

(RecTecKA) – Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben

Leitfaden – erstellt im Rahmen des Verbundprojekts
zum Förderkonzept FORKA – Forschung für den Rück-
bau kerntechnischer Anlagen des BMBF

Darmstadt,
22.10.2024

Autorinnen und Autoren

Angelika Spieth-Achtnich
Dr. Matthias Buchert
Dr. Veronika Ustohalova
Dr. Christoph Pistner
Dr. Felix Mayer
Dr. Nino Schön-Blume
Manuel Claus
Julia Schütz
Öko-Institut e.V.

Kevin Wille
ELECTROCYCLING GmbH

Dr. Stephan Kranz
Rolf Etges
EnBW Kernkraft GmbH

Julius Luh
Prof. Dr. Daniel Goldmann
**TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Recycling und
Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD)**

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 15S9428A-D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.

Kontakt Partner

ELECTROCYCLING GmbH

Landstraße 91
38644 Goslar
Telefon +49 5321 3367 0

EnBW Kernkraft GmbH

Kernkraftwerk Philippsburg
Rheinschanzinsel
76661 Philippsburg
Telefon +49 7256 95-0

Technische Universität Clausthal

Institut für Aufbereitung, Recycling und
Kreislaufwirtschaftssysteme
Walther-Nernst-Straße 9
38678 Clausthal-Zellerfeld
Telefon +49 5323 72-2038

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis | 5 |
| 1. Vorhabenziele | 6 |
| 2. Kurze Beschreibung des Kernkraftwerks Philippsburg | 6 |
| 3. Kurze Beschreibung der wesentlichen Untersuchungsschritte | 8 |
| 4. Inventarerhebung | 9 |
| 4.1. Großkomponenten | 9 |
| 4.2. Kabel, Elektromotoren und Stellantriebe | 11 |
| 4.3. Komponenten der E- und Leittechnik | 11 |
| 5. Materialwerte der Komponenten | 12 |
| 6. Ökobilanzielle Betrachtung | 15 |
| 7. Hemmnisse mit Blick auf die Freigabe | 17 |
| 8. Schlussfolgerungen und Ausblick | 20 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|---|----|
| Abbildung 2-1: | Luftbild des Anlagenkomplexes Philippsburg (KKP 1 und KKP 2) | 7 |
| Abbildung 2-2: | Schema (vereinfacht) des Siedewasserreaktors KKP 1 | 7 |
| Abbildung 2-3: | Schema (vereinfacht) des Druckwasserreaktors KKP 2 | 8 |
| Abbildung 4-1: | Tonnagen aus Großkomponenten in Maschinenhaus in KKP 2 | 10 |
| Abbildung 4-2: | Kabel, Elektromotoren und Stellantriebe | 11 |
| Abbildung 5-1: | Materialwerte der identifizierten Komponenten | 13 |
| Abbildung 5-2: | Prozentuale Verteilung der Materialwerte KKP 1 | 14 |
| Abbildung 5-3: | Prozentuale Verteilung der Materialwerte KKP 2 | 14 |
| Abbildung 6-1: | Schematische Darstellung der Systemgrenzen | 15 |
| Abbildung 6-2: | Substitution von Rezyklaten und zurückgewonnener Energie | 16 |
| Abbildung 6-3: | GWP Großkomponenten für KKP 2 und KKP 1 in Tsd. t CO ₂ - Eq | 16 |
| Abbildung 6-4: | GWP für Schaltschränke, Mittelspannungsschalter und elektrische Einrichtungen bezogen auf die Gesamttonnagen in KKP 1 und KKP 2 | 17 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|------------------------------------|----|
| Tabelle 4-1: | Komponenten der E- und Leittechnik | 12 |
|--------------|------------------------------------|----|

1. Vorhabenziele

In Deutschland sind aktuell (Stand Frühjahr 2024) alle Kernkraftwerke (mit Ausnahme weniger Forschungsreaktoren) stillgelegt und befinden sich im atomrechtlichen Abbau. In Kernkraftwerken wurden für die Erfüllung der unterschiedlichsten technischen Funktionen Komponenten verbaut und eingesetzt, die ein hohes Potenzial an Wertmetallen und -legierungen versprechen. Gleichzeitig werden in Deutschland und Europa intensive Diskussionen und Aktivitäten geführt, die unter dem Schlagwort „Urban Mining“ die verstärkte Gewinnung von Wertmaterialien aus dem anthropogenen Lager zum Ziel haben. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Förderkonzepts „FORKA – Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“ geförderte und zusätzlich durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg unterstützte Vorhaben RecTecKA setzt an dieser Schnittstelle an und verfolgt die folgenden zentralen Vorhabenziele:

- Erstellung eines Inventars recyclingfähiger und –würdiger Metalle und Legierungen in Bezug auf mögliche Massen, Kontaminationszustände sowie Konzentrationen in den jeweiligen Komponenten,
- Analyse von Separierungs- und Recyclingoptionen bzgl. eines hochwertigen Recyclings für die wesentlichen Wertmetalle und -legierungen unter Berücksichtigung technologischer und radiologischer Randbedingungen,
- Analyse der Recyclingpotenziale für die wesentlichen Wertmetalle und -legierungen sowie der damit verbundenen wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen,
- Abschätzung und Skalierung der ermittelten Potenziale für die zum Rückbau vorgesehenen KKW in Deutschland.

Zur Durchführung des Forschungsprojekts wurden als Modellanlagen das Kernkraftwerk Philippsburg mit den Blöcken 1 (KKP 1 - Siedewasserreaktor) und 2 (KKP 2 - Druckwasserreaktor) untersucht. Damit wurden die vorhandenen Reaktorarten abgedeckt. Hierbei muss zusätzlich beachtet werden, dass die beiden Blöcke zu unterschiedlichen Zeitpunkten errichtet wurden. Über die Untersuchungen soll ein Ansatz zur Generalisierung auf andere Kernkraftwerke erreicht werden.

2. Kurze Beschreibung des Kernkraftwerks Philippsburg

Der Standort des Kernkraftwerks Philippsburg ist rund 30 Kilometer nördlich von Karlsruhe auf einer Insel im Rhein gelegen. Betreiber der Anlagen ist die EnBW Kernkraft GmbH (EnKK). Der Siedewasserreaktor KKP 1 wurde 1980 mit einer elektrischen Bruttoleistung von 926 MWe in Betrieb genommen. Die Außerbetriebnahme von KKP 1 erfolgte im August 2011 und die Stilllegungs- und erste Abbaugenehmigung (1. SAG) wurde im April 2017 erteilt; die zweite Abbaugenehmigung (2. AG) erfolgte im Juli 2020. Die Inbetriebnahme des Druckwasserreaktors KKP 2 folgte 1985 mit einer elektrischen Bruttoleistung von 1.468 MWe. Die Außerbetriebnahme von KKP 2 und die Abbau- und Stilllegungsgenehmigung (SAG) erfolgte im Dezember 2019. In der nachfolgenden Aufnahme ist die stillgelegte und in Teilen rückgebaute (hier ist vor allem auf den bereits erfolgten Abriss der Kühltürme zu verweisen) Anlage als Luftbild¹ zu sehen.

¹ Stand der Aufnahme. September 2023, mit freundlicher Genehmigung der EnBW Kernkraft GmbH.

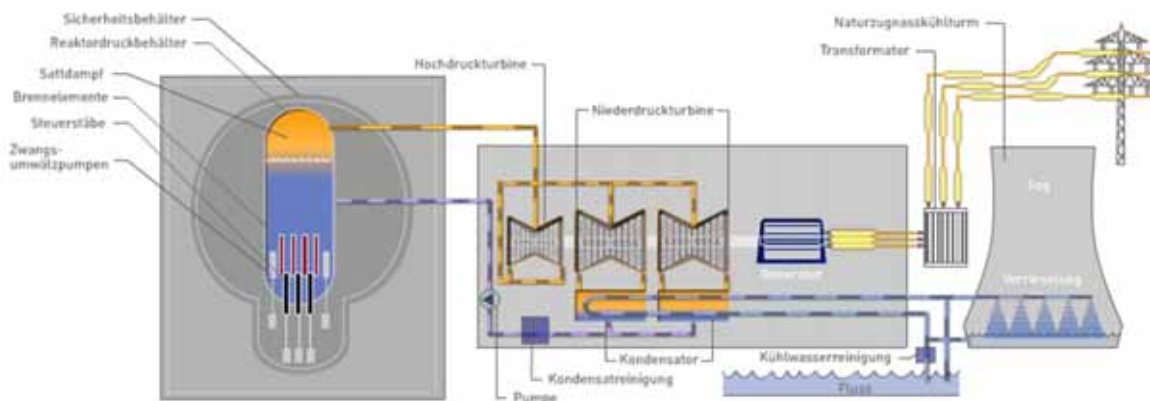
Abbildung 2-1: Luftbild des Anlagenkomplexes Philippsburg (KKP 1 und KKP 2)



Quelle: RecTeckA-Verbund

Eine vereinfachte Darstellung des Siedewasserreaktors KKP 1 bietet das nachfolgende Schema:

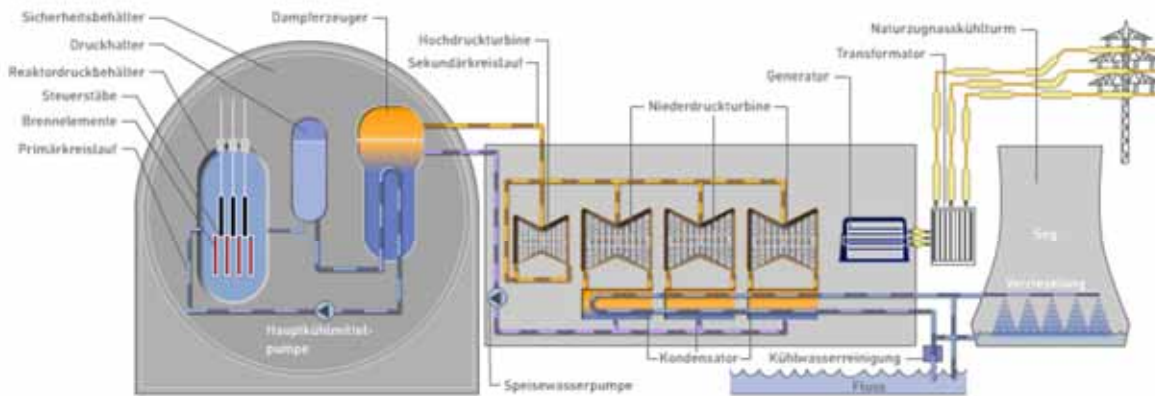
Abbildung 2-2: Schema (vereinfacht) des Siedewasserreaktors KKP 1



Quelle: EnBW

Der Druckwasserreaktor KKP 2 mit bedingt durch den Sekundärkühlkreislauf deutlich umfangreicheren konventionellen Anlagenteilen ist im folgenden Schema dargestellt.

Abbildung 2-3: Schema (vereinfacht) des Druckwasserreaktors KKP 2



Quelle: EnBW

3. Kurze Beschreibung der wesentlichen Untersuchungsschritte

Das Forschungsvorhaben RecTecKA wurde über fünf Arbeitspakete realisiert, die hier kurz skizziert werden:

- Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotenzial, Inventarerhebung Wertmetalle und –legierungen KKP 1 und KKP 2,
- Ermittlung des intrinsischen Materialwerts,
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung,
- Analyse des Spannungsfeldes Recyclingpotenzial vs. Freigabe,
- Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland.

Die Arbeitspakete wurden von den Verbundpartnern Öko-Institut (ÖI), TU Clausthal (TUC), EnKK sowie Electrocyling (Elec) anhand der Modellanlagen KKP 1 und KKP 2 intensiv bearbeitet.

Im Laufe des Vorhabens wurde deutlich, dass vor allem die Inventarerhebung relevanter Anlagenteile und Komponenten und die Quantifizierung der darin erhaltenen Wertmetalle und –legierungen sehr anspruchsvolle Aufgaben darstellten. Die notwendigen Recherchen erfolgten unter intensiver Einbindung und Unterstützung durch verschiedenste Fachleute der EnKK des Standorts Philippsburg und umfasste ganztägige Anlagenbegehungen, Interviews und die Auswertung der zahlreichen – vielfach nur analog verfügbaren - Unterlagen. Ungeachtet dessen konnte durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit eine erfolgreiche Grundlage für die nachfolgenden Arbeiten gelegt werden. Die zentralen Vorhabenergebnisse werden im nächsten Abschnitt zusammengefasst.

4. Inventarerhebung

Bei der Inventarerhebung wurden Komponenten in KKP 1 und KKP 2 betrachtet, die werthaltige Basis- und Technologiemetalle in nennenswerten Mengen enthalten. Zu den Zielmetallen² gehören insbesondere Kupfer, Nickel, Chrom, Aluminium sowie die Platingruppenmetalle, Silber und Gold. Metalle können in reiner Form (z. B. Kupferrohr) oder in legierter Form (z. B. Bauteil aus hochlegiertem Stahl) vorliegen. **Grundvoraussetzung ist, dass die Komponenten freigegeben werden können.** Untersucht werden hierzu:

- **Großkomponenten**, wie beispielsweise Wärmetauscher, Behälter oder Pumpen. Diese weisen größere Mengen an Edelstählen, Titan oder Kupferlegierungen auf.
- **Kabel, Elektromotoren (kurz: E-Motoren) und Stellantriebe** (größere Mengen an Kupfer),
- **Komponenten der E- und Leittechnik** (größere Mengen an Kupfer und Edelmetallen).

4.1. Großkomponenten

Innerhalb der Inventarerhebung wurden Komponenten aufgenommen, wenn die entsprechenden Großkomponenten eine hohe Menge an hochwertigen Metallen aufweisen. Als „hohe Menge“ wurde hier definiert, dass die Menge in einem Bauteil (pro Redundanz) 1.000 kg überschreitet. Hochwertige Metalle im Bereich von Großkomponenten sind insbesondere Kupfer, Nickel, Titan, Chrom und Aluminium. Weiterhin wurden Komponenten in dieser Betrachtung nur berücksichtigt, wenn radioaktive Kontamination der Komponenten durch Herausgabe ausgeschlossen werden kann oder eine Freigabe zum Nachweis der weiteren Verwendung oder Verwertung der Komponententeile als nicht radioaktiven Stoff möglich erscheint.

Großkomponenten wurden zunächst systematisch durch das Öko-Institut auf Grundlage von vorhandenen Anlagendokumentationen identifiziert. Bei identifizierten Großkomponenten von KKP 1 und KKP 2 konnte das Fachpersonal der EnKK aufgrund der Kenntnis der Komponenten bereits oft in einer Voreinschätzung solche Komponenten ausschließen, die keine oder nur geringe Mengen an werthaltigen Metallen aufweisen. Für Großkomponenten, bei denen erwartet wurde, dass diese mengenmäßig relevante Technologiemetalle enthalten, wurden Werkstoffdatenblätter beim Betreiber angefordert und ausgewertet.

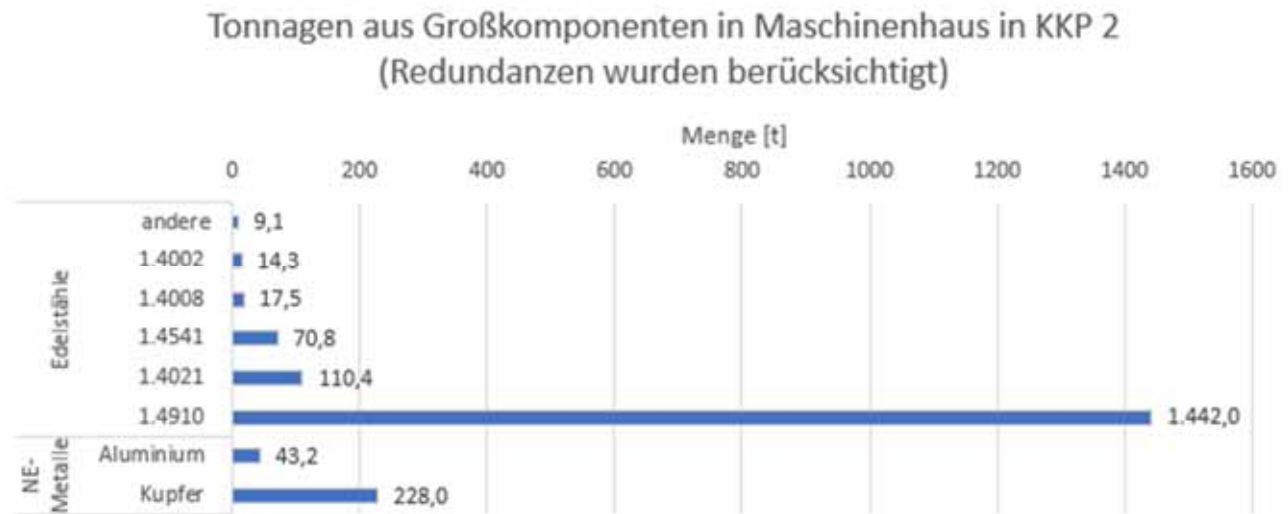
Zur Ermittlung des Wertstoffpotentials wurden Großkomponenten systematisch inventarisiert. Dabei wurden für den Druckwasserreaktor KKP 2 die folgenden Cluster gebildet:

- Reaktor inkl. Sicherheitssysteme
- Hilfs-/Zusatzsysteme des Primärkreises
- Einrichtungen im Maschinenhaus
- Haupt- und Nebenkühlwassersystem
- Notstromerzeugung und Notspeisesystem

Für KKP 2 steuern die Einrichtungen im Maschinenhaus mit Abstand die größten Beiträge bzgl. werthaltiger Metalle in Großkomponenten bei. Die ermittelten Tonnagen für das Maschinenhaus sind in der nachfolgenden Abbildung aufgeführt.

² Niedriglegierte Stähle waren nicht im Fokus des Forschungsvorhabens, da hierzu aus zurückliegenden Studien ausreichend Informationen vorlagen.

Abbildung 4-1: Tonnagen aus Großkomponenten in Maschinenhaus in KKP 2

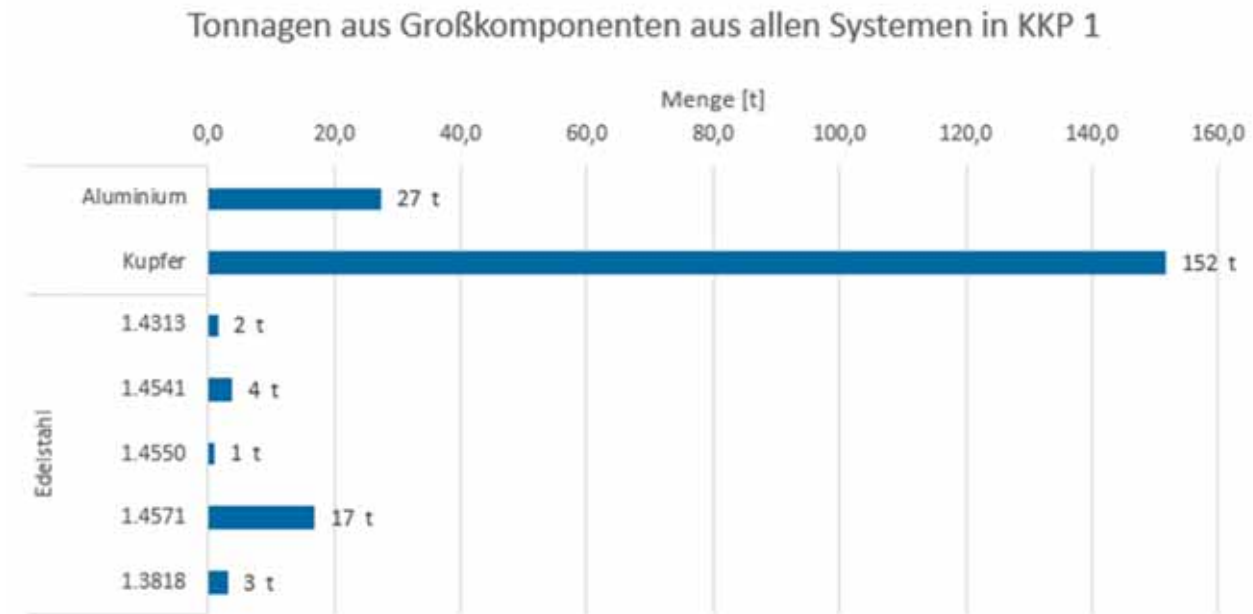


Quelle: RecTecKA-Verbund

Den größten Teil des Wertpotentials machen dabei Edelstähle aus. Mengenmäßig ist insbesondere der Edelstahl 1.4910 (DIN-Normbezeichnung: X3CrNiMoN17-13) mit 1.442 t relevant. Dieser enthält als primäre Legierungselemente 17% Chrom und 13% Nickel.

Die Anzahl an Großkomponenten, die sowohl werthaltige Metalle in nennenswerten Mengen enthalten als auch als kontaminationsfrei gelten, sind im Siedewasserreaktor KKP 1 (im Vergleich zu KKP 2) bauartbedingt vernachlässigbar gering. Komponenten, die die genannten Voraussetzungen (freigabefähig) erfüllen sind die Notspeisepumpe, der Borierbehälter (Vergiftungsbehälter), der USUS-Kühler (unabhängiges Sabotage- und Störfallschutzsystem), die betrieblichen H₂-Rekombinatoren, der Generator, die Erregermaschine sowie die Generatorableitung und die Notstromdieselgeneratoren.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Tonnage werthaltiger Metalle aller Großkomponenten in KKP 1 zusammengestellt.

Abbildung 4-2: Tonnagen aus Großkomponenten aller Systeme KKP 1

Quelle: RecTeckKA-Verbund

4.2. Kabel, Elektromotoren und Stellantriebe

Die identifizierte Gesamtmenge an Kupfer aus Kabeln und E-Motoren summiert sich auf knapp 2000 t für KKP 2. Hinzu kommen noch 161 t Aluminium aus E-Motoren sowie geringere Mengen Kupfer (4,4 t) und Aluminium (17,4 t) aus zahlreichen Stellantrieben.

Im Falle von KKP 1 wurde eine Gesamtmenge an Kupfer von knapp 1270 t aus Kabeln und E-Motoren identifiziert. Dazu noch einige Tonnen Kupfer und Aluminium aus Stellantrieben.

4.3. Komponenten der E- und Leittechnik

Nachfolgend sind die Inventarergebnisse für KKP 1 und KKP 2 aus Komponenten der Leittechnik, die zahlreiche Elektrobauteile (Schalter etc.), Mittelspannungsschalter sowie Schaltschränke mit Platinen umfassen, dargestellt. Hierzu wurden von den Partnern TU Clausthal und Electrocyling umfassende Aufbereitungs- und Analyseprozesse im Rahmen des Vorhabens durchgeführt, die nicht zuletzt auf die möglichst detaillierte Erfassung der wertvollen Edelmetallinventare abzielten. Die Ergebnisse für KKP 1 und KKP 2 sind in der nachfolgenden Übersicht zusammengestellt.

Tabelle 4-1: Komponenten der E- und Leittechnik

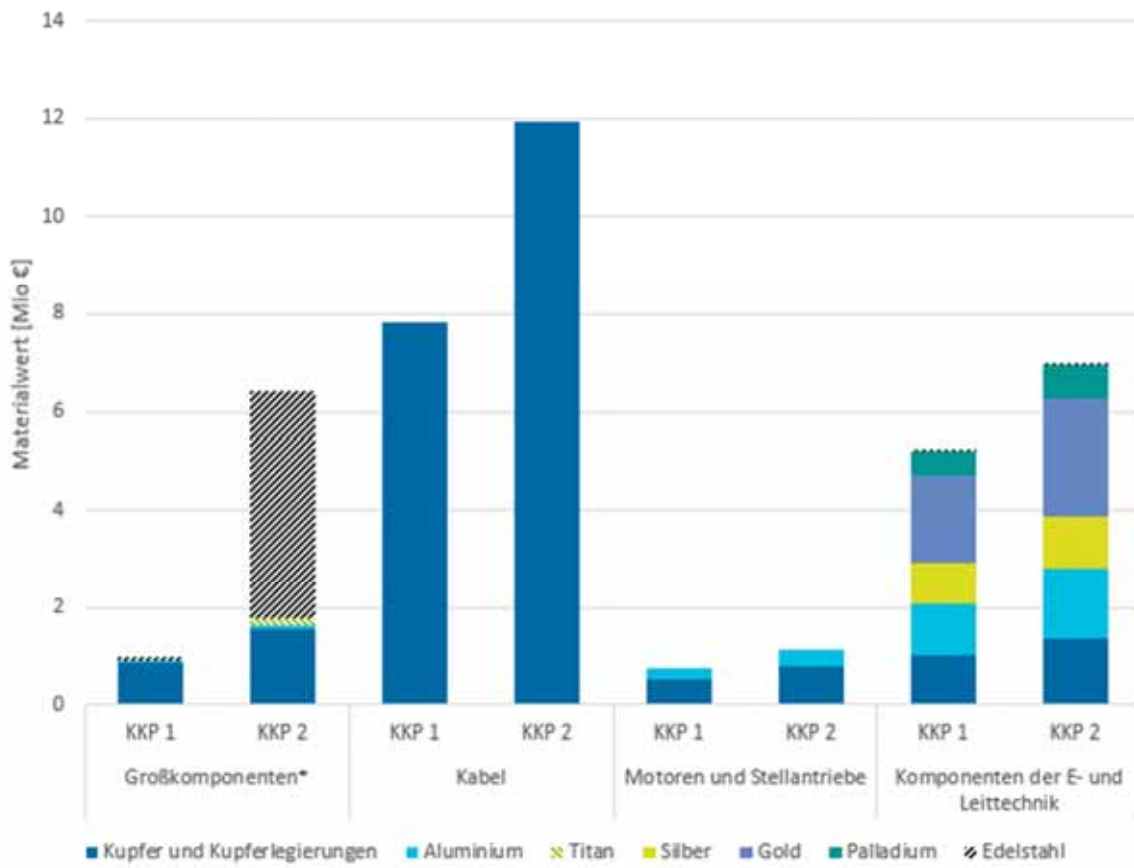
| Kategorie | KKP 1 | KKP 2 |
|---|-------|-------|
| Ausgewählte Wertmetalle und Legierungen in [t] | | |
| Kupfer und Kupferlegierungen | 190 | 253 |
| Aluminium | 571 | 761 |
| Edelstahl | 1,7 | 2,2 |
| Edelmetalle in [kg] | | |
| Silber | 1322 | 1760 |
| Gold | 35,8 | 47,9 |
| Palladium | 8,94 | 12,0 |

Quelle: RecTecKA-Verbund

5. Materialwerte der Komponenten

In der nachfolgenden Abbildung werden die monetären Materialwerte über alle in KKP 1 und KKP 2 identifizierten werthaltigen Komponenten getrennt nach (i) Großkomponenten, (ii) Kabeln, (iii) Motoren und Stellantrieben sowie (iv) Komponenten der E- und Leittechnik mit den jeweiligen kumulierten Materialwerten zusammengefasst. Niedriglegierte Stähle bzw. deren Materialwerte zählen nicht zu den werthaltigen Metallen und sind daher nicht in der Darstellung aufgenommen.

Abbildung 5-1: Materialwerte der identifizierten Komponenten



Quelle: RecTeCKA-Verbund

Für KKP 1 ergibt sich in der Summe ein Materialwert von ~15 Mio. €. Dieser Wert verteilt sich prozentual zu:

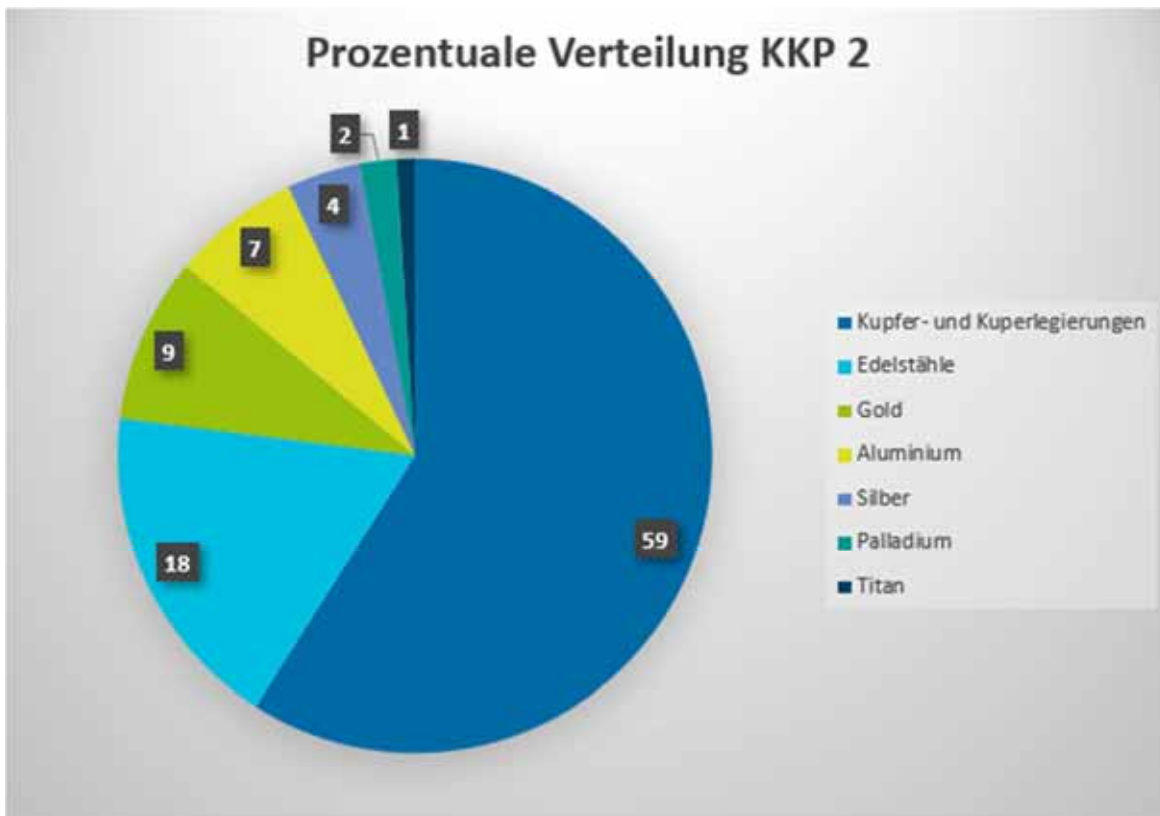
Abbildung 5-2: Prozentuale Verteilung der Materialwerte KKP 1



Quelle: RecTecKA-Verbund

Für KKP 2 ergibt sich in der Summe ein Materialwert von ~27 Mio. €. Dieser Wert verteilt sich prozentual zu:

Abbildung 5-3: Prozentuale Verteilung der Materialwerte KKP 2



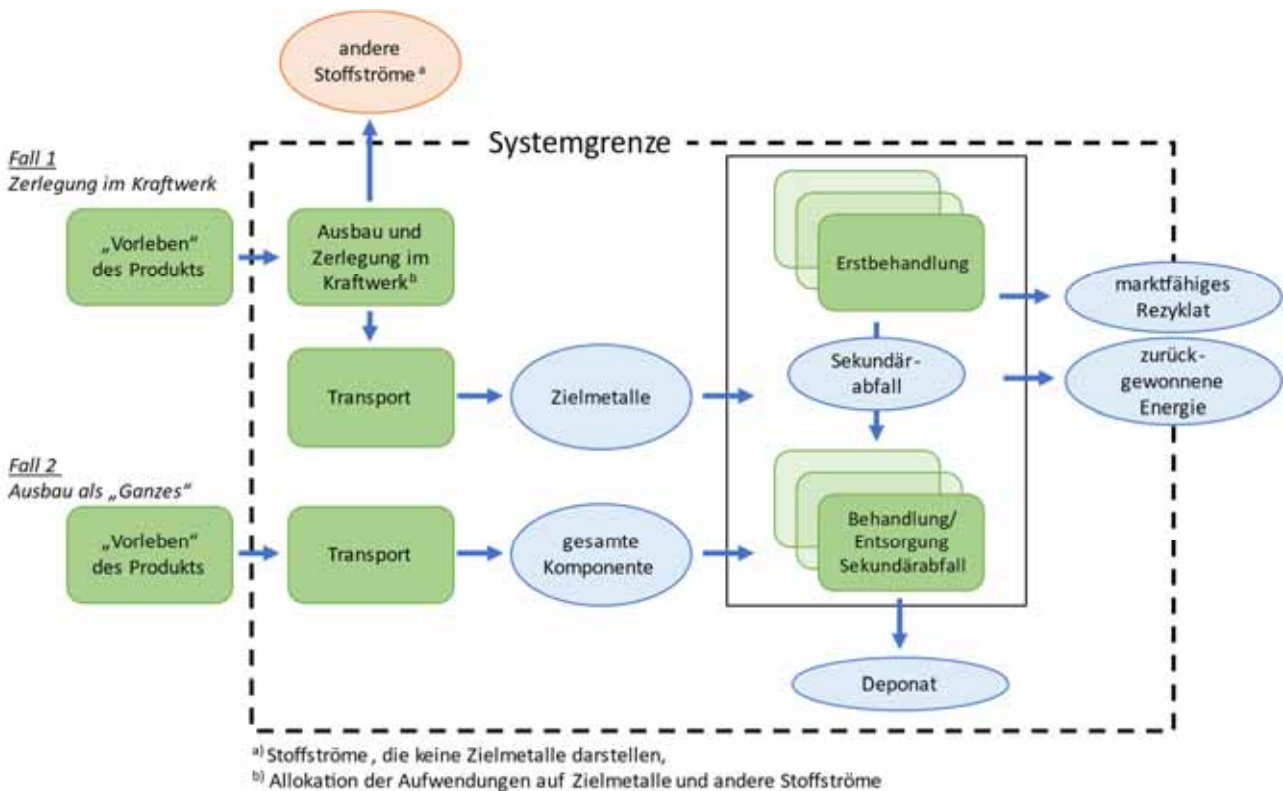
Quelle: RecTecKA-Verbund

Die deutlich höheren Materialwerte in KKP 2 im Vergleich zu KKP 1 ergeben sich durch die höhere Menge an Komponenten, die direkt im Rahmen der Herausgabe weiterer Verwendung zugeführt werden können oder freigabefähig sind. Dies führt insbesondere bei Großkomponenten zu einer deutlich höheren Menge an Edelstählen, die dem Recycling zugeführt werden können. Weiterhin ist die größere Dimensionierung von KKP 2 im Gegensatz zu KKP 1 dafür entscheidend, dass dort auch größere Mengen an Kabeln, Motoren, Stellantrieben und elektronischen Bauteilen verwendet werden. Unterschiede ergeben sich aber auch immer durch den Reaktorbautyp. So ist festzuhalten, dass auch innerhalb von Siede- bzw. Druckwasserreaktoren je nach Baureihe und Baujahr im Detail unterschiedliche Materialien und Materialmengen zu inventarisieren sind.

6. Ökobilanzielle Betrachtung

Im Rahmen des Verbundvorhabens RecTeCKA wurde vom Öko-Institut bzgl. der identifizierten werthaltigen Metalle in KKP 1 und KKP 2 eine umfassende **Ökobilanz** gemäß ISO 14040/14044 durchgeführt mit dem Ziel, die ökologische Vorteilhaftigkeit einer möglichen Verwertung über professionelle Aufbereitungs- und Recyclingverfahren zu quantifizieren. Für die Ökobilanz wurde unterstellt, dass die jeweiligen Komponenten entweder in der Anlage selbst zerlegt und separiert werden (vor allem Großkomponenten) oder die jeweiligen Komponenten in ihrer Gesamtheit dem Kernkraftwerk entnommen werden (Kabel und Motoren sowie für Komponenten der E- und Leittechnik). Im letzteren Fall schließt sich der Verwertungspfad für die gesamte Komponente außerhalb des Kernkraftwerks an. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Systemgrenze schematisch auf.

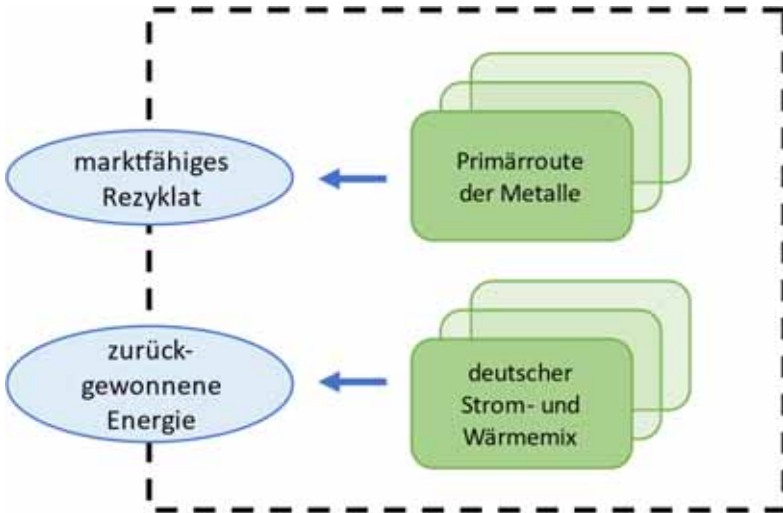
Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der Systemgrenzen



Quelle: RecTeCKA-Verbund

Für zurückgewonnene Rezyklate und Energie wird entsprechend der Substitutionsmethode eine Gutschrift ausgewiesen. Für Energie wird die Gutschrift entsprechend des deutschen Strom- und Wärmemix vergeben. Für zurückgewonnene Metalle werden zunächst die Lasten der Primärroute gutgeschrieben.

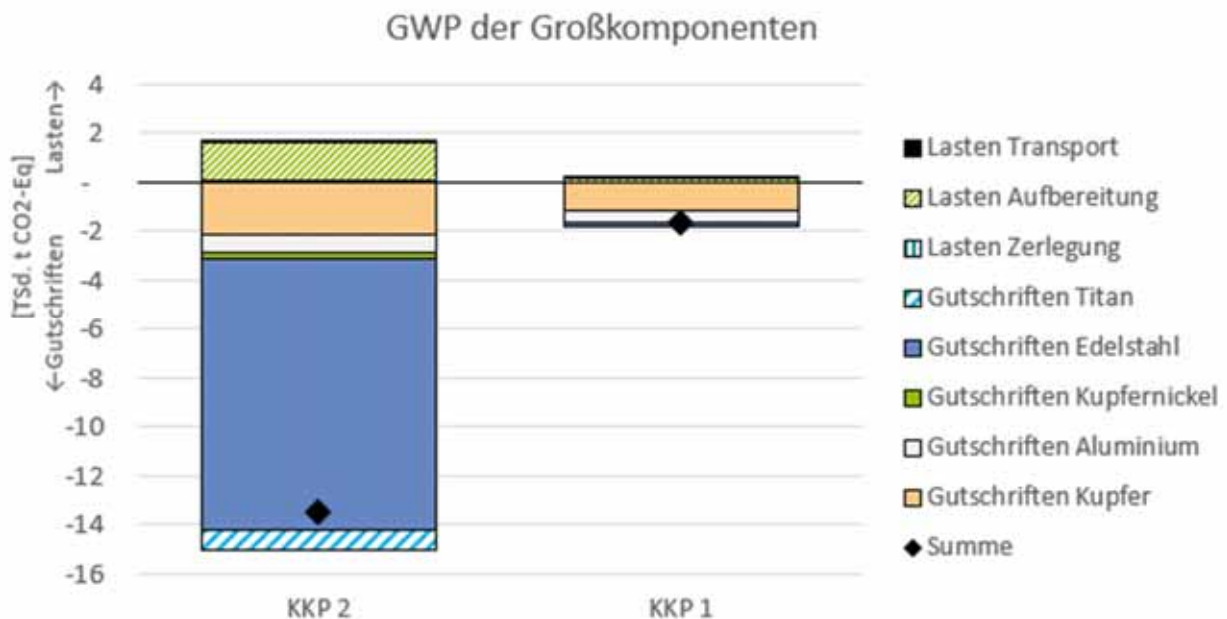
Abbildung 6-2: Substitution von Rezyklaten und zurückgewonnener Energie



Quelle: RecTeCKA-Verbund

Für KKP 1 wurden deutlich weniger Komponenten identifiziert, die sich für ein Recycling eignen, da ein Großteil der Komponenten radioaktiv kontaminiert ist. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, wurde für die Großkomponenten in KKP 2 in Summe eine potenzielle Nettogutschrift im GWP (Global warming potential) von -13,48 Tsd. t CO₂- Eq ermittelt. Für die Großkomponenten von KKP 1 dagegen beträgt dieser Wert nur -1,52 Tsd. t CO₂- Eq. Die Nettogutschriften von KKP 1 gehen zum Großteil auf die vermiedene Kupferproduktion zurück.

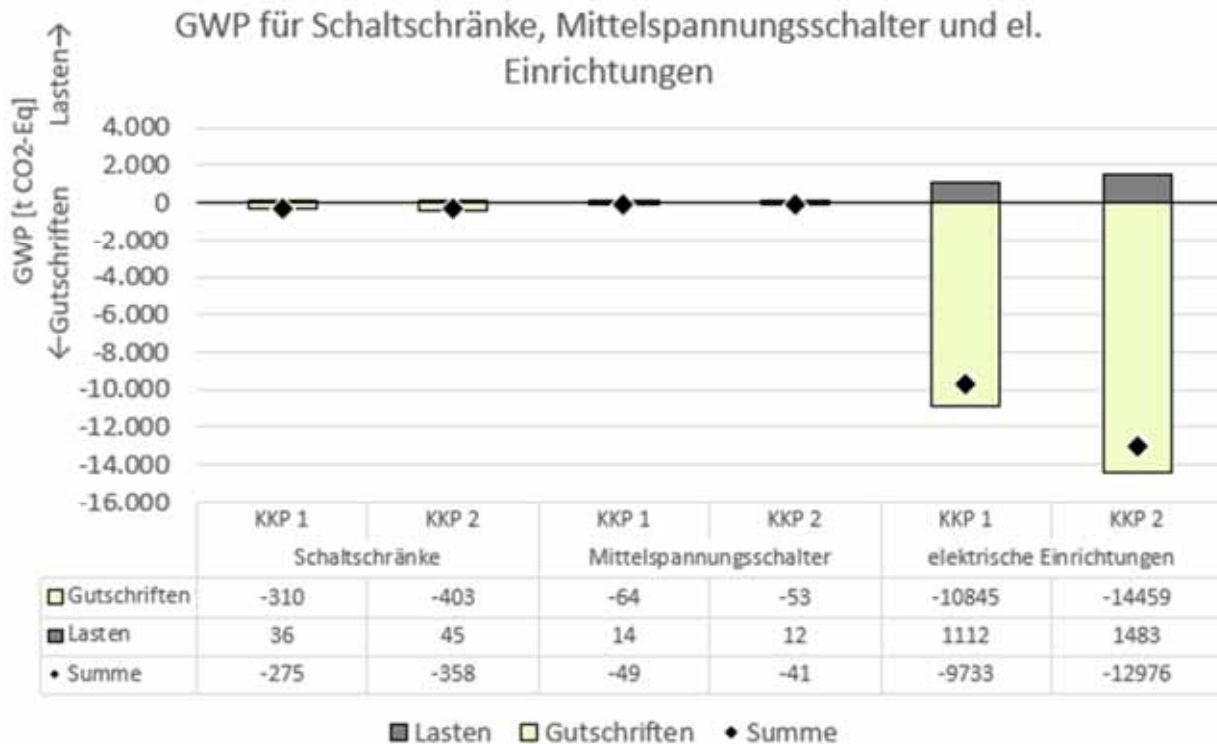
Abbildung 6-3: GWP Großkomponenten für KKP 2 und KKP 1 in Tsd. t CO₂- Eq



Quelle: RecTeCKA-Verbund

In der nächsten Abbildung sind die Ergebnisse für die Verwertung der Schaltschränke, Mittelspannungsschalter und elektrischen Einrichtungen zusammengefasst. Für KKP 1 sind es Nettogutschriften von rund -10 Tsd. T CO₂-Eq. Und für KKP 2 rund -13,5 Tsd. T CO₂-Eq.

Abbildung 6-4: GWP für Schaltschränke, Mittelspannungsschalter und elektrische Einrichtungen bezogen auf die Gesamttonnagen in KKP 1 und KKP 2



Quelle: RecTeckA-Verbund

Insgesamt besteht durch die Verwertung der identifizierten Wertmaterialien ein Gutschriftspotenzial (netto) von gut 22 Tsd. Tonnen CO₂-Eq. für KKP 1 und von rund 43 Tsd. Tonnen CO₂-Eq. für KKP 2. Für die weiteren in der Ökobilanz untersuchten Umweltwirkungskategorien (wie z. B. Emissionen an Säurebildern) fallen die Ergebnisse ebenfalls eindeutig positiv hinsichtlich der Verwertung der Wertmaterialien aus.

7. Hemmnisse mit Blick auf die Freigabe

Im Forschungsvorhaben RecTeckA wurden auch **allgemeine Hemmnisse beim Metallrecycling**, die sich auf die Freigabe zurückführen lassen, identifiziert. Im Rahmen eines Freigabeverfahrens werden Gegenstände oder Materialien messtechnisch auf radiologische Kontamination geprüft und ggf. dekontaminiert, bevor sie konventionell weiterverwendet oder beseitigt werden dürfen. Diese Prüfung kann je nach der Zusammensetzung und vorherigem Einsatz des Materials oder Gegenstandes aufwendig sein, weil eine radiologische Charakterisierung und gutachterliche Bewertung erforderlich sind. Daher wurden auch Optimierungen im Freigabeprozess untersucht.

Folgende **Hemmnisse mit Blick auf die Freigabe** wurden identifiziert:

- Bei der Rückbauplanung ist nicht immer unmittelbar bekannt, welche Materialien in den einzelnen Anlagenteilen verbaut wurden. Details dazu müssen speziell für das Recycling zuvor erstellt werden.
- Bei der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen gibt es viele Faktoren, die die zeitliche Planung bis zur endgültigen Entsorgung der Materialien beeinflussen. Vorarbeiten für das Recycling können die Zeitspanne bis zur endgültigen Beseitigung beeinflussen. Für jeden Monat einer Anlage im Abbau fallen erhebliche Betriebskosten an. Ein wirtschaftlicher Nutzen durch Recycling kann vom Faktor Zeit aufgezehrt werden.
- Die Voruntersuchungen zur radiologischen Charakterisierung können sehr zeitaufwendig sein.
- Die Dekontamination mit der vorgeschalteten Zerlegung komplexer Anlagenteile als auch die Entsorgung radioaktiver Sekundärabfälle aus der Dekontamination können mit einem zusätzlichen technologischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden sein und müssen im Rahmen der Abbauplanung berücksichtigt werden.
- Komplexe Anlagenteile können bei dem Freimessvorgang zusätzlichen Aufwand bedeuten. Der Aufwand bei der Zerlegung muss gegen mögliche Vorteile bei der Verwertung abgewogen werden.
- Recycling benötigt Lagerflächen. Diese sind im kerntechnischen Rückbau knapp bemessen. Das Schaffen zusätzlicher Zwischenlageroptionen kann mit erheblichem Aufwand verbunden sein.
- Für den Fall der spezifischen Freigabe von „Metallschrott zur Rezyklierung“ erweist sich die Suche nach einem geeigneten Schmelzbetrieb, der bereit ist, die freigegebenen Metalle anzunehmen, als schwierig.
- Der Dekontaminations- und Freigabeprozess ist zeitaufwendig und verlängert den Rückbau.
- Eine öffentliche Ablehnungshaltung kann zu Einschränkungen der Möglichkeiten für das Recycling von Metallen aus dem kerntechnischen Rückbau führen.

Mögliche Optimierungen³ im Freigabeprozess in Bezug auf wertvolle Materialien können sein:

- Es ist wichtig, den Ausgangszustand einer kerntechnischen Anlage nach der endgültigen Abschaltung gut zu kennen. Die Charakterisierung der Anlagenteile hinsichtlich des Recyclings sollte frühzeitig durchgeführt werden.
- Systematische Informationen für das Metallrecycling sollten zusammengestellt werden, damit sie in die Abbauplanung einfließen können. Soweit möglich sollte die Rückbauplanung die Metallpreise und deren Entwicklung berücksichtigen.
- Ein effizienter und rechtzeitiger öffentlicher Diskurs zu Rückbau, Freigabe und Metallrecycling trägt zur Vertrauensbildung bei.
- Durch einen höheren Freigabeanteil können Kosten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle vermieden werden. Jedoch müssen die Aufwendungen zum Dekontaminieren von Komponenten verhältnismäßig sein.

³ Mit Optimierungen ist gemeint, mehr wertvolle Materialien in die Kreislaufwirtschaft zurückzuführen. Freigabeverfahren und Freigabegrenzen sowie die ihnen zugrundeliegenden Strahlenschutzanforderungen werden nicht in Frage gestellt.

- Die Einplanung ausreichender Lager- und Logistikflächen wirkt sich positiv auf die erforderlichen Rückbauaktivitäten wie Zerlegung, Dekontamination und Freigabe aus. Zusätzliche Lagerflächen müssten bereits bei der Abbauplanung eingeplant werden.

Im Zusammenhang mit der Optimierung von Freigabeprozessen wurde u.a. der **Dampferzeuger** als Beispiel für ein komplex aufgebautes Anlagenteil betrachtet, das bisher nicht oder nur teilweise recycelt wird, jedoch aufgrund der Materialzusammensetzung für ein Metallrecycling interessant ist.

In Druckwasserreaktoren erfolgt in den Dampferzeugern die Übertragung der Wärme vom Primär- zum Sekundärkreislauf. Dampferzeuger bestehen aus einem kuppelförmigen Dampfdom, vier Ringen, der Rohrplatte und der kuppelförmigen Wasserkammer. Durch die Rohrplatte führen viele dünne Heizrohre. Da der Dampferzeuger sowohl mit dem kontaminierten Reaktorkühlkreislauf (Primärkreislauf) als auch mit dem nicht kontaminierten Sekundärkreislauf verbunden ist und aufgrund der Heizrohre eine sehr große Oberfläche hat, wäre insbesondere die Dekontamination des mit dem Primärkreislauf verbundenen Teils aufwendig. Das Gewicht eines Dampferzeugers beträgt je nach Anlagentyp etwa 150 bis 450 t. Das Recycling der Sekundärseite ist relativ einfach und wird bereits praktiziert: der dickwandige Zylinder kann mechanisch zerlegt und, sofern erforderlich, einfach dekontaminiert werden. Nachfolgende exemplarische Angaben basieren auf Dampferzeugern, die in Anlagen der EnKK zum Einsatz kamen. Für das Recycling sind vor allem interessant

- die Heizrohre des Dampferzeugers aus Edelstahl (X2NiCrAlTi32-20, 1% Mn, 21.5% Cr, 33.5% Ni). Es handelt sich um ca. 4.000 Heizrohre mit einem Gesamtgewicht von 13,5 t. Der Metallwert von X2NiCrAlTi32-20 liegt bei 4.320 €/t (Stand 2024). Damit beläuft sich der Gesamtwert der Heizrohre auf ca. 58.320 € pro Dampferzeuger bzw. auf ca. 233.300 € für alle vier in KKP 2 vorhandenen Dampferzeuger.
- der Rohrboden aus Inconel 600 (Nickelbasislegierung mit 1% Mn, 15.5% Cr, 72% Ni), ca. 620 mm dick, Durchmesser 3 m, Gewicht nicht bekannt. Der Rohrboden besteht aus einer großen Lochplatte, in welche die Heizrohre münden. Aufgrund der Geometrie ist die Lochplatte schwierig zu dekontaminieren. Bisher ist geplant, dass sie endgelagert wird.

Die Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) hat eine Methode (chemisches Verfahren) entwickelt, um die Heizrohre spezifisch als „Metallschrott zur Rezyklierung“, d. h. zum Einschmelzen, freigeben zu können. Auch Verfahren auf Basis des Hochdruckwasserstrahlens wurden für die Heizrohre erprobt und erste Praxiserprobungen bei einem deutschen Unternehmen wurden erfolgreich durchgeführt. Die Dampferzeuger aus dem KKW Stade wurden 2007 zur schadlosen Verwertung nach Schweden abtransportiert, dort zerlegt und eingeschmolzen. Die Dampferzeuger in Mühlheim-Kärlich⁴ wurden mit Spezialsägen zerlegt. Die zerlegten Hüllen konnten freigemessen und dem konventionellen Wertstoffkreislauf zugeführt werden. Die Heizrohre sind für das Endlager Schacht Konrad vorgesehen. Im Zwischenlager Nord der EWN in Greifswald können Großkomponenten wie Dampferzeuger zur Abklinglagerung zwischengelagert werden. So werden die Rückbauarbeiten und die Nachzerlegung größerer Anlagenteile entkoppelt, was zur Beschleunigung des Rückbaus beitragen kann. Danach sind die Dekontamination und die anschließende Freigabe möglicherweise einfacher. Allerdings sind die Möglichkeiten zur Abklinglagerung nicht an jedem Standort vorhanden.

Um die zerlegten primärseitigen Teile des Dampferzeugers (ca. 5 t) zu dekontaminieren, wäre ein großes Säurebad notwendig. Dafür wäre ein geeigneter Chemismus zu entwickeln. Die Säure greift nicht nur die kontaminierte Oxydschicht an, sondern auch die Oberfläche der plattierten Edelstahl-

⁴ Es ist zu beachten, dass das KKW Mühlheim-Kärlich nur eine sehr kurze Betriebszeit hatte und demzufolge die Kontamination der Dampferzeuger und der Dampferzeuger-Heizrohre geringer war.

Metallteile. Würde die Plattierung in der Säure gelöst werden, müsste ggf. ein Verfahren entwickelt werden, um das Metall aus der Säure rückzugewinnen. Da ein solch großes Bad derzeit an keinem Kernkraftwerksstandort in Deutschland vorhanden ist, müsste(n)

- eine zentrale Anlage geschaffen werden, in welcher große Metallteile in einem Kontrollbereich dekontaminiert werden können,
- ein spezifischer Chemismus des Bades für jede einzelne Anlage entwickelt werden, da die Radiologie der einzelnen Kernkraftwerke unterschiedlich ist,
- Dampferzeuger und andere Großkomponenten dorthin transportiert werden,
- die Säure nach der Dekontamination von Radionukliden bereinigt werden,
- eine Logistik aufgebaut werden, die es ermöglicht, die Anlagenteile den entsprechenden Kernkraftwerken zuzuordnen, da die Radionuklide als radioaktiver Abfall an das entsprechende Kernkraftwerk zurückgegeben werden müssten,
- in einer Machbarkeitsstudie die Wirtschaftlichkeit der Umsetzung geprüft werden.

Mit welchem Aufwand die Entwicklung eines Prozesses, wie er oben beschrieben wird, einher gehen würde und ob ein solcher Prozess dazu führen würde, dass alle wesentlichen primärseitigen Teile des Dampferzeugers freigebbar wären, kann hier nicht beurteilt werden. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig. Außerdem wäre zu prüfen, wie ein solcher Prozess hinsichtlich seiner Ökobilanz zu bewerten wäre.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Folgendes Fazit kann aus den umfangreichen Ergebnissen des Verbundvorhabens RecTecKA gezogen werden:

- Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Anlagen KKP 1 und KKP 2 zeigen eindeutig ein hohes Verwertungspotenzial für Wertmetalle und Wertlegierungen, die ohne Probleme in den Wertstoffkreislauf rückgeführt werden können. Es dominieren bei den zur Verwertung geeigneten Metallen/Legierungen nach Mengengesichtspunkten vor allem Kupfer- und Kupferlegierungen, Aluminium sowie Edelstähle. Edelmetalle (Gold, Silber, Palladium) aus diversen elektronischen Bauteilen in KKP 1 und KKP 2 weisen zudem ein hohes ökonomisches Wertpotenzial aus dem Recycling auf. Dieses Potential wird auf Basis der Vorgaben der Strahlenschutzgesetzgebung bzw. des Kreislaufwirtschaftsgesetzes bereits heute im Wesentlichen ausgeschöpft.
- Die Arbeiten der Verbundpartner zeigen zudem, dass die identifizierten Metallinventare, die für ein hochwertiges Recycling zur Verfügung stehen, ganz überwiegend durch einfache und konventionelle Demontageprozesse wie z. B. mechanische Trennung von Edelstählen von niedriglegierten Stählen aus Großkomponenten, konventionelle Aufbereitung von Kupferkabelschrott und Elektromotoren und einfache Aufbereitung und Refining von Leiterplatten und sonstigem Elektronikschrott erschlossen werden können. Dies bedeutet, dass die hohen Wertpotenziale aus diesen Komponenten im Rahmen des Rückbaus der Kernkraftwerke vergleichsweise einfach und mit wenig Aufwand erschlossen werden können und in der Rückbaupraxis auch dies bereits erschlossen wird. Dieses Fazit schließt in Bezug auf den zuvor angesprochenen geringen Aufwand radioaktiv kontaminierte oder gar aktivierte Bauteile und Komponenten explizit aus.

- Das identifizierte Verwertungspotenzial für Wertmetalle und Wertlegierungen ist bauartbedingt im Falle des Druckwasserreaktors KKP 2 signifikant höher im Vergleich zum Siedewasserreaktor KKP 1. Zwar weist KKP 2 eine höhere Nettoleistung auf als KKP 1. Entscheidender für die Unterschiede ist jedoch, dass im Falle eines Siedewasserreaktors erheblich mehr Anlagenkomponenten (vor allem im Maschinenhaus) über den Primärkreislauf radioaktiv kontaminiert sind als im Falle eines Druckwasserreaktors und Dekontaminierungsprozesse daher aufwendiger sein können.
- Insgesamt errechnet sich aus der Hochskalierung der Ergebnisse für KKP 1 und KKP 2 auf alle in Deutschland relevanten (kommerziellen) Reaktoren ein Materialwert für Wertmetalle und Wertlegierungen von mehreren Hundert Mio. Euro. Für alle Druck- und Siedewasserreaktoren in Europa errechnet sich ein Materialwert im einstelligen Mrd. Euro Bereich.
- Aus den Ergebnissen der umfassenden Ökobilanz zum RecTecKA-Vorhaben zu KKP 1 und KKP 2 und deren Hochskalierung auf alle Kernreaktoren in Deutschland insgesamt ergibt sich bei einem hochwertigen Recycling der Metallinventare eine Einsparung an Treibhausgasen von nahezu 850.000 Tonnen CO₂-Eq. Dies entspricht dem jährlichen Ausstoß von rund 90.000 Einwohnern in Deutschland. Für ganz Europa liegt das Einsparpotential bei 5,35 Mio. t CO₂-Eq, was ungefähr dem CO₂-Eq Ausstoß von 750.000 Europäern pro Jahr entspricht.
- Anhand von ausgewählten Beispielen für radioaktiv kontaminierte Komponenten wie z. B. Dampferzeuger, die im RecTecKA-Vorhaben näher beleuchtet wurden, wird deutlich, dass hier zwar im Einzelfall weitere Potenziale für Metallrecycling bestehen. Es müssen jedoch sowohl für die Konzeption und Durchführung der Dekontaminierungsprozesse als auch für die notwendigen FreigabeprozEDUREN erhebliche Personal- und sonstige Ressourcen vorgehalten bzw. einkalkuliert werden.
- Den oben genannten Aufwendungen für Dekontaminierung und Freigabe stehen jedoch erhebliche Einsparungskosten hinsichtlich der Vermeidung von Endlagerkosten für radioaktive Abfälle von 30.000 €/m³ – mit steigender Tendenz – gegenüber. Es wird deutlich, dass es zur Entscheidungsfindung (Dekontamination und Freigabe versus Endlagerung als radioaktiver Abfall) jeweils umfassender Einzelfallprüfungen bedarf.

Als Ausblick aus den Ergebnissen des RecTecKA-Verbundvorhabens können die folgenden Punkte hervorgehoben werden:

- Der Rückbau von Kernkraftwerken in Deutschland bietet u. a. für Kupfer, Aluminium und Edelstähle aber auch für Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium eine attraktive und signifikante Quelle für Sekundärrohstoffe.
- Die Erschließung der Potenziale für die genannten Wertmetalle und Wertlegierungen aus dem Rückbau der Kernkraftwerke steht im direkten Einklang mit den Zielen des im April 2024 in Kraft getretenen European Critical Raw Materials Act - CRMA⁵ und ist damit für Deutschland und die EU ein hochaktuelles und strategisches Feld.
- Die Fachleute des Verbundpartners EnKK haben darüber hinaus explizit darauf hingewiesen, dass viele Erkenntnisse bzgl. der Metallinventare aus den konventionellen Anlagenbereichen der Kernkraftwerke auch interessante Rückschlüsse für den Rückbau von Kohle- sowie Erdgaskraftwerken zulassen. Dies beschränkt sich auf Anlagenteile und Komponenten wie Generatoren, die in allen Wärmekraftwerken benötigt werden. Hier gilt es in den nächsten Jahren

⁵ Regulation (EU) 2024/1252

hinsichtlich der großen Zahl an stillgelegten und noch stillzulegenden Kohle- und auch Erdgas-kraftwerken durch vergleichbare Inventarerhebungen wie in RecTecKA die Potenziale für das Metallrecycling genauer zu erheben.

- Es bedarf in den nächsten Jahren noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen für eine mögliche Ausweitung der Freigabe von Komponenten. Hier gilt es weitere Potenziale für besonders relevante Einzelkomponenten wie Dampferzeuger noch zu erschließen. Wie bereits beschrieben werden diese Aktivitäten mit erheblichen Aufwendungen verbunden sein und müssen erforscht und erprobt werden. Allerdings versprechen diese Aktivitäten im Erfolgsfall durch Reduzierung Abfallmengen bzgl. der erheblichen und weiter zunehmenden Endlagerkosten entsprechende positive wirtschaftliche Ergebnisse. Daher lohnt es sich unbedingt in den kommenden Jahren hier in weitere Anstrengungen zu investieren.