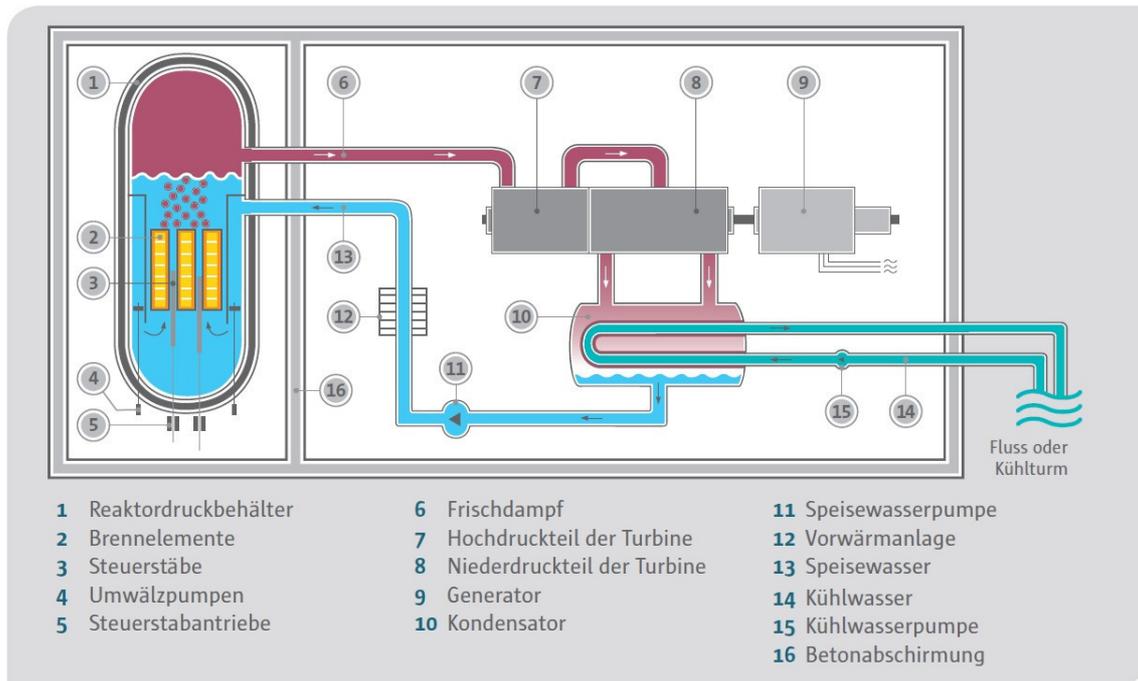


Abbildung 3: Siedewasserreaktor (DAfF, et al., 2013)

Der Unterschied zur Variante des Druckwasserreaktors ist, dass hierbei auf den Dampferzeuger verzichtet wird. Dabei muss das Wasser im Reaktordruckbehälter nicht unter sehr hohem Druck stehen und es bildet sich direkt Wasserdampf, welcher ohne Umwege zu den Turbinen geleitet wird. Zwar ist die Bauweise dieses Reaktors einfacher, allerdings entstehen so mehr kontaminierte Bauteile, da das radioaktive Wasser mit viel mehr Komponenten der Anlage in Kontakt kommt. (Neles, et al., 2012 S. 71-72)

## 2.3. ARTEN DER STILLLEGUNG

Nach dem Abschalten des Kernreaktors folgt zunächst die sogenannte Nachbetriebsphase. Diese dauert durchschnittlich vier bis sechs Jahre und dient dazu, den Brennelementen genug Zeit zum Abklingen zu geben, da sie sonst zu viel Wärme beim Transport produzieren würden. In dieser Phase sind Maßnahmen zur Kühlung des Reaktorkernes und zur Sicherung des Kraftwerksgeländes fortzuführen. Folgende Varianten der Stilllegung von Kernkraftanlagen existieren und werden in der Praxis angewandt:

- Gesicherter Einschluss (mit späterem Rückbau)
- Sofortiger Rückbau

Ein dauerhaft sicherer Einschluss ohne anschließenden Rückbau ist in Deutschland untersagt. Die eingeschlossenen Anlagen müssen jederzeit zurückgebaut werden können. (DAfF, 2013 S. 8)

### **2.3.1. GESICHERTER EINSCHLUSS**

Bei dieser Stilllegungsvariante wird die Anlage nach Herstellung der Brennstofffreiheit von allen nicht in fester Form vorliegenden, radioaktiven Stoffen und Brandlasten befreit. Das heißt, dass alle Filtereinsätze, Klärschlämme und Konzentrate wie im Betriebszustand entsorgt werden. Die kontaminierten Feststoffe der gesamten Anlage werden teilweise demontiert und umgelagert, sodass ein komprimierter Einschluss in vorhandenen und ergänzten massiven Gebäudeteilen erfolgen kann. In der Regel ist dies der Bereich des Reaktorgebäudes. Dieses ist durch Betoneinschluss zu versiegeln, um die Strahlung abzuschirmen und Unbefugten den Zugang zu verwehren. Der Betreiber installiert vor dem Einschluss Überwachungseinrichtungen sowie Melde-, Mess- und Kommunikationsanlagen. Für den Rückbau benötigte Systeme (z. B. Deckenkräne) werden konserviert und überprüft. Kontrollpersonal untersucht die eingeschlossene Anlage in regelmäßigen Abständen auf Schäden durch Verrottung, Wassereintrich, Korrosion oder Ähnlichem. (VDI, 1987 S. 28-30)

Der Grundgedanke dahinter ist, dem radioaktiven Restbestand Zeit zum natürlichen Zerfall der aktiven Nuklide zu geben. In durchschnittlich 30 Jahren Einschlusszeit sinkt die radioaktive Belastung für den späteren Rückbau und somit auch das Volumen des radioaktiven Abfalls. Gleichzeitig hofft man auf die Entwicklung neuer Rückbautechniken für den Einsatz bei der Zerkleinerung und der Dekontamination. Deshalb wird bei Reaktoren, deren Entsorgung oder Finanzierung bisher ungeklärt ist oder die einem Unfall unterlagen, zeitweise der sichere Einschluss angewandt. (GRS, 2017 S. 11)

Während der Einschlussdauer fallen allerdings fortlaufende Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen an und das bebaute Gelände wird länger blockiert. Auch fehlt beim späteren Rückbau das mit der Anlage vertraute Personal und man muss neue, qualifizierte Fachkräfte finden, welche sich erst in die ehemalige Funktionsweise einarbeiten müssen. Weiterhin gibt es keine signifikante Verbesserung des Aufwandes zur Freimessung der kontaminierten Bauteile. (DATF, 2013 S. 9)

### **2.3.2. SOFORTIGER RÜCKBAU**

Im Rahmen des sofortigen Rückbaus wird direkt im Anschluss an die Nachbetriebsphase die gesamte Anlage bis zur sogenannten „grünen Wiese“ zurückgebaut. Dabei ist die Übernahme des Personals und deren Fachkenntnis über die Anlage von großem Vorteil. Diese verlängert und stabilisiert gleichzeitig die wirtschaftliche Situation der Angestellten und damit der Region. Weiterhin kann das Gelände zeitnah anderweitig genutzt werden. (VDI, 1981 S. 13)

Trotz der hohen Radioaktivität und der damit verbundenen höheren Strahlenbelastung bei den Rückbaumaßnahmen wird in Deutschland der sofortige Rückbau favorisiert. Dies kann ohne die zusätzliche Erstellungsmaßnahme erfolgen und bringt so schnell wie möglich eine

100%ige Kontaminationsfreiheit mit sich. Zumal nachfolgende Generationen nicht mit dem Problem des Rückbaus belastet werden sollen. (DAtF, 2013 S. 9)

## **2.4. GENEHMIGUNGS- UND AUFSICHTSASPEKTE**

Die Stilllegung, der sichere Einschluss sowie der Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen sind nach § 7 Abs. 3 AtG genehmigungspflichtig. Schon bei der Planung eines Kernkraftwerkes muss ein entsprechendes Rückbaukonzept nach der Sicherheitsanforderung für Atomkraftwerke Nummer 3.11 (7) (BMU, 2015) nachgewiesen werden. Dieses wird während des Leistungsbetriebes periodisch an den Stand der Technik angepasst und genauestens dokumentiert.

In der Nachbetriebsphase gilt weiterhin die Betriebserlaubnis, wodurch die folgenden Vorbereitungsmaßnahmen (BMU, 2016 S. 6) rechtlich abgedeckt sind:

- möglichst frühzeitige Entladung von Brennelementen oder Kernbrennstoffen
- Anlagen- bzw. Systemdekontamination
- für die Antragstellung der Stilllegung erforderliche Probenahmen an Systemen und Komponenten (z. B. zum Zweck der radiologischen Charakterisierung der Anlage)
- Bestandsaufnahme von gefährlichen (z. B. brennbaren, toxischen, wassergefährdenden) Stoffen
- Anpassung des Betriebsreglements
- Verwertung radioaktiver Stoffe und Beseitigung radioaktiver Abfälle aus der Betriebsphase
- Außerbetriebnahme und Freischaltung nicht mehr benötigter Systeme und Einrichtungen
- Schaffung von Freiflächen sowie von anlageninternen Transportwegen

Nach § 19b Abs. 1 AtVfV (Atomrechtliche Verfahrensverordnung) müssen beim Erstantrag auf Stilllegung einer Kernkraftanlage die gesamten Maßnahmen zur Stilllegung im Sicherheitsbericht erläutert werden. Entsprechend des Umfangs des jeweiligen Projektes kann die Genehmigung als Ganzes (nur bei kleineren Stilllegungsvorhaben) oder in einzelnen Schritten erfolgen. Die folgende Auflistung enthält alle nötigen Erstantragsunterlagen (BMU, 2016 S. 34-36), welche in einem ausführlichen Gutachten geprüft werden:

- Antragsschreiben
- Sicherheitsbericht
- Ergänzende Pläne, Zeichnungen und Beschreibungen der Anlage und der vorgesehenen Stilllegungstechniken und -maßnahmen
- Sicherheitsbericht

- Zuverlässigkeit und Fachkunde
- Nachgewiesene Kenntnisse
- Liste der sicherheitstechnisch relevanten Maßnahmen
- Deckungsvorsorgemaßnahmen
- Radioaktive Reststoffe
- Überwiegende öffentliche Interessen, Umweltauswirkungen
- UVP-Unterlagen
- Kurzbeschreibung
- Verzeichnis der eingereichten Unterlagen
- Anpassung Betriebshandbuch und Prüfhandbuch
- Darstellung der aufzuhebenden oder zu ändernden Genehmigungsbescheide, Auflagen und Gestattungen
- Baurechtliche Unterlagen
- Unterlagen zu BImSchG (Bundes-Immissionsschutzgesetz)
- Unterlagen zum Wasserrecht

Wenn die Antragsunterlagen vollständig sind und dem Antrag stattgegeben wird, erlässt die jeweils zuständige Landesbehörde eine Stilllegungsgenehmigung, welche die Betriebserlaubnis ab diesem Zeitpunkt ablöst. Dabei tritt das BMU (Bundesministerium für Umwelt, Natur, Bau und Reaktorsicherheit) als Aufsichtsinstanz über die Landesbehörden auf und wird von einigen Kommissionen zu den Themen Strahlenschutz, Reaktorsicherheit und Entsorgung beraten. Das Verfahren zur Freimessung der kontaminierten Bauteile muss nach § 29 StrlSchV (Strahlenschutzverordnung) erfolgen, womit die Komponenten ordnungsgemäß aus dem Atomgesetz entlassen werden können. Die Frei- oder Herausgabe ist als Verwaltungsakt anzusehen. Die zuständige Behörde erteilt den beantragten Freigabebescheid, welcher bei der Freimessung eingehalten werden muss. (GRS, 2017 S. 15)

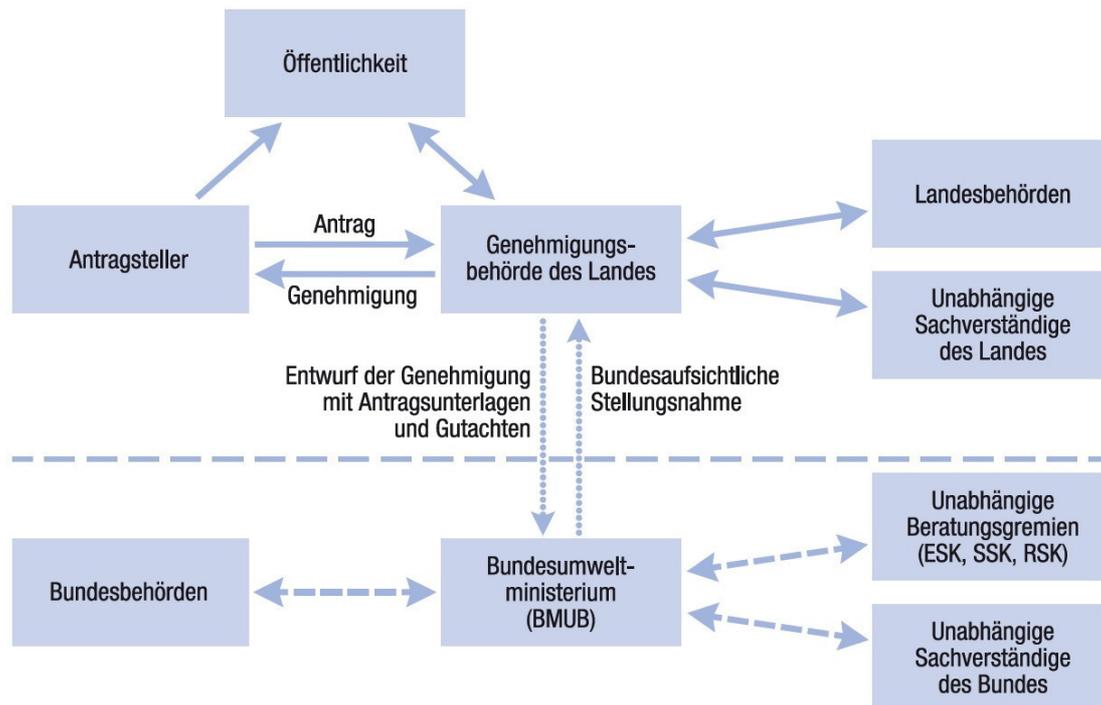


Abbildung 4: Beteiligte im Genehmigungsverfahren (GRS, 2017)

Alle Stilllegungsarbeiten mit radioaktiven Stoffen werden nach § 7 AtG von einem von den Landesbehörden beauftragten Gutachter überwacht und die Einhaltung der durch die Stilllegungsgenehmigung festgelegten Bedingungen dokumentiert. Weiterhin gehören das radioaktive Inventar samt seiner Verteilung und der Zustand der noch vorhandenen Gebäude, Restbetriebssysteme und Komponenten, Daten zum Strahlenschutz des Personals sowie sicherheitstechnisch bedeutsame Feststellungen und Zwischenfälle in diesen Bericht. Die Dokumentation sollte so verfasst werden, dass diese auch bei einem eventuellen Personalwechsel nachvollziehbar und fortführbar ist. (BMU, 2016 S. 12)

## 2.5. SICHERHEITSBETRACHTUNGEN

Die zu treffenden Schutzmaßnahmen werden in Art und Umfang durch die Genehmigungsbehörde festgelegt. Dabei spielen das Gefährdungspotential und die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Störfalls eine maßgebende Rolle. Mögliche innere Unfälle sind beispielsweise Brand, Leckage, Explosionen, chemische Einwirkungen oder Lasten durch Anprall beziehungsweise Absturz von Gegenständen. Waldbrand, Flugzeugabsturz, Wettereskapaden, Erdbeben oder biologische Einwirkungen werden als äußere Störungen angesehen. Beim Abbau der Anlagen können auch Belastungen durch Asbest oder Mineralwolle auftreten. (BMU, 2016 S. 8)

Die Strahlungsbelastungen als hauptsächliches Gefährdungspotential werden durch den Kontrollbereich zum Rest der Anlage abgetrennt. Jegliches Personal muss während des gesamten Aufenthalts in diesem Bereich ein persönliches, regelmäßig geeichtes und gewartetes Dosimeter am Körper tragen, welches die aktuelle und die bisher

aufgenommene Strahlendosis misst und bei Überschreitung eine Warnung von sich gibt. Periodische ärztliche Untersuchungen und die Umgebungsüberwachung sind zusätzlich notwendig. Beim Betreten und Verlassen ist eine Strahlungsmessung am gesamten Körper und der Wechsel sämtlicher Kleidung einschließlich der Unterwäsche Pflicht. Diese Maßnahmen dienen zur Vorbeugung der Verschleppung. Dazu erhält jeder Mitarbeiter eine persönliche Schutzausrüstung, welche täglich einer speziellen Wäsche unterzogen wird. Diese besteht aus einem Schutzanzug, Handschuhen, Überschuhen und ggf. einer Atemschutzmaske. Radioaktive Anlagen werden baulich abgeschirmt, Abluft und Abwasser gezielt abgeleitet, kontrolliert und gereinigt. Viele der Strahlenschutzmaßnahmen wurden bereits im Rahmen der Betriebserlaubnis angewandt. (GRS, 2017 S. 18), (VDI, 1987 S. 34-36)

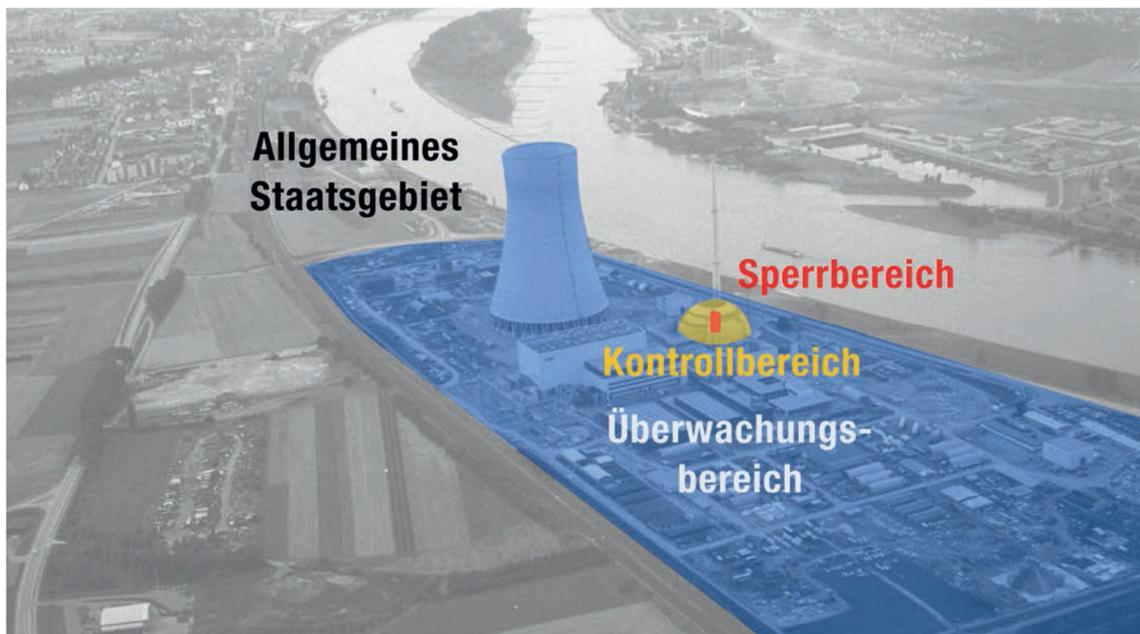


Abbildung 5: Sicherheitsbereiche (GRS, 2017)

## 2.6. ARBEITSBEREICHE

Nachdem alle Genehmigungen eingeholt worden sind und die Nachbetriebsphase beendet ist, kann der eigentliche Rückbau in der Restbetriebsphase beginnen. Folgende Hauptarbeitsgebiete (VDI, 1987 S. 26) treten dabei auf:

- Dekontamination
- Demontage
- Freimessung
- Aufbereitung / Konditionierung
- Transport
- Konventioneller Rückbau

Grundlegend sind einige Prinzipien beim Rückbau zu beachten. Die Abbaureihenfolge orientiert sich an der radiologischen Voruntersuchung, denn die Arbeiten sollen zum Schutz des Personals dosisoptimiert vonstattengehen. Gleichzeitig sollte ein optimierter

Materialfluss stattfinden können. Durch die gewählten Rückbauverfahren ist eine Reduzierung der Menge radioaktiven Abfalls anzustreben. Die terminliche Reihenfolge darf einen Abbau nachfolgender Bauteile nicht erschweren oder behindern. Ziel ist die Schaffung leerer und freigabefähiger Räume. (ARGE Stilllegung Biblis, 2016 S. 125-126) Der konventionelle Rückbau wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da es speziell um den Rückbau kontaminierter Materialien gehen soll.

### **2.6.1. DEKONTAMINATION**

Die Dekontamination erfolgt bei besonders kontaminierten Bereichen am noch integrierten Bauteil und soll die weitere Bearbeitung und Entsorgung des radioaktiven Abfalls durch Herabsetzung der Strahlung erleichtern. Gleichzeitig wird einer Verschleppung von abwischbarer Kontamination entgegengewirkt. Der Kontaminationsgrad bestimmt den benötigten Umfang der Maßnahmen. In extremen Fällen ist ein ferngesteuerter Einsatz erforderlich, um eine Gefährdung des Personals auszuschließen. Begleitende Dekontaminationsmaßnahmen werden durch einen ständig vor Ort tätigen Dekontaminationstrupp ausgeführt. Dazu zählen die Ausgabe, Reinigung und Instandhaltung der Kontrollbereichskleidung und der Betrieb, die Desinfektion und Dekontamination des Kontrollbereiches. Weiterhin müssen neben Beseitigungshilfsmitteln auch Transport- und Endlagerbehälter zur Weiterbenutzung von Kontamination befreit werden. (VDI, 1987 S. 34-36), (VDI, 1981 S. 19)

Mechanische Verfahren sind nur an gut zugänglichen Flächen anzuwenden. Beispielsweise durch Sandstrahlen, Bürsten, Schaben, Schleifen oder Absaugen werden Kontaminationen, welche sich durch Flüssigkeiten oder Gase auf Oberflächen abgesetzt haben, erfolgreich entfernt. Chemische Verfahren sind zur Anwendung an unzugänglichen Orten (z.B. in Rohren) bestimmt. Dekontaminationspaste, Säureschaum oder Beizmittel werden auf die Oberflächen aufgetragen und lösen beim Einwirken kontaminiertes Material ab. Die langen Einwirkzeiten können durch das Anlegen einer Spannung verringert werden. Selbst in das Material diffundierte Nuklide werden so gelöst. Die benötigte Elektrolytlösung verbraucht sich zwar sehr langsam und ist regenerierbar, muss aber an das zu lösende Material angepasst sein. Der Abtrag, egal ob als Span oder gelöst in Flüssigkeit, muss in Aufbereitungsanlagen abgefangen werden. (RWE Power AG, 2014 S. 84-86)

### **2.6.2. DEMONTAGE**

Vor der Demontage muss das abzubauende Anlagenteil stillgesetzt werden. Dazu bedarf es zuerst einer formalen Außerbetriebnahme, an welche sich die technische Stillsetzung anschließt. Dabei müssen die Bauteile entleert, druck-, strom- und spannungslos sein, damit diese rückwirkungsfrei von weiterbetriebenen Systemteilen getrennt werden können. (RWE Power AG, 2014 S. 74-75)

Die Demontage erfolgt nach Möglichkeit raumweise. Dabei werden zuerst die am meisten kontaminierten Bauteile ausgebaut. Für die Auswahl der Verfahren zur Zerkleinerung gilt folgendes Prinzip:

- Spanlose vor spanenden sowie spanende vor thermischen Verfahren!

Denn entstehende Partikel radioaktiven Materials bürden ein erhöhtes Risiko der Verschleppung von Kontamination. Die benötigte Größe der abgetrennten Bauteile ist abhängig von den nachfolgenden Bearbeitungsschritten. Stoffe, die der Endlagerung zugeführt werden sollen, sollten vorzugsweise auf die Größe ihrer Einlagerungsgefäße (meistens verschließbare Tonnen) zerlegt werden, um eine Nachzerkleinerung zu vermeiden. Für die restlichen Bauteile aus dem Kontrollbereich gilt die Größe der Gitterboxen, in welchen die Bauteilstücken zur Freimessung aufbewahrt werden. (VDI, 1981 S. 20)

Mechanische Verfahren der Zerkleinerung sind das Sägen mit Diamantkreis- oder Seilsägen, Fräsen, Hydraulik-Schneiden, Trennschleifen, Sprengen oder das Hydro-Abrasiv-Schneiden. Diese Techniken kommen meist beim Zerlegen von Betonbauteilen zum Einsatz. Hingegen nutzt man bei Metallen eher thermische Verfahren, wie autogenes Brenn-, Plasmaschmelz-, Lichtbogen- oder Laserstahlschneiden. Diese weisen eine höhere Schnittgeschwindigkeit und geringe Rückstellkräfte auf, weshalb die genannten Techniken für den fernbedienten Einsatz präferiert werden. (GRS, 2017 S. 21-22)

Bei allen Verfahren fallen Späne oder Partikel (sogenannte Aerosole oder Hydrossole) an, welche aufgefangen oder abgesaugt einer fachgerechten Entsorgung zugeführt werden müssen. Einige Varianten kommen bei beiden Materialgruppen zur Anwendung oder sind für den Einsatz unter Wasser prädestiniert, da dieses als Isolationsmedium das Personal vor Strahlung schützt. (VDI, 1987 S. 33)

### **2.6.3. AUFBEREITUNG / KONDITIONIERUNG**

Alle Materialien des Bestandsgebäudes und die durch Zerkleinerung entstandenen Sekundärabfälle können in drei Abfallgruppen (Krumpholz, 2016) eingeordnet werden:

- Endlagerung: Radioaktiver Abfall, welcher nicht ausreichend dekontaminiert werden kann, um die gesetzlichen Höchststrahlungsdosen zu unterschreiten
- Deponierung: Abfall, welcher konventionell deponiert werden kann, aber zu kontaminiert für eine Wiederverwertung ist
- Schadlose Verwertung: Reststoffe, welche bedenkenlos in den Rohstoffkreislauf zurückgeführt werden können



Abbildung 6: Entsorgungsschema (Krumpholz, 2016)

Die Aufbereitung dient zur Rückgewinnung der ausgebauten Materialien, indem diese abermals dekontaminiert werden, falls eine erfolgreiche Freimessung in Aussicht steht. Dies betrifft vor allem Bauteile, welche durch luft- oder wasserdampfgetragene Aktivitäten kontaminiert worden sind. Die bekannten Verfahren aus der Dekontamination und Zerkleinerung kommen in baulich abgeschirmten Bereichen mit spezieller Abluft- und Abwasserhaltung zum Einsatz. Diese Reststoffbehandlungszentren (RBZ) enthalten Wiegestationen, Hebezeuge, Tauchbecken, Material- und Personenschleusen, Hydraulikpressen, Trocknungsanlagen, Zementierstationen mit Materialsilos und radiologische Messeinrichtungen. Die abgetragenen Aktivitätsträger werden aufkonzentriert, um später effizienter transportiert und eingelagert werden zu können. Die gesäuberten Materialien können wegen der geringeren Strahlenbelastung günstiger weiterverarbeitet werden. Aus diesem Grund empfiehlt sich die Vor-Ort-Bearbeitung auf dem Betriebsgelände und eine umfangreiche Nutzung der vorhandenen Recyclinganlagen und Gebäude aus der Betriebsphase, da ein Transport der unbehandelten Stoffe oder eine Neuerrichtung von Gebäuden einen großen Kostenfaktor darstellen würde. In solchen Reststoffbehandlungszentren wird auch die Konditionierung durchgeführt, deren Aufgabe es ist, die nicht freigemessenen Bauteile endlagergerecht zu verpacken. Dabei sind Sicherheit und eine effektive Ausnutzung der Gebinde die obersten Gebote. Es stellt sich jedoch häufig die Frage, ob sich eine Zerkleinerung unter erhöhter Strahlenbelastung gegenüber der Verwendung zusätzlicher Gebinde lohnt. (VDI, 1987 S. 47-49)

Bei Konditionierungsmaßnahmen für Gase kommen Filter, Abscheider, Aktivkohle, Gaswäscher und Rekombinatoren zum Einsatz. Die Entfernung der Nuklide aus flüssigen Stoffen erfolgt mittels Verdampfer, Ionentauscher, Sedimentation, Fällung, Flockung, Filterung oder Kühltröcknung. Feste Stoffe werden zerteilt oder geschreddert, um dann

gewalzt oder gepresst zu werden. In endlagerfähigen Gebinden werden die konzentrierten Reste verpackt, verdichtet und mit Zement, Bitumen oder Kunststoff fixiert. Schwach radioaktive Metalle können eingeschmolzen und für die Herstellung von Fässern für die Endlagerung wiederverwendet werden. (VDI, 1981 S. 21)

Stark aktivierte Materialien müssen zuerst in Abklingbecken aufbewahrt werden, bis sich Strahlung und Wärmeerzeugung auf ein verarbeitbares Niveau gesenkt haben. Kontaminierte und aktivierte Stoffe werden mit geringer Dosisleistung in Stahlblechcontainern oder Gusscontainern mit den Abmessungen von 1,6 m x 1,7 m x 1,7 m verpackt. Dabei müssen alle Hohlräume verfüllt werden. Aktivierte Bauteile mit höherer Strahlungsrate sind in 16 cm starken, zylindrischen Gussbehältern mit einem Außendurchmesser von 1,06 m und einer Höhe von 1,50 m oder Gusscontainern mit 15 cm Wanddicke zu lagern. Alternativ sind auch interne Bleiabschirmungen mit bis zu 7 cm Dicke zusätzlich möglich. (VDI, 1987 S. 48)

#### **2.6.4. FREIGABE**

Im Kontrollbereich muss jeglicher Abraum nach Strahlenschutzverordnung freigemessen werden. Dazu wurde in der Stilllegungsgenehmigung ein Verfahren mit den zugehörigen Grenzwerten unter Aufsicht der Kontrollbehörden festgelegt. Die demontierten Bauteile werden je nach ehemaliger Nutzung und Einbauort dekontaminiert. Für die Bauteilchargen muss jeweils ein Antrag auf Freigabe gestellt werden. Anschließend erfolgt eine erste Orientierungsmessung in Form einer Oberflächenmessung, um die Aktivitätsverteilung zu ermitteln. Zur Freigabe ist das erfolgreiche Durchlaufen der Entscheidungsmessung notwendig. In seltenen Fällen finden Kontrollmessungen statt. Die Kontrollbehörde vergleicht die Messungen mit den Grenzwerten und gibt die Bauteile bei Einhaltung frei. Der gesamte Prozess ist vollständig zu dokumentieren. Abbildung 7 zeigt den schematischen Ablauf einer Freimessung. (E.ON, 2008)

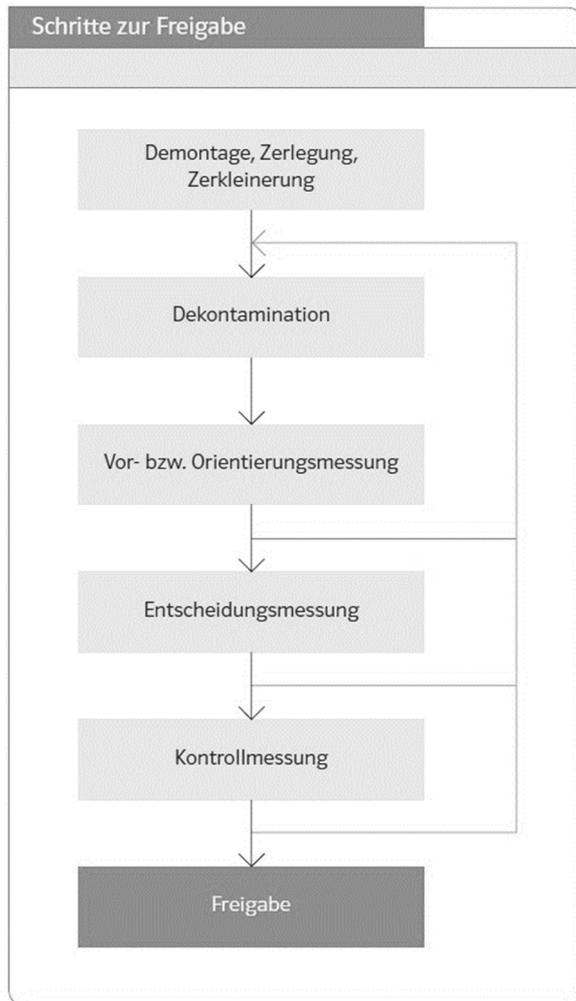


Abbildung 7: Schritte zur Freigabe (E.ON, 2008)

Zur Freigabe der Gebäudestrukturen des Kontrollbereiches aus dem Atomgesetz werden Böden ganzflächig und Wände und Decken im Rastermaß von circa einem Meter gemessen. Sollte eine Kontamination mit Überschreitung der Grenzwerte auftreten, sind zusätzliche Messungen durchzuführen, um den Bereich genauer einzugrenzen. Nach der Dekontamination sind die Flächen erneut ganzflächig zu messen. (VDI, 1987 S. 33)

### 2.6.5. TRANSPORT

Für die Wahl der Transportmittel und -wege ist die Bestandskonstruktion von entscheidender Bedeutung. Zunächst muss geprüft werden, ob vorhandene Hebezeuge und Transportanlagen tragfähig genug sind, um eine ausreichende Umschlagskapazität zur Verfügung zu stellen. Falls eine zusätzliche Montage von Transporteinrichtungen erfolgen muss, ist diese statisch nachzuweisen. Die Größe, das Gewicht und die Dosisleistung der einzelnen Güter muss in jedem Fall berücksichtigt werden, um auf den Transportwegen Verstärkungen, Erweiterungen von Durchbrüchen oder Abschirmungen einzurichten. Die großen und schweren Castorbehälter der Brennstäbe werden in der Regel mittels

Schienenverkehr nach Gefahrgutvorschrift transportiert. Selten kommen mobile Schwerlasttieflader zum Einsatz. Größere Mengen an Baustoffen gleicher Eigenschaften, beispielsweise der Abtransport des biologischen Schildes, kann mit Förderbändern realisiert werden. Auch zusätzliche Wandöffnungen sind keine Seltenheit, da es gilt, die Anzahl der Transportwege zu minimieren und diese zusätzlich kurz, einfach und übersichtlich zu halten. Die Handhabungsboxen werden per Handstapler bzw. Hochhubwagen bewegt. Da die zu dekontaminierenden Bauteile diskontinuierlich anfallen, müssen Pufferlager eingerichtet werden, um eine optimale Auslastung der Konditionierungs- und Verpackungsanlagen zu gewährleisten. Ein ausgearbeiteter Logistikbericht mit an den Bauablauf angepassten Veränderungen sollte im Erläuterungsbericht integriert sein. (ARGE Stilllegung Biblis, 2016 S. 126-128)

### 3. TRACKING DER BAUTEILE

Zur Nachverfolgung der demontierten Bauteile sollen Identifikationssysteme zum Einsatz kommen, welche möglichst ohne großen Aufwand und auf kostengünstige Art und Weise ein Erfassen des Materialflusses ermöglichen. Momentan werden Identifikationssysteme für Logistikzwecke in allen Branchen verwendet. Dabei unterscheidet man nach der Fähigkeit der Datenaufnahme, -transformation und -übertragung. Bei der manuellen Identifikation wird der Mensch als Werkzeug zur Datenaufnahme eingesetzt. Dieser erfasst optisch, also mit Hilfe seiner Augen, die zu verarbeitenden Beschriftungen, Displays, Lichtsignale oder einfach den Gegenstand als solchen. Die ausgelesenen Daten werden dann von ihm verarbeitet und per Hand, Touchscreen oder Tastatur in die Datenbank übertragen. Die Fehlerwahrscheinlichkeiten liegen hier beim 1000-fachen der maschinellen Datenübermittlung. Zur Datenaufnahme bei der rein automatischen Identifikation können optische, elektronische, magnetische oder mechanische Erkennungssysteme eingesetzt werden. Dabei ist kein Eingreifen eines Mitarbeiters notwendig, da die Informationen automatisch übermittelt und eingefügt werden. In der Regel werden sozio-technische Systeme eingesetzt, bei welchen ein Mitarbeiter mit einem mobilen Aufnahmegerät die Daten erfasst und welche dann automatisch weiterverarbeitet werden. Mit dieser Vermischung der beiden Grundvarianten erreicht man Flexibilität und gleichzeitig ein niedriges Fehlerniveau. (Lolling, 2003 S. 41-51)

#### 3.1. OPTISCHE IDENTIFIKATIONSSYSTEME

Optoelektrische Identifikationssysteme unterscheiden sich nach der Art der Leserichtung in 1D- und 2D-Systeme. Der Grundgedanke dabei ist die Codierung von Informationen mittels Schwarz-Weiß-Kontrasts. Mit Hilfe einer Lichtquelle wird ein Lichtstrahl auf den auszulesenden Datenträger geworfen und je nach Farbe verändert reflektiert. Ein Photosensor fängt diesen ein, wandelt die enthaltenen Signale in elektrische Impulse um und sendet diese Informationen an eine Auswertungseinheit weiter (vgl. Abbildung 8). Im Falle eines einzigen Sensors erfolgt eine serielle Datenaufnahme durch die Bewegung des Lichtstrahles über die Datenreihe. Einfacher ist die Verwendung einer Zeilenkamera, bei welcher die Fotozellen in einer Reihe angeordnet sind und damit eine parallele Aufnahme der Informationen ermöglicht wird. Die größte Aufnahmemöglichkeit erreicht man mit einer Matrixkamera, welche aneinander gesetzte Reihen von Sensoren besitzt und somit zur Informationsaufnahme in zwei Richtungen (2D) verwendet werden kann. Der erfasste Bereich wird dann mit einem Algorithmus nach Informationen abgesucht und wertet die erhaltenen Informationen anschließend aus. Als Fotozellen werden meistens CCD (Charge-Coupled Devices) -Sensoren verwendet, welche eine maximale Reichweite von circa 20 cm haben, Zusätzlich sind diese CCD-Sensoren kostengünstig herstellbar und sehr robust. Bei Fremdlicht oder großen Distanzen sind Laserscanner vorzuziehen. (Jünemann, et al., 1998 S. 299-304)

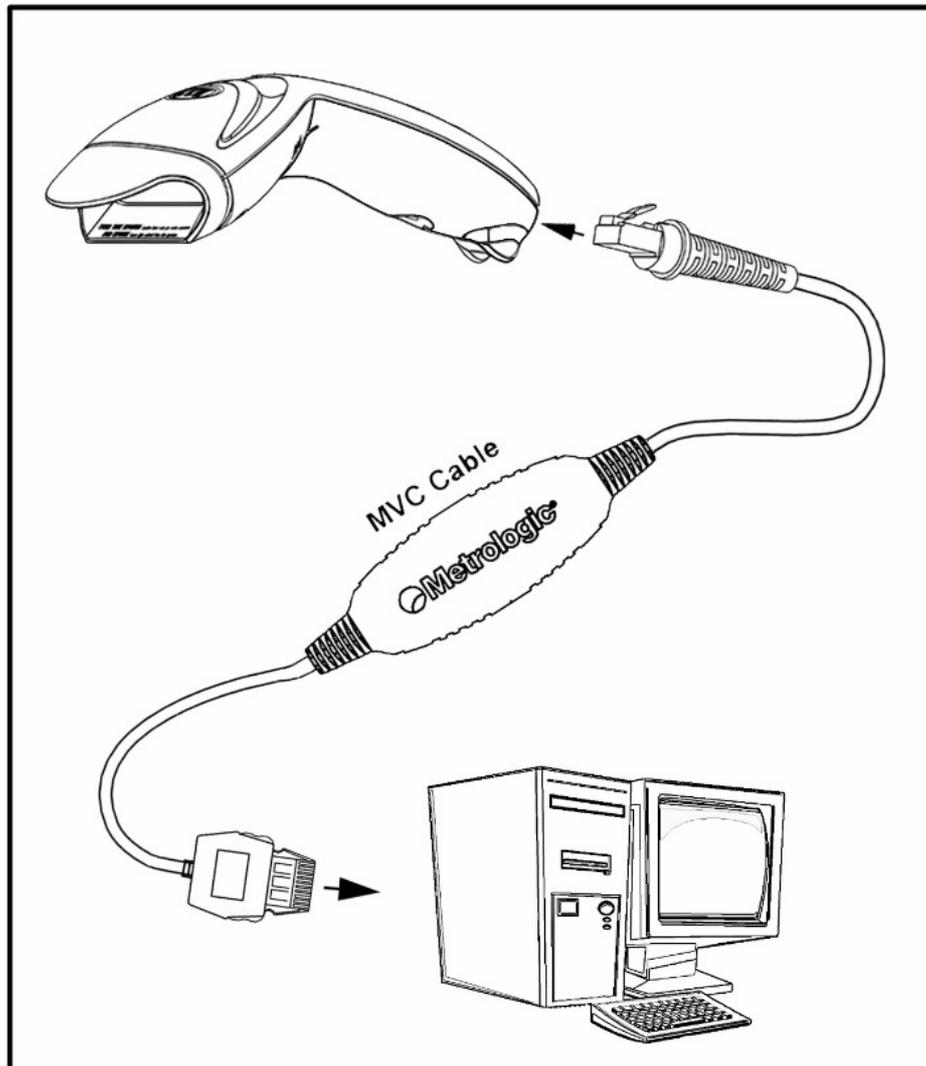


Abbildung 8: Einfacher CCD-Handscanner (Metrologic Instruments Inc., 2008)

### 3.1.1. OCR-SCHRIFT

Damit eine Maschine in der Lage ist die sogenannte optische Klarschrift (Optical Character Recognition) zu lesen, müssen fest definierte Erkennungsmerkmale vorliegen. Die Stilisierung dieser Zeichen besteht aus einer Normung in Form, Größe und Abstand. Dabei wurde bei der Festlegung dieser Faktoren darauf geachtet, dass auch Menschen die enthaltenen Informationen auslesen können sollen, was sich beispielsweise bei der Handhabung von Gefahrstoffen als positiver Sicherheitsfaktor auswirkt. Die schreibmaschinenartige OCR-B-Schrift, welche Zahlen, Groß- und Kleinbuchstaben und viele

Sonderzeichen beinhaltet, ähnelt dabei am meisten den lateinischen Buchstaben. (Lolling, 2003 S. 56-57)

```
OCR B:
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z
+ * # & % / ( ) = ? ! " $ { } [ ] \ . : ;
```

Abbildung 9: Beispiel OCR-B-Schrift (eigene Darstellung)

Zwar besitzt die vergleichsweise eckigere OCR-A-Schrift nur Großbuchstaben, Zahlen und wenige Sonderzeichen, hat dafür aber eine bessere Erkennungsrate beim Auslesen durch Maschinen. Als Erfassungsgerät eignen sich Reihen- und Matrixscanner. Zeilensensoren in der Form eines Stiftes erfordern ein genaues Aufsetzen des Lesegerätes auf den Datenträger. (Virnich, et al., 1992 S. 85-87)

### 3.1.2. BARCODE

Die allseits verwendeten Barcodes sind eine sehr kostengünstige Identifikationsmöglichkeit, da diese lediglich aus dunklen und hellen, parallel zueinander verlaufenden Streifen bestehen. Einfache Barcodes speichern ihre Informationen nur in der Breite der schwarzen Striche, welche durch gleichartige, helle Striche getrennt werden. Wird die Breite der Lücken variiert, handelt es sich um einen komplexen Barcode mit einer höheren Informationsdichte. Ausgedehnte, helle Ruhebereiche grenzen den Strichcode von umliegenden Signaturen ab, um das Auslesen zu erleichtern. Zur Bestimmung der Leserichtung wird das Datenfeld von einem Start- und einem Stoppzeichen eingeschlossen und erhält darunter ein optionales Textfeld in Klarschrift. (Martin, 2017 S. 523-525)



Abbildung 10: Selbst erstellter Barcode (TEC-IT, 2018)

Der Barcode kann mit stationären oder mobilen Scannern erfasst werden. Am flexibelsten sind Handscanner, welche mit CCD-Matrixkameras ausgerüstet sogar wenige Meter Scanreichweite besitzen. Die Datenübertragung kann entweder kontinuierlich über WLAN erfolgen oder erst beim Abstellen des Handgerätes in eine Dockingstation erfolgen. Die Daten werden dann an ein Hostsystem weitergeleitet, welches die Daten auswertet und in die entsprechende Datenbank einpflegt. Die Technik des Barcodes hat sich mittlerweile überbetrieblich bewährt. Dadurch gibt es eine Vielzahl an kostengünstigen Lesegeräten, welche eine sichere Datenerfassung ermöglichen. Die Kapazität des Barcodes ist auf circa 40

Zeichen beschränkt. Auch muss der Datenträger bei Beschädigung oder Änderung komplett erneuert werden. (Lolling, 2003 S. 61-66)

### **3.1.3. QR-CODE**

Der QR- bzw. Quick Response Code ist den 2D- bzw. Matrixcodes zuzuordnen. Damit können Daten in zwei Richtungen gespeichert werden, wodurch sich die Informationsdichte extrem erhöht. Mit einem Datenträger können bis zu 7089 numerische oder 4296 alphanumerische Zeichen kodiert werden. Ein 80 x 100 mm großer Strichcode kann auf einen 7 x 7 mm Matrixcode reduziert werden, ohne Speicherplatz zu verlieren. (Lolling, 2003 S. 69)

Die Daten werden binär über den Kontrast codiert. Dank der Verschlüsselung nach Reed und Solomon kann bei einer Beschädigung des QR-Musters von bis zu 30 % des gesamten Inhalts trotzdem ausgelesen werden. Dazu werden Hilfsinformationen in der Datenmatrix erzeugt, durch welche die Ausgangsdaten mit Hilfe des Verschlüsselungscodes wiederhergestellt werden können. Heutzutage gibt es 40 Versionen von QR-Codes, welche sich in Konfiguration und Größe unterscheiden. Eine platzsparende Variante ist beispielsweise der Micro-QR-Code, welcher simpler gestaltet ist, aber weniger Speicherkapazität besitzt. (Uitz, et al., 2012)

Der gesamte QR-Code wird auch als Symbol bezeichnet und besteht aus vielen einzelnen schwarzen und weißen Quadraten bzw. Modulen. Das „Codefeld“ ist von einem vier Modulen breiten Ruhebereich, der „Quiet Zone“, eingefasst. Innerhalb dieses Bereiches sucht das Lesegerät dann zuerst nach den drei in den Ecken befindlichen und separierten „Finder Patterns“, um die Orientierung, die Größe und den Winkel des Datenfeldes zu ermitteln. Es wird darauf geachtet, dass das spezielle Muster der „Finder Patterns“ nicht im eigentlichen Datenfeld vorkommt und so das Auslesen verfälschen könnte. Je nach Größe des Symbols werden zusätzlich „Alignment Patterns“ eingefügt, um Verzerrungen oder Krümmungen der Oberfläche zu ermöglichen. Die „Timing Patterns“ dienen zur Synchronisation der „Encoding Region“, auf welcher sich in speziellen Bereichen auch Informationen über die Version und das Datenformat befinden. Durch die oben genannten „Function Patterns“ kann der QR-Code bis zu 15-mal schneller ausgelesen werden als andere 2D-Codes. Die endgültige Verarbeitungsdauer hängt von der Decodiersoftware, dem verwendeten Rechner und der Druckqualität des Symbolen ab. Die Erfassung der Muster kann durch CCD-Matrixkameras im Stillstand oder in Bewegung erfolgen. Sogar das Erkennen mit Mobiltelefonen ist mit einer entsprechenden Software möglich. (Uitz, et al., 2012)

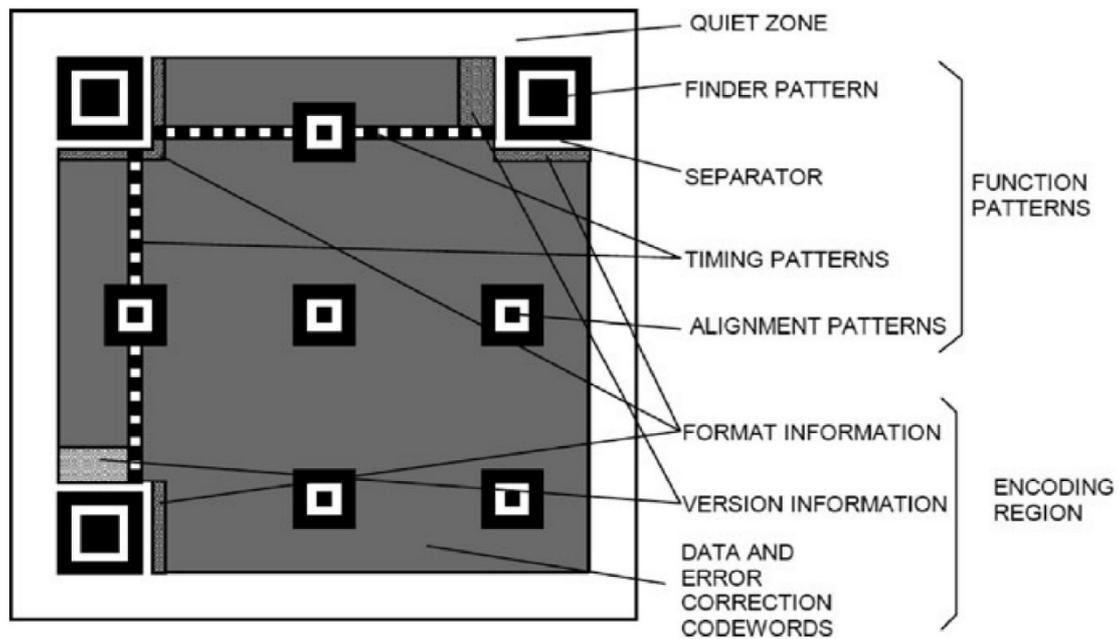


Abbildung 11: Aufbau eines QR-Codes (Uitz, et al., 2012)

## 3.2. ELEKTRONISCHE IDENTIFIKATIONSSYSTEME

### 3.2.1. RFID

Radio-Frequenz-Identifikation ist eine Identifikationstechnologie, bestehend aus einem Transponder und einem Erfassungsgerät, welches an eine verarbeitende Recheneinheit angeschlossen ist. Der Transponder besitzt einen Mikrochip mit integriertem Datenspeicher, dessen Inhalt entweder fest beschrieben oder frei programmierbar sein kann. Dieser wird mittels einer Kopplungseinheit (Antenne oder Spule) ausgelesen, indem das Lesegerät Radiowellen einer bestimmten Frequenz aussendet. Sobald diese auf einen passiven Transponder treffen, wird über eine Spule elektrische Energie für den Chip induziert. Dadurch meldet sich der nun aktive Transponder mit seiner Kennung und dann können je nach Speichertyp vorhandene Inhalte gelesen oder neue Daten geschrieben werden. Für die Rücksendung wird ein Teil der Energie in Kondensatoren gespeichert. Aktive Transponder besitzen eine zusätzliche Stromquelle für einen leistungsstärkeren Mikrochip, eine höhere Sendefrequenz und eine vergrößerte Sendereichweite. Semi-passive Transponder nutzen den zusätzlichen Strom nur für ihren Chip und nicht zum Senden. (Finkenzeller, 2006 S. 23-25)

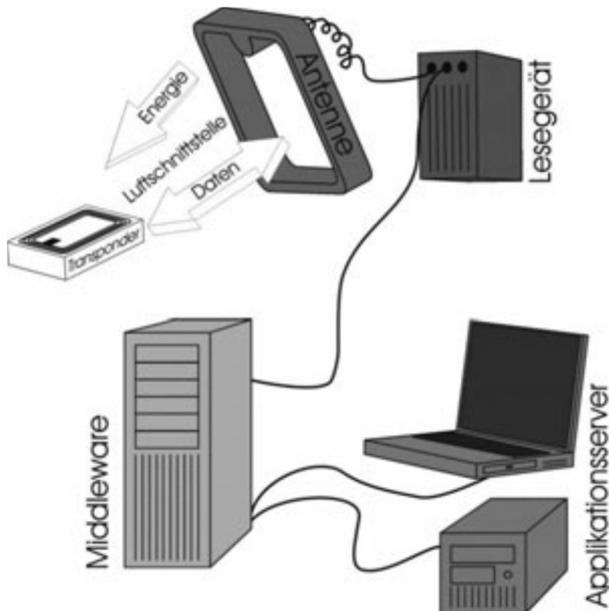


Abbildung 12: Prinzipieller Aufbau eines RFID-Systems (Jehle, et al., 2011)

Um das gleichzeitige Erfassen mehrerer RFID-Tags zu ermöglichen, kommen probabilistische und deterministische Antikollisionsverfahren zum Einsatz. Bei den deterministischen Antikollisionsverfahren ist die Erkennung aller Tags sichergestellt, da über einen Baumtraversierungsalgorithmus alle Seriennummern über eine Bereichssuche abgefragt werden. Dies ist allerdings sehr zeitintensiv und benötigt hohe Datenübertragungsraten. Durch den probabilistischen ALOHA-Algorithmus werden Antworten der Transponder in zufällig gewählten Zeiträumen gelesen und dann temporär stumm geschaltet. Dabei ist es dennoch möglich, dass zwei Transponder zur gleichen Zeit antworten und damit eine Kollision entsteht, da keine Kommunikation zwischen den Transpondern erfolgen kann. (Lampe, et al., 2005 S. 76-77)

Die Wahl der Sendefrequenz ist entscheidend für die Eigenschaften der Datenübertragung. Für Anwendungen in der Industrie, Forschung und Medizin sind lizenzfreie ISM (Industrial-Scientific-Medical) -Frequenzbänder freigehalten. Im Niederfrequenzbereich (LF) von 100 bis 135 kHz und im Hochfrequenzbereich (HF) um 13,56 MHz ist eine induktive Energieerzeugung möglich, welche allerdings nur eine geringe Sendereichweite im Nahfeld ermöglicht. Allerdings ist das Durchdringungsverhalten besonders zufriedenstellend. Um 868 MHz liegt der Ultrahochfrequenzbereich (UHF), welcher durch seine hohe Taktung die Anwendung schnellerer Mikrochips zulässt und große Datenmengen in kürzerer Zeit überträgt. Die induktive Spannung genügt den erhöhten Leistungen nicht mehr und es werden externe Energieversorgungen notwendig, wodurch eine Sendereichweite von bis zu 10 Metern erreicht werden kann. Bei Frequenzen im Bereich der Microwellen mit 2,45 oder 5,8 GHz kann die Reichweite noch etwas erhöht werden. So entsteht aber eine wesentlich höhere Anfälligkeit für Absorption durch Wasser und Reflektion durch Metall. (Finkenzeller, 2006 S. 169-171)

Induktive Transponder können bei senkrechter Ausrichtung zum Lesegerät nicht erfasst werden, da die Spule so keinen Strom durch das Magnetfeld erzeugen kann. Auch bei semi-passiven, elektromagnetisch gekoppelten Systemen kann eine Nichterfassung stattfinden, da die elektromagnetische Welle polarisiert ist und so nur in einer Ausrichtung die maximale Spannung erzeugt. Durch die Verwendung zirkulär polarisierter Antennen oder Antennen mit verschiedenen räumlichen Ausrichtungen kann eine Erkennung sichergestellt werden. Elektrische Anlagen und Maschinen oder andere Datensender können ein Rauschen auf einigen Kanälen verursachen. Dadurch erzeugte Bitfehler werden über eine Prüfsumme erkannt. Im Nieder- und Hochfrequenzbereich werden Radiowellen durch Metalle absorbiert, da der magnetische Fluss gestört wird. Demgegenüber reflektiert Metall im Ultrahochfrequenz- und Mikrowellenbereich. Dies kann zwar die Sendeleistung verstärken, aber durch Überlagerung auch zu lokalen Dämpfungen bis hin zur Auslöschung führen. In diesen Frequenzen absorbieren Wasser und organische Materialien sehr stark, wodurch es zu einem unvorhersagbaren Erfassungsbereich des Lesegerätes kommt. (Lampe, et al., 2005)

Der klare Vorteil der RFID-Technologie besteht in der Erfassung von einem oder mehreren Transpondern ohne Sichtkontakt und in beliebiger Orientierung. Die einzelnen Datenträger können eine hohe Anzahl an Informationen speichern und diese sehr schnell übertragen. Dabei sind diese durch variable Bauformen der Außenhülle vor Flüssigkeit, Verschmutzungen und geringen mechanischen Belastungen geschützt. Die vorhandenen Daten können ohne Neuerstellung des Datenträgers mobil verändert werden. Nachteilig wirkt sich die leichte Anfälligkeit der Radiowellen auf Wasser und Metall und die daraus resultierende Fehlerrate der Datenübertragung aus. Des Weiteren entstehen relativ hohe Stückkosten für aktive Transponder durch die zusätzliche Stromversorgung (Lolling, 2003 S. 83).

### **3.2.2. GPS**

Zur genauen Lokalisierung wäre auch der Einsatz des Global Positioning Systems (GPS) denkbar. Die GPS-Empfänger müssen zur Ermittlung der Position mit mindestens vier GPS-Satelliten in Verbindung stehen. Drei davon wären zur Bestimmung der Position ausreichend. Da aber die dafür benötigten Distanzmessungen über Signallaufzeiten ermittelt werden und die Uhren im Empfänger nicht genau mit denen in den Sendern übereinstimmen, wird ein vierter Satellit zur Erzeugung einer Redundanz benötigt, um den Fehler zu minimieren. (Schelkshorn, 2007)

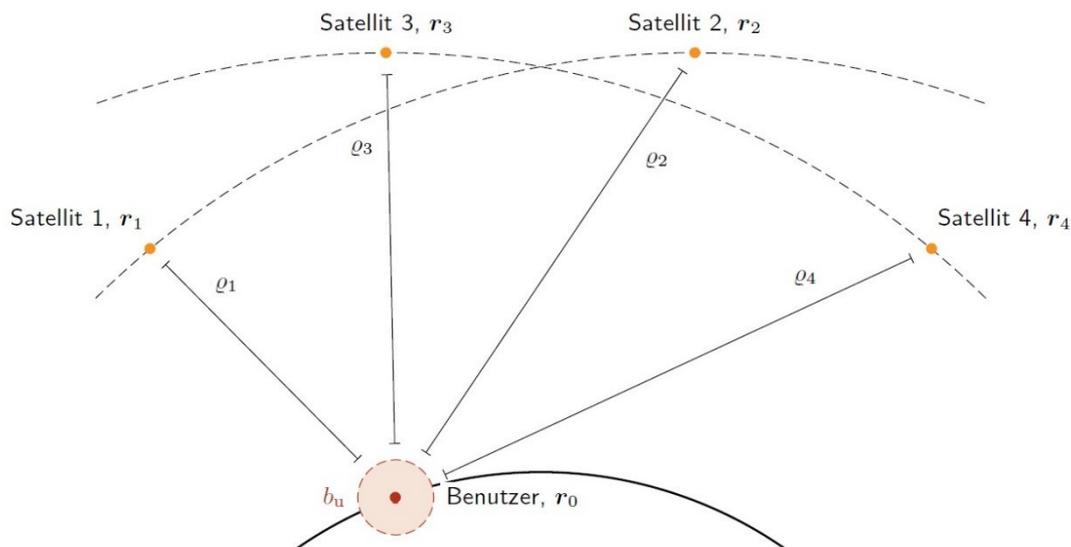


Abbildung 13: Beziehungen eines GPS (Schelkshorn, 2007)

In dieser Konstellation entsteht eine durchschnittliche Abweichung von 10 bis 15 Metern, welche mit steigender Anzahl an Satelliten zunehmend genauer wird. In Deutschland betreibt die Landesvermessung ein flächendeckendes Netz aus zusätzlichen ortsfesten Referenzstationen. Diese werden beim Differential-GPS benötigt, um die Genauigkeit zu steigern, da durch die bekannten Positionen der Fehler korrigiert werden kann. Durch den kostenpflichtigen Service, welcher auch im Nachhinein erfolgen kann, ist eine Genauigkeit von einigen Zentimetern möglich. (Donath, 2008)

### 3.3. ANWENDUNGSMÖGLICHKEIT IM RÜCKBAU NUKLEARER ANLAGEN

Zur Auswahl des praktischsten Systems erfolgt zunächst die Ermittlung aller Randbedingungen. Dabei fällt sofort der Einfluss der Kosten der Datenträger auf. Denn während des Rückbaus entstehen unzählige Bauteile, welche identifiziert werden müssen. Es sind preiswerte Marker von Nöten, welche im Idealfall wiederverwendet werden können. Gleichzeitig sollte das System flexibel und skalierbar sein, um sich auf die ständig wechselnden Umstände einstellen zu können. Der Identifikationsvorgang soll so schnell wie möglich ablaufen, um Zeit und damit Kosten zu sparen. Eine Automatisierung wäre von großem Vorteil, da diese sowohl Datensicherheit als auch die Einsatzfähigkeit in Bereichen mit hoher Dosisleistung mit sich bringt. Das Identifikationsmerkmal sollte trotz der auf einer Baustelle üblichen Einflüsse von Wasser, Dreck und Staub auslesbar sein.

Optische Identifikationssysteme besitzen einen klaren Kostenvorteil gegenüber den elektrischen, denn die Erstellung eines optischen Datenträgers aus bedrucktem Papier oder Folie ist wesentlich günstiger als ein Transponder mit einer Platine. Trotzdem ist bei der Wahl des Trackingsystems die RFID-Technologie die aktuell zu präferierende Lösung. Denn der entscheidende Pluspunkt ist die anpassungsfähige Datenaufnahme, welche ohne

Sichtkontakt und Personal auskommt. Dabei ist das gleichzeitige Erfassen mehrerer Objekte, sogar bei individueller Ausrichtung, in einem Senderadius von 10 Metern möglich. Außerdem ist die Fehlerquote sehr gering, da bei der elektronischen Datenübertragung eine Routine zur Überprüfung der fehlerfreien Datenübertragung angewandt wird. Das System kann auch an für Menschen gefährlichen Orten zum Einsatz kommen. Die Informationen können sicher im Inneren eines Schutzgehäuses aufbewahrt werden und sind folglich auch nach einer Oberflächendekontamination noch auslesbar. Bei Änderungen des Speicherinhaltes muss kein neues Etikett erstellt werden, sondern es kann ein schnelles Umschreiben per Handgerät erfolgen. Eine Wiederverwendung der Transponder bietet sich also an.

Nachteilig wirkt sich die Absorption oder Reflektion der Bauteile auf das RFID-Signal aus. Um diese Effekte so gering wie möglich zu halten, werden UHF-Transponder benötigt, welche eine eigene Energieversorgung voraussetzen und damit teurer und in ihrer wartungsfreien Einsatzdauer begrenzt sind. Die momentan forcierte Verbesserung der Batterietechnologie und ein zu erwartender Anstieg an Personalkosten machen die Nutzung der Transponder aber immer rentabler.

Weiterhin kann die Befestigung der Identifikationsmittel nicht auf der Oberfläche der Bauteile selbst stattfinden, da diese bei der Dekontamination vollständig gereinigt werden müssen, wobei die Datenträger zerstört werden würden. Bauteile mit sehr hoher Aktivität werden ferngesteuert zerlegt und sofort in dafür vorgesehen Gebinde eingeschlossen, sodass eine direkte Befestigung keinen Sinn ergeben würde. Deshalb ist es am praktikabelsten, die Bauteile an ihren Handhabungsboxen oder Gebinden zu markieren.

Das eigentliche Tracking der Bauteile ist nicht ortsgenau realisierbar. Eine GPS-Ortung ist innerhalb von Gebäuden nicht fehlerfrei möglich und nicht praktikabel, da die Empfängermodule im Vergleich zu den restlichen Identifikationsmarken besonders teuer sind. Erst beim Überlandtransport außerhalb des Betriebsgeländes kann das Transportfahrzeug mittels Zuordnung der Transponder zum Fahrzeug-GPS-Tracker verfolgt werden. Innerhalb des Kernkraftwerksgeländes werden verschiedene Zonen eingerichtet, welche nur durch RFID-Gates erreicht werden können. Beim Wechsel in eine andere Zone wird durch das jeweilige Tor die Position über einen automatischen Eintrag in der Datenbank erneuert.

Die RFID-Transponder bleiben in ihrer Funktion auch durch die radioaktive Strahlung unbeeinflusst. Dies bewies das Argonne National Laboratory in einem Forschungsversuch mit verschiedenen RFID-Tags. Diese befanden sich in einer Kunststoffhülle und beinhalteten zusätzlich einen Siegesensor und Platz für weitere Messeinrichtungen wie ein Dosimeter oder GPS-Empfänger (Chen, et al., 2008). Auch die Firma Alphasource nutzt erfolgreich RFID-Tags in Kernkraftwerken bei ihrem Produkt RFID-Toolsaver zur Nachverfolgung von Werkzeugen (Alphasource, 2018).

## 4. DIGITALISIERUNGSKONZEPT

„Der Begriff Building Information Modeling beschreibt [...] den Vorgang zur Erschaffung, Änderung und Verwaltung eines [...] digitalen Bauwerkmodells mithilfe entsprechender Softwarewerkzeuge.“ (Borrmann, et al., 2015 S. 4) Dabei ist die Digitalisierung der Daten unabdingbar. Des Weiteren gehört die Verlinkung der Datenmodelle und damit auch deren Interoperabilität zur BIM-Arbeitsweise. Dies ist essenziell für eine fehlerfreie Kommunikation unter den beteiligten Gewerken. Durch die Bereitstellung aller notwendigen Informationen mittels einer Verknüpfung der einzelnen Datenmodelle wird eine fachübergreifende Bearbeitung ermöglicht. Idealerweise werden bereits digitalisierte Informationen aus vorangegangenen Lebenszyklusphasen eines Bauwerkes verwendet. (Scherer, et al., 2014 S. V-VI)

Ziele der Digitalisierung des Rückbaus nuklearer Anlagen sind zum einen die Sicherheit in Bezug auf die fachgerechte Entsorgung der kontaminierten Bauteile durch Tracking und zum anderen die Optimierung der zu erwartenden Kosten durch vorherige Simulationen und regelmäßige Vergleiche zwischen dem Ist- und Soll-Zustand. Diese werden durch eine ausführliche Planung und kontinuierliche Anpassungsmaßnahmen erreicht. Nebenbei wird durch die Verbesserung des Arbeitsablaufes die Strahlenbelastung des Personals reduziert.

Für die Umsetzung eines umfassenden digitalen Planungsprozesses, muss die Interoperabilität zwischen vorhandenen Datenquellen und Softwareprogrammen sichergestellt werden. Dies gestaltet sich durch die Verwendung verschiedener proprietärer Datenformate der einzelnen Softwarehersteller problematisch und wird durch eine hohe Individualität der Bauvorhaben und der daran beteiligten Fachinstitutionen verstärkt. IFC (Industry Foundation Classes) als standardisiertes Austauschformat kann zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht ohne Bedenken verwendet werden, da zum einen das notwendige Datenschema noch nicht für alle Fachbereiche vollständig implementiert ist und zum anderen beim Import und Export der Modelle aufgrund einer unzureichend programmierten Schnittstelle noch zu viele Informationen verloren gehen. Deshalb ist es in der Regel notwendig, sich möglichst auf einen Softwarehersteller zu fokussieren, was sich in der Praxis als äußerst schwierig gestaltet und mit hohem Investitionsaufwand verbunden ist. Denn bei einer Umstellung der Programme müssen auch die Mitarbeiter des Unternehmens von Grund auf mit einer neuen Software vertraut gemacht werden. Dies verlangt Zeit und geschultes Fachpersonal, woraus enorme Kosten resultieren. Hinzu kommt, dass verschiedene Softwarehersteller nur in einzelnen Fachbereichen spezialisiert sind und damit nicht für jedes Teilgebiet ein passendes Programm anbieten.

Im Rahmen dieser Arbeit ist eine Strategie für den Einsatz der digitalen BIM-Methode im Unternehmen IPROconsult GmbH zu entwickeln. Dieses ist als Generalplaner vor allem in den Bereichen Planung und Überwachung von Rückbaumaßnahmen tätig. Um ein durchführbares Konzept des Digitalisierungsvorhabens zu ermöglichen, muss zunächst die Ausgangslage charakterisiert werden. Die Leitfragen dazu lauten:

- Welche Informationen liegen in welchen Datenformaten vor?
- Welche Software ist bereits vorhanden und mit welchen Datenformaten kann diese agieren?

#### **4.1. DATENQUELLEN**

Da zur Zeit der Errichtung deutscher Atomkraftwerke die BIM-Methodik noch nicht betrieben wurde, liegen auch keine semantischen Modelle aus der Planung der Anlagen in einem digitalen Format vor. Vereinzelt wurden durch die Betreiber 2D-Pläne oder sogar 3D-Modelle rein geometrischer Natur im Nutzungsverlauf erstellt. Es ist also relativ kompliziert einen geeigneten Anschluss für die digitale Endphase im Lebenszyklus eines Gebäudes zu finden. Daher wird es in den meisten Fällen nötig sein, neue vollständige Modelle zu erstellen beziehungsweise grafische Modelle zu BIM-ready-Modellen auszuarbeiten. Dies ist an einen erheblichen Aufwand gebunden, bringt aber gleichzeitig die Möglichkeit mit sich, ein Zentralmodell in einem gewünschten Dateiformat aufzusetzen. Es soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass für die weitere Bearbeitung ein ausführliches BIM-Modell vorliegt oder nachträglich erstellt wurde. Darin sind alle für die Rückbausimulation relevanten Daten erfasst. Anhand dieser Informationen kann unter Einhaltung der technischen und normativen Bedingungen ein Rückbaukonzept erstellt werden.

Des Weiteren soll es möglich sein, Informationen während der Abbauarbeiten zu ändern oder zu ergänzen. Vorrangig kommt dies bei der Zuordnung der RFID-Tags zu den zu verfolgenden Bauteilen zum Einsatz, aber auch wenn Strahlungswerte nach einer Dekontamination aktualisiert oder Elemente in mehrere Teilelemente zerlegt werden müssen.

#### **4.2. PLANUNGSSOFTWARE**

Die in dieser Arbeit verwendete Software ist nur ein Beispiel für eine der vielzähligen Kombinationen aus Programmen diverser Fachbereiche im Bauwesen. Dabei sind die benötigten Informationen für jedes Teilgebiet beständig, die Software hingegen austauschbar. Die genannten Programme stehen stellvertretend für den jeweiligen Aufgabenbereich, wie in der folgenden Grafik verdeutlicht wird:

**Architekturplanung**

Autodesk Revit

**Tragwerksplanung**

Dlubal RSTAB/RFEM

**Materialflussplanung**Siemens Tecnomatix  
Plant Simulation

Abbildung 14: Vorhandene Software (eigene Darstellung)

Zur Rückbauplanung soll das Gebäudemodell im proprietären Dateiformat der Software Autodesk Revit vorliegen. Das Koordinationsmodell fasst die Fachmodelle aller Gewerke zusammen, insbesondere der Architektur, der Tragwerksplanung und der technischen Gebäudeausrüstung. In Revit können den Elementen Parameter und damit Eigenschaften zugeordnet werden. Das Programm bietet Visualisierung bei geometrischen oder semantischen Änderungen in allen erstellten Ansichten, egal ob 2D oder 3D.

Bauteilkategorien und -typen sind besonders für die statischen Nachweise nötig, denn nach diesen wird beim Erstellen des Tragwerkmodells aus dem Architekturmodell gefiltert. Dabei weist man den architektonischen Bauteilen über eine Mapping-Tabelle ihre tragende Grundstruktur zu. So können alle Betonwände mit Wärmedämmung und Außenputz auf ihre tragende Schicht, beispielsweise eine 17,5 cm dicke Stahlbetonwand der Güte C25/30 reduziert werden. Zuvor wurden bei tragenden Bauteilen der Parameter „Tragwerk“ aktiviert. Durch diesen ergeben sich weitere Einstellmöglichkeiten. Neben den Dicken der Betondeckungen können die Tragfunktion gewählt und ein analytisches Modell als Berechnungsmodell erzeugt werden. Über ein Plugin der Berechnungssoftware RFEM oder RSTAB von Dlubal kann dieses Berechnungsmodell übergeben werden und die Nachweisführung in der externen Software kann beginnen. Dort ist es möglich, das System weiter zu verändern oder zusätzliche Lasten zu modellieren. Ergebnisse und Änderungen können nach der Berechnung zurück in Revit importiert werden.

Volumina, Dichten und daraus erzeugte Massen werden nicht nur für die Ermittlung der Lasten benötigt, sondern auch für eine Materialflussplanung über den gesamten Rückbauprozess. Dadurch kann die Dimensionierung der Maschinen im Reststoffbehandlungszentrum effizient ermittelt und die benötigten Hilfseinrichtungen samt Pufferzonen durch einen Flächenplan möglichst nah zu allen relevanten Abbauorten positioniert werden. Durch verschiedene Simulationen in der Planungsphase kann man so Optima verschiedener Einflussparameter wie Mannschaftsstärke, Lagerfläche oder Rückbauzeitraum erreichen. Im laufenden Rückbaubetrieb soll eine Prozessüberwachung ermöglicht werden. Engpässe im Materialfluss oder Überläufe der Lagerplätze detektiert das System und gibt Warnungen aus, wodurch eine Anpassung des Arbeitsablaufes erfolgen kann. Durch eine ständige Gegenüberstellung der Simulation und des realen Materialflusses

sind Probleme frühzeitig erkennbar. Gerade im Bauwesen passieren oft trotz detailgenauer Planung unerwartete Ereignisse, welche unverzüglich integriert werden müssen. Dies ist mit der Fabrikplanungssoftware Siemens Tecnomatix Plant Simulation möglich, welche Berechnungen einer dynamischen Materialflussplanung ausführen kann.

### 4.3. SIMULATIONSABLAUF

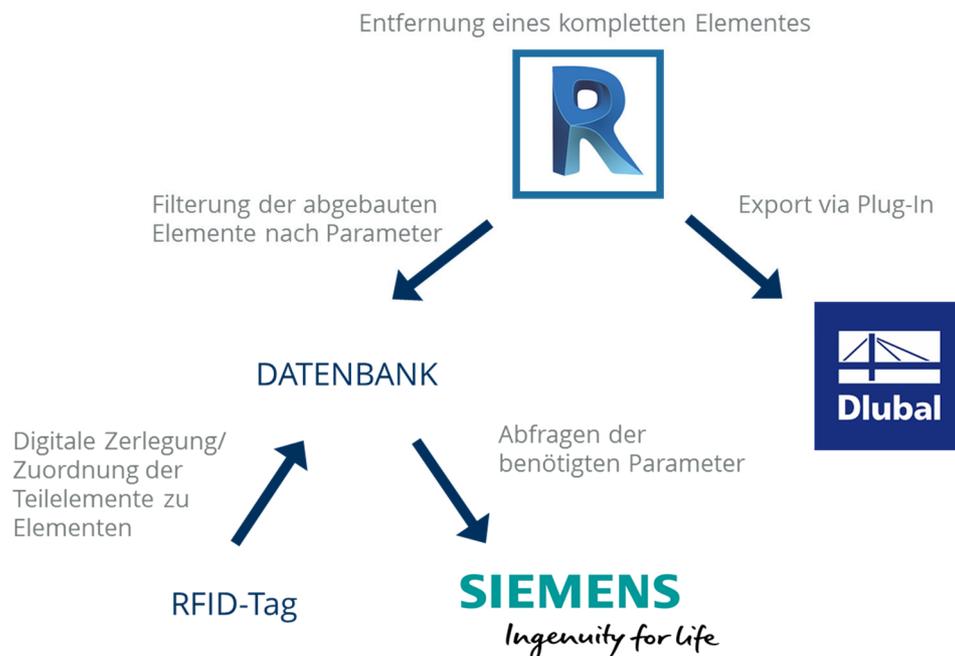


Abbildung 15: Simulationskonzept (eigene Darstellung)

Im virtuellen Architekturmodell in Revit können bei der Simulation des Rückbaus nur ganze Elemente entfernt werden. Wird etwa ein Wand-Element in kleine Würfel beziehungsweise Teilelemente zerlegt, verliert das Bauteil seine Semantik und wird als Volumenkörper deklariert. Damit wäre es bei der Erstellung des Tragwerkmodells nicht mehr als tragende Wandscheibe aus dem Architekturmodell herauszufiltern. Zusätzlich wird angenommen, dass beim Entfernen eines Teilelementes das zugehörige Element nicht mehr tragfähig ist und somit nicht mehr in die Tragwerksnachweise einfließt. Über das in Revit einspielbare Plug-In von Dlubal kann der Export der Tragstruktur und der Import der Ergebnisse sicher erfolgen. Damit ist die Nachweisführung für die restliche Gebäudestruktur nach jedem abgebauten Element möglich. Die einzelnen Bauteile müssen aber auch in sich selbst tragfähig und damit lager- bzw. transportfähig sein. Dazu werden diese gesondert aus dem Modell exportiert und berechnet.

Nachdem das Restgebäude statisch berechnet wurde, können nun die abgebauten Bauteile verarbeitet und digital zerlegt werden. Dafür ist es notwendig, eine Datenbank zu erstellen, in welcher die Teilelemente ihren Ursprungselementen zugeordnet werden. Zunächst filtert man die in der Simulation entfernten Bauteile samt der notwendigen Parameter aus Revit heraus. Danach können die demontierten Teilelemente über die ID des zugehörigen RFID-

Tags verknüpft werden. Während der Simulation sollen aus der jeweiligen Gesamtbauteilgeometrie mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen eine effiziente Zerlegung im Hinblick auf die zu nutzenden Gebinde und der Minimierung von Trennflächen erreicht werden. Durch vorgeplante Zerkleinerung der kontaminierten Materialien entstehen Einsparungen von Behältern, Transportvolumen, Verfüllmaterialien, Werkzeugverschleiß und Aero- beziehungsweise Hydrosolbildung. Neben dem offensichtlichen Kostenvorteil entsteht damit ein zusätzlicher Sicherheitsgewinn für das Personal.

In der Ausführung soll zu jedem Element in der Datenbank ein Zerlegevorschlag gespeichert werden. Nach der Demontage eines Teilelementes wird dieses in ein dafür vorgesehenes Transportbehältnis gepackt. Das Gebinde wird dann über einen realen RFID-Tag verfolgt. Die Tag-ID und eventuell abweichende Informationen müssen dann über ein Handlesegerät eingetragen werden. Vor allem die aktuelle Position durch das letzte RFID-Gate samt Zeitstempel ist ein ständig zu aktualisierender Datensatz.

Weiterhin scheint es naheliegend, die digitale Zerlegung einmalig für jedes abgebaute Bauteil durchzuführen und zu speichern, um diese Berechnung nicht ständig wiederholen zu müssen. Allerdings kann sich durch die Veränderung der Kontamination die Teilgröße für ein anderes Gebinde ändern.

Die benötigten Daten für die Materialflussplanung können anschließend durch gezielte Abfragen aus der Datenbank in das Plant Simulation übergeben werden. In diesem muss zuvor das Reststoffbehandlungszentrum modelliert worden sein. Anhand der Wertstromanalysen kann nun eine Änderung der Abbaureihenfolge, Lagerflächen, Durchsatzstärken usw. vorgenommen werden, um bei einem erneuten Simulationslauf verbesserte Ergebnisse zu erhalten.

Während des realen Rückbauprozesses müssen in regelmäßigen Abständen die tatsächlichen Fortschritte gespeichert werden, um diese als Sicherungskopie der Dokumentation beizufügen. Gleichzeitig sollten diese Arbeitsstände mit der Ausgangssimulation abgeglichen werden. Bei zu großen Differenzen können dann Maßnahmen ergriffen werden, um den Ablauf wieder zu optimieren. Alternativ kann auch ausgehend vom veränderten Zustand eine Simulation durchgeführt werden, um Prognosen für den neuen Ablauf zu treffen.

#### 4.4. EXEMPLARISCHE DURCHFÜHRUNG

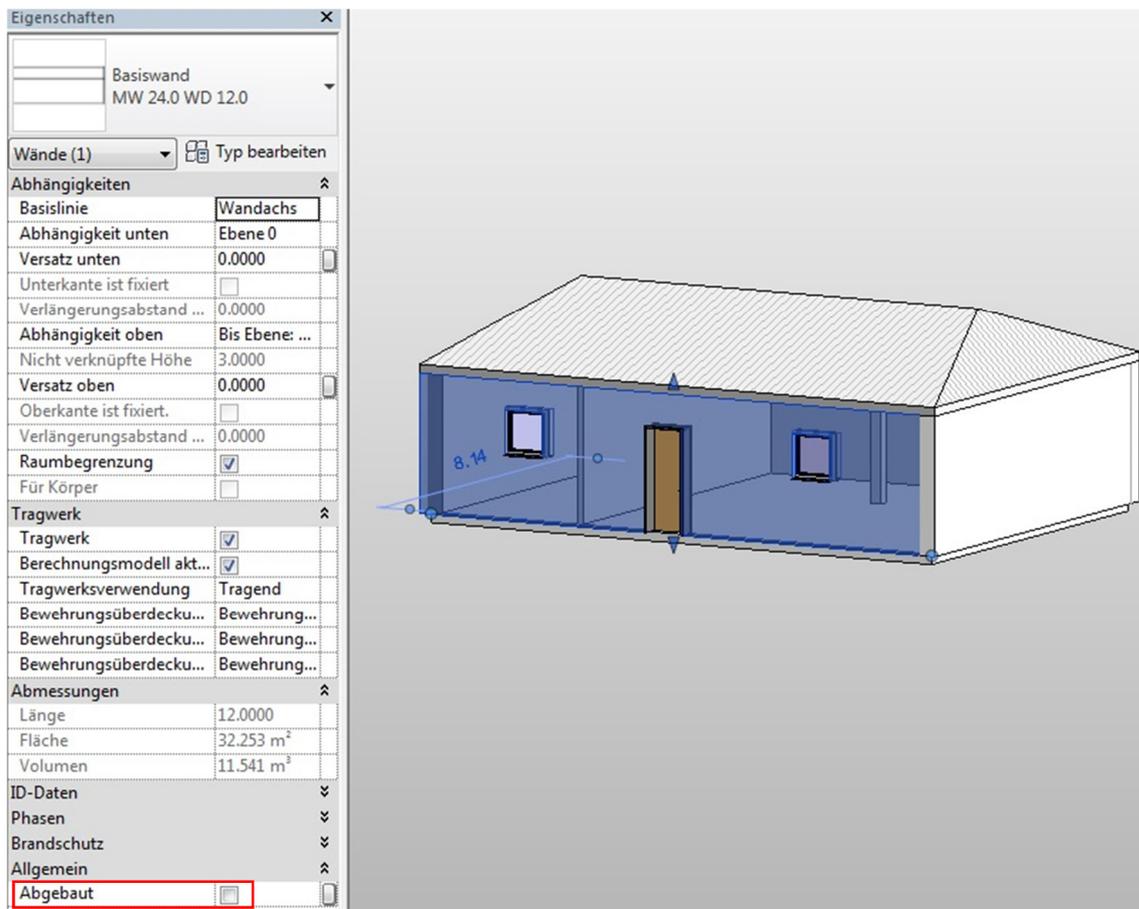


Abbildung 16: Beispielhaus in Revit (eigene Darstellung)

Um das Konzept auf Durchführbarkeit zu testen, wurde ein Beispielgebäude erstellt, welches nach der aufgestellten Strategie digital zurückzubauen ist. Dieser Prototyp soll lediglich den Zweck erfüllen, die gewünschte Interoperabilität der ausgewählten Programme zu belegen und besitzt aus diesem Grund nur sehr simple Eigenschaften.

Das Testgebäude wurde in Autodesk Revit erstellt und beinhaltet verschiedene Bauteile. Dazu gehören tragende und nicht tragende Wände, ein Dach, zwei Geschosdecken, ein Luftkanalsystem, zwei Fenster, eine Tür und eine Tragwerksstütze. Durch einen zusätzlich eingefügten Projektparameter namens „Abgebaut“ wird jedem Bauteil der Zustand im Rückbau zugewiesen. Wird dieser Parameter aktiviert, muss gleichzeitig der Parameter für Tragwerk deaktiviert werden, falls dieser aktiviert war.

Über ein grafisch programmiertes Skript mit Autodesk Dynamo werden zunächst alle Bauteile, die über den zusätzlichen Parameter verfügen, ermittelt. Danach werden die abgebauten Bauteile aus dieser Menge gefiltert und die zugehörigen, gewünschten Eigenschaften ausgelesen und in eine CSV-Datei (Comma-Separated Values) geschrieben.

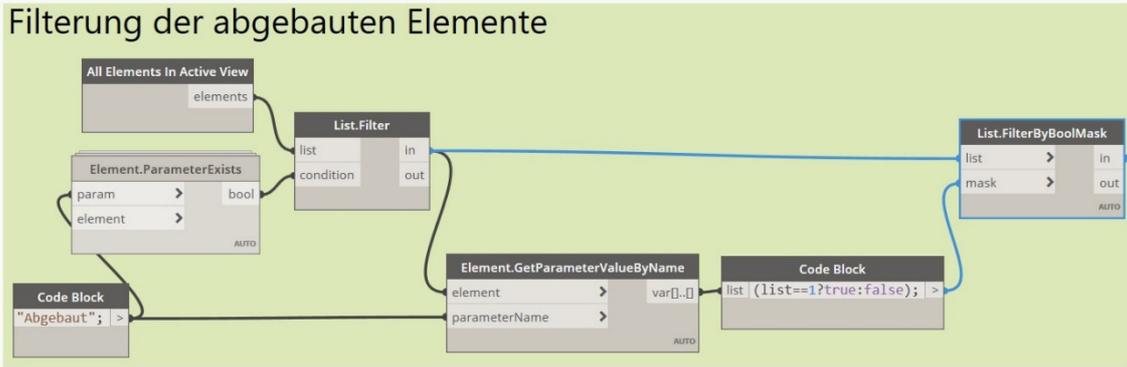
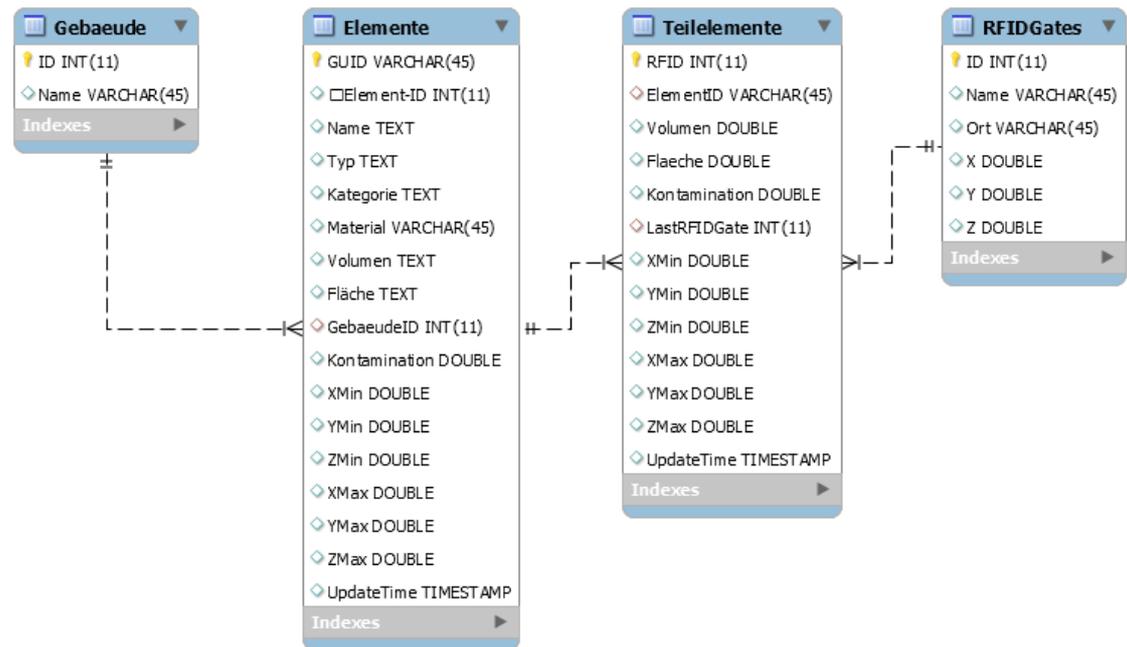


Abbildung 17: Filterung der abgebauten Elemente (eigene Darstellung)

Mit Hilfe des Programms MySQL Workbench wurde eine Datenbank auf einem SQL-Server erstellt. Diese relationale Datenbank besteht in der dritten Normalform aus vier Tabellen. Die abgebauten Elemente aus Revit werden mit ihren Eigenschaften in die Tabelle Elemente geladen. Die GUID (Global Unique ID) wird hier als Primärschlüssel verwendet. Über das Attribut „GebaeudeID“ wird das zugehörige Gebäude des Projektes referenziert, welches in der Tabelle „Gebäude“ abgelegt wurde.



```

1 SELECT Teilelemente.RFID, Teilelemente.ElementID, Elemente.Material, Teilelemente.Volumen, Teilelemente.Flaeche, Teilelemente.Kontamination,
2 abs(Teilelemente.XMax-Teilelemente.XMin) AS X, abs(Teilelemente.YMax-Teilelemente.YMin) AS Y, abs(Teilelemente.ZMax-Teilelemente.ZMin) AS Z
3 FROM schueler.Teilelemente
4 INNER JOIN Elemente ON Teilelemente.ElementID = Elemente.GUID;
    
```

RFID	ElementID	Material	Volumen	Flaeche	Kontamination	X	Y	Z
1	9b8d18dc-badc-4d88-ab03-7a4-72c14d3b-0005f2f8	KS	1	56	0.15	498	408	0
2	9b8d18dc-badc-4d88-ab03-7a4-72c14d3b-0005f2f8	KS	1	45	0.15	385	3	111

Abbildung 18: Datenbankstruktur und Beispielabfrage (eigene Darstellung)

Nun steht die Tabelle „Elemente“ zum Ausgelesen und Verarbeiten bereit. Dabei soll in der Simulation mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen jedes Element bestmöglich zerlegt und

den Teilelementen jeweils ein RFID-Tag zugeordnet werden. Da noch kein RFID-Testsystem zur Verfügung stand, wurden die Bauteile händisch zerlegt und mit einer RFID-Kennung versehen.

Die modifizierten Daten können nun zurück an den SQL-Server zurückgegeben werden. So entsteht die dritte Tabelle namens Teilelemente. Mit Hilfe des Attributs „ElementID“ werden die Teilelemente den GUIDs der Ausgangselemente zugewiesen. Die RFID-Kennung stellt den Primärschlüssel der Teilelemente dar. Des Weiteren erhält jedes Teilelement die Eigenschaft „LastRFIDGate“. Mit dieser werden die in der Tabelle „RFIDGates“ befindlichen Tore verknüpft und immer das zuletzt passierte Gate eingetragen.

Aus der erstellten Datenbank wird nun für jedes Teilelement der benötigte Datensatz ausgelesen. Besonders wichtig sind Massen, Volumen und Transportbehältnisse, sowie die Kontamination und die RFID-Kennung. Diese Daten können von MySQL Workbench als XML-Datei ausgegeben werden. Über diese erhält das Materialflussplanungsprogramm den nötigen Input, welcher dort als Tabelle dargestellt werden kann. Daten zu Art und Leistung der Transportmittel und Maschinen sind separat im Plant Simulation einzutragen.

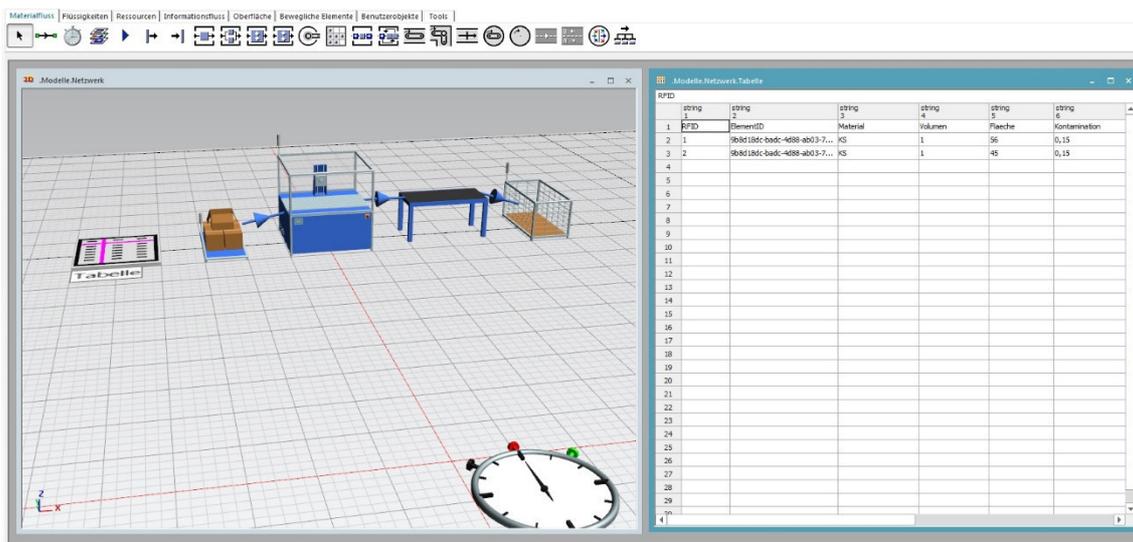


Abbildung 19: Einlesen der XML-Datei als Tabelle (eigene Darstellung)

## 4.5. DIGITALISIERUNG

Für die Digitalisierung wird als Grundlage eine Gesamtprozesskette des herkömmlichen Rückbauverfahrens benötigt. Diese wird durch das Verknüpfen der in Kapitel 2 recherchierten Informationen entworfen. Erst dann kann durch das Einbeziehen der Trackingmethoden und dem Simulationskonzept eine digitalisierte Prozesskette erstellt werden.

### 4.5.1. RÜCKBAUABLAUF

Während des Rückbaus treten verschiedene Akteure mit verschiedenen Rollen auf. Der Initiator des gesamten Vorhabens ist der Betreiber der Anlage, welcher hier als Auftraggeber fungiert. Als Auftragnehmer können mehrere Einzelunternehmen oder auch ein Generalübernehmer eingesetzt werden. Letztendlich müssen die Rollen des Planers, des Bauüberwachers und des Bauausführenden besetzt werden. Das Prüfen der Planung und die Überwachung der Umsetzung erfolgt durch die Genehmigungsbehörde, welche aus mehreren Institutionen zusammengesetzt ist.

Sobald das Ende der Laufzeit eines Kraftwerks ansteht, sucht sich der Betreiber geeignete Auftragnehmer zur Planung und Durchführung des Rückbauvorhabens. Diese entwickeln ein geeignetes Rückbaukonzept durch umfangreiche Voruntersuchungen, Orientierungsmessungen und Berechnungen. Die gegebenen Umstände und geplanten Vorhaben werden im Antrag auf Stilllegung (vgl. Kapitel 2.4.) festgehalten.

Nach der Antragsstellung nimmt der Betreiber die endgültige Abschaltung des Reaktors vor und leitet damit die Nachbetriebsphase ein, welche mit der Erteilung der Stilllegungsgenehmigung endet. Während dieser Zeit dürfen im Geltungsbereich der Betriebserlaubnis Vorbereitungsarbeiten zum Rückbau und die Herstellung der Brennstofffreiheit ausgeführt werden. Dazu zählt eine umfassende Vordekontamination, an welche sich eine erneute Orientierungsmessung anschließt. Des Weiteren werden nicht mehr benötigte Anlagenteile abgebaut und der damit geschaffene Platz zur Einrichtung von Lager- und Pufferflächen genutzt. Diese befinden sich in der Nähe des Reststoffbehandlungszentrums. Zusätzliche Hilfsanlagen zum Transport oder zur Einhaltung des Arbeitsschutzes gehören ebenso zu den Vorbereitungsmaßnahmen.

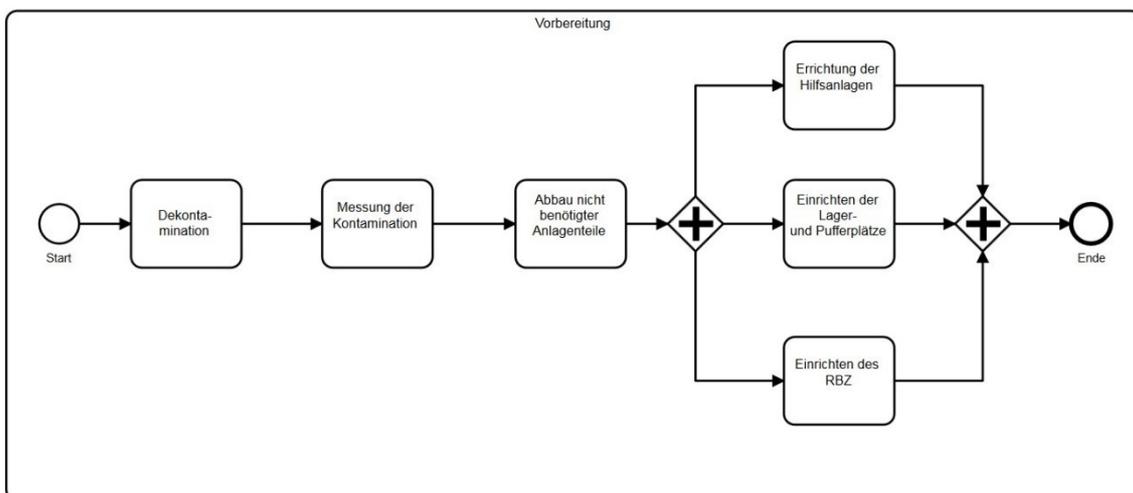


Abbildung 20: Vorbereitungsprozess zum nuklearen Rückbau (eigene Darstellung)

Nach ausführlicher Prüfung des Antrags durch die Genehmigungsbehörde initiiert die Stilllegungsgenehmigung die Restbetriebsphase. Nun darf der eigentliche Rückbau unter

fortlaufender Dokumentation der Auftragnehmer beginnen. Die Rückbaudokumentation wird durch die Genehmigungsbehörden bis zur Entlassung aus dem Atomgesetz überwacht.

Der Rückbau der nuklearen Anlagenteile erfolgt nach der im Sicherheitsbericht festgelegten Reihenfolge, welche in der Stilllegungsgenehmigung festgesetzt wurde. Jedes Bauteil wird bei der Demontage zuerst formell außer Betrieb genommen, um danach demontiert zu werden. Anschließend erfolgt der Transport zum Reststoffbehandlungszentrum. Hierbei ist die weitere Verarbeitung vom Kontaminierungsgrad abhängig, welcher bei der Orientierungsmessung ermittelt wurde. Unbelastete Bauteile kommen direkt zur Freimessung. Sollte die Freigabe nach dem festgelegten Verfahren erteilt werden, erfolgt der Abtransport und die Wiederverwendung als unbedenkliches Material im Ressourcenkreislauf.

Leicht kontaminierte Elemente, welche nicht unbedenklich im Alltag wiederverwendet werden können, sind nach dem Abtransport auf speziellen Deponien zu lagern. Handelt es sich hierbei um Metalle, ist die Verwertung für die Herstellung von Endlagergebinden möglich. Sollte die leichte Kontamination nur oberflächlich durch luft- oder wassergetragene Partikel entstanden sein, steht durch Aufbereitungsmaßnahmen eine Freimessung in Aussicht.

Für Bauteile mit hoher Dosisleistung kommt nur eine Endlagerung in Frage. Um diese so platzsparend und sicher wie möglich zu gestalten, erfolgt vorher die sogenannte Konditionierung. Dabei wird das zu lagernde Material komprimiert in Endlagergebinden verpackt, verfüllt und verschlossen, bevor es zum Endlager abtransportiert wird.

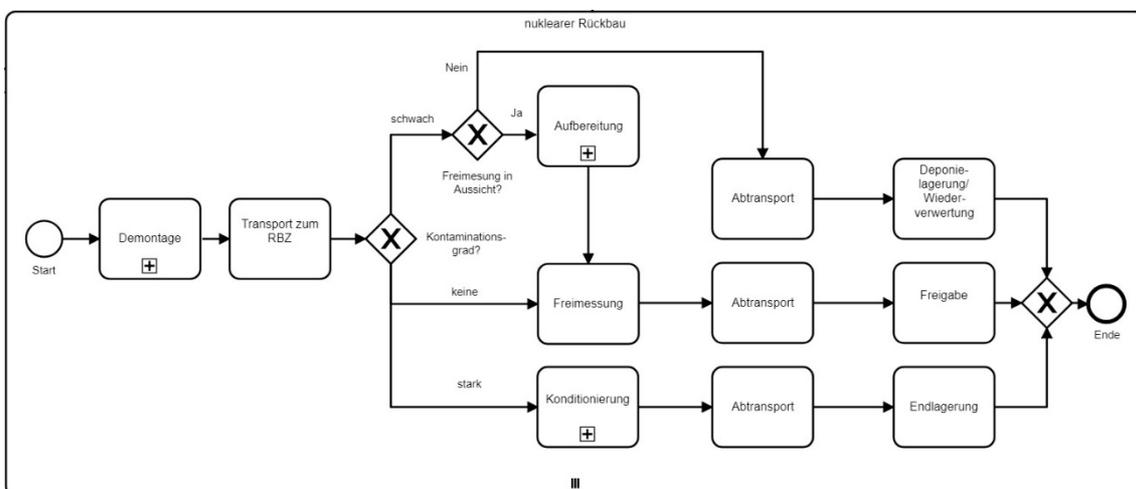


Abbildung 21: nuklearer Rückbau (eigene Darstellung)

Neben dem Rückbau der nuklearen Bereiche wurden parallel nicht mehr benötigte Gebäude auf dem Betriebsgelände auf konventionelle Art und Weise abgebaut. Sind alle kontaminierten Bestandteile aus dem Kontrollbereich entfernt, werden die zurückgebliebenen Gebäudestrukturen freigemessen und können damit aus dem Atomgesetz entlassen werden. Nun kann auch hier der konventionelle Rückbau stattfinden, welcher durch die Freimessung des Geländes die so genannte „grüne Wiese“ hinterlässt.

Eine Gesamtansicht der Prozesskarte ist auf der folgenden Seite zu finden und veranschaulicht den soeben beschriebenen Rückbauablauf detailliert.

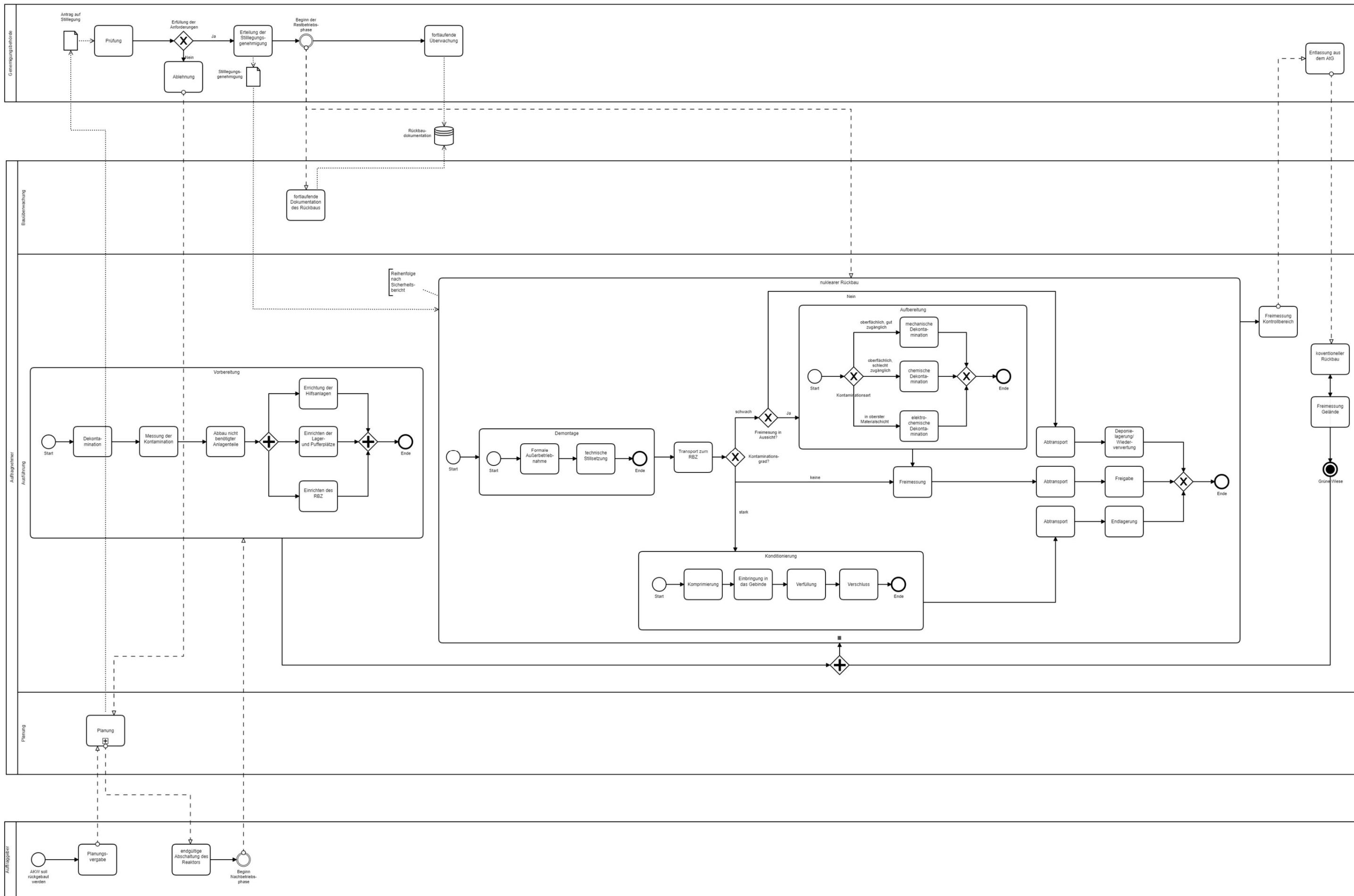


Abbildung 22: Prozesskette zum Rückbauablauf (eigene Darstellung)

## 4.5.2. DIGITALISIERTE PROZESSKETTE

Das ausgearbeitete Simulationskonzept kann nun in die Prozesskette des bisherigen Rückbauverfahrens integriert werden. Durch die Möglichkeit der vorherigen Simulation des Rückbaus können schon während der Planung später auftretende Fehler ermittelt werden. Zur Bestandsaufnahme gehört ab sofort die Erstellung des BIM-Modells. Auf dieser Grundlage wird dann in der Detailplanung wie gewohnt nach ingenieurtechnischem Verstand und gesetzlichen Vorgaben ein sinnvoller Rückbauablauf entworfen. Nachfolgend findet der virtuelle Rückbau zur Überprüfung des Vorgehens statt. Dabei wird für das Restgebäude und die abgebauten Bauteile wie in Kapitel 4.3. vorgegangen. Am Ende der Simulation können die Ergebnisse ausgewertet und bewertet werden. Falls der Ablauf fehlerhaft ist, kann durch eine Änderung in der Detailplanung eine Optimierung erzielt werden, bis die Resultate zufriedenstellend sind. Mit der ermittelten Vorgehensweise kann nun der Antrag auf Stilllegung einer kerntechnischen Anlage ausgearbeitet und eingereicht werden. Das endgültige Simulationsmodell einschließlich der entstandenen Dateien und Datenbank wird auf einem Datenspeicher hinterlegt und kann während der Arbeiten jederzeit abgerufen werden.

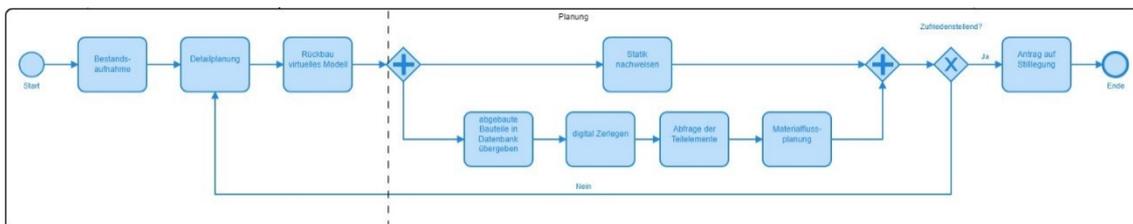


Abbildung 23: Digitalisierter Planungsprozess (eigene Darstellung)

Auch die favorisierte Trackingmethode aus Kapitel 3.3. kann in die bestehende Prozesskette eingefügt werden. Dazu wird nach der Demontage der Bauteile der Task „RFID-Zuordnung/fortlaufendes Tracking“ eingefügt. Dieser steht für die Zuordnung des Tags und veranlasst den Beginn der ständigen Aktualisierung des zuletzt passiertenen RFID-Gates. Die so generierten Informationen werden auf dem Datenspeicher der Rückbaudokumentation abgelegt. Die Bauüberwachung hat nun die Aufgabe in regelmäßigen Abständen die Rückbaudokumentation mit dem letzten Simulationsmodell zu vergleichen, um eventuelle Unstimmigkeiten aufzudecken und beheben zu können.

Auf der folgenden Seite ist die vollständige Prozesskette zu sehen. Die blau markierten BPMN-Elemente verdeutlichen die hinzugefügten Änderungen der Ausgangsprozesskette.

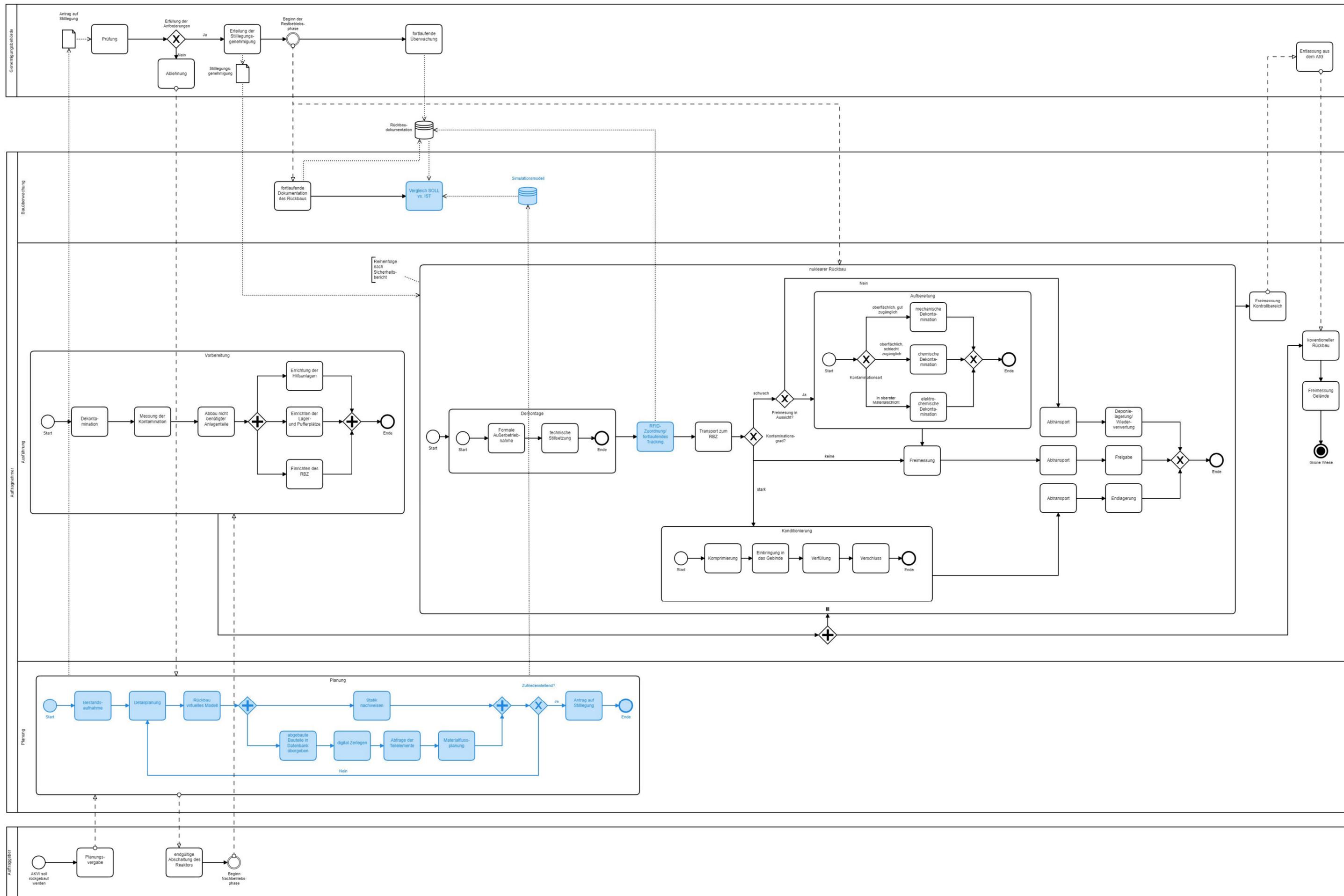


Abbildung 24: Digitalisierte Prozesskette (eigene Darstellung)

## 4.6. BEWERTUNG

Dank des Simulationskonzeptes kann der Rückbau schon in der Planungsphase iterativ optimiert werden und ist notfalls auch während der Ausführung anpassbar. Das Trackingsystem ermöglicht die automatisierte Dokumentation der Aufenthaltsorte der Bauteile und lässt Informationsabfragen und -änderungen über einen RFID-Tag am gewählten Objekt zu.

Das zentrale Element ist der SQL-Server, auf dem alle wichtigen Daten für den Materialfluss gespeichert werden. So können verschiedene Anwendungen wie die digitale Zerlegung, die RFID-Zuordnung und das Materialflussprogramm nacheinander auf diesen zugreifen und die benötigten Informationen abgreifen.

Maßgebenden Einfluss auf den Informationsfluss nimmt die Zerlegung der Bauelemente außerhalb von Revit, um den Erhalt der Semantik zu gewährleisten. An dieser Stelle weicht der virtuelle Rückbau etwas von der Realität ab. Trotzdem wird der Informationsfluss sichergestellt, da die Zerlegung nicht direkt am Gebäude, sondern in der Datenbank stattfindet. Die Rentabilität des Konzeptes erreicht erst ihr volles Ausmaß, wenn bereits vorhandene BIM-Modelle einbezogen werden können, da deren Erstellung nur für die Anwendung im Rückbau verhältnismäßig aufwendig ist.

## **5. SCHLUSSBETRACHTUNG**

### **5.1. ZUSAMMENFASSUNG**

Die Energiefreisetzung findet ausschließlich im Kontrollbereich von kerntechnischen Anlagen statt. Nach deren Betriebsende können die nuklearen Überreste entweder sicher eingeschlossen oder sofort zurück gebaut werden. Das gesamte Vorhaben unterliegt Regelungen aus dem Atomgesetz und der Strahlenschutzverordnung. Das oberste Ziel ist die Freimessung der Materialien zur Wiederverwertung im Stoffkreislauf, um so wenig wie möglich Endlagervolumen zu generieren. Dabei besitzt der Strahlenschutz von Personal und Umwelt die höchste Priorität. Grundsätzlich werden die Bauteile zuerst dekontaminiert und dann möglichst ohne Erzeugung von Sekundärabfällen demontiert. Nach dem Transport zum Reststoffbehandlungszentrum werden sie verarbeitet und einer weiteren Nutzung oder Endlagerung zugeführt.

In der Logistik kommen schon länger Identifikationssysteme zum Einsatz. Je nach Einsatzzweck stehen optische und elektrische Systeme zur Verfügung. OCR-Schrift, Bar- und QR-Codes sind sehr kostengünstig, da die Daten nur aufgedruckt werden müssen, damit ein Scanner diese erfassen kann. GPS oder RFID benötigen teure, elektrotechnische Komponenten samt Energiezufuhr, ermöglichen aber eine flexible Pulkerkennung der Identifikationsträger. Man muss den Kostenvorteil der optischen gegen den Automatisierungsvorteil der elektronischen Trackingsysteme abwägen.

Durch die Analyse der vorhandenen Datenquellen und Softwaresysteme der IPROconsult GmbH wurde eine Strategie zur virtuellen Simulation eines Rückbauprojektes erstellt. Dabei mussten vor allem die Interoperabilität der einzelnen Programme untereinander berücksichtigt werden, wodurch die Notwendigkeit einer Datenbank ermittelt wurde. Das Konzept konnte nach erfolgreicher Erprobung in die zuvor erstellte Prozesskette des konventionellen Rückbaus von Kernkraftwerken integriert werden. Diese entstand durch Verknüpfen der einzelnen Arbeitsbereiche und Genehmigungsschritte aus Kapitel 2. In die digitalisierte Prozesskette floss gleichzeitig die Anwendung des gewählten Trackingsystems ein.

### **5.2. ERGEBNISSE DER ARBEIT**

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen muss mit omnipräsenter Vorsicht vorstattgehen. Glücklicherweise ist das Verhältnis von radioaktiv belasteten Bauteilen im Vergleich zum Gesamtbauteilvolumen sehr gering, da je nach Reaktorart bei der nuklearen Energiefreisetzung nur der Kontrollbereich kontaminiert wird. Somit ist lediglich das Innere des Reaktorgebäudes speziell zurückzubauen und zu entsorgen. Außerdem sind über 99 % der Radioaktivität schon mit der Herstellung der Brennstofffreiheit vor dem Beginn des Rückbaus entfernt wurden. Betreiber und Aufsichtsbehörden achten darauf, die Stilllegung so schnell wie möglich durchzuführen, um eventuellen Gefahren vorzubeugen. Dabei gibt es

strenge Auflagen in allen Bereichen und eine allgegenwärtige Überwachung des Rückbaus, deren Einhaltung ausnahmslos dokumentiert und von Seiten öffentlicher Institutionen geprüft wird. Eine händische Aufnahme der benötigten Informationen in dezentralen Ablageorten birgt ein großes Fehlerpotential und erfordert hohe Personalkosten.

Die Digitalisierung des Rückbaus von Gebäuden ist gerade beim Umgang mit Gefahrenstoffen von großem Vorteil für Mensch und Natur. Denn es wird mehr Sicherheit bei der Verwertung der belasteten Bauteile ermöglicht, da durch ein Identifikationssystem jederzeit der genaue Herkunfts- und Lagerort bestimmt werden kann. Das Konzept des Trackings durch RFID-Tags ist durch seine Skalierbarkeit für unterschiedlichste Projektgrößen einsetzbar. Neben der Unempfindlichkeit gegenüber Dreck und Wasser, kann die Datenaufnahme automatisiert stattfinden, wodurch die Fehleranfälligkeit und die Anzahl an erforderlichem Personal minimiert wird.

Des Weiteren ist eine bessere Planung im Vorfeld möglich, welche sich auch problemlos an unvorhergesehene Zwischenfälle im Bauablauf anpassen lässt. Das BIM-Modell wird nicht nur digital begleitend zurückgebaut, sondern kann schon in der Planungsphase simuliert werden. Über einen iterativen Änderungsprozess wird die Optimierung des Ablaufes ermöglicht.

Eine Anknüpfung an bestehende BIM-Daten ist aufgrund des Alters vieler Kernkraftwerke noch nicht möglich. Aber auch die direkte Nutzung neu erstellter Modelle fällt schwer, da die Kompatibilität verschiedener proprietärer Datentypen nicht immer gegeben ist. Mit der fortschreitenden Entwicklung von IFC sollte dieses Problem aber in ein paar Jahren umgangen werden können.

### **5.3. AUSBLICK**

Da nun eine digitale Verarbeitung der Daten gegeben ist, kann beispielsweise die iterative Planung automatisiert werden. Denkbar sind auch Vorhersagemodelle zu Zwischenfällen im Bauablauf. Diese könnten beispielsweise mittels „supervised machine learning“ aus bereits vollendeten Rückbaumaßnahmen erkannt werden. Dazu wären im Vorfeld Analysen und Systemidentifikationen aller abgeschlossenen Projekte nötig. Mit Hilfe künstlicher Intelligenz könnte in Zukunft das Optimierungspotential für einen wirtschaftlichen Rückbau weiter ausgeschöpft werden. Denn bei der Wahl der richtigen Verfahrensweise für kontaminierte Bauteile kann eine gut trainierte Maschine, die schnell und automatisiert Anweisungen ausgibt, aufwändige Analysen per Hand ersparen.

In den nächsten Jahren kommt durch den deutschlandweiten Atomausstieg ein gewaltiges Auftragsvolumen zum AKW-Rückbau auf. Dieser wird sich ab 2022 noch mindestens bis 2037 hinziehen, wenn der Rückbau planmäßig verlaufen sollte. Danach ist diese Thematik allerdings noch lange nicht zu Ende. Neben den unzähligen Kernkraftwerken in Europa und auf der ganzen Welt entstehen immer wieder Forschungseinrichtungen mit Kernreaktoren, welche nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer oder durch die Nutzung neuer

Forschungsmethoden stillgelegt und zurückgebaut werden müssen. Dann allerdings unter direkter Zuhilfenahme der während des Lebenszyklus entstanden Modellinformationen. Selbst wenn die letzte nukleare Anlage wieder zur „grünen Wiese“ geworden ist, müssen zum Schluss die teilweise kontaminierten Reststoffbehandlungszentren stillgelegt werden.

Was dann noch bleibt ist das weltweite Endlagerproblem, welches hoffentlich in Zukunft gelöst werden kann, wobei Digitalisierung und Zusammenarbeit einzelner Fachdisziplinen, wie in der BIM-Methodik beschrieben, unerlässlich sind.

---

## LITERATURVERZEICHNIS

**Alphasource. 2018.** RFID Nuclear Solutions. [Online] Alphasource Innovative Technologie Solutions, 2018. [Zitat vom: 7. 11 2018.] <http://www.rfidnuclear.com/>.

**ARGE Stilllegung Biblis. 2016.** *Gutachten zum Antrag auf Stilllegung und Abbau nach § 7 Abs. 3 AtG (A022/12)*. Biblis : s.n., 2016.

**BGE, Bundesgesellschaft für Endlagerung. 2018.** PM 01/18 Fertigstellung des Endlagers Konrad verzögert sich. [Online] BGE, 08. 03 2018. [Zitat vom: 03. 01 2019.] <https://www.bge.de/de/pressemitteilungen/2018/03/pm-0118-fertigstellung-des-endlagers-konrad-verzoegert-sich/>.

**BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 2016.** *Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen und Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes, RS Handbuch 3-73*. Bonn : Bundesanzeiger Amtlicher Teil, 2016.

—. **2015.** *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke*. Bonn : Bundesanzeiger Amtlicher Teil, 2015.

**Borrmann, Ande, et al. 2015.** *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015.

**Büdenbender, Martin. 2009.** *Atomausstieg in Deutschland: Ein zukunftsfähiger Sonderweg im europäischen Kontext?* Münster : Instituts für Genossenschaftswesen der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 2009.

**Chen, Kun, Hanchung, Tsai und Lui, Yung. 2008.** *Development of the RFID system for nuclear materials management*. Argonne : Eigenverlag, 2008.

**DAtF, Deutsches Atomforum e.V. 2013.** *Stilllegung und Rückbau von Atomkraftwerken*. Berlin : Eigenverlag, 2013.

**DAtF, Deutsches Atomforum e.V. und Volkmer, Martin. 2013.** *Kernenergie Basiswissen*. Berlin : Eigenverlag, 2013.

**Donath, Dirk. 2008.** *Bauaufnahme und Planung im Bestand: Grundlagen - Verfahren - Darstellung - Beispiele*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008.

**E.ON, Kernkraft GmbH. 2008.** *Stade: Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks - vom Kernkraftwerk zur Grünen Wiese, 3. Auflage*. Hannover : Eigenverlag, 2008.

**EnBW Kernkraftwerke GmbH. 2014.** *Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des Kernkraftwerks Neckarwestheim Block I (GKN I) - Sicherheitsbericht*. Obrigheim : s.n., 2014.

**Finkenzeller, Klaus. 2006.** *RFID Handbuch: Grundlegen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten*. 4. München : Carl Hanser Verlag, 2006.

- GRS, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH. 2017.** *Stilllegung kerntechnischer Anlagen, 2. Auflage.* Köln : s.n., 2017.
- Jehle, Peter, Seyffert, Stefan und Wagner, Steffi. 2011.** *IntelliBau Anwendbarkeit der RFID-Technologie im Bauwesen.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner Research, 2011.
- Jünemann, Reinhardt und Beyer, Andreas. 1998.** *Steuerung von Materialfluß- und Losistiksystemen: Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik.* Berlin : Springer Verlag, 1998.
- Kernkraftwerk Leibstadt. 2018.** Kernkraftwerk Leibstadt. [Online] 2018. [Zitat vom: 9. 10 2018.] <https://www.kkl.ch/kraftwerk/strom-aus-uran/stromproduktion/interaktive-uebersicht.html>.
- Krumpholz, Udo. 2016.** *Entsorgung abgebauter Anlagenteile und Materialien aus dem radiologisch überwachten Kontrollbereich: Eine technisch gelöste Aufgabe!* Grundremmingen : Kernkraftwerk Grundremmingen GmbH, 2016.
- Lampe, Matthias, Flörkemeier, Christian und Haller, Stephan. 2005.** Einführung in die RFID-Technologie. [Buchverf.] Elgar Fleisch. [Hrsg.] Friedemann Mattern. *Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen.* Berlin : Springer Verlag, 2005.
- Lolling, Andreas. 2003.** *Identifikationssysteme in der Logistik: Übersicht und praxisorientierte Auswahl.* München : Praxisreihe Logistik, Band 10, Hussverlag, 2003.
- Martin, Heinrich. 2017.** *Transport- und Lagerlogistik : Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit, 10. Auflage.* Wiesbaden : Springer Vieweg, 2017.
- Metrologic Instruments Inc. 2008.** *MS5100 Eclipse Series Installation and User's Guide.* Bickwood : s.n., 2008.
- Neles, Julia Mareike und Pistner, Christoph. 2012.** *Kernenergie - Eine Technik für die Zukunft?* Heidelberg : Springer Vieweg, 2012.
- RWE Power AG. 2014.** *Sicherheitsbericht: Stilllegung und Abbau des KWB-A (A022/12).* Biblis : s.n., 2014.
- Schelkshorn, Simon. 2007.** *Global Positioning System (GPS).* 2007.
- Scherer, Raimar und Schapke, Sven-Eric. 2014.** *Informationssysteme im Bauwesen 2 - Anwendungen.* Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2014.
- TEC-IT, Datenverarbeitung GmbH. 2018.** Kostenloser Online Barcode Generator: Code-128. [Online] TEC-IT Datenverarbeitung GmbH, 2018. [Zitat vom: 27. 11 2018.] <https://barcode.tec-it.com/de>.
- Uitz, Iris und Harnisch, Michael. 2012.** Der QR-Code - aktuelle Entwicklungen und Anwendungsbereiche. [Buchverf.] Schweizer Informatik Gesellschaft. *Mitteilungen der Schweizer Informatik Gesellschaft / 5\_2012.* Graz : Springer-Verlag, 2012.

**VDI, Verein Deutscher Ingenieure. 1981.** *Stilllegung von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland nach Ende ihrer Einsatzdauer, Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 15 (Umwelttechnik), Nr. 18.* Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1981.

**VDI, Verien Deutscher Ingenieure. 1987.** *Technik und Kosten bei der Stilllegung von Kernkraftwerken nach Ende ihrer Einsatzdauer, Fortschrittberichte der VDI, Reihe 15 (Umwelttechnik), Nr.52.* Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1987.

**Virnich, Martin und Posten, Klaus. 1992.** *Handbuch der codierten Datenträger: Identifikationssysteme für Produktion, Logistik, Handel und Dienstleistung.* Köln : TÜV Rheinland, 1992.

## **SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Dresden, den 01.02.2019

Johannes Frank Schüler