

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

Teil II. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

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.-Ing. Daniel Goldmann  
**TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Recycling und  
Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD)**

## Kontakt

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://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

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>1 Ausgangsbasis und Zielstellung des Vorhabens</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Stand von Wissenschaft und Technik</b>	<b>14</b>
1.1.1 Aktueller Rückbaufortschritt deutscher Kernkraftwerke	14
1.1.2 Metallinventare in Komponenten von Kernkraftwerken	16
1.1.3 Metallrecycling in der bisherigen Rückbaupraxis von Kernkraftwerken	18
1.1.4 Grundlagen der Freigabe radioaktiver Stoffe und der Herausgabe nicht radioaktiver aus dem Abbau von Kernkraftwerken	20
<b>1.2 Ziele und Arbeitshypothese des Forschungsvorhabens</b>	<b>23</b>
<b>2 Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential aus KKW Philippsburg 1 und 2</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und systematische Zuordnung der Komponenten</b>	<b>24</b>
<b>2.2 Bewertung der Freigabefähigkeit von Großkomponenten am Kernkraftwerksstandort Philippsburg</b>	<b>26</b>
2.2.1 Festlegung der Entsorgungsziele und technische Vorgehensweise beim Abbau der Komponenten, der Herausgabe und der Freigabe	26
2.2.2 Radiologische Charakterisierung und Zuordnung der Komponenten im KKP 1 und KKP 2 zu den Entsorgungszielen	30
<b>3 Inventarerhebung der werthaltigen Metalle aus KKW Philippsburg 1 und 2</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Auswertung der Materialdaten zu Groß-Komponenten</b>	<b>32</b>
3.1.1 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 2 (KKP 2)	33
3.1.2 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1 (KKP 1)	46
<b>3.2 Auswertung der Materialdaten zu Kabeln, E-Motoren und Stellantrieben</b>	<b>47</b>
3.2.1 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 2 (KKP 2)	47
3.2.2 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1 (KKP 1)	49
<b>3.3 Auswertung der Materialdaten der E- und Leittechnik</b>	<b>50</b>
3.3.1 Elektrobauteile	50
3.3.2 Mittelspannungsschalter	53
3.3.3 Schaltschränke und Platinen	53

3.3.4	Gesamt mengen an identifizierten werthaltigen Metallen	68
<b>4</b>	<b>Ermittlung des Materialwerts</b>	<b>70</b>
<b>4.1</b>	<b>Groß-Komponenten</b>	<b>71</b>
4.1.1	Kernkraftwerk Philippsburg, Block 2 (KKP 2)	71
4.1.2	Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1 (KKP 1)	74
<b>4.2</b>	<b>Kabel, E-Motoren und Stellantrieben</b>	<b>75</b>
<b>4.3</b>	<b>Komponenten der E- und Leittechnik</b>	<b>77</b>
<b>4.4</b>	<b>Zusammenfassung der Materialwerte für die Kraftwerke KKP 1 und KKP 2</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>Ökobilanzierung</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>Herausgabe- und Freigabeprozesse- Hemmnisse und Optimierung</b>	<b>84</b>
<b>6.1</b>	<b>Untersuchung möglicher Hemmnisse bei der Freigabe</b>	<b>84</b>
6.1.1	Technische Aspekte der Freigabe und damit verbundene Hemmnisse	84
6.1.2	Öffentliche Wahrnehmung und damit verbundene Hemmnisse	87
6.1.3	Formeller Ablauf der Freigabe und Freigabebescheid	88
<b>6.2</b>	<b>Mögliche Optimierungen im Freigabeprozess in Bezug auf wertvolle Materialien</b>	<b>88</b>
6.2.1	Überwinden von Hemmnissen	88
6.2.2	Beispiele für die Optimierung von Freigabeprozessen in Bezug auf wertvolle Materialien	90
6.2.3	Schlussfolgerungen	94
<b>7</b>	<b>Hochskalierung der Ergebnisse und Erhebung des ökologischen und ökonomischen Gesamtpotenzials</b>	<b>95</b>
<b>7.1</b>	<b>Hochskalierung auf Deutschland</b>	<b>95</b>
<b>7.2</b>	<b>Hochskalierung auf Europa</b>	<b>97</b>
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>99</b>
<b>Anhang 1 - Ökobilanzbericht zum RecTecKA-Vorhaben</b>		<b>103</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Optionen der Verwertungs- und Beseitigungswege	27
Abbildung 2-2: Entsorgungs- und Freigabeziele der EnBW Kernkraft GmbH	29
Abbildung 3-1: Digitalisierung von Werkstoffdatenblättern. Original (oben) und digitalisierte Daten (unten)	33
Abbildung 3-2: Übersichtsschema der Systeme in einem Druckwasserreaktor in Vor-Konvoi Bauweise	34
Abbildung 3-3: Prinzipschaltbild der Sicherheitssysteme KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)	35
Abbildung 3-4: Tonnagen aus Großkomponenten im Sicherheitssystem KKP 2	36
Abbildung 3-5: Prinzipschaltbild Primärkreis mit Hilfs- und Zusatzsystemen KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)	37
Abbildung 3-6: Tonnagen aus Großkomponenten in Primärkreis und Hilfs- und Zusatzsystemen KKP 2	38
Abbildung 3-7: Prinzipschaltbild Maschinenhaus KKP 2 (stark vereinfacht)	39
Abbildung 3-8: Tonnagen aus Großkomponenten in Maschinenhaus in KKP 2	41
Abbildung 3-9: Prinzipschaltbild Haupt- und Zwischen- und Nebenkühlwassersystem KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)	42
Abbildung 3-10: Tonnagen aus Großkomponenten in Haupt-, Neben- und Zwischenkühlwasserkreislauf KKP 2	43
Abbildung 3-11: Prinzipschaltbild Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)	44
Abbildung 3-12: Prinzipschaltbild Notspeisegebäude KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)	45
Abbildung 3-13: Tonnagen aus Großkomponenten in Notstromerzeugung/Notspeisesystem/Kaltwasserzentrale KKP 2	46
Abbildung 3-14: Tonnagen aus Großkomponenten aller Systeme KKP 1	47
Abbildung 3-15: Anzahl der Motoren in KKP 2 (innerhalb und außerhalb des Kontrollbereichs) gruppiert nach Leistungsspektrum	48
Abbildung 3-16: Darstellung von leichten Elektrobauteilen aus dem Rückbau	50
Abbildung 3-17: Aufbereitungsweg für Elektrobauteile	51
Abbildung 3-18: Fließschema der Platinen Aufbereitung	54

Abbildung 3-19: Prozentuale Verteilung der Massen auf die Blöcke 1 und 2 (KKP 1 und KKP 2)	58
Abbildung 3-20: Metallgehalte gegen verbaute Anzahl auf das Kraftwerk gerechnet	59
Abbildung 3-21: Metallgehalte gegen verbaute Anzahl in KKP 1	60
Abbildung 3-22: Metallgehalte gegen verbaute Anzahl in KKP 2	60
Abbildung 3-23: Bildaufnahme zur erzeugten „Fraktion 4“	66
Abbildung 3-24: Bildaufnahme zur erzeugten „Fraktion 5“	66
Abbildung 3-25: Bildaufnahme zur erzeugten „Fraktion 7“	68
Abbildung 4-1: Wert der Materialien der Großkomponenten im Sicherheitssystem KKP 2	71
Abbildung 4-2: Wert der Materialien der Großkomponenten im Primärkreis und Hilfs- und Zusatzsysteme von KKP 2	72
Abbildung 4-3: Wert der Materialien der Großkomponenten im Maschinenhaus in KKP 2	73
Abbildung 4-4: Wert der Materialien der Großkomponenten im Haupt-, Neben- und Zwischenkühlwasserkreislauf in KKP 2	73
Abbildung 4-5: Wert der Materialien der Großkomponenten im Notstromerzeugung, Notspeisesysteme und Kaltwasserzentrale von KKP 2	74
Abbildung 4-6: Wert der Materialien der Großkomponenten aller Systeme in KKP 1	75
Abbildung 4-7: Materialwerte und Abnahmepreise Kabel	76
Abbildung 4-8: Materialwerte und Abnahmepreise Elektromotoren	76
Abbildung 4-9: Materialwerte und Abnahmepreise Stellantriebe	77
Abbildung 4-10: Materialwerte und Abnahmepreise für Elektrische Bauteile	78
Abbildung 4-11: Materialwerte und Abnahmepreise Schaltschränke	78
Abbildung 4-12: Materialwerte und Abnahmepreise Gießharzschalter	79
Abbildung 4-13: Materialwerte der identifizierten Komponenten	80
Abbildung 5-1: Einsparpotentiale von Treibhausgasen durch das Recycling von werthaltigen Metallen in kerntechnischen Anlagen	83
Abbildung 6-1: Abbildung eines Dampferzeugers	91

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Kernkraftwerke (Leistungsreaktoren) der Bundesrepublik Deutschland in Stilllegung	14
Tabelle 1-2: Kernkraftwerke (Leistungsreaktoren) der Bundesrepublik Deutschland - endgültig abgeschaltet, keine Stilllegungsgenehmigung erteilt bzw. Stilllegungsgenehmigung noch nicht in Anspruch genommen	16
Tabelle 1-3: Eingeschmolzene Metalle zwischen den Jahren 1987 und 2015 in der Schmelzanlage von Studsvik in Schweden	18
Tabelle 1-4: Freigabeoptionen der Tabelle 1 der Strahlenschutzverordnung (Auszug aus Tabelle 1, Anlage 4, StrSchV)	21
Tabelle 3-1: Gesamtmenge und Kupfer- bzw. Aluminiummenge der in KKP 2 verbauten Kabel und Motoren	49
Tabelle 3-2 Mengenströme der Stellantriebe in KKP 2	49
Tabelle 3-3 Gesamtmenge und Kupfer- bzw. Aluminiummenge der in KKP 1 verbauten Kabel und Motoren	49
Tabelle 3-4 Massen an Elektronischen Einrichtungen KKP 1 und KKP 2	52
Tabelle 3-5 Fraktionen und deren Anteile bei der mechanischen Aufbereitung von Elektrobauteile	52
Tabelle 3-6 Absolute Mengen bei der Aufbereitung von Elektrobauteilen	52
Tabelle 3-7 Aufschlüsselung der Mittelspannungsschalter nach Gesamtmasse und Masse an versilberten Kontakten	53
Tabelle 3-8 Berechnete Gehalte der Baugruppen	56
Tabelle 3-9 Ermittelte Gesamtmassen in Baugruppen	56
Tabelle 3-10 Massenanteile der Baugruppen bezogen auf KKP 1 und KKP 2	57
Tabelle 3-11 Erläuterung zur optischen Sortierung von Leiterplatten	61
Tabelle 3-12 Massen und Wertmetallgehalte bei Trennung der Platinen nach KKP 1 und KKP 2	62
Tabelle 3-13 Massen und Wertmetallgehalte bei gesammelter Abgabe	62
Tabelle 3-14 Edelmetallgehalte bei Trennung nach Edelmetallgehalten	62
Tabelle 3-15 Massen und Wertmetallgehalte bei Trennung nach Edelmetallgehalten	63
Tabelle 3-16 Im Sortierprozess erzeugte Fraktionen	63
Tabelle 3-17 Schaltschrankkalkulation KKP 1	64

Tabelle 3-18 Schaltschrankkalkulation zu KKP 2. Anteile und absolute Mengen der erzeugten Fraktionen	64
Tabelle 3-19 Zusammensetzung der Fraktion 3	65
Tabelle 3-20 Zusammensetzung der Fraktion 4	65
Tabelle 3-21 Zusammensetzung der „Fraktion 5“	67
Tabelle 3-22 Zusammensetzung der „Fraktion 6“	67
Tabelle 3-23 Zusammensetzung der „Fraktion 7“	68
Tabelle 3-24 Gesamtmengen an identifizierten werthaltigen Metallen	69
Tabelle 4-1 Angesezte Preise für die identifizierten Materialströme	70
Tabelle 7-1 Datengerüst zur Hochskalierung der Ergebnisse zu KKP 1 und KKP 2 auf Deutschland, gesamt. Daten aus IAEA (2024)	95
Tabelle 7-2 Ergebnisse der Hochskalierung auf alle kerntechnischen Anlagen in Deutschland	96
Tabelle 7-3 Aggregierte Leistung aller Reaktoren in Europa. Datenbasis: IAEA (2024)	97
Tabelle 7-4 Ergebnisse der Hochskalierung auf alle kerntechnischen Anlagen in Europa	98



## Abkürzungsverzeichnis

Ag	Silber
Al	Aluminium
AKZ	Anlagenkennzeichnungssystem
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren
Au	Gold
BB	Brandenburg
BE	Brennelement
BFS	Betriebsführungssystem
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
Bq	Becquerel
BW	Baden-Württemberg
BWR	Boiling Water Reactor (Siedewasserreaktor)
BY	Bayern
CO <sub>2</sub> -Eq	CO <sub>2</sub> (Wasserstoff)-Äquivalent
Cr	Chrom
CRMA	European Critical Raw Materials Act
Cu	Kupfer
DE	Dampferzeuger
DEU	Deutschland
DERA	Deutsche Rohstoffagentur (in der BGR)
DIN	Deutsche Industrie Norm

DWR	Druckwasserreaktor
EDF	Electricité de France
EEA	European Environment Agency (Seite 92)
EK VS	interne Bezeichnung für eine (metallreiche) Sortierfraktion bei der Aufbereitung von Elektroschrott
EnBW	Energie Baden-Württemberg AG
EnKK	EnBW Kernkraft GmbH
ESK	Entsorgungskommission
EU	Europäische Union
EVA	Einwirkungen von Außen
EWN	Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (vormals Energiewerke Nord GmbH)
Fe	Eisen
G	Generator
G	Gesamtmasse
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GKN	Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim/Kernkraftwerk Neckarwestheim
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HD	Hochdruck (wie HD-Sicherheitseinspeisepumpe)
HE	Hessen
HKMP	Hauptkühlmittelpumpe
IAEA	International Atomic Energy Agency
ISO	Internationale Organisation für Normung
KBR	Kernkraftwerk Brokdorf
KBR	Kontrollbereich

---

kg	Kilogramm
KGR	Kernkraftwerk Greifswald
KK	Kontaminationsklassen
KKE	Kernkraftwerk Emsland
KKG	Kernkraftwerk Grafenrheinfeld
KKG	Kernkraftwerk Gösgen (Schweiz)
KKI	Kernkraftwerk Isar
KKK	Kernkraftwerk Krümmel
KKP	Kernkraftwerk Philippsburg
KKR	Kernkraftwerk Rheinsberg
KKS	Kernkraftwerk Stade
KKS	Kraftwerkkenzeichnungssystem
KKW	Kernkraftwerk (Gösgen, Leibstadt etc.)
KRB	Kernkraftwerk Gundremmingen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kW	Kilowatt
KWG	Kernkraftwerk Grohnde
KWL	Kernkraftwerk Lingen
KWO	Kernkraftwerk Obrigheim
mm	Millimeter
Mo	Molybdän
MV	Mecklenburg-Vorpommern
MW	Megawatt
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NI	Niedersachsen

Ni	Nickel
NRW	Nordrhein-Westfalen
OECD/NEA	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung/ Nuclear Energy Agency
Pd	Palladium
ppm	parts per million
PS	Pferdestärke
PWR	Pressurized Water Reactor (Druckwasserreaktor)
RBZ	Reststoffbearbeitungszentrum
RecTecKA	Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben
RK	Radiologische Kategorie
RP	Rheinland-Pfalz
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SH	Schleswig-Holstein
StrlSchG	Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz)
StrlSchV	Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung)
SWR	Siedewasserreaktor
t	Tonne
Ti	Titan
TU Clausthal	Technische Universität Clausthal
USUS	Unabhängiges Sabotage- und Störfallschutzsystem
V2A	korrosionsbeständiger Stahl (CrNi-Stahl)
V4A	korrosionsbeständiger Stahl (CrNiMo-Stahl)
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor (DWRn sow./russ. Bauart)

Zn

Zink

# 1 Ausgangsbasis und Zielstellung des Vorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Identifikation des Recyclingpotentials hochwertiger metallischer Werkstoffe und Elektronikkomponenten beim Rückbau von Kernkraftwerken gemäß den Förderzielen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Förderpolitisches Ziel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ist u. a. die Förderung von Vorhaben, die die Weiterentwicklung von Verfahren zum Recycling von wertvollen Metallen voranbringen. Das Verbundvorhaben RecTeckKA ist ein wesentlicher Beitrag zum Erreichen dieser Ziele, da es speziell im Bereich Kernkraftwerke solche Metalle und Legierungen zum Gegenstand hat, die in bisherigen Forschungsvorhaben bislang nicht zielgerichtet angesprochen wurden.

## 1.1 Stand von Wissenschaft und Technik

### 1.1.1 Aktueller Rückbaufortschritt deutscher Kernkraftwerke

Mit dem beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland befinden sich die Kernkraftwerke (Leistungsreaktoren) der Bundesrepublik Deutschland mittlerweile in der Stilllegung. Gemäß Atomgesetz (AtG) müssen diese Anlagen unverzüglich stillgelegt und abgebaut werden. Der Rückbau der Kernkraftwerke liegt in der Verantwortung der Kraftwerks-Betreiber und erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. 10 bis 15 Jahren. Im Zuge des Rückbaus werden die verbliebenen Gebäudestrukturen dekontaminiert, freigemessen und einer anderweitigen Nutzung zugeführt oder abgerissen.

Tabelle 1-1 gibt eine kurze Übersicht über die Kernkraftwerke (Leistungsreaktoren) der Bundesrepublik Deutschland, die sich in Stilllegung befinden. Unter Stilllegung werden gemäß (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2021) sämtliche stilllegungsgerichteten Maßnahmen (einschließlich sicherem Einschluss und Abbau) verstanden.

**Tabelle 1-1: Kernkraftwerke (Leistungsreaktoren)<sup>1</sup> der Bundesrepublik Deutschland in Stilllegung**

Name	Kurzbezeichnung	Reaktor-typ	Leistung MWe (brutto)	Leistungs-betrieb ab	außer Betrieb-nahme	erste Stillle-gungsge-nehmigung	Betreiber	Standort
Grohnde	KWG	DWR	1.430	1985	Dez. 2021	Okt. 2017	PreussenElektra GmbH	Emmerthal (NI)
Rheinsberg	KKR	DWR / WWR	70	1966	Juni 1990	April 1995	Entsorgungswerk für Nukle-aranlagen GmbH (EWN)	Rheinsberg (BB)
Obrigheim	KWO	DWR	357	1969	Mai 2005	Aug. 2008	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Obrigheim (BW)
Neckar-westheim 1	GKN I	DWR	840	1976	Aug. 2011	Feb. 2017	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Neckarwestheim (BW)
Neckar-westheim 2	GKN II	DWR	1.400	1989	April 2023	April 2023	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Neckarwestheim (BW)

<sup>1</sup> Nicht berücksichtigt in dieser Auflistung sind die sog. Prototypreaktoren, auch wenn diese zeitweise Elektrizität in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist (sog. Leistungsbetrieb) haben. Diese sind aufgrund ihrer Besonderheiten im Rahmen des Forschungshabens nicht zu berücksichtigen.

Name	Kurzbezeichnung	Reaktor-typ	Leistung MWe (brutto)	Leistungs-betrieb ab	außer Betrieb-nahme	erste Stillle-gungsge-nehmigung	Betreiber	Standort
Philippsburg 1	KKP 1	SWR	926	1980	Aug. 2011	Ap-ril.2017	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Philippsburg (BW)
Philippsburg 2	KKP 2	DWR	1.468	1985	Dez. 2019	Dez.2019	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Philippsburg (BW)
Isar 1	KKI 1	SWR	912	1979	Aug. 2011	Jan. 2017	PreussenElektra GmbH	Essenbach (BY)
Isar 2	KKI 2	DWR	1.485	1988	April 2023	Juli 2019	PreussenElektra GmbH	Essenbach (BY)
Gundrem-mingen A	KRB A	SWR	250	1967	Jan. 1977	Mai 1983	RWE Nuclear GmbH	Gundrem-mingen (BY)
Grafen-rheinfeld	KKG	DWR	1.345	1982	Juni 2015	April 2018	PreussenElektra GmbH	Grafen-rheinfeld (BY)
Gundrem-mingen B	KRB II B	SWR	1.344	1984	Dez. 2017	März2019	RWE Nuclear GmbH	Gundrem-mingen (BY)
Gundrem-mingen C	KRB II C	SWR	1.344	1985	Dez. 2021	Mai 2021	RWE Nuclear GmbH	Gundrem-mingen (BY)
Biblis-A	KWB A	DWR	1.225	1975	Aug. 2011	März2017	RWE Nuclear GmbH	Biblis (HE)
Biblis-B	KWB B	DWR	1.300	1977	Aug. 2011	März2017	RWE Nuclear GmbH	Biblis (HE)
Greifswald-1	KGR 1	DWR / WWR	440	1974	Dez. 1990	Juni 1995	Entsorgungswerk für Nukle-aranlagen GmbH (EWN)	Lubmin (MV)
Greifswald-2	KGR 2	DWR / WWR	440	1975	Feb. 1990	Juni 1995	Entsorgungswerk für Nukle-aranlagen GmbH (EWN)	Lubmin (MV)
Greifswald-3	KGR 3	DWR / WWR	440	1978	Feb. 1990	Juni 1995	Entsorgungswerk für Nukle-aranlagen GmbH (EWN)	Lubmin (MV)
Greifswald-4	KGR 4	DWR / WWR	440	1979	Juni 1990	Juni 1995	Entsorgungswerk für Nukle-aranlagen GmbH (EWN)	Lubmin (MV)
Greifswald-5	KGR 5	DWR / WWR	440	-	Nov. 1989	Juni 1995	Entsorgungswerk für Nukle-aranlagen GmbH (EWN)	Lubmin (MV)
Greifswald-6	KGR 6	DWR / WWR	440	-	-	-	Entsorgungswerk für Nukle-aranlagen GmbH (EWN)	Lubmin (MV)
Lingen	KWL	SWR	252	1968	Jan. 1977	Dez. 2015	Kernkraftwerk Lingen GmbH (Tochterunterne-hmen der RWE Nuclear GmbH)	Lingen (NI)
Stade	KKS	DWR	672	1972	Nov. 2003	Sept.2005	PreussenElektra GmbH	Stade (NI)
Unterweser	KKU	DWR	1.410	1979	Aug. 2011	Feb. 2018	PreussenElektra GmbH	Esenshamm (NI)
Würgassen	KWW	SWR	670	1975	Aug. 1994	April 1997	PreussenElektra GmbH	Würgassen (NRW)
Mülheim-Kärlich	KMK	DWR	1302	1987	Sept.1988	Juli 2004	RWE Nuclear GmbH	Mülheim-Kärlich (RP)

Name	Kurzbezeichnung	Reaktor-typ	Leistung MWe (brutto)	Leistungsbe-trieb ab	außer Betrieb-nahme	erste Stillle-gungsge-nehmigung	Betreiber	Standort
Brunsbüttel	KKB	SWR	806	1977	Aug. 2011	Dez. 2018	Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH & Co. oHG	Brunsbüttel (SH)

Quelle: RecTeCKA-Verbund, nach (Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) 2024)

In Tabelle 1-2 sind diejenigen Kernkraftwerke gelistet, die zwar endgültig abgeschaltet sind, die Stilllegungsgenehmigung aber bis Stand April 2024 nicht erteilt bzw. vom Betreiber noch nicht in Anspruch genommen wurde.

**Tabelle 1-2: Kernkraftwerke (Leistungsreaktoren) der Bundesrepublik Deutschland - endgültig abgeschaltet, keine Stilllegungsgenehmigung erteilt bzw. Stilllegungsgenehmigung noch nicht in Anspruch genommen**

Name	Kurzbezeichnung	Reaktor-typ	Leistung MWe (brutto)	Leistungsbe-trieb ab	außer Be-triebnahme	Antrag auf Stillle-gung / erste Stillle-gungsge-nehmigung	Betreiber	Standort
Krümmel	KKK	SWR	1.402	1984	Aug. 2011	Aug. 2015	Kernkraftwerk Krümmel GmbH & Co. oHG	Krüm-mel (SH)
Brokdorf	KBR	DWR	1.480	1986	Dez. 2021	Dez.2017	PreussenElek-tra GmbH	Brok-dorf (SH)
Emsland	KKE	DWR	1.406	1988	April 2023	Dez. 2016	RWE Nuclear GmbH	Lingen (NI)

Quelle: RecTeCKA-Verbund, nach (Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) 2024)

### 1.1.2 Metallinventare in Komponenten von Kernkraftwerken

Detaillierte Informationen zu Metallinventaren in Kernkraftwerken wurden in der Fachliteratur bislang nur gelegentlich behandelt. Dies ist aus dem Umstand zu erklären, dass die Funktionalität von Komponenten im Mittelpunkt des Interesses stand. Daraus ergeben sich zwar Ableitungen bzgl. benötigter spezifischer Werkstoffe – allerdings waren detaillierte Quantifizierungen der jeweiligen Metallinventare hierbei in der Regel von untergeordnetem Interesse. Ungeachtet dessen werden in diesem Abschnitt einige Quellen beschreiben, die zu Beginn des Vorhabens bereits verfügbar waren.

(Bryan und Dudley 1974) geben für einen US-amerikanischen Druckwasserreaktor der 1000 MW Klasse insgesamt ca. 32.700 Tonnen niedriglegierte und ca. 2.000 Tonnen hochlegierte Stähle an. Es werden für den Bau eines Kernkraftwerks dieser Größe außerdem rund 1.250 Tonnen sonstige Eisenmetalle, 18 Tonnen Aluminium, 10 Tonnen Messing, 25 Tonnen Bronze, knapp 700 Tonnen reines Kupfer, 46 Tonnen Blei, 1 Tonne Nickel und ca. 500 kg Silber benötigt. Bei diesen Zahlen sind Verbrauchsmaterialien mitberücksichtigt, die während der Bauphase also verbraucht werden und nicht im Kraftwerk verbaut sind.

Ebenfalls von Interesse sind Angaben zu Metallinventaren auch bei der Öko-Bilanzierung. Die aktuelle Version der Ecoinvent-Datenbank v. 3.10 (Wernet et al. 2016) nutzt zwei Kernkraftwerke der Schweiz, das KKW Gösgen und das KKW Leibstadt als Referenz. Demnach sind in Komponenten



insgesamt bis zu etwa 22.000 Tonnen Stahl verwendet worden. Angaben zu Betonstahl- bzw. Spannbewehrung, der auf den gesamten Betonblock der Anlage bezogen wird, belaufen sich je nach Größe etwa auf 33.000 bis 40.000 Tonnen. Von Bedeutung für Ökobilanzen sind knapp 1.500 Tonnen Kupfer und ca. 130 Tonnen Titan, die im KKW Leibstadt als Kondensatorrohre eingesetzt werden. Die Primärdaten sind in unveröffentlichten Arbeiten aus den frühen 1980er Jahren erhoben worden, die in einer Veröffentlichung des Ecoinvent Centre zusammengefasst und ggf. aktualisiert wurden (Roberto Dones et al. 2009).

Nach jüngeren Erhebungen der RWTH Aachen befinden sich in einem deutschen Kraftwerk in Großkomponenten mit Druckwasserreaktor etwa 15.000 bis 16.000 Tonnen Eisen und Stahllegierungen. Hinzu kommen knapp 1.300 Tonnen Kupferlegierungen wie Messing. Es werden etwa 150 Tonnen Kupfer in Motoren (Wicklungen) und weitere nennenswerte Massen an Kupfer in etwa 1000 Tonnen Kabelschrotten geschätzt (Büttner et al. 2016, S. 51).

Die genannten Metallinventare verteilen sich dabei auf unterschiedliche Großkomponenten. Niedriglegierte Stähle bzw. Nickelbasislegierungen sind z. B. in Rohren des Primär- und des Sekundärkreises (DWR), Pumpsystemen, Druckhaltern, etc., vorhanden. Besonders häufig zum Einsatz kommt der Stahl 20MnMoNi55. Bei der Anwendung in Rohren des Hauptkühlkreislaufs ist dieser zum Schutz vor Korrosion plattiert (z. B. Inconel 600). In Teilkomponenten, die hohen Materialanforderungen (wie z. B. Dampferzeugerheizrohre) genügen müssen, kommen sog. Superlegierungen wie Inconel 600, Inconel 718 oder Inconel 800, die weitere Zuschlagsstoffe wie Chrom, Magnesium, Eisen und Titan enthalten, vor. Werkstoffe mit hoher Druck- und Temperaturbeständigkeit, wie sie in zahlreichen weiteren Wärmetauschern vorkommen, sind Legierungen wie 15Mo3 und 13CrMo44. Im Weiteren sind Cu-haltige Legierungen wie CuZn20Al oder CuZn40 etwa in Kondensatoren zu finden. Reines Kupfer findet man in Elektromotoren und Kabelschrotten. Für Turbinen in Kernkraftwerken ergibt sich eine mangelnde Datenlage. In konventionellen Dampfkraftwerken werden aufgrund der Materialanforderungen auch hier für die Schaufeln Legierungen wie Refractoloy 70 oder 80, Ti-6Al-4V oder Inconel 718 zum Einsatz gebracht (Büttner et al. 2016).

Metallschrotte müssen im Rückbau radiologisch bewertet werden. Dazu werden je nachdem, welche Voraussetzungen vorliegen, die Verfahren Herausgabe und Freigabe angewendet. So kann ermittelt werden, inwiefern die Stoffmengen der Entsorgung oder einem Verwendungszweck wie der Wiederverwertung nach Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) zufließen.

Im KKW Stade<sup>2</sup> in Deutschland wurden 13.000 Tonnen Metallschrott demontiert (Stand: 2014) und 30% davon zum Einschmelzen gebracht (OECD-NEA 2017; Bacmeister 2014). Es handelt sich dabei um einen in der kerntechnischen Industrie bevorzugten Recyclingweg, wenn nur geringfügige radiologische Kontaminationen nach der Freigabe nachgewiesen sind. Zur weiteren Ausführung über Recyclingwege geben Kapitel 1.1.3 und 1.1.4 einen Überblick.

Schrott, der mit vertretbarem Aufwand vor Ort dekontaminiert werden kann oder keiner Dekontamination bedarf, wird in der Regel vor Ort freigegeben und kann direkt von Recyclingfirmen verarbeitet werden (Bacmeister 2014). Es handelt sich in diesem Fall schätzungsweise somit um etwa 9.000 Tonnen nichtkontaminiertes Metall, das aus dem Kernkraftwerk Stade zwischen den Jahren 2005 und 2014 dem Recycling zugeführt wurden. Der Anteil der recyclingfähiger Metalle beträgt hier etwa

---

<sup>2</sup> Das KKW Stade befindet sich seit 2005 im Rückbau. Es handelte sich um einen Druckwasserreaktor mit 1892 MW thermischer Leistung (672 MW elektrisch). Nach Betreiberinformationen befindet sich der Rückbau in der vorletzten Phase. Im Reaktorgebäude innerhalb des kugelförmigen Sicherheitsbehälters aus Stahl läuft seit 2018 die Demontage des zylinderförmigen Splitterschutzes (<https://www.preussenelektra.de/de/unsere-kraftwerke/kraftwerkstade.html>).

70% bezogen auf die gesamte Masse an bisher angefallenem und bilanziertem Metallschrott. Dies entspricht jedoch nicht dem Gesamtanfall an Metallen, da der Rückbau bei Erstellung des Berichts (Bacmeister 2014) noch nicht abgeschlossen war.

Auch der Blick auf das Metallrecycling aus der kerntechnischen Industrie in Schweden zeigt, welche Arten von Metallschrotten anfallen und wie deren mengenmäßiges Verhältnis zueinander ist (OECD-NEA 2017). Bei der Aufschlüsselung ist zu beachten, dass bei der Datenaggregation nicht zwischen Freigabepfaden (siehe Kapitel 1.1.3) differenziert worden ist.

**Tabelle 1-3: Eingeschmolzene Metalle zwischen den Jahren 1987 und 2015 in der Schmelzanlage von Studsvik in Schweden**

Metallfraktion	Masse in Tonnen	Anteil an der Gesamtmasse der Metalle in Prozent
Niedriglegierter Stahl	32.000	71,6
Edelstahl	5.200	11,6
Aluminium	2.033	4,5
Blei	1.153	2,6
Messing	307	0,7
Kupfer (ohne Kabel)	99	0,2
Kupfer in Kabeln	3.896	8,7

Quelle: RecTeckKA-Verbund, nach (OECD-NEA 2017)

Ungeachtet der zitierten Quellen war zu Beginn des Vorhabens (Mai 2021) der Wissensstand zu Inventaren von Wertmetallen und -legierungen in Kernkraftwerken insgesamt lückenhaft und nicht konsistent. Dies gilt nicht zuletzt auch für Edelmetalle in diversen Elektronikkomponenten wie Silber, Palladium und Gold. Eine umfassende und detaillierte Datenerfassung sowohl für Basismetalle bzw. Legierungen in Großkomponenten als auch zu Edelmetallen in Elektronikkomponenten erfolgte bislang in einschlägigen Studien nicht. Außerdem zeigt der bisherige Wissenstand noch deutliche Lücken bei der Zuordnung in die gängige Freigabep Praxis einzelner Metallfraktionen.

Hier setzt das Forschungsvorhaben RecTeckKA am Kernkraftwerksstandort Philippsburg am Beispiel eines Siedewasserreaktors (KKP 1) und eines Druckwasserreaktors (KKP 2) an. Es fokussiert auf Wertmetalle und -legierungen wie Edelstähle, Messing, Kupfer, Aluminium, Titan sowie auf Edelmetalle wie Palladium, Gold und Silber. Niedriglegierte Stähle hingegen lagen nicht im Fokus des Forschungsvorhabens RecTeckKA.

### 1.1.3 Metallrecycling in der bisherigen Rückbaupraxis von Kernkraftwerken

Beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen ist grundsätzlich die Restaktivität der Anlagenteile ein entscheidendes Maß für den weiteren möglichen Verwendungszweck. Die Prüfung der Restaktivität erfolgt durch die im gesetzlichen Regelwerk festgelegten Verfahren der Herausgabe und Freigabe. Diese Verfahren spielen eine zentrale Rolle bei der Entscheidung über den möglichen Verwendungszweck. Die Heraus- und Freigabeverfahren werden in Kapitel 1.1.4 Kapitel näher beschrieben. Die hier beschriebenen Wege für die direkte Freigabe bzw. die spezifische Freigabe kontaminierter

Komponenten sind als Standardprozesse im Rückbau etabliert und decken fast den gesamten Massenstrom aus dem Rückbau ab. Nur ca. 1 % der Masse muss aufgrund der Kontamination/Radiologie dem Abfall zugeordnet werden.

Aus der Bewertung der nachweislich vorhandenen oder nicht vorhandenen Restaktivität lassen sich die Optionen des Verwendungszwecks für die gängigen Verfahren folgendermaßen gliedern:

1. Direkte Abgabe am Standort des Rückbaus an ein Recyclingunternehmen als Herausgabe:

Diese Route umfasst die direkte Abgabe (bzw. den Verkauf) des Metalls an ein Recyclingunternehmen, wie dies auch außerhalb der Kerntechnik üblich ist. Bei solchen Metallen konnte eine Kontamination im Rahmen der Herausgabe plausibel ausgeschlossen werden.

2. Einige Metalle beinhalten aufgrund deren Historie geringfügige Restaktivität. Diese können erst nach einer messtechnischen Prüfung im Rahmen der uneingeschränkten oder spezifischen Freigabe abgegeben werden.

a) Die Metalle aus der uneingeschränkten Freigabe können ohne strahlenschutzrelevante Einschränkungen gehandhabt, benutzt, weitergegeben oder verarbeitet werden. Die abfallrechtlichen Randbedingungen an bestimmte Entsorgungswege sind hiervon unberührt.

b) Die Metalle aus der spezifischen Freigabe sind an spezifische Randbedingungen bzw. Entsorgungswege gebunden und es ist eine Abgabe am Standort des Rückbaus an einen zertifizierten Schmelzbetrieb mit strahlenschutzrechtlicher Umgangsgenehmigung erforderlich.

– Solche radioaktiven Stoffe können nach der Freimessung in einer Schmelze oftmals so weit dekontaminiert werden<sup>3</sup>, dass sie anschließend in den konventionellen Stoffkreislauf gehen können. Ein Produkt einer Schmelzanlage ist ein Gießling, der, zusammen mit Strahlschrott aus anderen Herkunftsbereichen als aus der Kerntechnik, in einer herkömmlichen Schmelzanlage erneut eingeschmolzen werden kann. Hochwertige Legierungsbestandteile gehen allerdings beim Einschmelzen für industrielle Zwecke, in denen diese gezielt benötigt werden, verloren, da eine vorherige Separierung nicht möglich ist.

– Als eine weitere Option im Rahmen der Spezifischen Freigabe hat sich in der letzten Zeit die Beauftragung für den Abbau und Entsorgung ganzer Großkomponenten wie Dampferzeuger an spezialisierte Unternehmen, auch im Europäischen Ausland, etabliert. Solch kosteneffiziente Entsorgung von Großkomponenten im kerntechnischen Abbau wird zunehmend als eines der zentralen Themen gesehen; die Suche nach günstigen Optionen zeigt, dass die Behandlung größerer Komponenten außerhalb des Standorts viele Vorteile bietet, da die Notwendigkeit der maßgeschneiderten Zerkleinerung und des Baus von Abfallbehandlungsanlagen vor Ort für große Komponenten entfällt (Krause et al. 2016). So hat PreussenElektra die schwedische Firma Cyclife, Tochterunternehmen der Electricité de France (EDF) mit dem Abbau und der Entsorgung der insgesamt 16 Dampferzeuger in den Kernkraftwerken Unterweser, Grafenrheinfeld, Grohnde und Brokdorf beauftragt. Cyclife entwickelte vor etwa 15 Jahren ein Verfahren zur Zerlegung und Verarbeitung von Dampferzeugern und baute auch die hierfür notwendige Infrastruktur auf. So sollen die Dampferzeuger als Ganzes herausgehoben und dann per Schiff nach Schweden abtransportiert werden, wo sie zerlegt und für die Entsorgung und ggf. Recycling vorbereitet werden (PreussenElektra 2021).

---

<sup>3</sup> Eine Dekontamination beim Einschmelzen heißt, dass einige Radionuklide in die Schlacke oder Filterstäube übergehen.

3. Ebenfalls als Recycling von Metallen wird in der einschlägigen Literatur die Wiederverwendung von ganzen Komponenten oder Teilkomponenten, Abschirmeinrichtungen etc. in der Kerntechnik verstanden oder es werden Metalle, für die keine Freigabe möglich ist, eingeschmolzen und in Form von z. B. Abschirmungen dem kerntechnischen Stoffkreislauf zugeführt (vgl. Kapitel 2.2). So können z. B. Transportbehälter für radioaktive Abfälle oder Abschirmplatten hergestellt werden, die in der kerntechnischen Industrie oder Laboren weiter eingesetzt werden (Bounin et al. 2002; Bounin und Kleinkröger 2009; Siempelkamp Nuklear- und Umwelttechnik GmbH 2020). Dieser Wiederverwendungspfad wird in diesem Vorhaben nicht verfolgt.

#### 1.1.4 Grundlagen der Freigabe radioaktiver Stoffe und der Herausgabe nicht radioaktiver aus dem Abbau von Kernkraftwerken

Nach der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV, (StrlSchV 2018)) unterscheidet man auf den Betriebsgeländen kerntechnischer Anlagen zwischen Kontrollbereichen und betrieblichen Überwachungsbereichen.

Grundsätzlich sind alle Gegenstände oder Materialien, die im Kontrollbereich eines Kernkraftwerks waren, als radioaktive Stoffe anzusehen. Auch in Überwachungsbereichen können Kontaminationen auftreten. Alle Gegenstände oder Materialien aus dem Kontroll- oder Überwachungsbereich, die möglicherweise aktiviert oder kontaminiert sind, müssen daher im Rahmen eines Freigabeverfahrens freigemessen und freigegeben werden, bevor sie konventionell weiterverwendet oder beseitigt werden dürfen (Entsorgungskommission (ESK) 2022). Die Stoffe außerhalb des Kontrollbereichs, bei welchen eine Kontamination plausibel ausgeschlossen werden kann, werden **der Herausgabe** zugeführt. Es handelt sich um Komponenten und Stoffe oder auch ganze Flächen, bei denen aufgrund deren Betriebshistorie und Nutzung nachgewiesen werden kann, dass eine Kontamination oder Aktivierung ausgeschlossen ist (nicht radioaktive Reststoffe<sup>4</sup>).

Die Voraussetzungen für die Freigabe sind in der StrlSchV (StrlSchV 2018) geregelt. Freigabe ist demnach möglich als

- **Uneingeschränkte Freigabe** nach § 35 StrlSchV: bedarf keiner Festlegung hinsichtlich der künftigen Nutzung, Verwendung, Verwertung, Wiederverwertung, Beseitigung oder dem endgültigen Verbleib der Stoffe.
- **Spezifische Freigabe** nach § 36 StrlSchV: bedarf einer Festlegung hinsichtlich der zukünftigen Nutzung, Verwendung, Verwertung, Wiederverwertung, Beseitigung oder dem endgültigen Verbleib der Stoffe.
- Alternativ zur uneingeschränkten oder spezifischen Freigabe ermöglicht der Verordnungsgeber die **Freigabe im Einzelfall** nach § 37 StrlSchV. Es handelt sich um eine fallbezogene Nachweisführung, dass das Dosiskriterium der Freigabe eingehalten ist.

Für die Freigabe ist die Einhaltung des Dosiskriteriums gemäß § 31 StrlSchV und der daran geknüpften Randbedingungen zu belegen. Demnach dient die Freigabe dem Nachweis, dass für Einzelpersonen der Bevölkerung durch die freizugebenden Stoffe und Gegenstände nur eine effektive

---

<sup>4</sup> Als nicht radioaktive Reststoffe werden Stoffe, bewegliche Gegenstände, Anlagen und Anlagenteile bezeichnet, die weder kontaminiert noch aktiviert sind. Nicht radioaktive Reststoffe fallen außerhalb von Gebäuden des Kontrollbereichs an.

Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Kalenderjahr auftreten kann. Im Mittel erhält eine Referenzperson durch natürliche Umgebungsstrahlung in Deutschland eine Strahlenexposition von 2100 Mikrosievert im Jahr. Die gesetzlich zulässige Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung liegt somit um mehrere Größenordnungen unter der natürlichen Umgebungsstrahlung.

Nachfolgende Tabelle 1-4 mit dem Ausschnitt der Tabelle aus der Anlage 4 der StrlSchV zeigt sämtliche Optionen der radiologischen Freigabe im Überblick, beispielhaft mit den zugehörigen Freigrenzen (Spalten uneingeschränkte Freigabe) und Freigabewerten (Spalten spezifische Freigabe) für die ersten vier dort genannten Radionuklide.

**Tabelle 1-4: Freigabeoptionen der Tabelle 1 der Strahlenschutzverordnung (Auszug aus Tabelle 1, Anlage 4, StrSchV)**

**Tabelle 1** Freigrenzen, Freigabewerte für verschiedene Freigabearten, Werte für hochradioaktive Strahlenquellen, Werte der Oberflächenkontamination

Radionuklid	Freigrenze in Bq	Freigrenze, uneingeschränkte Freigabe von festen u. flüssigen Stoffen in Bq/g	Aktivität HfQ in TBq	Oberflächenkontamination in Bq/cm <sup>2</sup>	spezifische Freigabe von									Halbwertszeit
					Bauschutz von mehr als 1.000 Mg/a in Bq/g	Bodenflächen in Bq/g	Resten Stoffen bis zu 100 Mg/a zur Beseitigung auf Deponien in Bq/g	Stoffen bis zu 100 Mg/a zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen in Bq/g	Resten Stoffen bis zu 1000 Mg/a zur Beseitigung auf Deponien in Bq/g	Stoffen bis zu 1000 Mg/a zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen in Bq/g	Gebäuden zur Wieder- und Weiterverwendung in Bq/cm <sup>2</sup>	Gebäuden zum Abriss in Bq/cm <sup>2</sup>	Metallschlacke zur Recycling in Bq/g	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H-3	1 E+9	1 E+2	2 E+3	1 E+2	6 E+1	3	6 E+4	1 E+6	6 E+3	1 E+6	1 E+3	4 E+3	1 E+3	12,3 a
Be-7	1 E+7	1 E+1	1	1 E+2	3 E+1	2	3 E+2	4 E+2	9 E+1	4 E+1	8 E+1	6 E+2	3 E+2	53,2 d
Be-10	1 E+6	1 E+2	3 E+1											1,6 E+6 a
C-11	1 E+6	1 E+1	6 E-2											20,4 m

Quelle: Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2018)

Die **Freigabe** erfolgt in folgenden Schritten:

- **Radiologische Charakterisierung des freizugebenden Materials:** Die Einhaltung der radionuklidbezogenen massenspezifischen Aktivitätskonzentrationen der relevanten Spalte der Tabelle 1 der StrlSchV (Tabelle 1-4) muss messtechnisch nachgewiesen werden. Für die Freigabe werden daher zunächst im Rahmen der Voruntersuchungen die freizugebenden Stoffe oder Gegenstände radiologisch charakterisiert. Hierfür ist ein repräsentativer Nuklidvektor<sup>5</sup> zu ermitteln. Aus den Ergebnissen der Charakterisierung wird festgelegt, ob die Komponenten grundsätzlich für die Freigabe geeignet sind, welche Messverfahren eingesetzt werden und welche Dekontaminationsschritte sinnvoll sind. Für den Ablauf der Freigabemessungen und die Wahl der Messmethoden ist die Nuklidvektorzusammensetzung maßgebend.

<sup>5</sup> Der repräsentative Nuklidvektor gibt an, in welchem Verhältnis die Radionuklide in dem freizugebenden Material tatsächlich vorliegen. Zu seiner Bestimmung werden Materialproben gammaspektrometrisch untersucht und radiochemische Analysen zur Bestimmung der Alpha- und Betastrahler durchgeführt. Bei der eigentlichen Freigabemessung werden dann die gammastrahlenden Radionuklide direkt gemessen und die für die Freigabe auch relevanten Beiträge der Alpha- und Betastrahler rechnerisch berücksichtigt.

- **Abbau und Zerlegung der Anlagenteile ggf. mit Dekontamination im Kontrollbereich:** Nach der radiologischen Charakterisierung werden die der Freigabe zugeordneten radioaktiven Reststoffe aus dem Überwachungs- und Kontrollbereich nach erfolgter Zerlegung und ggf. Dekontamination zu den Freimesseeinrichtungen transportiert.
- **Entscheidungsmessungen:** Basis für die Freigabefähigkeit des Anlagenteils ist die Entscheidungsmessung mit einem dazu geeigneten Messgerät. Die aus der Freimessung ermittelten Aktivitätswerte werden zur Prüfung auf Einhaltung der jeweiligen Freigabewerte der Tabelle 1 der StrlSchV (Tabelle 1-4) herangezogen. Alternativ können Anlagenteile auch im eingebauten Zustand mit geeigneten Messgeräten freigemessen werden.
- **Entsorgung über gewählten Freigabepfad:** Nach Abschluss des Freigabeverfahrens werden die Reststoffe als nicht radioaktive Reststoffe im konventionellen Stoffkreislauf verwendet, innegehabt, an Dritte weitergegeben, als konventioneller Abfall verwertet oder beseitigt (Die Vorgehensweise wird ausführlich im Bezug zum Kernkraftwerksstandort Philippsburg im Kapitel 2.2.1 behandelt.)
  - Wie aus der Tabelle 1-4 ersichtlich, ist für die spezifische Freigabe eine eigene Freigabeoption auch für kontaminierte oder aktivierte Metalle vorgesehen, die in einer Schmelzanlage zur Dekontamination behandelt werden. Hierbei wird von einer Durchmischung in der Metallschmelze mit aus anderen Herkunftsbereichen stammenden Schrotten im Verhältnis 1:10 zur Einhaltung des Dosiskriteriums ausgegangen. Im Anschluss stehen dann die aus der Strahlenschutzüberwachung freizugebenden Metallgießlinge als Produkt an, die an zertifizierte Abnehmer abgegeben werden (vgl. Kapitel 1.1.3).
  - Viele Metalle, auch wenn sie aus dem Kontrollbereich stammen, sind nicht oder sehr geringfügig kontaminiert. Sie können nach dem messtechnischen Nachweis uneingeschränkt freigegeben werden, die Durchmischung in der Metallschmelze im Verhältnis 1:10 ist in dem Fall nicht erforderlich.
  - Eine besondere Stellung in der Freigabe haben die radiologischen Bewertungen von Metallen im Materialverbund mit anderen Stoffen in großen komplexen Komponenten. Diese weisen in der Regel messtechnische Besonderheiten auf und die Messvorgänge müssen entsprechend optimiert werden.

Die **Herausgabe** ist eine Vorgehensweise zur Entlassung von nicht radioaktiven Stoffen sowie aufgrund der Tätigkeit nach § 4 Absatz 1 Satz 1 Nummer 4 StrlSchG (StrlSchG 2022) nicht kontaminierten und nicht aktivierten Gegenständen aus der atom- und strahlenschutzrechtlichen Überwachung. Hierzu müssen Plausibilitätsbetrachtungen unter Berücksichtigung der Betriebshistorie angestellt und stichprobenhafte Beweissicherungsmessungen durchgeführt werden. Dabei müssen die Aktivitätswerte weit unterhalb der Freigabewerte liegen (Entsorgungskommission (ESK) 2022). Sind sowohl aus der Betriebshistorie als auch aus den Ergebnissen beweissichernder Messungen keine Hinweise auf Kontamination vorhanden, können die Materialien ohne eine Freigabe einer direkten Wiederverwendung oder dem Recycling zugeführt werden. Die Vorgehensweise zur Herausgabe muss genehmigt werden. Außerdem muss die konkrete Umsetzung der Herausgabe in betrieblichen Anweisungen festgelegt werden. Darüber hinaus kann die Atomaufsicht Kontrollmessungen durchführen und die zugehörige Dokumentation prüfen (Entsorgungskommission (ESK) 2022).



## 1.2 Ziele und Arbeitshypothese des Forschungsvorhabens

Die geschlossene Kreislaufwirtschaft von Metallen aus dem Rückbau von Kernkraftwerken zu verbessern, ist ein übergeordnetes Ziel, welches mit dem Verbundprojekt RecTecKA erreicht werden sollte. Der Fokus des Vorhabens liegt dabei insbesondere auf herausgegebenen Wertmetallen und -legierungen aufgrund ihrer hohen spezifischen Werthaltigkeit und den bestehenden erheblichen Informationslücken bzgl. des Inventars dieser Metalle und Legierungen in kerntechnischen Anlagen. Die bisherige Rückbaupraxis ermöglicht bereits hohe Recyclingquoten. Die bestehenden Wissensdefizite und Hemmnisse sollten erkannt und überwunden werden. So sorgt das Verbundprojekt RecTecKA für einen bewussteren Umgang mit den Materialien und Komponenten. Folgende Ziele wurden mit dem Vorhaben schwerpunktmäßig verfolgt:

1. Identifizierung von Anlagenteilen mit hohem Recyclingpotenzial und Inventarerhebung Wertmetalle am Beispiel eines Siedewasserreaktors (KKP 1) und eines Druckwasserreaktors (KKP 2)
2. Ermittlung des Materialwerts
3. Ökologische Betrachtung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
4. Analyse des Spannungsfeldes Recyclingpotenzial vs. Freigabe
5. Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Wertmetallen aus dem KKW-Rückbau in Deutschland

Ausgehend vom Stand der Wissenschaft sollte eine Aktualisierung der Datenlage erfolgen. Es wurde angenommen, dass bislang nicht alle Metalle systematisch erfasst wurden und dadurch erhebliche Wissenslücken bestanden, die geschlossen werden sollten. Von besonderem Interesse waren Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, oder hoher Druck und hohe Temperaturen herrschen. Es wurde angenommen, dass solche Anlagenteile aus hochwertigen Materialien bestehen. Es wurde die Hypothese vertreten, dass Anlagenteile und Werkstoffe erfasst werden können, zu denen bislang keine öffentlichen Daten zugänglich sind, die aber einen Beitrag zur Rohstoff-sicherung spielen können. Darüber hinaus waren Edelmetalle wie z. B. Silber, Palladium und Gold bislang in kerntechnischen Anlagen nicht vollumfänglich erfasst worden.

Die Datenerfassung zu den Metallen erhebt grundsätzlich nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, in dem Sinn, dass eine Bearbeitung und Erfassung „Stück für Stück“ erfolgt ist. Vielmehr wurde die These vertreten, dass durch gründliches Screening und systematische Datenaufbereitung ein abdeckendes Bild entsteht, das Skalierungen ermöglichen solln und durch Analogieschluss verborgene Stellen ausleuchtet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Vorhabens zielte auf den Bereich des Wissens- und Know-How Erhalts bzw. den Wissenstransfer zwischen den Industriebereichen: der kerntechnischen Industrie, der Recyclingwirtschaft sowie der wissenschaftlichen Partner. Es wurde Wissen gebündelt, das vor Beginn des Vorhabens dispers verteilt vorlag. Dadurch sollen Entscheidungsprozesse das Recycling betreffend zukünftig optimiert werden. Die Erwartungen und die Ziele der Forschungsnehmer in den Rollen des Betreibers (EnBW Kernkraft GmbH) und der kommerzielle Nutzen der Recyclingindustrie (ELECTROCYCLING GmbH) wurden dabei berücksichtigt. Die bei der EnBW Kernkraft GmbH bereits heute etablierten Entsorgungsprozesse ermöglichen bereits eine hohe Recyclingquote.

## 2 Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential aus KKW Philippsburg 1 und 2

Im Rahmen des Verbundprojektes RecTeCKA wurden als Modellanlagen das Kernkraftwerk Philippsburg mit seinen Blöcken 1 (KKP 1: Siedewasserreaktor) und 2 (KKP 2: Druckwasserreaktor) untersucht. Damit wurden beide relevanten Reaktortypen (Siede- und Druckwasserreaktor) sowie Anlagen unterschiedlichen Alters abgedeckt. Somit war es auch abschließend möglich, eine Generalisierung und abgeschätzte Skalierung der Forschungsergebnisse aus den Modellanlagen auf sämtliche Kernkraftwerke in Deutschland bzw. der EU vorzunehmen.

### 2.1 Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und systematische Zuordnung der Komponenten

Die intensive Recherche bzgl. des Inventars, der im Fokus des Vorhabens liegenden Wertmetalle und -legierungen (Edelstähle, Aluminium, Kupfer, Titan, Messing sowie Edelmetalle), wurde jeweils für die beiden Reaktorblöcke in Philippsburg separat vorgenommen. Dies folgte der Logik, dass sich sowohl aufgrund der deutlichen Unterschiede des Reaktorkonzepts (Siede- bzw. Druckwasserreaktor) als auch des Baualters der beiden Reaktoren deutliche Unterschiede bei den technischen Komponenten, den Werkstoffzusammensetzungen und den möglichen radioaktiven Kontaminationen unterstellen ließen.

Die Recherche der Komponenten erfolgte für die Vorauswahl nach einfachen Kriterien, um eine möglichst frühzeitige Priorisierung zu gewährleisten. Diese einfachen Kriterien sind:

- Materialwissenschaftliche Verwendung von Metalllegierungen, d. h. Annahme der Wahrscheinlichkeit von Wertmaterialien (z. B. Resilienz gegen hohe Drücke, Temperaturen etc.),
- Gewicht und Anzahl Redundanzen von Komponenten sowie darin enthaltener Teilkomponenten aus Wertmaterialien (typische Beispiele: Wärmetauscherrohre, Schaltschränke mit Platinen),
- Spezifischer intrinsischer Wert der Wertmaterialien (in Euro/kg) und
- Einstufung bzgl. radioaktiver Kontamination bzw. Herausgabe oder Freigabefähigkeit (siehe Kapitel 1.1.4).

Die intensive und umfassende Datenrecherche zur Inventarerhebung der Wertmetalle und -legierungen erfolgte mehrstufig und iterativ. Folgende Informationsquellen wurden vom Projektteam systematisch ausgewertet:

- Literaturrecherche im Internet (um frühzeitig Hinweise auf interessante „Hot Spots“ zu erhalten),
- Recherche in den Archiven der EnBW Kernkraft GmbH am Standort Philippsburg (Datenblätter, Komponenten- und Stücklisten, Bauzeichnungen etc.),
- Mehrmalige geführte Begehungen relevanter Anlagenteile (z. B. Maschinenhaus KKP 2 etc.),
- Wiederholte und intensive Interviews (zur Aufnahme und Plausibilisierung von Daten, Schließen von Datenlücken) mit ausgewählten Fachleuten und Wissensträgern bei EnBW Kernkraft GmbH,



- Analyse und Hochrechnung von Wertmetallen (Kupfer und Edelmetalle) von Platinen aus KKP 1 und KKP 2 sowie weiterer elektronischer Bauteile durch die Verbundpartner TU Clausthal und ELECTROCYCLING GmbH,
- Besuch des Kernkraftwerks Zwentendorf in Österreich (weitgehend baugleich mit KKP 1).

Grundsätzlich folgte die Datenerhebung anhand solcher Anlagenteile, bei denen vermutet werden kann, dass sie zum einen aufgrund der Materialanforderungen hochwertig ausgeführt sein müssen und zum anderen die Freigabefähigkeit nicht bereits von vornherein ausgeschlossen wird.

Entlang der folgenden Thesen wurden Datenerhebungen vorgenommen und Komponentenstücklisten erstellt:

- Typischerweise erfolgte die Datenaufnahme von Komponenten des Druckwasserreaktors KKP 2, die im Normalbetrieb mit Betriebsmitteln (Wasser / Dampf) gefahren werden, dann außerhalb der Schnittstelle zum Primärkreislauf. Als die Schnittstelle galt der Dampferzeuger und seine sekundärkreisseitigen Komponenten (etwa Grob- und Feinabscheider). Für den Siedewasserreaktor KKP 1 wurde der Primärkreis zunächst nicht näher untersucht.
- Nicht ausschließlich Komponenten, die Wasser oder Dampf führen, waren von Interesse; Beispiele waren das Wasserstoffabbausystem (sog. Rekombinatoren, die Palladium enthalten) oder Elektromotoren, die Wicklungen aus Kupfer enthalten und in großer Stückzahl vorhanden sind. Beim Siedewasserreaktor wurde aufgrund des fortgeschrittenen Rückbaus vor allem die Leittechnik und die Elektronik näher untersucht. Die Elektronik in Schaltschränken oder auch Schaltanlagen der Hochspannungskomponenten waren erwartungsgemäß mit Gold, Silber oder anderen hochwertigen Metallen ausgeführt.

Es sollte durch die Kenntnis über die exakte Systemzugehörigkeit während des Datenerhebungsprozesses durch Analogieschluss auf weitere Systeme und ihre Komponenten geschlussfolgert werden können. Damit wurden Hinweise erhalten, ob Datenrecherchen auf diese weiteren Komponenten ausgeweitet werden sollten.

Als Beispiel kann folgender Analogieschluss angeführt werden: Aus Recherchearbeiten zu Ökobilanzen zur Stromerzeugung aus Kernenergie (Roberto Dones et al. 2009) konnte in Erfahrung gebracht werden, dass Kondensatorrohre aus hochwertigem Titan in der Kerntechnik Mitte der 1980er Jahre die sonst in diesem Anwendungsbereich oft eingesetzten Messing-Rohrbündel ersetzt haben. Als Grund wurden festgestellte Materialermüdungen genannt. So wird in diesem Beispiel der Blick bei der Datenerhebung verstärkt auf Rohrbündel in Wärmetauschern gelegt.

Um, ausgehend von den ersten Einschätzungen, in welchen Komponenten welche Metalle enthalten sein können, Daten gezielter abzufragen, wurde eine einheitliche Systematik entwickelt. Es wurde das Anlagenkennzeichnungssystem (AKZ), die Anlage KKP 1 betreffend, und das Kraftwerkkenzeichnungssystem (KKS), die Anlage KKP 2 betreffend, genutzt.

Zuletzt ist der zu bestimmende Freigabepfad der entscheidende Faktor für die Zuordnung in die Recyclingroute (s. Kapitel 1.1.3 und 1.1.4).

Jede Komponente hat dann folgende Attribute

- Herkunft aus Anlage (KKP 1 / KKP 2)
- Systemzugehörigkeit (erste beiden Ziffern des AKZ oder drei Ziffern des KKS)

- Exakte Anlagenidentnummer (vollständiger AKZ bzw. KKS-Code)
- Funktion
- Hersteller
- Freigabepfad bzw. Freigabeoptionen
- Redundanzen (Vorkommen der Komponente / des Systems 2- bis 4-mal)
- Masse der Metallinventare nach Werkstoffart

Eine eindeutige Zuordnung zu einzelnen Komponenten ist gegeben und eine Hochrechenbarkeit der erhobenen Daten zu Metallarten und deren Masse auf die Gesamtanlage soll gewährleistet werden. Gesamte Metallinventare zu nicht erhobenen Komponenten können anhand einer Abschätzung zu deren Gesamtzahl nach der Funktion (z. B. Rohre, Kabel, Pumpen) ermittelt werden. Eine Skalierung auf Gesamtinventare der Metalle von Großkomponenten ist durch Angabe der Redundanzen möglich.

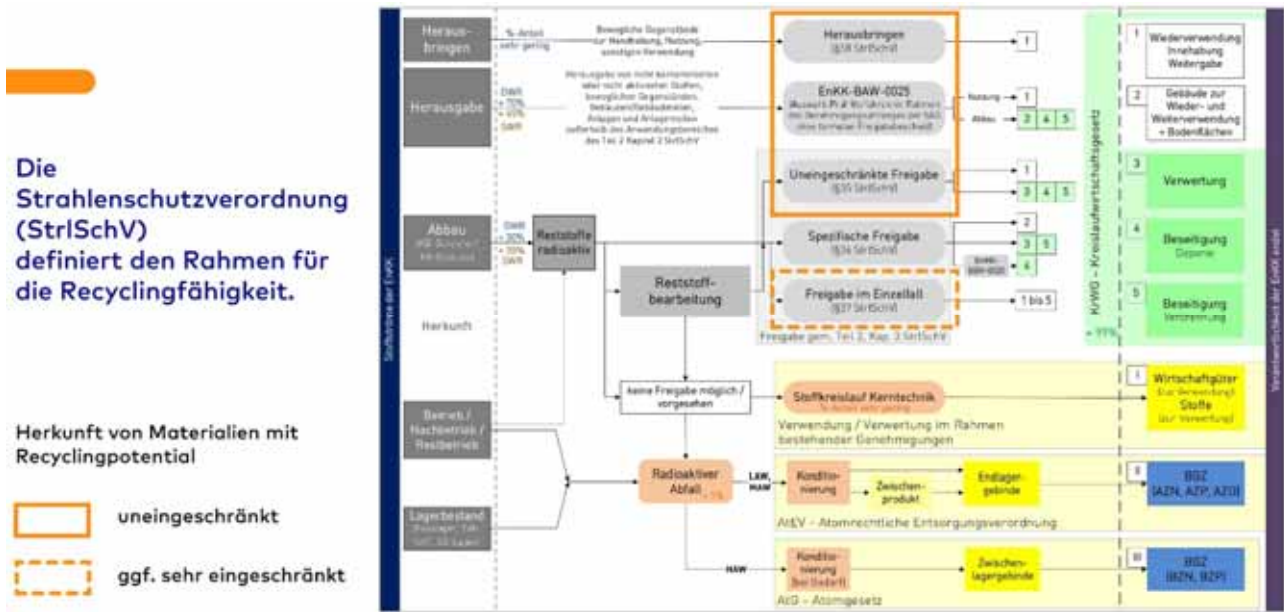
Die Ergebnisse der Inventarerhebungen zu KKP 1 und KKP 2 im Rahmen des Verbundprojektes RecTeckA werden ausführlich in Abschnitt 3 dieses Berichts dokumentiert.

## **2.2 Bewertung der Freigabefähigkeit von Großkomponenten am Kernkraftwerkstandort Philippsburg**

### **2.2.1 Festlegung der Entsorgungsziele und technische Vorgehensweise beim Abbau der Komponenten, der Herausgabe und der Freigabe**

Der grundsätzliche Rahmen der Recyclingfähigkeit und welche Verwertungs- und Beseitigungswege sich im Zusammenhang mit den Vorgaben der StrlSchV (StrlSchV 2018) zur Aufteilung auf die radioaktiven und nicht radioaktiven Reststoffe und folglich die Herausgabe und Freigabe in der EnBW Kernkraft GmbH ergeben, ist in Abbildung 2-1 dargestellt (vgl. Kapitel 1.1.4).

Abbildung 2-1: Optionen der Verwertungs- und Beseitigungswege



Quelle: EnBW Kernkraft GmbH

Um Anlageteile und Komponenten zu identifizieren, bei denen Kontaminationen oder Aktivierungen ein direktes Recycling ohne Einschränkungen ausschließen, wird folgendermaßen vorgegangen:

- Im Fall von Komponenten in Kontroll- oder Überwachungsbereichen, bei denen eine Kontamination möglich oder vorhanden ist, müssen weitere Bewertungsschritte im Hinblick auf die gesetzlichen Schutzziele im Sinne der Exposition und sich ergebenden Entsorgungsziele erfolgen. Für den Rückbau werden diese Bewertungsschritte im Allgemeinen im Vorfeld der Erteilung der Abbaugenehmigung durch die zuständige kerntechnische Aufsichts- und Genehmigungsbehörde und zur weiteren Planung von Arbeitsschritten, also im Voraus zur späteren behördlichen Freigabe, beschrieben.
- Nicht radioaktive Reststoffe werden, sofern sie als Abfälle im Sinne des KrWG gelten, entsprechend den geltenden gesetzlichen Regelungen der Beseitigung in einer Beseitigungsanlage oder dem konventionellen Stoffkreislauf (ggf. über Verwertungsanlagen) zugeführt. Sind die nicht radioaktiven Reststoffe keine Abfälle im Sinne dieses Gesetzes, können diese ohne Einschränkung verwendet, innegehalten oder an Dritte weitergegeben werden (freier Umgang).
- Radioaktive Reststoffe fallen überwiegend beim Abbau von Komponenten in den Kontrollbereichsgebäuden an. Diese sind für die Festlegung der weiteren Bearbeitung oder Behandlung zunächst einem voraussichtlichen Entsorgungsziel zuzuordnen. Die Zuordnung von radioaktiven Reststoffen zu einem Entsorgungsziel sowie die Bearbeitungs- bzw. Behandlungsschritte, die radioaktive Reststoffe durchlaufen, werden als Entsorgungspfade bezeichnet. Eine Übersicht über die anfallenden Reststoffe und die Entsorgungs- bzw. Freigabeziele Abbildung 2-2. Die Freigabe- und Entsorgungsziele A – E in Philippsburg sind im Folgenden aufgelistet.
  - Uneingeschränkte Freigabe (A)
  - Spezifische Freigabe (B)

- Abklinglagerung (C, mit dem Ziel der späteren Freigabe nach A oder B nach Ablauf einer bestimmten Abklingzeit)
- Kerntechnischer Stoffkreislauf (D, insbesondere Metalle, für die keine Freigabe möglich ist und die nach dem Einschmelzen z. B. für die Produktion von Abschirmungen oder Abfallbinden verwendet werden können)
- Radioaktiver Abfall (E)

Die Entsorgungsziele D und E werden im Rahmen dieses Vorhabens im Weiteren nicht verfolgt.

Der Ablauf der Zuordnung zu den Entsorgungszielen bis hin zu der jeweiligen Entsorgung vor bzw. nach der Demontage von Anlagenteilen erfolgt im Wesentlichen in nachfolgenden Schritten, die nicht notwendigerweise sequentiell abgearbeitet werden:

- Voruntersuchung, Orientierungsmessungen, Zuordnung zu den Entsorgungszielen

Im Rahmen von Voruntersuchungen wird die Höhe der vorliegenden Kontamination bzw. Dosisleistung sowie die Materialbeschaffenheit ermittelt. Die Ergebnisse der Voruntersuchung bilden unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Kriterien die Grundlage für die Zuordnung zu den Entsorgungszielen A – E sowie der Entscheidung, ob anfallende radioaktive Stoffe intern oder extern bearbeitet werden (siehe weiter unten). Die später anzuwendenden Dekontaminationsverfahren werden auf der Grundlage der Ergebnisse der Voruntersuchung festgelegt. Die Voruntersuchungen liefern die ersten Informationen zur Aktivität (Kontamination, Aktivierung) und zum Nuklidgemisch bzw. Nuklidvektor. Hierzu können z. B. radiologische Messungen und/oder Probenahmen an repräsentativen Stellen oder Aktivierungsberechnungen erfolgen. Bei Erfordernis werden die örtlichen Gegebenheiten, die Betriebshistorie sowie die verfahrenstechnischen Zusammenhänge bewertet. Folgende Aspekte sind hierbei im Wesentlichen zu betrachten:

- radiologische Eigenschaften (z. B. Kontamination, Aktivierung, Nuklidgemisch),
  - physikalische/chemische Eigenschaften,
  - geometrische Beschaffenheit,
  - Masse/Volumen,
  - ggf. Gefahrstoffe,
  - wirtschaftliche Aspekte der Bearbeitung.
- Zerlegung und/oder Dekontamination und Freigabemessungen

Für einen Teil der Komponenten ist eine Zerlegung und/oder Dekontamination erforderlich, damit das vorgesehene Entsorgungsziel erreicht werden kann. Es erfolgt zunächst die Demontage im Ganzen oder in Teilen einschließlich des Umgangs mit den dabei anfallenden radioaktiven Reststoffen. Zusätzliche Messungen (Orientierungsmessungen) nach der Durchführung von Zerlege- oder Dekontaminationsmaßnahmen dienen zur Verifizierung bzw. Kontrolle. Die anschließende Bearbeitung umfasst die Zerlegung, Sortierung, Sammlung, vorübergehende Lagerung und Dekontamination von radioaktiven Reststoffen sowie Aktivitätsmessungen (Freigabemessungen) an radioaktiven Reststoffen.

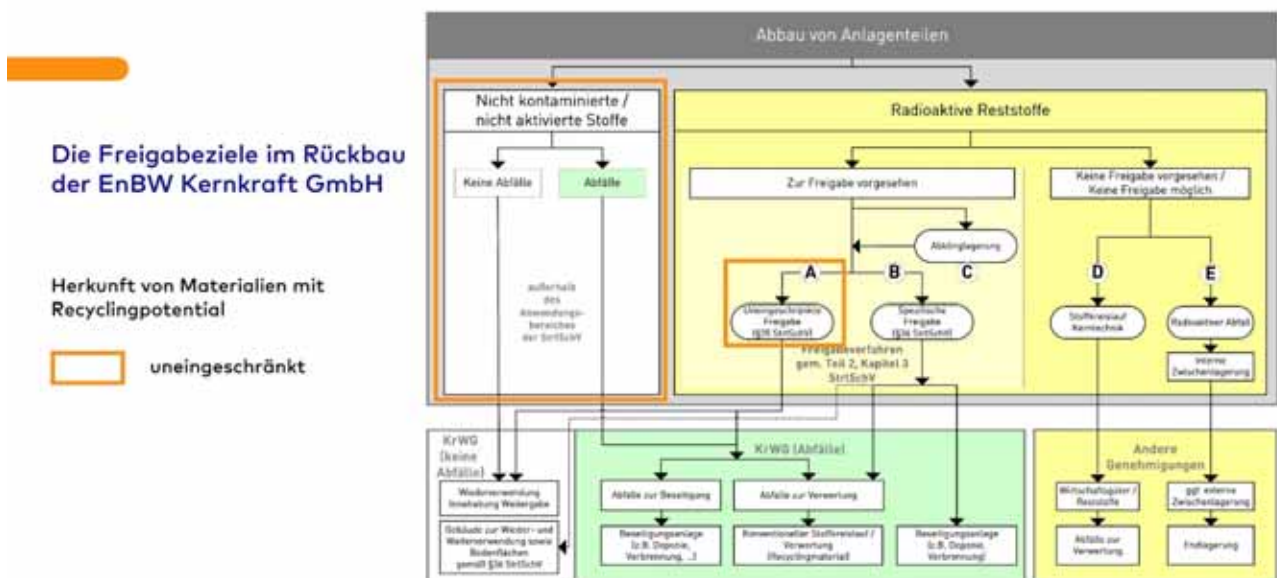
Die der Freigabe zugeordneten radioaktiven Reststoffe werden nach erfolgter Zerlegung und ggf. Dekontamination in geeigneten Behältnissen (z. B. in Stapelboxen) zu den Freimesseinrichtungen transportiert und freigemessen. Die aus der Freimessung ermittelten Aktivitätswerte werden zur Prüfung auf Einhaltung der jeweiligen Freigabewerte herangezogen.

Alternativ können Anlagenteile auch im eingebauten Zustand mit geeigneten Messgeräten (z. B. In-situ-Gammaspektrometer) freigemessen werden.

Folgende Messverfahren sind insbesondere bei der Durchführung von Freimessungen vorgesehen:

- Oberflächenaktivitätsmessung mit Kontaminationsmonitoren,
- Gesamt-Gamma-Messung in einer Freimessanlage,
- Gammaspektrometrie an Proben und
- In-situ-Gammaspektrometrie.

**Abbildung 2-2: Entsorgungs- und Freigabeziele der EnBW Kernkraft GmbH**



Quelle: EnBW Kernkraft GmbH

• Entsorgung über die Ziele

Die radioaktiven Reststoffe werden intern entsprechend der Entsorgung über die Ziele und den Vorgaben der EnBW Kernkraft GmbH bearbeitet oder sie werden zur weiteren Bearbeitung zu Einrichtungen Dritter gebracht.

- Interne Bearbeitung von radioaktiven Reststoffen

Für die interne Reststoffbearbeitung werden verschiedene vorhandene Einrichtungen der Anlagen genutzt, sie erfolgt bevorzugt im Reststoffbearbeitungszentrum Philippsburg (RBZ) oder

auch in geeigneten Einrichtungen am Standort KKP. Die Bearbeitung und Dekontamination erfolgt mit für den jeweiligen Zweck geeigneten Standardeinrichtungen bzw. -verfahren. Es stehen zur Verfügung:

- Mediumstrahlanlage (Medium: Stahlkies),
- Hochdruck-Wasserstrahlanlage in einer begehbaren Kabine,
- Ultraschallbad,
- Thermische Trennverfahren (Autogenbrennschneiden und Plasmaschneiden) und
- Mechanische Trennverfahren (u. a. Sägen, Bohren).

– Externe Bearbeitung radioaktiver Reststoffe

Dabei wird sichergestellt, dass sich die Einrichtungen für die Bearbeitung eignen und entsprechende Bearbeitungskapazitäten vorhanden sind. Bevorzugt sollen die anfallenden radioaktiven Reststoffe an das Reststoffbearbeitungszentrum (RBZ) abgegeben werden, welches zur Bearbeitung radioaktiver Reststoffe insbesondere für den Reststoffanfall aus dem Abbau von Anlagenteilen der EnBW Kernkraft GmbH ausgelegt wurde. Zusätzlich stehen für die Bearbeitung radioaktiver Reststoffe weitere Einrichtungen Dritter zur Verfügung.

**2.2.2 Radiologische Charakterisierung und Zuordnung der Komponenten im KKP 1 und KKP 2 zu den Entsorgungszielen**

Für die zu erfolgende Voreinschätzung des Kontaminationszustands wichtiger Komponenten wird im Folgenden genutzt, dass die Entsorgungsziele grundsätzlich definiert sind: Für die Definitionen der Entsorgungsziele wird zunächst einmal der Herkunftsbereich der Komponente betrachtet und anschließend eine radiologische Charakterisierung vorgenommen.

Für die Anlagen wurden für die im Kontrollbereich befindlichen Systeme die radiologischen Kategorien festgelegt. Die radiologische Einteilung erfolgte in zwei Kontaminationsklassen (KK), die wie folgt definiert sind:

- KK I: durch radioaktive Medien von innen oder außen kontaminierte Komponenten / Systeme
- KK II: nur äußerlich durch luftgetragene Kontamination kontaminierte Systeme / Komponenten

Damit ergeben sich folgende Kriterien zur Festlegung der KK-Klassen für die verfahrenstechnischen Komponenten:

- Verwendungszweck des Systems
- Betrieb des Systems mit kontaminiertem Medium (ja/nein)
- Ereignisse aus der Betriebshistorie (z. B. DE-Heizrohrleck, Meldepflichtige Ereignisse, Leckagen)

Systeme, die in KK I eingestuft sind, können unter Umständen auch Teile bzw. Abschnitte enthalten, die in KK II eingestuft werden können – bspw. die Schmierölversorgung der Hauptkühlmittelpumpe. Eine Detailzuordnung erfolgt im Betriebsführungssystem (BFS). Bei der Eintragung der Kontaminationsklassen im BFS – erfolgt durch den Strahlenschutz - ist folgendes zu beachten:

- Komponenten wie bspw. Stellantriebe, Stoßbremsen oder Motoren, die keinen Kontakt mit radioaktiven Medien haben, werden in KK II eingestuft
- Gebäude, Räume und Türen werden generell in KK II eingestuft
- Teilsysteme der in KK I eingestuften Systeme können während deren Betriebszeit ausschließlich mit nicht radioaktiven Medien beaufschlagt sein (z. B. Schmierölversorgung der HKMP); die zugehörigen Komponenten können dann in KK II eingestuft werden; in diesen Fällen ist eine Detailabstimmung zwischen Strahlenschutz und Systemtechnik erforderlich

Systeme/Teilsysteme außerhalb von Gebäuden des Kontrollbereichs werden zur Festlegung des jeweils anzuwendenden Verfahrens zur Freigabe oder Herausgabe sowie der ggf. erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen bei Durchführung von Abbautätigkeiten in die folgenden radiologischen Kategorien eingeteilt:

- RK I: Kontamination vorhanden
- RK II: Kontamination möglich
- RK III: Kontamination ausgeschlossen

Weil das im Forschungsvorhaben wesentliche Entsorgungsziel die uneingeschränkte Verwertung im Stoffkreislauf nach Kreislaufwirtschaftsgesetz ist, kommen also nur Komponenten in Betracht, die uneingeschränkt freigegeben oder herausgegeben werden können. Im Weiteren ist ggf. aufzuzeigen, welche Metalle aus welchen Komponenten spezifisch freigegeben und somit der Metallschmelze zugeführt werden könnten.

Die vorstehend genannten Kriterien „Radiologische Kategorie“ bzw. „Kontaminationsklasse“ wurden im Zuge des Auswahlverfahrens primär herangezogen, um die grundsätzliche Möglichkeit einer Zuführung in einen Prozess zur Wiedergewinnung von Metallen abzuschätzen.



### 3 Inventarerhebung der werthaltigen Metalle aus KKW Philippsburg 1 und 2

Bei der Inventarerhebung werden Komponenten in kerntechnischen Anlagen betrachtet, die werthaltige Basis- und Technologiemetalle in nennenswerten Mengen enthalten. Zu den Zielmetallen 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 bzw. herausgegeben 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)

#### 3.1 Auswertung der Materialdaten zu Groß-Komponenten

Innerhalb der Inventarerhebung wurden Komponenten aufgenommen, wenn die entsprechenden Großkomponenten eine hohe Menge an hochwertigen Materialien aufweist. Als „hohe Menge“ wurde hier definiert, dass die Menge in einem Bauteil (pro Redundanz) 1.000 kg überschreitet.

Großkomponenten wurden zunächst systematisch durch das Öko-Institut auf Grundlage von vorhandenen Anlagendokumentationen identifiziert. Bei identifizierten Großkomponenten von KKP 1 und KKP 2 konnte Fachpersonal der EnBW Kernkraft GmbH aufgrund der Kenntnis der Komponenten bereits oft in einer Voreinschätzung Komponenten ausschließen, die keine oder nur geringe Mengen an werthaltigen Materialien aufweisen.

Für Großkomponenten, bei denen erwartet wurde, dass diese mengenmäßig relevante Technologiemetalle enthalten, wurden Werkstoffdatenblätter beim Betreiber angefordert. Diese wurden im ersten Schritt digitalisiert (bei Werkstoffdatenblättern handelt es sich in der Regel um handschriftliche Papierbögen). Das umfasst das Einscannen der Werkstoffdatenblätter und händische Überführen der Bauteile, deren Werkstoffe, Mengen und Massen in eine Excel Tabelle. Abbildung 3-1 zeigt das Vorgehen. Da Werkstoffdatenblätter teils unvollständig waren (z. B. fehlende Mengen oder Massenangaben) wurden diese durch Einschätzungen des Fachpersonals der EnBW Kernkraft GmbH ergänzt. Abschließend wurde für jede Komponente ermittelt, ob diese potenziell kontaminiert oder nicht kontaminiert ist. Potenziell kontaminierte Komponenten wurden zunächst aufgenommen, aber gesondert betrachtet.



**Abbildung 3-1: Digitalisierung von Werkstoffdatenblättern. Original (oben) und digitalisierte Daten (unten)**

TEIL-NR. part-no.	STÜCK quantity	STÜCK-GEWICHT weight of parts	TEIL BEZEICHNUNG ERZEUGNISFORM part designation type designation	ABMESSUNG dimensions	WERKSTOFF material
1	1	1216	WK-Deckel	∅ 1628 x 85	15MnNi63

...	Stück	Gewicht [kg]	Bauteil	Werkstoffnummer	Werkstoff / Material	Oberbegriff	...
...	1	1216	WK-Deckel	1.6210	15MnNi63	Niedriglegierter Stahl	...

Quelle: RecTecKA-Verbund

Zu den zum Einsatz kommenden werthaltigen Metallen zählen Nichteisenmetalle wie Kupfer, Kupferbasislegierungen, Aluminium und Titan. Darüber hinaus werden verschiedene hochlegierte Stähle verwendet. Als hochlegiert werden Stähle bezeichnet, deren Massengehalt eines Legierungselementes mindestens 5% übersteigt. Die Legierungselemente dienen dazu, die Eigenschaften des Werkstoffes (mechanische Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit, Säurebeständigkeit, Hitzebeständigkeit) hinsichtlich seines Einsatzzweckes zu optimieren. Insbesondere Chrom kommt häufig zum Einsatz und ist eines der wichtigsten Legierungselemente zur Erzeugung korrosions- und hitzebeständiger Stähle.

In KKP 2 ist im Vergleich zu KKP 1 ein weitaus höheres Wertstoffpotential zu erwarten. Zunächst ist die Nettoleistung in KKP 2 mit 1.268 MW deutlich höher als in KKP 1, die dort nur 864 MW beträgt. Eine höhere Nettoleistung begünstigt eine größere Dimensionierung der Komponenten und damit einen höheren Einsatz an Werkstoffen. Weitaus relevanter ist allerdings, dass es sich bei KKP 2 um einen Druckwasserreaktor handelt. Dadurch wird der Primärkreislauf physikalisch vom Sekundärkreislauf durch die Dampferzeuger getrennt und eine Vielzahl der Komponenten (insbesondere des Maschinenhauses) bleiben kontaminationsfrei, da sie nicht mit dem Primärkühlmittel in Berührung kommen. In KKP 1 als Siedewasserreaktor ist dies nicht gegeben. Aus diesem Grund wird im ersten Schritt das Wertstoffpotential von KKP 2 ermittelt.

### 3.1.1 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 2 (KKP 2)

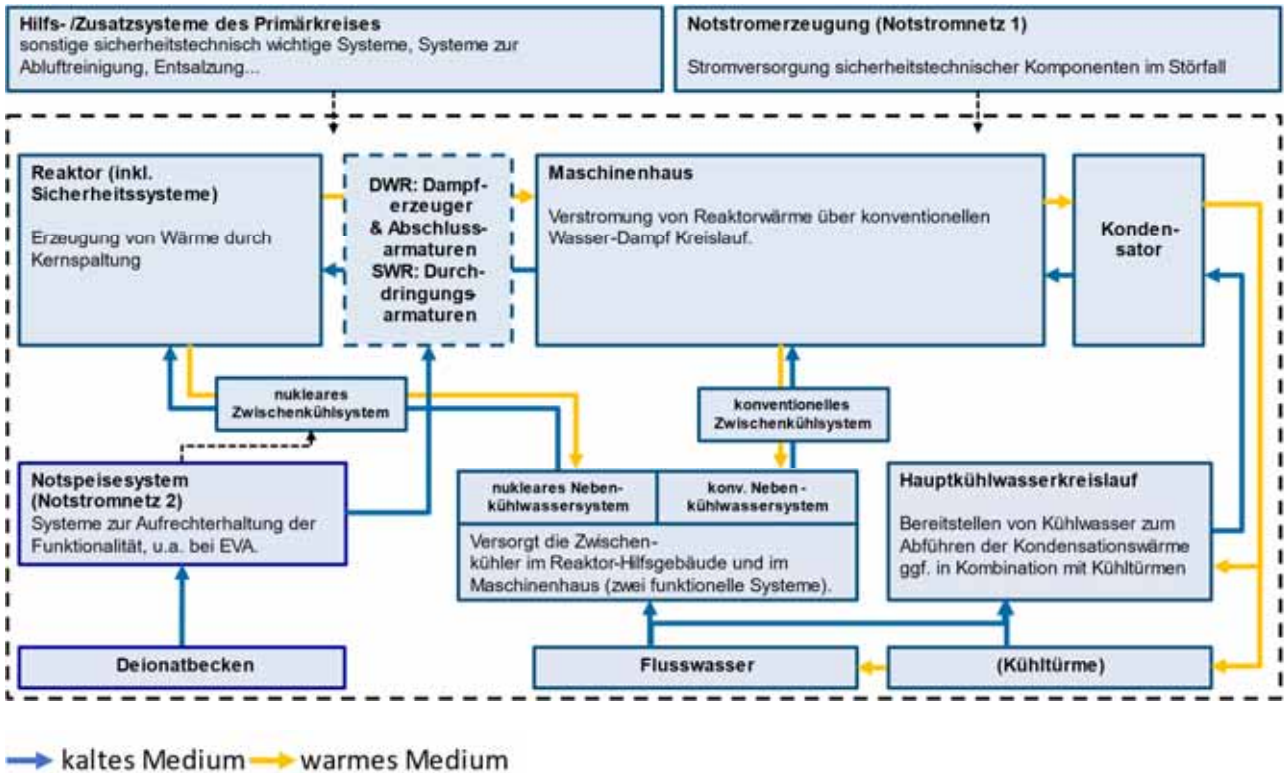
Zur Ermittlung des Wertstoffpotentials wurden Großkomponenten systematisch inventarisiert. Dabei wurden die folgenden Cluster gebildet:

- Reaktor inkl. Sicherheitssysteme
- Hilfs-/Zusatzsysteme des Primärkreises
- Einrichtungen im Maschinenhaus

- Haupt- und Nebenkühlwassersystem
- Notstromerzeugung und Notspeisesystem

Die Zuordnung von Großkomponenten zu den Clustern ist nicht immer eindeutig und muss den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden. Das Übersichtsschema in Abbildung 3-2 zeigt die genannten Systeme und wie diese im Grundsatz zusammenhängen.

**Abbildung 3-2: Übersichtsschema der Systeme in einem Druckwasserreaktor in Vor-Konvoi Bauweise**

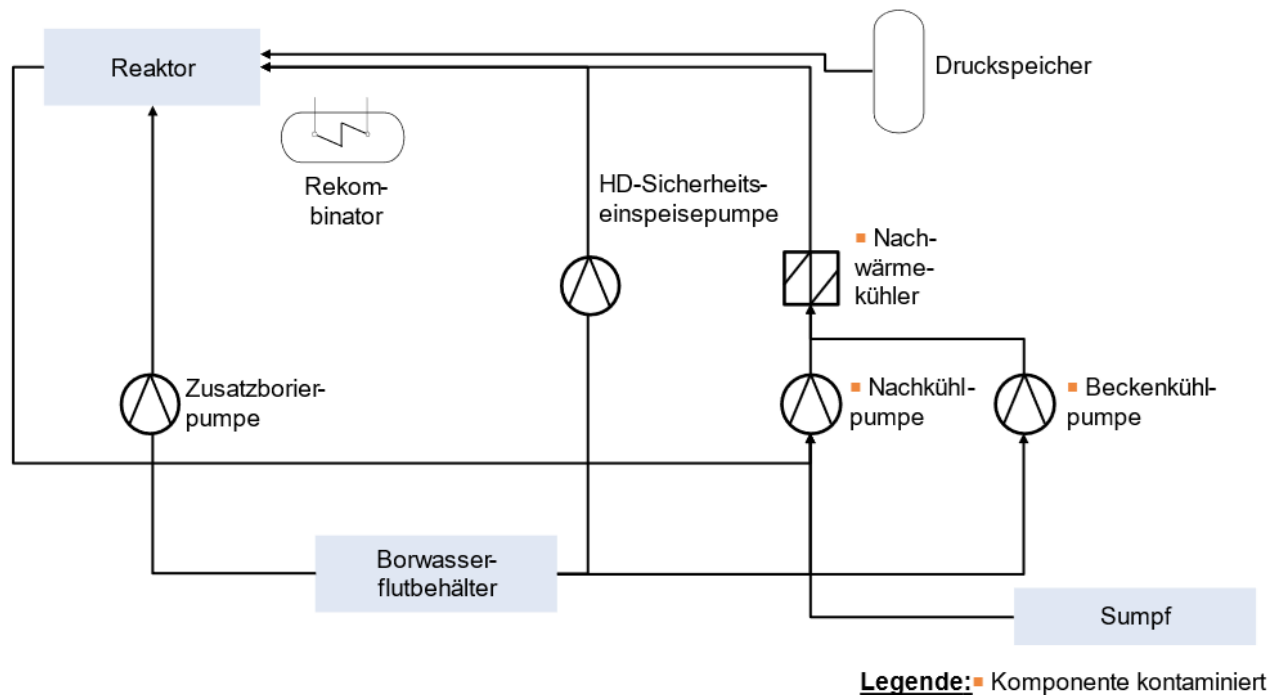


Quelle: RecTeCKA-Verbund

### Reaktor und dessen Sicherheitssysteme

Um die Schutzziele (Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der Brennelemente, Einschluss radioaktiver Stoffe) auch bei Störfällen einzuhalten, gibt es innerhalb eines Kernkraftwerks verschiedene Sicherheitssysteme. Dafür sind verschiedene Großkomponenten an den Reaktor angegliedert. Diese umfassen sicherheitstechnische Pumpen (HD-Sicherheitseinspeisepumpe, Nachkühlpumpe und Beckenkühlpumpe sowie Zusatzborierpumpe), die Nachwärmekühler und die Druckspeicher. Darüber hinaus waren für auslegungsüberschreitende Zustände Rekombinatoren vorgesehen. Abbildung 3-3 gibt einen Überblick über die genannten Großkomponenten.

**Abbildung 3-3: Prinzipschaltbild der Sicherheitssysteme KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)**



Quelle: RecTecKA-Verbund

Die Kombination aus Nachwärmekühler und zugehörigen Pumpen sowie Sicherheitseinspeisepumpe, Borwasser-Flutbehältereinheit und Druckspeicher stellt die Not- und Nachkühlung von BE-Becken und Reaktor sicher. Tritt Kühlmittel z. B. über Lecks in größerem Maße aus, wird zunächst über HD-Sicherheitseinspeisepumpen boriertes Wasser aus den Flutbehältern in den Primärkreislauf gefördert. Bei Absinken des Drucks im Reaktorkühlsystem unter den Treibdruck der Druckspeicher speisen diese zusätzlich (selbsttätig) ein. Fällt der Primärkreisdruck unter ein gewisses Level starten die Not- und Nachkühlpumpen und fördern boriertes Wasser aus den Flutbehältern. Durch diese Maßnahmen wird das Inventar im primären Kühlkreislauf aufrechterhalten bzw. der Reaktor-druckbehälter (schnell) mit boriertem Wasser geflutet. Die Einspeisung aufborierten Kühlmittels dient zudem der Herstellung und Aufrechterhaltung der Unterkritikalität.

Wasserstoff-Rekombinatoren haben die Funktion, gasförmigen Wasserstoff, der bei Unfällen in größeren Mengen auftreten kann, katalytisch<sup>6</sup> zu Wasser zu oxidieren, um so eine Knallgasexplosion zu verhindern. Diese Rekombinatoren sind für Unfälle installiert und sind nicht mit den betrieblichen Rekombinatoren des Abgassystems zu verwechseln.

Nachstehend werden die Komponenten gelistet, die kontaminationsfrei sind und die aufgrund von einer erwarteten hohen Menge an werthaltigen Metallen ausgewertet wurden:

- Zusatzborierpumpe und -behälter
- Sicherheitseinspeisepumpe

<sup>6</sup> Katalysatormaterial ist in der Regel Palladium

- Druckspeicher

Die Auswertung der genannten Komponenten ergab die in Abbildung 3-4 dargestellten Mengen relevanter Metalle. Darin enthalten sind drei Edelstähle mit unterschiedlichen Legierungszusammensetzungen. Die größte Menge macht dabei der Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4550 aus mit knapp 150 t. Der Edelstahl 1.4550 hat die DIN-Normbezeichnung X6CrNiNb18-10, die primären Legierungselemente sind Chrom (18%) und Nickel (10%). Darüber hinaus befinden sich in den analysierten Komponenten 13 t des Edelstahls 1.4541 mit der DIN-Normbezeichnung X10CrNiTi18-9, mit den Hauptlegierungselementen Chrom (18%) und Nickel (9%), sowie 2 t des Guss-Edelstahls 1.4552 mit der DIN-Normbezeichnung GX5CrNiNb19-11 mit den Hauptlegierungselemente Chrom (19%) und Nickel (11%).

**Abbildung 3-4: Tonnagen aus Großkomponenten im Sicherheitssystem KKP 2**



Quelle: RecTecKA-Verbund

Zusätzlich ist auch das Katalysatormaterial der Rekombinatoren (Rekombinatoren für den Störfall – nicht zu verwechseln mit den betrieblichen Rekombinatoren) von Interesse. Dabei handelt es sich um Palladium, welches auf Aluminiumoxidkugeln aufgedampft ist. Insgesamt ergibt sich hier eine Menge von 7,86 kg Palladium. Aufgrund des schwierigen Freigabepfads (siehe auch Kapitel 6.2.2 b), werden die Rekombinatoren bei der Auswertung zunächst auÑenvor gelassen.

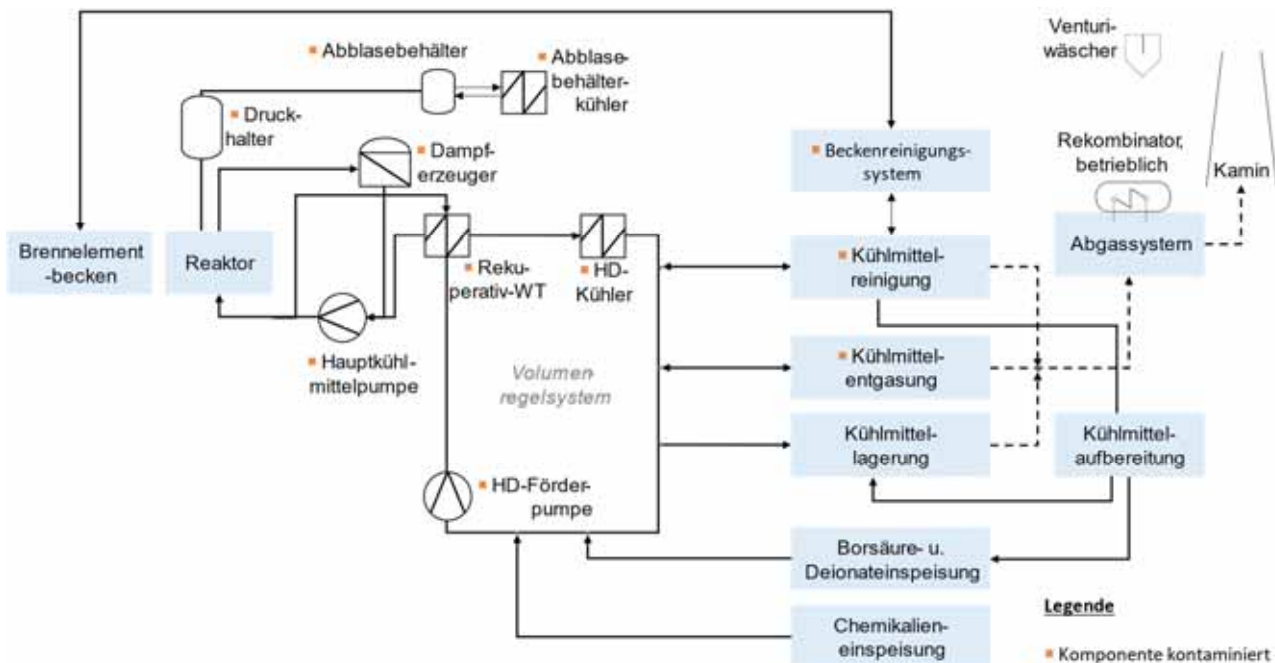
**Hilfs- und Zusatzsysteme des Primärkreises**

Primärseitig sind an den Reaktor verschiedenste Hilfs- und Zusatzsysteme angeschlossen. Einen Überblick über die Komponenten des Primärkreises sowie deren Hilfs- und Zusatzsysteme gibt Abbildung 3-5.

Die Hilfssysteme sind direkt am Reaktorbetrieb beteiligt und dienen der Einspeisung und Entnahme von Kühlmittel, der Zudosierung von Chemikalien, der Reinigung und Aufbereitung des Kühlmittels und der Kühlung von Kühlstellen u. a. im Kontrollbereich. Temperaturbedingte Dichte- oder Volumenänderungen des Kühlmittels werden durch das Volumenregelsystem ausgeglichen. Änderungen der Borkonzentration im Reaktorkühlsystem werden durch die Borsäure- und Deionateinspeisung reguliert. Die Reinheit des Kühlmittels wird durch die Kühlmittelreinigung sichergestellt. Die chemische Spezifikation des Kühlmittels wird über die Chemikalieneinspeisung eingestellt. Abwässer aus

der Reaktoranlage werden gereinigt, dekontaminiert und kontrolliert abgegeben. Die dabei anfallenden Gase werden dem Abgassystem zugeführt und nach einer ausreichenden Abklingzeit gefiltert in die Atmosphäre abgegeben.

**Abbildung 3-5: Prinzipschaltbild Primärkreis mit Hilfs- und Zusatzsystemen KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)**



Quelle: RecTeckKA-Verbund

Die Komponenten des Primärkreises sowie ihre Hilfs- und Zusatzsysteme sind häufig kontaminiert, da sie mit Kühlmittel in Berührung kommen, welches auch die Brennstäbe im Reaktorkern durchströmt. Dies betrifft u. a. die Komponenten des Volumenregelsystems, den Druckhalter sowie die zugehörigen Abblasebehälter und -kühler und die Dampferzeuger. Weiterhin sind auch Komponenten, die an das Brennelementbecken angegliedert sind, kontaminiert. Auch hier kommt das Kühlmittel direkt in Kontakt mit Brennstäben. Nachstehend sind Großkomponenten der Hilfs- und Zusatzsysteme aufgeführt, die bezüglich ihrer Materialzusammensetzung analysiert wurden, da sie (potenziell) kontaminationsfrei sind und werthaltige Materialien erwartbar waren:

- Venturiwäscher
- Dosierpumpe der Chemikalieneinspeisung
- Betriebliche H<sub>2</sub>-Rekombinatoren

Die Analyse der aufgelisteten Komponenten ergab die in Abbildung 3-6 dargestellten Tonnagen an relevanten Metallen. Insgesamt kommen Edelstähle mit drei unterschiedlichen Legierungszusammensetzungen zum Einsatz. Den primären Unterschied zwischen den Werkstoffen macht dabei, neben der Prozessführung, der Kohlenstoffgehalt aus, während die werthaltigen Legierungselemente auf einem ähnlichen Niveau sind. Der Edelstahl 1.4541 macht 13 t aus (DIN-Normbezeichnung: X10CrNiTi18-9), mit 18 % Chrom und 9 % Nickel. Die kleinste Menge macht mit 3 t der Edelstahl 1.4571 (DIN-Normbezeichnung: X10CrNiMoTi 18-10) mit 18 % Chrom und 10 % Nickel aus.

**Abbildung 3-6: Tonnagen aus Großkomponenten in Primärkreis und Hilfs- und Zusatzsystemen KKP 2**



Quelle: RecTecKA-Verbund

### Maschinenhaus

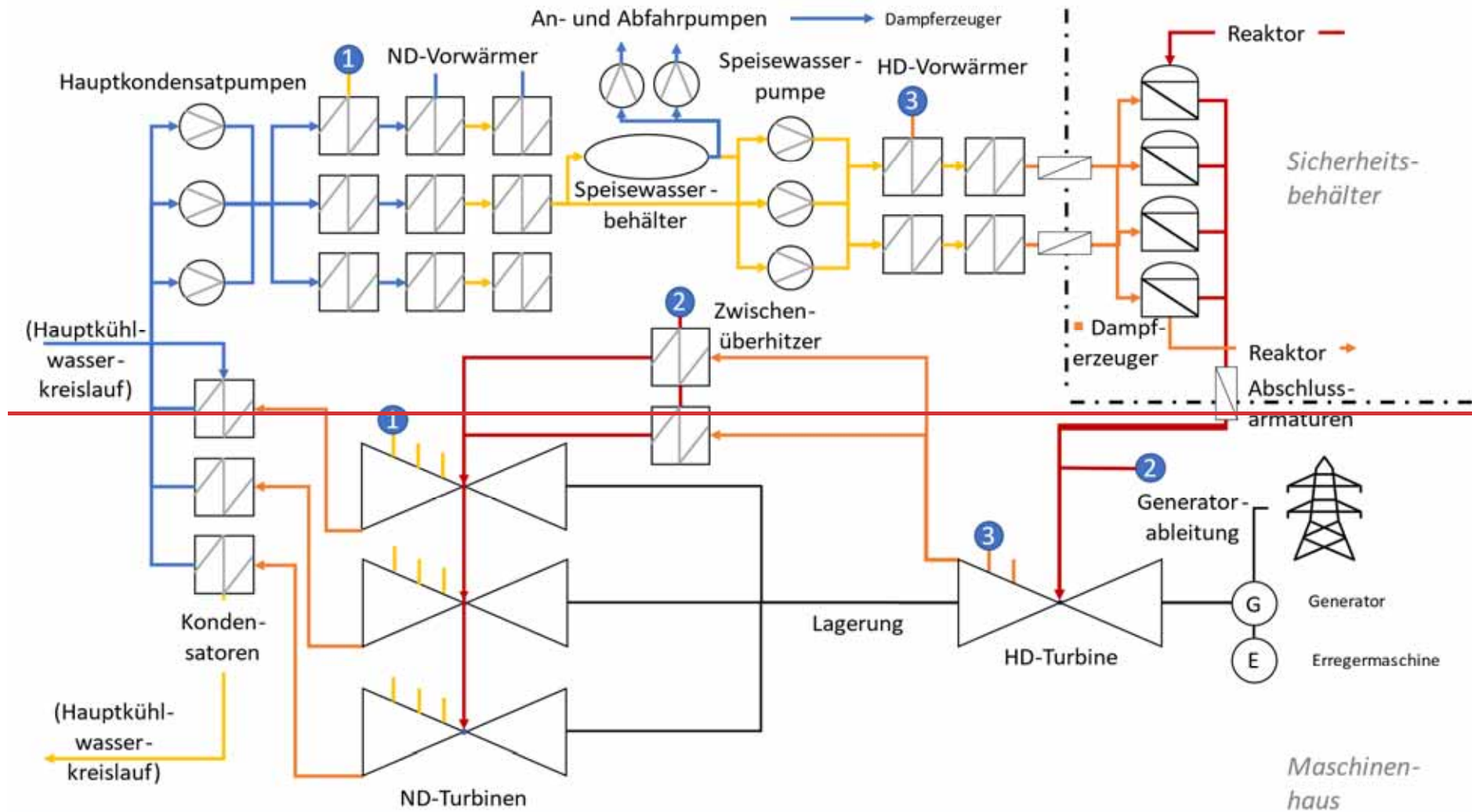
Großkomponenten des Maschinenhauses sind in einem stark vereinfachten Prinzipschaltbild in Abbildung 3-7 dargestellt. Das Maschinenhaus umfasst Komponenten entlang des Wasser-Dampf-Kreislaufs. Da es sich bei KKP 2 um einen Druckwasserreaktor handelt, sind diese Komponenten grundsätzlich nicht mit Kühlmittel aus dem Primärkreislauf in Kontakt gekommen und sind daher nicht kontaminiert. Schnittstelle zwischen dem Sicherheitsbehälter und dem Maschinenhaus sind die vier Dampferzeuger. Diese werden primärseitig mit Kühlmittel durchströmt und stellen sekundärseitig die Wärme für den Wasserdampfkreislauf bereit.

Großkomponenten des Maschinenhauses sind zunächst die Hochdruckturbine und drei Niederdruckturbinen. Diesen sind zwei Zwischenüberhitzer zwischengeschaltet, um das Energieniveau des Dampfes zu erhöhen und den Dampf zu trocknen. Die mechanische Arbeit der Turbinen wird mittels Generator (G) und Erregermaschine (E) verstromt und über die Generatoreableitung in das Stromnetz eingespeist.

Der Dampf, der aus den Niederdruckturbinen strömt, wird innerhalb dreier Hauptkondensatoren zu Wasser kondensiert. Die Wärme wird dabei über das Hauptkühlwasser abgeführt. Damit bilden die Hauptkondensatoren die Schnittstelle zum Hauptkühlwasserkreislauf. Anschließend wird das Kondensat mittels Anzapfdampf aus den Turbinen vorgewärmt, bevor es in die Dampferzeuger gelangt.



Abbildung 3-7: Prinzipschaltbild Maschinenhaus KKP 2 (stark vereinfacht)



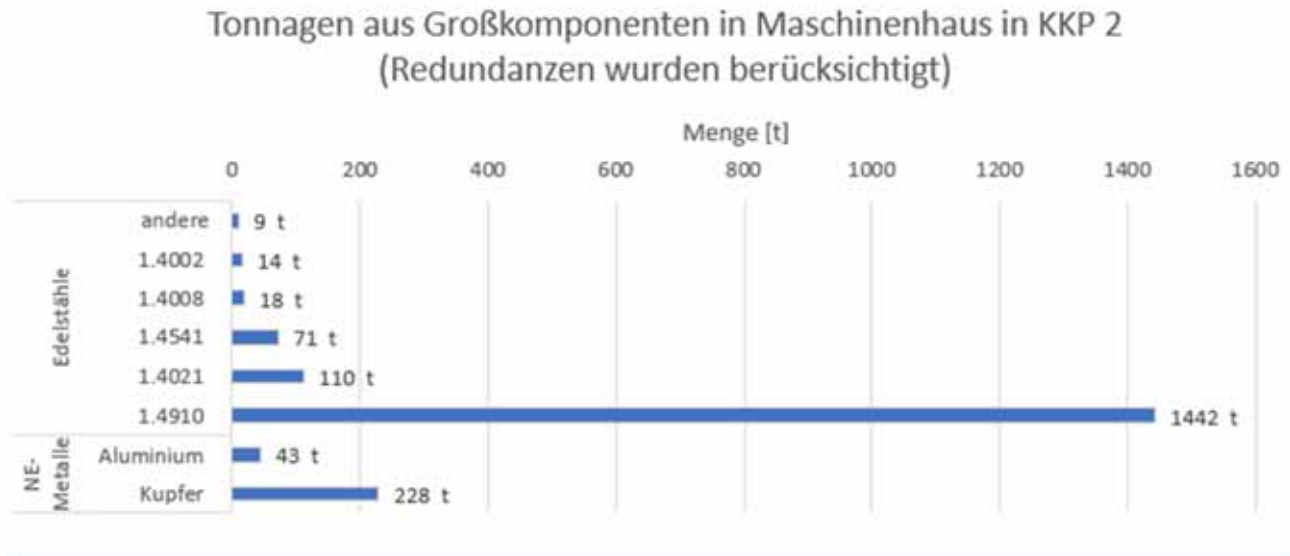
Quelle: RecTeckA-Verbund

Die analysierten Großkomponenten des Maschinenhauses sind nachstehend aufgeführt:

- Generatorableitung
- Speisewasserbehälter & Entgaser-Sprühköpfe
- Hochdruck-Entspanner & Hochdruckvorwärmer
- Frischdampfleitung & Abschlussarmatur
- Zwischenüberhitzer
- Niederdruck-Vorwärmer & Niederdruck-Entspanner
- Hochdruck-Kühler & Hochdruckkondensat-Kühler
- Niederdruckkühler
- Zwischenüberhitzer-Kondensat-Kühler
- HD-Turbine
- ND-Turbinen
- Lagerung Turbine
- Hauptkondensator
- Generator
- Erregermaschine

Aus den gelisteten Komponenten des Maschinenhauses ergaben sich die Abbildung 3-8 dargestellten aggregierten Tonnagen an werthaltigen Metallen. Den größten Teil 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. Weitere Edelstähle sind 1.4021 (110 t, DIN-Normbezeichnung: X10Cr13) mit 13% Chrom und 1.4541 (71 t, DIN-Normbezeichnung: X10CrNiTi18-9), mit 18% Chrom und 9% Nickel. Darüber hinaus kommen weitere 41 t an Edelstählen mit variierenden Legierungszusammensetzungen hinzu. Im Maschinenhaus kommt somit eine Gesamtmenge von 1.664 t Edelstahl aus Großkomponenten zusammen. Darüber hinaus kommen in den Großkomponenten im Maschinenhaus die werthaltigen Nichteisenmetalle Kupfer und Aluminium zum Einsatz, insgesamt 228 t Kupfer und 43 t Aluminium, wie in Abbildung 3-8 dargestellt.



**Abbildung 3-8: Tonnagen aus Großkomponenten in Maschinenhaus in KKP 2**


Quelle: RecTecKA-Verbund

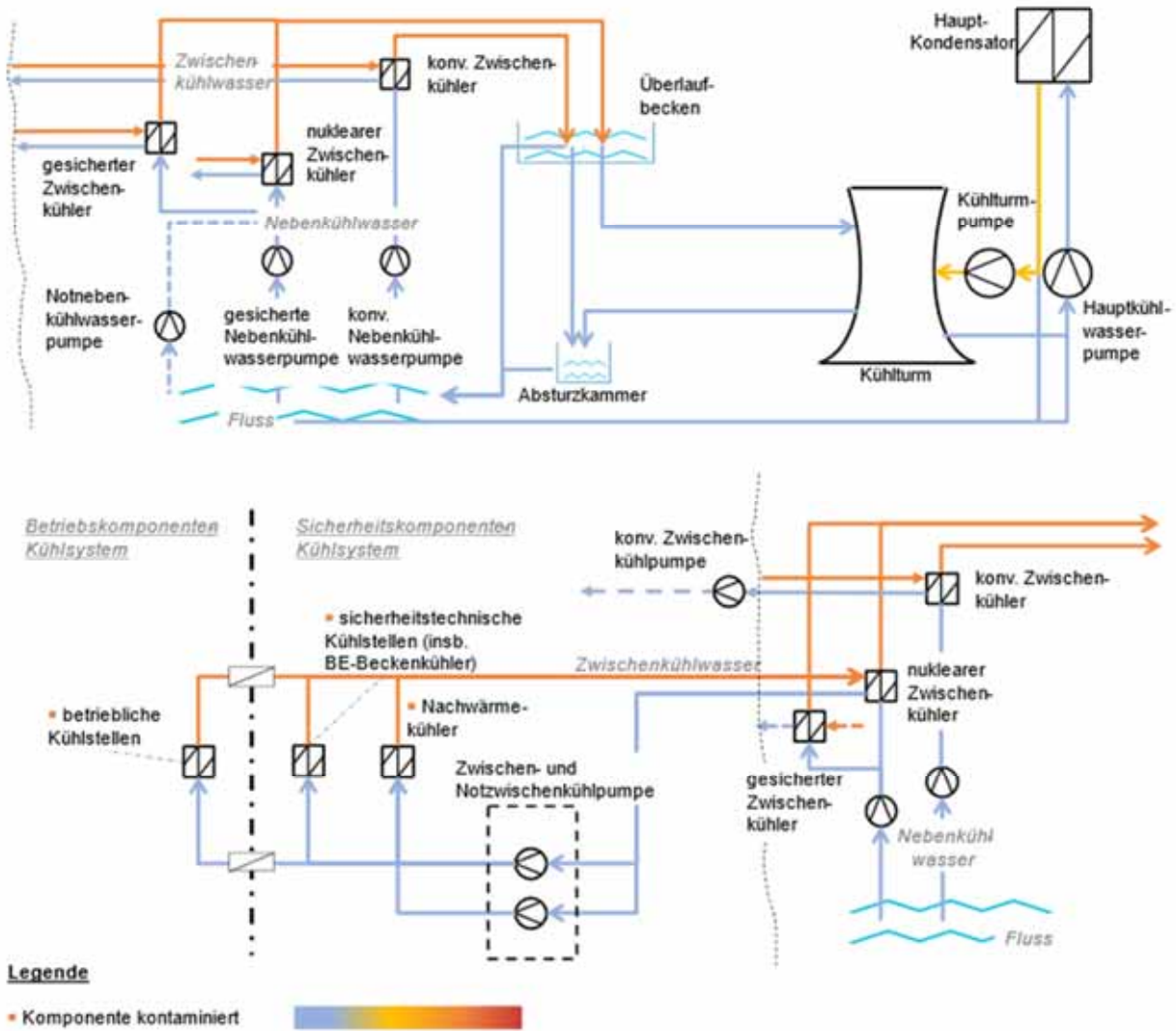
### Haupt- und Nebenkühlwassersystem

Das **Hauptkühlwassersystem** hat die Funktion, die Kondensationswärme der Hauptkondensatoren abzuführen. Dazu wird innerhalb des Tertiärkreislaufs gekühltes Wasser aus den Kühltürmen über die Hauptkondensatoren geleitet. Nachdem das Kühlwasser die Hauptkondensatoren verlässt, wird es i. d. R. über Kühltürme abgekühlt, um anschließend wieder Kondensationswärme aus den Hauptkondensatoren abführen zu können. Innerhalb der Kühltürme kommt es aufgrund von Verdunstung zu Wasserverlusten. Diese werden durch Entnahme von Flusswasser ausgeglichen.

Das Zwischen- und **Nebenkühlwassersystem** besteht aus zwei funktionellen Systemen, dem nuklearen und dem konventionellen Zwischen- und Nebenkühlwassersystem. Diese versorgen die Zwischenkühler im Reaktor-Hilfsgebäude und im Maschinenhaus mit Kühlwasser. Im konventionellen System versorgt die konventionelle Nebenkühlwasserpumpe den konventionellen Zwischenkühler mit Kühlwasser. Im nuklearen System wird der nukleare Zwischenkühler i. d. R. über die gesicherte Nebenkühlwasserpumpe mit Kühlwasser versorgt. Die Zwischenkühler stellen die Schnittstelle zwischen Nebenkühlwasser und Zwischenkühlwasser dar. Das Zwischenkühlwasser wird durch Zwischenkühlpumpen umgewälzt. Über das konventionellen Zwischenkühlssystem werden verschiedenste betriebliche Kühler (z. B. zur Raum- oder Generatorkühlung bzw. verschiedener Pumpen) mit Kühlwasser versorgt. Über das nukleare Zwischenkühlssystem werden betriebliche Kühlstellen des Primärkreises, sicherheitstechnische Kühlstellen (insbesondere der BE-Beckenkühler) und die Nachwärmekühler mit Kühlwasser versorgt.

Abbildung 3-9 gibt einen Überblick über das Haupt- und das Zwischen- und Nebenkühlwassersystem.

Abbildung 3-9: Prinzipschaltbild Haupt- und Zwischen- und Nebenkühlwassersystem KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)



Quelle: RecTeckKA-Verbund

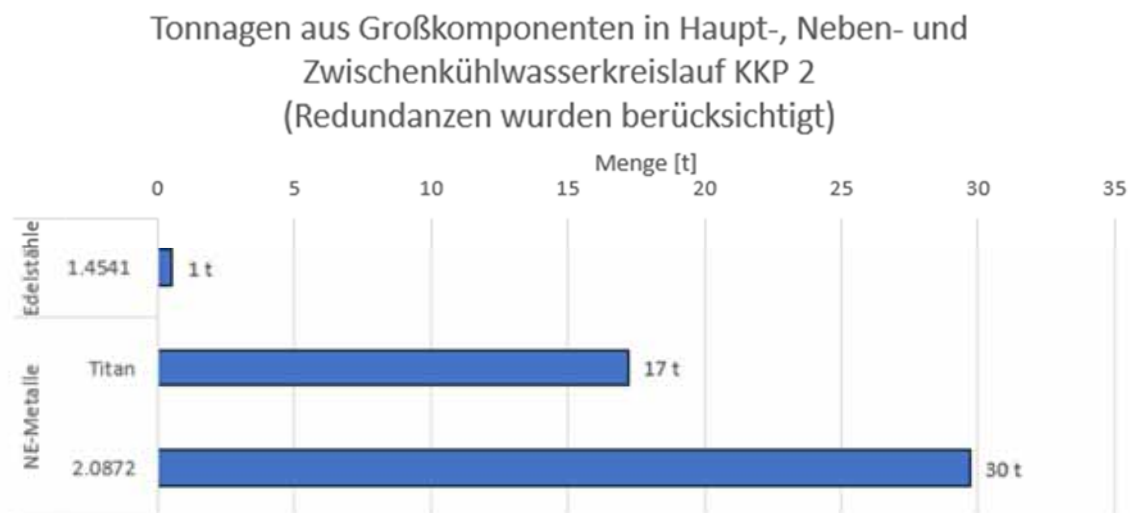
Großkomponenten des Haupt- und des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems, die (potenziell) kontaminationsfrei sind und bei denen hohe Mengen an werthaltigen Materialien zu erwarten waren, sind nachstehend aufgeführt:

- Beckenkühler
- Zwischen- und Notzwischenkühlpumpe
- Nuklearer Zwischenkühler
- Hauptkühlwasserpumpen, ohne Motor
- Nebenkühlwasserpumpen, ohne Motor

- konventioneller Zwischenkühler
- Gesicherte Zwischenkühlpumpe, ohne Motor
- gesicherte Zwischenkühler

Die gelisteten Komponenten wurden ausgewertet und Abbildung 3-10 gibt einen Überblick über die Mengen an werthaltigen Materialien aus Großkomponenten des Haupt- und des Zwischen- und Nebenköhlwassersystems. Neben ca. 1 t des Edelstahl 1.4541 (DIN-Normbezeichnung: X10CrNiTi18-9, mit 18% Chrom und 9% Nickel) kamen die Nichteisenmetalle Titan und der Werkstoff 2.0872 zum Einsatz. Bei den ca. 17 t Titan handelt es sich um hochreines Titan Grade 1. Bei den 30 t 2.0872 handelt es sich um einen kupferbasierten Werkstoff (ca. 88 % Kupferanteil) mit einem Nickel-Legierungsanteil von ca. 10 %.

**Abbildung 3-10: Tonnagen aus Großkomponenten in Haupt-, Neben- und Zwischenköhlwasserkreislauf KKP 2**



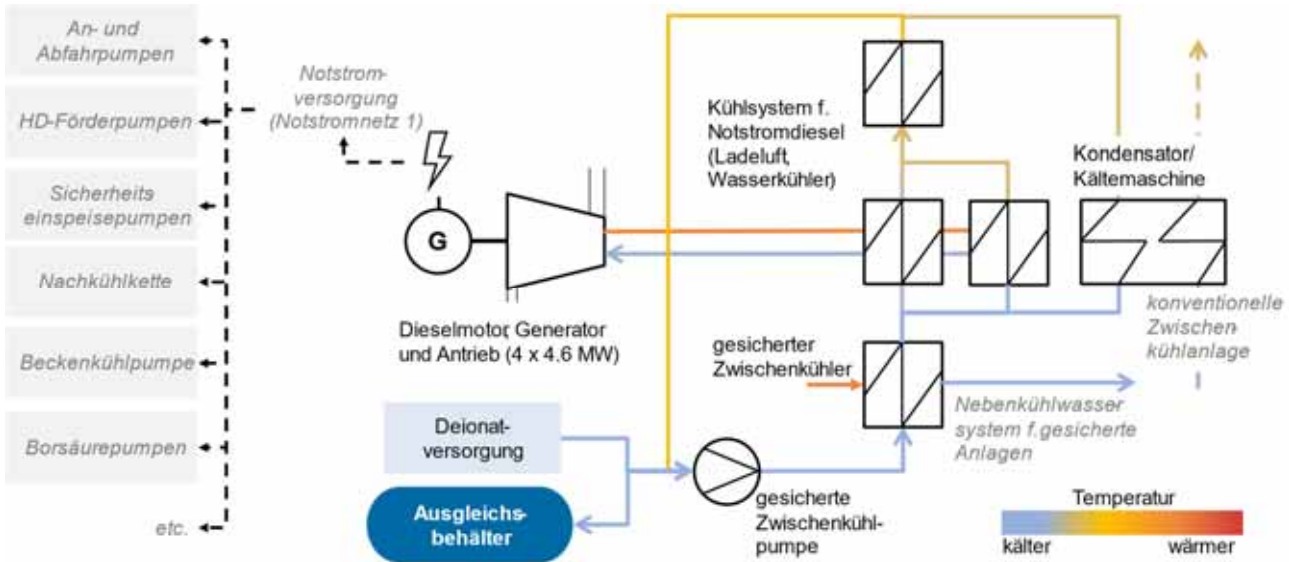
Quelle: RecTecKA-Verbund

### Notstromerzeugung und Notspeisesystem

Fällt in einem Kernkraftwerk die externe Stromversorgung aus, so muss gewährleistet sein, dass sicherheitsrelevante Systeme weiterhin mit Elektrizität versorgt werden können und ein sicheres Abfahren des Reaktors möglich ist. Vier Dieselmotoren und deren Generatoren (4 x 50%) stellen Strom über das Notstromnetz D1 bereit und können dadurch dieser Aufgabe nachkommen. Die Dieselmotoren und -generatoren sind im **Notstromerzeugergebäude** verortet. Im Notstromerzeugergebäude befindet sich weiterhin die **Kaltwasserzentrale**. Das Kaltwassersystem ist für die Kühlung der verschiedenen Kühlstellen in der Lufttechnischen Anlage und im Abgassystem zuständig. Es besteht aus vier Strängen, die durch ein Sammelbecken miteinander verbunden sind und die Kühlstellen mit Kaltwasser versorgen. Sowohl die redundanten Kühlstellen als auch die Kühlstellen im Abgassystem werden auch im Notstromfall mit Kaltwasser versorgt. Im Notstromfall werden alle Kältemaschinen vom gesicherten Zwischenköhlssystem gekühlt. Die gesicherte Zwischenköhlpumpe und zugehöriger Köhler führen im Notstromfall die Verlustwärme der Notstromdiesel (Ladeluft und Wasserköhlter) und

der Kaltwasserzentrale ab. In Abbildung 3-11 ist eine vereinfachte Darstellung des Notstromerzeugergebäudes und der Kaltwasserzentrale gegeben. Die vier Redundanzen sind nicht dargestellt.

**Abbildung 3-11: Prinzipschaltbild Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)**



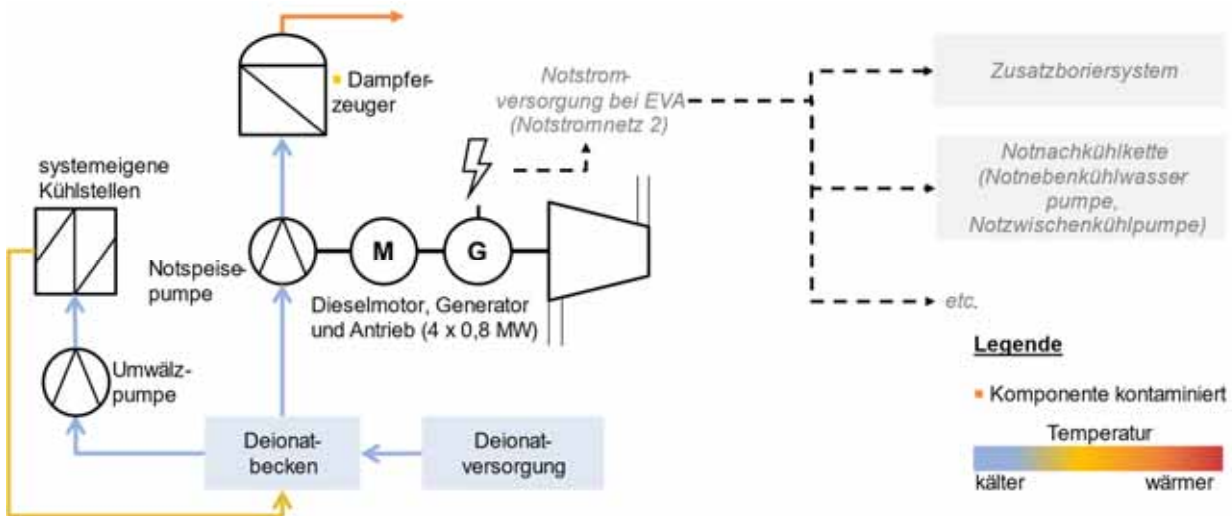
Quelle: RecTeckKA-Verbund

Das Notspeisesystem stellt die Versorgung der Dampferzeuger bei Transienten mit Ausfall der betrieblichen Dampferzeugerbespeisungssysteme sicher. Für die Notbespeisung wird über das Notstromnetz D 2 zusätzlich elektrische Energie von den dieselgetriebenen Notspeisegeneratoren bereitgestellt, wenn die Stromversorgung von Notstromnetz D 1 ausfällt (beispielsweise bei einem Flugzeugabsturz oder einer Explosionsdruckwelle, also bestimmten Einwirkungen von außen (EVA)).

Abbildung 3-12 stellt in einem vereinfachten Prinzipschaltbild die Komponenten des Notspeisegebäudes dar. Das Notspeisesystem besteht aus vier redundanten Strängen. Die Redundanzen sind in der Abbildung nicht aufgeführt. Innerhalb des **Notspeisegebäudes** wird Deionat aus dem Deionatbecken entnommen<sup>7</sup>, welches von der Notspeisepumpe zu den Dampferzeugern geleitet wird. Die anfallende Wärme aus verschiedenen Kühlern wird an den Deionatvorrat abgeführt, um das Notspeisesystem autark von der Nebenkühlwasserversorgung zu halten.

<sup>7</sup> kann bei Anforderung auch aus anderen Strängen entnommen werden

**Abbildung 3-12: Prinzipschaltbild Notspeisegebäude KKP 2 (stark vereinfacht, ohne Redundanzen)**



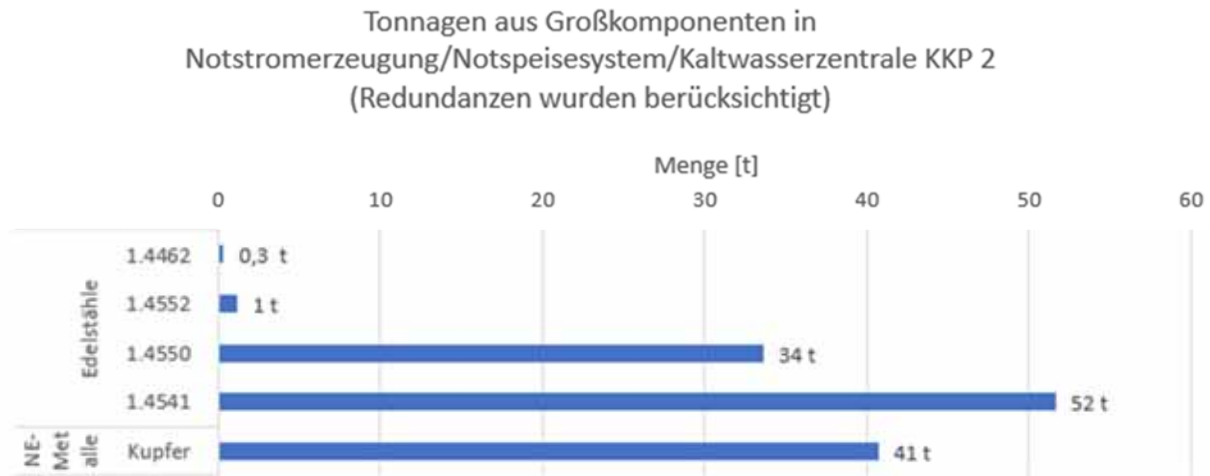
Quelle: RecTecKA-Verbund

Nachfolgend sind die Großkomponenten der Notstromerzeugung, der Kaltwasserzentrale und des Notspeisesystems aufgeführt, die (potenziell) kontaminationsfrei sind und hohe Mengen an werthaltigen Materialien erwarten lassen:

- Deionatbehälter, -pumpe und -armatur
- Notspeiserohrleitung
- Notspeisepumpe
- Kältemaschineverflüssiger & - verdampfer
- Motorkühler Notstromdiesel
- Notstromdiesel – Notstromnetz D 1
- Notstromdiesel – Notstromnetz D 2

Aus den analysierten Großkomponenten der Notstromerzeugung, der Kaltwasserzentrale und des Notspeisesystems ergeben sich die in Abbildung 3-13 dargestellten Mengen an werthaltigen Metallen, insgesamt vier unterschiedliche Edelstähle sowie das Nichteisenmetall Kupfer. 34 t des Edelstahl 1.4550, mit der DIN-Normbezeichnung X6CrNiNb18-10, welcher 18% Chrom und 10% Nickel enthält, sowie ca. 52 t des Edelstahl 1.4541 (DIN-Normbezeichnung: X10CrNiTi18-9, mit 18% Chrom und 9% Nickel). Darüber hinaus kamen 1 t des Edelstahl 1.4552 und 0,3 t des Edelstahl 1.4462 zum Einsatz. Die Menge an Kupfer in den Großkomponenten belief sich auf 41 t.

**Abbildung 3-13: Tonnagen aus Großkomponenten in Notstromerzeugung/Notspeisesystem/Kaltwasserzentrale KKP 2**



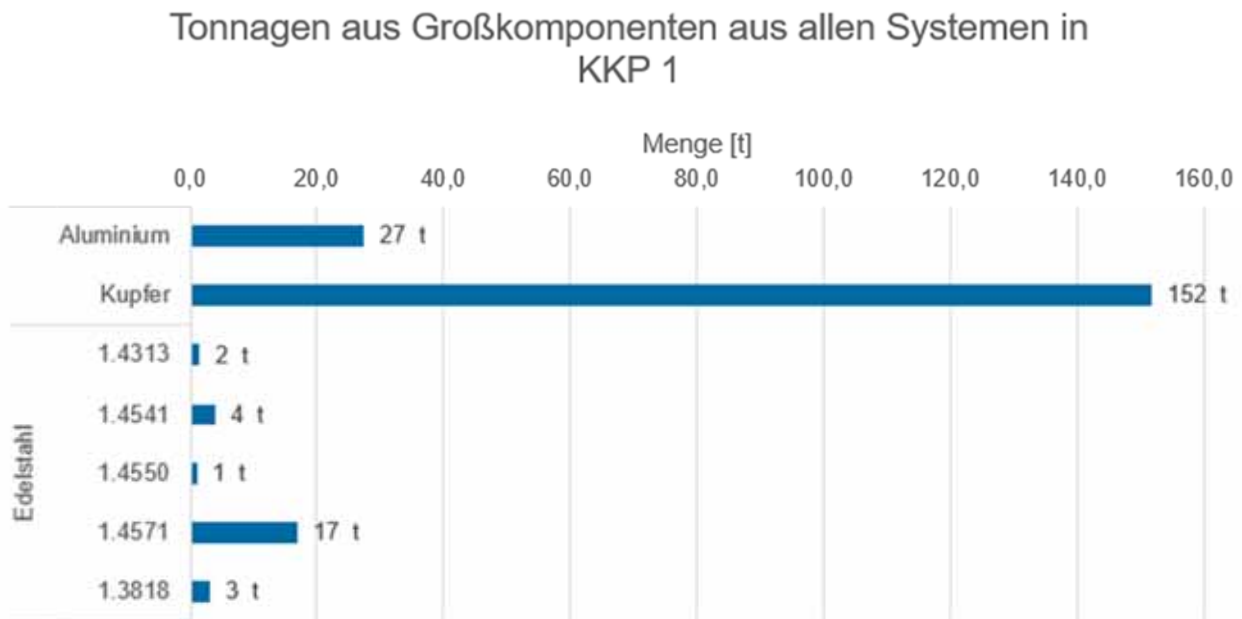
Quelle: RecTeckKA-Verbund

### 3.1.2 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1 (KKP 1)

Die Menge an Großkomponenten, die sowohl werthaltige Materialien in nennenswerten Mengen enthalten als auch als kontaminationsfrei gelten, sind in KKP 1 (im Vergleich zu KKP 2) vernachlässigbar gering. Komponenten, die die genannten Voraussetzungen erfüllen, sind die Notspeisepumpe, der Borierbehälter (Vergiftungsbehälter), der USUS-Kühler und die betrieblichen H<sub>2</sub>-Rekombinatoren.

Weiterhin sind auch Generator, Erregermaschine sowie die Generatorableitung freigabefähig. Für diese Komponenten waren die Werkstoffdatenblätter unvollständig und die Menge an werthaltigen Materialien wurde auf Basis der in KKP 2 verbauten Komponenten abgeschätzt. Hier wurde die Nettoleistung der beiden Reaktoren (Nettoleistung KKP 1 = 864 MW, KKP 2 = 1268 MW) als Skalierungsfaktor angesetzt (Skalierungsfaktor = 0,68).

Abschließend sind auch die Notstromdieselmotoren aufzunehmen. Hiervon gibt es in KKP 1 sechs Stück, je mit einer Leistung von 4.000 PS. In Abbildung 3-14 ist die Tonnage werthaltiger Materialien aller Großkomponenten in KKP 1 zusammengestellt.

**Abbildung 3-14: Tonnagen aus Großkomponenten aller Systeme KKP 1**

Quelle: RecTecKA-Verbund

## 3.2 Auswertung der Materialdaten zu Kabeln, E-Motoren und Stellantrieben

Innerhalb und außerhalb des Kontrollbereichs befinden sich Kabel und E-Motoren, die v. a. aufgrund ihrer Kupfer- und Aluminiumgehalte von besonderer Relevanz sind. Für KKP 2 stellt sich die Datenlage etwas besser dar im Vergleich zu KKP 1, weshalb KKP 2 eingangs betrachtet wird. Anschließend wird das Werkstoffpotential aus Kabeln und Motoren von KKP 1 betrachtet.

### 3.2.1 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 2 (KKP 2)

#### Kabel

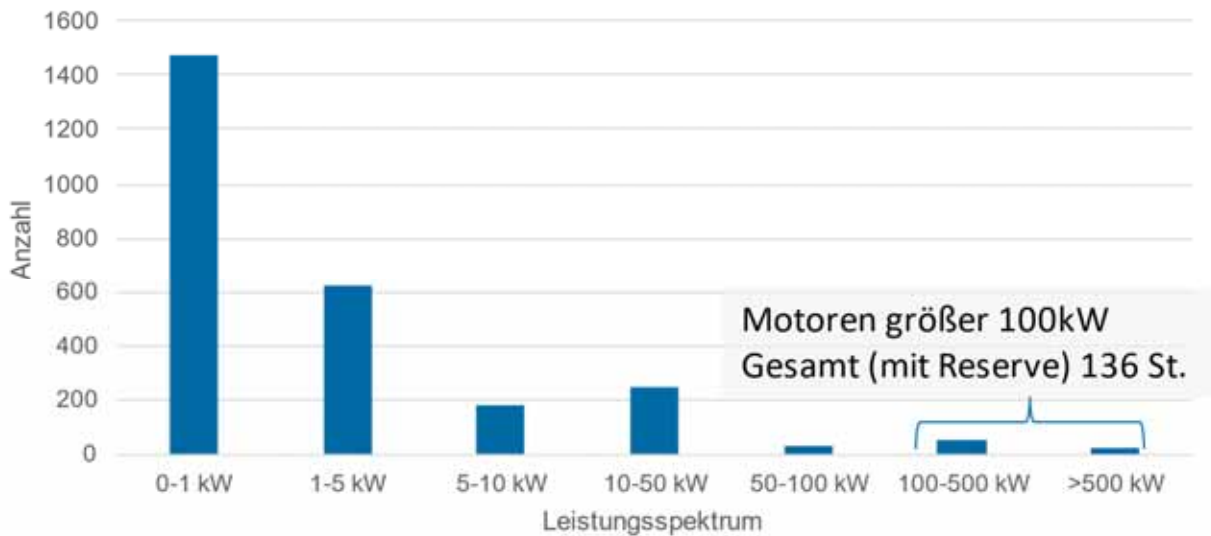
Die Menge an Kabel innerhalb und außerhalb des Kontrollbereichs beläuft sich in KKP 2 auf knapp 2.300 t. Bei Kabeln wird ein durchschnittlicher Kupfergehalt von 80% angesetzt.

#### E-Motoren

Innerhalb von KKP 2 waren etwa 2.700 E-Motoren verbaut, die mehrheitlich im niedrigen Leistungsspektrum bis 100 kW angesiedelt sind. Die Anzahl der E-Motoren, die größer als 100 kW sind, beträgt 136 Stück (inklusive Reservemotoren). Abbildung 3-15 gibt einen Überblick.



**Abbildung 3-15: Anzahl der Motoren in KKP 2 (innerhalb und außerhalb des Kontrollbereichs) gruppiert nach Leistungsspektrum**



Quelle: RecTeCKA-Verbund

Zu den größten E-Motoren (Leistungsspektrum größer 500 kW) gehören Motoren der folgenden Pumpen:

- Speisewasserpumpe [3 x 12,5 MW]
- Hauptkühlmittelpumpe [4 x 7,3 MW]
- Kühlturmpumpe [4 x 3,0 MW]
- Hauptkühlwasserpumpe [6 x 1,6 MW]
- Hauptkondensatpumpe [3 x 1,2 MW]
- An- und Abfahrpumpen [2 x 0,67 MW]
- Hochdruck-Einspeisepumpe [4 x 0,57 MW]
- Konventionelle Nebenkühlwasserpumpe [1 x 0,55 MW]

Von den knapp 700 t an verbauten E-Motoren machen die genannten großen Motoren (>500 kW) etwa 50% des Gewichtes aus. Bezüglich des Kupfergehaltes der Motoren kann folgende Aussage getroffen werden: für E-Motoren bis 300 kg sind Kupferwerte zwischen 18 - 20% üblich, selten auch bis zu 22%, für E-Motoren größer 300 kg verringert sich der Kupferanteil auf 15 - 18%.

Die Gesamtmenge an Kupfer aus Kabeln und E-Motoren summiert sich so auf knapp 2000 t für KKP 2. Die Aufstellung über Kabel und E-Motoren ist in Tabelle 3-1 zusammengefasst.



**Tabelle 3-1: Gesamtmenge und Kupfer- bzw. Aluminiummenge der in KKP 2 verbauten Kabel und Motoren**

Motoren/Kabel	Gesamtmenge	Kupfermenge	Aluminiummenge
Kabel außerhalb Kontrollbereich	1.695 t	1.356 t	--
Kabel innerhalb Kontrollbereich	582 t	467 t	--
E-Motoren innerhalb Kontrollbereich	245 t	116 t (gesamt)	161 t (gesamt)
E-Motoren außerhalb Kontrollbereich	441 t		

Quelle: RecTecKA-Verbund

### Stellantriebe

Stellantriebe sind in KKP 2 in einer Größenordnung von knapp 90 t in KKP 2 verbaut. Der Kupferanteil ist mit 5 Masse-% deutlich geringer als in Motoren. Der Aluminiumanteil erreicht 20 Masse-%. In Tabelle 3-2 ist eine Aufstellung der Stellantriebe für KKP 2 gegeben.

**Tabelle 3-2 Mengenströme der Stellantriebe in KKP 2**

Stoffstrom	KKP 2
Stellantriebe im Kontrollbereich	43,6 t
Stellantriebe außerhalb des Kontrollbereichs	43,6 t
<b>Stellantriebe, gesamt</b>	<b>87,2 t</b>
<i>davon Kupfer</i>	4,4 t
<i>davon Aluminium</i>	17,4 t

Quelle: RecTecKA-Verbund

### 3.2.2 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1 (KKP 1)

Für KKP 1 wurden die Gesamtmengen der Kabel und Motoren durch die EnBW Kernkraft GmbH zusammengetragen. Hinsichtlich der Zusammensetzung wurde dasselbe methodische Vorgehen wie bei KKP 2 (vergleiche Kapitel 3.2.1) angewendet. Die Auflistung zu den Gesamtmengen sowie den Kupfer- und Aluminiummengen befindet sich in Tabelle 3-3.

**Tabelle 3-3 Gesamtmenge und Kupfer- bzw. Aluminiummenge der in KKP 1 verbauten Kabel und Motoren**

Motoren/Kabel	Gesamtmenge	Kupfermenge	Aluminiummenge
Kabel außerhalb Kontrollbereich	1.091 t	873 t	--
Kabel innerhalb Kontrollbereich	403 t	322 t	--
E-Motoren innerhalb Kontrollbereich	167 t	73,5 t (gesamt)	102 t (gesamt)
E-Motoren außerhalb Kontrollbereich	267 t		
Stellantriebe innerhalb Kontrollbereich	116 t	6,4 t (gesamt)	25,4 t (gesamt)
Stellantriebe außerhalb Kontrollbereich	11 t		

Quelle: RecTecKA-Verbund

### 3.3 Auswertung der Materialdaten der E- und Leittechnik

#### 3.3.1 Elektrobauteile

Als mengenmäßig größter Posten zur Untersuchung wurden von der EnBW Kernkraft GmbH Bauteile aus der Leittechnik zur Verfügung gestellt. Diese stellen im weitesten Sinne eine Fraktion von Schaltern, Platinen mit Abdeckungen und verschiedenen Kontrolleinheiten dar. Nach einer ersten Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass eine getrennte Sammlung der Materialien nicht erforderlich ist, da diese als eine Elektromischfraktion betrachtet werden können. Die Bauteile wurden in einem ersten Schritt anhand ihrer Masse in 2 Kategorien eingeteilt. Der Trennschnitt liegt bei einem Gewicht von 150 g. Nachfolgende Abbildung 3-16 stellt ein Beispiel der leichten Fraktion dar.

**Abbildung 3-16: Darstellung von leichten Elektrobauteilen aus dem Rückbau**

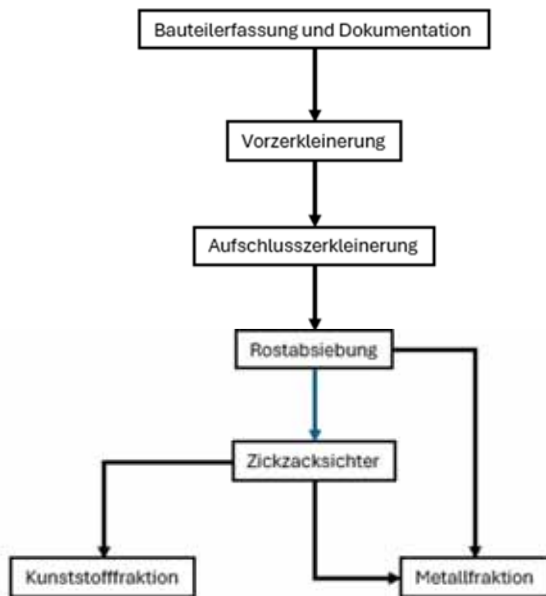


Quelle: RecTecKA-Verbund

Die Bauteile wurden im ersten Schritt in einer Rotorschere vorzerkleinert. Besonders bei der Fraktion der großen Bauteile wurden hierüber bereits große Stahl- und Aluminiumanteile freigelegt, welche direkt der Metallschrottsammlung zugeführt wurden. Nach der Vorzerkleinerung wurde mittels einer Hammermühle eine Aufschlusszerkleinerung durchgeführt. Hierbei wurde zuerst mit einem 10\*20 mm Quadratsieb gearbeitet, um eine zu hohe Temperaturentwicklung in der Mühle zu verhindern. Im zweiten Schritt wurde auf ein 2 mm Lochsieb gewechselt, um den Aufschluss der Bauteile zu gewährleisten. Nach der Zerkleinerung wurde deutlich, dass der Großteil der Bauteile Spulen enthält. Durch die Zerkleinerung wurden die Litzen freigelegt. Die Litzen bildeten dabei Knäuel, welche vor dem Zickzack-Sichter durch eine Rostabsiebung abgetrennt und der Fraktion Metallschrott zugeführt wurden. Hierüber konnte ermittelt werden, dass in der Fraktion der Bauteile mit einem Gewicht von weniger als 150 g der Metallanteil bei 30% liegt, während der Metallanteil bei Bauteilen mit einem Gewicht von mehr als 150 g bei 70 Massenprozent liegt. Der Unterschied kann darüber erklärt werden, dass bei schweren Bauteilen deutlich mehr Abdeckungen aus Aluminium oder Stahl vorhanden sind, der Kunststoffanteil ist entsprechend geringer. Bei den kleinen Bauteilen finden sich

im Regelfall häufiger Kunststoffgehäuse. Anhand der Beobachtungen kann festgestellt werden, dass für die Aufbereitung von Elektrobauteilen keine gesonderten Verfahrenswege entwickelt werden müssen (Amit Kumar et al. 2017; Jirang Cui und Eric Forssberg 2003). Der identische Aufbereitungsweg für beide Fraktionen ist in Abbildung 3-17 dargestellt.

**Abbildung 3-17: Aufbereitungsweg für Elektrobauteile**



Quelle: RecTeckKA-Verbund

Zu einer weiteren Sortierung der Metallfraktion können klassische trockenmechanische Sortierschritte ausgewählt werden. Hierzu kommen besonders die Magnetscheidung und die Wirbelstromscheidung in Frage. Mittels Magnetscheidung können ferromagnetische Bestandteile wie Eisen bzw. Stahl abgetrennt werden. Aufgrund der groben Körnung kommen hierzu klassische Überbandmagnete und Trommelmagnete in Frage. Mittels Wirbelstromscheidung kann im Anschluss eine Aluminiumfraktion gewonnen werden. Weitere Möglichkeiten sind röntgengestützte, sensorbasierte oder dichte-basierte Verfahren zur Abtrennung von Kunststofffraktionen (Jirang Cui und Eric Forssberg 2003). Die Metallfraktion besteht aus Eisen, Stahl, Messing, Kupfer und Aluminium. Weiterhin können Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium enthalten sein. Durch Rücksprache mit den Kraftwerksbetreibern konnte die Gesamtmenge an Elektrobauteilen in den Blöcken 1 und 2 ermittelt werden. Diese belaufen sich in KKP 1 auf 2.248 Tonnen und in KKP 2 auf 2997,2 Tonnen.

Die genaue Aufteilung ist nachfolgender Tabelle 3-4 zu entnehmen. Hierbei werden die Elektrobauteile in die Kategorien innerhalb und außerhalb des Kontrollbereichs (KB) unterteilt.

**Tabelle 3-4 Massen an Elektronischen Einrichtungen KKP 1 und KKP 2**

Bezeichnung	KKP 1 [t]	KKP 2 [t]
Innerhalb KB	370	105
außerhalb KB	1.878	2.892
Gesamtmasse	2.248	2.997

Quelle: RecTecKA-Verbund

Nach Erfahrungswerten von ELECTROCYCLING GmbH stellen die zur Verfügung gestellten Bauteile einen wirtschaftlich interessanten Posten dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass etwa 39% der Gesamtmasse direkt in einer Kupferhütte verwertet werden können. Tabelle 3-5 stellt die geschätzte Zusammensetzung der Fraktion dar.

**Tabelle 3-5 Fraktionen und deren Anteile bei der mechanischen Aufbereitung von Elektrobauteile**

Bezeichnung	Gehalt [%]
Hüttenfraktion	39
Eisen	24
Aluminium	23
Eisen-Stahl Mischfraktion	11
Kunststoffe	3

Quelle: RecTecKA-Verbund

Es wird deutlich, dass die Hüttenfraktion mengenmäßig einen großen Anteil an der Gesamtmasse hat. Nach Erfahrungswerten kann davon ausgegangen werden, dass durch die enthaltenen Steuerplatinen in den Bauteilen Gehalte von 39 g Gold, 1.500 g Silber und 10 g Palladium in einer Tonne Hüttenfraktion erwartet werden können. Im Nachfolgenden werden die ermittelten Gesamtmassen der Metalle beider Blöcke in Bezug auf die enthaltenen Metalle aufgeschlüsselt. Hierbei wird der Anteil innerhalb respektive außerhalb des Kontrollbereichs berücksichtigt. Die Aufschlüsselung ist in Tabelle 3-6 dargestellt.

**Tabelle 3-6 Absolute Mengen bei der Aufbereitung von Elektrobauteilen**

Bezeichnung	KKP 1 Innerhalb Kontrollber. [kg]	KKP 1 Außerhalb Kontrollber. [kg]	KKP2 Innerhalb Kontrollber. [kg]	KKP 2 Außerhalb Kontrollber. [kg]
Hüttenfraktion	144.300	732.420	41.028	1.127.880
<i>davon: Gold</i>	5,62	28,56	1,60	43,98
<i>davon: Silber</i>	216,45	1.098,63	61,54	1.691,82
<i>davon: Palladium</i>	1,44	7,32	0,41	11,27
Eisen	88.800	450.270	25.248	694.080
Aluminium	85.100	431.940	24.196	665.160
Eisen- Stahl Mischfraktion	40.700	206.580	11.572	318.120
Kunststoffe	11.100	56.340	3.156,00	87.760

Quelle: RecTecKA-Verbund

### 3.3.2 Mittelspannungsschalter

Eine weitere interessante Komponente im Kraftwerk stellen Mittelspannungsschalter (sog. Gießharzschalter) dar. Diese bestehen zu einem Großteil aus Gusseisen, verfügen allerdings über versilberte Kupferkontakte. Im Rahmen des Projekts wurde ein Schalter an der TU Clausthal demontiert und die Masse der Kontakte aufgenommen. Diese beläuft sich auf 1,8 Massenprozent. Nach Rücksprache mit der EnBW Kernkraft GmbH konnte die Gesamtmasse an Mittelspannungsschaltern und versilberten Kontakten in den Blöcken 1 und 2 ermittelt werden. Diese ist in Tabelle 3-7 aufgelistet.

**Tabelle 3-7      Aufschlüsselung der Mittelspannungsschalter nach Gesamtmasse und Masse an versilberten Kontakten**

<b>KKP 1</b>				
Typ	Masse [kg]	Anzahl	Gesamtmasse [kg]	Masse versilberte Kontakte [kg]
GE 512	230	78	17.940	322,92
GE 516	230	4	920	16,56
GE 517/817	460	10	4.600	82,8
GE 512	230	78	17.940	322,92
GE 516	230	4	920	16,56
GE 517/817	460	10	4.600	82,8
<b>KKP 2</b>				
GE 512	230	78	17.940	322,92
GE 516	230	4	920	16,56
GE 517/817	460	10	4.600	82,8

Quelle: RecTecKA-Verbund

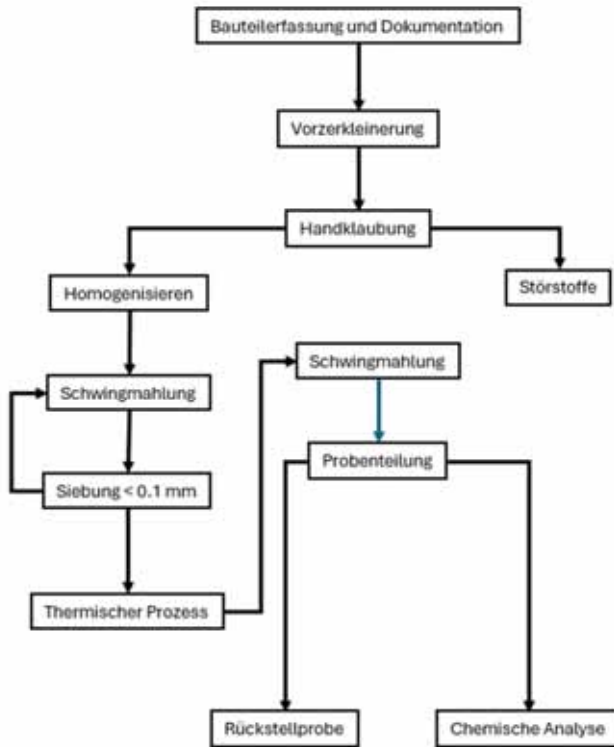
Somit ergibt sich im Kraftwerk eine Gesamtmasse von etwas über 51 Tonnen, wovon 930 kg auf versilbertes Kupfer entfallen. Dieses teilt sich zu 507 kg auf KKP 1 und 422 kg auf KKP 2 auf.

### 3.3.3 Schaltschränke und Platinen

Für die Durchführung des Projektes wurden von der EnBW Kernkraft GmbH verschiedene Komponenten der E- und Leittechnik zur Verfügung gestellt. Die größte Gruppe der Komponenten umfasst Leiterplatten. Der Aufbau einer Leiterplatte besteht aus mehreren Lagen Glasfaser, Flammenschutzmitteln sowie Kupferbahnen, welche für die Schaltkreise erforderlich sind. Als Matrix für den Verbundwerkstoff dient Epoxidharz. Auf den Leiterplatten sind verschiedene Bauteile enthalten, welche die Funktionen regeln. Die Aufbereitung von Leiterplatten ist aufgrund ihrer Eigenschaften eine energieaufwendige Aufgabe. So sorgt das Epoxidharz für eine hohe Schlagfestigkeit und eine gute Wärmebeständigkeit von bis zu 500°C. Die Glasfasern ermöglichen eine hohe Zugfestigkeit. Die aktuelle Recyclingroute basiert auf thermischen und hydrometallurgischen Prozessen (Rocchetti et al. 2018). Um eine Wertmetallerhebung dieser Platinen durchzuführen sind chemische Analysen der einzelnen Komponenten erforderlich. Für eine chemische Analyse ist es notwendig, das Material weitestgehend aufzuschließen und zu homogenisieren, wozu eine zeiteffiziente Aufbereitungsrouten erforderlich ist. Im Verlauf des Projektes wurde eine Aufbereitungsmethode für Analysenzwecke entwickelt, welche nachfolgend vorgestellt wird.

Das Verfahren stellt eine Kombination aus mechanischen und thermischen Prozessschritten dar. Der Vorteil des Verfahrens besteht in der Gesamtbewertung der einzelnen Platine. Hierbei werden Materialverluste vermieden. Durch Zerkleinern, Probenteilung und Homogenisieren werden in kurzer Zeit repräsentative Proben für die chemische Analytik hergestellt. Der grundlegende Ablauf ist im Fließschema in Abbildung 3-17 dargestellt.

**Abbildung 3-18: Fließschema der Platinen Aufbereitung**



Quelle: RecTeckKA-Verbund

Im ersten Schritt werden die Platinen gewogen und mittels händischer Zerkleinerung in grobe Stücke vorgebrochen. Die Größe der Stücke beläuft sich auf 10 bis 15 mm. Große Metallanteile wie z. B. die vorderen Abdeckungen oder auch die Anschlussstellen werden während der Vorzerkleinerung aussortiert. Das vorzerkleinerte Material wird mittels einer Scheibenschwingmühle in einem Wolframcarbidgefäß gemahlen. Die Entscheidung für die Scheibenschwingmühle wurde getroffen, da die Platinen über eine weitgehend spröde Struktur verfügen. Eine Zerkleinerung in einer Kugelmühle wäre ebenfalls möglich, ist jedoch mit einem deutlich höheren Zeitaufwand und möglichen Materialverlusten, durch Anhaftungen an den Mahlkörpern, verbunden.

Nach einer Mahldauer von 5 Minuten wird das Material aus der Mühle entnommen und bei 100 µm abgesiebt. Das Überkorn wird mit neuem Material erneut in die Mühle aufgegeben. Je nach Zusammensetzung und Bauteilen beläuft sich der komplette Zeitaufwand für die Zerkleinerung pro Platine auf 30 bis 90 Minuten, dies kann durch Mahlgefäße mit einem größeren Volumen beschleunigt werden. Nach der vollständigen Zerkleinerung der Platine wird die verbleibende Menge gewogen, um eventuelle Verluste zu bestimmen. Mittels Rotationsprobenteiler wird eine Probe für den thermischen Prozess erstellt und gewogen. Die Teilung ist erforderlich, um eine möglichst hohe Anzahl an

Proben gleichzeitig thermisch zu behandeln. Das Material wird für eine Stunde bei 300°C behandelt, um flüchtige Kunststoffanteile zu entfernen. Im Anschluss wird das Material für eine Stunde bei 500°C und darauffolgend für eine Stunde bei 700°C geglüht. Hierüber kann das Epoxidharz ausgetrieben werden, ohne dass die Gefahr der Freisetzung von brennbaren Gasen besteht. Die geglühte Probe wird gewogen, um die prozentuale Masse des ausgetriebenen Kunststoffes zu bestimmen. Für eine weitere Homogenisierung wird die geglühte Probe ein weiteres Mal in der Scheibenschwingmühle homogenisiert und im Anschluss nasschemisch analysiert. Die Zerkleinerung dient dem weiteren Aufschluss des Materials und beschleunigt den nachfolgenden chemischen Löseprozess. Die Hochrechnung der Metallanteile auf die Gesamtmasse wird nach Gleichung 1 durchgeführt.

$$\frac{A[\text{ppm}]}{10.000} * \frac{G[\text{g}] - G_v[\text{g}]}{100} * \frac{1}{G[\text{g}]} * 100 * 10.000 = B[\text{ppm}] \quad \text{Gleichung 1}$$

Hierbei steht A für das Ergebnis der Analyse in ppm, G für die Gesamtmasse der Platine und G<sub>v</sub> für die Masse des Glühverlustes. Die Masse der groben Störstoffe wurde als Verlust betrachtet und stellt in erster Linie Aluminium und Stahl dar, die bei einem mechanischen Aufschluss entfernt werden können. Die Analyse wurde für die Wertmetalle Kupfer (Cu), Silber (Ag), Gold (Au) und Palladium (Pd) durchgeführt. Da eine Hochrechnung auf die einzelnen Bauteile nicht möglich ist, wurden die Bauteile in Obergruppen nach den Blöcken 1 und 2 eingeteilt und der Mittelwert der Gehalte verwendet. Dieser wurde nach Gleichung 2 berechnet.

$$\frac{\sum_1^k B[\text{ppm}]_i}{n} = B\emptyset[\text{ppm}] \quad \text{Gleichung 2}$$

Hierbei stellt B den zuvor berechneten Wertmetallgehalt der jeweiligen Platine dar. Dieser wird durch die Anzahl der Platinen, welche der Gruppe zugeordnet werden können, geteilt. Das Durchschnittsgewicht der Platinen wird nach Gleichung 3 ermittelt.

$$\frac{\sum_1^k M[\text{g}]_i}{n} = M\emptyset[\text{g}] \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Gesamtmasse der im Kraftwerk verbauten Platinen wurde für jede Obergruppe durch Gleichung 4 berechnet.

$$\frac{M\emptyset[\text{g}]}{1.000.000} * N = M\emptyset[\text{T}] \quad \text{Gleichung 4}$$

Hierbei stellt N die Anzahl der verbauten Platinen für die entsprechenden Blöcke dar. Zur Vereinfachung wird für die weiteren Berechnungen die Masse in Tonnen angegeben, da so direkt die Wertmetallgehalte in Gramm berechnet werden können wie in Gleichung 5 dargestellt.

$$B\emptyset[\text{ppm}] * M\emptyset[\text{T}] = B\emptyset[\text{g}] \quad \text{Gleichung 5}$$

Insgesamt wurden 88 Analysen zu den einzelnen Platinen durchgeführt. Von diesen konnten 82 den ermittelten Obergruppen zugeordnet werden. Die 6 nicht ermittelbaren Bauteile wurden zur Gruppe „Sonstige“ zusammengefasst. Die Anzahl wurde nach Rücksprache mit der EnBW Kernkraft GmbH



auf 5.000 geschätzt. Für die Betrachtungen der Gesamtmasse wird die Gruppe Sonstige mit aufgenommen, für die Betrachtung der Blöcke wird die Gruppe nicht mit in die Berechnungen einbezogen. Durch intensiven Austausch mit dem Kraftwerksbetreiber kann approximiert werden, dass mit den Analysen ein guter Querschnitt über das gesamte Kraftwerk getroffen wurde. Pro Obergruppe wurde ein Aufschlag von 10% aufgrund von Lagerbeständen angenommen. Nachfolgende Tabelle 3-8 stellt die berechneten Durchschnittsgehalte, Massen und Anzahlen der in Zusammenarbeit mit den Kraftwerksbetreibern ermittelten Obergruppen dar.

**Tabelle 3-8 Berechnete Gehalte der Baugruppen**

Baugruppe	Block	Masse [g]	Ag [ppm]	Au [ppm]	Cu [ppm]	Pd [ppm]
B1 1	1	228,65	228,65	155,06	104.355,18	8,38
B1 2	1	228,65	228,65	155,06	104.355,18	8,38
B1 3	1	174,35	406,59	195,54	112.103,00	21,74
B1 4	1	145,86	293,49	613,77	107.287,21	80,12
B1 5	1	440,39	430,08	123,94	137.125,00	19,47
B1 6	1	174,35	406,59	195,54	112.103,00	21,74
B1 7	1	174,34	406,59	195,53	112.103,00	21,73
B1 8	1	140,45	391,14	131,75	181.919,20	6,25
B2 1	2	228,65	228,65	155,06	104.355,18	8,38
B2 2	2	148,58	220,70	178,29	147.516,00	77,95
B2 3	2	152,88	339,56	335,44	185.350,00	46,65
B2 4	2	152,88	339,56	335,44	185.350,00	46,65
B2 5	2	145,87	293,50	613,78	107.287,22	80,13
B2 6	2	440,39	430,08	123,94	137.125,00	19,47
B2 7	2	174,35	406,59	195,54	112.103,00	21,74
B2 8	2	201,51	228,65	155,06	104.355,18	8,38
B2 9	2	140,45	391,14	131,75	181.919,20	6,25
B2 10	2	140,45	391,14	131,75	181.919,20	6,25
Sonstiges	-	149,77	325,32	233,78	149.302,59	7,63

Quelle: RecTeCKA-Verbund

Die berechneten Gesamtmetallgehalte der einzelnen Baugruppen sind in Tabelle 3-9 dargestellt.

**Tabelle 3-9 Ermittelte Gesamtmassen in Baugruppen**

Baugruppe	Anzahl	Masse [g]	Gesamtmasse [kg]	Ag [g]	Au [g]	Cu [g]	Pd [g]
B1 1	495	228,65	113,18	25,88	17,55	11.811,34	0,95
B1 2	1.650	228,65	377,27	86,26	58,50	39.371,13	3,16
B1 3	33.000	174,35	5.753,55	2339,23	1.125,00	644.971,72	125,07
B1 4	990	145,86	144,40	42,38	88,63	154.92,99	11,57
B1 5	1.100	440,39	484,43	208,34	60,03	66.427,14	9,43
B1 6	4.950	174,35	863,03	350,89	168,75	96.745,75	18,76
B1 7	770	174,34	134,24	54,58	26,25	15.049,34	2,92
B1 8	1.430	140,45	200,84	78,56	26,46	36.539,02	1,25



Baugruppe	Anzahl	Masse [g]	Gesamtmasse [kg]	Ag [g]	Au [g]	Cu [g]	Pd [g]
B2 1	8.250	228,65	1.886,36	431,33	292,50	196.855,69	15,81
B2 2	110	148,58	16,34	3,60	2,91	2.411,03	1,27
B2 3	27.500	152,88	4.204,20	1427,61	1410,28	77.9265,46	196,13
B2 4	4.950	152,88	756,75	256,96	253,85	140.267,78	35,30
B2 5	2.200	145,87	320,91	94,18	196,96	34.428,86	25,71
B2 6	1.100	440,39	484,43	208,34	60,03	66.427,13	9,43
B2 7	1.980	174,35	345,21	140,35	67,50	38.698,30	7,50
B2 8	770	201,51	155,16	35,48	24,06	16.192,70	1,30
B2 9	3.300	140,45	463,48	181,30	61,06	84.320,82	2,89
B2 10	550	140,45	77,24	30,21	10,17	14.053,47	0,48
Sonstiges	5.500	149,77	823,73	267,99	192,57	122.989,22	6,29

Quelle: RecTeckKA-Verbund

Nachfolgende Tabelle 3-10 gibt eine Übersicht über die gesamtverbauten Mengen in Block 1 und 2 sowie über die Anteile an Gold, Silber, Palladium und Kupfer. Hierzu wurden die einzelnen Obergruppen den Blöcken zugeordnet und die resultierenden Mengen aufsummiert.

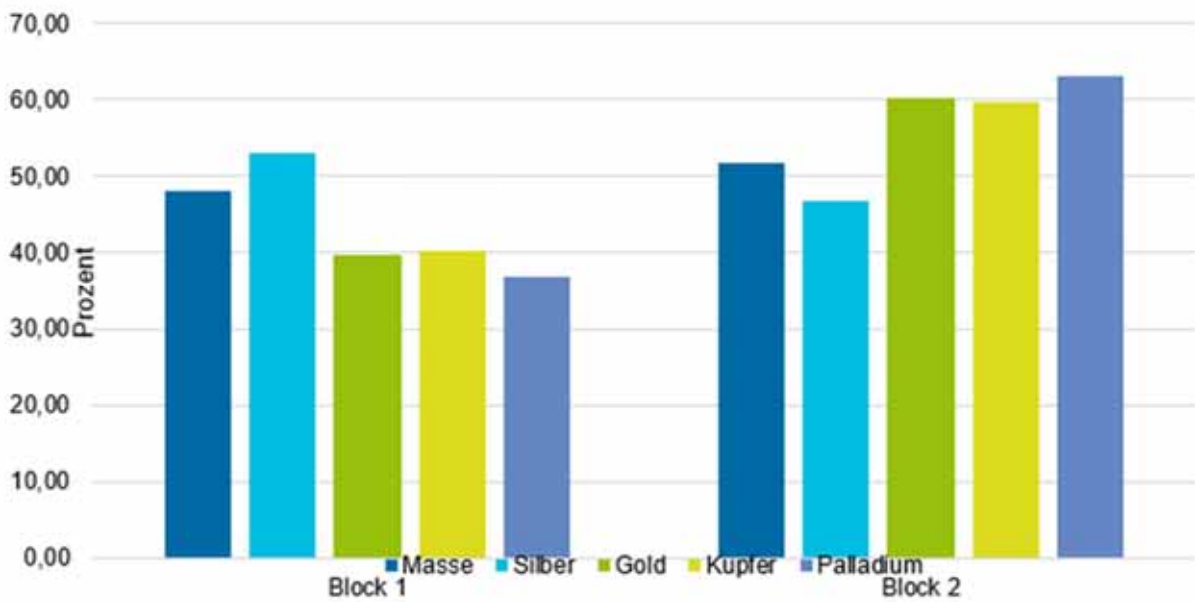
**Tabelle 3-10 Massenanteile der Baugruppen bezogen auf KKP 1 und KKP 2**

Bezeichnung	Masse [t]	Anzahl	Ag [kg]	Au [kg]	Cu [kg]	Pd [kg]
KKP 1	8,07	44.385	3,18	1,56	926,39	0,17
KKP 2	8,70	50.710	2,80	2,37	1.372,97	0,29
Sonstige (ohne Zuordnung)	0,92	5.500	0,30	0,19	136,26	0,0077
Gesamtmasse	17,69	100.595	6,28	4,13	2.435,63	0,467

Quelle: RecTeckKA-Verbund

Es wird deutlich, dass in Block 2 eine größere Gesamtmasse an Platinen vorhanden ist. Hierdurch ist auch die Ausbeute bzw. der Gehalt an Edelmetallen etwas höher. Interessant ist, dass trotz der geringeren Anzahl eine größere Masse an Silber in Block 1 zu finden ist. Dies kann dem Alter der Anlage geschuldet sein. Die prozentualen Anteile der Edelmetalle in Block 1 und Block 2 bezogen auf die Gesamtmasse sind in Abbildung 3-19 dargestellt. Die Gruppe der sonstigen Bauteile wird bei der Betrachtung ausgeschlossen, da eine genaue Zuordnung nicht möglich ist.

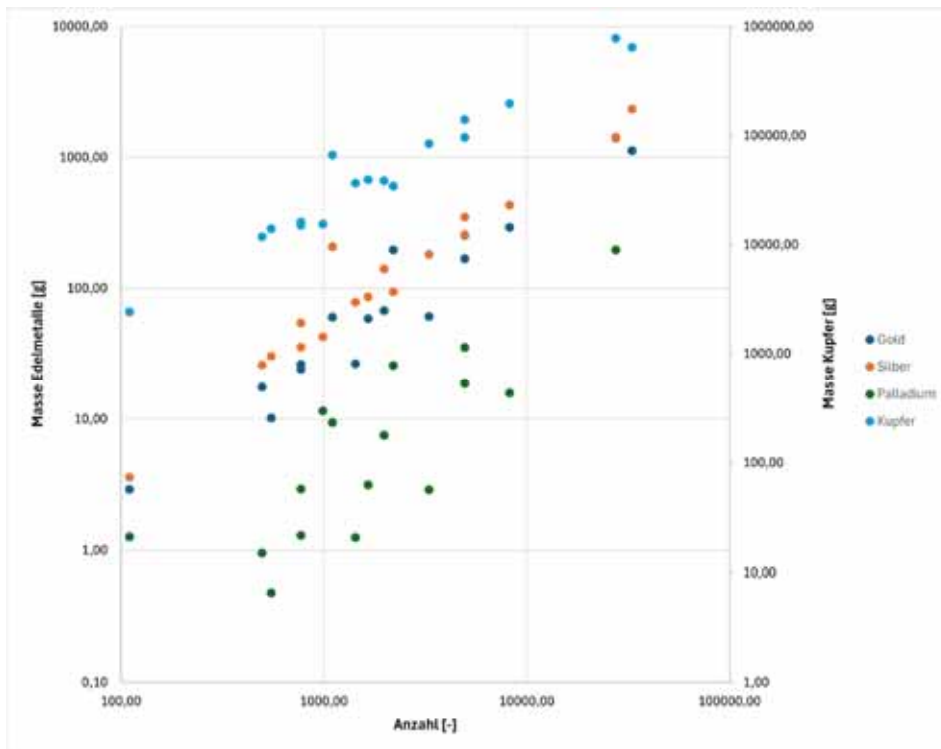
Abbildung 3-19: Prozentuale Verteilung der Massen auf die Blöcke 1 und 2 (KKP 1 und KKP 2)



Quelle: RecTeckKA-Verbund

Anhand der Tabellen kann bereits vermutet werden, dass der ausschlaggebende Faktor für die Menge an zurückgewinnbaren Edelmetallen in der Anzahl der Bauteile bzw. dem Gesamtgewicht liegt. Diese Beobachtung kann durch nachfolgende Abbildung 3-20 verdeutlicht werden. Hierbei werden die Gesamtgehalte an Metallen in Gramm der Obergruppen über die verbaute Anzahl aufgetragen. Die tatsächlichen Gehalte von einzelnen Bauteilen in den Obergruppen können jedoch abweichen, wodurch das Diagramm nur einen allgemeinen Trend widerspiegelt. Hierbei werden die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium auf der Primärachse und Kupfer auf der Sekundärachse abgebildet.

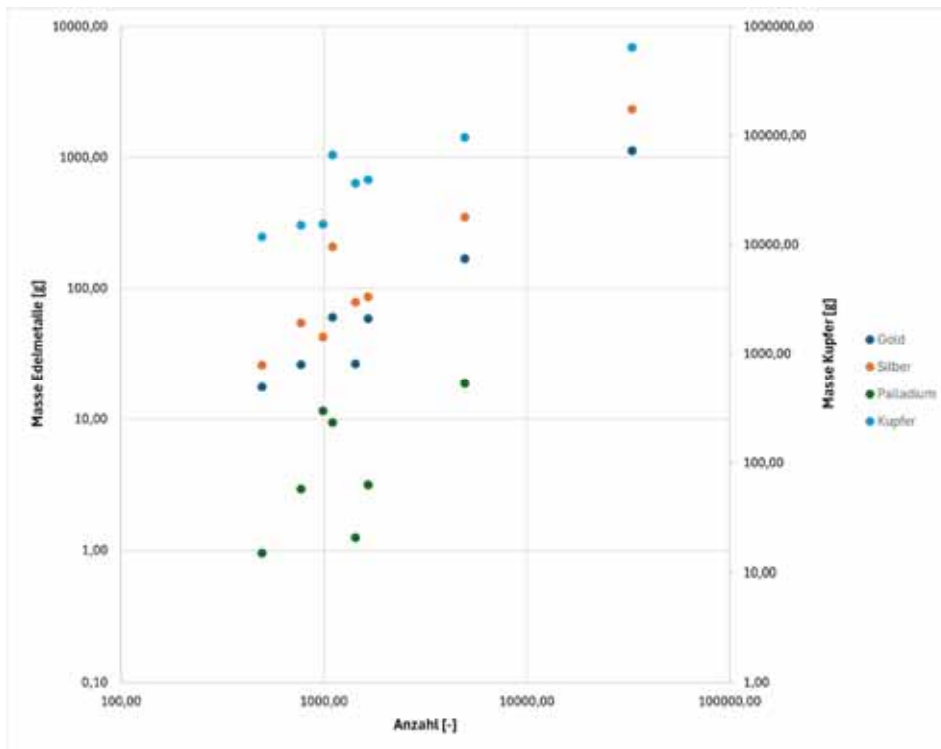
Abbildung 3-20: Metallgehalte gegen verbaute Anzahl auf das Kraftwerk gerechnet



Quelle: RecTecKA-Verbund

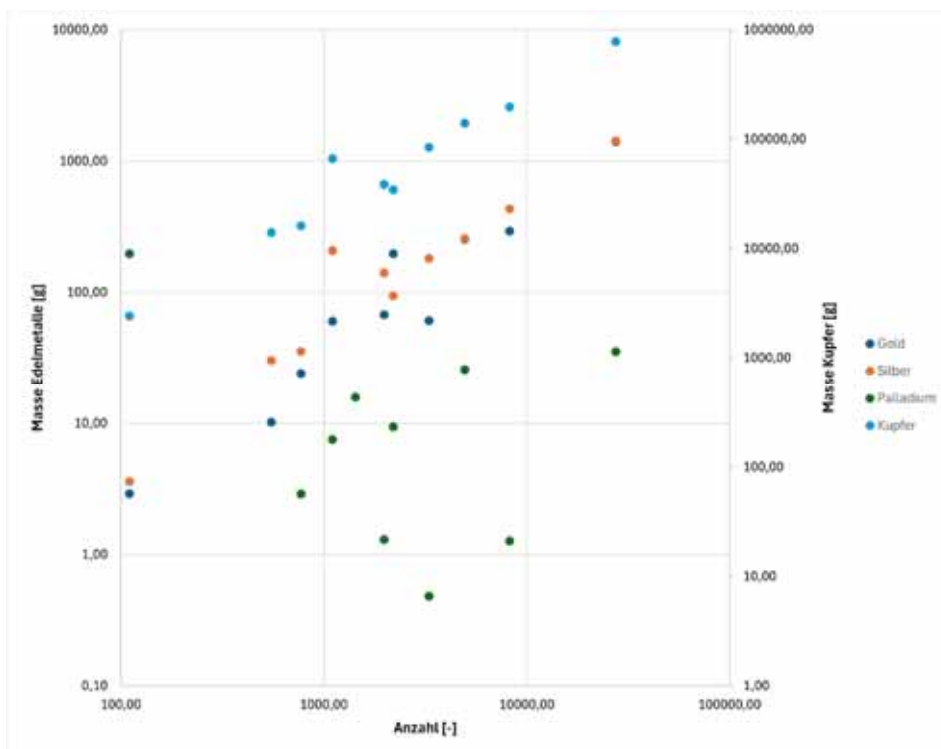
Anhand der Darstellung wird deutlich, dass die Mengen an Gold, Silber und Kupfer stark mit einer größeren verbauten Anzahl an Baugruppen ansteigen. Für einen zukünftigen Rückbau können so anhand der Anzahl der Baugruppen die erwartbaren Inhalte für das Recycling abgeschätzt werden. Palladium ist dagegen nur in geringen Mengen verbaut und wird auch bei einer hohen Anzahl von Leiterplatten nicht in wirtschaftlichen Mengen zurückgewinnbar sein. Weiterhin wird deutlich, dass zwischen den Baugruppen teilweise starke Unterschiede bestehen und somit kein linearer Trend erreicht werden kann. Besonders die Gehalte von Palladium schwanken stark. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der verstärkte Recyclingfokus auf die übrigen Metalle gelegt werden sollte. Um einen Unterschied zwischen den Bereichen von Siedewasserreaktor (KKP 1) und Druckwasserreaktor (KKP 2) zu ermöglichen, ist die entsprechende Betrachtung nachfolgend für beide Reaktortypen in Abbildung 3-21 und Abbildung 3-22 dargestellt. Hierbei werden die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium auf der Primärachse und Kupfer auf der Sekundärachse abgebildet.

Abbildung 3-21: Metallgehalte gegen verbaute Anzahl in KKP 1



Quelle: RecTeckA-Verbund

Abbildung 3-22: Metallgehalte gegen verbaute Anzahl in KKP 2

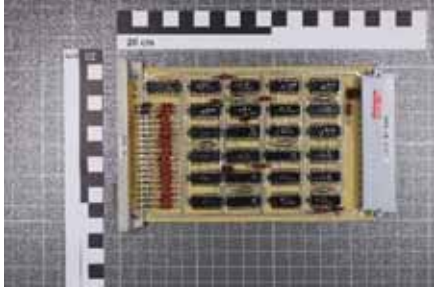

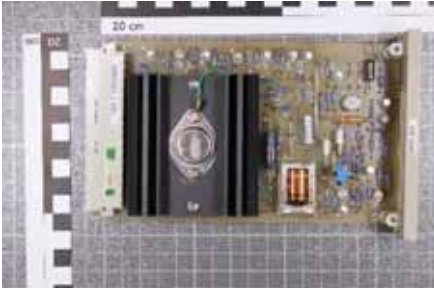


Quelle: RecTeckA-Verbund

Anhand der Abbildungen wird deutlich, dass eine bessere Korrelation ermöglicht wird, wenn beide Reaktortypen getrennt betrachtet werden. Eine annähernde Korrelation von Palladium ist jedoch nur in Block 1 festzustellen. Die maximalen Gehalte für Gold, Kupfer und Silber liegen in einer ähnlichen Größenordnung.

Eine Korrelation der erwartbaren Gehalte in einzelnen Leiterplatten von Kernkraftwerken kann anhand der Masse nicht durchgeführt werden, da die Gehalte stark abhängig von den verwendeten Bestückungen sind. Die Möglichkeit zur optischen Sortierung besteht und ist bereits Stand der Technik. Eine Erläuterung über die Kategorien ist in Tabelle 3-11 dargestellt.

**Tabelle 3-11 Erläuterung zur optischen Sortierung von Leiterplatten**

Bezeichnung	Beispielbild	Erklärung
Kategorie I		Alte Leiterplatten Viele kleine Bauteile Mikrochips
Kategorie II		Optisch hochwertiger Weniger Mikrochips Größere Bauteile
Kategorie III		Große Bauteile Sichtbare Spulen

Quelle: RecTecKA-Verbund

Eine rein optische Sortierung würde bei insgesamt 100.595 verbauten Leiterplatten einen erheblichen Zeitaufwand bedeuten. Um dies zu umgehen kann jedoch der Gesamtmittelwert der Edelmetallgehalte für die Blöcke 1 und 2 verwandt und so die verbauten Platinen nach Ihren Analysengehalten in die Kategorien eingeteilt werden. Durch ein Clustern der jeweiligen Obergruppen in nach Gehalten optimierte Kategorien kann der Zeitaufwand erheblich reduziert werden. Im Folgenden werden Möglichkeiten der Clusterung vorgeschlagen.

Die erste Möglichkeit besteht darin, alle Platinen eines Blocks gesammelt einer Kategorie zuzuweisen. Hierüber werden sowohl die Gruppen mit hohen Gehalten, aber geringer Anzahl als auch die Gruppen mit hoher Anzahl und geringen Gehalten berücksichtigt. Ein Nachteil kann darin bestehen, bei der Abgabe an Recycler wirtschaftliche Verluste zu erzielen, da Gruppen mit hoher Masse und geringen Gehalten einen erhöhten Bedarf an Reagenzien haben, um die Edelmetalle zu gewinnen. Die Daten für die Blöcke 1, 2 sowie die sonstigen Baugruppen sind in Tabelle 3-12 dargestellt.

**Tabelle 3-12 Massen und Wertmetallgehalte bei Trennung der Platinen nach KKP 1 und KKP 2**

Bezeichnung	Masse [t]	Ag [ppm]	Au [ppm]	Cu [%]	Pd [ppm]
B 1	8,07	394,05	193,30	11,48	21,06
B 2	8,70	321,84	272,41	15,78	33,33
Sonstige	0,92	326,06	206,52	14,81	8,36

Quelle: RecTeCKA-Verbund

Die Vorsortierung ist in diesem Fall mit geringem Aufwand verbunden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass der Erlös geringer ist als bei einer gesonderten Abgabe der jeweiligen Obergruppen. Als relevantester Gehalt kann der berechnete ppm-Wert für Gold angenommen werden.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, alle Leiterplatten innerhalb einer Charge abzugeben. Hierüber wird der Aufwand der Vorsortierung minimiert. Allerdings werden somit auch die Gehalte weiter gemittelt, was zu einem geringeren angenommenen Gehalt führen wird wie in Tabelle 3-13 dargestellt.

**Tabelle 3-13 Massen und Wertmetallgehalte bei gesammelter Abgabe**

Bezeichnung	Masse [t]	Ag [ppm]	Au [ppm]	Cu [%]	Pd [ppm]
B1 und B2	17,69	355,00	233,46	13,76	26,90

Quelle: RecTeCKA-Verbund

Hierbei werden die Mittelwerte über alle Blöcke betrachtet. Es wird deutlich, dass die Gehalte trotz gleicher Menge an Edelmetallen verschoben werden. Mit dieser Herangehensweise können die geringsten Kosten für die Vorsortierung erwartet werden. Die dritte Möglichkeit besteht darin, die Obergruppen nicht nach den Blöcken zu trennen, sondern anhand ihrer Gehalte zu Clustern. Hierzu werden als Obergrenze für Kategorie III 150 ppm Gold und als Obergrenze für Kategorie II 300 ppm Gold festgelegt. Tabelle 3-14 gibt eine Übersicht über den Durchschnitt der neu bestimmten Kategorien.

**Tabelle 3-14 Edelmetallgehalte bei Trennung nach Edelmetallgehalten**

Bezeichnung	Ag [ppm]	Au [ppm]	Cu [%]	Pd [ppm]	Enthaltene Obergruppen
Kategorie I	335,61	359,31	17,86	49,52	B1 4, B2 3, B2 4, B2 5
Kategorie II	356,85	188,72	11,32	17,48	B1 1, B1 2, B1 3, B1 6, B1 7, B2 1, B2 2, B2 7, B2 8, Sonst.
Kategorie III	413,20	127,30	15,65	13,72	B1 5, B1 8, B2 6, B2 10

Quelle: RecTeCKA-Verbund

Es wird deutlich, dass für die Kategorie I eine deutliche Erhöhung der Goldgehalte durch eine entsprechende Clusterung möglich ist. Auch die Gehalte für Palladium und Kupfer werden maximiert. Die Silbergehalte nehmen ab. Weniger positiv sieht die Clusterung für Gold bei den Kategorien II und III aus. Für Silber ist bei Kategorie II und III eine deutliche Steigerung des Gehalts möglich. Die Gehalte sind in Tabelle 3-15 dargestellt.

**Tabelle 3-15 Massen und Wertmetallgehalte bei Trennung nach Edelmetallgehalten**

Bezeichnung	Masse [t]	Ag [kg]	Au [kg]	Cu [kg]	Pd [kg]
Kategorie I	5,43	1,82	1,95	969,78	0,27
Kategorie II	10,47	3,73	1,97	1185,20	0,18
Kategorie III	1,71	0,70	0,21	267,61	0,02

Quelle: RecTeCKA-Verbund

Die Masse an Gold wird gleichmäßig auf die Kategorien I und II aufgeteilt. Massenmäßig liegt der größte Teil von Silber in Kategorie II. Die Massen in Kategorie III sind vernachlässigbar. Allgemein kann vermutet werden, dass eine Clusterung in Kategorien die Wertschöpfung im Rückbau leicht steigern wird. Die Möglichkeiten der Clusterung müssen dem Aufwand der Vorsortierung gegenübergestellt werden.

Die Leiterplatten stellen nicht die einzigen interessanten Komponenten aus Schaltschränken dar, machen jedoch den größten Anteil der Edelmetalle in diesen aus. Bei der Firma ELECTROCYCLING GmbH wurde eine Charge Schaltschränke auseinandergenommen und auf die enthaltenen Fraktionen mittels mechanischer Aufbereitung analysiert. Hierüber konnten die Massenprozentage der verschiedenen Fraktionen ermittelt werden, welche für die Hochrechnung auf das Kraftwerk verwendet werden können. Nach Rücksprache mit den Kraftwerksbetreibern konnte die Gesamtanzahl an Schaltschränken in KKP 1 und KKP 2 ermittelt werden. Diese belaufen sich in Block 1 auf 400 und in Block 2 auf 550. Diese Informationen ermöglichten eine Kalkulation der Zusammensetzung der Schaltschränke. Zur besseren Übersicht werden nachfolgend die Zielfraktionen anhand der enthaltenen Inhaltsstoffe erläutert und nummeriert, dargestellt in Tabelle 3-16.

**Tabelle 3-16 Im Sortierprozess erzeugte Fraktionen**

Nummerierung	Materialien
Fraktion 1	Edelstahl
Fraktion 2	Eisen
Fraktion 3	Eisen, Kupfer, Aluminium, Messing, Edelstahl
Fraktion 4	Eisen, Kupfer
Fraktion 5	Kupfer, Kunststoff, VA-Stahl, Messing, Zink
Fraktion 6	Kupfer, Aluminium, Zink, VA-Stahl, Kunststoff, Eisen, Leiterplatten
Fraktion 7	Aluminium, Kupfer, Leiterplatten, Zink, Messing, V4A-Stahl
Fraktion 8	Eisen, VA-Stahl

Quelle: RecTeCKA-Verbund

In Tabelle 3-17 ist die Schaltschrankkalkulation für Block 1 dargestellt.

**Tabelle 3-17 Schaltschrankkalkulation KKP 1**

Bezeichnung	Anteil [%]	Masse [kg]
Fraktion 1	0,38	253,33
Fraktion 2	58,19	38.792,94
Fraktion 3	0,30	199,99
Fraktion 4	0,13	86,66
Fraktion 5	3,94	2626,64
Fraktion 6	21,00	13.999,86
Fraktion 7	12,65	8.433,24
Fraktion 8	0,33	219,99
Filtergut fein Reststoff	1,31	873,32
Filtergut grob Reststoff	0,84	559,99
Produkt aus Sortierung	0,93	619,99
<b>Gesamt</b>	<b>100,00%</b>	<b>66.666</b>

Quelle: RecTecKA-Verbund

Es wird deutlich, dass der größte Anteil der Schaltschränke auf die Fe-Fraktion entfällt, dahinter kommen die Fraktionen EK VS metallreich, sowie eine Nichteisenfraktion. Die Anteile an Metallen und Kunststoffen decken sich mit den Untersuchungen im Labormaßstab. Eine analoge Betrachtung lässt sich unter der Annahme der Baugleichheit für KKP 2 durchführen. Die Baugleichheit kann angenommen werden, da die Schaltschränke für ähnliche Funktionen vorgesehen waren und die gleichen Bauteile enthalten sind. Die gesamte Masse der Schaltschränke in KKP 2 beläuft sich auf 83.3 Tonnen. Der massenmäßige Unterschied zwischen KKP 1 und KKP 2 deckt sich mit den Beobachtungen, welche bei den Leiterplatten gemacht wurden, in KKP2 ist ein höherer Prozentsatz der E- und Leittechnik enthalten. Tabelle 3-18 zeigt die Zusammensetzung der Schaltschränke in KKP 2.

**Tabelle 3-18 Schaltschrankkalkulation zu KKP 2. Anteile und absolute Mengen der erzeugten Fraktionen**

Bezeichnung	Anteil [%]	Masse [kg]
Fraktion 1	0,38	316,66
Fraktion 2	58,19	48.491,47
Fraktion 3	0,30	249,99
Fraktion 4	0,13	108,33
Fraktion 5	3,94	3.283,32
Fraktion 6	21,00	17.499,93
Fraktion 7	12,65	10.541,62
Fraktion 8	0,33	274,99
Filtergut fein Reststoff	1,31	1.091,66
Filtergut grob Reststoff	0,84	699,99
Produkt aus Sortierung	0,93	774,99
<b>Gesamt</b>	<b>100,00%</b>	<b>83.333</b>

Quelle: RecTecKA-Verbund



Für die weiteren Berechnungen, welche die Erläuterung der Fraktionen umfassen, wird das Gesamtgewicht der Schaltschränke verwendet. Dieses liegt bei etwa 150 Tonnen. Für die meisten Fraktionen können direkte Marktpreise verwendet werden. Im Nachfolgenden werden die Fraktionen beschrieben, für welche eine genauere Kalkulation erforderlich ist. Fraktion 3 umfasst neben Eisen und Kupfer auch Aluminium, Messing und Edelstahl. Tabelle 3-19 stellt die Massen dar.

**Tabelle 3-19 Zusammensetzung der Fraktion 3**

Bezeichnung	Anteil [%]	Masse [kg] (Summe aus KKP 1 und KKP 2)
Eisen	64,32	289,44
Kupfer	4,56	20,52
Aluminium	10,25	46,13
Messing	7,31	32,90
Edelstahl	13,56	61,02
<b>Gesamt</b>	<b>100,00</b>	<b>450,00</b>

Quelle: RecTecKA-Verbund

Fraktion 4 unterteilt sich – wie in Tabelle 3-20 dargestellt – auf die Gesamtmasse bezogen in 18% Kupfer und 82% Eisen.

**Tabelle 3-20 Zusammensetzung der Fraktion 4**

Bezeichnung	Anteil [%]	Masse [kg] (Summe aus KKP 1 und KKP 2)
Kupfer	18,00	35,10
Eisen	82,00	159,90
<b>Gesamt</b>	<b>100,00</b>	<b>195,00</b>

Quelle: RecTecKA-Verbund

Der erwartete Eisenschrottpreis ist in dieser Fraktion etwas geringer als in der Kalkulation der Schaltschränke, da von Verunreinigungen ausgegangen werden muss und besonders Kupfer negative Auswirkungen auf den pyrometallurgischen Recyclingprozess von Eisen haben kann. In Abbildung 3-23 ist die erzeugte Fraktion dargestellt.

**Abbildung 3-23: Bildaufnahme zur erzeugten „Fraktion 4“**



Quelle: RecTeckA-Verbund

Fraktion 5 umfasst Material, welches teilweise nicht mittels maschineller Sortiertechnik getrennt wurde, sondern mittels händischer Klaubung. Dies stellt eine Analogie zu den in den Laborversuchen bestimmten Mengen an Litzenknäueln dar. Besonders die großen Stücke in Abbildung 3-24 gut erkennbar.

**Abbildung 3-24: Bildaufnahme zur erzeugten „Fraktion 5“**



Quelle: RecTeckA-Verbund

Die Aufschlüsselung der Fraktion ist in Tabelle 3-21 gegeben. Auch diese Fraktion erfordert eine Nachzerkleinerung bzw. Nachbehandlung, um die relevanten Metalle abtrennen und recyceln zu können.

**Tabelle 3-21 Zusammensetzung der „Fraktion 5“**

Bezeichnung	Anteil [%]	Masse [kg] (Summe aus KKP 1 und KKP 2)
Kupfer	25,00	1.477,5
Kunststoff	50,00	2.955
VA	5,00	295,5
Messing	10,00	591
Zink	10,00	591
<b>Gesamt</b>	<b>100,00</b>	<b>5.910</b>

Quelle: RecTecKA-Verbund

Die nächste relevante Fraktion stellt Fraktion 6 dar. In dieser sind Kupfer, Aluminium, Zink, VA-Stahl, Kunststoff, Eisen sowie Leiterplatten enthalten. Nachfolgend ist die Zusammensetzung der Gesamtfraktion in Tabelle 3-22 dargestellt.

**Tabelle 3-22 Zusammensetzung der „Fraktion 6“**

Bezeichnung	Anteil [%]	Masse [kg] (Summe aus KKP 1 und KKP 2)
Kupfer	16,45	5.181,75
Aluminium	21,98	6.923,7
Zink	6,45	2.031,75
Va	8,56	2.696,4
Kunststoff	28,46	8.964,9
Eisen	12,23	38.52,45
Leiterplatten	5,87	1.849,05
<b>Gesamt</b>	<b>100,00</b>	<b>31.500,00</b>

Quelle: RecTecKA-Verbund

In dieser Fraktion machen die edelmetallhaltigen Leiterplatten etwa 6 Massenprozent aus. Daher kann von einer hohen Werthaltigkeit ausgegangen werden. Diese Fraktion stellt noch keine Fraktion für einen pyrometallurgischen Prozess dar. Die enthaltenen NE-Metalle würden die jeweiligen metallurgischen Prozesse behindern, dabei stellt vor allem Kupfer für das pyrometallurgische Recycling von Eisen ein Problem dar. Eine so erzeugte Fraktion durchläuft weitere Aufbereitungsschritte. Die Fraktion der Leiterplatten kann z. B. über eine Röntgenfluoreszenz gestützte Sortierung abgetrennt werden. Die Eisenfraktion kann über eine klassische Magnetscheidung abgetrennt werden, während Aluminium über eine Wirbelstromscheidung gewonnen werden kann.

Die letzte relevante Fraktion stellt Fraktion 7 dar. Hierbei handelt es sich um eine Mischung aus Nichteisenmetallen, von denen Aluminium in Abbildung 3-25 erkennbar ist, den größten Anteil ausmacht.

**Abbildung 3-25: Bildaufnahme zur erzeugten „Fraktion 7“**



Quelle: RecTeckKA-Verbund

Die Zusammensetzung der Fraktion ist in Tabelle 3-23 dargestellt. Analog zu übrigen Fraktionen kann eine Nachsortierung durchgeführt werden, um reine Fraktionen mit einem gesteigerten Verkaufspreis zu erzielen.

**Tabelle 3-23 Zusammensetzung der „Fraktion 7“**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Anteil [%]</b>	<b>Masse [kg] (Summe aus KKP 1 und KKP 2)</b>
Aluminium	70,00	13.282
Kupfer	12,00	2.277
Leiterplatten	1,10	208
Zink	6,61	1.254
Messing	8,72	1.654
V4A	1,58	300
<b>Gesamt</b>	<b>18.975,00</b>	<b>18.975</b>

Quelle: RecTeckKA-Verbund

### 3.3.4 Gesamtmengen an identifizierten werthaltigen Metallen

Abschließend sollen die ermittelten Gesamtmengen an werthaltigen Metallen, die sich aus Großkomponenten, Kabeln, E-Motoren und Komponenten der E- und Leittechnik ergeben zusammengetragen werden. Tabelle 3-24 zeigt eine Aufstellung für die Blöcke KKP 1 und KKP 2, getrennt nach werthaltigen Materialien und untersuchten Teilkomponenten der Kraftwerke.

**Tabelle 3-24 Gesamtmenngen an identifizierten werthaltigen Metallen**

Block	Großkomponenten		Kabel		Motoren und Stellantriebe		Komponenten der E- und Leittechnik	
	KKP 1	KKP 2	KKP 1	KKP 2	KKP 1	KKP 2	KKP 1	KKP 2
Kupfer und Kupferlegierungen [t]	152	272	1.195	1.822	80	121	190	253
Aluminium [t]	28	43			128	179	571	761
Titan [t]		17						
Edelstahl [t]	26	1.915					1,7	2,2
Silber [kg]							1.322	1.760
Gold [kg]							35,8	47,9
Palladium [kg]							8,94	12,0

Quelle: RecTecKA-Verbund

Kupfer und Kupferlegierungen stellen in beiden Blöcken die größte Menge dar (KKP 1: 1.617 t, KKP 2: 2.468 t). Über 70% davon sind in Kabeln zu finden. Edelstähle finden sich aufgrund der höheren Menge an kontaminationsfreien Großkomponenten in KKP 2. Die Summe beläuft sich auf 1.917 t. In KKP 1 spielen sie mit 28 t eine untergeordnete Rolle. Aluminium ist vor allem in Motoren und in Komponenten der E- und Leittechnik zu finden. In KKP 1 beträgt die Summe 727 t, in KKP 2 dagegen 983 t. Edelmetalle finden sich in Komponenten der E- und Leittechnik und hier v.a. auf Platinen. Die mengenmäßig größte Menge stellt Silber mit 1,3 t in KKP 1 und 1,8 t in KKP 2. Die Menge an Gold und Palladium fällt mit in Summe ~ 100 kg (Summe aus KKP 1 und 2) dagegen deutlich geringer aus.

## 4 Ermittlung des Materialwerts

Um die Materialwerte der ermittelten Komponenten bestimmen zu können, wurden – soweit vorhanden – Preise aus dem Volatilitätsmonitor der DERA und BGR (2024) entnommen. Da Metalle starken Preisschwankungen unterliegen wurde der 5 Jahresmittelwert<sup>8</sup> angesetzt. Es wurden die jeweiligen (Alt-)Schrottpreise angesetzt. Bei Edelmetallen waren nur Werte „ab Werk“ (in warehouse) vorhanden. Für die meisten identifizierten Edelstähle waren keine Daten vorhanden. Diese wurden über die ELECTROCYCLING GmbH ermittelt. In Tabelle 4-1 sind die angesetzten Preise angegeben. Alle Preise wurden in € pro Tonne umgerechnet. Edelmetalle waren in US-\$ angegeben. Hier wurde ein Umrechnungsfaktor von 0,898 € pro US-\$ angesetzt (5 Jahresmittelwerte<sup>8</sup>).

Bei einer abschließenden Einordnung der aus den Untersuchungen resultierenden Materialwerte ist jedoch immer im Hinterkopf zu behalten, dass hierbei größere Spannweiten erwartet werden müssen und die nachfolgend ausgewiesenen Materialwerte lediglich einen groben Anhalt über die erwartbare Größenordnung vermitteln sollen. Selbstverständlich wären für eine konkrete Bewertung im Rahmen des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage entsprechend weitergehende Ermittlungen vorzunehmen.

**Tabelle 4-1 Angesetzte Preise für die identifizierten Materialströme**

Kategorie	Metall	Kommentar/Bezeichnung	Preis [€/t]
Kupfer und Kupferlegierungen	Kupfer, <95%	Rotgusschrott (Radar)	5.349
	Kupfer, hochrein	Kupferschrott (Kasus)	6.555
	Kupfernickel (Cu90Ni10)	Kupfernickelschrott	6.113
	Messing	Messingschrott (Milbe)	3.766
Weitere Basismetalle	Titan	Konservative Schätzung <sup>a</sup>	9.000
	Aluminium	Aluminiumprofilschrott (Alter)	1.893
	Zink	Zinkschrott (Zebra)	1.681
Edelstähle	Edelstahl 1.3818	Edelstahlschrott	1.900
	Edelstahl 1.4002		1.900
	Edelstahl 1.4008		1.900
	Edelstahl 1.4021		1.900
	Edelstahl 1.4313		2.300
	Edelstahl 1.4317		2.300
	Edelstahl 1.4435		2.600
	Edelstahl 1.4462		2.300
	Edelstahl 1.4541		1.900
	Edelstahl 1.4550		1.900
	Edelstahl 1.4552		1.900
	Edelstahl 1.4571		2.400
	Edelstahl 1.4910		2.600
	Edelstahlschrott (aus Schaltschrankaufbereitung)		Stahlschrott (V2A)
	Edelstahlschrott (aus Schaltschrankaufbereitung)	Stahlschrott (V4A)	1.805

<sup>8</sup> Januar 2019-Dezember 2023



Kategorie	Metall	Kommentar/Bezeichnung	Preis [€/t]
	Stahl, niedriglegiert	Stahlaltschrott	277
Edelme- talle	Silber	in warehouse	653.624
	Gold	in warehouse	53.190.959
	Palladium	in warehouse	58.557.397

a) zum Vergleich: TITAN: Ferrotitanium 65 % Ti min, Al 5 % max, FCA Lagerhaus Europa = 6.000 €/t

Quelle: TecTecKA-Verbund

## 4.1 Groß-Komponenten

Die in Kapitel 3.1 erhobenen Mengen an werthaltigen Materialien in Großkomponenten werden nun in Materialwerte überführt. Hierzu wird wie in Kapitel 3.1 zunächst mit KKP 2 begonnen. Der Abnahmepreis fällt im Vergleich zum Materialwert etwas niedriger aus. Hier kann von einem Abschlag von rund 100 € ausgegangen werden. Der Abnahmepreis wird nachfolgend allerdings nicht separat ausgewiesen.

### 4.1.1 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 2 (KKP 2)

Für die in Kapitel 3.1.13 identifizierten werthaltigen Materialien der Großkomponenten von KKP 2 und KKP 1 wird im folgenden Kapitel, basierend auf den in Tabelle 4-1 angesetzten Preisen, der intrinsische Materialwert bestimmt. Abbildung 4-1 zeigt den intrinsischen Materialwert der Großkomponenten des Sicherheitssystems von KKP 2. Der Gesamtwert der verschiedenen Edelstähle liegt bei 312.086 €.

Abbildung 4-1: Wert der Materialien der Großkomponenten im Sicherheitssystem KKP 2

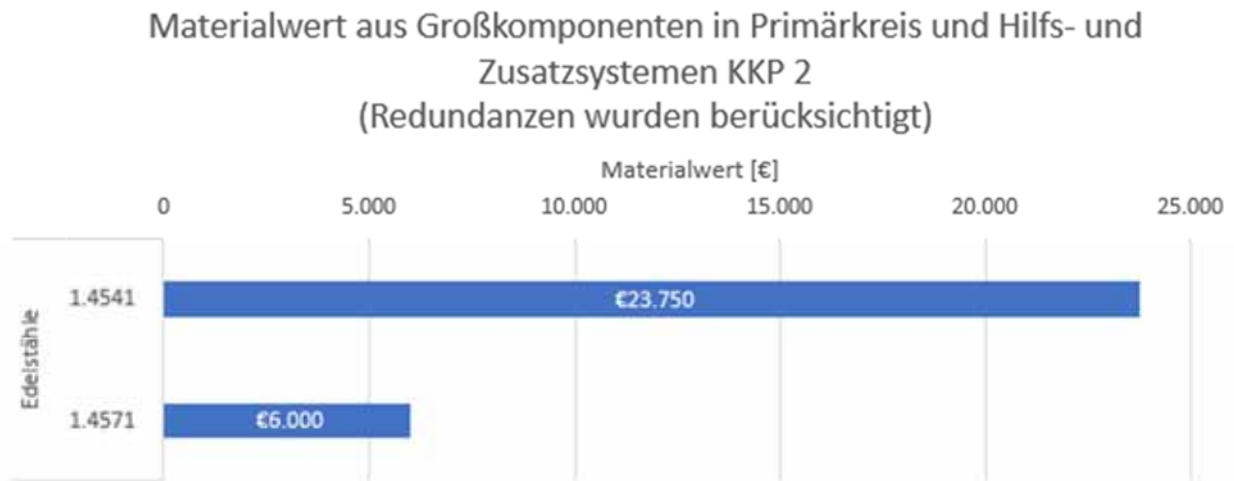


Quelle: TecTecKA-Verbund

Der Materialwert der Großkomponenten im Primärkreis und den Hilfs- und Zusatzsystemen von KKP 2 ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Der intrinsische Materialwert der zwei identifizierten Edel-

stähle mit den Werkstoffnummern 1.4541 und 1.4571 liegt bei 1.900 € bzw. 2.400 € pro Tonne Edelstahlschrott. Der Gesamtwert der werthaltigen Materialien im Primärkreis und den Hilfs- und Zusatzsystemen liegt bei 29.750 €.

**Abbildung 4-2: Wert der Materialien der Großkomponenten im Primärkreis und Hilfs- und Zusatzsysteme von KKP 2**

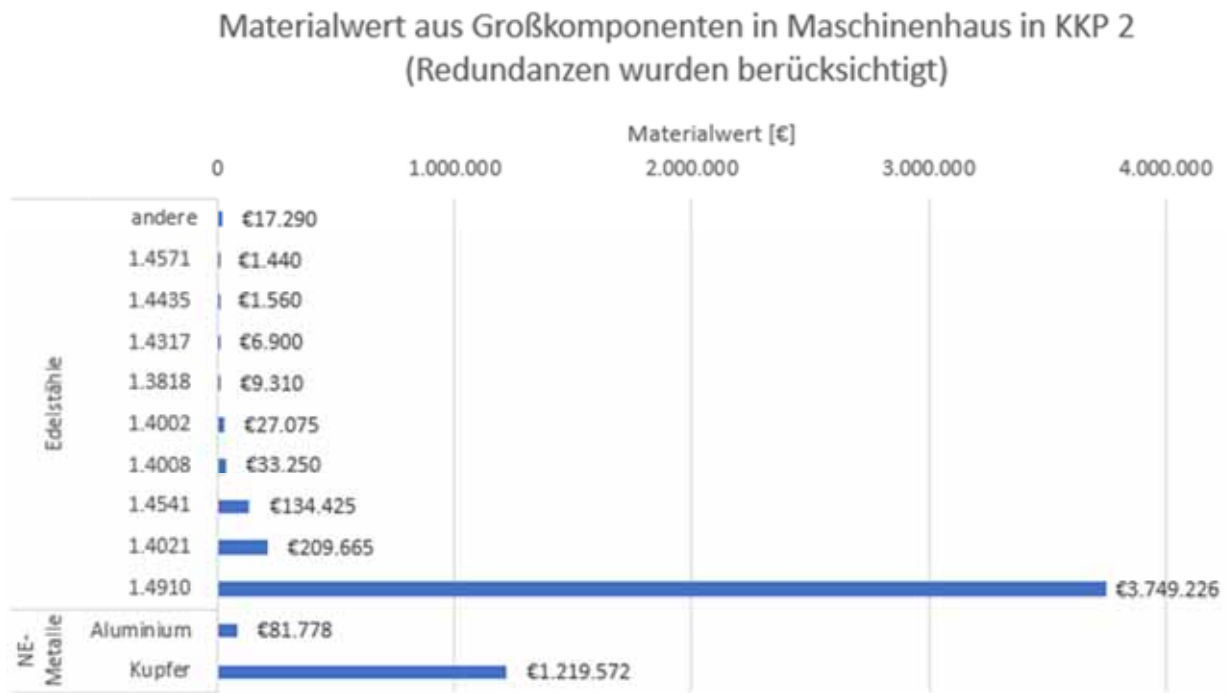


Quelle: TecTeCKA-Verbund

Abbildung 4-3 zeigt den intrinsischen Materialwert der Großkomponenten aus dem Maschinenhaus von KKP 2. Im Maschinenhaus finden sich viele unterschiedliche Edelstähle, den größten Gesamtwert hat dabei der Werkstoff 1.4910 (2.600 €/t) mit 3.749.226 €. Der Schrott aller Edelstähle zusammen hat einen Gesamtwert von 4.190.141 €. Im Maschinenhaus wurden zusätzlich die Nichteisenmetalle Aluminium (1.839 €/t) und Kupfer (5.349 €/t) mit einem Gesamtwert von 81.778 € bzw. 1.219.572 € identifiziert. Insgesamt ergibt sich ein intrinsischer Materialwert von 5.491.491 € für das Maschinenhaus von KKP 2.



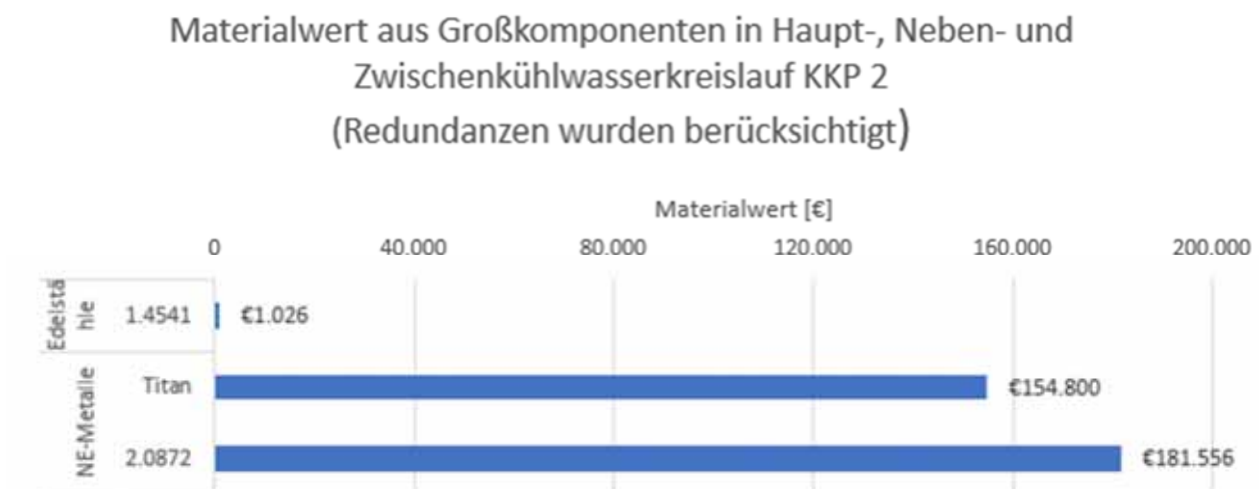
**Abbildung 4-3: Wert der Materialien der Großkomponenten im Maschinenhaus in KKP 2**



Quelle: TecTecKA-Verbund

Der Materialwert der Großkomponenten in Haupt-, Neben- und Zwischenkühlwasserkreislauf von KKP 2 ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Nichteisenmetalle machen den größten Wert aus, Titan (9.000 €/t) mit einem Gesamtwert von 154.800 € und Kupfernickel (6.113 €/t) mit der Werkstoffnummer 2.0872 und einem Gesamtwert von 181.556 €. Der Gesamtwert der Materialien aus Haupt-, Neben- und Zwischenkühlwasserkreislauf in KKP 2 liegt bei 337.382 €.

**Abbildung 4-4: Wert der Materialien der Großkomponenten im Haupt-, Neben- und Zwischenkühlwasserkreislauf in KKP 2**



Quelle: TecTecKA-Verbund

Der Materialwert aus Großkomponenten der Notstromerzeugung, des Notspeisesystems und der Kaltwasserzentrale in KKP 2 ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Insgesamt wurden vier unterschiedliche Edelstähle identifiziert mit einem Gesamtwert von 164.858 € sowie Kupfer mit einem Schrottwert von 217.683 €. Insgesamt beläuft sich der intrinsische Materialwert der Notstromerzeugung, des Notspeisesystems und der Kaltwasserzentrale in KKP 2 auf 382.541 €.

**Abbildung 4-5: Wert der Materialien der Großkomponenten im Notstromerzeugung, Notspeisesysteme und Kaltwasserzentrale von KKP 2**



Quelle: TecTecKA-Verbund

#### 4.1.2 Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1 (KKP 1)

Für KKP 1 ist der Materialwert der identifizierten Materialien aus Großkomponenten für alle Großkomponenten in Abbildung 4-6 dargestellt. Der Gesamtwert des Edelstahlschrotts beläuft sich auf 58.678 €. Zusätzlich wurden in KKP 1 die Nichteisenmetalle Aluminium (1.839 €/t) und Kupfer (5.349 €/t) mit einem Gesamtwert von 51.913 € bzw. 811.743 € identifiziert. Folglich liegt der Gesamtwert der Materialien in KKP 1 bei 922.334 €.

**Abbildung 4-6: Wert der Materialien der Großkomponenten aller Systeme in KKP 1**



Quelle: TecTeckKA-Verbund

## 4.2 Kabel, E-Motoren und Stellantrieben

Nachfolgend werden Materialwerte und Abnahmepreise für Kabel, Motoren und Stellantriebe ausgewiesen. Hierbei muss beachtet werden, dass aufgrund der Kosten des Recyclings unterschiedliche Werte für die enthaltenen Materialien und den Abnahmepreis angenommen werden müssen. Der reine Materialwert wird anhand von Börsenpreisen ermittelt, während der Abnahmepreis auf Erfahrungswerten von ELECTROCYCLING GmbH basiert. In diesen sind bereits die Kosten für Transport und Aufbereitung enthalten.

### Kabel

Aufgrund des hohen Kupfergehaltes von Industriekabeln kann von einer hohen Wirtschaftlichkeit beim Recycling ausgegangen werden. Der Materialwert der betrachteten Kupferkabel wurde mit 5.244 €/t Kabel bestimmt. Für den Abnahmepreis kann mit 4.990 €/t kalkuliert werden. Nachfolgende Abbildung 4-7 stellt die Materialwerte für KKP 1 und KKP 2 gegenüber.

Abbildung 4-7: Materialwerte und Abnahmepreise Kabel



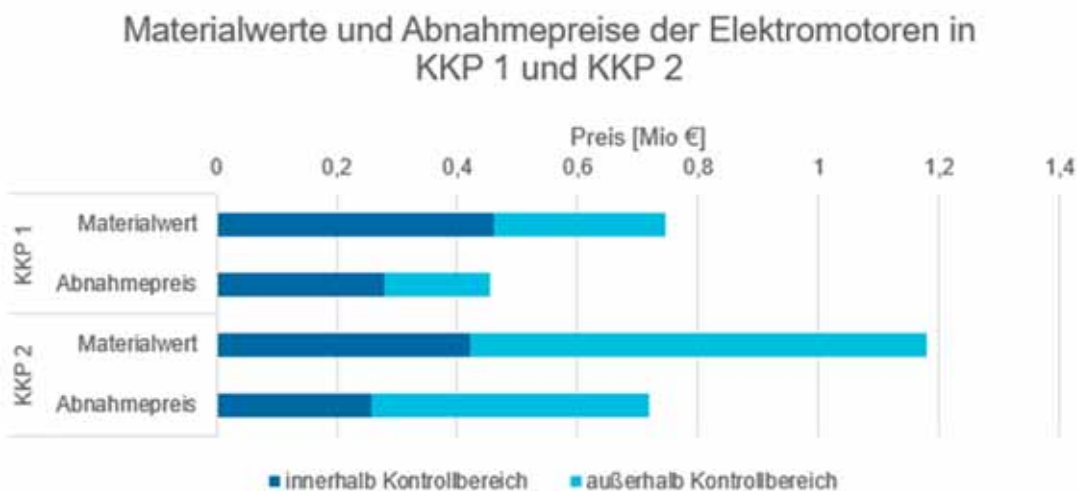
Quelle: TecTeCKA-Verbund

Insgesamt kann für KKP 1 für die Summe aller Kabel etwa mit einem Abnahmepreis von 7 Mio. € gerechnet werden. Bei KKP 2 sind es etwas über 11 Mio. €.

**Elektromotoren und Stellantriebe**

Aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung müssen Elektromotoren und Stellantriebe bei der wirtschaftlichen Betrachtung separat voneinander betrachtet werden. Für Elektromotoren kann ein Materialwert von 1.721,00 €/t angenommen werden. Aufgrund eines hohen Aufwands bei der Aufbereitung liegt der tatsächliche Abnahmepreis mit 1.048 €/t deutlich darunter. Der etwas geringere Materialwert in Verbindung mit deutlich geringeren verbauten Mengen resultiert in einem stark verringerten Gesamtwert, wie in Abbildung 4-8 deutlich wird.

Abbildung 4-8: Materialwerte und Abnahmepreise Elektromotoren



Quelle: TecTeCKA-Verbund

Bei beiden Kraftwerken ist prozentual eine deutlich höhere Menge innerhalb des Kontrollbereichs verbaut. In Verbindung mit einer starken Reduzierung des Abnahmepreises wird deutlich, dass Motoren eine vergleichsweise geringe Wirtschaftlichkeit mit sich bringen. Der Gesamtwert aller Motoren der beiden Blöcke summiert sich auf etwas über 1 Million €.

Stellantriebe haben im Vergleich zu Elektromotoren einem geringeren Anteil an werthaltigen Metallen (Kupfer, Aluminium). Dadurch beläuft sich der Materialwert lediglich auf 914 €/t. Eine vergleichbar aufwendige Aufbereitung in Verbindung mit einem geringen Anteil an Wertmetallen resultiert in einem Abnahmepreis von nur 322 €/t. Abbildung 4-9 stellt die erzielbaren Preise gegenüber. In Summe kann für beide Blöcke ein Abnahmepreis von etwa 70.000 € für alle Stellantriebe erwartet werden.

**Abbildung 4-9: Materialwerte und Abnahmepreise Stellantriebe**



Quelle: TecTeckKA-Verbund

### 4.3 Komponenten der E- und Leittechnik

Analog zu Abbildung 3-2 werden bei der ökonomischen Bewertung die verschiedenen Komponenten separat bewertet. Auch hier wird der reine Materialwert anhand der in Kapitel 4 eingangs aufgeführten Börsenpreise ermittelt. Der Abnahmepreis wurde auf Grundlage von Erfahrungswerten durch die ELECTROCYCLING GmbH abgeschätzt.

#### Elektrobauteile

Als mengenmäßig größte Gruppe kann vermutet werden, dass die Elektrobauteile auch finanziell den größten Anteil ausmachen. Für den Materialwert kann ein Preis von 2.161 €/t angenommen werden, während der Abnahmepreis mit 1.831 €/t etwas darunter liegt. Abbildung 4-10 stellt die Werte für die Blöcke 1 und 2 gegenüber.

Abbildung 4-10: Materialwerte und Abnahmepreise für Elektrische Bauteile



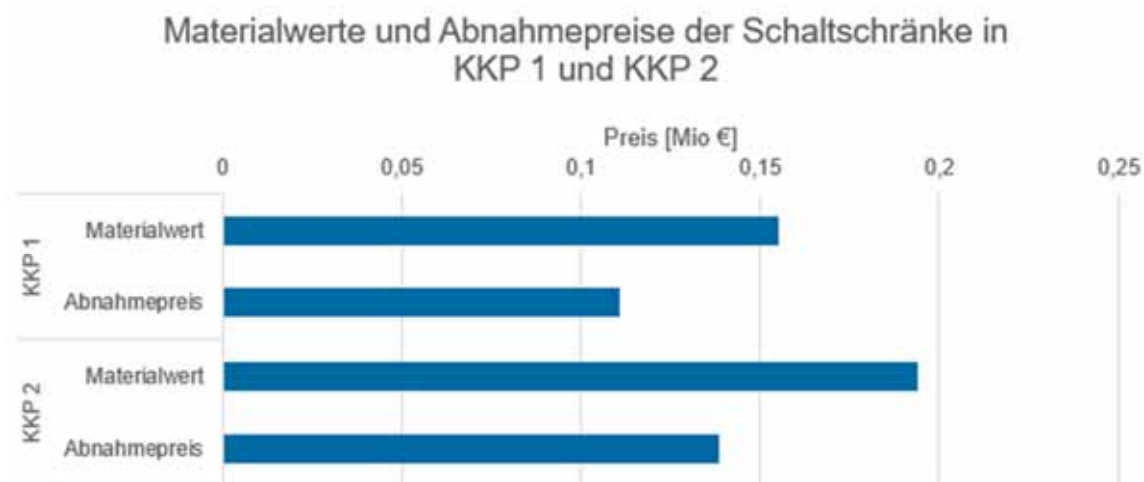
Quelle: TecTeckKA-Verbund

Es wird deutlich, dass Komponenten im Kontrollbereich für den wirtschaftlichen Ertrag eine untergeordnete Rolle spielen. Insgesamt kann für KKP 1 ein Abnahmepreis von etwa 4 Millionen € angenommen werden. Für KKP 2 liegt dieser aufgrund der erhöhten Menge etwas höher bei rund 5,5 Millionen Euro. Somit ergibt sich ein erwartbarer Gesamtabnahmepreis von etwa 9,5 Millionen €.

**Schaltschränke und Platinen**

Schaltschränke und Platinen stellen mengenmäßig einen geringen Anteil dar. Trotz der enthaltenen Edelmetalle kann davon ausgegangen werden, dass der Beitrag zum Rückbau finanziell eher untergeordneter Natur ist. Der reine Materialwert kann auf etwa 2.331 €/t festgelegt werden, während der Abnahmepreis mit 1.661 €/t deutlich geringer ist. Die resultierenden Preise sind in Abbildung 4-11 dargestellt.

Abbildung 4-11: Materialwerte und Abnahmepreise Schaltschränke



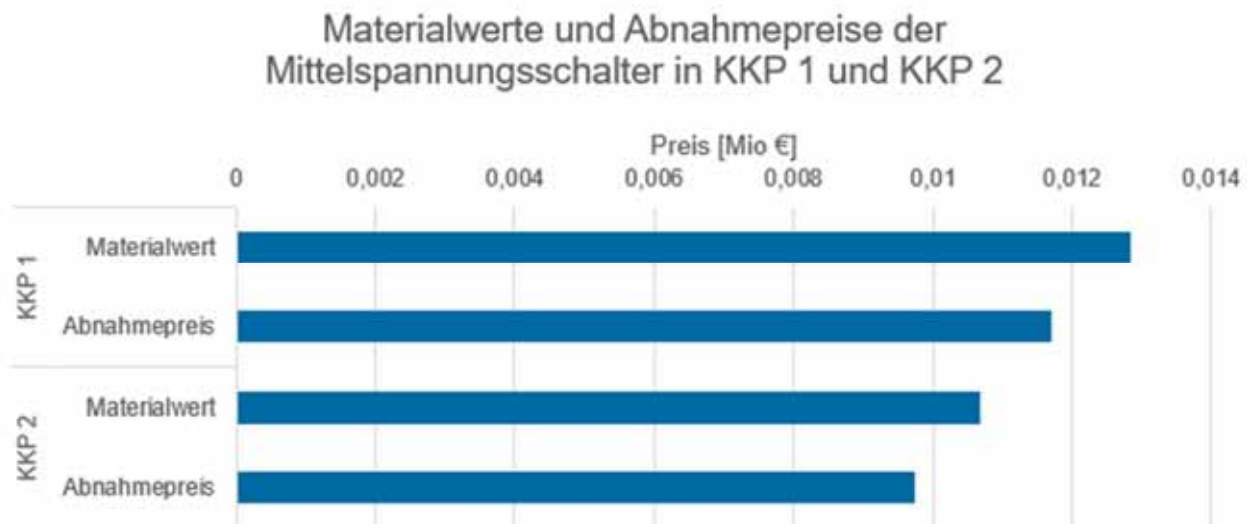
Quelle: TecTeckKA-Verbund

Der gesamte Materialwert beider Blöcke liegt bei etwas unter 400.000 €. Hierbei wurde eine gesonderte Entnahme der Platinen aufgrund des geringen Wertes nicht berücksichtigt. Bei einer Entnahme kann ein höheres Ergebnis erzielt werden, dieses steht jedoch nicht im Verhältnis zu dem erforderlichen Aufwand. Der gesamte Abnahmepreis liegt bei etwas über 250.000 €.

### Mittelspannungsschalter

Die im Kraftwerk enthaltenen Mittelspannungsschalter (Gießharzschalter) machen mengenmäßig mit 51 Tonnen den geringsten Anteil aus. Da neben den versilberten Kontakten primär Eisen verbaut ist, liegt der reine Materialwert bei 456 €/t, während der Abnahmepreis bei 415 €/t liegt. Die geringe Differenz kann durch die unproblematische Demontage der Kontakte erklärt werden. Die erzielbaren Preise sind in Abbildung 4-12 dargestellt.

**Abbildung 4-12: Materialwerte und Abnahmepreise Gießharzschalter**



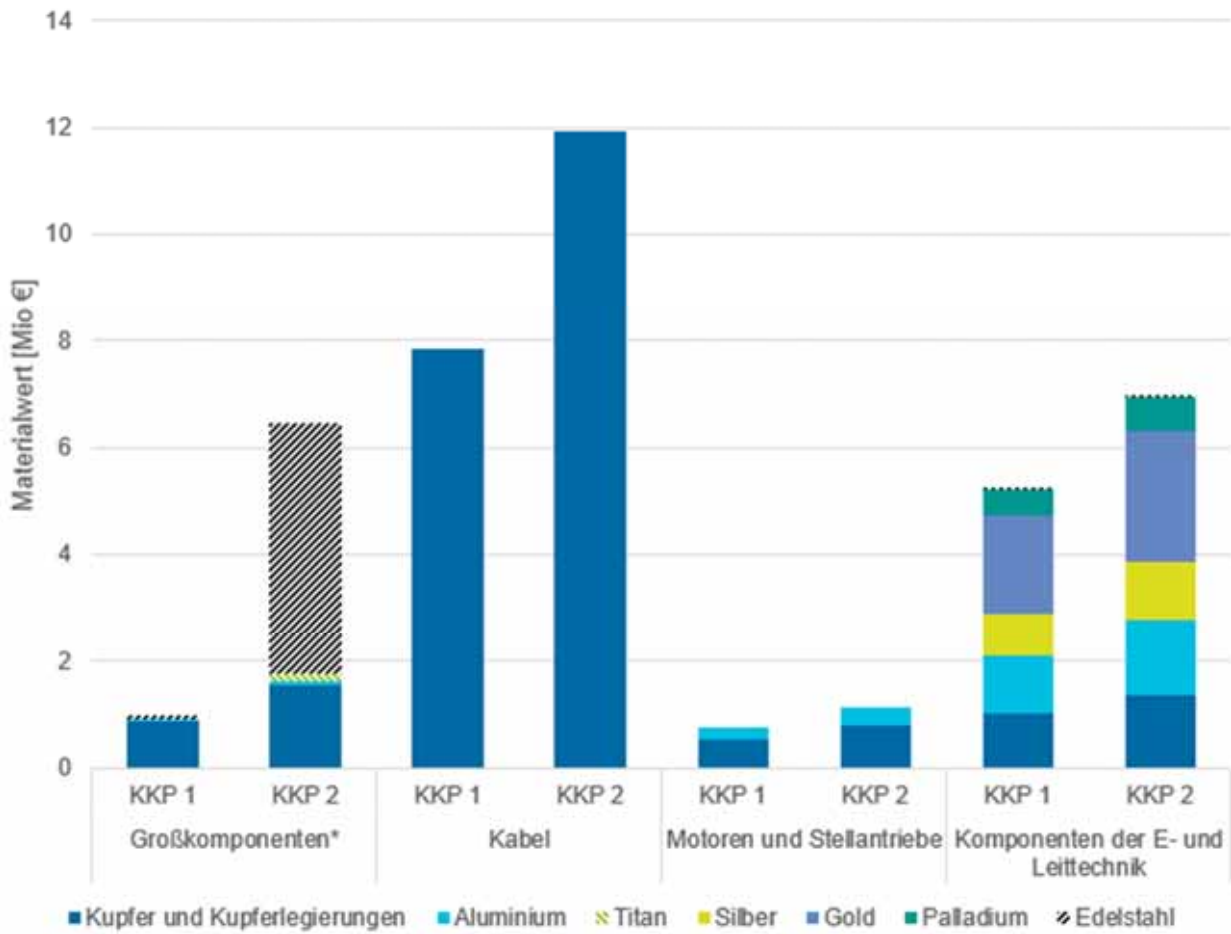
Quelle: TecTecKA-Verbund

In KKP 1 liegt der reine Materialwert bei etwas über 12.000 €, in KKP 2 bei 11.000 €. Der gesamt-erzielbare Abnahmewert liegt in der Summe bei etwa 20.000 €.

## 4.4 Zusammenfassung der Materialwerte für die Kraftwerke KKP 1 und KKP 2

Abschließend sollen die Materialwerte über alle in KKP 1 und KKP 2 identifizierten werthaltigen Komponenten zusammengefasst werden. In Abbildung 4-13 werden getrennt nach Großkomponenten, Kabeln, Motoren und Stellantrieben sowie Komponenten der E- und Leittechnik die werthaltigen Materialien mit jeweiligen kumulierten Materialwerten gezeigt. Niedriglegierte Stähle bzw. deren Materialwerte zählen nicht zu den werthaltigen Materialien und sind daher nicht in der Darstellung aufgenommen.

Abbildung 4-13: Materialwerte der identifizierten Komponenten



Quelle: TecTeCKA-Verbund

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

- 69% auf Kupfer und Kupferlegierungen
- 12% Gold
- 9% Aluminium
- 6% Silber
- 3% Palladium und
- 0,4% Edelstähle

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

- 59% auf Kupfer und Kupferlegierungen



- 18% Edelstähle
- 9% Gold
- 7% Aluminium
- 4% Silber
- 3% Palladium und
- 1% Titan

Die deutlich höheren Materialwerte in KKP 2 im Vergleich zu KKP 1 ergeben sich insbesondere durch die höhere Menge an Komponenten, die 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 Kabel, Motoren, Stellantrieben und elektronischen Bauteilen verwendet werden. Unterschiede ergeben sich aber auch immer durch den Reaktorbautypen. So ist auch festzuhalten, dass auch innerhalb von Siede- bzw. Druckwasserreaktoren je nach Baureihe unterschiedliche Materialien und Materialmengen zu inventarisieren sind.

## 5 Ökobilanzierung

Die Ökobilanz wurde nach den Normen ISO 14040 und ISO 14044 durchgeführt und zeigt die charakteristische Struktur einer Ökobilanz, die nach Norm einzuhalten ist. Daher wurde die Ökobilanz zum Recycling von werthaltigen Metallen aus kerntechnischen Anlagen in den Anhang 1 ausgelagert. An dieser Stelle sollen die Ziele und Ergebnisse der Ökobilanz kurz zusammengefasst werden.

### Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz

Bei der Ökobilanz handelt es sich um eine Abfallbilanz. Sie wurde als attributive Bilanz durchgeführt. Im Fokus der Ökobilanz steht die Rückgewinnung werthaltiger Metalle aus kerntechnischen Anlagen. Ziel der Studie ist es, die Lasten und Gutschriften der Rückgewinnung dieser Metalle zu inventarisieren und in ausgewählte ökologische Wirkungen zu übersetzen.

Innerhalb der Ökobilanz werden zunächst sämtliche Aufwendungen, die mit der Rückgewinnung der Metalle einhergehen, ermittelt. Diesen Lasten werden der vermiedenen Primärproduktion der entsprechenden Metalle gegenübergestellt. Dadurch wird nach der sog. Substitutionsmethode das maximale Recyclingpotential ökobilanziell quantifiziert.

Für die Bilanzierung wurden im Rahmen des Gesamtvorhabens RecTecKA der Block 1 des Kernkraftwerks Philippsburg (KKP 1) als Repräsentant für einen Siedewasserreaktor und der Block 2 des Kernkraftwerks Philippsburg (KKP 2) als Repräsentant für einen Druckwasserreaktor erfasst.

Untersucht wurden hierzu

- - Großkomponenten
- - Kabel, Elektromotoren (kurz: E-Motoren) und Stellantriebe
- - Komponenten der E- und Leittechnik

### Sachbilanz

Die Bilanz greift auf die unter Kapitel 3 ermittelten Materialdaten zurück. Energieverbrauchsdaten zur Zerlegung von Großkomponenten konnten über den spezifischen Arbeitseinsatz EnBW Kernkraft GmbH abgedeckt werden. Energieverbräuche für die Zerlegung von E-Motoren und Stellantriebe wurden über die ELECTROCYCLING GmbH bestimmt. Ebenso wurden auch Energieverbräuche für die mechanische Aufbereitung über die ELECTROCYCLING GmbH quantifiziert.

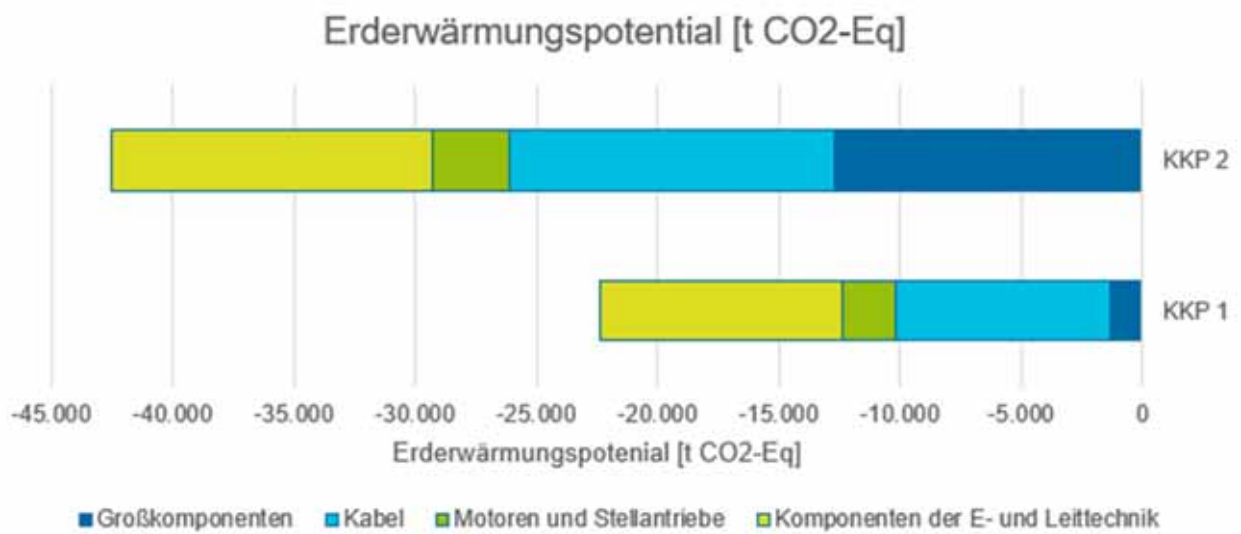
Daten zu weiteren Aufbereitungsschritten (insb. metallurgische Prozessschritte) entlang der Recyclingkette wurden über generische Datensätze aus der ecoinvent-Datenbank abgeleitet bzw. teilweise um Literaturdaten ergänzt. Auch zur Abbildung der Primärroute der entsprechenden Metalle wurden ecoinvent-Datensätze herangezogen. Falls nicht anders möglich, werden qualifizierte Schätzungen oder eigene Modellierungen durchgeführt, um unbekannte Parameter zu bilanzieren.

### Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Ökobilanz verdeutlichen die Vorteilhaftigkeit des Recyclings von werthaltigen Metallen. Gegenüber der Gewinnung von Metallen über die Primärroute zeigt das Recycling um > 90 % geringere Lasten. Das trifft auf alle ausgewerteten Wirkungskategorien zu.

Exemplarisch werden nachstehend die Ergebnisse der Wirkungskategorie Erderwärmungspotential gezeigt. Durch das Recycling von werthaltigen Metallen können in KKP 1 > 20.000 t CO<sub>2</sub>-Eq eingespart werden, in KKP 2 sind es >40.000 t CO<sub>2</sub>-Eq. Abbildung 5-1 zeigt, dass ein Großteil der Einsparungen auf das Recycling von Kabeln und Komponenten der E- und Leittechnik (insb. elektrische Einrichtungen) zurückgeht. Motoren und Stellantriebe sind von eher untergeordneter Bedeutung. Für KKP 1 ergibt sich für Großkomponenten ein deutlich geringeres Einsparpotential im Vergleich zu KKP 2. Dies ist auf die geringere Menge an Großkomponenten zurückzuführen, die potenziell freigegeben werden können.

**Abbildung 5-1: Einsparpotentiale von Treibhausgasen durch das Recycling von werthaltigen Metallen in kerntechnischen Anlagen**



Quelle: TecTeckKA-Verbund

## 6 Herausgabe- und Freigabeprozesse- Hemmnisse und Optimierung

Im Forschungsvorhaben RecTecKA werden neben der Herausgabe auch solche Anlagenteile aus dem Rückbau von Kernkraftwerken betrachtet, die spezifisch oder uneingeschränkt freigegeben werden können (s. Kapitel 1.1.3 und 1.1.4). Es wird diskutiert, inwiefern die Freigabe eine aussichtsreiche Option für das Metallrecycling darstellt. Die uneingeschränkte Freigabe setzt voraus, dass die Metalle dieser Anlagenteile entweder sehr geringfügig bzw. nur oberflächlich kontaminiert waren und eine Dekontamination ohne erheblichen Aufwand (z. B. verfahrenstechnisch) erfolgen kann. Die spezifische Freigabe im Zusammenhang mit der Metallschmelze wird ebenfalls erwähnt („Metallschrott zur Rezyklierung“), da auch dieser Freigabepfad von Bedeutung sein kann. Die Rückbaupraxis zeigt, dass eine hohe Recyclingquote erreicht wird, da die Entsorgung als nuklearer Abfall stets die kostenintensivste Entsorgungsart ist.

### 6.1 Untersuchung möglicher Hemmnisse bei der Freigabe

In diesem Kapitel sollen allgemeine Hemmnisse beim Metallrecycling, die sich auf Unsicherheiten bei der Freigabe zurückführen lassen, identifiziert werden. Als allgemeine Hemmnisse bei der Freigabe wurden gemeinsam mit dem Projektpartner EnBW Kernkraft GmbH folgende Aspekte herausgearbeitet: Technische Aspekte der Freigabe, öffentliche Wahrnehmung sowie der formelle Ablauf der Freigabe.

#### 6.1.1 Technische Aspekte der Freigabe und damit verbundene Hemmnisse

- **Informationen über verbaute Materialien und deren Mengen:** Für das Recycling von Metallen ist bei der Rückbauplanung nicht immer unmittelbar bekannt, welche Materialien in den einzelnen Anlagenteilen verbaut wurden und an welcher Stelle in der Anlage die für ein Metallrecycling interessanten Anlagenteile verortet sind. Außerdem fehlt die systematische Zusammenstellung von Informationen über ggf. vorhandene - meist höherwertige - Plattierungen (ggf. Edelmetalle), die für das Recycling ein Trennen der Materialien erfordert. Diese muss speziell für diesen Zweck zuvor erstellt werden. Mögliche Informationslücken können durch Unterlagen und Wissen von Know-How-Trägern geschlossen werden. Es kann vorkommen, dass vereinzelt Lücken nicht geschlossen werden können. In solchen Fällen sind Analysen und Probenahmen möglich.
- **Faktor Zeit:** Bei der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen gibt es viele Faktoren, die die zeitliche Planung bis zur endgültigen Entsorgung der Materialien beeinflussen. Stufenweise Stilllegungsmaßnahmen zur Trennung von Materialien, die für das Recycling oder die Wiederverwendung geeignet sind, können die Zeitspanne bis zur endgültigen Beseitigung beeinflussen (OECD-NEA 2017). Konventionelle Entsorgungsmethoden mit weniger Materialtrennung während der Demontage sind oft schneller und einfacher zu handhaben, so dass die Bestrebungen im Hinblick auf Recycling und Wiederverwendung freigegebener Materialien vergleichsweise mit großem Aufwand verbunden sind und Herausforderungen mit sich bringen. Zusätzliche Zeit und Ressourcen für die Vorbereitung von behördlichen Analysen, Umwelt- oder Sicherheitsbewertungen um nachzuweisen, dass die Materialien sicher wiederverwendet oder recycelt werden können, können ebenfalls zu den Herausforderungen beitragen (OECD-NEA 2017). Für jeden Monat, in dem sich eine Anlage im Abbau befindet, fallen erhebliche Betriebskosten an. Somit besteht die Gefahr, dass ein wirtschaftlicher Nutzen, der beim Recycling aufgrund der Marktpreisentwicklung entstehen könnte, vom Faktor Zeit aufgezehrt wird.

- **Voruntersuchungen zur radiologischen Charakterisierung:** Die Voruntersuchungen dienen u.a. der radiologischen Charakterisierung der freizugebenden Stoffe oder Gegenstände (siehe hierzu Kapitel 1.1.4).

- Die im Freigabeverfahren eingesetzten Messverfahren sind teils nicht auf alle Strahlungsarten sensitiv (In-situ-Gammaspektrometrie) oder sie ermöglichen keine Nuklidbestimmung (Freimessanlage). Um die Entscheidungsmessungen im Freigabeverfahren durchführen und bewerten zu können, muss die Nuklidzusammensetzung in den freizugebenden Anlagenteilen bekannt sein. Dazu müssen repräsentative Proben jeweils aus den Anlagenteilen mit vergleichbarer Kontamination entnommen und ihre Nuklidzusammensetzung ermittelt werden. Ausgehend von der Nuklidzusammensetzung werden die erforderlichen abdeckenden Parameter für die Freigabemessungen mit einer Freimessanlage oder In-situ-Gammaspektrometrie – der repräsentative Nuklidvektor und die Korrelationsfaktoren<sup>9</sup> – bestimmt: der Nuklidvektor repräsentiert die Zusammensetzung der Gamma-Strahler, mit Hilfe der Korrelationsfaktoren werden die Alpha- und Betastrahler erfasst. Die auf diese Weise ermittelte Zusammensetzung der Radionuklide fließt in die in der StrlSchV vorgegebene Summenformel ein<sup>10</sup>, welche zum Nachweis der Einhaltung der Freigabewerte bei mehreren Radionukliden dient.

*Hemmnisse:* Insbesondere im Fall großer und komplex aufgebauter Anlagenteile aus verschiedenen Materialien kann die repräsentative Probenentnahme mit großem Aufwand verbunden sein: Die radiologisch relevanten Stellen müssen zunächst ermittelt werden. Sie zu erreichen ist ohne Zerlegung kaum möglich und ist somit teilweise mit erheblichem Zeitaufwand verbunden. Für die Zerlegung und Probenahme sind entsprechende Zerlegewerkzeuge sowie Probenahmewerkzeuge erforderlich, die teils erst beschafft werden müssen. Eine aufwendige Zerlegung kann wiederum mit höherem Strahlenbelastungsrisiko für die Beschäftigten verbunden sein.

- Die Analyse der entnommenen Proben muss in einem Speziallabor durchgeführt werden. Dies kann u. U. mehrere Monate in Anspruch nehmen. Der gesamte Vorgang muss von der Behörde und den behördlichen Gutachtern begleitet und bestätigt werden.

*Hemmnisse:* Der gesamte Prozess der Probenhandhabung und Analytik ist zeitaufwendig und bis zum behördlich zugestimmten Nuklidvektor vergeht ca. ein Jahr.

- **Dekontamination:** Ein wesentlicher Schritt beim Recycling freizugebender Anlagenteile ist die Dekontamination. Bei der Dekontamination werden radiologisch kontaminierte Oberflächen von Anlagenteilen mittels verschiedener mechanischer oder chemischer Verfahren behandelt. Prinzipiell kann nahezu jedes Bauteil dekontaminiert werden. Große und geometrisch komplexe Anlagenteile müssen allerdings vor der Dekontamination zerlegt werden, damit alle Oberflächen erreicht werden können. Die Dekontaminationsverfahren an sich sind bereits weitgehend entwickelt, so dass die geeignete Methode gewählt werden kann. Die EnBW Kernkraft GmbH hat an ihren Standorten entsprechende Einrichtungen installiert, um die anfallenden großen Massenströme zu bewältigen sowie um die Prozesse zu optimieren und die Abfallmengen zu minimieren.

---

<sup>9</sup> Nuklide, die zur Bestimmung der Summenformel betrachtet werden müssen, aber nicht messtechnisch erfasst werden können, werden an ein messtechnisch erfassbares Nuklid mit einem festen Faktor korreliert.

<sup>10</sup> gemäß Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 2 und 3 der StrlSchV (StrlSchV 2018).

*Hemmnisse:* Sowohl die Dekontamination mit der vorgeschalteten Zerlegung komplexer Anlagenteile als auch die Entsorgung radioaktiver Sekundärabfälle, die bei der Dekontamination entstehen, können mit einem zusätzlichen technologischen, zeitlichen und somit auch finanziellen Aufwand verbunden sein und müssen im Rahmen der Abbauplanung berücksichtigt werden.

- **Freimessvorgang:** Vor dem Start der Freimessungen ist die Implementierung des ermittelten Nuklidvektors mit dem behördlich hinzugezogenen Sachverständigen bzw. der zuständigen Behörde abzustimmen. Die Messgeräte werden entsprechend der Radionuklidzusammensetzung ausgewählt und kalibriert: die Freimessanlage für die Gesamt-Gamma-Messung oder die In-situ-Gammaspektrometrie für eine mögliche Berücksichtigung der Alpha-, Beta und Gammastrahler. Für die Ermittlung der Beta-Strahler eignet sich auch der Kontamat bzw. das Kontaminationsnachweisgerät. Die Geometrie, die Einschränkungen der maximal möglichen messbaren Masse und Größe sowie die Materialart des freizumessenden Anlagenteils sind insbesondere für die Kalibrierung der Freimessanlage entscheidend. Beim Messvorgang ist es wichtig, dass die einzelnen kontaminierten Stellen nicht durch abschirmende Teile überdeckt sind.

*Hemmnisse:* Insgesamt handelt es sich hier um erprobte Verfahren, die sich in der Praxis bewährt haben. Im Hinblick auf die Umsetzung der Freimessung kann jedoch die Komplexität bzw. die Geometrie der freizumessenden Anlagenteile zusätzlichen Aufwand bedeuten. Die freizumessenden Anlagenteile müssen so zerlegt werden, dass ebene Flächen entstehen. Ebenso müssen die abschirmenden Eigenschaften von Anlagenteilen beachtet werden, insbesondere dann, wenn sich in deren Innerem radiologisch relevante Stellen befinden. Die abschirmenden Teile sind daher für die Freimessung abzutrennen. So muss auch hier die Wirtschaftlichkeit - der Aufwand bei der Zerlegung und Abtrennung der abschirmenden Anlagenteile versus mögliche Vorteile bei der Verwertung - abgewogen werden.

- **Lagerflächen:** Im Rahmen des Rückbauprozesses sind zusätzliche Lagerflächen (innerhalb und außerhalb von Gebäuden) notwendig, welche nach Bedarf auch als Kontrollbereiche ausgewiesen werden müssen. Solche zusätzlichen Lagerflächen sind im kerntechnischen Rückbau in der Regel knapp bemessen. Die Umorganisation in der Abbauplanung aufgrund der Erweiterung der Freigabe zum Zweck des Metallrecyclings müsste je nach dem Ausmaß mit der Neuausgestaltung der Logistik und Schaffung neuer Lager- und Pufferflächen sowie erweiterten Reststoffbehandlung einhergehen.

*Hemmnisse:* Insbesondere die zusätzlichen Lagerflächen sind während des kerntechnischen Abbaus knapp bemessen. Das Schaffen zusätzlicher Zwischenlageroptionen kann mit erheblichem Aufwand verbunden sein.

- **Aspekte der spezifischen Freigabe im Zusammenhang mit Metallrecycling:** Für den Fall der spezifischen Freigabe von „Metallschrott zur Rezyklierung“ ist vorgesehen, dass freigegebene Metalle in einem Verhältnis 1:10 von freigegebenen zu anderen Metallen eingeschmolzen werden oder der Schmelzbetrieb einen jährlichen Durchsatz von mindestens 40.000 t aufweisen muss. Formell muss eine Annahmeerklärung des Schmelzbetriebes vorgelegt werden, auf den im Freigabebescheid verwiesen wird.

*Hemmnisse:* Der Ablauf der spezifischen Freigabe an sich stellt kein Hemmnis dar. Die bisherige Praxis zeigt aber, dass sich die Suche nach einem geeigneten Schmelzbetrieb, der bereit ist, die freigegebenen Metalle anzunehmen, als schwierig erweist.

### 6.1.2 Öffentliche Wahrnehmung und damit verbundene Hemmnisse

Die Kernenergie stand in Deutschland seit den 1970er Jahren immer wieder im Zentrum der gesellschaftlichen Kontroverse<sup>11</sup>, was letztlich zum Ausstieg aus der Kernenergie im Jahr 2011 beigetragen haben dürfte. Beim Abbau von Kernkraftwerken fallen Abfälle an, für die zu entscheiden ist, ob sie als radioaktive Abfälle endgelagert werden müssen oder aufgrund ihrer geringfügigen Radioaktivität wie normale, konventionelle Abfälle verwertet oder beseitigt werden können. Insofern wird ebenso der kerntechnische Abbau, bei dem solche Abfälle anfallen, sowie der Umgang mit diesen einem kritischen öffentlichen Diskurs unterzogen: nicht zuletzt klagen einige Bürgerinitiativen gegen die Abbauprojekte<sup>12</sup>. Auch wenn diese Klagen zu Verzögerungen führen können, wird der Betreiber eines Kernkraftwerks in der Öffentlichkeit als dafür verantwortlich gesehen, dass das Kernkraftwerk sicher, aber dennoch so schnell wie möglich abgebaut wird. Verzögerungen und Änderungen im Abbauplan werden in der Öffentlichkeit eher negativ wahrgenommen und mit möglicher Erhöhung der radiologischen Beeinträchtigung sowie mit vermeintlich unzureichender Verantwortungswahrnehmung seitens der Betreiber verbunden.

Bezüglich der Herausgabe bzw. der Freigabe von Stoffen aus dem Rückbau wird insbesondere die Deponierung spezifisch freigegebener Abfälle<sup>13</sup> in der öffentlichen Wahrnehmung kritisch gesehen (SSK 2024) mit der Begründung, dass es sich um radioaktive Stoffe handle, welche nur formell als nicht radioaktiv erklärt würden. In der Öffentlichkeit wird teils die Meinung vertreten, dass diese Stoffe nicht deponiert werden dürften, sondern endgelagert werden müssten. So können Stoffe und Anlagenteile, welche im Zusammenhang mit dem abgebauten Kernkraftwerk stehen, häufig als radiologisch kontaminiert und gefährlich wahrgenommen werden. Diese öffentliche Haltung kann auch ein Grund sein, warum keine geeigneten Entsorger für die zur Deponierung bestimmten freigegebenen Abfälle gefunden werden können.<sup>14</sup> Die Deponieanlagenbetreiber lehnen die Abfälle aus der spezifischen Freigabe ab, obwohl die Aufnahme der Abfälle für sie aus ökonomischer Sicht vorteilhaft wäre - vor allem mit der Befürchtung, im Zentrum der öffentlichen Kritik zu stehen. Ähnliche Gründe für die Ablehnungshaltung sind auch bei den Schmelzbetrieben bezüglich der Annahme von spezifisch freigegebenen Metallen zum Recycling zu vermuten.

Eine öffentliche Ablehnungshaltung – insbesondere im Hinblick auf die spezifische Freigabe – aus Furcht vor negativen Folgen der Strahlung und damit verbundenen Überschätzung der Gesundheitsrisiken kann nie ausgeschlossen werden. Die Erfahrungen zeigen, dass insbesondere Laien die gesundheitlichen Risiken auch bei extrem niedrigen, deutlich unter der natürlichen Strahlungs-dosis liegenden Werten als eine Gefahr sehen<sup>15</sup>.

Neben den radiologischen Themen ist auch die Arbeitssicherheit in der öffentlichen Wahrnehmung ein wichtiges Thema. So hat das sorgfältige Arbeiten zusammen mit einer guten Sicherheitskultur neben dem Erfüllen aller Strahlenschutzbelange der Beschäftigten und der Bevölkerung höchste Priorität.

---

<sup>11</sup> <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/333362/kleine-geschichte-der-atomkraft-kontroverse-in-deutschland/>

<sup>12</sup> [https://www.stmuv.bayern.de/themen/reaktorsicherheit/stilllegung\\_abbau/in\\_stilllegung\\_abbau.htm](https://www.stmuv.bayern.de/themen/reaktorsicherheit/stilllegung_abbau/in_stilllegung_abbau.htm)

<sup>13</sup> <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/biblis-akw-schutt-in-deponie-buettelborn-jetzt-muessen-gerichte-entscheiden-v2,bauschutt-biblis-buettelborn-100.html>

<sup>14</sup> <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/akw-abfall-aus-biblis-soll-auf-deponie-buettelborn-gelagert-werden-18465314.html>

<sup>15</sup> Paul Slovic: *Perception of Risk from Radiation*. In: *Radiation Protection Dosimetry*. Band 68, Nr. 3/4, 1996, S. 165–180



Das Verständnis der Öffentlichkeit für ionisierende Strahlung ist im Allgemeinen gering und führt zu Fehlinformationen, Vorbehalten gegenüber der Industrie und zu Angst (OECD-NEA 2017). So werden beispielsweise Kernkraft und nukleare Abfälle als hohes Risiko wahrgenommen, während medizinische oder Radon-Expositionen als viel geringeres Risiko akzeptiert werden. Im Hinblick auf das Recycling und die Wiederverwendung von Materialien aus kerntechnischen Anlagen zeigt diese „Wahrnehmungslücke“, dass die Akzeptanz von Risiken von einer Reihe von Faktoren abhängt, wie dem Vertrauen in die Industrie und die Bewertung des Strahlungsrisikos im Vergleich zu anderen Risiken (OECD-NEA 2017). Erschwerend kommen Angst, Wut und Vorbehalte hinzu, die die Öffentlichkeit nach großen Weltereignissen wie dem Unfall von Tschernobyl oder dem Unfall von Fukushima Daiichi empfindet (OECD-NEA 2017).

### 6.1.3 Formeller Ablauf der Freigabe und Freigabebescheid

Das Freigabeverfahren wird durch den Freigabebescheid verbindlich festgelegt. Der Freigabebescheid nimmt als behördlicher Akt in der Regel 6 Wochen und in Sonderfällen bis zu 6 Monate in Anspruch. Bei dem formellen Verwaltungsakt sind keine größeren Hemmnisse im Zusammenhang mit Metallrecycling aus dem Rückbau zu erwarten.

## 6.2 Mögliche Optimierungen im Freigabeprozess in Bezug auf wertvolle Materialien

Wenn im Rahmen dieses Forschungsprojekts über Optimierungen bei Freigabeprozessen diskutiert wird, so geschieht dies ausschließlich mit dem Ziel, wertvolle Materialien in die Kreislaufwirtschaft zurückzuführen. Freigabeverfahren und Freigabegrenzen sowie die ihnen zugrundeliegenden Strahlenschutzanforderungen dienen dem Schutz des Menschen und der menschlichen Gesundheit, als auch dem Schutz der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung und werden nicht in Frage gestellt.

Zunächst soll dargestellt werden, wie die Hemmnisse, die in Kapitel 6.1 beschrieben werden, überwunden werden können und was nötig ist, um für das Recycling interessante Anlagenteile aus dem Kontrollbereich, bei denen es Hemmnisse bezüglich des Freigabeprozesses gibt, freizugeben. Im Anschluss daran soll anhand von zwei Beispielen dargestellt werden, welche Schritte bzw. Prozeduren für eine Freigabe notwendig wären. Als Beispiele wurden Anlagenteile gewählt, die aufgrund ihrer Materialien für das Recycling interessant sind, aber bislang nicht bzw. nur teilweise freigegeben werden können. Schließlich wird ein Fazit zur Optimierung des Freigabeprozesses herausgearbeitet.

### 6.2.1 Überwinden von Hemmnissen

Im Hinblick auf die Anforderungen der Kreislaufwirtschaft werden hier mögliche Optimierungen der Freigabeprozesse diskutiert und gezeigt, wie die Hemmnisse überwunden werden können bzw. wo Potentiale zur Optimierung der Freigabeprozesse gesehen werden.

Nach (OECD-NEA 2020) ist es wichtig, den Ausgangszustand einer kerntechnischen Anlage nach der endgültigen Abschaltung gut zu kennen. Im Grundsatz ermöglichen Charakterisierungsverfahren eine genaue Kategorisierung der Abfälle und sollten zum richtigen Zeitpunkt und im richtigen Umfang durchgeführt werden. Die Charakterisierung ermöglicht auch eine frühzeitige und solide Bestandsaufnahme der radioaktiven Abfälle zur Untermauerung von Projektplänen und um externen



Dienstleistern kommerzielle Entscheidungen über unterstützende Infrastrukturinvestitionen zu ermöglichen. Außerdem hat sich nach (OECD-NEA 2020) gezeigt, dass die Anwendung der Abfallhierarchie ein Erfolgsfaktor ist; oberstes Prinzip ist die Vermeidung von Abfällen, dann folgt die Minimierung durch Wiederverwendung und Recycling.

Aus den Gesprächen sowohl mit Experten aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen als auch im Rahmen der Materialrecherchen zu diesem Forschungsprojekt wurde deutlich, dass Informationen über für das Metallrecycling interessante Anlagenteile, d. h. welche Anlagenteile aus welchen Materialien bestehen, vorhanden sind, aber nicht mit dem Fokus auf Recycling aufbereitet vorliegen und somit nicht unmittelbar in die Abbauplanung einfließen können. Notwendig sind auch die systematischen Informationen über die Menge der jeweiligen „interessanten“ Anlagenteile, Informationen über ggf. vorhandene - meist höherwertige - Plattierungen (ggf. Edelmetalle), die für das Recycling ein Trennen der Materialien erfordert. Da die Wirtschaftlichkeit des Recyclings im Wesentlichen an den Metallpreisen hängt, die für Recyclingmetalle zu erzielen sind, könnte eine Aktualisierung der Wirtschaftlichkeit des Recyclings angezeigt sein (Aufwand versus Nutzen). Bei der Rückbauplanung wäre es hilfreich, solche Faktoren - soweit möglich - zu berücksichtigen.

Im Allgemeinen ist die Menge der zu recycelnden Materialien aus dem Bereich kerntechnischer Einrichtungen im Vergleich zu konventionellen recycelten Materialien gering. Allerdings ist aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die Systemauslegung (betriebliche Systeme, Auslegungsanforderungen und vorzuhaltende Sicherheitssysteme) ein Vergleich zwischen kerntechnischen Einrichtungen und konventionellen Stromerzeugungsanlagen nicht ohne weiteres möglich, weshalb die allgemeine Aussage mit großer Unschärfe behaftet ist.

Die Recyclingindustrie ist aufgrund der öffentlichen Vorbehalte sehr zögerlich, Materialien aus dem Bereich kerntechnischer Einrichtungen anzunehmen, zumal andere Materialien aus konventionellem Recycling leichter verfügbar sind. Ebenso lehnen Hersteller und Verbraucher Materialien oder Handelswaren, die recycelte Materialien aus dem Bereich kerntechnischer Einrichtungen enthalten, oftmals ab (OECD-NEA 2017). Insgesamt trägt ein effizienter und rechtzeitiger öffentlicher Diskurs zu solchen sensiblen Themen mit Klärung der Sachverhalte sowie der Entwicklung geeigneter Informationsstrategien zur Vertrauensbildung bei. Solche Prozesse sollten mit relevanten Interessengruppen und Experten so früh wie möglich eingeleitet werden mit dem Ziel, Vertrauen und Glaubwürdigkeit in den Entscheidungsprozess hinsichtlich des Recyclings und der Wiederverwendung von Materialien zu entwickeln. Auch geeignete politische Strategien und ein geeigneter Rechtsrahmen sind relevante Erfolgsfaktoren für das Recycling. Detaillierte rechtliche Rahmenbedingungen und Leitlinien erleichtern den Prozess für Betreiber und Behörden (OECD-NEA 2020).

Um eine höhere Recyclingquote durch Freigabe erreichen zu können, sind verschiedene Faktoren zu betrachten, die miteinander wechselwirken und bei der Planung des Rückbaus gegeneinander abgewogen werden müssen:

- Das primäre Interesse der Betreiber kerntechnischer Einrichtungen liegt in der Vermeidung von radioaktiven Abfällen. Der radioaktive Abfall ist stets die teuerste Entsorgungsvariante. Jedoch müssen die Aufwendungen zum Dekontaminieren von Komponenten verhältnismäßig sein. Hier verlaufen die Grenzen zwischen noch dekontaminierbar / recyclebar und final zu entsorgenden Anlagenteilen.

Durch einen höheren Freigabeanteil können Kosten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle vermieden werden.

- Der Dekontaminations- und Freigabeprozess ist zeitaufwendig und es lohnt sich, diesen im Reststofffluss zu etablieren und zu optimieren. Herausforderungen im Prozess haben einen verlängernden Effekt auf den Rückbau.
- Im Rückbau hat sich die Nutzung der Erfahrungen der Mitarbeiter bewährt. Je länger der Rückbau dauert, desto mehr muss vorhandenes Know-How innerhalb der Organisation weitergegeben werden.
- Dekontaminationsprozesse führen nicht immer zum gewünschten Ergebnis. Anlagenteile können trotz durchgeführter Dekontamination als radioaktiver Abfall entsorgt werden müssen. Hier muss die Verhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Nutzen im Auge behalten werden.
- 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.
- Die Suche nach geeigneten Schmelzbetrieben zur Annahme von zur Rezyklierung freigegebenen metallischen Abfällen ist komplex. Es gibt viele Gründe, warum eine beträchtliche Anzahl geeigneter Anlagen für Materialien aus dem Bereich kerntechnischer Einrichtungen nicht genutzt werden können. Bezüglich der spezifischen Freigabe von metallischen Abfällen ist es grundsätzlich sinnvoll, frühzeitig (im Zuge der Abbauplanung) Strategien und Ansätze zu entwickeln (PreussenElektra 2021).

Die Kosten für das Recycling entstehen in erster Linie durch Demontage, radiologische Charakterisierung und Dekontaminationsprozesse und werden im Allgemeinen nur dann zu einer Herausforderung, wenn sich herausstellt, dass Recycling teurer und aufwendiger ist als die direkte Abfallentsorgung. Instrumente zur Bewertung der Optimierung (z. B. Kosten-Nutzen-Analyse, Multi-Attribut-Analyse) könnten verwendet werden, um die mit dem Recycling verbundenen Gesamtkosten mit den andernfalls anfallenden Entsorgungskosten zu vergleichen (OECD-NEA 2017). Anlagenteile, die nicht freigegeben werden können, werden als radioaktiver Abfall in ein Endlager verbracht – hierbei kann bezogen auf die Gesamtmasse (des Rückbaus) von einem Anteil von weniger als 1% ausgegangen werden. Nach (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2020) wurden für das Endlager Konrad bis 2012 vom Bund die Kosten für die Endlagerung von 1 m<sup>3</sup> Abfallgebindevolumen auf 12.800 Euro, im Jahr 2020 auf 30.363 Euro beziffert. Die Überprüfung der Kostenkalkulation ist alle zwei Jahre vorgesehen und es wird mit weiter steigenden Kosten gerechnet. Die genannten Zahlen entsprechen einer jährlichen Preissteigerung von ca. 11% für die Endlagerung. Aufgrund der Dauer des Rückbaus eines Kernkraftwerks von 10 – 15 Jahren ist in diesem Zeitraum mit einer nennenswerten Steigerung der Endlagerkosten zu rechnen. Dies muss bei der Planung berücksichtigt werden.

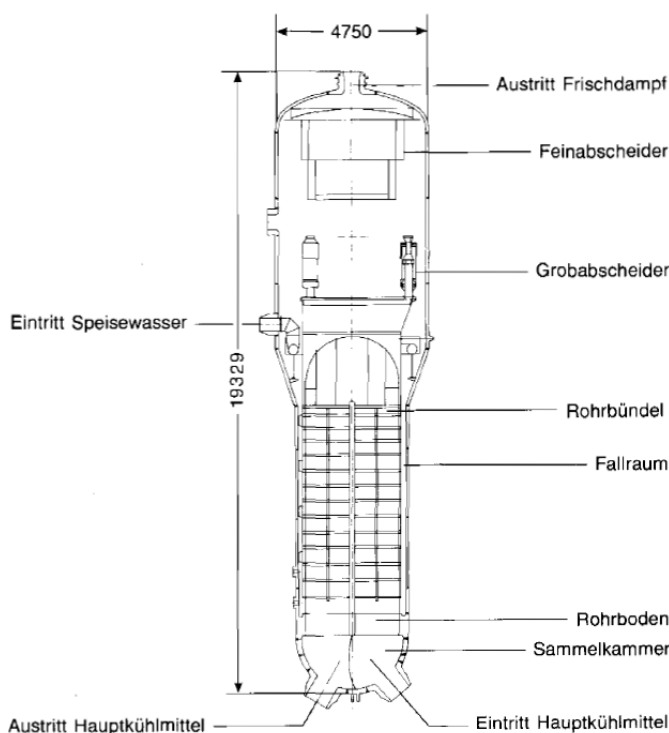
## 6.2.2 Beispiele für die Optimierung von Freigabeprozessen in Bezug auf wertvolle Materialien

Im Zusammenhang mit der Optimierung von Freigabeprozessen werden Dampferzeuger und Wasserstoffrekombinatoren als Beispiele für Anlagenteile betrachtet, die bisher nicht oder nur teilweise recycelt werden, jedoch aufgrund ihrer Materialzusammensetzung für ein Metallrecycling interessant sind. Bezüglich der Freigabe der beiden Anlagenteile stehen bislang unterschiedliche Aspekte dem Recycling entgegen und werden hier diskutiert.

### a) Dampferzeuger

In Druckwasserreaktoren erfolgt in den Dampferzeugern die Übertragung der Wärme vom Primär- zum Sekundärkreislauf. Abbildung 6-1 zeigt eine schematische Darstellung eines Dampferzeugers. 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.

**Abbildung 6-1: Abbildung eines Dampferzeugers**



Quelle: Kapitel 2 der Deutschen Risikostudie Phase B „Beschreibung der untersuchten Anlage“ (Anlage Biblis B) (Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) 1999)

Nachfolgende exemplarische Angaben basieren auf Dampferzeugern, die in Anlagen der EnBW Kernkraft GmbH 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 aktuelle 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 entwickelt, um die Heizrohre spezifisch als „Metallschrott zur Rezyklierung“, d. h. zum Einschmelzen, freigeben zu können. Hierzu wurde von einer im internationalen Rückbau tätigen Firma ein chemisches Verfahren entwickelt. Die Dekontamination konnte dann an einem Standort der EWN durchgeführt werden (Schmidt und Brenneisen 2019). Ob das Verfahren zum geplanten Ziel führt, war zum Zeitpunkt der Veröffentlichung von (Schmidt und Brenneisen 2019) noch nicht belegt. Auch Verfahren auf Basis des Hochdruckwasserstrahlens wurden für die Heizrohre erprobt und erste Praxiserprobungen bei einem deutschen Unternehmen wurden erfolgreich durchgeführt (Finkenberger und Sell 2015). Die vier Dampferzeuger aus dem KKW Stade mit einer Masse von zusammen 660 t wurden 2007 zur schadlosen Verwertung nach Schweden abtransportiert, dort zerlegt und eingeschmolzen (Thierfeldt und Schartmann 2009). Die Möglichkeit, Abfälle zur Behandlung in ein anderes Land zu schicken, hängt von internationalen Vereinbarungen ab, einschließlich der grenzüberschreitenden Beförderung und der Harmonisierung der Vorschriften (OECD-NEA 2020).

Die Dampferzeuger in Mülheim-Kärlich wurden mit Speziälsägen zerlegt. Die zerlegten Hüllen konnten freigemessen und dem konventionellen Wertstoffkreislauf zugeführt werden. Die inneren Teile der Dampferzeuger, die Heizrohre, wurden als radioaktiver Abfall verpackt und sind für das Endlager Schacht Konrad vorgesehen (RecyclingPortal 2020).

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 (Thierfeldt und Schartmann 2009). Nach einer Abklinglagerung sind die Dekontamination und die anschließende Freigabe möglicherweise deutlich einfacher. Allerdings sind die Möglichkeiten zur Abklinglagerung nicht an jedem Standort vorhanden. Und auch die Infrastruktur für eine Abklinglagerung muss in eine Kosten-Nutzen-Bilanz einbezogen werden, ebenso mögliche Transporte zu Lager- bzw. Zerlege- und Dekontaminationsanlagen an anderen Standorten bzw. in anderen Ländern.

Grundsätzlich sind sowohl der Transport eines Dampferzeugers an einen anderen Standort als auch die Zerlegung innerhalb der jeweiligen Anlage mit erheblichem Aufwand verbunden. Bei EnBW Kernkraft GmbH werden die Teile der Dampferzeuger, die derzeit nicht freigebbar sind, mittels einer großen Seilsäge so zerlegt, dass sie für die Endlagerung in Konradcontainer verpackt werden können. Würde die Dekontamination eine kleinteiligere Zerlegung fordern, so müsste beispielsweise die dadurch verlängerte Schnittzeit der Seilsäge bedacht werden (um Zeitverluste zu minimieren). Außerdem könnte eine endlagerergerechte Verpackung in Konradcontainer aufwendiger werden, sollte die Dekontamination nicht das gewünschte Ergebnis bringen und die zerlegten Teile am Ende doch nicht freigegeben werden können. Bei der Zerlegung der äußeren Teile eines Dampferzeugers dürfen die Rohrbündel nicht angeschnitten werden, da sonst mit weiteren Kontaminationen zu rechnen ist. Für eine kleinteiligere Zerlegung des Dampferzeugers sind außerdem der Platzbedarf für die Zerlegung und ggf. damit verbundene Verzögerungen zu beachten.

Um die zerlegten primärseitigen Teile des Dampferzeugers (ca. 5 t) zu dekontaminieren, wäre ein großes Säurebad notwendig, wofür darüber hinaus noch ein geeigneter Chemismus zu entwickeln wäre. Die Säure greift nicht nur die kontaminierte Oxydschicht an, sondern auch die Oberfläche der plattierten Edelstahl-Metalteile. 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. Hierzu wäre ggf. eine Genehmigung erforderlich: übersteigt die Radioaktivität der Anlagenteile eine im Gefahrgutrecht festgelegte Grenze, so muss ein solcher Transport durch die zuständige Genehmigungsbehörde genehmigt 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, einhergehen 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.

#### **b) Wasserstoffrekombinatoren mit Palladiumkugeln**

Im Normalbetrieb entstehen in einem Kernreaktor geringe, bei Unfällen mit Ausfall der Kernkühlung unter Umständen große Mengen an gasförmigem Wasserstoff. Wasserstoffrekombinatoren sind im Containment eines Kernkraftwerks verbaute Edelstahlgehäuse mit Palladiumeinbauten in Kassettenform, in denen geringe bis große Mengen von Wasserstoff durch Katalyse automatisch abgebaut werden - und damit die Reaktion mit dem Luftsauerstoff und folglich Entstehung von Knallgas verhindert wird. Bezüglich des Recyclings sind primär die mit Palladium beschichteten Aluminiumoxid-Pellets interessant: Der Druckwasserreaktor KKP 2 ist mit 92 Wasserstoff-Rekombinatoren bestückt - 84 Rekombinatoren mit je 44 Kassetten und 8 Rekombinatoren mit 22 Kassetten, d. h. insgesamt 3.872 Kassetten. Jede Kassette enthält ca. 366 g Katalysatorpellets, d. h. insgesamt enthalten sie 1.417 kg Katalysatorpellets. Die Pellets bestehen aus  $Al_2O_3$ -Kügelchen mit einem Durchmesser von 3 - 6 mm und einer katalytischen Schicht Palladium (0,5%). Insgesamt enthalten die Rekombinatoren ca. 7,86 kg Palladium. Bei einem aktuellen Preis für Palladium von 28,45 €/g (Stand 2024) liegt der Gesamtwert des Palladiums der Rekombinatoren bei 201.597 €. Nach (GRS 2023) wurden Rekombinatoren aus Deutschland in mehr als 200 Anlagen weltweit geliefert. Diese Anzahl weist auf das Potential beim Recycling der  $H_2$ -Rekombinatoren hin.

Da sich die Rekombinatoren im Kontrollbereich des Kernkraftwerks befinden, müssten sie für ein Recycling freigegeben werden. Bisher gibt es keinen den Verfassern bekannten Prozess zur Freigabe der  $H_2$ -Rekombinatoren. Für eine Freigabe könnte der Nuklidvektor für luftgetragene Kontaminationen herangezogen werden. Er müsste aber vorab noch gutachterlich bestätigt werden. Außerdem müsste ein Zerlegungsverfahren der Rekombinatoren mit Separation der mit Palladium beschichteten Pellets entwickelt werden. Die Pellets könnten dann als Schüttgut in einer Freimessanlage freigemessen werden.

### 6.2.3 Schlussfolgerungen

Zur möglichen Optimierung des Freigabeprozesses für wertvolle Metalle kann folgendes zusammengefasst werden:

- Vor der Rückbauplanung muss zusammengestellt sein, welche wertvollen Metalle in der Anlage in welchem Anlagenteil und in welcher Menge vorhanden sind.
- Jedes Kernkraftwerk ist aufgrund seiner Betriebshistorie bezüglich der vorhandenen Kontaminationen (unterschiedliche Radionuklide in unterschiedlicher Konzentration an unterschiedlichen Stellen eines Anlagenteils) anders. Dies wirkt sich auch auf die Möglichkeit einer Freigabe von Anlagenteilen aus. Für jedes Anlagenteil einer Anlage muss der Betreiber gesondert entscheiden, ob die Freigabe grundsätzlich möglich sein kann. Dies ist bei der Entwicklung von anlagenübergreifenden Strategien zu berücksichtigen.
- Da der Rückbau von Kernkraftwerken in der Regel 10 bis 15 Jahre dauert und die Wirtschaftlichkeit des Recyclings im Wesentlichen an den Metallpreisen hängt, die für Recyclingmetalle zu erzielen sind, könnte eine Aktualisierung der Rückbauplanungen unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit angezeigt sein (Aufwand versus Nutzen).
- Die Kosten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle werden voraussichtlich in den Jahren des Rückbaus stark ansteigen. Insofern sollten zusätzliche Möglichkeiten der Dekontamination von Anlagenteilen mit dem Ziel der Freigabe geprüft werden.
- Durch den Einsatz von Hilfsstoffen wie z. B. Säuren, bei der Dekontamination und deren anschließende Wiederaufarbeitung (Entfernen der Radionuklide) können Umweltauswirkungen entstehen. Diese wären der primären Rohstoffgewinnung gegenüberzustellen.



## 7 Hochskalierung der Ergebnisse und Erhebung des ökologischen und ökonomischen Gesamtpotenzials

### 7.1 Hochskalierung auf Deutschland

Die im Vorhaben anhand von KKP 1 (Siedewasserreaktor) und KKP 2 (Druckwasserreaktor) identifizierten Verwertungspotenziale für Wertmetalle bzw. Wertlegierungen werden auf die Summe der in Deutschland installierten, kommerziell bis längstens Mitte April 2023 betriebenen Siede- und Druckwasserreaktoren hochskaliert. Da es hierfür um die Ermittlung der Größenordnungen der Inventare und damit Verwertungspotenziale geht, wurden Detailunterschiede zwischen einzelnen Reaktorgenerationen etc. innerhalb der jeweiligen Familie der Siede- und Druckwasserreaktoren außer Acht gelassen. Mit dieser Einschränkung konnte die Hochskalierung einfach über die installierten Brutto-Leistungen der Siede- und Druckwasserreaktoren in Deutschland erreicht werden. Tabelle 7-1 zeigt das Datengerüst für diese Hochskalierung. Darin enthalten sind alle dauerhaft stillgelegten bzw. im Rückbau befindlichen Reaktoren aufgelistet. Kleinskalige Versuchsreaktoren sind darin nicht enthalten. Ebenso sind in dieser Auflistung die Reaktoren Greifswald 1-5 nicht gelistet, da die entsprechenden Druckwasserreaktoren aus sowjetischer Produktion stammen und einige Besonderheiten gegenüber westlichen Druckwasserreaktoren aufweisen.

**Tabelle 7-1 Datengerüst zur Hochskalierung der Ergebnisse zu KKP 1 und KKP 2 auf Deutschland, gesamt. Daten aus IAEA (2024)**

Kraftwerk <sup>16</sup>	Brutto-Leistung (MW)	Netto-Leistung (MW)	Reaktortyp	Skalierungsfaktor	
Brunsbüttel	806	770	BWR	Brutto-Gesamtleistung SWR=7.654 MW, Brutto-Leistung KKP 1=926 MW	
Gundremmingen a	250	237	BWR		
Gundremmingen b	1344	1244	BWR		
Gundremmingen c	1344	1249	BWR		
Isar 1	912	870	BWR		
Krümmel	1402	1260	BWR		
<b>Philippsburg 1</b>	<b>926</b>	<b>864</b>	<b>BWR</b>		→Skalierungsfaktor=8,26
Würgassen	670	640	BWR		
Obrigheim	357	283	PWR	Brutto-Gesamtleistung DWR=17.126 MW, Brutto-Leistung KKP 2=1468 MW	
Stade	672	630	PWR		
Biblis a	1225	1146	PWR_1G		
Biblis b	1300	1178	PWR_1G		
Brokdorf	1480	1307	PWR_1G		
Grafenrheinfeld	1345	1225	PWR_1G		
Grohnde	1430	1289	PWR_1G		
Mülheim-Kärlich	1308	1219	PWR_1G		
Neckarwestheim 1	840	805	PWR_1G		
<b>Philippsburg 2</b>	<b>1468</b>	<b>1268</b>	<b>PWR_1G</b>		→Skalierungsfaktor=11,66
Unterweser	1410	1230	PWR_1G		
Isar 2	1485	1285	PWR_AR		
Emsland	1406	1242	PWR_AR		

<sup>16</sup> Zum Stand des Rückbaus der Kernkraftwerke in Deutschland siehe Kapitel 1.1.1

Kraftwerk <sup>16</sup>	Brutto-Leistung (MW)	Netto-Leistung (MW)	Reaktortyp	Skalierungsfaktor
Neckarwestheim 2	1400	1225	PWR_AR	

Quelle: TecTecKA-Verbund

Gemäß dem Fokus des Verbundvorhabens RecTecKA wurden niedriglegierte Stähle, die in großen Mengen zusätzlich in KKW-Anlagen verbaut sind, für die Hochskalierung auf Deutschland ausgenommen. Weiterhin sind in den ermittelten Mengen der Hochskalierung ausschließlich Materialströme einbezogen, die ohne Probleme in die Freigabe kommen können, d. h. radioaktiv kontaminierte oder gar aktivierte Komponenten sind in den hochgerechneten Daten nicht enthalten.

In Tabelle 7-2 sind zusammenfassend für alle in Deutschland installierten Siede- sowie Druckwasserreaktoren die Inventare an Wertmetallen und Wertlegierungen dargestellt.

**Tabelle 7-2 Ergebnisse der Hochskalierung auf alle kerntechnischen Anlagen in Deutschland**

	Materialien	Menge [t]	Materialwert [Mio €]	Erderwärmungspotential [Tsd.-t CO <sub>2</sub> -Eq]
<b>Alle Druckwasserreaktoren DEU</b>	Kupfer und Kupferlegierungen	28.762	309	- 496 (± 55.000 Personen; mittelgroße Stadt) <sup>a,b</sup>
	Aluminium	11.457		
	Titan	201		
	Edelmetalle	21		
	Edelstahl	22.357		
<b>Alle Siedewasserreaktoren DEU</b>	Kupfer und Kupferlegierungen	13.354	122	- 184 (± 20.000 Personen) <sup>a,b</sup>
	Aluminium	5.996		
	Titan	-		
	Edelmetalle	11		
	Edelstahl	233		

<sup>a)</sup> Das negative Vorzeichen steht für eine Einsparung Es wird von einem CO<sub>2</sub>-Eq Ausstoß von 9,1 t CO<sub>2</sub>-Eq pro deutscher/m Bürger\*in und Jahr ausgegangen (EEA 2024)

Quelle: TecTecKA-Verbund

Aus den Ergebnissen der Hochskalierung lässt sich entnehmen, dass für die Druckwasserreaktoren in Deutschland nach Mengengesichtspunkten vor allem große Mengen an Kupfer- und Kupferlegierungen, aber auch an Edelstählen und Aluminium als Inventar für die Metallverwertung als Potenzial zu erwarten sind. Bei den Siedewasserreaktoren dominieren ebenfalls Kupfer- und Kupferlegierungen; aber auch Aluminium stellt ein relevantes Potenzial zur Verwertung dar. Die hochskalierte Edelstahlmenge ist für die Siedewasserreaktoren erheblich geringer als bei den Druckwasserreaktoren. Dies ist damit zu erklären, dass viele Großkomponenten, die im Falle der Druckwasserreaktoren einfach in die Herausgabe gehen können, im Falle der Siedewasserreaktoren radioaktiv kontaminiert und damit aus dieser Hochskalierung ausgenommen werden müssen. Dies wurde für die oben aufgeführte Hochskalierung jedoch bewusst nicht unterstellt und daher sind diese Wertmetallmengen in der obigen Tabelle bei Siedewasserreaktoren nicht mit aufgenommen.



Aus der Hochskalierung ergibt sich für die Druckwasserreaktoren eine überschlägige Hochschätzung des Materialwerts von etwas über 300 Mio. Euro, für die Siedewasserreaktoren beläuft sich die Hochschätzung auf gut 130 Mio. Euro. Anders als bei der reinen Mengenbetrachtung in Tonnen tragen die identifizierten Edelmetallinventare (Gold, Silber und Palladium) zu diesen Gesamtsummen signifikant bei. Wie oben bereits erwähnt, bezieht diese Abschätzung nur Komponenten und Materialien ein, die problemlos die erforderliche Herausgabe erhalten können. Bei den hier angegebenen Werten handelt es sich um Skalierungen mit einer entsprechenden Unschärfe. Da im Rückbau neben der Sicherheit und den Terminaspekten auch die Wirtschaftlichkeit von zentraler Bedeutung ist, nutzen die Betreiber bereits die sich ergebenden Potentiale aus dem Recycling.

Aus den Ökobilanzergebnissen zum RecTecKA-Vorhaben (siehe Anhang zu diesem Bericht) lässt sich mittels der oben geschilderten Hochskalierung der Ergebnisse von KKP 1 und KKP 2 ein Einsparungspotenzial für die Treibhausgasemissionen von knapp 500.000 Tonnen für alle Druckwasserreaktoren und von rund 200.000 Tonnen für alle Siedewasserreaktoren in Deutschland abschätzen, wenn hochwertiges Recycling für die abgeschätzten Metallinventare (ohne Berücksichtigung niedriglegierter Stähle und nur unter Einbezug der Metallinventare, die problemlos die Freigabe erhalten) unterstellt wird.

## 7.2 Hochskalierung auf Europa

Eine ähnliche Übung lässt sich auch für alle Reaktoren innerhalb von Europa durchführen. An dieser Stelle ist die Herangehensweise deutlich undifferenzierter im Vergleich zu der Hochrechnung für Deutschland. Hier wird nur eine Unterteilung nach Siede- und Druckwasserreaktoren sowie anderen Reaktortypen vorgenommen. Atypische Bauweisen oder kleinskalige Reaktoren können nicht ausgeschlossen werden. Andere Reaktortypen als Druck- und Siedewasserreaktoren werden aber weiterhin nicht berücksichtigt. Tabelle 7-3 stellt die Leistungen aller Reaktoren in Europa dar. Basierend auf der aggregierten Brutto-Leistung aller Reaktoren lässt sich für die Druckwasserreaktoren ein Skalierungsfaktor von 23,31 ermitteln. Für die Druckwasserreaktoren ein Skalierungsfaktor von 113,53.

**Tabelle 7-3 Aggregierte Leistung aller Reaktoren in Europa. Datenbasis: IAEA (2024)**

Bezugsraum	Brutto-Leistung [MW]			
	Siedewasserreaktoren	Druckwasserreaktoren	Andere Reaktortypen	
EU 27	Belgien		5.952	
	Bulgarien		3.638	
	Deutschland	7.557	18.340	478
	Finnland	1.780	2.614	
	Frankreich		65.065	3.484
	Italien	1.010	260	153
	Litauen			2.370
	Niederlande	55	482	
	Rumänien			1.300
	Schweden	7.925	3.056	10
	Slowakei		3.564	93

Bezugsraum	Brutto-Leistung [MW]		
	Siedewasserreaktoren	Druckwasserreaktoren	Andere Reaktortypen
	Slowenien		688
	Spanien	1.510	6.200
	Tschechische Republik		3.934
	Ungarn		1.916
europäische Länder außerhalb der EU	Armenien		792
	Belarus		2.220
	Russland		22.232
	Schweiz	1.746	1.612
	Türkei		4.456
	Ukraine		15.177
	U.K.		4.458
	<b>Europa gesamt</b>	<b>Summe</b>	<b>21.583</b>
Abgeleiteter Skalierungsfaktor bezogen auf Daten von KKP 1 (Bruttoleistung: 926 MW) und KKP 2 (Bruttoleistung: 1468 MW)		23,31	113,53
			Nicht berücksichtigt

Quelle: TecTeckKA-Verbund

In Tabelle 7-4 sind zusammenfassend für alle in Europa installierten Siede- sowie Druckwasserreaktoren die Inventare an Wertmetallen und Wertlegierungen dargestellt.

**Tabelle 7-4 Ergebnisse der Hochskalierung auf alle kerntechnischen Anlagen in Europa**

	Materialien	Menge [t]	Materialwert [Mio €]	Erderwärmungspotential [Tsd.-t CO <sub>2</sub> -Eq]
<b>Alle Druckwasserreaktoren DE</b>	Kupfer und Kupferlegierungen	280.045	3.004	- 4830 (≙ CO <sub>2</sub> -Eq Ausstoß von 620.000 Personen (Europäern) pro Jahr) <sup>a,b</sup>
	Aluminium	111.554		
	Titan	1.953		
	Edelmetalle	207		
	Edelstahl	217.680		
<b>Alle Siedewasserreaktoren DE</b>	Kupfer und Kupferlegierungen	37.686	345	- 521 (≙ 67.000 Personen) <sup>a</sup>
	Aluminium	16.921		
	Titan	-		
	Edelmetalle	32		
	Edelstahl	656		

<sup>a)</sup> Das negative Vorzeichen steht für eine Einsparung b) Es wird von einem CO<sub>2</sub>-Eq Ausstoß von 7,8 t CO<sub>2</sub>-Eq pro Europäer und Jahr ausgegangen (EEA 2024)

Quelle: TecTeckKA-Verbund

## 8 Fazit 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 die Freigabe gelangen 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 schießt radioaktiv kontaminierte oder gar aktivierte Bauteile und Komponenten explizit aus.
- Das identifizierte Verwertungspotenzial für Wertmetalle und Wertlegierungen ist 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 daher ohne aufwendige Dekontaminierungsprozesse nicht in die Freigabe gelangen 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 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 700.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq. Dies entspricht dem jährlichen Ausstoß von rund 70.000 Einwohnern in Deutschland. Für ganz Europa liegt das Einsparpotential bei 5,35 Mio. t CO<sub>2</sub>-Eq, was ungefähr dem CO<sub>2</sub>-Eq Ausstoß von 700.000 Europäern pro Jahr.
- Anhand von ausgewählten Beispielen für radioaktiv kontaminierte Komponenten wie Dampferzeuger oder H<sub>2</sub>-Rekombinatoren, 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 genannten Aufwendungen für Dekontaminierung und Freigabe stehen aber erhebliche Einsparungskosten hinsichtlich der Vermeidung von Endlagerkosten für radioaktive Abfälle von 30.000 €/m<sup>3</sup> – 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 - CRMA<sup>17</sup> und ist damit für Deutschland und die EU ein hochaktuelles und strategisches Feld.
- Die Fachleute des Verbundpartners EnBW Kernkraft GmbH 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 hinsichtlich der großen Zahl an stillgelegten und noch stillzulegenden Kohle- und auch Erdgaskraftwerken 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 weitere Anstrengungen zu investieren.

---

<sup>17</sup> Regulation (EU) 2024/1252

## 9 Literaturverzeichnis

- Amit Kumar; Maria Holuszko; Denise Croce Romano Espinosa (2017): E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. In: *Resources, Conservation and Recycling* 122, S. 32–42. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.01.018.
- Bacmeister, G. U. (2014): Some Impact of Melting Scrap for the Decommissioning of Nuclear Power Plant Stade. E.ON Kernkraft GmbH, NPP Stade (EON).
- Bounin, D.; Kleinkröger, W. (2009): Stilllegung und Rückbau. Forschungsvorhaben zur Optimierung der Reststoffverwertung von Metallen. Abschließende Untersuchungen (FORM III). Hg. v. Siempelkamp Nuklear- und Umwelttechnik GmbH. Siempelkamp. Krefeld.
- Bounin, D.; Quade, U.; Kleinkröger, W.; Schreiber, D.; Völzer, W. (2002): Stilllegung und Rückbau. Forschungsvorhaben zur Optimierung der Reststoffverwertung von Metallen. Weiterführende Untersuchungen (FORM II). Hg. v. Siempelkamp Nuklear- und Umwelttechnik GmbH. Siempelkamp. Krefeld.
- Bryan, R. H.; Dudley, I. T. (1974): Estimated quantities of materials contained in a 1000-MW(e) PWR power plant.
- Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) (2024): Kerntechnische Anlagen in Stilllegung - April 2024. Online verfügbar unter [https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/kernanlagen-stilllegung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=36](https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/kernanlagen-stilllegung.pdf?__blob=publicationFile&v=36), zuletzt geprüft am 25.04.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, naturschutz und nukleare Sicherheit (2021): Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes.
- Büttner, Christian; Charlier, Frank; Dabruck, Jan Philipp; Friedmann, David; Nabbi, Rahim; Rombach, Elinor et al. (2016): Wiederverwertbarkeit seltener Metalle beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. Voruntersuchung. RWTH Aachen.
- DERA; BGR (Hg.) (2024): Volatilitätsmonitor. Februar 2024. Online verfügbar unter [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2024/02-24/2024-02-volatilitaetsmonitor.pdf;jsessionid=9422E50767B386FEAA82AA769485ABC3.internet941?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2024/02-24/2024-02-volatilitaetsmonitor.pdf;jsessionid=9422E50767B386FEAA82AA769485ABC3.internet941?__blob=publicationFile&v=2).
- EEA (2024): EEA greenhouse gases — data viewer. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>.
- Entsorgungskommission (ESK) (2022): Freigabe radioaktiver Stoffe und Herausgabe nicht radioaktiver Stoffe aus dem Abbau von Kernkraftwerken. Informationspapier- Kurzfassung.
- Finkenberger, H.; Sell, H. (2015): Dekontamination von Dampferzeugerrohrb deln mittels Hochdruckwasserstrahlen. KONTEC 2015.
- Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) (1999): Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B. Online verfügbar unter [https://www.grs.de/sites/default/files/publications/Dt.\\_Risikostudie\\_Kernkraftwerke\\_Phase\\_B.pdf](https://www.grs.de/sites/default/files/publications/Dt._Risikostudie_Kernkraftwerke_Phase_B.pdf), zuletzt geprüft am 30.04.2024.
- GRS (2023): Zur Abschaltung der letzten KKW in Deutschland: ein kurzer (sicherheits-)technischer Rückblick. Online verfügbar unter <https://www.grs.de/de/aktuelles/zur-abschaltung-der-letzten-kkw-deutschland-ein-kurzer-sicherheits-technischer-rueckblick>, zuletzt aktualisiert am 27.02.2024.
- IAEA (2024): Country statistics - Germany. PRIS database. Online verfügbar unter <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=DE>.

- Jirang Cui; Eric Forssberg (2003): Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. In: *Journal of Hazardous Materials* 99 (3), S. 243–263. DOI: 10.1016/S0304-3894(03)00061-X.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2020): Bericht über die Entsorgung von radioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen aus Baden- Württemberg. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- OECD-NEA (2017): Recycling and Reuse of Materials Arising from the Decommissioning of Nuclear Facilities. Radioactive Waste Management. Hg. v. Nuclear Energy Agency (OECD-NEA).
- OECD-NEA (2020): Optimising Management of Low-level Radioactive Materials and Waste from Decommissioning. Radioactive Waste Management and Decommissioning 2020. Hg. v. Nuclear Energy Agency (OECD-NEA).
- PreussenElektra (2021): Kernkraftwerke an Cyclife. Online verfügbar unter <https://www.preussenElektra.de/de/newsroom/pressemitteilungen/2021/PEL-erteilt-auftrag-abbau-dampferzeuger.html>, zuletzt aktualisiert am 12.02.2024.
- RecyclingPortal (2020): Rückbau der Dampferzeuger im KKW Mülheim- Kärlich abgeschlossen. Online verfügbar unter <https://recyclingportal.eu/Archive/61428>, zuletzt aktualisiert am 27.02.2024.
- Roberto Dones; Christian Bauer; Gabor Doka (2009): Kernenergie. ecoinvent report No. 6-VII. Hg. v. Ecoinvent Centre. Paul Scherrer Institut (PSI). Villigen.
- Rocchetti, Laura; Amato, Alessia; Beolchini, Francesca (2018): Printed circuit board recycling: A patent review. In: *Journal of Cleaner Production* 178, S. 814–832. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.076.
- Schmidt, K.; Brenneisen, M. (2019): Dekontamination eines Dampferzeugers des Kernkraftwerkes Greifswald. KONTEC 2019.
- Siempelkamp Nuklear- und Umwelttechnik GmbH (Hg.) (2020): Strahlenschutz und Dokumentation beim Schmelzen von radioaktiv kontaminierten Metallen. Siempelkamp. Bayreuth (Expertentreffen Strahlenschutz).
- SSK (2024): Umgang mit Parameterwerten zur Herleitung und Bedingungen für die Anwendung von Freigabewerten zur Beseitigung geringfügig radioaktiver Stoffe auf Deponien im Freigabeverfahren. Handreichung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 330. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 30. Januar 2024. Hg. v. Strahlenschutzkommission (SSK).
- StrlSchG (2022): Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG). StrlSchG, vom "Strahlenschutzgesetz vom 27.06.2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Mai. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/StrlSchG.pdf>.
- StrlSchV (2018): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung). StrlSchV, vom om 29.11.2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 20.11.2020 (BGBl. I S. 2502) geändert worden ist.
- Thierfeldt, S.; Schartmann, F. (2009): Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen.
- Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.

## Anhang 1 - Ökobilanzbericht zum RecTecKA-Vorhaben



## Ökobilanz zum Recycling von ausgewählten werthaltigen Metallen aus kerntechnischen Anlagen

Darmstadt,  
21.08.2024

### **Autorinnen und Autoren**

Dr. Matthias Buchert  
Dr. Felix Mayer  
Julia Schütz

### **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

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

---

Eine Studie im Rahmen des Projektes ***RecTecKA – „Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben“***

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderlinie „FORKA – Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“

Förderkennzeichen: 15S9428A

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Ziel und Untersuchungsrahmen</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Ziele und Anwendungen der Studie</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens</b>	<b>2</b>
2.2.1. Zu untersuchendes System	3
2.2.2. Funktion und funktionelle Einheit	5
2.2.3. Abschneidekriterien	5
2.2.4. Festlegung der Systemgrenzen	5
2.2.5. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	7
2.2.6. Technologische Repräsentativität	7
2.2.7. Geographische Repräsentativität	7
2.2.8. Zeitrepräsentativität	7
2.2.9. Softwareumgebung	7
2.2.10. Umgang mit multifunktionellen Prozessen	8
2.2.11. End-of-Life Allokation	8
2.2.12. Wirkungskategorien	8
2.2.13. Methoden der Auswertung	10
2.2.14. Einschränkungen und Verwendung	10
2.2.15. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	10
2.2.16. Konformität und kritische Prüfung	11
<b>3. Sachbilanz</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Modellierungsansätze</b>	<b>12</b>
3.1.1. Datengrundlage der Primärroute von Metallen	12
3.1.2. Datengrundlage des Metallrecyclings	14
3.1.3. Datengrundlage der energetischen Verwertung von Abfällen	17
3.1.4. Datengrundlage der Energiebereitstellung	19
3.1.5. Datengrundlage von Transportdistanzen	21
<b>3.2. Mengen der Inputströme</b>	<b>22</b>
3.2.1. Großkomponenten	22
3.2.1. Kabel, E-Motoren und Stellantriebe	24
3.2.2. Komponenten der E- und Leittechnik	25
3.2.3. Gesamtübersicht	27

<b>3.3.</b>	<b>Beschreibung spezifischer Prozesse</b>	<b>28</b>
3.3.1.	Großkomponenten	28
3.3.2.	Kabel, E-Motoren und Stellantriebe	29
3.3.3.	Komponenten der E- und Leittechnik	31
<b>3.4.</b>	<b>Einschätzung der Datenqualität</b>	<b>36</b>
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse der Wirkungsabschätzung</b>	<b>38</b>
<b>4.1.</b>	<b>Gesamtergebnisse</b>	<b>38</b>
<b>4.2.</b>	<b>Großkomponenten</b>	<b>39</b>
<b>4.3.</b>	<b>Kabel, E-Motoren und Stellantriebe</b>	<b>41</b>
<b>4.4.</b>	<b>Komponenten der E- und Leittechnik</b>	<b>42</b>
<b>5.</b>	<b>Auswertung der Ökobilanz</b>	<b>45</b>
<b>5.1.</b>	<b>Identifizierung der signifikanten Parameter</b>	<b>45</b>
<b>5.2.</b>	<b>Beurteilung</b>	<b>49</b>
5.2.1.	Vollständigkeitsprüfung	49
5.2.2.	Sensitivitätsprüfung	49
5.2.3.	Konsistenzprüfung	52
<b>6.</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>53</b>
6.1.1.	Sensitivitätsanalysen	53
6.1.2.	Einschränkungen	53
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>
	<b>Anhang</b>	<b>I</b>
<b>A-1.</b>	<b>Pedigree-Matrix</b>	<b>I</b>
<b>A-2.</b>	<b>Absolute Ergebnisse der Auswertung für die betrachteten Wirkungskategorien</b>	<b>II</b>
	<b>Kritische Prüfung der Studie</b>	<b>III</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Beispielhafte Darstellung, welche Komponenten eines Wärmetauschers relevant für die Betrachtung sind (eigene Darstellung)	6
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung der Systemgrenzen	6
Abbildung 2-3	Substitution von Rezyklaten und zurückgewonnener Energie	7
Abbildung 3-1	Prozessschema der Edelstahlherstellung (eigene Darstellung)	14
Abbildung 3-2	Prozesskette der Kupferproduktion (eigene Darstellung nach Kupferverband e.V. (2012) und Kupferverband e.V. (2019))	15
Abbildung 3-3	Prozessschema der energetischen Verwertung in einer MVA und einem Zementwerk (eigene Darstellung)	18
Abbildung 3-4	Rasterpunkte (10 km x 10 km) und Elektrostahlwerke in Deutschland. Veranschaulichung der kürzesten und zweitkürzesten Entfernung von einem beliebigen Rasterpunkt.	22
Abbildung 3-5	Materialmengen der bilanzierten Referenzflüsse separat für KKP 1 und KKP 2	28
Abbildung 3-6	Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Großkomponenten	29
Abbildung 3-7	Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Kabeln	30
Abbildung 3-8	Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Motoren und Stellantrieben	31
Abbildung 3-9	Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Mittelspannungsschaltern	32
Abbildung 3-10	Stoffströme der mechanischen Aufbereitung von Schaltschränken	33
Abbildung 3-11	Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Schaltschränken und elektrischen Einrichtungen	34
Abbildung 4-1	Gesamtergebnisse Wirkungsabschätzung KKP 1	38
Abbildung 4-2	Gesamtergebnisse Wirkungsabschätzung KKP 2	39
Abbildung 4-3	GWP der Großkomponenten von KKP2 nach Clustern in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Eq	40
Abbildung 4-4	GWP Großkomponenten für KKP 2 und KKP 1 in Tsd. t CO <sub>2</sub> - Eq	40
Abbildung 4-5	GWP für Kabel, Motoren und Stellantriebe bezogen auf 1 Tonne Inputmaterial	41
Abbildung 4-6	GWP für Kabel, Motoren und Stellantriebe bezogen auf die Gesamttonnagen in KKP 1 und KKP 2	42
Abbildung 4-7	GWP für Schaltschränke bezogen auf 1 Tonne Inputmaterial	43
Abbildung 4-8	GWP für Mittelspannungsschalter und elektrische Einrichtungen bezogen auf 1 Tonne Inputmaterial	44
Abbildung 4-9	GWP für Schaltschränke, Mittelspannungsschalter und elektrische Einrichtungen bezogen auf die Gesamttonnagen in KKP 1 und KKP 2	45
Abbildung 5-1	Beitragsanalyse der Prozesse für alle Wirkungskategorien - KKP 1	46

Abbildung 5-2	Beitragsanalyse für alle Wirkungskategorien KKP 2	48
Abbildung 5-3	Netto-Gutschriften der Wertstoffpotenziale in KKP 1 (oben) und KKP 2 (unten) bei Gutschriften gegenüber Primärmaterial und dem Marktmix.	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Übersicht über die Menge der ermittelten werthaltigen Materialien	3
Tabelle 2-2	Ausschlusskriterien für Wirkungskategorien, die nicht innerhalb dieser Studie berücksichtigt wurden	10
Tabelle 3-1	Prozesse und Mengenanteile bei der Modellierung der Primärroute von Aluminium in ecoinvent	13
Tabelle 3-2	Brennstoffmix der deutschen Zementwerke 2022	18
Tabelle 3-3	Deutscher Strommix im Jahr 2022 (Fraunhofer ISE 2022) und spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen (eigene Berechnung)	19
Tabelle 3-4	Anteiliger Wärmeenergieverbrauch nach Sektoren (ohne Strom) im Jahr 2022 in Deutschland nach AG Energiebilanzen (2023)	20
Tabelle 3-5	Anteile der Energieträger am Wärmemix (Endenergieverbrauch) nach Sektoren (ohne Strom) im Jahr 2022 in Deutschland nach AG Energiebilanzen (2023) und spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen (eigene Berechnung)	20
Tabelle 3-6	Transportdistanzen in der Modellierung	21
Tabelle 3-7	Mengenströme der Großkomponenten aus KKP 2	23
Tabelle 3-8	Mengenströme der Großkomponenten aus KKP1	24
Tabelle 3-9	Mengenströme der Kabel in KKP 1 und KKP 2	24
Tabelle 3-10	Mengenströme der E-Motoren in KKP 1 und KKP 2	25
Tabelle 3-11	Mengenströme der Stellantriebe in KKP 1 und KKP 2	25
Tabelle 3-12	Mengenströme der Mittelspannungsschalter in KKP 1 und KKP 2 und der daraus separierten Fraktionen	26
Tabelle 3-13	Mengenströme der Schaltschränke in KKP 1 und KKP 2 und daraus separierte Fraktionen	26
Tabelle 3-14	Mengenströme der elektrischen Einrichtungen in KKP 1 und KKP 2 und daraus separierte Fraktionen	27
Tabelle 3-15	Zusammensetzung der Kunststofffraktion gemäß MGG Polymers (2020) und angepasste Zusammensetzung	35
Tabelle 3-16	Stoffströme bei der Verwertung von Kunststoffen aus Schaltschränken und elektrischen Einrichtungen. Bezugsgröße ist 1 t Kunststoffabfall.	35
Tabelle 3-17	Priorisierung der Datenquellen	36
Tabelle 3-18	Bewertung der Datenqualität anhand der Pedigree-Matrix	37
Tabelle 5-1	Beitragsanalyse der Elementarflüsse für alle Wirkungskategorien – KKP 2	47
Tabelle 5-2	Beitragsanalyse der Elementarflüsse für alle Wirkungskategorien – KKP 2	48
Tabelle 5-3	Metalle und Beschreibung des Prozesses zur Abbildung des Marktmixes	50
Tabelle 5-4	Geographischer und zeitlicher Bezug einiger ausgewählter Metalle.	52



## Abkürzungsverzeichnis

<b>AP</b>	Versauerungspotenzial
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>ABS</b>	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
<b>CO<sub>2</sub>-Äq</b>	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
<b>EnKK</b>	EnBW (Energie Baden-Württemberg) Kernkraft GmbH
<b>EoL</b>	End of Life (Lebensende)
<b>EP</b>	Eutrophierungspotenzial
<b>Fe-Metalle</b>	Eisenmetalle
<b>Gew.-%</b>	Massenprozent
<b>GHD</b>	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
<b>GLO</b>	global (verwendet innerhalb von ecoinvent-Datensätzen)
<b>HIPS</b>	High Impact Polystyrene
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung
<b>KEA</b>	Kumulierter Energieaufwand
<b>KKP1</b>	Kernkraftwerk Philippsburg – Block 1 (Siedewasserreaktor)
<b>KKP2</b>	Kernkraftwerk Philippsburg – Block 2 (Druckwasserreaktor)
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse bzw. Ökobilanz)
<b>Mg</b>	Megagramm (1.000 kg)
<b>MVA</b>	Müllverbrennungsanlage
<b>NE-Metalle</b>	Nicht-Eisen Metalle
<b>PE</b>	Polyethylen
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PVC</b>	Polyvinylchlorid
<b>RER</b>	Europäischer Raum (verwendet innerhalb von ecoinvent-Datensätzen)

## 1. Einleitung

Als Konsequenz der Nuklearkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 hat Deutschland den schrittweisen Ausstieg aus der Atomenergie beschleunigt. Am 15. April 2024 wurden schließlich die letzten drei verbleibenden Kernkraftwerke in Deutschland abgeschaltet. Infolgedessen befinden sich nun zahlreiche kerntechnische Anlagen im Rückbau, darunter auch die Kraftwerke Philippsburg Block 1 und Block 2 (KKP 1 und KKP 2).

Im Rahmen des Projekts RecTecKA haben die Projektpartner EnBW Kernkraft GmbH (EnKK), Philippsburg, die ELECTROCYCLING GmbH und das Öko-Institut e.V. wertvolle Metalle in kerntechnischen Anlagen identifiziert, die durch den Rückbau zur Verwertung zur Verfügung stehen. Diese Untersuchung konzentrierte sich auf die KKP 1 und KKP 2. Da es sich bei den beiden Blöcken um unterschiedliche Reaktortypen handelt, konnte ein separates Wertstoffprofil für einen Siedewasserreaktor (KKP 1) und einen Druckwasserreaktor (KKP 2) erstellt werden.

Zur Ermittlung des Wertstoffprofils wurden systematisch für die folgenden drei Obergruppen Daten erhoben:

- Großkomponenten (z.B. Wärmetauscher, Turbinen etc.)
- Kabel, Elektromotoren und Stellantriebe
- Komponenten der Elektro- und Leittechnik (z.B. Schaltschränke, elektrische Einrichtungen etc.)

Daten zu Großkomponenten wurden hauptsächlich über Werkstoffdatenblätter zusammengetragen. Die Mengen an Kabeln, Elektromotoren und Stellantrieben sowie für Komponenten der Elektro- und Leittechnik konnten durch die EnKK bereitgestellt werden. Durch labortechnische Analysen der TU Clausthal sowie Abschätzungen der ELECTROCYCLING GmbH konnten die Zusammensetzungen dieser Komponenten ermittelt werden. Die Methodik ist in Spieth Achtnich et al. (2024) ausführlich dargestellt. Im Rahmen der vorliegenden Ökobilanz soll quantifiziert werden, welche Umweltauswirkungen entstehen, wenn die ermittelten wertvollen Materialien einer stofflichen Verwertung (Recycling) zugeführt werden. Nach ISO 14040 wird die Ökobilanz in den vier charakteristischen Phasen durchgeführt. Diese sind (i) Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, (ii) Erstellung der Sachbilanz, (iii) Durchführung der Wirkungsabschätzung und (iv) Auswertung der Bilanz.

## 2. Ziel und Untersuchungsrahmen

In Übereinstimmung mit der ISO 14040 wird die Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens als erste Phase einer Ökobilanz (LCA) durchgeführt. Dabei sollen Ziel und Zielgruppe der Ökobilanz umrissen werden. Weiterhin soll der Untersuchungsrahmen und die Systemgrenze der Studie abgesteckt werden. Abschließend werden methodischen Entscheidungen, die bei der Durchführung der Ökobilanz angesetzt werden, offengelegt. Auch wenn Ökobilanzen heute durch die ISO-Normen 14040 und 14044 formalisiert sind, sind Bilanzierer\*innen immer noch mit einer Vielzahl von methodischen Entscheidungen konfrontiert. Dies umfasst beispielsweise die Art der Modellierung, Allokationsfragen, Modellierung der End of Life (EoL) Phase, die Wahl der Systemgrenze und der funktionellen Einheit. Die methodischen Entscheidungen für diese Studie werden in diesem Kapitel konkretisiert.

### 2.1. Ziele und Anwendungen der Studie

Im Fokus der Studie steht die Rückgewinnung ausgewählter **werthaltiger Metalle** aus kerntechnischen Anlagen. Dabei handelt es sich um Kupfer und Kupferlegierungen, Aluminium, Titan, Zink, Edelmehalle sowie die Edelmetalle Gold, Platin, Palladium und Silber. Ziel der Studie ist es die Lasten und Gutschriften der Rückgewinnung dieser Metalle zu inventarisieren und in potenzielle ökologische Wirkungen (siehe Kapitel 2.2.12 Wirkungskategorien) zu übersetzen. Die Zielgruppe der Studie ist die Fachöffentlichkeit, die insbesondere mit dem Rückbau kerntechnischer Anlagen befasst ist. Diese Studie dient nicht der Verwendung zu vergleichenden Aussagen, die an die Öffentlichkeit gerichtet sind.

Das **maximale Recyclingpotenzial** wird ökobilanziell quantifiziert, in dem die vermiedene Primärproduktion der entsprechenden Metalle mit den Aufwendungen bzw. Lasten der Rückgewinnung und Aufbereitung verrechnet werden.

Für die Bilanzierung wurden im Rahmen des Gesamtvorhabens RecTecKA, Block 1 des Kernkraftwerks Philippsburg (KKP 1) als Repräsentant für einen Siedewasserreaktor und Block 2 des Kernkraftwerks Philippsburg (KKP 2) als Repräsentant für einen Druckwasserreaktor erfasst.

### 2.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens

Bei der LCA handelt es sich um eine **Abfallbilanz**. Dabei wird die Verwertung von Metallen in der End-of-Life (EoL) Phase entkoppelt von der Produktions- bzw. Nutzenphase betrachtet.

Mit Hinblick auf die Rückgewinnung von werthaltigen Metallen wird für die beiden kerntechnischen Anlagen KKP 1 und KKP 2 jeweils eine Ökobilanz vorgelegt. Die Bilanzierung wird als **attributive** Bilanz durchgeführt. Mit der attributiven Lebenszyklusanalyse wird eine Zustandsbeschreibung der Umweltwirkungen eines Produktsystems vorgenommen. Im Gegensatz zu einer handlungskonsequenzorientierten Modellierung werden die untersuchten Produktflüsse nicht als marginale Änderungen des Systems betrachtet. Somit werden Marktdynamiken (z. B. Verschiebungen des Marktgleichgewichts) nicht miteinbezogen.

Das Recyclingpotenzial für KKP 1 und KKP 2 soll nicht miteinander verglichen werden (keine comparative LCA), da die beiden Reaktorblöcke einen gänzlich unterschiedlichen Aufbau aufweisen. Die Blöcke unterscheiden sich u.a. hinsichtlich des Jahres der Inbetriebnahme (KKP 1=1979, KKP 2=1984), der Leistung (Nettoleistung KKP 1=864 MW, KKP 2=1268 MW) und Bauart (KKP 1= Siedewasserreaktor der Baulinie 69, KKP 2=Druckwasserreaktor aus der „Vor-Konvoi“ Baureihe).

### 2.2.1. Zu untersuchendes System

Das zu untersuchende System umfasst den Rückbau und die Verwertung von dafür freigegebenen Komponenten<sup>1</sup> in kerntechnischen Anlagen, die werthaltige Basis- und Technologiemetalle in nennenswerten Mengen enthalten. Zu den Zielmetallen 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. Untersucht werden hierzu

- **Großkomponenten**, wie beispielsweise Wärmetauscher, Behälter oder Pumpen (größere Mengen an Edelstählen, Titan oder Kupferlegierungen)
- **Kabel, Elektromotoren (kurz: E-Motoren) und Stellantriebe** (größere Mengen an Kupfer),
- **Komponenten der E- und Leittechnik, bestehend aus Mittelspannungsschaltern, Schaltschränken und elektrischen Einrichtungen** (größere Mengen an Kupfer und Edelmetallen)

Da einerseits der Begriff Großkomponente nicht klar definiert ist, andererseits Kernkraftwerke über zahlreiche Systeme mit weiteren Untersystemen verfügen, wurde ein „Abschneide-Kriterium“ definiert, unterhalb welcher eine Großkomponente nicht in die detaillierte Inventarisierung aufgenommen wurde. Großkomponenten, die in der Summe (pro Redundanz) <1 t an werthaltigen Metallen enthalten, wurden von der Inventarisierung ausgeschlossen. Rückbau und Verwertung von Komponenten und Bauteilen der kerntechnischen Anlagen, die dieses Kriterium nicht erfüllen (bspw. niedrig legierter Baustahl oder Komponenten mit nur geringen Mengen an werthaltigen Metallen) werden nicht erfasst bzw. untersucht.

Bei Kabel, E-Motoren und Stellantrieben gibt es kein Abschneide-Kriterium. Aufgrund der besseren Datenlage zu diesen Komponenten konnte die gesamte Zusammensetzung der Komponente betrachtet werden. Das bedeutet das innerhalb der betrachteten Komponenten auch Materialien in die Bilanz eingingen, die nicht als werthaltige Materialien definiert wurden. Dies umfasst niedriglegierte Stähle und Kunststoffe.

Die detaillierte Erfassung der einzelnen Komponenten wird im Hauptbericht zum RecTecKA-Vorhaben (Spieth Achtnich et al. 2024) ausgewiesen. An dieser Stelle werden die ermittelten Mengen an werthaltigen Metallen angegeben. Tabelle 2-1 stellt die Mengen getrennt nach System für KKP 1 und KKP 2 dar.

**Tabelle 2-1 Übersicht über die Menge der ermittelten werthaltigen Materialien**

System	Wertstoff	Einheit	Menge KKP 1	Menge KKP 2
Großkomponenten	Kupfer	t	151,7	273,2
	Kupfernichel	t	-	29,7
	Titan	t	-	17,2
	Aluminium	t	27,4	43,2
	Edelstahl 1.3818	t	3,1	4,9
	Edelstahl 1.4002	t	-	14,3
	Edelstahl 1.4008	t	-	17,5
	Edelstahl 1.4021	t	-	110,4

<sup>1</sup> Im Zuge des Rückbaus von kerntechnischen Anlagen fallen radioaktiv kontaminierte oder aktivierte Komponenten/Reststoffe an. Nur radiologisch unbedenkliche Komponenten/Reststoffe können durch sog. Freimessen „freigegeben“ werden und einem konventionellen Verwertungspfad zugeführt werden.

System	Wertstoff	Einheit	Menge KKP 1	Menge KKP 2
	Edelstahl 1.4313	t	1,5	-
	Edelstahl 1.4317	t	-	3,0
	Edelstahl 1.4435	t	-	0,6
	Edelstahl 1.4462	t	-	0,3
	Edelstahl 1.4541	t	3,9	151,1
	Edelstahl 1.4550	t	1,0	182,9
	Edelstahl 1.4552	t	-	3,0
	Edelstahl 1.4571	t	16,9	3,1
	Edelstahl 1.4910	t	-	1442,0
Kabel	Kupfer	t	1195,2	1821,8
	PVC <sup>a</sup>	t	298,8	455,4
Motoren	Aluminium	t	102,1	161,4
	Kupfer	t	74	116,2
	Stahl <sup>a</sup>	t	258	408,5
Stellantriebe	Aluminium	t	25,4	17,4
	Kupfer	t	6,4	4,4
	Stahl <sup>a</sup>	t	95,3	65,4
Komponenten der E- und Leittechnik: Mittelspannungsschalter	Kupfer	t	0,5	0,4
	Stahl <sup>a</sup>	t	27,7	23,0
	Silber	kg	4,1	3,4
Komponenten der E- und Leittechnik: elektrische Einrichtungen	Eisenfraktion <sup>a</sup>	t	696,9	929,1
	Aluminiumfraktion	t	562,0	749,3
	Kunststofffraktion <sup>a</sup>	t	112,4	149,9
	Hüttenfraktion	t	876,7	1168,9
	<i>davon: Kupfer</i>	t	184,1	245,5
	<i>davon: Silber</i>	kg	1315	1753
	<i>davon: Gold</i>	kg	34,2	45,6
Komponenten der E- und Leittechnik: Schalt-schränke	Eisenfraktion <sup>a</sup>	t	40,9	51,1
	Edelstahlfraktion	t	1,7	2,2
	Aluminiumfraktion	t	9,0	11,3
	Messingfraktion	t	1,0	1,3
	Zinkfraktion	t	1,7	2,2
	Kupfer, hochrein	t	1,6	2,0
	Kunststofffraktion <sup>a</sup>	t	5,3	6,6
	CuFe Anker	t	0,09	0,11
	Hüttenfraktion	t	5,4	6,7
	<i>davon: Kupfer</i>	t	2,7	3,3
	<i>davon: Silber</i>	kg	3,28	2,76
	<i>davon: Gold</i>	kg	1,63	2,33
	<i>davon: Palladium</i>	kg	0,17	0,29

<sup>a</sup>) kein werthaltiges Material im Sinne des RecTeCKA-Vorhabens, aber wird als Teil der Komponenten mitbetrachtet.

### 2.2.2. Funktion und funktionelle Einheit

funktionelle Einheit dieser Studie ist die **Verwertung aller Komponenten eines Kernkraftwerkes, die die folgenden Kriterien erfüllen:**

- **Die Komponente enthält als werthaltig definierten Zielmetalle** (i.e. Kupfer und Kupferlegierungen, Aluminium, Titan, Zink, Edelstähle sowie Gold, Platin, Palladium und Silber)
- **Die Komponente ist nicht kontaminiert**

Es wird jeweils eine Bilanz für KKP 2 als Repräsentant für einen Druckwasserreaktor und eine Bilanz für KKP 1 als Repräsentant für einen Siedewasserreaktor vorgelegt. Als jeweiliger Referenzfluss für KKP 1 und KKP 2 dient das unter Tabelle 2-1 gelistete Wertstoffprofil. Darin enthalten sind auch nicht werthaltige Materialien. Eine Ausnahme stellen die Großkomponenten dar. Dabei werden ausschließlich die in der Großkomponente enthaltenen werthaltigen Metalle berücksichtigt. Die Verwertung von Materialien in Großkomponenten, die nicht als werthaltig definiert wurden (z.B. Stahl oder Kunststoffe) sind nicht Teil des Referenzflusses.

### 2.2.3. Abschneidekriterien

Es wurden keine zusätzlichen Abschneidekriterien (z.B. nach dem Massen-, Energiekriterium oder auf Grundlage der Umweltrelevanz) eingeführt.

### 2.2.4. Festlegung der Systemgrenzen

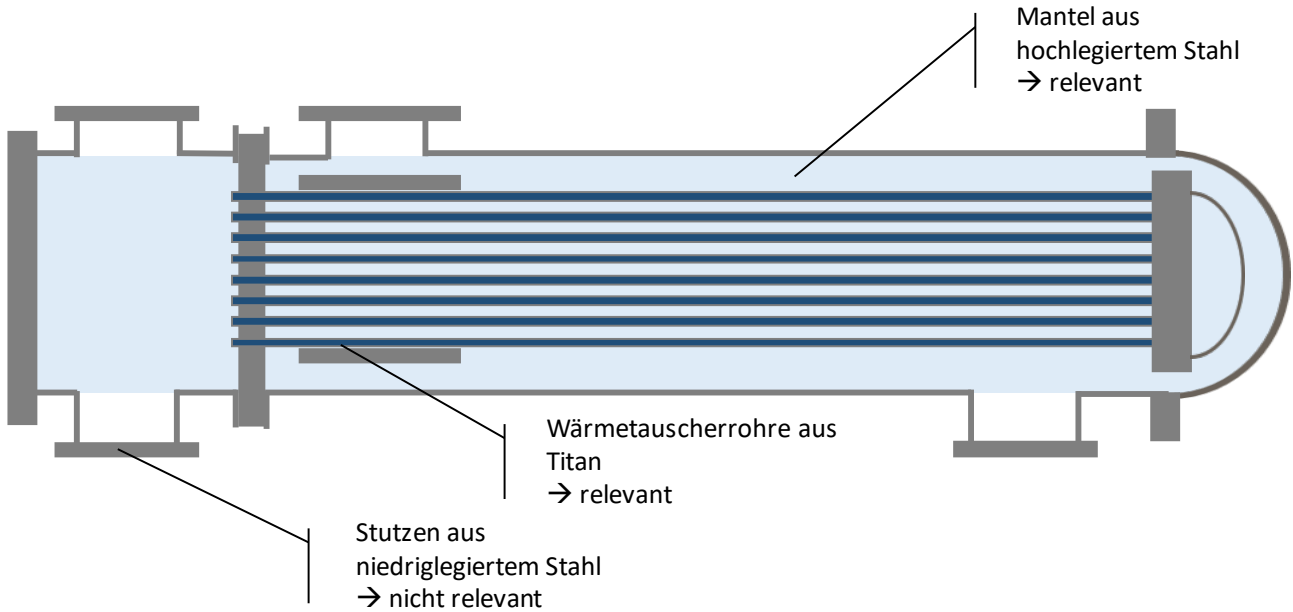
Die Betrachtung beginnt, sobald eine Komponente (welche die oben genannte Kriterien erfüllt), zurückgebaut wird und zu Abfall wird. Das „Vorleben“ der Produkte wird nicht betrachtet und die Abfallströme gehen lastenfrei in die Bilanz ein. Die Betrachtung endet mit der Erzeugung marktfähiger Rezyklate, also sobald die Metalle einer erneuten Verwendung zugeführt werden können und damit deren Abfalleigenschaft endet. Alternativ endet die Betrachtung mit der energetischen Verwertung oder der Ablagerung.

Die untersuchten Komponenten setzen sich in der Regel aus verschiedenen Metallen bzw. Legierungen zusammen. Insbesondere bei Großkomponenten stellt deren heterogene Zusammensetzung eine gewisse Schwierigkeit bei der Definition der Systemgrenzen dar. Wünschenswert wäre es die Komponente in ihrer Gesamtheit zu betrachten, also neben den werthaltigen Metallen auch weniger werthaltige Materialströme zu betrachten. Allerdings liegt die Zusammensetzung der Großkomponenten oft nur lückenhaft vor<sup>2</sup>. Die Systemgrenze wird für Großkomponenten aus diesem Grund anders gewählt. Großkomponenten werden innerhalb des Kernkraftwerks zerlegt. Wie in Abbildung 2-2 dargestellt, werden die werthaltigen Metalle von anderen Materialströmen „freigeschnitten“. Die Betrachtung zur Verwertung der anderen Materialströme ist außerhalb der Systemgrenze und nur die Verwertung der werthaltigen Stoffströme wird betrachtet.

Beispielsweise befinden sich Zielmetalle in einem Wärmetauscher im Mantel (hochlegierter Stahl – sog. Edelstahl) und in den Rohren (Titan). Umlenkleche oder Stützen aus niedriglegiertem Stahl sind dagegen nicht von Relevanz im Sinne des Vorhabens RecTecKA. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine schematische Darstellung eines Wärmetauschers.

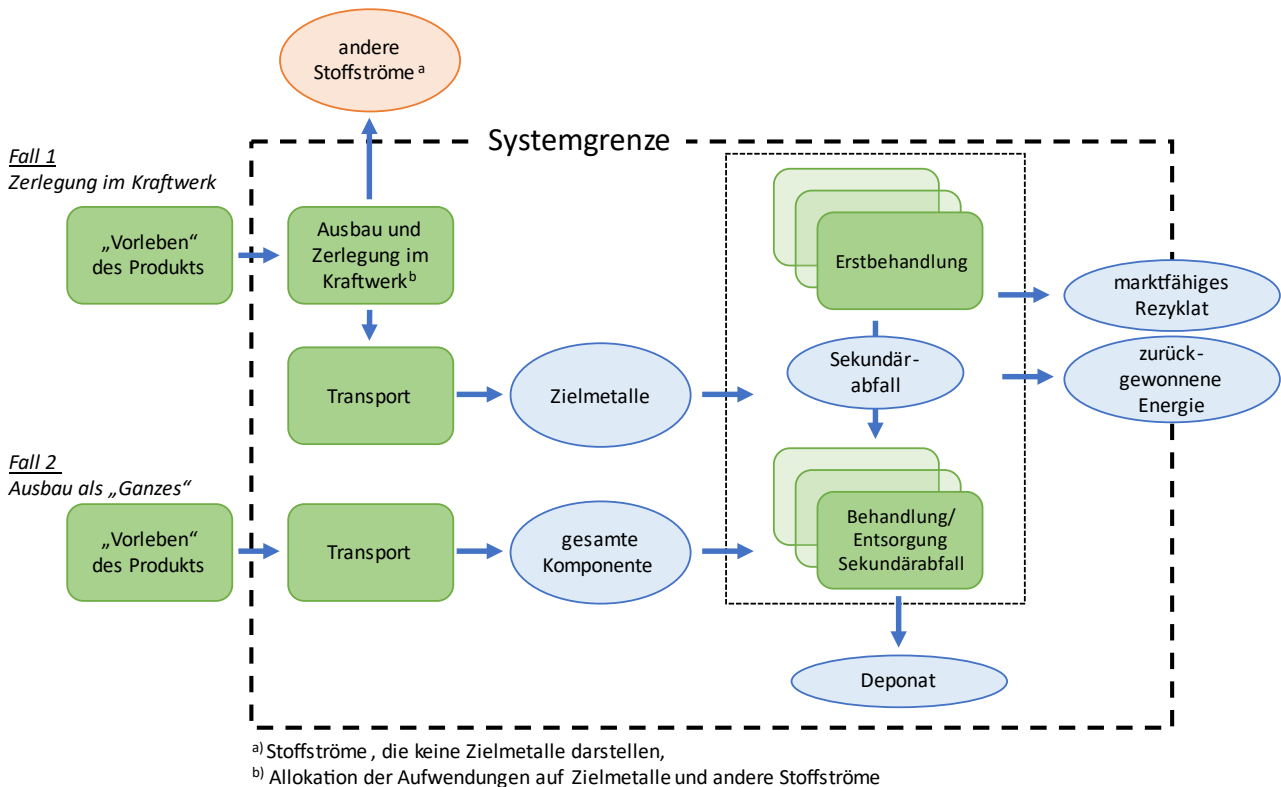
---

<sup>2</sup> Die Dokumentation der Werkstoffdatenblätter führt i.d.R. die Werkstoffe der Teilkomponenten auf aber nur teilweise das Gewicht und/oder Geometrie. Diese Informationen sind für Errichtung, Betrieb und Instandhaltung eines Kernkraftwerks (abgesehen von Aspekten der Statik) zumeist nicht von Interesse.



**Abbildung 2-1 Beispielhafte Darstellung, welche Komponenten eines Wärmetauschers relevant für die Betrachtung sind (eigene Darstellung)**

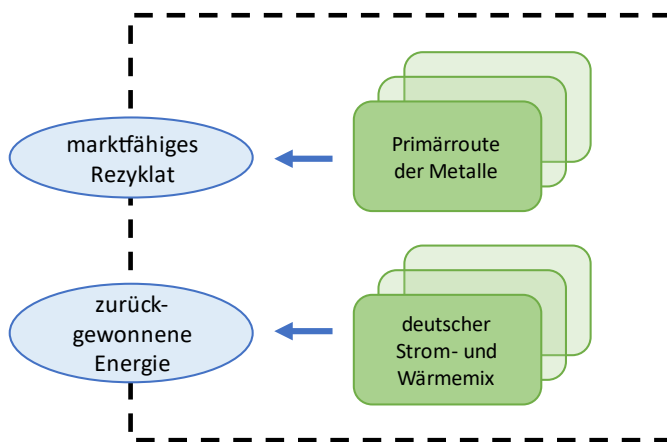
Für Kabel und Motoren sowie für Komponenten der E- und Leittechnik kann die vollständige Zusammensetzung abgeschätzt werden. Ein Freischneiden der werthaltigen Komponenten von den nicht werthaltigen Komponenten ist an dieser Stelle nicht notwendig. Die jeweiligen Komponenten werden in ihrer Gesamtheit dem Kernkraftwerk entnommen. Daran schließt sich der Verwertungspfad für die gesamte Komponente an. Abbildung 2-2 zeigt die Systemgrenze schematisch auf.



**Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Systemgrenzen**



Für zurückgewonnene Rezyklate und Energie wird entsprechend der Substitutionsmethode eine Gutschrift ausgewiesen. Für Energie wird die Gutschrift entsprechend des deutschen Strom- und Wärmemix vergeben (siehe Kapitel 3.1.1). Für zurückgewonnene Metalle werden zunächst die Lasten der Primärroute gutgeschrieben.



**Abbildung 2-3 Substitution von Rezyklaten und zurückgewonnener Energie**

### 2.2.5. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

Die Datenerhebung zur Menge und Zusammensetzung der Komponenten soll möglichst auf Primärdaten basieren. Die Bilanzierung der Verwertungspfade von Komponenten soll überwiegend durch generische Datensätze abgebildet werden.

### 2.2.6. Technologische Repräsentativität

Das Recycling von Basis- und Technologiemetallen aus Großkomponenten sowie Kabeln, Elektromotoren sowie von elektrischen Bauteilen ist etabliert. Die Verwertung aller betrachteten Komponenten bzw. Stoffströme erfolgt im großindustriellen Maßstab. Die Verwertungspfade sollen in dieser Form bilanziert werden.

### 2.2.7. Geographische Repräsentativität

Der geographische Bezugsraum der Ökobilanz soll Deutschland sein. Das Vordergrundsystem soll möglichst auf diesen Bezugsraum zugeschnitten werden.

### 2.2.8. Zeitrepräsentativität

Die Bilanz soll entsprechend des Referenzjahres 2022 bilanziert werden.

### 2.2.9. Softwareumgebung

Der Kern einer Ökobilanz ist es, Prozesse über deren gesamten Lebenszyklus zu betrachten. Entsprechend komplex und umfangreich gestalten sich die Prozessketten, wenn sämtliche Lebenszyklen eines jeden Prozessschrittes holistisch abgedeckt werden. Daher werden Ökobilanzen heute meist mittels Ökobilanzierungssoftware in Zusammenhang mit integrierten Datenbanken gerechnet.

Zur Berechnung der hier vorliegenden Studie wird auf die Softwarelösungen openLCA v. 2.0.3 (GreenDelta 2022) zurückgegriffen. Die verwendete Datenbank ist die ecoinvent-Datenbank (cut-off, v. 3.10, Stand: 2024 Wernet et al.(2016) [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#))

### 2.2.10. Umgang mit multifunktionellen Prozessen

Innerhalb der Bilanz kommt es im Vordergrundssystem nur an einer Stelle zu einem multifunktionellen Prozess bei dem eine Allokation stattfinden muss. Dabei handelt es sich um die Zerlegung der Großkomponenten. Der Aufwand für die Zerlegung muss zwischen den werthaltigen Materialien und den nicht-werthaltigen Materialien alloziert werden. Dabei wird eine physikalische Allokation (nach Masse) angewendet.<sup>3</sup> Die Aufwendungen und Gutschriften, die durch die Verwertung und Beseitigung des Abfalls bilanziert werden, werden immer zu 100 % dem jeweiligen Abfallstrom zugeschrieben. In Hintergrundprozessen wird die bereits vorhandene Allokation von ecoinvent (cut-off) verwendet.

### 2.2.11. End-of-Life Allokation

In Übereinstimmung mit dem Substitutionsansatz werden die Aufwendungen und Gutschriften, die durch die Verwertung und Beseitigung des Abfalls bilanziert werden, immer zu 100 % dem jeweiligen Abfallstrom zugeschrieben. Durch diesen Ansatz kann in Übereinstimmung mit dem Ziel der Studie dargestellt werden, welche Umweltwirkungen durch das Recycling maximal eingespart werden können. Andere Ansätze, wie die cut-off Methodik oder die „Circular Footprint Formula“ sind für diesen Zweck nicht geeignet.

### 2.2.12. Wirkungskategorien

Von den einzelnen Prozessen können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diese möglichen Auswirkungen sind bei der Schadstoffbewertung in der Wirkungsabschätzung zu berücksichtigen. Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltauswirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen und damit zusätzliche Informationen zu liefern, die in die Bewertung einfließen. Wirkungsabschätzungsergebnisse sind relative Aussagen und machen keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken.

Bezüglich der zu betrachtenden Wirkungskategorien führt die Fachliteratur aus: „Da ISO 14044 keine feste Liste von Wirkungskategorien vorgibt, nicht einmal eine Empfehlungsliste, obliegt die Auswahl der Kategorien den Erstellern der Ökobilanz.“ (Klopffer 2009)

In Anpassung an die Thematik und die bestehenden Fragestellungen wurde aus der Vielzahl verschiedenen Wirkungsabschätzungsmethoden (z.B. PEF oder ReCiPe) die CML baseline-IA (CML 2016) aus dem Methodenpack 2.3.2 in openLCA (GreenDelta 2021) ausgewählt. Die Wirkungsabschätzung zum Erderwärmungspotenzial wird über die IPCC 2021 Methode (IPCC 2023) durchgeführt, da diese aktuellere Charakterisierungsfaktoren als die Methode in CML enthält. Zusätzlich zu den genannten Kategorien wird der kumulierten Energieaufwand berechnet.

Bei allen Wirkungskategorien erfolgt die Wirkungsabschätzung auf Midpoint-Ebene, d. h. in der Mitte der Wirkungskette. Langzeit-Emissionen (long-term) werden bei der Bewertung nicht berücksichtigt.

---

<sup>3</sup> In der Konsequenz bedeutet das, dass für die Zerlegung einer bestimmten Menge werthaltigen Materials der gleiche Aufwand angesetzt wurde wie für die Zerlegung eines nicht-werthaltigen Materials.

Die problemorientierten Midpoint-Wirkungsindikatorergebnisse haben den Vorteil einer höheren Datensicherheit und enthalten keine Normierung bzw. Gewichtung. Eine Normierung mit globalen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten als optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung wird in dieser Studie nicht durchgeführt. Ebenso werden keine Ordnungs- und Gewichtungsverfahren verwendet

Folgende Midpoint-Kategorien werden für diese Studie ausgewählt:

Die Berechnung des **Erderwärmungspotenzials** (global warming potential - GWP) in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten muss die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt werden. ISO 14067 legt den Bezugszeitraum auf der 100-Jahre-Basis fest und dieser Empfehlung wird in dieser Studie gefolgt.

Eine **Versauerung** kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich dafür sind saure oder säurebildende Emissionen. Die Berechnung des Versauerungspotenzials (acidification potential - AP) erfolgt in Form von SO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

Die **Eutrophierung** steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Das Eutrophierungspotenzial (Eutrophication potential - EP) von Nährstoffemissionen wird durch die Aggregation von Phosphat (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>)-Äquivalenten ermittelt.

Die Kategorie **Bildung von photochemischem Ozon** (photochemical ozone formation - POF) bezieht sich auf den Prozess, bei dem bodennahes Ozon in der Atmosphäre durch chemische Reaktionen entsteht. Diese laufen unter dem Einfluss von Sonnenlicht ab und involvieren in der Regel Vorläufersubstanzen wie Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) oder flüchtige organische Verbindungen (VOCs). Bodennahes Ozon kann schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Pflanzen und die Umwelt haben. Es trägt zur Bildung von sogenannten "Sommer-Smog" bei, der vor allem in urbanen Gebieten auftreten kann. Das POF Potenzial wird zu kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Äquivalenten aggregiert.

Die **Verknappung abiotischer Ressourcen** (Abiotic depletion potential (ultimate reserves) - ADP) bezieht sich auf die potenzielle Erschöpfung oder begrenzte Verfügbarkeit von Mineralien und Metallen. Umweltauswirkungen entstehen durch deren Abbau, den Verbrauch und die Erschöpfung. Die Verknappung von Mineralien und Metallen kann nicht direkt mit einem Umweltschaden in Verbindung gebracht werden. Da diese Ressourcen jedoch endlich und nicht erneuerbar sind, kann ihre Verknappung zu verstärktem Wettbewerb, höherem Energieverbrauch und damit zu einem erhöhten Risiko der Umweltzerstörung führen. Die Ressourcennutzung wird in diesem Fall in kg Antimon-Äquivalenten (Sb-Eq) gemessen.

Der **Verbrauch an energetischen Ressourcen** wird über den Kumulierten Energie-Aufwand (KEA) abgebildet. KEA ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. Über den KEA können alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte ausgewiesen werden. Der KEA wird in MJ angegeben. Zur Berechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt.

Auf weitere Kategorien wird in dieser Studie verzichtet. Tabelle 2-2 fasst die Ausschlusskriterien für weitere Wirkungskategorien zusammen.

**Tabelle 2-2**      **Ausschlusskriterien für Wirkungskategorien, die nicht innerhalb dieser Studie berücksichtigt wurden**

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Ausschlusskriterium</b>
Verknappung von fossilen Ressourcen	Die Verknappung von fossilen Ressourcen korreliert sehr stark mit dem GWP. Es wird argumentiert, dass durch die Betrachtung der Verknappung der fossilen Ressourcen kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn generiert wird.
Öko- und Humantoxizität	Die Wirkungsabschätzung der Toxizität setzt weiterhin auf lineare Zusammenhänge zwischen Emissionen und Wirkungen. Die Ergebnisse dieser Wirkungskategorien sind aus diesem Grund nicht ausreichend belastbar, weshalb fundierte Aussagen auf Basis der schlechten Datenlage bzw. Methodik nicht möglich sind.
Abbau der stratosphärischen Ozonschicht	Die Freisetzung ozonzersetzender Stoffströme kann keinem Prozess des Vordergrundsystems zugeordnet werden und findet im betrachteten System nicht in einer relevanten Größenordnung statt. Die Relevanz der entsprechenden Wirkungskategorie ist für diese Studie somit nicht gegeben ist daher für die Betrachtung dieser Studie nicht relevant.
Ionisierende Strahlung	Innerhalb des Vordergrundsystems wird keine relevante Menge hochenergetischer Strahlung freigesetzt. Die Relevanz der entsprechenden Wirkungskategorie ist für diese Studie somit nicht gegeben.

**2.2.13. Methoden der Auswertung**

Die Auswertung wird entsprechend der in ISO 14040 und ISO 14044 geforderten Bestandteile durchgeführt. Diese umfasst:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungsphasen der Ökobilanz;
- eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt;
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

**2.2.14. Einschränkungen und Verwendung**

Einschränkungen der Studie ergeben sich durch die enge Abgrenzung von Ziel und Untersuchungsrahmen. Lediglich Komponenten, die werthaltige Metalle enthalten werden betrachtet. Zusätzlich, werden Großkomponenten von der Betrachtung ausgeschlossen, die <1 t werthaltige Materialien enthalten.

Die Studie soll den Nutzen von Recycling aufzeigen und quantifizieren. Dies kann unter anderem bei Freigabeüberlegungen berücksichtigt werden

**2.2.15. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts**

Die Art und der Aufbau des Berichts orientieren sich an den vier Phasen einer Ökobilanz (Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Auswertung). Nach Abschluss des Projekts soll dieser Bericht als Ganzes publiziert werden.

### **2.2.16. Konformität und kritische Prüfung**

Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040 und ISO 14044 durchgeführt. Da es sich um eine Ökobilanz handelt, die zur Publikation vorgesehen ist, wurde, wie in den Normen empfohlen, eine kritische Prüfung nach ISO TS 14071 durch einen unabhängigen Gutachter durchgeführt. Prof. Dr. Matthias Finkbeiner kann auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen in den methodischen Anforderungen an Ökobilanzen und der Abfallwirtschaft, insbesondere Recycling, verweisen. Die kritische Prüfung wurde als unabhängiger Gutachter und nicht als Vertreter oder im Auftrag der TU Berlin erstellt. Die Prüfung erfolgte gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 begleitend zur Studie. Das, die Prüfaussage enthaltende, Gutachten wird in den Anhang des Berichtes aufgenommen. Eine Validierung des LCI-Modells und der verwendeten Daten war nicht Gegenstand der kritischen Prüfung.

### 3. Sachbilanz

Bei der Verwertung von Komponenten aus kerntechnischen Anlagen wird innerhalb der Modellierung auf verschiedene Prozesse und Module zurückgegriffen. Im ersten Teil der Sachbilanz werden Modellierungsansätze:

- zur Primärroute der Metalle
- zum Metallrecycling,
- zur energetischen Verwertung,
- zur Energiebereitstellung und
- zu Transportdistanzen

beschrieben.

Im zweiten Teil der Sachbilanz werden die Inputmengenströme getrennt nach:

- Großkomponenten,
- Kabel, E- Motoren und Stellantriebe und
- Komponenten der E- und Leittechnik

zusammengetragen.

Im letzten Teil werden die spezifischen Prozesse zur Verwertung der einzelnen Komponenten dargestellt. Abschließend soll eine Einschätzung zur Datenqualität gegeben werden.

#### 3.1. Modellierungsansätze

##### 3.1.1. Datengrundlage der Primärroute von Metallen

Um Gutschriften für zurückgewonnene Metalle zu erteilen, wurden die Lasten der Primärroute für alle relevanten Metalle zusammengetragen. Die zugehörigen Datensätze wurden der ecoinvent Datenbank entnommen. Hierzu wurden die Prozesse herangezogen, die den globalen Marktmix abdecken (angegeben durch das Suffix „GLO“ im Prozessname). Die in den Marktmixen enthaltenden Anteile aus Sekundärrouten wurden dabei vollständig auf die Primärrouten umgestellt, um das maximale Potenzial zu ermitteln.

**Kupfer:** Der globale Marktmix für Kupfer wird in ecoinvent über den Prozess „*market for copper, cathode | copper, cathode - GLO*“ abgebildet. Soll lediglich die Primärroute dargestellt werden, werden Abfallbehandlungsprozesse, die in der Bereitstellung von Kupferkathodenmaterial enden, aus dem Marktmix subtrahiert.

**Zink:** Der ecoinvent Prozess „*market for zinc - GLO*“ enthält nur Primärrouten. Daher wird dieser Prozess ohne eine Anpassung übernommen.

**Messing:** Messing kommt in der Studie als Cu70Zn30 und Cu60Zn40 Legierung vor. Damit wird für die Primärroute 70 Gew.-% bzw. 60 Gew.-% Kupfer (siehe Kupfer) und 30 Gew.-% bzw. 40 Gew.-% Zink (siehe Zink) angesetzt. Diese werden um Materialverluste korrigiert, die bei der Messingproduktion mit 1 % abgeschätzt werden. In Anlehnung an Classen et al. (2009) bzw. dem ecoinvent

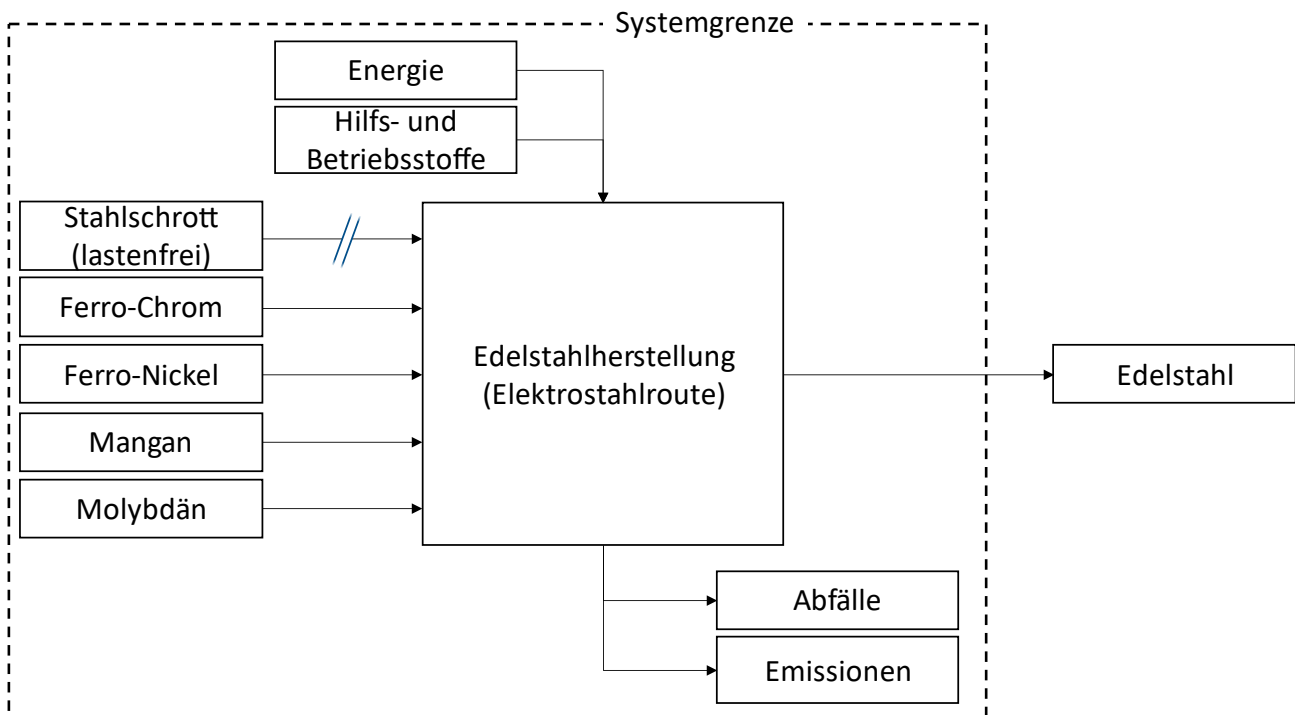
Prozess „brass production | brass“ werden Energieverbräuche, Kapitalgüter sowie Abfälle und Emissionen im Prozess betrachtet. Abweichend von Classen et al. (2009) wird bzgl. des Energieverbrauchs zum Einschmelzen die reine Wärmemenge für die Erwärmung bzw. Schmelzenthalpie um Wärmeverluste korrigiert. Diese wurden konservativ mit 50 % (=Verdopplung des Wärmebedarfs) angesetzt. Grundlage dieser Annahme sind Energieverluste, die der Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e. V. für elektrische beheizte Schmelzöfen angibt (bdguss 2013).

**Aluminium:** Die Datengrundlage für die Primärroute kann aus ecoinvent abgeleitet werden. Nach ecoinvent wird der globale Marktmix der Primärroute über die in Tabelle 3-1 angegebenen Prozesse und Anteile berechnet.<sup>4</sup>

**Tabelle 3-1 Prozesse und Mengenanteile bei der Modellierung der Primärroute von Aluminium in ecoinvent**

Fluss	Menge	Einheit	Prozessname
aluminium, primary, ingot	0.78	kg	market for aluminium, primary, ingot - RoW
aluminium, primary, ingot	0.14	kg	market for aluminium, primary, ingot - IAI Area, EU27 & EFTA
aluminium, primary, ingot	0.08	kg	market for aluminium, primary, ingot - IAI Area, North America

**Hochlegierte Stähle:** Hochlegierte Stähle (bzw. umgangssprachlich Edelstähle) werden über die Elektrostahlroute hergestellt. Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 3-1 das Prozessschema der Edelstahlherstellung dargestellt.



<sup>4</sup> An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass die Zusammensetzung von Sekundärmaterial aufgrund von darin enthaltenen Legierungselementen anders als Reinaluminium aus der Primärroute ist. Es werden jedoch alle Sorten von Aluminium, auch legiertes Aluminium, in der Industrie benötigt. Daher wird argumentiert, dass Primäraluminium Sekundäraluminium im Verhältnis 1:1 ersetzt (eine Tonne Sekundäraluminium ersetzt eine Tonne Primäraluminium).



### Abbildung 3-1 Prozessschema der Edelstahlherstellung (eigene Darstellung)

Edelstähle weisen neben Stahl verschiedenste Legierungselemente auf. Im Zusammenhang mit den im Projekt betrachteten Stählen sind Chrom, Nickel, Mangan und Molybdän mengenmäßig und auch ökobilanziell relevante Legierungselemente. Die Primärrouten der Legierungselemente werden über folgende ecoinvent-Prozesse abgebildet:

- Chrom: *“market for ferrochromium, high-carbon, 68 % Cr - GLO”*
- Nickel: *“market for ferronickel - GLO”*
- Mangan: *“market for manganese - GLO”*
- Molybdän: *“market for molybdenum - RER”*

Der Eisenanteil im Edelstahl wird einerseits über die in Ferrochrom und Ferronickel enthaltenen Mengen gedeckt, andererseits über Stahlschrott. Stahlschrott geht lastenfrei in das System und wird nicht über die Primärroute bereitgestellt. Lasten und Aufwendungen für den Prozess der Edelstahlherstellung wurden an den Prozess *„steel production, electric, chromium steel 18/8“* angelehnt. Je nach Edelstahlsorte wurden hierbei die Anteile der Legierungselemente angepasst. Energieaufwendungen, Emissionen und Abfallströme wurden nicht spezifisch für die verschiedenen Edelstahlsorten angepasst.

**Niedriglegierter Stahl:** Da niedriglegierter Stahl als Begleitelement in den betrachteten Komponenten auftauchen kann, muss auch hierfür die Primärroute bilanziert werden. In der Primärroute wird niedriglegierter Stahl über die Hochofenroute hergestellt. Bei der Primärstahlerzeugung wird zunächst im Hochofen aus Eisenerz und Koks Roheisen erzeugt und anschließend im Konverter zu Rohstahl verarbeitet. Im Konverter wird Stahlschrott als "Kühlschrott" eingesetzt. Das bedeutet, dass immer ein Teil des Stahlschrotts im Primärmaterial enthalten ist. Die Primärproduktion wurde aus dem ecoinvent-Prozess *“market for steel, low-alloyed - GLO”* abgeleitet. Der Prozess wurde dahingehende korrigiert, dass nur die Hochofenroute berücksichtigt wird.

**Titan:** Die Primärroute für Titan wird über den Prozess *„titanium production – GLO“* abgedeckt.

**Nickelsulfat:** Die Primärroute für Nickelsulfat wird über den Prozess *„market for nickel sulfate–GLO“* abgedeckt.

**Gold:** Die Primärroute von Gold wird über den Prozess *„market for gold – GLO“* abgedeckt. Da nur die Primärroute dargestellt werden soll, werden Abfallbehandlungsprozesse, die in der Bereitstellung von Gold enden, nicht betrachtet.

**Silber:** Die Primärroute von Silber wird über den Prozess *“market for silver - GLO”* abzüglich der Abfallbehandlungsprozesse abgebildet.

**Palladium:** Die Primärroute von Palladium wird über den Prozess *“market for palladium - GLO”* abzüglich der Abfallbehandlungsprozesse abgebildet.

#### 3.1.2. Datengrundlage des Metallrecyclings

**Kupfer:** Die Art wie Kupfer recycelt wird hängt davon ab, in welcher Qualität Kupferschrotte vorliegen. In der niedrigsten Qualität durchlaufen kupferhaltige Schrotte mit einem Kupferanteil >50 Gew.-% eine vollständige pyrometallurgische Aufbereitung<sup>5</sup>. Die Schritte umfassen das Einschmelzen, die

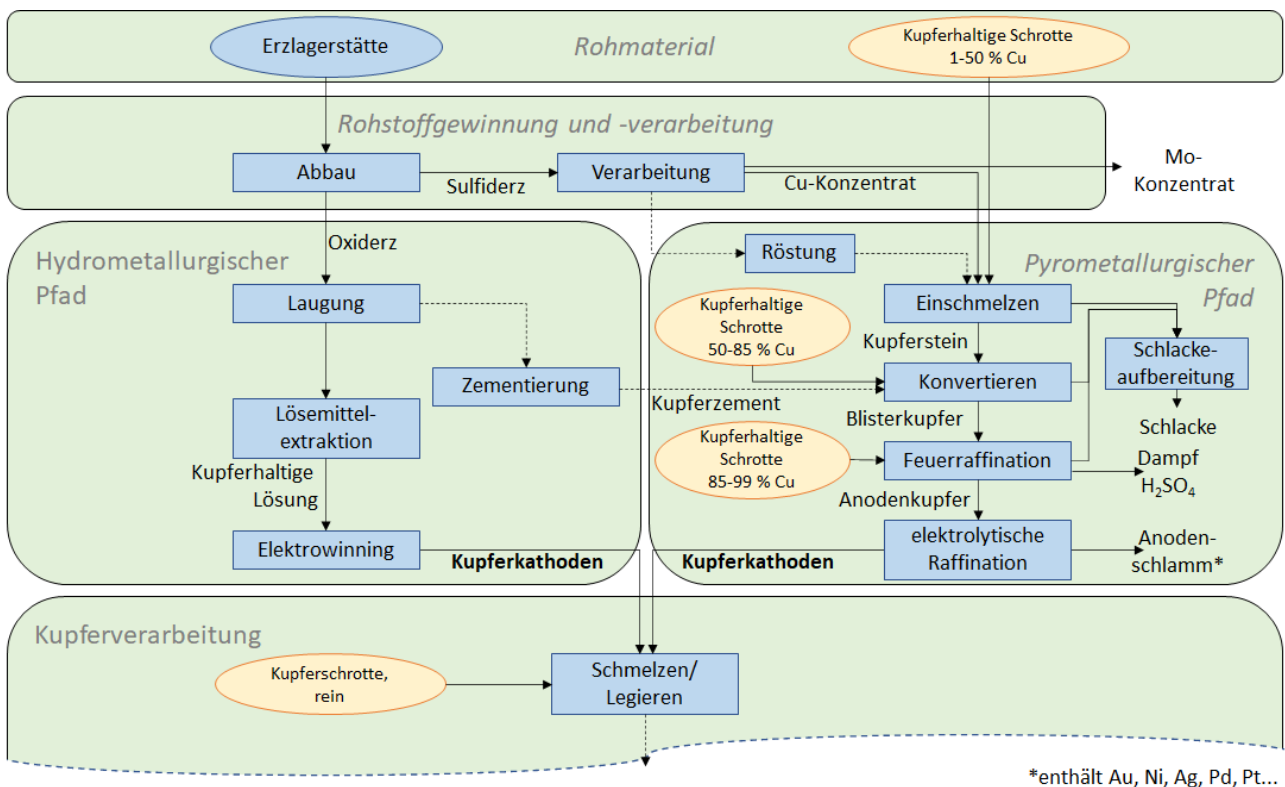
<sup>5</sup> Ebenso wie Kupferkonzentrat, welches über die Primärroute gewonnen wird



Behandlung im Konverter, die Feuerraffination im Anodenofen (bestehend aus Oxidation, Reduktion und Anodenguss). An die pyrometallurgische Aufbereitung schließt sich die elektrolytische Raffination an. Hat das Ausgangsmaterial höhere Kupferanteile kann es später entlang der Prozesskette eingesetzt werden. Kupferhaltige Schrotte mit einem Kupfergehalt zwischen 50-85 Gew.-% können direkt im Konverter eingesetzt werden. Bei einem Kupfergehalt zwischen 85-99 Gew.-% können Kupferschrotte direkt der Feuerraffination zugeführt werden.

Zielprodukt der pyrometallurgischen Aufbereitung und der elektrolytischen Raffination ist zunächst Kathodenkupfer. Zwischen Kathodenkupfer aus Primär- und Sekundärmaterial gibt es keine Qualitätsunterschiede. Weiteres Produkt ist Anodenschlamm. Abhängig vom Ausgangsmaterial enthält der Anodenschlamm werthaltige Metalle, wie Nickel, Gold, Silber, Platin oder Palladium. Durch eine weitere Aufbereitung können diese Metalle zurückgewonnen werden. Diese Aufbereitung wird weiter unten im Text im Zusammenhang mit der Rückgewinnung von Edelmetallen beschrieben.

Für Neuschrotte oder EoL Kupfer ohne Legierungselemente bzw. Verschmutzung ist keine nennenswerte Aufbereitung notwendig. Dieser Stoffstrom kann direkt als Kathodenkupfer im Schmelzprozess eingesetzt werden. Abbildung 3-2 zeigt das Prozessschema zur Kupferaufbereitung und an welcher Stelle Kupferschrotte eingesetzt werden.



**Abbildung 3-2 Prozesskette der Kupferproduktion (eigene Darstellung nach Kupferverband e.V. (2012) und Kupferverband e.V. (2019))**

In ecoinvent steht für die Aufbereitung von kupferhaltigen Schrotten lediglich der Prozess „treatment of copper scrap by electrolytic refining | copper, cathode – RER zur Verfügung. Die Prozessbeschreibung<sup>6</sup> zeigt, dass hier die vollständige pyrometallurgische Aufbereitungskette modelliert wird. Damit ist der Prozess für die Behandlung von kupferhaltigen Schrotten <50 Gew.-% Kupfer geeignet. Da

<sup>6</sup> Der Datensatz umfasst die Sammlung und Behandlung von Kupferschrott, das Schmelzen des Schrotts im Hochofen, die Umwandlung von Schwarzkupfer im Konverter, die Raffination des umgewandelten Kupfers in einem Anodenofen und die hydrometallurgische Behandlung des Schrotts.

der ecoinvent Prozess aber nicht in die jeweiligen Teilschritte untergliedert ist, ist eine Disaggregation des Prozesses nicht möglich. Daher wird dieser Prozess auch für Kupferschrotte mit höheren Kupfergehalten angesetzt. Bei der Modellierung handelt sich damit um einen konservativen Ansatz. Der Prozess wird dahin angepasst, dass der deutsche Strommix (siehe 3.1.4) hinterlegt wird. Hinsichtlich der Ausbeute von Kupfer wird mit einem Verlust von 5 Gew.-% gerechnet (Buchert et al. 2022).

Für die Aufbereitung von elektrischen und elektronischen Altgeräten steht weiterhin der ecoinvent Prozess „treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining | copper, cathode – SE“ zur Verfügung. Dieser wird angesetzt, wenn Kupferschrotte werthaltige Begleitelemente wie Gold, Silber oder Palladium enthalten, da innerhalb des Prozesses schon eine Allokation zwischen den Zielmetallen vorgenommen wurde. Auch hier wird der deutsche Strommix hinterlegt. Auch hier wird bei der Aufbereitung mit einem Verlust von 5 Gew.-% bezogen auf die Eingangsmenge an Kupfer gerechnet (Sphera Solutions, Inc. 2024).

Letztlich wird für hochreines Kupfer, wie beispielsweise aus Kupferkabeln, keine Kupferaufbereitung angesetzt. Hier zeigt beispielsweise der ecoinvent Prozess „treatment of used cable | copper, cathode - GLO“ das gleiche Vorgehen.

**Zink:** Bei Zinkschrott, welcher innerhalb dieser Studie dem Recycling zugeführt wird, handelt es sich um reines Zink. Entsprechend wird hier nur der Aufwand für das Einschmelzen von Zink angesetzt. Die Aufwände für das Einschmelzen orientieren sich an Classen et al. (2009). Die Wärmeverluste werden konservativ mit 50 % angesetzt. Dadurch ergibt sich ein Energiebedarf von ~0,5 MJ/kg Zink. Die Materialverluste werden mit 1 Gew.-% bezogen auf das Inputmaterial festgelegt.

**Messing:** Bei Messing handelt es sich ebenfalls um hochreinen Schrott. Ähnlich wie bei Zink wird der Ansatz von Classen et al. (2009) gewählt. Der Wärmebedarf für das Einschmelzen wird mit einem Wärmeverlust von 50 % beaufschlagt. Somit ergibt sich ein Wärmebedarf in Höhe von ~0,85 MJ/kg. Die Materialverluste werden mit 1 Gew.-% abgeschätzt.

**Aluminium:** Neuschrotte aus Aluminium weisen eine definierte Qualität auf und werden in sog. „Remelted“ zu Aluminium-Knetlegierungen aufbereitet. Für post-consumer Schrotte aus Aluminium gilt, dass diese in der Regel von den so genannten Refinern aufgekauft und meist zu Gusslegierungen, auch Gießereilegierungen eingeschmolzen werden (European Aluminium 2018). Für alle Aluminiumschrotte wird in dieser Studie gleichermaßen die Aufbereitung mittels Refiner angesetzt. Der ecoinvent Prozess „treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner | aluminium, cast alloy – RER“ wird für diesen Zweck herangezogen. Im Prozess wird der deutsche Strommix angesetzt. Die Verluste bezogen auf die Inputmenge an Aluminium wird mit 5 Gew.-% festgesetzt (Buchert et al. 2022).

**Hochlegierte Stähle:** Die Aufbereitung von Edelstahlschrott ist grundsätzlich identisch zu der Herstellung von Edelstahl über die Primärroute (siehe Kapitel 3.1.1). Lediglich die Inputströme an Ferrochrom, Ferronickel, Mangan und Molybdän werden nicht über die Primärroute bereitgestellt. Die Aufwendungen des Edelstahlrecyclings wurde daher ebenfalls über den Prozess „steel production, electric, chromium steel 18/8 - RER“ abgedeckt. Im Prozess wurde der deutsche Strommix hinterlegt. Energieaufwendungen, Emissionen und Abfallströme wurden je nach Edelstahlsorte nicht separat angepasst. Die Verluste bezogen auf die Inputmenge an Edelstahl wird beim Recyclingprozess mit 5 Gew.-% festgesetzt (Buchert et al. 2022).

**Niedriglegierte Stähle:** Die Aufbereitung von Stahlschrott erfolgt über die Elektrostahlroute. Der ecoinvent Prozess „steel production, electric, low-alloyed“ wurde für diesen Zweck adaptiert. Der

deutsche Strommix wurde hinterlegt. Die Verluste bei der Aufbereitung wurden nach Haupt et al. (2018) [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#) mit knapp 10 % angesetzt<sup>7</sup>.

**Titan:** Bei Titan handelt es sich im Rahmen der Studie um Titan, Grade 1. Damit eignet es sich im Prinzip wieder für eine direkte Wiederverwendung nach einem Einschmelzen (Takeda et al. 2020) und ein Downcycling zu Ferrotitan o.ä. kann umgangen werden. Nachecoinvent beträgt der Energiebedarf im Vakuumbogen (vacuum arc remelting) dafür 1 kWh/ kg Titan. Kritisch zu betrachten ist bei dieser Herangehensweise der geringe Anlagenbestand für die Verwertung von Titan. Hochreiner Titanschrott, wie er beispielsweise im Flugzeugbau anfällt wurde in der Vergangenheit für eine Verwertung nach Russland oder in die USA verbracht. Seit kurzem gibt es mit dem Werk EcoTitanium in Frankreich aber auch einen Titanrecycler in Europa (Europäische Investitionsbank 2018). Es wird angenommen, dass zurückgebautes Titan in Frankreich eingesetzt wird und zu Titan recycled wird. Der Materialverlust wird mit 0,5 % angesetzt.

**Kupfernickel:** Kupfernickel wird über eine Kupferhütte verarbeitet. Es durchläuft die pyrometallurgische Aufbereitungsrouten. Kupfer wird als Kathodenmaterial zurückgewonnen. Nickel befindet sich als Nickelsulfat im Anodenschlamm. Da Nickelsulfat als marktfähiges Produkt innerhalb vonecoinvent gutgeschrieben werden kann, wird die Recyclingkette an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die Verluste bei der Aufbereitung werden mit 5 % gleichermaßen für Kupfer und Nickelsulfat angesetzt.

**Edelmetalle:** Edelmetalle aus elektrischen und elektronischen Altgeräten werden wie im Absatz zum Kupferrecycling beschrieben zunächst in einer Kupferhütte über den pyrometallurgischen Pfad aufbereitet. Danach befinden sich die Edelmetalle im Anodenschlamm. Die Edelmetallgewinnung erfolgt über eine elektrolytische Raffination. Dieecoinvent Prozesse „treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction | gold/silver/palladium – SE“ werden für diesen Zweck angesetzt. Die Ausbeuten für Edelmetalle werden mit 98 % angesetzt (Sphera Solutions, Inc. 2024).

### 3.1.3. Datengrundlage der energetischen Verwertung von Abfällen

Im Rahmen dieser Studie wird eine Verbrennung von Kunststoffen in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) und in einem Zementwerk modelliert. Lastenseitig werden die direkten Emissionen der Verbrennung sowie Hilfs- und Betriebsstoffe (z.B. Ammoniakwasser zur Entstickung oder Kalkmilch für die Entschwefelung des Rauchgases) bilanziert. Gutschriften werden für die bereitgestellte Energie vergeben. Abbildung 3-3 zeigt das Prozessschema der energetischen Verwertung.

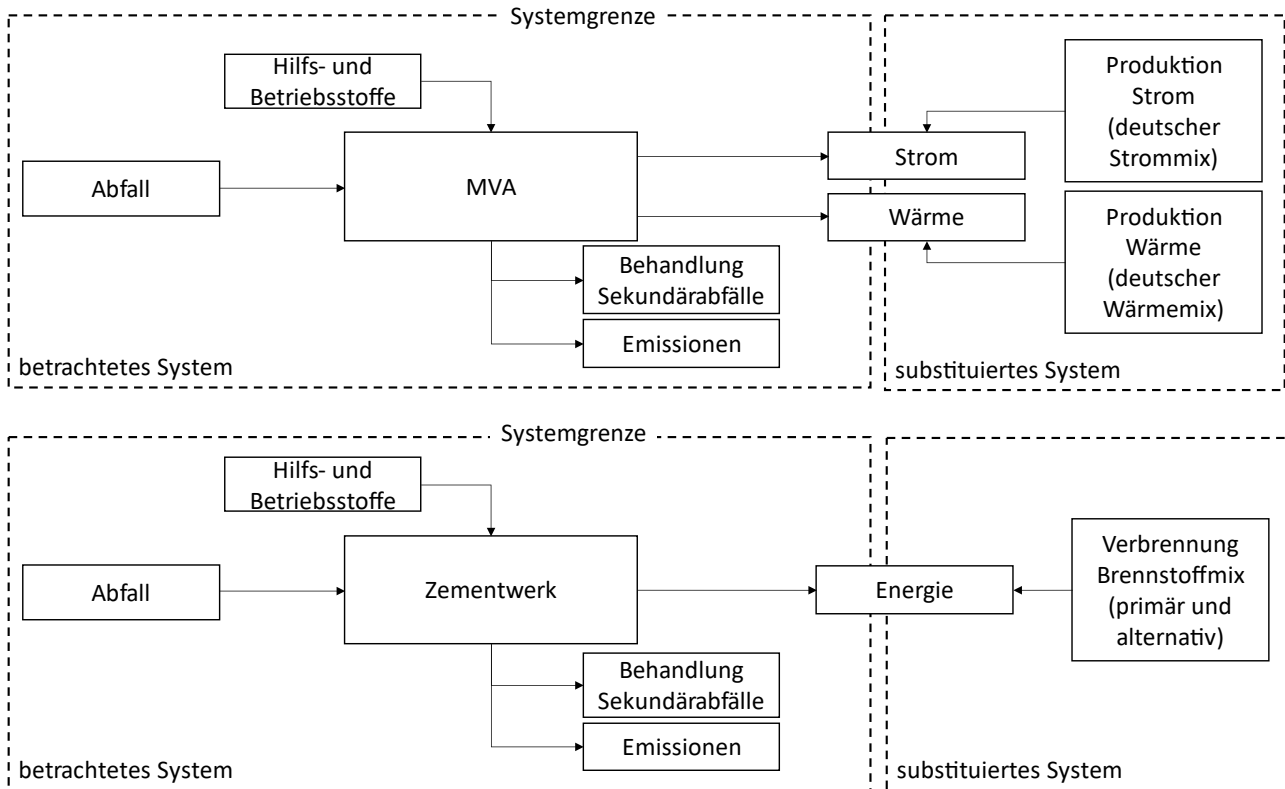
Für beide Anlagentypen basiert die Modellierung zur energetischen Verwertung von Abfällen auf der Elementarzusammensetzung der Abfallströme. Aus der Elementarzusammensetzung lassen sich Heizwert, Rauchgasvolumen und -zusammensetzung sowie die Menge an benötigten Betriebsmitteln und Sekundärabfällen (Stäube/Schlacken) berechnen. Da die Verbrennung von Abfällen in dieser Studie nur eine sehr untergeordnete Rolle einnimmt, soll auf eine ausführliche Beschreibung des Modells an dieser Stelle verzichtet werden und es wird auf Bulach et al. (2022) verwiesen.

Innerhalb einer MVA wird Strom und Wärme produziert, die gegenüber dem deutschen Strom- und Wärmemix gutgeschrieben wird (siehe auch Kapitel 3.1.4). Für MVA werden nach Flamme et al. (2018) folgende Nettowirkungsgrade (bezogen auf den Heizwert des Abfalls) angesetzt:

---

<sup>7</sup> Nach Haupt et al. (2018) werden aus 1,105 kg Stahlschrott wird 1 kg Stahl erzeugt [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#)

- Thermisch: 33,3 %
- Elektrisch: 11,3 %



**Abbildung 3-3 Prozessschema der energetischen Verwertung in einer MVA und einem Zementwerk (eigene Darstellung)**

Für die energetische Verwertung im Zementwerk wird angenommen, dass Abfälle den Brennstoffmix im Zementwerk entsprechend des jeweiligen Heizwertes ersetzen. Der Brennstoffmix kann vdz (2023) und vdz (2022) entnommen werden. Tabelle 3-2 stellt den Brennstoffmix der Zementwerke getrennt nach fossilen und alternativen Brennstoffen für das Jahr 2022 zusammen. In der Modellierung eine Gutschrift gegenüber dem gesamten Brennstoffmix (primäre und alternative Brennstoffe).

**Tabelle 3-2 Brennstoffmix der deutschen Zementwerke 2022**

Brennstoff	Anteil (bezogen auf den Energiegehalt)
<b>Fossile Brennstoffe</b>	<b>28,4 %</b>
Braunkohle	72,9 %
Erdgas	2,5 %
Heizöl	3,2 %
Petrolkoks	4,9 %
Steinkohle	16,9 %
<b>Alternative Brennstoffe</b>	<b>71,6%</b>
Altreifen	6,1 %
Altöl	1,8 %
Zellstoff/PPK	0,5 %
Kunststoff	30,1 %
SBS	31,2 %

Brennstoff	Anteil (bezogen auf den Energiegehalt)
Tiermehl/-fett	3,3 %
EBS	18,7 %
Lösungsmittel	4,4 %
Klärschlamm	3,1 %
Altholz	0,1 %
Sonstige	0,8 %

### 3.1.4. Datengrundlage der Energiebereitstellung

#### Strommix

Die rasche Veränderung des deutschen Strommix durch die Energiewende hat über die letzten Jahre dazu geführt, dass der in ecoinvent hinterlegte Strommix trotz regelmäßiger Updates nicht dem aktuellen Stand entspricht. Aus diesem Grund wird der Prozess des deutschen Strommix inklusive Umspannungsverlusten nachmodelliert. Die Zusammensetzung des modellierten Mix und die eingesetzten Anteile der jeweiligen Anlagentypen sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Zusatzaufwände pro bereitgestellter kWh gerechnet werden. Dies gilt auch für die Umspannungsverluste. Da in ecoinvent kein Umwandlungsprozess Nieder- auf Mittelspannung vorhanden ist, wurde für die Solarenergie der gleiche Umwandlungsverlust wie für Hoch- auf Mittelspannung angenommen. Aus diesem Grund wird der Umspannungsaufwand auf alle Stromerzeugungsanlagen mit Hoch- und Niederspannung angewandt.

**Tabelle 3-3 Deutscher Strommix im Jahr 2022 (Fraunhofer ISE 2022) und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen (eigene Berechnung)**

Energieträger	Anteil am Strommix
Abfall	1,6 %
Biogas	5,0 %
Biomasse	2,5 %
Braunkohle	18,4 %
Erdgas	13,0 %
Kernenergie	5,6 %
Öl	0,9 %
PV	10,1 %
Steinkohle	9,9 %
Wasser	2,8 %
Wind, offshore	4,2 %
Wind, onshore	16,6 %
Importe <sup>a</sup>	9,5 %
<b>Summe</b>	<b>100,0 %</b>
Spezifische CO <sub>2</sub> -Eq	485,2 g CO <sub>2</sub> -Eq/kWh <sub>el</sub>

<sup>a</sup>) In Deutschland belief sich die Stromerzeugung im Jahr 2022 auf 544 TWh, davon wurden 75,8 TWh exportiert und 49,3 TWh importiert. Der Stromverbrauch beläuft sich im Jahr 2022 damit auf 517,2 TWh. Die Importe beziehen sich auf den Stromverbrauch

## Wärmemix

Der deutsche Wärmemix wurde so modelliert, dass er den Wärmemix aus (i) Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und Verarbeitendes Gewerbe, (ii) Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) sowie (iii) der private Haushalte enthält. Die jeweiligen Anteile am Wärmeenergieverbrauch konnten den AG Energiebilanzen (2023) entnommen werden. Der Verbrauch von Strom, der ggf. für Wärmebereitstellung genutzt wurde, konnte nicht berücksichtigt werden. Tabelle 3-4 zeigt die Energieverbräuche nach Sektoren im Jahr 2022.

**Tabelle 3-4 Anteiliger Wärmeenergieverbrauch nach Sektoren (ohne Strom) im Jahr 2022 in Deutschland nach AG Energiebilanzen (2023)**

Sektor	Anteil am Wärmeverbrauch
Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und Verarbeitendes Gewerbe	71,8 %
GHD	7,7 %
Private Haushalte	20,5 %
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>

Die Zusammensetzung der Wärmeenergie konnte ebenfalls aus den AG Energiebilanzen (2023) entnommen werden. Bei der Modellierung wurde berücksichtigt, dass ein Teil der Wärme über Kraft-Wärme-Kopplung und ein Teil über Heizkessel bereitgestellt wurde. Die Zusammensetzung der Fernwärme wurde über Daten der AG Fernwärme (2023) modelliert. Tabelle 3-5 zeigt die Zusammensetzung des Wärmemix nach Sektoren und die spezifischen CO<sub>2</sub>-Eq Emission pro MJ thermische Energie.

**Tabelle 3-5 Anteile der Energieträger am Wärmemix (Endenergieverbrauch) nach Sektoren (ohne Strom) im Jahr 2022 in Deutschland nach AG Energiebilanzen (2023) und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen (eigene Berechnung)**

Energieträger	Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und Verarbeitendes Gewerbe <sup>a</sup>	GHD	Private Haushalte
Abfall	4.7 %		
Abwärme	0.2 %		
Braunkohle	5.0 %		0.5 %
Steinkohle	18.5 %		0.1 %
Erdgas und andere Gase	48.7 %	50.9 %	46.2 %
Öl	4.9 %	26.2 %	22.9 %
Biomasse	8.3 %	18.6 %	20.7 %
Fernwärme	9.6 %	4.3 %	9.5 %
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>
Spez. CO <sub>2</sub> -Eq	82,6 g / MJ <sub>th</sub>	71,8 g / MJ <sub>th</sub>	69,5 g / MJ <sub>th</sub>

### 3.1.5. Datengrundlage von Transportdistanzen

Der Transport der Sekundärabfallströme von der Erstbehandlungsanlage wird im Modell berücksichtigt. Die Transportentfernungen basieren auf der Entfernung einer Behandlungsanlage von einem beliebigen Punkt in Deutschland. Zu diesem Zweck wurden alle Behandlungsanlagen, die für einen bestimmten Abfallstrom relevant sind, zusammengestellt. Zweitens wurde ein äquidistantes Raster von 10 km über Deutschland gelegt. Von jedem dieser Rasterpunkte wurde die Transportentfernung (tatsächliche Entfernung, nicht lineare Entfernung) zu jeder Behandlungsanlage berechnet. Die Transportentfernung wurde über die Bing-API (Microsoft Corporation 2024) abgerufen<sup>8</sup>. Von jedem Rasterpunkt wurde die kürzeste und zweitkürzeste Entfernung zu einer Behandlungsanlage ermittelt. Weitere Einzelheiten zu diesem Ansatz sind in Bulach et al. (2022) enthalten.

Da davon ausgegangen wurde, dass Abfälle nicht immer zur nächstgelegenen Behandlungsanlage transportiert werden, wurde im Modell die zweitkürzeste Entfernung zugrunde gelegt. Wirtschaftliche Kosten oder Einnahmen, die in der Behandlungsanlage gezahlt oder erzielt werden, veranlassen die Abfallbehandler, nicht immer die nächstgelegene Behandlungsanlage zu wählen. Die Wahl der zweitnächsten Anlage stellt einen konservativen Ansatz dar, der im Rahmen der Ökobilanz angewandt werden sollte. Die Transportentfernung zu anderen Behandlungsanlagen (nicht genannten Anlagen) wird pauschal mit 200 km angenommen. Die kürzesten und zweitkürzesten Entfernungen für die relevanten Behandlungsstandorte sind in Tabelle 3-6 zusammengestellt.

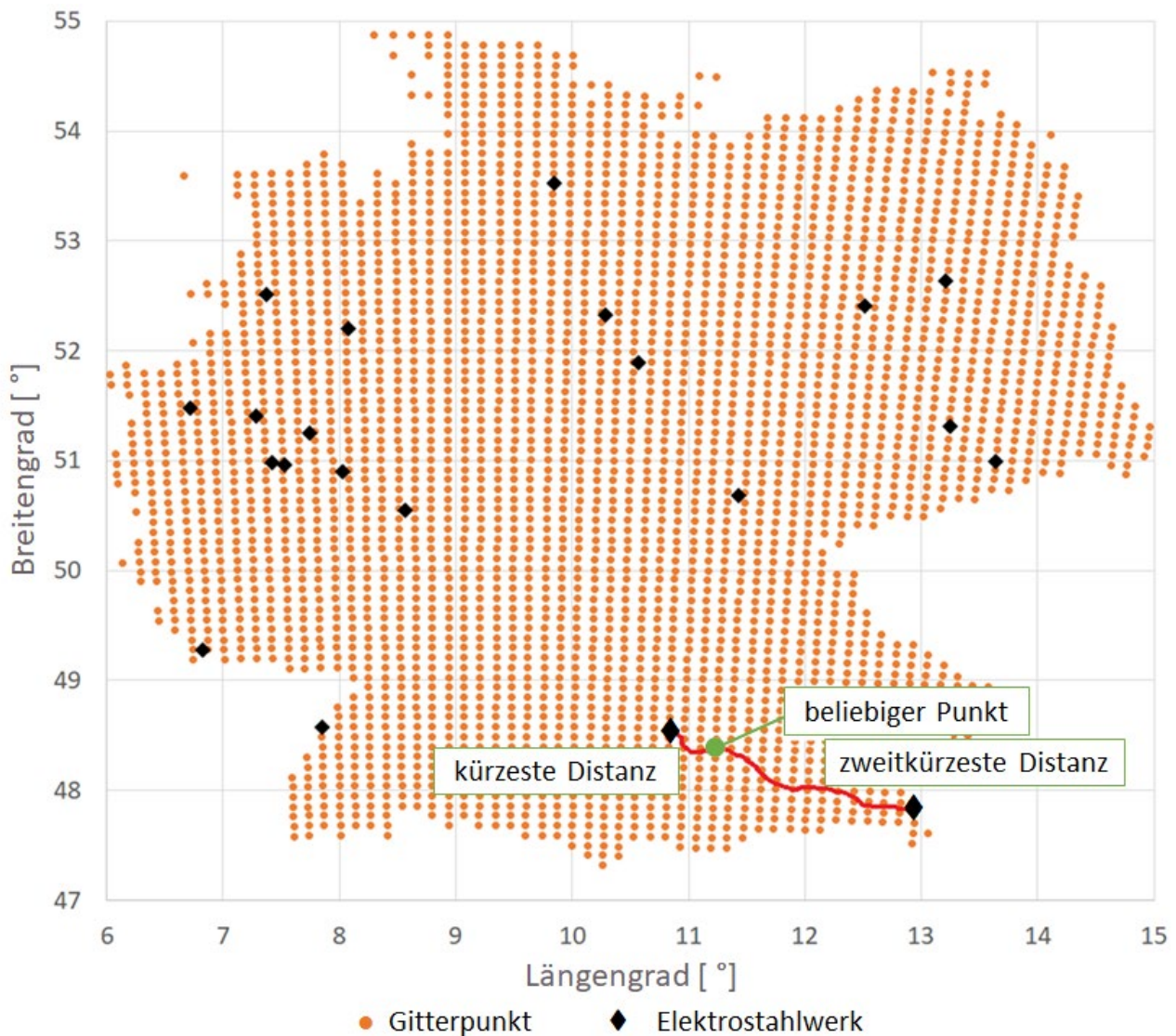
**Tabelle 3-6 Transportdistanzen in der Modellierung**

Transportdistanz zu ...	Kürzeste Distanz	Zweitkürzeste Distanz (im Modell verwendet)
...einer MVA	45 km	<b>75 km</b>
...einem Zementwerk	85 km	<b>127 km</b>
...einem Elektro-Stahlwerk	101 km	<b>166 km</b>
...einem Refiner für Aluminium	133 km	<b>188 km</b>
...einer Kupferhütte	177 km	<b>351 km</b>
...einem Titanrecycler <sup>a</sup>		<b>700 km</b>
...einer Deponie (keine Daten vorhanden - Schätzung)		<b>40 km</b>
... andere		<b>200 km</b>

a) Transportdistanz zu EcoTitanium

<sup>8</sup> Die Bing API (Application Programming Interface) ist eine Programmierschnittstelle, die von Microsoft bereitgestellt wird und Nutzern ermöglicht, auf die Funktionen von Bing (inkl. Standortdaten) zuzugreifen, um damit wie in diesem Fall Massenabfragen auszuführen.





**Abbildung 3-4 Rasterpunkte (10 km x 10 km) und Elektrostahlwerke in Deutschland. Veranschaulichung der kürzesten und zweitkürzesten Entfernung von einem beliebigen Rasterpunkt.**

### 3.2. Mengen der Inputströme

Die Erfassung werthaltiger Komponenten und die daraus resultierende Menge an Inputströmen wird ausführlich im Hauptbericht<sup>9</sup> zum RecTecKA-Vorhaben beschrieben. Die Hauptergebnisse dieser Arbeit werden an dieser Stelle lediglich in Kurzform wiedergegeben werden.

#### 3.2.1. Großkomponenten

Die Menge und Zusammensetzung der Großkomponenten von KKP 1 und KKP 2 basiert zunächst auf Primärdaten. Archive kerntechnischer Anlagen halten Dokumentation zu Großkomponenten vor. Diese weisen je nach Komponente eine unterschiedliche Detailtiefe auf. Insbesondere Mengenangaben von Teilkomponenten liegen nur lückenhaft vor. Diese wurden durch das Fachpersonal der

<sup>9</sup> RecTecKA – Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben. Teil II. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse



EnKK durch Erfahrungswerte ergänzt. Eine detaillierte Dokumentation der Datenermittlung findet sich in Kapitel 3.1 „Auswertung der Materialdaten zu Groß-Komponenten“ des Hauptberichts<sup>9</sup>. Zur Ausfallsicherheit werden eine Vielzahl von Bauteilen und Komponenten in Kernkraftwerken mehrfach eingebaut bzw. vorgehalten und sind somit in teilweise mehrfacher Redundanz vorhanden. Nur für die Verwertung freigegebenen Großkomponenten, die mehr als eine Tonne werthaltiger Metalle pro Redundanz beinhalten (siehe „Zu untersuchendes System“ in Kapitel 2.2.1) werden in die Sachbilanz aufgenommen. Tabelle 3-7 auf dieser Seite zeigt die Mengenströme für KKP 2, die aus den Großkomponenten inkl. Redundanzen hervorgehen. Diese sind in Vergleich zu Tabelle 2-1 nach den verschiedenen Systemen in einem Kernkraftwerk disaggregiert worden<sup>10</sup>.

**Tabelle 3-7 Mengenströme der Großkomponenten aus KKP 2**

Stoffstrom	KKP 2
<b>Sicherheitssysteme</b>	
Edelstahl 1.4541	13,12 t
Edelstahl 1.4550	149,34 t
Edelstahl 1.4552	1,80 t
<b>Hilfs- &amp; Zusatzsysteme des Primärkreises</b>	
Edelstahl 1.4541	12,50 t
Edelstahl 1.4571	2,50 t
<b>Maschinenhaus</b>	
Aluminium	43,20 t
Edelstahl 1.3818	4,90 t
Edelstahl 1.4002	14,25 t
Edelstahl 1.4008	17,50 t
Edelstahl 1.4021	110,35 t
Edelstahl 1.4317	3,00 t
Edelstahl 1.4435	0,60 t
Edelstahl 1.4541	70,75 t
Edelstahl 1.4571	0,60 t
Edelstahl 1.4910	1442,01 t
Kupfer, <95 %	182,04 t
Kupfer, hochrein	45,85 t
<b>Haupt- und Nebenkühlwassersystem</b>	
Edelstahl 1.4541	0,54 t
Titan	17,20 t
Kupfernickel	29,70 t
<b>Notstromerzeugung und Notspeisesystem</b>	
Kupfer, hochrein	14,20 t
Kupfer, <95 %	31,10 t
Edelstahl 1.4462	0,30 t
Edelstahl 1.4552	1,16 t
Edelstahl 1.4550	33,60 t
Edelstahl 1.4541	54,18 t

<sup>10</sup> In Spieth Achtnich et al. 2024 sind die Systeme und die enthaltenen Großkomponenten detailliert dargestellt.

In Tabelle 3-8 sind die Mengenströme aller Großkomponenten für KKP1 aufgelistet, da deutlicher weniger Großkomponenten die Abscheidekriterien erfüllen. Redundanzen sind bereits berücksichtigt.

**Tabelle 3-8 Mengenströme der Großkomponenten aus KKP1**

Stoffstrom	KKP 1
<b>Großkomponenten</b>	
Kupfer, <95 %	108,5t
Kupfer, hochrein	43,2 t
Aluminium	27,4 t
Edelstahl 1.3818	3,1 t
Edelstahl 1.4313	1,5 t
Edelstahl 1.4571	16,92 t

### 3.2.1. Kabel, E-Motoren und Stellantriebe

Die Menge der **Kabel** in KKP 1 und KKP 2 konnte durch die EnKK bereitgestellt werden. Die mittlere Zusammensetzung der Kabel wurde durch die EnKK und ELECTROCYCLING GmbH abgeschätzt. Demnach beträgt der mittlere Kupferanteil 80 Gew.-% und der Anteil der Ummantelung 20 Gew.-%. Tabelle 3-9 zeigt die Mengenströme der Kabel getrennt nach Kabeln innerhalb und außerhalb des Kontrollbereichs, jeweils für KKP 1 und KKP 2.

**Tabelle 3-9 Mengenströme der Kabel in KKP 1 und KKP 2**

Stoffstrom	KKP 1	KKP 2
Kabel im Kontrollbereich	403 t	582 t
Kabel außerhalb des Kontrollbereichs	1091 t	1.695 t
<b>Kabel, gesamt</b>	<b>1,494 t</b>	<b>2,277 t</b>
<i>davon Kupfer</i>	1195,2 t	1821,8 t
<i>davon PVC</i>	298,8 t	455,4 t

Die Anzahl und Masse aller **E-Motoren** in KKP 1 und KKP 2 war ebenfalls bekannt. Die Zusammensetzung der E-Motoren konnte hinsichtlich des Kupfergehalts durch die EnKK (nach Rücksprache mit einem Lieferanten) folgendermaßen abgeschätzt werden:

- Bei E-Motoren < 300 kg beträgt der Kupferanteil (Stator + Rotor) 18 Gew.-% – 20 Gew.-% (selten bis 22 Gew.-%). Im Mittel wurden hier 19 Gew.-% Kupfer angesetzt.
- Bei E-Motoren > 300 kg liegt der Kupferanteil (Stator + Rotor) bei 15 Gew.-% – 18 Gew.-%. Hier fällt der Prozentsatz niedriger aus, weil bei den größeren Maschinen anteilig mehr Stahl in der Gesamtkonstruktion (als bei kleinen Motoren) verbaut ist. Im Mittel wurden hier 16,5 Gew.-% Kupfer angesetzt.

Der Mittelwert über alle Motoren wurde zu 16,9 Gew.-% berechnet. Die Menge weiterer Materialien (Aluminium und Stahl) wurde über Literaturwerte ergänzt. Nach Almeida et al. (2011) wurde das Verhältnis von Kupfer zu Aluminium mit 0,72 angesetzt. Damit ergibt sich ein Aluminiumanteil von 23,5 Gew.-%. Der verbleibende Massenanteil (59,5 Gew.-%) wurde Eisen bzw. Stahl zugeordnet. Tabelle 3-10 listet das Wertstoffprofil der E-Motoren in KKP 1 und KKP 2 auf.

**Tabelle 3-10 Mengenströme der E-Motoren in KKP 1 und KKP 2**

Stoffstrom	KKP 1	KKP 2
E-Motoren im Kontrollbereich	167 t	245 t
E-Motoren außerhalb des Kontrollbereichs	267 t	441 t
<b>E-Motoren, gesamt</b>	<b>434 t</b>	<b>686 t</b>
<i>davon Kupfer</i>	73,5 t	116,2 t
<i>davon Aluminium</i>	102,1 t	161,4 t
<i>davon Eisen bzw. Stahl</i>	258,3 t	408,4 t

Die Menge an **Stellantrieben** konnte durch die EnKK beziffert werden. Die Zusammensetzung wurde durch die ELECTROCYCLING GmbH mit 5 Gew.-% Kupfer, 75 Gew.-% Eisen bzw. Stahl und 20 Gew.-% Aluminium abgeschätzt. Tabelle 3-11 zeigt die Mengenströme für die Stellantriebe in KKP 1 und KKP 2.

**Tabelle 3-11 Mengenströme der Stellantriebe in KKP 1 und KKP 2**

Stoffstrom	KKP 1	KKP 2
Stellantriebe im Kontrollbereich	116 t	43,6 t
Stellantriebe außerhalb des Kontrollbereichs	11 t	43,6 t
<b>Stellantriebe, gesamt</b>	<b>127 t</b>	<b>87,2 t</b>
<i>davon Kupfer</i>	6,4 t	4,4 t
<i>davon Aluminium</i>	25,4 t	17,4 t
<i>davon Eisen bzw. Stahl</i>	95,3 t	65,4 t

### 3.2.2. Komponenten der E- und Leittechnik

Unter Komponenten der E- und Leittechnik sind Mittelspannungsschalter, Schaltschränke und elektrische Einrichtungen subsumiert. Die Menge an **Mittelspannungsschaltern** (sog. Gießharzschalter) wurde durch die EnKK bestimmt. Deren Zusammensetzung konnte die TU Clausthal ermitteln. Tabelle 3-12 stellt die Mengenströme zusammen.

**Tabelle 3-12 Mengenströme der Mittelspannungsschalter in KKP 1 und KKP 2 und der daraus separierten Fraktionen**

Stoffstrom	KKP 1	KKP 2
<b>Mittelspannungsschalter, gesamt</b>	<b>28,2 t</b>	<b>23,5 t</b>
<i>davon Eisen</i>	27,7 t	23,0 t
<i>davon Kupfer</i>	0,5 t	0,4 t
<i>davon Silber</i>	4,06 kg	3,38 kg

Die Anzahl an **Schaltschränken** und darin enthaltenen Platinen konnten durch die EnKK für KKP 1 und KKP 2 bestimmt werden. Die mechanische Aufbereitung und Fraktionierung vergleichbarer Schaltschränke durch die ELECTROCYCLING GmbH ließ Aussagen über die Mengen der separierten Fraktionen zu. Untersuchungen der TU Clausthal gaben Aufschluss über die Mengen an Palladium, Gold und Silber der verbauten Platinen. Tabelle 3-13 gibt die Mengen der Schaltschränke in KKP 1 und KKP 2 an und die daraus gewonnenen Fraktionen.

**Tabelle 3-13 Mengenströme der Schaltschränke in KKP 1 und KKP 2 und daraus separierte Fraktionen**

Stoffstrom	KKP 1	KKP 2
<b>Schaltschränke, gesamt</b>	<b>116 t</b>	<b>43,6 t</b>
<i>davon in Eisenfraktion<sup>a</sup></i>	41 t	51 t
<i>davon in Edelstahlfraktion<sup>a</sup></i>	1,7 t	2,2 t
<i>davon in Aluminiumfraktion<sup>a</sup></i>	9,0 t	11,3 t
<i>davon in Messingfraktion<sup>a</sup></i>	1,0 t	1,3 t
<i>davon in Zinkfraktion<sup>a</sup></i>	1,7 t	2,2 t
<i>davon Kupfer, hochrein<sup>a</sup></i>	1,6 t	2,0 t
<i>davon in Kunststofffraktion<sup>a</sup></i>	5,3 t	6,6 t
<i>davon Eisen-Kupfer-Anker<sup>a</sup></i>	0,09 t	0,11 t
<i>davon in Hüttenfraktion<sup>a</sup></i>	5,4 t	6,7 t
<i>darin enthaltenes Kupfer<sup>a</sup></i>	2,7 t	3,3 t
<i>darin enthaltenes Silber<sup>b</sup></i>	3,28 kg	2,76 kg
<i>darin enthaltenes Gold<sup>b</sup></i>	1,63 kg	2,33 kg
<i>darin enthaltenes Palladium<sup>b</sup></i>	0,17 kg	0,29 kg

a) Durch die ELECTROCYCLING GmbH bestimmt durch mechanische Aufbereitung vergleichbarer Schaltschränke; b) Durch die TU Clausthal bestimmt, durch Analyse von verbauten Leiterplatten

Die Menge an **elektrischen Einrichtungen** wurde durch die EnKK bestimmt. Die Zusammensetzung der elektrischen Einrichtungen wurde über die ELECTROCYCLING GmbH anhand eines vergleichbaren Abfallstroms (Schalterschrott) quantifiziert. Tabelle 3-14 zeigt die Mengenströme der elektrischen Einrichtungen für KKP 1 und KKP 2.

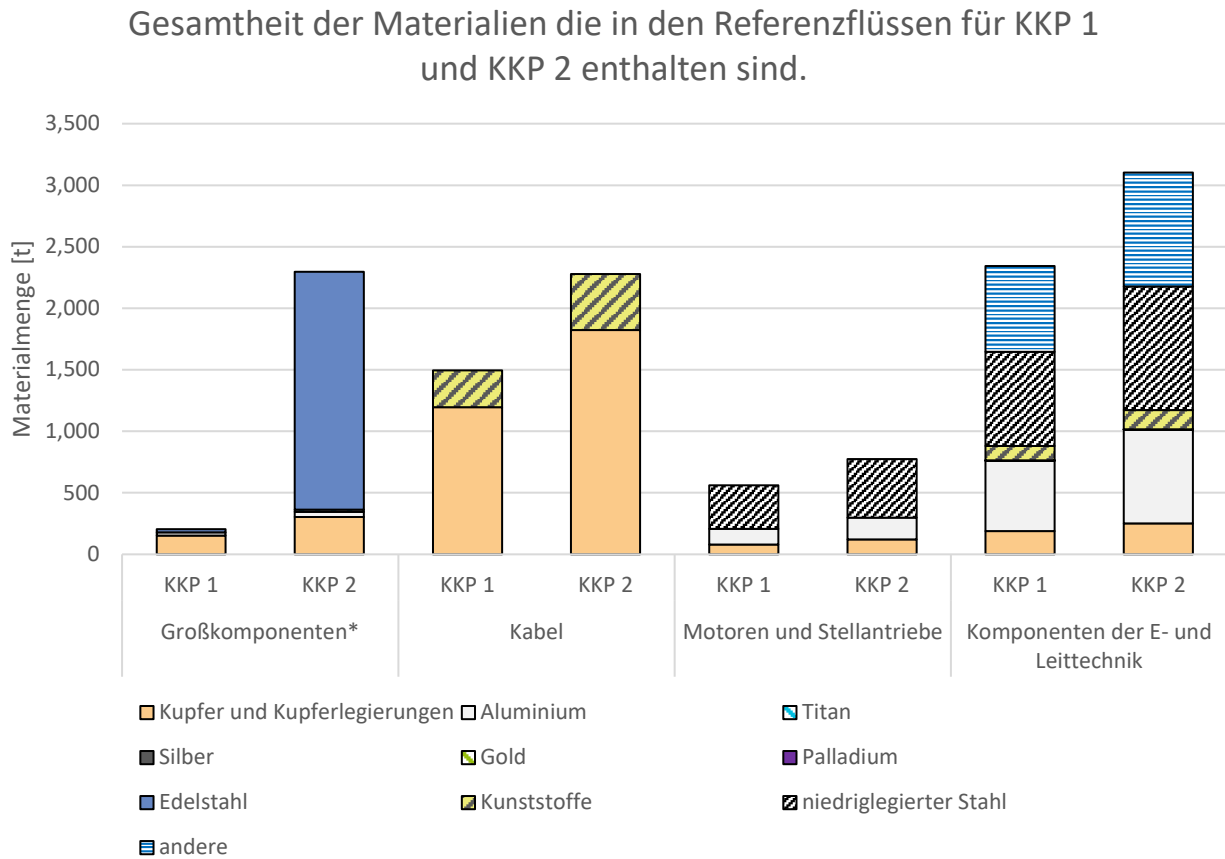
**Tabelle 3-14 Mengenströme der elektrischen Einrichtungen in KKP 1 und KKP 2 und daraus separierte Fraktionen**

<b>Stoffstrom</b>	<b>KKP 1</b>	<b>KKP 2</b>
El. Einrichtungen im Kontrollbereich	370 t	105.2 t
El. Einr. außerhalb des Kontrollbereichs	1878 t	2892 t
<b>Elektrische Einrichtungen, gesamt</b>	<b>2248 t</b>	<b>2997 t</b>
<i>davon in Eisenfraktion<sup>a</sup></i>	697 t	929 t
<i>davon in Aluminiumfraktion<sup>a</sup></i>	562 t	749 t
<i>davon in Kunststofffraktion</i>	112 t	150 t
<i>davon in Hüttenfraktion<sup>a</sup></i>	877 t	1169 t
<i>darin enthaltenes Kupfer<sup>a</sup></i>	184 t	245 t
<i>darin enthaltenes Silber<sup>a</sup></i>	1315 kg	1753 kg
<i>darin enthaltenes Gold<sup>a</sup></i>	34,19 kg	45,59 kg
<i>darin enthaltenes Palladium<sup>a</sup></i>	8,77 kg	11,69 kg

a) Durch die ELECTROCYCLING GmbH bestimmt durch mechanische Aufbereitung von „Schalterschrott“

### 3.2.3. Gesamtübersicht

Abschließend werden in Abbildung 3-5 die Materialmengen für die bilanzierten Referenzflüsse separat für KKP 1 und KKP 2 und für die drei Cluster (i) Großkomponenten, (ii) Kabel, Motoren und Stellantriebe und (iii) Komponenten der E- und Leittechnik gezeigt. Niedriglegierte Stähle oder Kunststoffe sind in der Darstellung nicht enthalten. Es fällt auf, dass das Wertstoffprofil in KKP 2 mit in Summe >5000 t mehr als doppelt so hoch ist als das in KKP 1. Dies liegt zum einen an der höheren Nettoleistung von KKP 2 gegenüber KKP 1 und zum anderen an der unterschiedlichen Bauart. In KKP1 (Siedewasserreaktor) sind eine Vielzahl der Großkomponenten radioaktiv kontaminiert (diese werden in der nachfolgenden Tabelle ausgeklammert), die in KKP 2 (Druckwasserreaktor) kontaminationsfrei sind und freigegeben werden können. Für mehr Details wird an dieser Stelle an den Hauptbericht des RecTecKA-Vorhabens (Spieth Achtnich et al. 2024) verwiesen.



\*) Großkomponenten mit einer Menge an werthaltigen Metallen <1 t wurden nicht betrachtet

**Abbildung 3-5 Materialmengen der bilanzierten Referenzflüsse separat für KKP 1 und KKP 2**

### 3.3. Beschreibung spezifischer Prozesse

Nachfolgend werden für die drei Obergruppen ((i) Großkomponenten, (ii) Kabel, Motoren und Stellantriebe, (iii) Komponenten der E- und Leittechnik) die Prozesspfade innerhalb der definierten Systemgrenze dargestellt

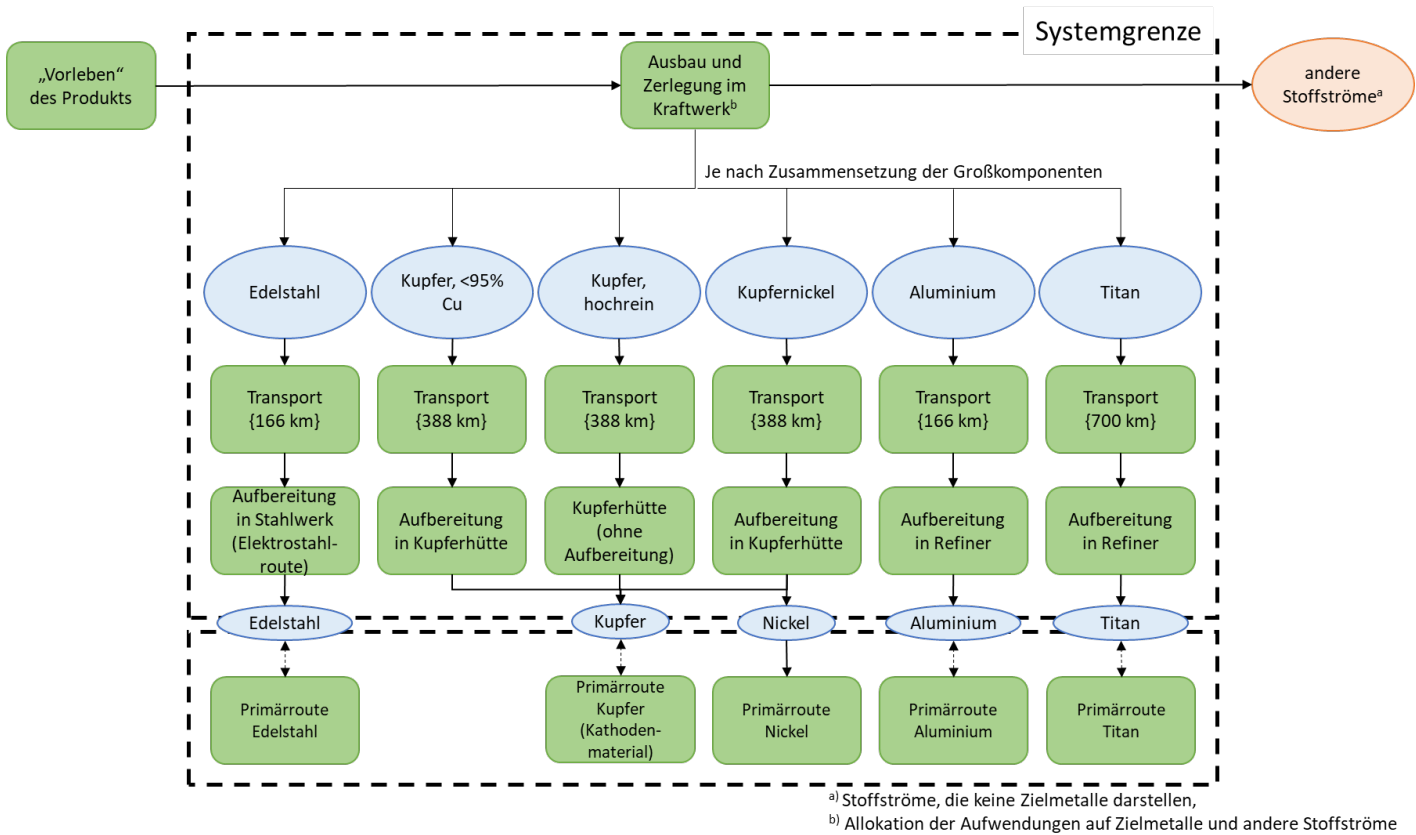
#### 3.3.1. Großkomponenten

Großkomponenten werden innerhalb des Kernkraftwerks zerlegt. Wie bei der Festlegung der Systemgrenze in Kapitel 2.2.4 dargestellt, werden die werthaltigen Metalle von anderen Materialströmen „freigeschnitten“. Die Betrachtung zur Verwertung der anderen Materialströme liegt außerhalb der Systemgrenze und nur die Verwertung der werthaltigen Stoffströme wird betrachtet.

Für den Ausbau und die Zerlegung der Großkomponenten im Kraftwerk konnte seitens EnKK basierend auf Erfahrungswerten der Aufwand für die Zerlegung geschätzt werden. Daraus wurde ein Stromverbrauch von 0,06 kWh pro Kilogramm für die Zerlegung abgeleitet.<sup>11</sup> Die Zerlegung wird auf die Zielmetalle und andere Stoffströme anhand der Masse alloziert.

<sup>11</sup> Nach EnKK kann eine Person ca. 20 bis 40 kg Material (Rohrleitungen/Armaturen/Einrichtungen/Leitungen) pro Stunde demontieren. Diese Menge bezieht sich auf eine reine Arbeitszeit. Annahme: Das Werkzeug zur Zerlegung hat eine

Aus den Großkomponenten können verschiedene Zielmetalle gewonnen werden. In hinreichenden Mengen identifiziert wurden Edelstahl, Kupfer, Kupfernickel, Aluminium und Titan. Eine schematische Darstellung des Aufbereitungspfads zeigt Abbildung 3-6.



**Abbildung 3-6 Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Großkomponenten**

Die Zielmetalle werden nach der Zerlegung zur Verwertung transportiert. Mit Ausnahme von hochreinem Kupfer wird eine Aufbereitung der Zielmetalle im Stahlwerk, der Kupferhütte oder einem Refiner angesetzt.

**3.3.2. Kabel, E-Motoren und Stellantriebe**

**Kabel** (Zusammensetzung: 80 Gew.-% Kupfer, 20 Gew.-% Kabelummantelung) werden zu einer Aufbereitungsanlage transportiert und dort in Kupfer und Kabelummantelung separiert. Energieverbrauchsdaten und Kapitalgüter stammen aus dem ecoinvent Prozess „treatment of used cable | used cable“. Es wird vereinfacht eine Separationseffizienz von 100 % angenommen. Das heißt pro 1 t Kabel wird angesetzt, dass diese in 200 kg Ummantelung und 800 kg Kupfer separiert werden. Bei der Kabelummantelung handelt es sich um Polyvinylchlorid (PVC), welches (Stand der Technik) in einer Müllverbrennungsanlage verbrannt wird<sup>12</sup>. Bei der Kupferfraktion handelt es sich um hochreines Kupfer. Daher wird in diesem Fall lediglich der Transport der Kupferfraktion zur Kupferhütte bilanziert. Abbildung 3-7 zeigt den Aufbereitungspfad schematisch.

elektrische Leistungsaufnahme von 2 kW; Leistungsfaktor: 0,85. Im worst case läuft die Maschine die gesamte Stunde. Im Schnitt können 30 kg Material zerlegt werden. Es gilt.  $(2 \text{ kW} \times 0,85 \times 1 \text{ h})/30 \text{ kg}=0,06 \text{ kWh}$

<sup>12</sup> Aufgrund des hohen Chlorgehaltes schließt sich eine höherwertige Verwertung bspw. in einem Zementwerk aus.



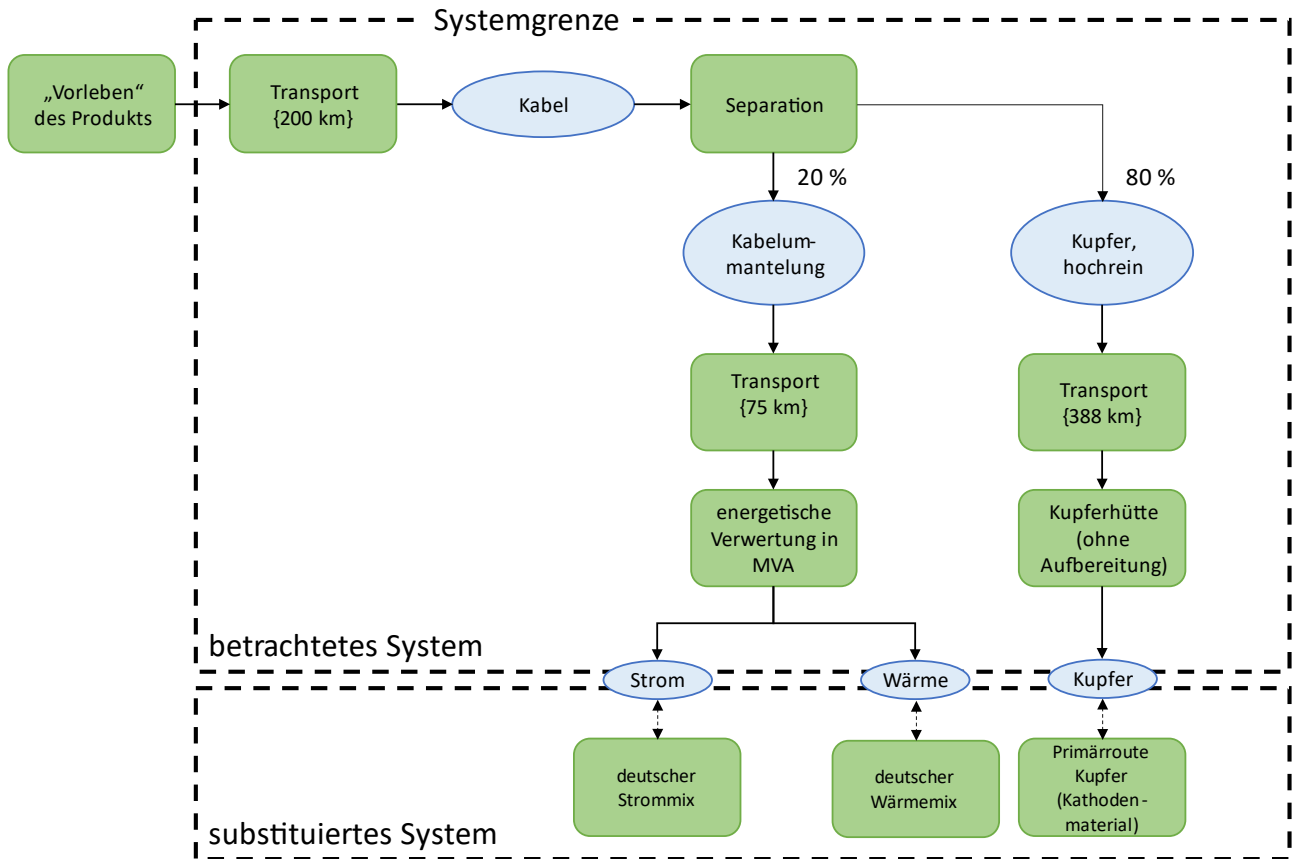


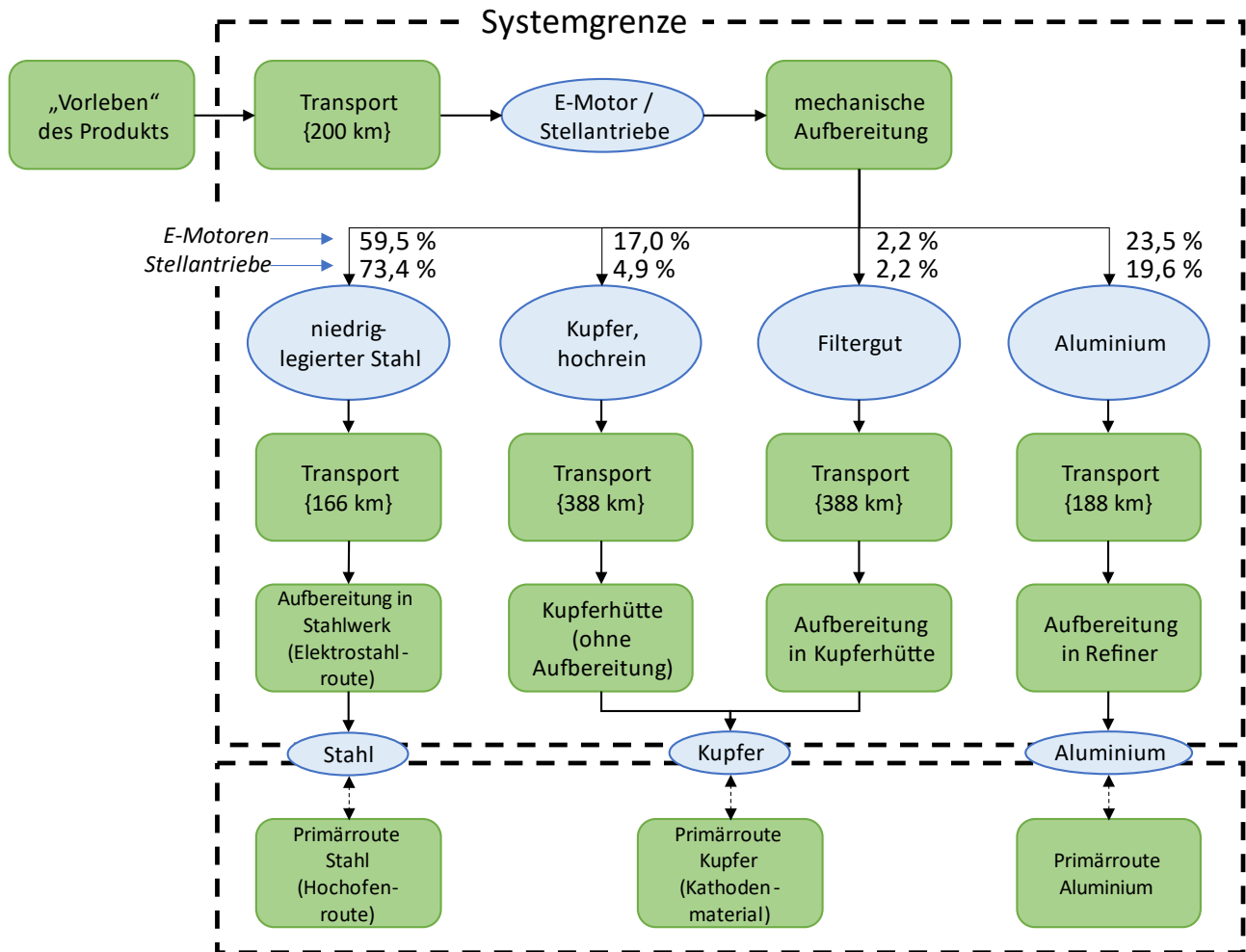
Abbildung 3-7 Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Kabeln

**Motoren und Stellantriebe** werden zu einer Aufbereitungsanlage transportiert. In einer mechanischen Aufbereitung werden Motoren und Stellantriebe zerkleinert und fraktioniert. Der spezifische Energieeinsatz wurde durch die ELECTROCYCLING GmbH bestimmt und beträgt ~200 kWh/t Inputmaterial. Für alle Stoffströme (Aluminium, Kupfer, Eisen bzw. Stahl) wird gleichermaßen ein Verlust von 2,2 Gew.-% angenommen. Diese Menge findet sich im Filtergut wieder. Die Zusammensetzung des Filterguts entspricht vereinfacht der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials.

Bei der mechanischen Aufbereitung werden bei E-Motoren und Stellantrieben vier Hauptfraktionen aussortiert:

- eine Eisen- bzw. Stahlfraktion, die dem Stahlrecycling zugeführt wird
- eine Kupferfraktion, die einer Kupferhütte zugeführt wird, jedoch hochrein ist und keine Aufbereitung mehr durchläuft
- eine Aluminiumfraktion, die in einem Refiner aufbereitet wird,
- Filtergut, welches einer Kupferhütte zugeführt wird. Das Filtergut wird in der Kupferhütte mit dem Ziel der Kupferrückgewinnung behandelt. Aluminium und Eisen verbleiben im Anodenschlamm und werden „geopfert“.

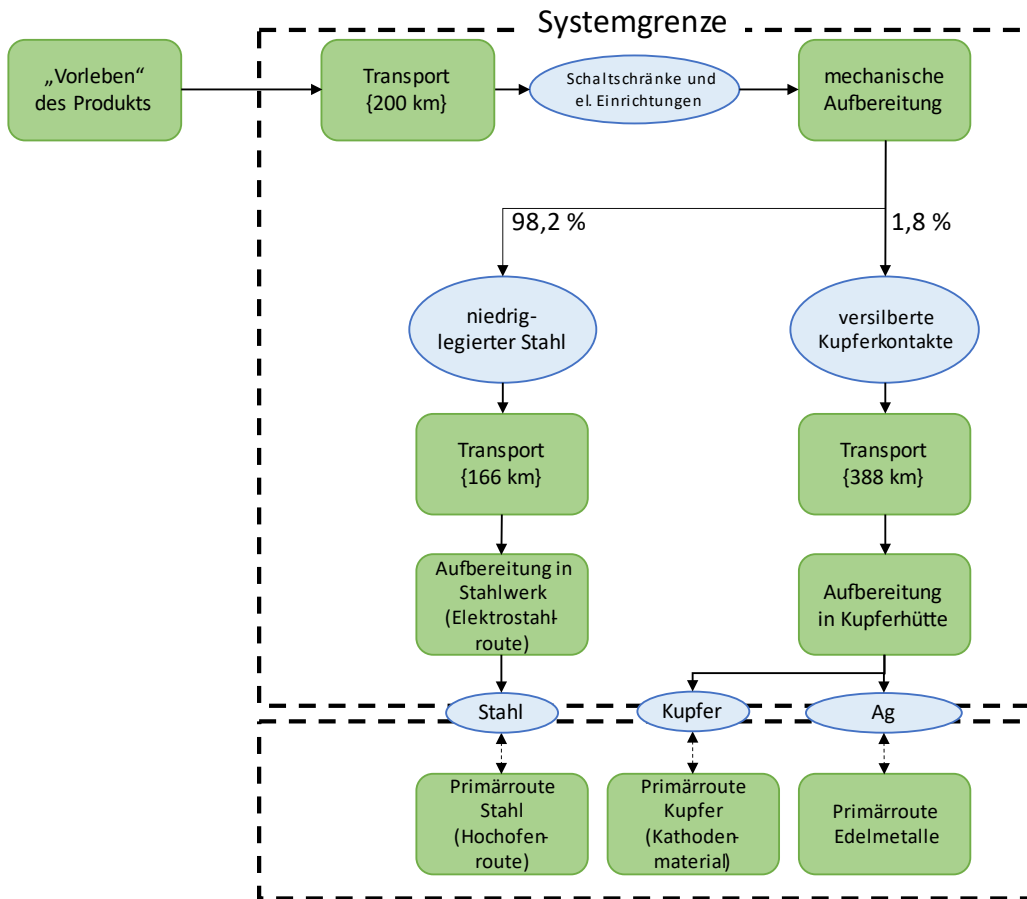
Der Behandlungspfad von E-Motoren und Stellantrieben wird in Abbildung 3-8 dargestellt.



**Abbildung 3-8 Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Motoren und Stellantrieben**

**3.3.3. Komponenten der E- und Leittechnik**

Bei den **Mittelspannungsschaltern** werden zunächst die versilberten Kupferkontakte abgetrennt. Diese gelangen in die Kupferhütte. Die verbleibende Eisen-/Stahlfraction wird im Elektrostahlwerk verarbeitet. Abbildung 3-9 zeigt die bilanzierten Verwertungsschritte.

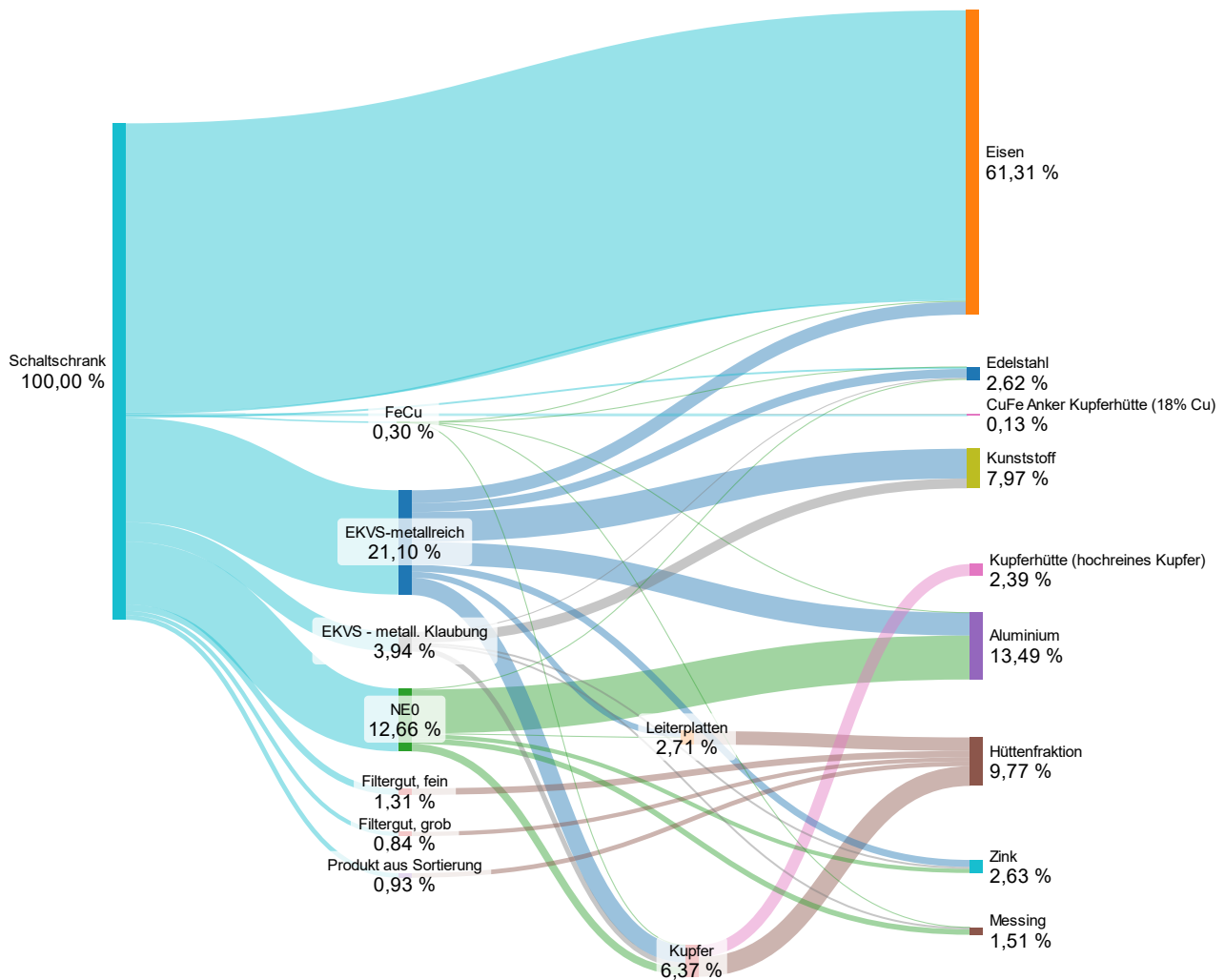


**Abbildung 3-9 Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Mittelspannungsschaltern**

Ausgebaute **Schaltanlagen** werden zu einer Aufbereitungsanlage transportiert. Dort erfolgt zunächst eine Zerkleinerung und anschließend eine mehrstufige Sortierung. Der Energieaufwand wurde wiederum mit ~200 kWh/t Inputmaterial durch die ELECTROCYCLING GmbH angegeben.

Nach der ersten Sortierung bleiben teilweise noch Mischfraktionen (z.B. EKVS metallreich oder NEO – betriebsinterne Bezeichnungen der ELECTROCYCLING GmbH) übrig, die weiter sortiert werden müssen. Schließlich ergeben sich so neun Zielfraktionen: (1) 61,3 % Eisen, (2) 2,6 % Edelstahl, (3) 0,1 % CuFe Anker, (4) 8,0 % Kunststoffe, (5) 2,4 % hochreines Kupfer, (6) 13,5 % Aluminium, (7) 2,6 % Zink, (8) 1,5 % Messing und (9) 9,8 % Hüttenfraktion.<sup>13</sup> Abbildung 3-10 zeigt die Stoffströme bei der Aufbereitung von Schaltanlagen in Form von einem Sankey-Diagramm.

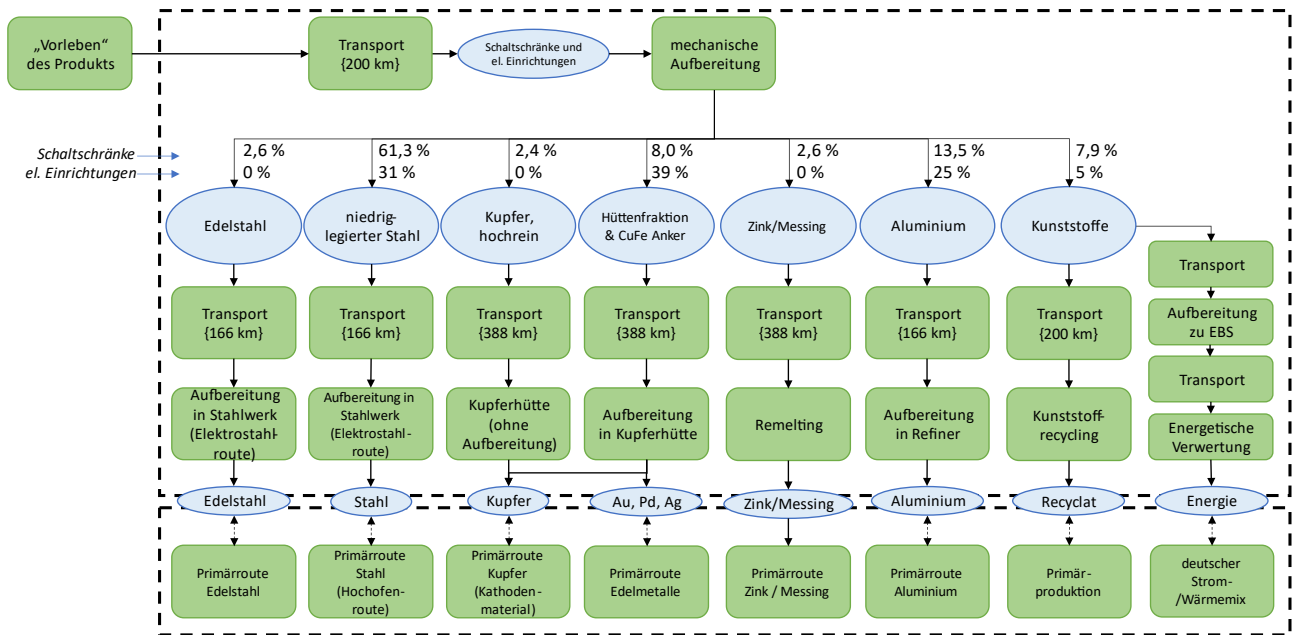
<sup>13</sup> Bei der Hüttenfraktion handelt es sich um eine Mischfraktion, die insbesondere Kupfer und Edelmetalle enthält.



**Abbildung 3-10 Stoffströme der mechanischen Aufbereitung von Schaltschränken**

Bei **elektrischen Einrichtungen** verläuft die mechanische Aufbereitung analog ab. Aufgrund eines anderen Eingangsmaterials ändert sich hierbei die Zusammensetzung der Zielfractionen: 31 % stellen niedriglegierter Stahl dar, 39 % gehen in die Hüttenfraktion, 25 % finden sich in der Aluminiumfraktion und die restlichen 5 % sind Kunststoffe.

Nach erfolgter mechanischer Aufbereitung gelangen die Fraktionen in verschiedene Aufbereitungspfade. Die Verwertungspfade sind in Abbildung 3-11 dargestellt sind. Edelstähle und niedriglegierte Stähle werden über die Elektrostahlroute verwertet. Bei Edelstahl wird die Zusammensetzung von V2A Stahl (Werkstoffnummer 1.4301) angesetzt. Hochreines Kupfer wird zur Kupferhütte transportiert, bedarf dort aber keiner Aufbereitung mehr. Die Hüttenfraktion, sowie CuFe-Anker (18 % Kupferanteil) werden zur Kupferhütte transportiert. Dort durchläuft diese eine vollständige pyrometallurgische Aufbereitung bis hin zur Gewinnung von Kathodenkupfer. Aus dem Anodenschlamm werden die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium gewonnen. Die Zink- und Messingfraktion werden im Modell lediglich eingeschmolzen. Aluminium wird zu einem Refiner transportiert und dort zu Sekundäraluminium recycelt. Die Kunststoffe werden teils energetisch (40 %), teils stofflich verwertet (60 %). Die Verwertungsquoten stammen von der ELECTROCYCLING GmbH (Mayer und Buchert 2024).



**Abbildung 3-11 Schematische Darstellung der End of Life-Phase von Schaltschränken und elektrischen Einrichtungen**

Da die Behandlung von Kunststoffen bisher nicht ausführlich behandelt wurde sollen nachfolgend die Modellierungsschritte ausgeführt werden. Bei der Verwertung der Fraktion Kunststoffe wird mit einer stoffliche und energetischen Verwertungsquote gerechnet, die die ELECTROCYCLING GmbH für den laufenden Betrieb angibt. Modellierungsannahmen zum Recycling von Kunststoffen aus Elektroschrott wurden aus Knappe et al. (2021) entnommen. Danach kommt ein Recycling für ABS, HIPS, PE und PP in Frage.

90 % der ins Recycling gehenden Kunststoffe werden regranuliert und 10 % werden zu dickwandigen Profilen verarbeitet. Der Strombedarf der Regranulierung beträgt 0,585 kWh/kg Inputmaterial und der Strombedarf bei der Agglomeration beträgt 0,35 kWh/kg Inputmaterial. Da Regranulate eine geringere Qualität aufweisen als Granulate aus Primärkunststoff, wurde bei der Verrechnung ein Abschlag von 5 % gerechnet (Substitutionsfaktor=0,95). Werden Mischkunststoffe zu Agglomeraten weiterverarbeitet und ersetzen dort Holz, Beton oder PE-HD wird, angenommen dass sie das im Verhältnis 1:1 tun, da die Produkte auch bei Verwendung von Primärmaterial dickwandig sind (Substitutionsfaktor=1). Zu beachten ist bei Holz und Beton, dass 1 kg Rezyklat nicht 1 kg Holz bzw. Beton ersetzt, sondern die Substitution über das Volumen erfolgt. Zudem muss die Lebensdauer der Materialien berücksichtigt werden. Für Holz wird die gleiche Lebensdauer wie für Kunststoff angenommen, für Betonprodukte wird angenommen, dass deren Lebensdauer doppelt so hoch wie die der Kunststoffprodukte ist.

Ausgeschleuste Recyclingreste werden energetisch verwertet. Diese werden zu 78 % zu EBS aufbereitet und anschließend in einem Zementwerk verwertet (Knappe et al. 2021). Für die Aufbereitung zu EBS wird ein Energieverbrauch von 0,32 kWh Strom pro kg Input angesetzt (Knappe et al. 2021).

Die Zusammensetzung der Kunststofffraktion wurde aus MGG Polymers (2020) entnommen und ist in Tabelle 3-15 gegeben. Da die stoffliche Verwertungsquote 60 % beträgt, wurde hier der Anteil der recycelbaren Kunststoffe (PP, PE, ABS, HIPS) auf 60 % erhöht und die verbleibenden Kunststoffe entsprechend reduziert.

**Tabelle 3-15 Zusammensetzung der Kunststofffraktion gemäß MGG Polymers (2020) und angepasste Zusammensetzung**

Fraktion	Zusammensetzung gemäß MGG Polymers (2020)	Angepasste Zusammensetzung	Zusammensetzung
<u>Recyclebare Kunststoffe (angepasst auf 60 %)</u>			
PP	12 %		16.4 %
PE	1 %		1.4 %
ABS	17 %		23.2 %
HIPS	14 %		19.1 %
<u>Andere Kunststoffe (angepasst, so dass Summe=100 %)</u>			
BFR beinhaltende Kunststoffe	7 %		4.3 %
PC	6 %		3.7 %
PC/ABS	6 %		3.7 %
EPDM	5 %		3.0 %
Andere	17 %		10.4 %
<u>Andere Reststoffe (unverändert)</u>			
Kabel	3 %		3 %
Hausmüll	2 %		2 %
Glas und Steine	2 %		2 %
Metalle	3 %		3 %
Holz natürlich, trocken	5 %		5 %
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>100 %</b>

Zum besseren Verständnis werden in Tabelle 3-15 die Stoffströme dargestellt, wie sie im Modell bilanziert wurden. Es werden zum einen die Mengen der energetisch verwerteten Abfälle und andererseits und eingespartes Primärmaterial dargestellt (negatives Vorzeichen).

**Tabelle 3-16 Stoffströme bei der Verwertung von Kunststoffen aus Schaltschränken und elektrischen Einrichtungen. Bezugsgröße ist 1 t Kunststoffabfall.**

Stoffstrom	Menge	Provider
Entsorgung von Kunststoffabfällen	1 t	
Abfall, an Verbrennung	-0.09 t	Energetische Verwertung von Kunststoffen, in MVA (eigene Modellierung)
Abfälle zur EBS-Aufbereitung	-0.31 t	Aufbereitung von Kunststoffen zu EBS (eigene Modellierung)
Polyethylen, Granulat	-0.01 t <sup>a</sup>	polyethylene production, high density, granulate - RER
Polypropylen Granulat	-0.01 t <sup>a</sup>	polypropylene production, granulate - RER
Polystyrol (high impact)	-0.16 t <sup>a</sup>	polystyrene production, high impact - RER
Säge- und Furnierholz, Nadelholz, gemessen als Vollholz unter Rinde	-0.27 m <sup>3a</sup>	market for sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark - Europe without Switzerland
Beton	-0.04 t <sup>a</sup>	concrete block production - DE
Acrylonitril-Butadiene-Styrol Copolymer	-0.16 t <sup>a</sup>	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer production - RER

<sup>a)</sup> Negative Zahlen stehen für eingesparte Primärmaterialien

### 3.4. Einschätzung der Datenqualität

Innerhalb der Bilanz fanden Primärdaten Einzug bei der Quantifizierung der Mengen und Zusammensetzung der Stoffströme, welche als Input in die Verwertung gehen. Weiterhin konnten Daten zur Demontage und mechanischen Aufbereitung über Primärdaten abgedeckt werden. Energieverbrauchsdaten zur Zerlegung von Großkomponenten konnten über den spezifischen Arbeitseinsatz EnKK abgedeckt werden. Energieverbräuche für die Zerlegung von E-Motoren und Stellantriebe wurden über die ELECTROCYCLING GmbH bestimmt. Ebenso wurden auch Energieverbräuche für die mechanische Aufbereitung über die ELECTROCYCLING GmbH quantifiziert werden.

Daten zur weiteren Aufbereitungsschritten (insb. metallurgische Prozessschritte) entlang der Recyclingkette wurden über generische Datensätze aus der ecoinvent Datenbank abgeleitet bzw. teilweise um Literaturdaten ergänzt. Auch zur Abbildung der Primärroute der entsprechenden Metalle wurden ecoinvent Datensätze herangezogen. Falls nicht anders möglich werden qualifizierte Schätzungen oder eigene Modellierungen durchgeführt, um unbekannte Parameter zu bilanzieren. Tabelle 3-17 fasst zusammen, in welcher Priorität Daten des Vordergrundsystems erhoben werden.

**Tabelle 3-17**      **Priorisierung der Datenquellen**

Priorität	Datenquelle
1	Primärdaten aus Archivdaten zu den kerntechnischen Anlagen (EnKK) Primärdaten aus dem Betrieb von Elektrorecyclingunternehmen (ELECTROCYCLING GmbH) Primärdaten aus der Untersuchung zu Edelmetallgehalten in Platinen (TU Clausthal)
2	Datenbanken Literaturdaten
3	Eigene Modellierungen Qualifizierte Schätzungen (Mitarbeiter EnKK, ELECTROCYCLING GmbH)

Zur Einschätzung der Datenqualität soll an dieser Stelle auf die Pedigree-Matrix nach Frischknecht et al. (2004) zurückgegriffen werden. Innerhalb der Matrix wird neben der technologischen, zeitlichen und geographischen Repräsentativität<sup>14</sup> auch die Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der Daten bewertet. Die Pedigree-Matrix ist zwischen den Bereichen 1 (sehr gut) und 5 (sehr schlecht) intervallskaliert. Das Bewertungsschema der Pedigree-Matrix ist in Anhang A-1 aufgeführt.

Die Bewertung der Datenqualität kann – je nachdem wie stark die betrachteten Systeme untergliedert wird – beliebig kleinteilig werden. Beispielsweise könnte für jeden Stoffstrom (z.B. Recycling von Kupfer aus Kabeln) eine einzelne Bewertung vorgenommen werden. An dieser Stelle soll lediglich eine Unterteilung für drei Teilaspekte der Modellierung vorgenommen werden:

1. mechanische Aufbereitung zur Vorbereitung zum Recycling
2. der Recyclingprozess der Metalle

<sup>14</sup> In der DIN EN 15804 (Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen) werden beispielsweise nur diese drei Indikatoren abgefragt.



3. die Prozesskette der Primärroute anhand derer Gutschriften erteilt werden.

In Tabelle 3-18 sind die Ergebnisse der Bewertung nach der Pedigree-Matrix zusammengefasst. Es fällt auf, dass insbesondere die Datensätze aus der Hintergrunddatenbank, zu den Recyclingprozessen und der Abbildung der Primärroute oft stark veraltet sind und teilweise sogar älter als 15 Jahre sind. Insbesondere sind hier die Datensätze zu Kupfer und Edelmetallen zu nennen. Weiterhin stammen die Datensätze zu Recyclingprozessen i.d.R. nur aus einer Anlage. Oft ist an dieser Stelle unklar, ob der Datensatz repräsentativ für den entsprechenden Recyclingprozess ist.

Die Problematik, dass Datensätze aus der ecoinvent Datenbank oft nicht auf dem aktuellen Stand sind, ist bekannt. Jedoch gibt es kaum Möglichkeiten dieses Problem zu lösen. Datensätze der Datenbank in „LCA for experts“ von Sphera (Sphera Solutions, Inc. 2024) sind beispielsweise deutlich aktueller und haben oft eine größere geographische Abdeckung. Technisch gesehen können Datensätze aus beiden Datenbanken (ecoinvent und LCA for experts) ineinander integriert werden, jedoch ist dann keine Konsistenz mehr gegeben, da die beiden Datenbanken auf unterschiedliche Hintergrunddaten zurückgreifen.

**Tabelle 3-18 Bewertung der Datenqualität anhand der Pedigree-Matrix**

	Zuverlässigkeit	Vollständigkeit	Zeitliche Repräsentativität	Geographische Repräsentativität	Technologische Repräsentativität
Mechanische Aufbereitung	1 (mechanische Aufbereitung von elektrischen/ elektronischen Geräten)	4	1	1	1
	3 (Zerlegung von Großkomponenten)				
Recyclingprozesse	1-3	3-5	3-5	1-3	1-2
Prozesskette Primärmaterial	1-3	2-4	3-5	1-3	1-3

## 4. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt. Zunächst werden die Wirkungsabschätzungen für alle Wirkungskategorien und in Summe für KKP1 und KKP2 dargestellt. Im Anschluss wird die Wirkungsabschätzung detailliert anhand der Wirkungskategorie GWP für die einzelnen Obergruppen aus Kapitel 3.2 aufgezeigt.

### 4.1. Gesamtergebnisse

Die Anteile der einzelnen Obergruppen an den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung werden in Abbildung 4-1 für KKP 1 und Abbildung 4-2 für KKP 2 grafisch dargestellt. Außerdem werden die absoluten Ergebnisse in den sechs betrachteten Wirkungskategorien tabellarisch aufgelistet.

Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung für KKP 1  
Anteile der Obergruppen am Gesamtergebnis

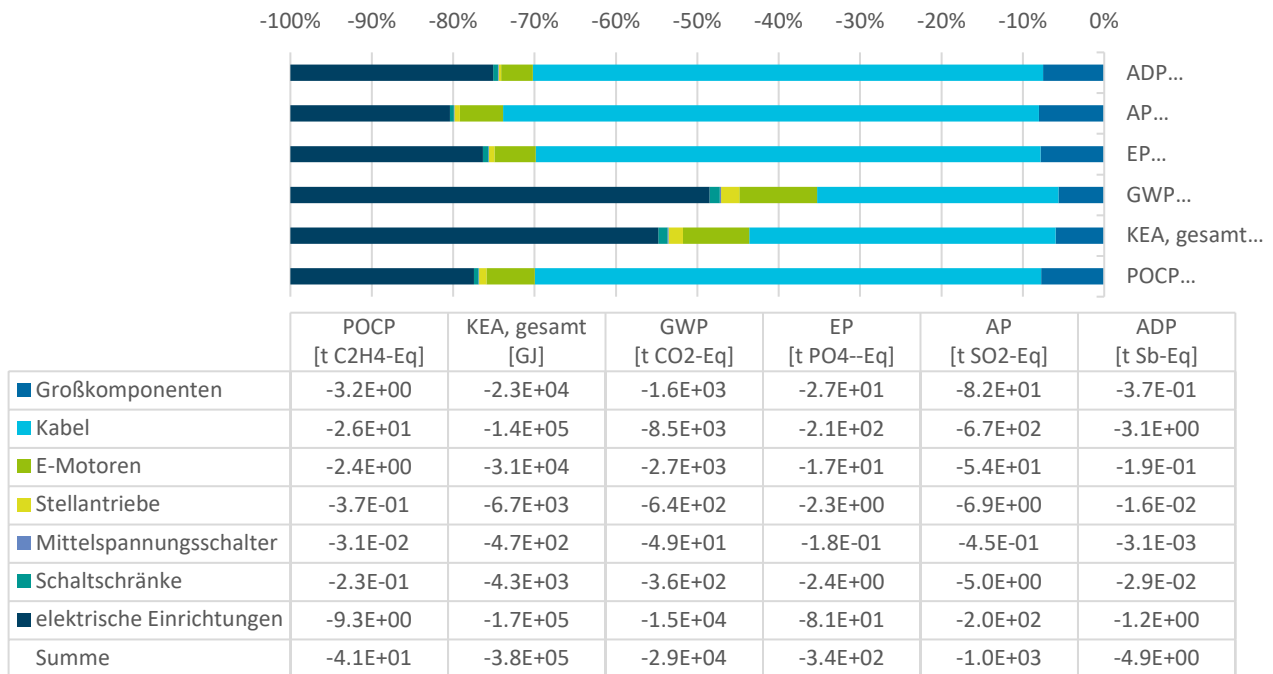


Abbildung 4-1 Gesamtergebnisse Wirkungsabschätzung KKP 1

Für KKP 1 ergeben sich über alle Wirkungskategorien als Ergebnis potenzielle Gutschriften durch die Verwertung der betrachteten Obergruppen. Kabel und elektrische Einrichtungen weisen durchgängig die größten Anteile auf. Bis auf in den Wirkungskategorien KEA-total und GWP gehen etwa 60 % der potenziellen Gutschriften auf die vermiedene Kupferproduktion durch die Verwertung der Kabel zurück. Insgesamt ergibt sich hinsichtlich des GWPs eine potenzielle Gutschrift von etwa 28,7 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq für KKP 1.

Wie in Abbildung 4-2 zu sehen ist, zeigt sich für KKP 2 ein ähnliches Bild. Allerdings weisen hier neben den Kabeln und elektrischen Einrichtungen die Großkomponenten mit 10 – 20 % einen größeren Anteil als bei KKP 1 auf. Insgesamt ergibt sich hinsichtlich des GWPs eine potenzielle Gutschrift von etwa 52,2 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq für KKP 2.

### Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung für KKP 2 Anteile der Obergruppen am Gesamtergebnis

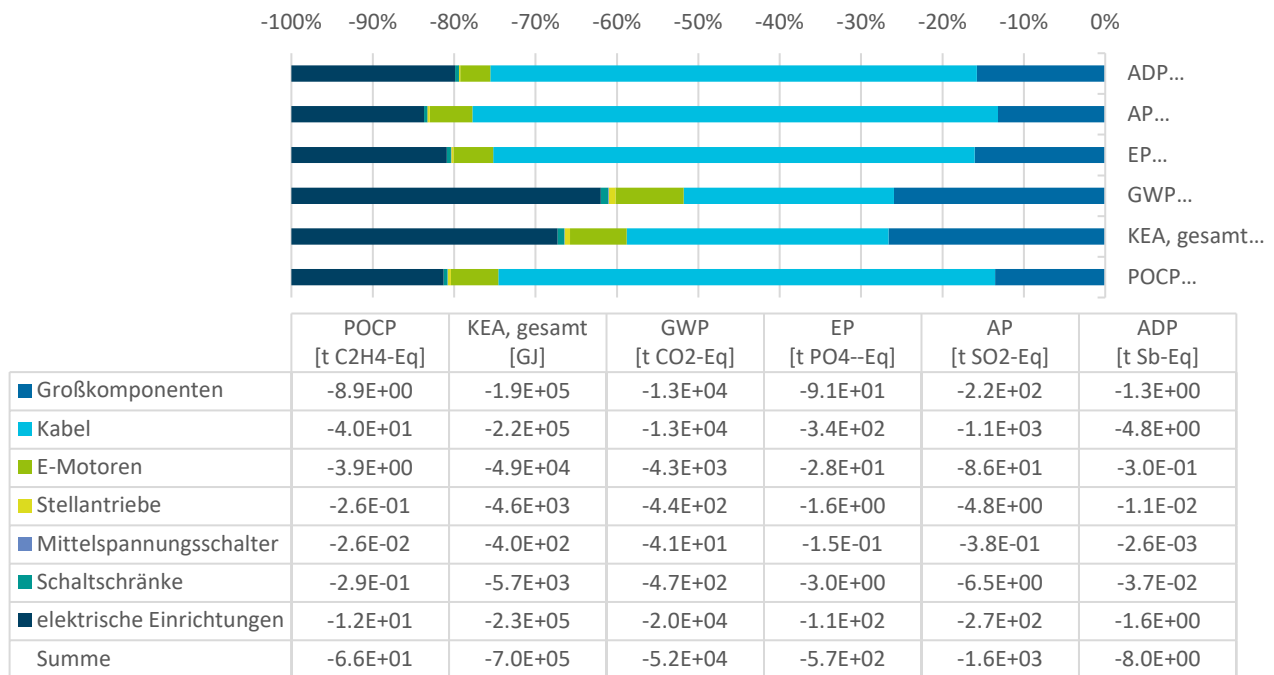
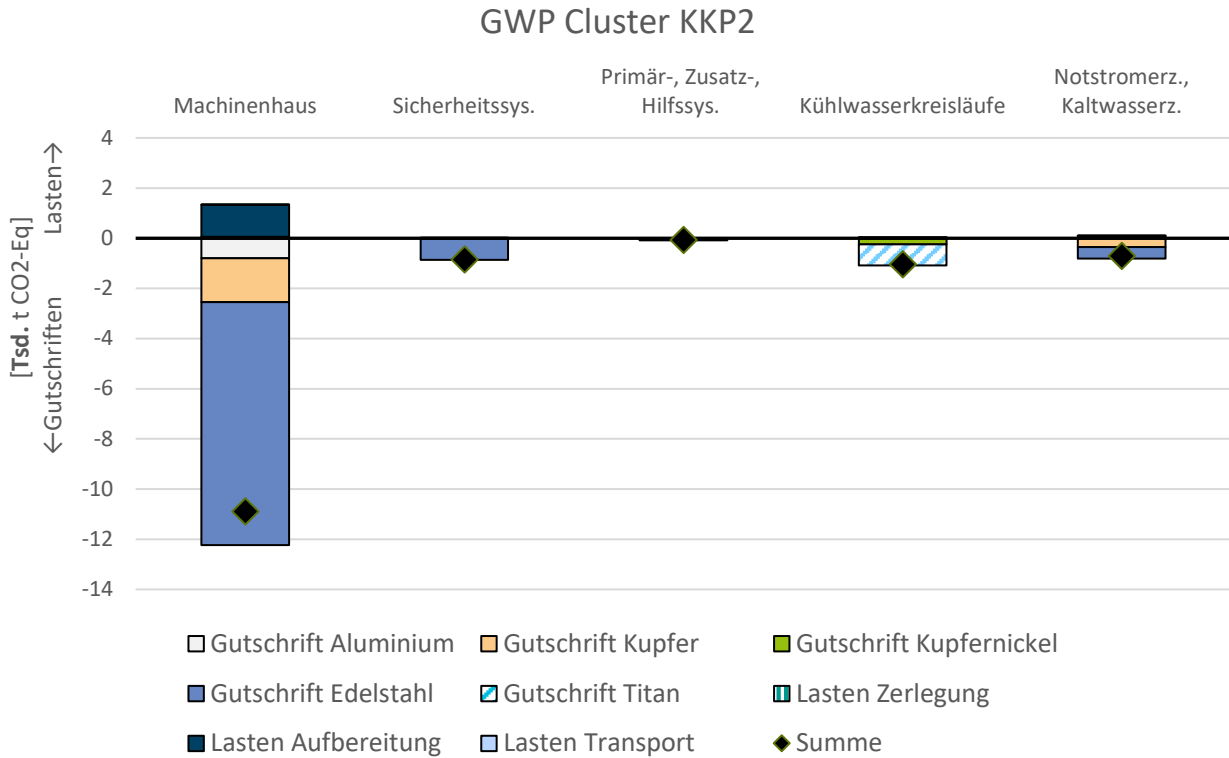


Abbildung 4-2 Gesamtergebnisse Wirkungsabschätzung KKP 2

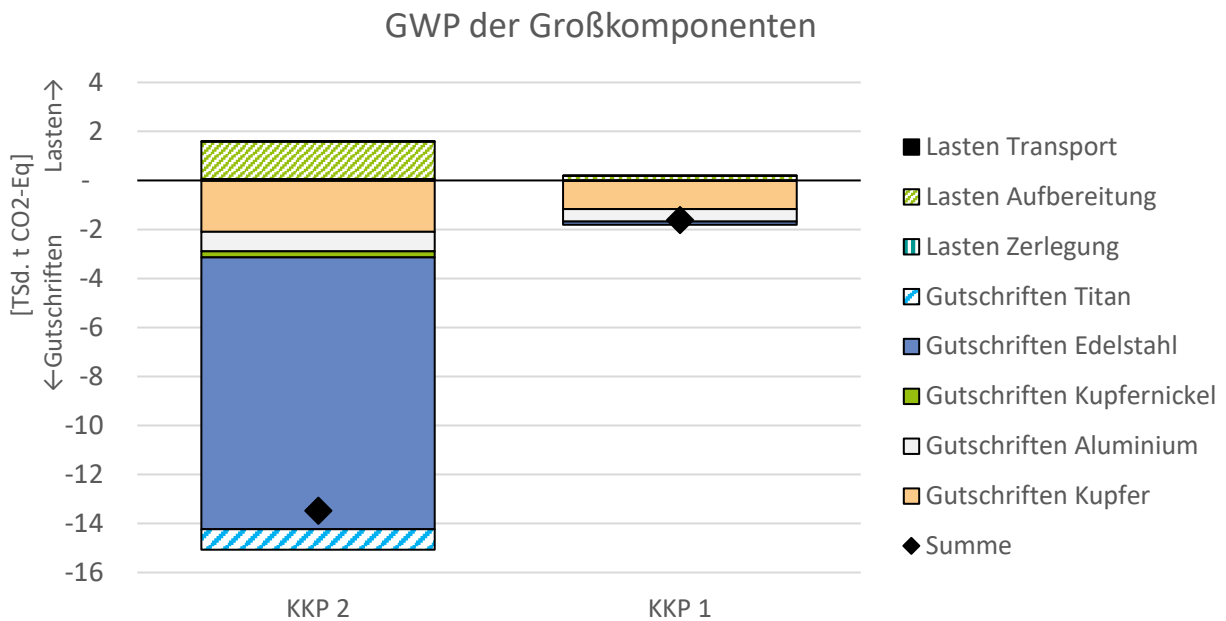
#### 4.2. Großkomponenten

Abbildung 4-3 zeigt das GWP der Großkomponenten von KKP2 nach Clustern (Maschinenhaus, Sicherheitssysteme, Primär-, Zusatz und Hilfssysteme, Kühlwasserkreisläufe sowie Notstromerzeugung und Kaltwasserzentrale) in Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq Da in KKP 2 eine hohe Anzahl an Großkomponenten identifiziert werden konnte (ca. 30 Stück) lohnt es sich hier eine Aufteilung nach den Systemen vorzunehmen. Dabei werden die Gutschriften der identifizierten Zielmetalle sowie die summierten Lasten für Zerlegung, Aufbereitung und Transport separat dargestellt. In Summe wurde für das Maschinenhaus eine potenzielle Gutschrift im GWP von ca. 11 Tsd. Tonnen CO<sub>2</sub>- Eq ermittelt. Für die anderen Cluster liegt dieser Wert meist deutlich unter 1 Tsd. Tonnen CO<sub>2</sub>- Eq Ein großer Anteil der Gutschriften geht auf die vermiedene Kupfer- und Edelstahlproduktion zurück. Bei Edelstahl verteilen sich die Gutschriften zu 69 % auf eingespartes Ferronickel, zu 24 % auf eingespartes Ferrochrom, und zu 5 % und 2 % auf eingespartes Molybdän und Mangan. Gleichzeitig trägt auch Titan trotz der geringen Menge (ca. 17 t) mit ca. 800 Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq zu einer Gutschrift im Cluster Kühlwasserkreisläufe bei. Die Lasten für Zerlegung, Aufbereitung und Transport reduzieren die potenziellen Gutschriften nur in geringem Maße.



**Abbildung 4-3 GWP der Großkomponenten von KKP2 nach Clustern in Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq**

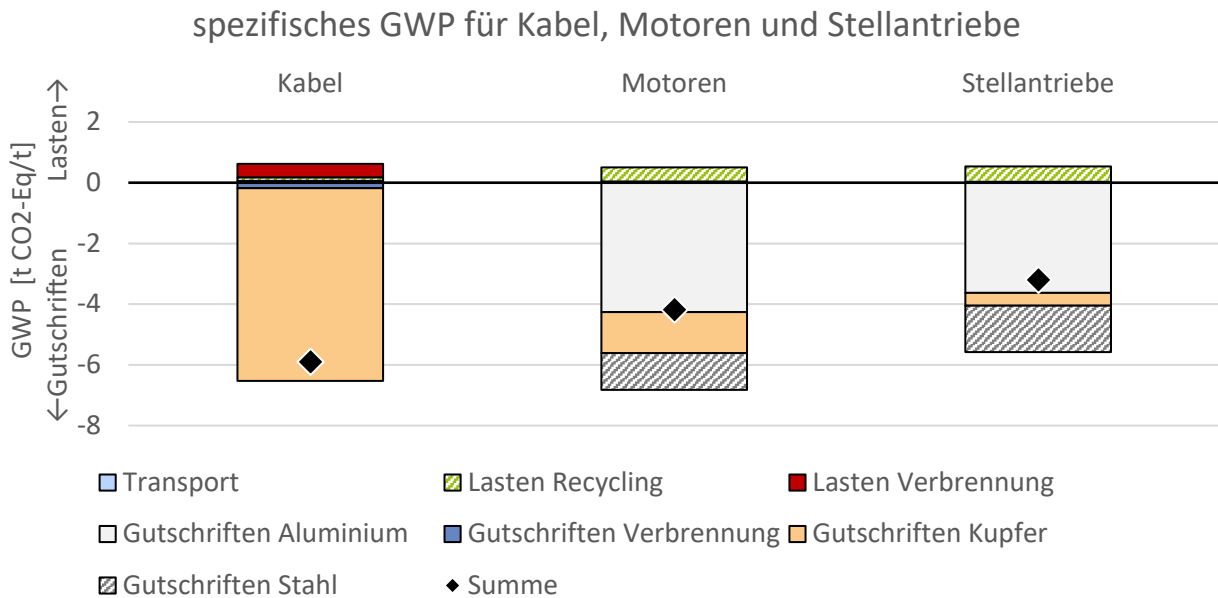
Für KKP 1 wurden deutlich weniger Komponenten identifiziert, die sich für ein Recycling eignen, da ein Großteil der Komponenten radioaktiv kontaminiert ist. Wie in Abbildung 4-4 dargestellt wurden für die Großkomponenten in KKP2 in Summe eine potenzielle Gutschrift im GWP von 13,48 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq ermittelt. Für die Großkomponenten von KKP 1 dagegen beträgt dieser Wert nur 1,52 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq Die Gutschriften von KKP1 gehen zum Großteil auf die vermiedene Kupferproduktion zurück.



**Abbildung 4-4 GWP Großkomponenten für KKP 2 und KKP 1 in Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq**

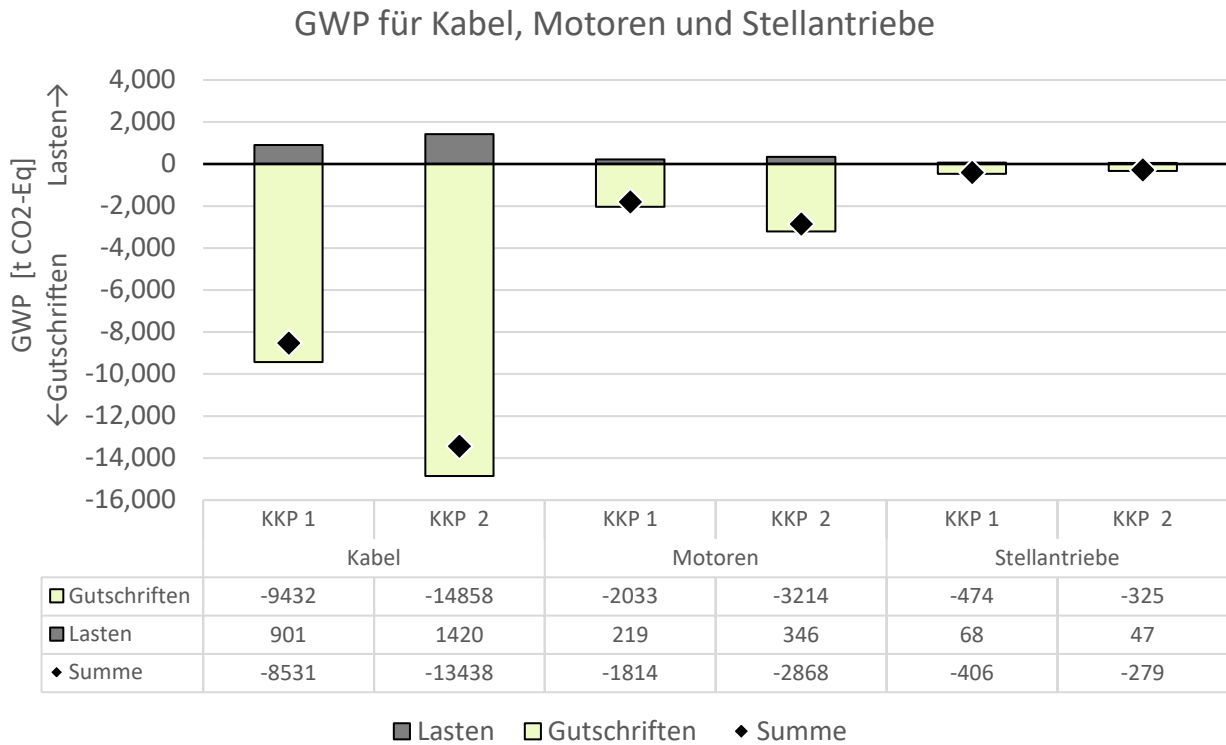
### 4.3. Kabel, E-Motoren und Stellantriebe

Für die Kabeln, E-Motoren und Stellantriebe ist zunächst in Abbildung 4-5 das GWP bezogen auf eine Tonne Inputmaterial dargestellt, also jeweils das spezifische GWP. Das spezifische GWP wird jeweils von den Gutschriften für die durch das Recycling vermiedene Produktion der Zielmetalle dominiert. Die Lasten durch die Recyclingaufwendungen bzw. bei Kabeln für die Entsorgung der Ummantelung fallen im Verhältnis gering aus. Pro Tonne Inputmaterial beträgt das spezifische GWP für Kabel -5,90 t CO<sub>2</sub>- Eq, für die Motoren -4,18 CO<sub>2</sub>- Eq und für die Stellantriebe ca. -3,12 CO<sub>2</sub>- Eq.



**Abbildung 4-5 GWP für Kabel, Motoren und Stellantriebe bezogen auf 1 Tonne Inputmaterial**

Das für die Gesamttonnagen resultierende GWP für die Kabel, Motoren und Stellantriebe von KKP1 und KKP2 ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Für die Verwertung der Kabel ergeben sich aus der Verrechnung des spezifischen GWP und der Masse potenzielle Gutschriften von ca. 8,5 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq für KKP 1 und ca. 13,4 Tsd. CO<sub>2</sub>- Eq für KKP 2. Die potenziellen Gutschriften der Motoren mit ca. 1,8 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq für KKP 1 und ca. 2,9 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq für KKP 2 sowie der Stellantriebe mit jeweils unter 0,5 Tsd. t CO<sub>2</sub>- Eq fallen dagegen deutlich geringer aus.

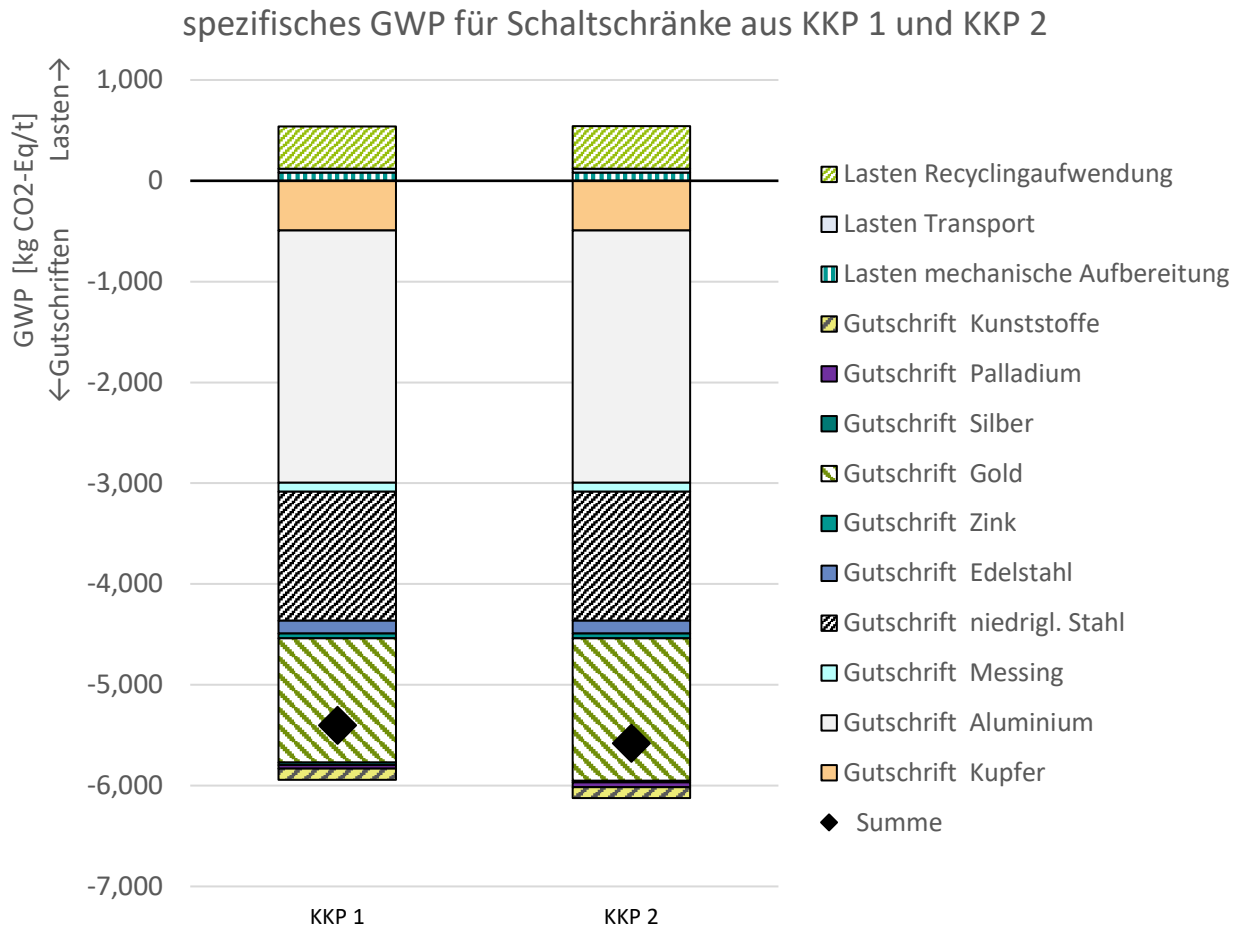


**Abbildung 4-6 GWP für Kabel, Motoren und Stellantriebe bezogen auf die Gesamttonnagen in KKP 1 und KKP 2**

#### 4.4. Komponenten der E- und Leittechnik

Zu den Komponenten der E- und Leittechnik zählen Schaltschränke, Mittelspannungsschalter und elektrische Einrichtungen. Für die Komponenten der E- und Leittechnik ist zunächst in Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 das GWP bezogen auf eine Tonne Inputmaterial dargestellt, also jeweils das spezifische GWP.

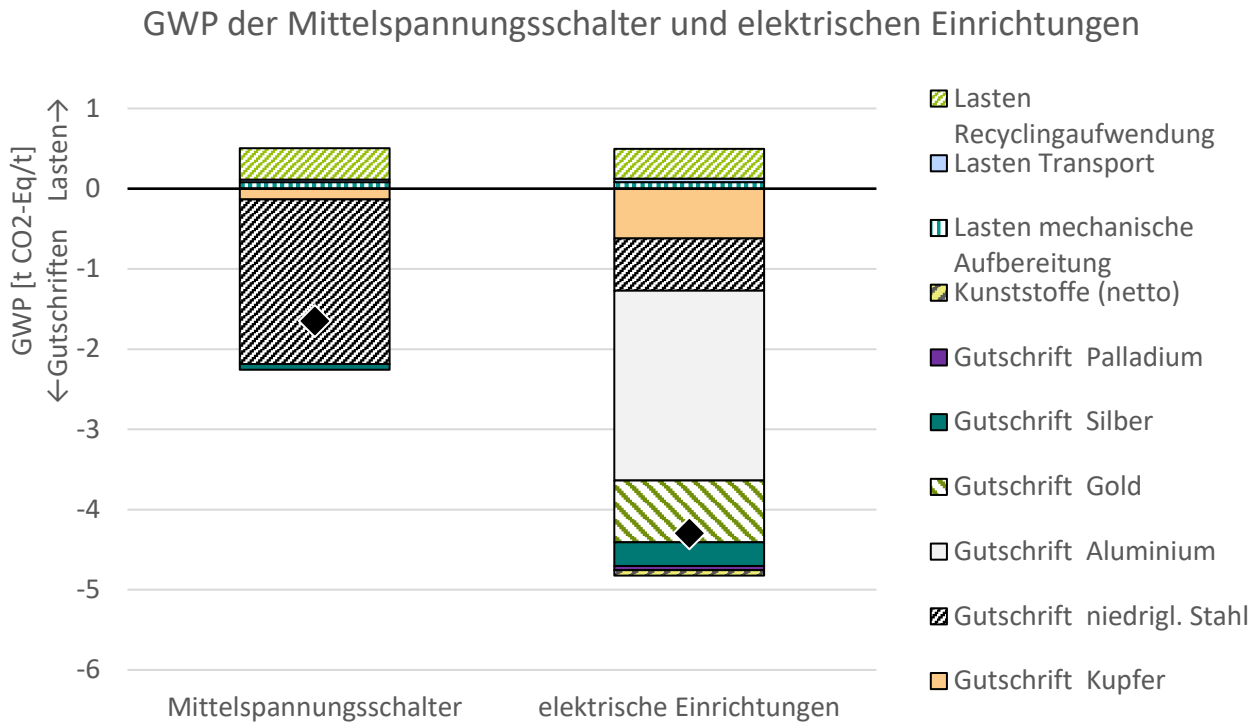
Für die Schaltschränke aus KKP 1 und KKP 2 beträgt das spezifische GWP jeweils ca. -5,5 t CO<sub>2</sub>-Eq. In Abbildung 4-7 wird deutlich, dass die Gutschriften für Aluminium, niedriglegiertem Stahl und Gold das spezifische GWP der Schaltschränke dominieren.



**Abbildung 4-7 GWP für Schaltschranke bezogen auf 1 Tonne Inputmaterial**

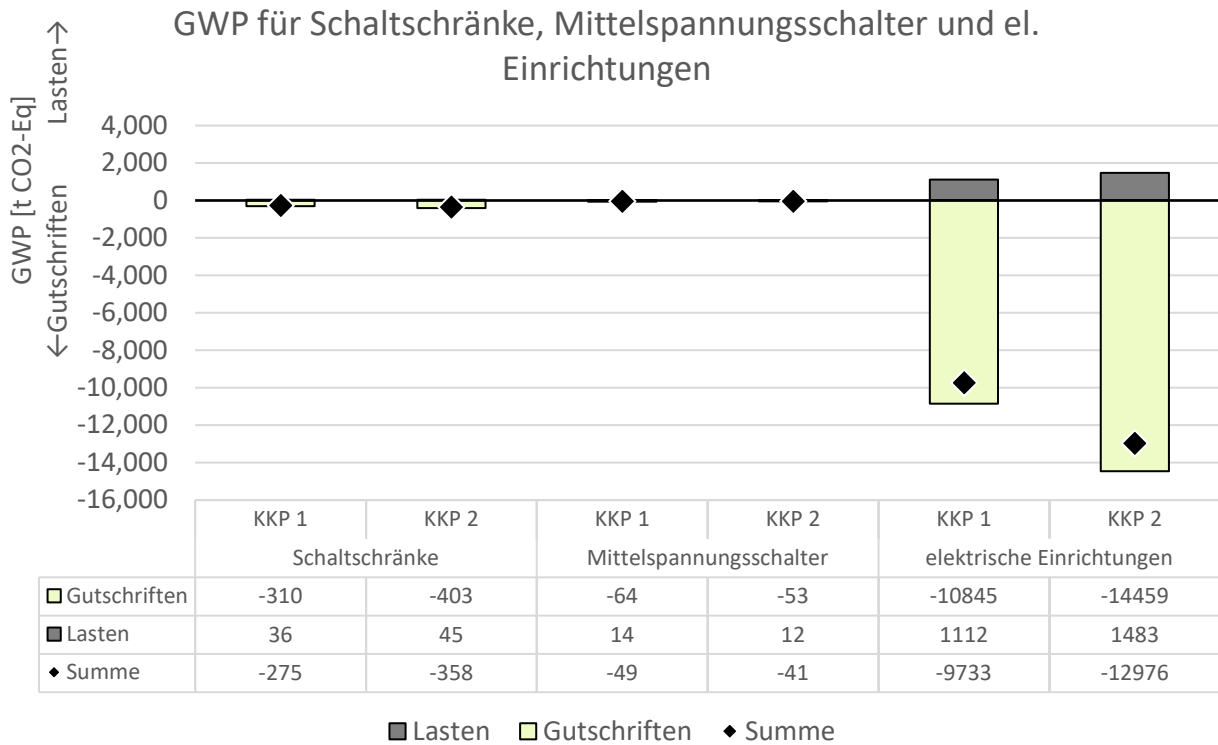
Wie in Abbildung 4-8 grafisch dargestellt, beträgt das spezifische GWP für die Mittelspannungsschalter -1,7 t CO<sub>2</sub>- Eq und für die elektrischen Einrichtungen -4,3 t CO<sub>2</sub>- Eq. Das spezifische GWP der Mittelspannungsschalter geht zum größten Teil auf die Gutschrift für niedrig legierten Stahl zurück. Das spezifische GWP der elektrischen Einrichtung wird zum größten Teil durch die Gutschriften für Aluminium sowie für Gold und niedrig legiertem Stahl beeinflusst.





**Abbildung 4-8 GWP für Mittelspannungsschalter und elektrische Einrichtungen bezogen auf 1 Tonne Inputmaterial**

Im nächsten Schritt kann das spezifische GWP mit den entsprechenden Massen der Komponenten der E- und Leittechnik für KKP 1 und für KKP 2 verrechnet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 4-9 grafisch dargestellt. Aus der Verwertung der Schaltschränke und Mittelspannungsschalter ergibt sich eine vergleichsweise geringe Gutschein. Für Mittelspannungsschalter liegt sie bei KKP 1 bei -49 t CO<sub>2</sub>-Eq, bei KKP 2 bei -41 t CO<sub>2</sub>-Eq. Bei Schaltschränken wurde eine potenzielle Gutschein von ca. -275 t CO<sub>2</sub>-Eq für KKP 1 errechnet und -358 t CO<sub>2</sub>-Eq für KKP 2. Bei der Verwertung der elektrischen Einrichtungen fällt die potenzielle Gutschein um mehrere Größenordnungen höher aus. Für KKP 1 sind es -9,7 Tsd. t CO<sub>2</sub>-Eq und für KKP 2 -12,9 Tsd. t CO<sub>2</sub>-Eq.



**Abbildung 4-9 GWP für Schaltschränke, Mittelspannungsschalter und elektrische Einrichtungen bezogen auf die Gesamttonnagen in KKP 1 und KKP 2**

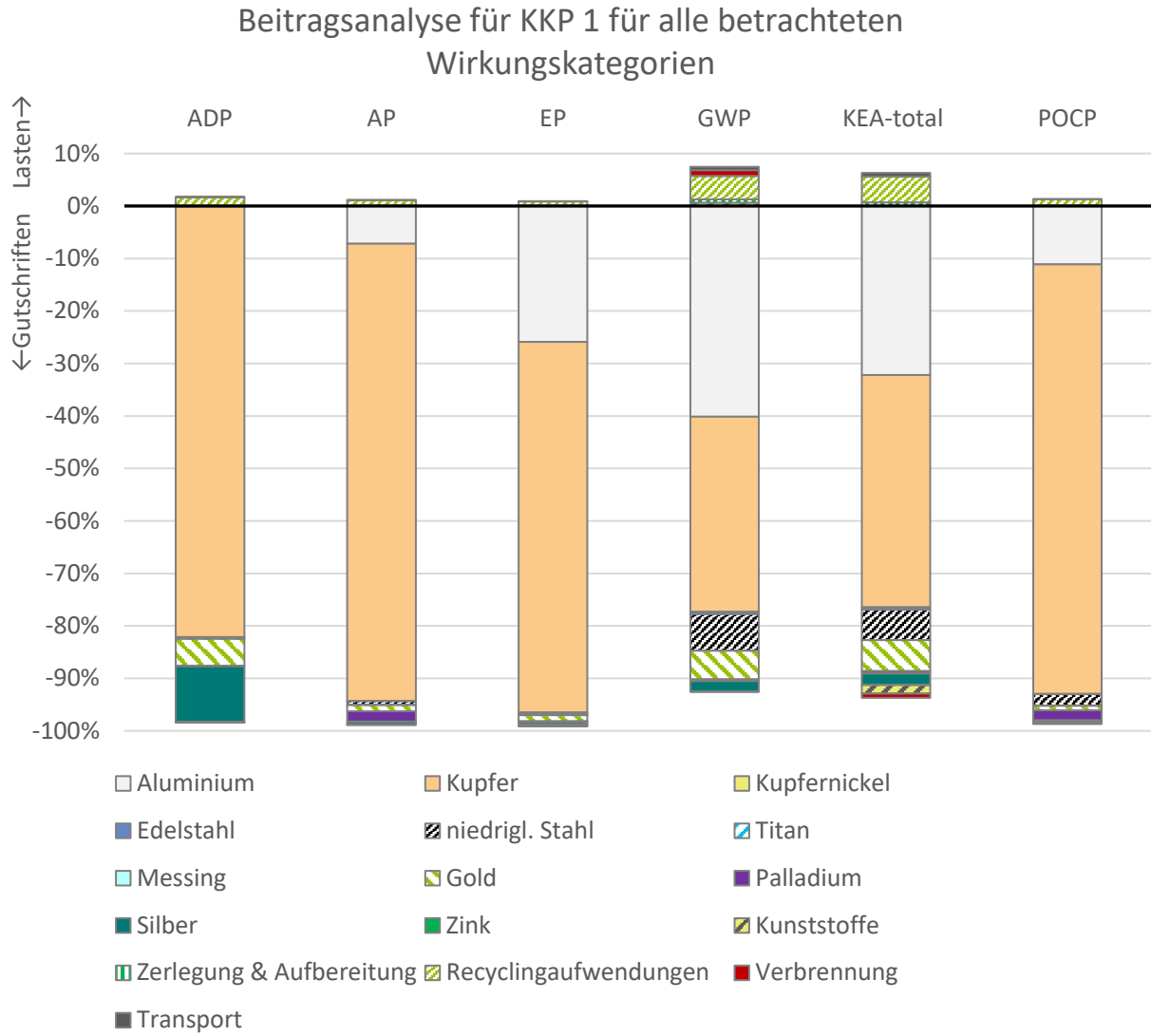
## 5. Auswertung der Ökobilanz

Das folgende Kapitel wertet die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse aus. Hierzu werden zunächst Parameter und Annahmen, die die Ergebnisse der Ökobilanz wesentlich beeinflussen, herausgearbeitet und diskutiert (Kapitel 5.1). Davon ausgehend wird die Relevanz der Aussagen der Ökobilanz beurteilt. Hierfür erfolgt zunächst die Prüfung der Vollständigkeit (Kapitel 5.2.1), darauf folgend die Analyse der Beeinflussung des Ergebnisses durch variierte Einflussgrößen (Sensitivitätsanalysen, Kapitel 5.2.2) und eine Erörterung der Konsistenz der Ergebnisse (Kapitel 5.2.3). Abschließend geht Kapitel 6 zusammenfassend auf Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen ein, die sich aus der Ökobilanz ergeben.

### 5.1. Identifizierung der signifikanten Parameter

Nachdem im Kapitel 4 bereits die Ergebnisse im Detail für das Erderwärmungspotenzial betrachtet wurden, ist nun in Abbildung 5-1 die Beitragsanalyse über alle Wirkungskategorien für KKP 1 und in Abbildung 5-2 für KKP 2 dargestellt. Die ökologischen Wirkungen in den einzelnen Wirkungskategorien sind auf 100 % skaliert.

In allen Wirkungskategorien für KKP 1 wird deutlich, dass die Gutschriften für die identifizierten Zielmetalle die Ergebnisse dominieren. Dies trifft für die Wirkungskategorien ADP, AP, EP und POCP insbesondere auf Kupfer mit über 80 % zu, während in den Kategorien GWP und KEA-total Aluminium mit über 20 % ebenfalls einen signifikanten Beitrag liefert.



**Abbildung 5-1 Beitragsanalyse der Prozesse für alle Wirkungskategorien - KKP 1**

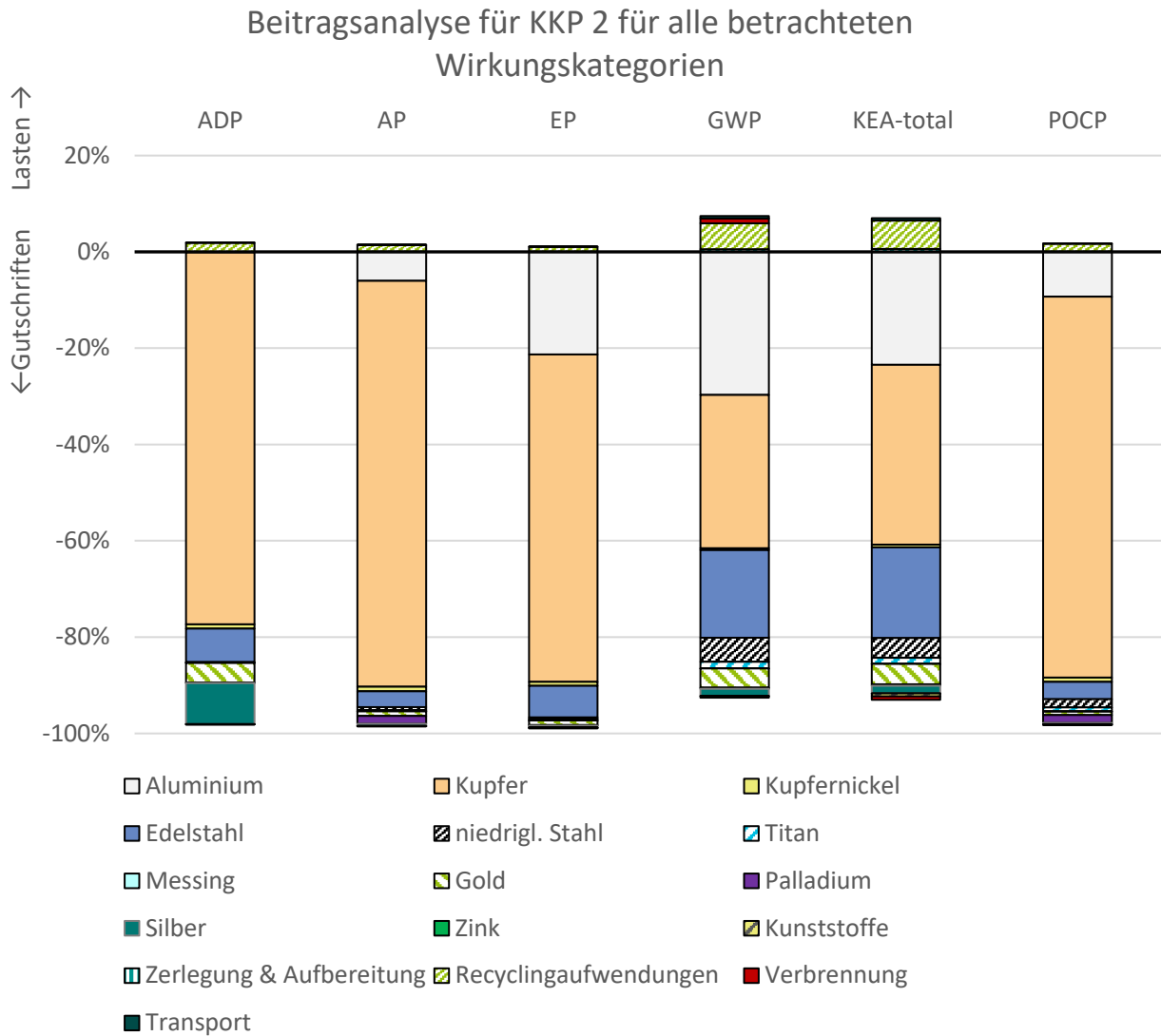
Tabelle 5-1 zeigt eine Beitragsanalyse nach Elementarflüssen für KKP 1. Die Ergebnisse sind auf -100 % normiert und es wird nicht nach Lasten und Gutschriften unterschieden.

**Tabelle 5-1 Beitragsanalyse der Elementarflüsse für alle Wirkungskategorien – KKP 2**

ADP		GWP	
Kupfer	-44%	Kohlenstoffdioxid (fossil)	-86%
Silber	-24%	Methan	-10%
Molybdän	-13%	Lachgas	-1%
Selen	-13%	andere	-3%
andere	-6%	<b>KEA-gesamt</b>	
<b>AP</b>		Steinkohle	-43%
Schwefeldioxid	-89%	Erdgas	-17%
Stickoxide	-8%	pot. Energie (Wasser)	-13%
Ammoniak	-3%	Öl	-13%
andere	<-1%	Uran	-7%
<b>EP</b>		andere	-7%
Phosphat	-84%	<b>POCP</b>	
Chemischer Sauerstoffbedarf	-4%	Schwefeldioxid	-89%
Stickoxide	-6%	Kohlenstoffmonoxid	-7%
Stickstoff	-2%	Methan	-1%
andere	-3%	andere	-2%

Beim ADP fällt auf, dass dieses durch Kupfer dominiert wird (Rückgewinnung von Kupfer). Einen maßgeblichen Anteil am ADP haben aber auch Silber (Rückgewinnung von Silber aus Schaltschränken und elektrischen Einrichtungen) und Molybdän (Rückgewinnung von Edelstahl). Das hohe ADP für Selen lässt sich auch auf den Kupferabbau in der Primärroute zurückführen. Sowohl beim AP als auch beim POCP ist die Emission von Schwefeloxid der Haupttreiber. Diese Emissionen stammen hauptsächlich aus der Bereitstellung von Kupfer, Aluminium und Edelmetallen über die Primärroute. Phosphate sind beim EP der dominante Elementarfluss. Diese stammen hauptsächlich aus der Bereitstellung von Kupfer über die Primärroute, bzw. genauer aus den Tailings. Das GWP wird maßgeblich durch CO<sub>2</sub> Emissionen bestimmt. Das GWP wurde bereits ausführlich diskutiert, weshalb an dieser Stelle auf weitere Ausführungen verzichtet wird. Der KEA wird vorrangig durch fossilstämmige Energieträger (insbesondere Steinkohle, Erdgas und Öl) bestritten. Dies stellt letztlich einen Indikator welche Energieträger für die ausgewählten Metalle im weltweiten Mix eingesetzt werden, um diese über die Primärroute abzubauen.

Bei KKP 2 zeichnet sich das gleiche Bild ab. Die Bilanz wird durch die Gutschriften der zurückgewonnenen Zielmetalle dominiert. Die Gutschriften gehen bei KKP 2 abweichend von KKP 1 neben Kupfer und Aluminium auch relevanten Anteil auf Edelstahl zurück. Die Beiträge der anderen Zielmetalle sowie der Parameter Transport, Zerlegung & Aufbereitung, Verbrennung sowie fallen dagegen gering aus. Einzig die Recyclingaufwendungen weisen mit bis zu 10 % einen relevanten Beitrag auf.



**Abbildung 5-2 Beitragsanalyse für alle Wirkungskategorien KKP 2**

Nachstehend folgt in Tabelle 5-2 eine Beitragsanalyse anhand der Elementarflüsse für alle Wirkungskategorien. Die Ergebnisse und deren Zustandekommen unterscheiden sich kaum von denen in KKP 2 (vgl. Tabelle 5-1), weshalb auf eine weitere detaillierte Auswertung an der Stelle verzichtet wird.

**Tabelle 5-2 Beitragsanalyse der Elementarflüsse für alle Wirkungskategorien – KKP 2**

ADP		GWP	
Kupfer	-44%	Kohlenstoffdioxid (fossil)	-87%
Silber	-21%	Methan	-9%
Molybdän	-14%	Lachgas	-1%
Selen	-13%	andere	-3%
andere	-8%	<b>KEA-gesamt</b>	
AP		Steinkohle	-42%
Schwefeldioxid	-89%	Erdgas	-18%
Stickoxide	-8%	pot. Energie (Wasser)	-14%

Ammoniak	-3%	Öl	-12%
andere	<-1%	Uran	-7%
<b>EP</b>		andere	-8%
Phosphat	-83%	<b>POCP</b>	
Chemischer Sauerstoffbedarf	-5%	Schwefeldioxid	-88%
Stickoxide	-6%	Kohlenstoffmonoxid	-8%
Stickstoff	-2%	Methan	-2%
Andere	-3 %	Andere	-2%

## 5.2. Beurteilung

Nachfolgend soll eine Vollständigkeits-, eine Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung der gerechneten Systeme durchgeführt werden.

### 5.2.1. Vollständigkeitsprüfung

Hinsichtlich der aufgenommenen werthaltigen Komponenten kann die Bilanz unvollständig sein. Dies kann daran liegen, dass nicht alle werthaltigen Komponenten identifiziert wurden. Kerntechnische Anlagen verfügen über unzählige Komponenten und Aggregate, die teilweise nur handschriftlich dokumentiert wurden. Aus den Werkstoffblättern lassen sich bei Großkomponenten zusätzlich oft nicht die Mengen werthaltiger Materialien herauslesen, weil diese so nicht dokumentiert wurden.

Abgesehen davon wurden bei der Bilanzierung, innerhalb der festgelegten Systemgrenzen alle Prozessschritte vom Abfallanfall über die Aufbereitung bis hin zu einem marktfähigen Rezyklat berücksichtigt. Die Behandlung aller Nebenprodukte (beispielsweise energetische Verwertung von Kabelummantelungen) wurde ebenfalls berücksichtigt. Innerhalb der definierten Systemgrenzen wurden somit alle Prozesse vollständig abgedeckt.

### 5.2.2. Sensitivitätsprüfung

Um die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen, können Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um zu ermitteln, ob sich die Aussage der Ergebnisse ändern kann. Dazu werden Parameter, die gleichzeitig einen hohen Unsicherheitsbereich aufweisen und einen hohen Einfluss auf die Gesamtbilanz haben variiert werden. Da die Ökobilanz durch die Gutschriften für die zurückgewonnen Metalle dominiert wird, stehen diese im Fokus einer Sensitivitätsprüfung.

Bei der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen wurde festgelegt, dass Gutschriften so erteilt werden, dass sie das maximale Potenzial des Recyclingprozesses widerspiegeln. Daher wurden die Gutschriften ausschließlich gegenüber Primärmaterial erteilt. Diese Art der Substitution kann kritisch betrachtet werden, insofern als dass der attributive Charakter der Ökobilanz nicht bedient wird. Die Gutschriftenerteilung in attributiven Ökobilanzen fordert, dass die Bemessung des ökologischen Gegenwerts anhand nutzengleicher Produkte erfolgt. Das heißt, dass keine Überlegung durchgeführt werden sollen, welches Produkt vermieden wird, sondern ein ausgeglichener Nutzenkorb hergestellt werden muss. Daher sollen die Gutschriften für zurückgewonnene Metalle nicht nur anhand der Primärroute ausgewiesen werden, sondern auch anhand des Marktmixes der entsprechenden Metalle. Beim Marktmix wird die Bereitstellung der Metalle über die Primärroute und Sekundärroute berücksichtigt. Die Bilanzierung der Marktmixe der relevanten Metalle erfolgt anhand der Modellierungen in Tabelle 5-3.

**Tabelle 5-3 Metalle und Beschreibung des Prozesses zur Abbildung des Marktmixes**

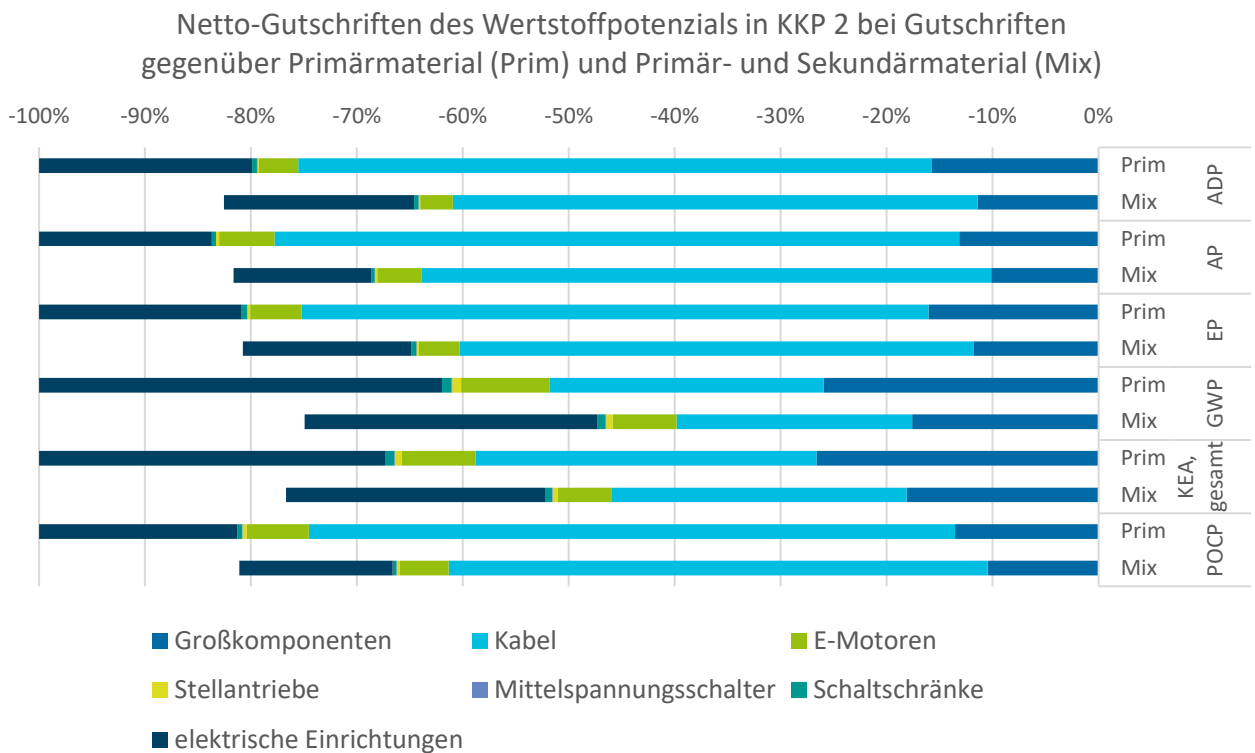
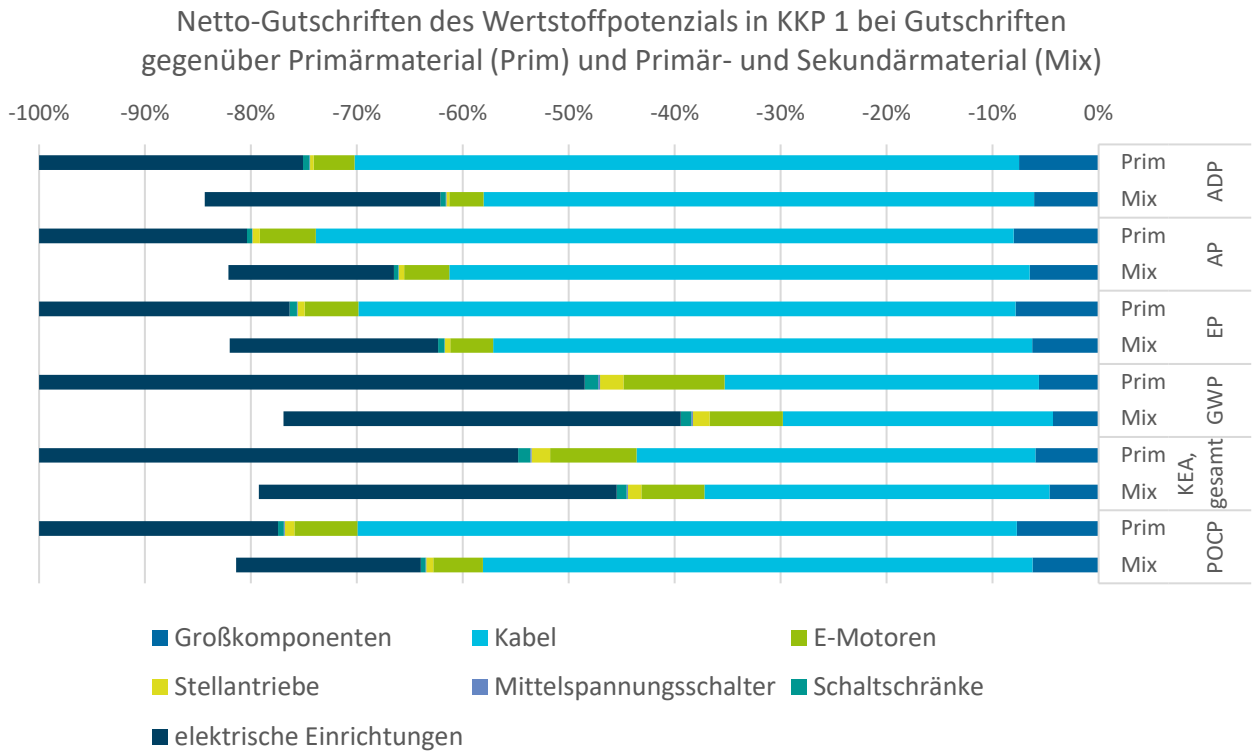
Metall	Hintergrundprozess Marktmix
Kupfer	ecoinvent Prozess: „market for copper, cathode   copper, cathode – GLO“ (keine Anpassung)
Zink	Nach Kania und Saturnus(2023) kann für Zink ein Recyclinganteil von 30 % angenommen werden. Es wird angenommen, dass die Aufbereitung von Zinkschrott ähnlich abläuft wie die Aufbereitung von Zinkkonzentrat aus Primärmaterial. Der ecoinvent Prozess „primary zinc production from concentrate“ wird dahingehend angepasst, dass der Input “zinc concentrate”, bzw. Der zugehörige Prozess „zinc mine operation   zinc concentrate – GLO“ in der Sekundärroute nicht berücksichtigt wird. <small>Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben. Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.</small>
Messing	Die Marktmixe für Kupfer und Zink werden anstatt deren Primärroute berücksichtigt.
Aluminium	Anteile Primär- und Sekundärmaterial nach International Aluminium Institute (2024) entsprechend des Jahres 2021. Demnach sind 64 % Primärmaterial (Modellierung siehe Kapitel 3.1.1), 15 % Aluminium aus post-industrial Material, und 21 % aus post-consumer Material. Die Modellierung für den post-industrial Strom erfolgt nach den ecoinvent Prozessen „treatment of aluminium scrap, new, at remelter/refiner“, die des post-consumer Stroms nach den Prozessen „treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter/refiner“ <sup>15</sup>
Stahl, niedriglegiert	Ecoinvent Prozess: “market for steel, low-alloyed   steel, low-alloyed – GLO” (keine Anpassung)
Stahl, hochlegiert (Edelstahl)	Die Modellierung ändert sich dahingehend, dass die Legierungselemente Nickel, Chrom, Mangan und Molybdän nicht mehr vollständig über Primärmaterial bereitgestellt werden. Nach worldstainless (2023) beträgt die „Recycling Input Rate“ <sup>16</sup> 37 %. Dieser Faktor wird für alle Legierungselemente (Cr, Ni, Mo, Mn) gleichermaßen verwendet. Das heißt 63 % der Legierungselemente werden weiterhin über die Primärroute bereitgestellt, 37 % werden lastenfrei (ohne Vorkette) in das System aufgenommen.
Edelmetalle	Für die Edelmetalle Silber, Gold, Palladium werden die Marktmixe aus ecoinvent unverändert verwendet („market for silver/gold/palladium – GLO)

Wird eine Gutschrift gegenüber dem Marktmix anstatt Primärmaterial erteilt, zeigt sich eine Reduzierung der Nettogutschriften über alle Wirkungskategorien um ca. 20 %. Ebenso ist für die einzelnen Obergruppen eine Reduzierung in der Größenordnung von 10-30 % erkennbar. In Abbildung 5-3 sind die Netto-Gutschriften separat für KKP 1 und KKP 2 für die untersuchten Wirkungskategorien dargestellt. Dabei wird einmal mit einer Gutschrift gegenüber Primärmaterial gerechnet (Prim) und

<sup>15</sup> Die Anteile die über den refiner bzw. remelter verwertet werden, bzw. auch die Verteilung nach geographischen Bezugsraum wird aus den Marktmixen für Knet- und Gussaluminium entnommen.

<sup>16</sup> Der Anteil berechnet sich aus dem Verhältnis von Edelstahlschrott (stainless scrap) zu produziertem Edelstahl

einmal mit einer Gutschrift gegenüber dem Marktmix (Mix). Referenzfall ist Prim und die entsprechende Nettogutschrift entspricht in der jeweiligen Kategorie -100 %. Bei Gutschriften gegenüber dem Marktmix fallen die Netto-Gutschriften entsprechend geringer aus. Die absoluten Ergebnisse befinden sich in Anhang A-2.





**Abbildung 5-3 Netto-Gutschriften der Wertstoffpotenziale in KKP 1 (oben) und KKP 2 (unten) bei Gutschriften gegenüber Primärmaterial und dem Marktmix.**

**5.2.3. Konsistenzprüfung**

Die Erhebung des Wertstoffmenge bzw. die Zusammensetzung der untersuchten Komponenten erfolgte abhängig von der betrachteten Obergruppe nach einer unterschiedlichen Methodik. In diesem Zusammenhang wird darauf verwiesen werden, dass bei Großkomponenten nur diejenigen Materialien berücksichtigt wurden, die als werthaltig definiert wurden (niedriglegierter Stahl z.B. wurde nicht berücksichtigt). Bei allen anderen Gruppen ist das nicht der Fall. Die Erhebung des Wertstoffprofils der Komponenten ist nur bedingt Teil dieses Ökobilanzberichts, weshalb an dieser Stelle auf den Hauptbericht (Spieth Achtnich et al. 2024) verwiesen wird. Dort wird die Methodik ausführlich erläutert.

Die Charakterisierungsfaktoren für die beschriebenen Wirkungskategorien entstammen mit Ausnahme des "KEA, gesamt" einer einheitlichen Quelle (GreenDelta 2021).

Die Bilanzierung erfolgt einheitlich innerhalb einer Software (openLCA) und mit einer Datenbank (ecoinvent v. 3.10). Die verwendeten generischen Datensätze führen teilweise aufgrund unterschiedlicher geographischer und zeitlicher Bezüge zu Inkonsistenzen. Die Daten sind teilweise veraltet oder basieren nur auf einer Anlage. Tabelle 5-4 gibt die wichtigsten Beispiele an, die zeigen, bei welchen Metallen die dünne Datenlage zu Inkonsistenzen führen kann. Als Folge der teilweise veralteten Daten, bzw. einer flächendeckend Abdeckung der Prozesse können sich folgende Verschiebungen bei den Ergebnissen ergeben:

- Durch eine ständige Verschärfung der Emissionswerte ist davon auszugehen, dass die Emissionen der Primärroute und Sekundärroute geringer ausfallen, als dies in der Vergangenheit war. Damit ergeben sich für das Ergebnis geringere Lasten aber auch Gutschriften.
- Ggf. werden weitere Hilfsstoffe benötigt, um die verschärften Emissionswerte einzuhalten.
- Durch Einbeziehung weiterer Anlagen und Verfahrenstypen kann sich eine Verschiebung bei der Wirkungsabschätzung ergeben.

**Tabelle 5-4 Geographischer und zeitlicher Bezug einiger ausgewählter Metalle.**

<b>Metall</b>	<b>Primärroute</b>	<b>Sekundärroute</b>
Kupfer	Daten zur Primärroute basieren auf elf verschiedenen Prozessen. Der Prozess mit dem höchsten Anteil ist <i>electrorefining of copper</i> , - GLO (~60 % Anteil am Marktmix). Die Daten basieren auf einer Publikation des Jahres 2009.	Kupferrecycling basiert auf einer Anlage. Die Daten stammen von 2003.
Edelstahl	Erstellt zwischen 2005 und 2010, Marktmix enthält einen nach eigener Aussage repräsentativen europäischen Mix und einen Mix für den Rest der Welt	Basiert auf Primärroute
Edelmetalle	Marktmix wird auf Basis von (nur) zwei Standorten abgeleitet (Bushveld, ZA und Norilsk, RU). Daten stammen teilweise noch von 2002. Hier gibt es hinsichtlich der Ergebnisse große Differenzen zwischen dem ecoinvent Datensatz und den Ergebnissen aus dem LCA for Experts Datensatz.	Rückgewinnung von Edelmetallen wird aufbauend auf einer Anlage in Schweden abgebildet. Daten stammen teilweise noch aus dem Jahr 2000.

## 6. Schlussfolgerungen

Kerntechnische Anlagen enthalten eine fast unüberschaubare Anzahl an Komponenten. Von Großkomponenten, wie Wärmetauschern oder Turbinen, über Motoren und Stellantriebe bis hin zu elektrischen Bauteilen werden alle diese Komponenten für den ordnungsgemäßen Betrieb benötigt. Durch den Rückbau von kerntechnischen Anlagen können diese Komponenten wieder dem Wertstoffkreislauf zugeführt werden. Im Rahmen des Projektes RecTecKA wurden werthaltige Komponenten identifiziert. Durch die hier vorliegende Bilanz wurde quantifiziert, wie hoch das Recyclingpotenzial von Metallen aus diesen ausfallen kann, wenn diese einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Die Bilanz zeigt, dass die Gutschriften für das zurückgewonnene Material die Recyclingaufwendungen um ein Vielfaches übersteigen. Hinsichtlich des GWP ist für alle Komponenten zu erkennen, dass die Gutschriften etwa zehnmal so hoch ausfallen wie die Lasten. Für andere betrachtete Wirkungskategorien fallen die Unterschiede noch wesentlich deutlicher aus. Der Löwenanteil der Gutschriften wird durch Kabel und elektrische Einrichtungen bestritten. Insbesondere bei KKP 2 wird eine hohe Gutschrift durch die Rückgewinnung von Großkomponenten erwirkt. Hinsichtlich des GWP kann durch das Recycling der ermittelten Komponenten eine CO<sub>2</sub>-Eq Menge von -29.000 t für KKP 1 eingespart werden, bei KKP 2 sind es -52.000 t CO<sub>2</sub>-Eq Dies entspricht in Summe dem jährlichen CO<sub>2</sub>-Eq Ausstoß von rund 9.000 deutschen Bürger\*innen<sup>17</sup>. Als Gesamtaussage lässt sich (unter den getroffenen Annahmen) festhalten, dass das Recycling von stillgelegten Kernkraftwerken allein durch die Rückgewinnung werthaltiger Komponenten ein hohes Potenzial aufweist.

### 6.1.1. Sensitivitätsanalysen

Innerhalb einer Sensitivitätsanalyse wurde ermittelt, wie sich die Ergebnisse verschieben, wenn die Gutschriften für zurückgewonnene Metalle nicht gegenüber Primärmaterial, sondern gegenüber dem Marktmix. Der Marktmix enthält neben Primärmaterial auch einen gewissen Anteil an Sekundärmaterial aus post-industrial und post-consumer Abfällen. Bei dieser Betrachtung zeigt sich, dass sich die Netto-Ergebnisse um etwa 20 % über alle Wirkungskategorien verringern. Die Netto-Gutschriften in der Wirkungskategorie GWP etwa verringern sich um 24 % von -81.000 t CO<sub>2</sub>-Eq auf -61.000 t CO<sub>2</sub>-Eq<sup>18</sup>.

### 6.1.2. Einschränkungen

Die beschriebenen Recyclingverfahren sind Stand der Technik und gängig für die betrachteten Stoffströme. Diese bestehen bei Komponenten, die aus mehreren Materialien bestehen aus einer mechanischen Aufbereitung und Sortierung in die entsprechenden Fraktionen. Die Metalle werden abschließend in Hütten, Stahlwerken o. ä. zu Sekundärmaterial aufbereitet.

Einschränkungen bei den Ergebnissen ergeben sich teilweise durch das hohe Datenalter der in ecoinvent hinterlegten Prozesse. Daher ist nicht auszuschließen, dass sich die Recyclingaufwendungen bzw. Gutschriften für zurückgewonnene Metalle bei einer Aktualisierung der Prozesse stark verändern können. Einschränkungen bei der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf ähnliche Stoffströme ergeben sich durch die spezifische Zusammensetzung der Komponenten. So weisen etwa Komponenten der E- und Leittechnik charakteristische Zusammensetzungen auf, die aufgrund des hohen Alters der Komponenten untypisch sind für heute verwendete elektrische und elektronische Bauteile. Weiterhin können diese Ergebnisse auch nicht ohne Weiteres auf andere

<sup>17</sup> Es wird von einem CO<sub>2</sub>-Eq Ausstoß von 9,1 t CO<sub>2</sub>-Eq pro deutscher/m Bürger\*in und Jahr ausgegangen (EEA 2024).

<sup>18</sup> In Summe für KKP 1 und KKP 2

kerntechnische Anlagen übertragen werden. Im Laufe der Zeit wurden viel Reaktorbautypen (Vor-Konvoi, Konvoi, KWU-Baulinie 69, 72, Gen 2 etc.) entwickelt, die sich hinsichtlich der verbauten Komponenten und Materialzusammensetzung stark unterscheiden können.

## Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2023): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2022. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/>.
- AG Fernwärme (2023): Hauptbericht 2022. Frankfurt. Online verfügbar unter <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>.
- Almeida, Anibal T. de; Ferreira, Fernando J. T. E.; Fong, João A. C. (2011): Standards for Efficiency of Electric Motors. In: *IEEE Ind. Appl. Mag.* 17 (1), S. 12–19. DOI: 10.1109/MIAS.2010.939427.
- bdguss (2013): Energieaspekte bei elektrisch beheizten Schmelzöfen. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e. V.
- Buchert, Matthias; Bleher, Daniel; Bulach, Winfried; Knappe, Florian; Muchow, Nadine; Reinhardt, Joachim; Meinshausen, Ingo (2022): Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III). Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (47/2022). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kartierung-des-anthropogenen-lagers-iii-kartal-iii>.
- Bulach, Winfried; Dehoust, Günter; Mayer, Felix; Möck, Alexandra (2022): Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Öko-Institut. Darmstadt/Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/oekobilanz-zu-den-leistungen-der-dualen-systeme-im-bereich-des-verpackungsrecyclings>.
- Classen, Mischa; Althaus, Hans-Jörg; Blaser, Silvio; Tuchschnid, Matthias; Jungbluth, Niels (2009): Life Cycle Inventories of Metals. ecoinvent v2.1 report No. 10. Unter Mitarbeit von ESU-services EMPA.
- CML (2016): CML-IA Characterisation Factors. Hg. v. Department of Industrial Ecology. Online verfügbar unter <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>.
- ISO 14040: DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement\_ - Ökobilanz\_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO\_14040:2006\_ + Amd\_1:2020); Deutsche Fassung EN\_ISO\_14040:2006\_ + A1:2020.
- ISO 14044: DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement\_ - Ökobilanz\_ - Anforderungen und Anleitungen (ISO\_14044:2006\_ + Amd\_1:2017\_ + Amd\_2:2020); Deutsche Fassung EN\_ISO\_14044:2006\_ + A1:2018\_ + A2:2020.
- ISO 14067: DIN EN ISO 14067:2019-02, Treibhausgase\_ - Carbon Footprint von Produkten\_ - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO\_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN\_ISO\_14067:2018.
- EEA (2024): EEA greenhouse gases — data viewer. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>.
- Europäische Investitionsbank (2018): Titan: wertvoller Nachschub für Europa. Neues Recyclingwerk schont Klima und Ressourcen. Online verfügbar unter <https://www.eib.org/de/stories/titanium-recycling>.
- European Aluminium (2018): Environmental Profile Report. Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Hg. v. European Aluminium. Brussels.
- Flamme, Sabine; Hanewinkel, Jörg; Quicker, Peter; Weber, Kathrin (2018): Energieerzeugung aus Abfällen: Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (51/2018).
- Fraunhofer ISE (2022): Energy-Charts. Nettostromerzeugung in Deutschland. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg. Online verfügbar unter [https://energy-charts.info/charts/energy\\_pie/chart.htm?l=de&c=DE](https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE).

- Frischknecht, Rolf; Jungbluth, Niels; Althaus, Hans-Jörg; Doka, Gabor; Dones, Roberto; Heck, Thomas et al. (2004): The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp). Hg. v. *Int J Life Cycle Assessment* (10, 3–9).
- GreenDelta (2021): openLCA LCIA methods. Version v.2.1.2. Berlin.
- Haupt, M.; Kägi, T.; Hellweg, S. (2018): Modular life cycle assessment of municipal solid waste management. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 79, S. 815–827. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.035.
- International Aluminium Institute (2024): Global Aluminium Cycle 2021. Online verfügbar unter <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/public-global-cycle/>.
- IPCC (2023): Climate change 2022. Mitigation of climate change : Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kania, Henryk; Saturnus, Mariola (2023): Evaluation and Current State of Primary and Secondary Zinc Production—A Review. In: *Applied Sciences* 13 (3), S. 2003. DOI: 10.3390/app13032003.
- Klöpffer, Walter (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527627158>.
- Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; Kauertz, Benedikt; Oetjen-Dehne, Rüdiger; Buschow, Nadine; Ritthoff, Michael et al. (2021): Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (92/2021). Online verfügbar unter [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7808/file/7808\\_Kunststoffrecycling.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7808/file/7808_Kunststoffrecycling.pdf).
- Kupferverband e.V. (2012): Life Cycle Assessment of copper – Basics. Online verfügbar unter <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/nachhaltige-oekobilanz/life-cycle-daten/analyse-von-kupferprodukten/?lang=en>.
- Kupferverband e.V. (2019): Recycling von Kupferwerkstoffen. Online verfügbar unter <https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf>.
- Mayer, Felix; Buchert, Matthias (2024): Treibhausgasbilanz für die ELECTROCYCLING GmbH. Hintergrunddokumentation. Hg. v. Öko-Institut e.V.
- MGG Polymers (2020): Volumen und Zusammensetzung von WEEE-Kunststoffen in Europa. Online verfügbar unter <https://mgg-polymers.com/de/news/blog/volumen-und-zusammensetzung-von-weee-kunststoffen-in-europa>.
- Microsoft Corporation (2024): Microsoft Bing Maps API. Online verfügbar unter <https://learn.microsoft.com/en-us/bingmaps/rest-services/locations/>.
- Sphera Solutions, Inc. (2024): LCA for Experts. Recycling of copper/palladium/silver/gold from electronic scrap. Leinfelden-Echterdingen.
- Spieth Achtnich, Angelika; Claus, Manuel; Ustohalova, Veronika; Pistner, Christoph; Buchert, Matthias; Mayer, Felix et al. (2024): RecTeCKA - Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben. Teil II. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse. Hg. v. Öko-Institut e.V.
- Takeda, Osamu; Ouchi, Takanari; Okabe, Toru H. (2020): Recent Progress in Titanium Extraction and Recycling. In: *Metall Mater Trans B* 51 (4), S. 1315–1328. DOI: 10.1007/s11663-020-01898-6.
- vdz (2022): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Online verfügbar unter [https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ\\_Umweltdaten\\_Environmental\\_Data\\_2022.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2022.pdf).

vdz (2023): Zementindustrie im Überblick 2023/2024. Online verfügbar unter <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2023-2024>.

Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.

worldstainless (2023): Global Life Cycle of Stainless Steel. Online verfügbar unter <https://www.worldstainless.org/news/global-life-cycle-of-stainless-steel/>.

## Anhang

### A-1. Pedigree-Matrix

**Tabelle A 1 Pedigree-Matrix nach Frischknecht et al. (2004)**

Indikator	1	2	3	4	5
<b>Zuverlässigkeit der Daten</b>	geprüfte Daten auf der Grundlage von Messungen	geprüfte Daten teilweise auf der Grundlage von Annahmen	nicht verifizierte Daten, die teilweise auf Annahmen beruhen	Qualifizierte Schätzungen	Nicht-qualifizierte Schätzungen
<b>Vollständigkeit</b>	Repräsentative Daten von allen Standorten, die für den betrachteten Markt relevant sind, über einen angemessenen Zeitraum, um normale Schwankungen auszugleichen	Repräsentative Daten von > 50 % der für den betrachteten Markt relevanten Standorte über einen angemessenen Zeitraum, um normale Schwankungen auszugleichen	Repräsentative Daten von nur einigen Standorten (<< 50 %), die für den betrachteten Markt relevant sind, oder > 50% der Standorte, aber aus kürzeren Zeiträumen	Repräsentative Daten von nur einem Standort, der für den betrachteten Markt relevant ist, oder von mehreren Standorten, aber aus kürzeren Zeiträumen	Repräsentativität unbekannt oder Daten von einer kleinen Anzahl von Standorten und aus kürzeren Zeiträumen
<b>Zeitliche Korrelation</b>	Weniger als 3 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes	Weniger als 6 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes	Weniger als 10 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes	Weniger als 15 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes	Alter der Daten nicht bekannt oder mehr als 15 Jahre Unterschied zum Zeitraum des Datensatzes
<b>Geographische Korrelation</b>	Daten aus dem untersuchten Gebiet	Durchschnittsdaten aus einem größeren Gebiet, in dem das untersuchte Gebiet enthalten ist	Daten aus Gebieten mit ähnlichen Produktionsbedingungen	Daten aus einem Gebiet mit leicht ähnlichen Produktionsbedingungen	Daten aus unbekanntem oder deutlich anderem Gebiet (Nordamerika statt Naher Osten, OECD-Europa statt Russland)
<b>Technologische Korrelation</b>	Daten aus den untersuchten Unternehmen, Prozessen und Materialien	Daten von untersuchten Verfahren und Materialien (d. h. identische Technologie), aber von verschiedenen Unternehmen	Daten aus den untersuchten Prozessen und Materialien, aber aus einer anderen Technologie	Daten über verwandte Verfahren oder Materialien	Daten über verwandte Prozesse im Labormaßstab oder aus anderen Technologien

## A-2. Absolute Ergebnisse der Auswertung für die betrachteten Wirkungskategorien

KKP 1												
	Verknappung abiotischer Ressourcen		Versauerungspotenzial		Eutrophierungspotenzial		Erderwärmungspotenzial		gesamter kumulierter Energieaufwand		Bildung von photochemischem Ozon	
	Prim <sup>a</sup>	Mix <sup>b</sup>	Prim	Mix	Prim	Mix	Prim	Mix	Prim	Mix	Prim	Mix
<b>Großkomponenten</b>	-3.7E-01	-3.0E-01	-8.2E+01	-6.7E+01	-2.7E+01	-2.2E+01	-1.6E+03	-1.2E+03	-2.3E+04	-1.8E+04	-3.2E+00	-2.6E+00
<b>Kabel</b>	-3.1E+00	-2.5E+00	-6.7E+02	-5.6E+02	-2.1E+02	-1.7E+02	-8.5E+03	-7.3E+03	-1.4E+05	-1.2E+05	-2.6E+01	-2.1E+01
<b>E-Motoren</b>	-1.9E-01	-1.6E-01	-5.4E+01	-4.4E+01	-1.7E+01	-1.4E+01	-2.7E+03	-2.0E+03	-3.1E+04	-2.3E+04	-2.4E+00	-1.9E+00
<b>Stellantriebe</b>	-1.6E-02	-1.4E-02	-6.9E+00	-5.4E+00	-2.3E+00	-1.8E+00	-6.4E+02	-4.6E+02	-6.7E+03	-4.8E+03	-3.7E-01	-2.8E-01
<b>Mittelspannungsschalter</b>	-3.1E-03	-2.7E-03	-4.5E-01	-3.9E-01	-1.8E-01	-1.6E-01	-4.9E+01	-4.4E+01	-4.7E+02	-4.3E+02	-3.1E-02	-2.6E-02
<b>Schaltanlagen</b>	-2.9E-02	-2.5E-02	-5.0E+00	-4.1E+00	-2.4E+00	-2.1E+00	-3.6E+02	-2.8E+02	-4.3E+03	-3.5E+03	-2.3E-01	-1.9E-01
<b>elektrische Einrichtungen</b>	-1.2E+00	-1.1E+00	-2.0E+02	-1.6E+02	-8.1E+01	-6.8E+01	-1.5E+04	-1.1E+04	-1.7E+05	-1.3E+05	-9.3E+00	-7.2E+00
<b>SUMME</b>	-4.9E+00	-4.1E+00	-1.0E+03	-8.4E+02	-3.4E+02	-2.8E+02	-2.9E+04	-2.2E+04	-3.8E+05	-3.0E+05	-4.1E+01	-3.3E+01
	[t Sb eq]		[t SO2 eq]		[t PO4 <sup>---</sup> eq]		[t CO2 eq]		[GJ]		[t C2H4 eq]	
KKP 2												
	Verknappung abiotischer Ressourcen		Versauerungspotenzial		Eutrophierungspotenzial		Erderwärmungspotenzial		gesamter kumulierter Energieaufwand		Bildung von photochemischem Ozon	
	Prim	Mix	Prim	Mix	Prim	Mix	Prim	Mix	Prim	Mix	Prim	Mix
<b>Großkomponenten</b>	-1.3E+00	-9.2E-01	-2.2E+02	-1.7E+02	-9.1E+01	-6.7E+01	-1.3E+04	-9.1E+03	-1.9E+05	-1.3E+05	-8.9E+00	-6.9E+00
<b>Kabel</b>	-4.8E+00	-4.0E+00	-1.1E+03	-8.8E+02	-3.4E+02	-2.8E+02	-1.3E+04	-1.2E+04	-2.2E+05	-1.9E+05	-4.0E+01	-3.4E+01
<b>E-Motoren</b>	-3.0E-01	-2.5E-01	-8.6E+01	-6.9E+01	-2.8E+01	-2.2E+01	-4.3E+03	-3.1E+03	-4.9E+04	-3.6E+04	-3.9E+00	-3.0E+00
<b>Stellantriebe</b>	-1.1E-02	-9.4E-03	-4.8E+00	-3.7E+00	-1.6E+00	-1.2E+00	-4.4E+02	-3.1E+02	-4.6E+03	-3.3E+03	-2.6E-01	-1.9E-01
<b>Mittelspannungsschalter</b>	-2.6E-03	-2.2E-03	-3.8E-01	-3.3E-01	-1.5E-01	-1.4E-01	-4.1E+01	-4.4E+01	-4.0E+02	-3.5E+02	-2.6E-02	-2.2E-02
<b>Schaltanlagen</b>	-3.7E-02	-3.3E-02	-6.5E+00	-5.4E+00	-3.0E+00	-2.8E+00	-4.7E+02	-3.7E+02	-5.7E+03	-4.6E+03	-2.9E-01	-2.4E-01
<b>elektrische Einrichtungen</b>	-1.6E+00	-1.4E+00	-2.7E+02	-2.1E+02	-1.1E+02	-9.0E+01	-2.0E+04	-1.4E+04	-2.3E+05	-1.7E+05	-1.2E+01	-9.5E+00
<b>SUMME</b>	-8.0E+00	-6.6E+00	-1.6E+03	-1.3E+03	-5.7E+02	-4.6E+02	-5.2E+04	-3.9E+04	-7.0E+05	-5.4E+05	-6.6E+01	-5.4E+01
	[t Sb eq]		[t SO2 eq]		[t PO4 <sup>---</sup> eq]		[t CO2 eq]		[GJ]		[t C2H4 eq]	

<sup>a)</sup> Gutschrift gegenüber Primärmaterial, <sup>b)</sup> Gutschrift gegenüber Marktmix



## **Kritische Prüfung der Studie**

# **ÖKOBILANZ ZUM RECYCLING VON AUSGEWÄHLTEN WERTHALTIGEN METALLEN AUS KERNTECHNISCHEN ANLAGEN**

**Auftraggeber:** Öko-Institut e.V., Darmstadt  
mit Förderung durch das  
Bundesministerium für Bildung und Forschung,  
Berlin

**Prüfer:** Prof. Dr. Matthias Finkbeiner, Berlin

**Normbezug:** DIN EN SO 14040 (2006): Umweltmanagement –  
Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen  
DIN EN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement –  
Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen  
ISO TS 14071 (2014):  
Environmental management - Life cycle  
assessment - Critical review processes and  
reviewer competencies: Additional requirements  
and guidelines to ISO 14044:2006

## **Inhalt und Umfang der Kritischen Prüfung**

Der Prüfer und das Prüfungsverfahren sollen feststellen, ob:

- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden mit den internationalen Normen ISO 14040 und ISO 14044 übereinstimmen;
- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet und technisch gültig sind;
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind;
- die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Studie berücksichtigen und
- der Bericht transparent und in sich stimmig ist.

Die Kritische Prüfung wurde gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 als Prüfung durch einen externen, unabhängigen Sachverständigen vorgenommen, da diese Ökobilanz-Studie nicht als Grundlage für zur Veröffentlichung vorgesehene vergleichende Aussagen bestimmt ist.

Dieser Prüfungsbericht gilt ausschließlich für den Abschlußbericht der Studie in der am 21.08.2024 vorgelegten Fassung.

Die Prüfung und Verifizierung einzelner Daten und Datensätze sowie des Ökobilanzmodells war nicht Teil des Prüfungsumfanges.

## **Prüfungsverfahren**

Das Prüfungsverfahren wurde zwischen dem Öko-Institut als Ersteller der Ökobilanz und dem externen Sachverständigen koordiniert. Das Prüfungsverfahren hat mit einem Kick-off-Meeting am 08. März 2024 begonnen, in dem wesentliche Elemente des Ziels und des Untersuchungsrahmens der Studie präsentiert wurden. Der Sachverständige hat Hinweise gegeben, die bei der Fortführung der Studie berücksichtigt wurden. Der zweite Schritt der Prüfung war die Vorlage des ersten Entwurfes des Abschlußberichtes der Studie am 09. Juli 2024.

Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 63 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 21. Juli 2024 übermittelt wurden. Der zweite, überarbeitete Entwurf des Berichtes wurde dem Prüfer am 19. August 2024 übermittelt.

Die Prüfung des zweiten Entwurfes ergab, dass die Prüfhinweise konstruktiv und umfassend berücksichtigt wurden. Es waren lediglich zwei weitere Hinweise mit redaktionellem Charakter notwendig. Die finale Fassung des Berichtes wurde dem Prüfer am 21. August 2024 übermittelt.

Der Sachverständige bedankt sich für den uneingeschränkten Zugang zu allen nachgefragten Informationen sowie die offene und konstruktive Haltung während des gesamten Prüfungsverfahrens.

## **Bewertung**

Die Ökobilanz dient zur projektbegleitenden Bewertung im Vorhaben „RecTecKA – Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben“. Im Fokus des Projektes steht die Rückgewinnung ausgewählter werthaltiger Metalle aus alten Kernkraftwerken. Die Ökobilanz stellt dem dafür notwendigen Demontage- und Recyclingaufwand das maximale Recyclingpotenzial durch die vermiedene Primärproduktion der entsprechenden Metalle gegenüber.

Die funktionelle Einheit der Studie ist die Verwertung aller Komponenten eines Kernkraftwerkes, die als werthaltig definierte Zielmetalle (Kupfer und Kupferlegierungen, Aluminium, Titan, Zink, Edelstähle sowie Gold, Platin, Palladium und Silber) enthalten und nicht kontaminiert sind.

Die vorgelegten Ergebnisse gelten nur unter der Annahme, dass die Komponenten und Materialien ökologisch lastenfrei in die Bilanz eingehen. Alternative End-of-Life-Allokationsansätze wurden nicht untersucht.

Es wird transparent darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse das maximale Recyclingpotenzial ermitteln. Es wird auch darauf hingewiesen, dass die quantitativen Ergebnisse nur für die untersuchten Anlagen (Block 1 des Kernkraftwerks Philippsburg als Repräsentant für einen Siedewasserreaktor und Block 2 des Kernkraftwerks Philippsburg als Repräsentant für einen Druckwasserreaktor) repräsentativ sind.

Die verwendeten Methoden und die Modellierung des Produktsystems sind geeignet, die in der Studie formulierten Ziele zu erfüllen. Der Bericht ist umfassend und beschreibt den Untersuchungsrahmen der Studie in transparenter Weise.

### **Ergebnis**

Die Ökobilanz wurde in Übereinstimmung mit ISO 14040 und ISO 14044 erstellt.



Matthias Finkbeiner  
22. August 2024