

2025



Projekt Seltene Technologiemetalle

Rückgewinnung von Seltenen Technologiemetallen aus Elektronik-Altgeräten

Analyse von Recyclingketten für Gallium und Antimon aus EAG und Untersuchung des aktuellen Entwicklungsstands und zukünftiger Rückgewinnungstechnologien

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)



Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abfall und Rohstoffe, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Begleitung BAFU: Donat Andrey, Elias Rehmann, Michael Hügi

Auftragnehmer

Empa, Technology and Society Lab, Critical Materials and Resource Efficiency Group,
9014 St. Gallen¹

Autorinnen/Autoren

¹ Dea Wehrli

¹ Manuele Capelli

¹ Harald Desing

¹ Setenay Saglam

¹ Ruben Vingerhoets

¹ Kirsten Remmen

Hinweise

Dieses Projekt wird im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

St. Gallen, Oktober 2025

Fotos Erste Seite, von oben nach unten:

Gallium: Wikipedia, en:user:foobar, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gallium_crystals.jpg

Antimon: Wikipedia, Robert M. Lavinsky, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Antimony-201379.jpg>

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	iii
Tabellen.....	iv
Begriffe.....	v
Zusammenfassung (D/F/I/E)	vii
Zusammenfassung.....	vii
Résumé	ix
Riassunto.....	xii
Summary	xv
1 Einleitung.....	18
1.1 Hintergrund.....	18
1.2 Ziel des Projekts.....	18
1.3 Rollen	19
1.4 Projektentwicklung	20
2 Methodisches Vorgehen	21
3 Vorauswahl potenzieller STM.....	23
3.1 Anwendung der Filter zur Vorauswahl	23
3.2 Austausch Fachausschuss.....	26
4 Auswahl von zwei STM	27
4.1 Recherche und Antworten zu Fragen und Rückmeldungen.....	27
4.2 Austausch Fachausschuss und Festlegung von zwei STM	30
5 Analyse der Recyclingketten der zwei ausgewählten STM	31
5.1 Analyse der Recyclingkette von Gallium	31
5.1.1 Grundlage.....	31
5.1.2 Globale Entwicklung & Trends.....	32
5.1.3 Mengen von LED-Leuchtmitteln in der Schweiz.....	33
5.1.4 Schlussfolgerungen Gallium	38
5.2 Analyse der Recyclingkette von Antimon	39
5.2.1 Grundlage.....	39
5.2.2 Globale Entwicklung & Trends.....	39
5.2.3 Mengen in der Schweiz	42
5.2.4 Schlussfolgerungen Antimon.....	45
6 Ausblick.....	46
7 Anhang	47
7.1 Anwendung Filter 3: Massen und Umweltrelevanz	47
7.1.1 Herleitung der Masse im CH-EAG Strom von Elementen	48
7.1.2 Umweltbelastung	50
7.1.3 Herleitungen	51
7.2 Pro- / Kontra-Analyse zur Elementauswahl.....	54
7.3 Literaturverzeichnis.....	55

Abbildungen

Abbildung 1: Visuelle Darstellung des Vorgehens und der Zwischenresultate entlang der 5 Arbeitsschritte der Phase 1 des Projekts Seltene Technologiemetalle.....	20
Abbildung 2: Mehrstufiger Kriterienkatalog für die Vorauswahl der STM mit positive Auswahlkriterien (grün) und Ausschlusskriterien (rot).	21
Abbildung 3: Die kritischen (blau) und strategisch kritischen (gelb) Rohstoffe und Rohstoffgruppen der EU, ergänzt mit den in der VREG erwähnten STM (grün). Ergänzte Abbildung von www.consilium.europa.eu	24
Abbildung 4: Auswahl von 7 seltenen Technologiemetallen aus einer engeren Liste von 15 Elementen (grün umrandet) sowie deren Begründung. Grün schraffiert: STM, die in der VREG erwähnt werden.	26
Abbildung 5: Verschiedene Szenarien welche die globale Galliumproduktion aus primären sowie sekundären Quellen modelliert [17].	33
Abbildung 6: Entwicklung der jährlich verkauften Stückzahlen von Leuchtmitteln in der Schweiz im Zeitraum von 2014 – 2020. Der deutliche Rückgang der Stückzahlen ist auf die längere Lebensdauer und zunehmende Verbreitung von LED-Leuchtmitteln zurückzuführen [25].	34
Abbildung 7: Marktanteil von LED-Leuchtmitteln im Zeitraum von 2014 – 2020. Ab 2024 wird ein Marktanteil von nahe 100% geschätzt [25].	35
Abbildung 8: Berechnete Anzahl verkaufte LED-Leuchtmitteln pro Jahr anhand der Marktanteilentwicklung, inklusive Projektion bis 2030 (graue Fläche). Die Stückzahlen sind mit ca. 16.5 Millionen Einheiten vergleichsweise konstant.	35
Abbildung 9: Sammelmengen Leuchtmittel in Tonnen pro Jahr der Schweizerischen Rücknahmesysteme [29].	38
Abbildung 10: Produktion von Antimon im Jahr 2023, in Tonnen. Datenquelle: Mineral Commodity Summary 2024, USGS [41].	40
Abbildung 11: Europäische Importe und Exporte von Antimon in Kilotonnen[45].	41
Abbildung 12: Abbildung 12: Kreislauf von Antimon aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten aus Kunststoff. Quelle: Gaudin et al. (2025).....	44
Abbildung 13: Prozessübersicht für die Rückgewinnung von ATO, ABS und BFR [49].	45

Tabellen

Tabelle 1: Zusammensetzung des Fachausschusses.	19
Tabelle 2: Übersicht der sieben ausgewählten Elemente. Eine dunklere Einfärbung zeigt eine höhere Relevanz in Bezug auf die jeweilige Spalte an. Quellenangaben und Hinweise: siehe nächste Seite.	28
Tabelle 3: Zentrale positive und negative Aspekte hinsichtlich dem Rückgewinnungspotential der acht ausgewählten STM.	29
Tabelle 4: Kommerziell verfügbare typische LED-Leuchtmitteltypen [26].	36
Tabelle 5: Ermitteltes Potenzial anhand von verschiedenen Quellen zur Galliumkonzentration in LED-Leuchtmitteln.	36
Tabelle 6: Modellierte theoretische Galliummenge aus jährlich in der Schweiz verkauften LED-Leuchtmitteln, in kg.	37
Tabelle 7: Verwendung von Antimon in der EU [42].	40
Tabelle 8: Durchschnittliche jährlich Preise für Rohantimon, Antimonerz und Antimonoxid auf dem Europäischen Zollmarkt in Euro/Tonne [44].	41
Tabelle 9: Anwendung des Filters 3 für die Ermittlung der 10 Elemente mit der höchsten Massen- und Umweltrelevanz (ausgenommen sind die fünf STM, die in der VREG erwähnt werden). Rot markiert sind jeweils Werte, die auf Herleitungen beruhen.	47
Tabelle 10: Herleitung der jährlich geschätzten Masse von STM im CH EAG-Strom.	49
Tabelle 11: Ermittlung der Umweltbelastungspunkte der Primärproduktion von STM. Rot: Fehlende Datensätze. Die Herleitungen sind im Annex 7.2.1 erläutert.	50
Tabelle 12: Bestimmung des Allokationsfaktors von Bismuth als Nebenprodukt des Blei- und Zinkabbaus (Nuss und Eckelman (2014)).	51
Tabelle 13: Allokationsfaktoren nach Nuss und Eckelman (2014) und berechnete UBPs der Metalle Blei, Zink, Silber, Indium und Germanium.	52
Tabelle 14: Relevante Grössen für die Berechnung des Allokationsfaktors der Zinkproduktion von Nuss und Eckelman[59] basierend auf [62].	52
Tabelle 15: Berechnung des Datensatzes von Germanium basierend auf den UBP von Indium und Cadmium und den respektiven ökonomischen Allokationsfaktoren nach Nuss und Eckelman (2014).	53
Tabelle 16: Angewendete Allokationsfaktoren der Metallproduktion von Zirkoniumoxid für Zirkonium und Hafnium [59].	53
Tabelle 17: Berechnung der UBP von Hafnium (und Zirkonium) basierend auf dem verfügbarem Datensatz zu Zirkoniumoxid und dem Allokationsfaktor von 0.13 (0.87).	53

Abkürzungen

ATO	Antmontrioxid
BAFU	Bundesamt für Umwelt
EAG	Elektroaltgerät
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (www.empa.ch)
FVG	Fachverband VREG-Entsorgung
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
SENS	Sens eRecycling, Stiftung für Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten in der Schweiz (ex Stiftung Entsorgung Schweiz) (www.erecycling.ch)
STM	Seltene Technologiemetalle
SWICO	Schweizerischer Wirtschaftsverband der ICT- und Online-Branche (www.swico.ch)
UBP	Umweltbelastungspunkte
USG	Umweltschutzgesetz
VREG	Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte
VSMR	Verband Stahl-, Metall- und Papier-Recycling Schweiz

Begriffe

Bedeutungen wichtiger Begriffe:

Behandlung von Abfällen	Explizit definiert im USG als jede physikalische, chemische oder biologische Veränderung der Abfälle.
Behandlungsstrom	Bezieht sich auf eine Gruppe von EAG, welche zusammen behandelt werden.
Beurteilungsgrösse	Eine quantitative oder qualitative Messgrösse, die zur Bewertung oder Beurteilung eines Objekts, Prozesses oder Systems verwendet wird.
Fraktionen	Separater Outputstrom, der durch die Behandlung von EAG entsteht [1].
Schadstoffe	Als Schadstoffe gelten Stoffe, die bereits in verhältnismässig geringen Konzentrationen Mensch oder Umwelt direkt oder indirekt gefährden können. ¹
Schadstoffentfrachtung	Als Schadstoffentfrachtung wird der Prozess bezeichnet, in welchem gezielt Schadstoffe aus Elektro- und Elektronikaltgeräten separiert werden. ¹
Stoffe	Unter Stoffen werden in Anlehnung an ChemG Art. 4 und USG Art. 7 natürliche oder durch ein Produktionsverfahren hergestellte chemische Elemente und deren Verbindungen verstanden. ¹
Stofffluss	Als Stofffluss wird die Bewegung und Verlagerung von Stoffen, Gegenständen und Folgeprodukten (Masse, Stück) pro Zeiteinheit unter Berücksichtigung der Zerlegung und Umwandlung verstanden. ¹

¹ Abgeändert, basierend auf der Definition von SENS / Swico Recycling, «Technische Vorschriften zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten». 2012.

Zielfractionen	Sind Fraktionen aus den verschiedenen Behandlungsprozessen, bei welchen die Aufkonzentrierung von Zielkomponenten oder -stoffen im Vordergrund steht.
Zielprodukt/-komponente/-stoffe	Sind Komponenten, respektive Stoffe, die in heutigen und künftigen EAG vorkommen und deren Rückgewinnung oder Ausschleusung und umweltgerechte Entsorgung im Vordergrund steht.

Zusammenfassung (D/F/I/E)

Zusammenfassung

Das Recycling von Elektroaltgeräten (EAG) konzentriert sich bisher vor allem auf die Schadstoffentfrachtung und die Rückgewinnung von massenreichen Metallen wie Eisen, Aluminium und Kupfer und sehr werthaltigen Metallen wie Gold, Silber und Platin sowie von Kunststoffen. Sogenannte seltene Technologiemetalle (STM), wie Indium, Gallium, Germanium oder Neodym, die nur in geringen Mengen vorkommen und finanziell weniger interessant sind, gehen dagegen meist verloren. Hauptgründe dafür sind fehlende wirtschaftliche Anreize und mangelnde industrielle Rückgewinnungstechnologien. Im Projekt 'Rückgewinnung von STM aus EAG' wurde für ausgewählte STM der aktuelle Stand und das zukünftige Potenzial der Rückgewinnung aus EAG in der Schweiz untersucht. Zwei wurden ausgewählt und besonders detailliert angeschaut.

Auswahl von zwei STM

Dazu wurde zunächst eine Ausgangsliste mit mehr als 50 verschiedenen Materialien erstellt. Die Ausgangsliste beinhaltete die in der Liste der kritischen Rohstoffe der EU aufgeführten Materialien und die in der Schweizer «Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte» (VREG) aufgeführten STMs. Anhand verschiedener Kriterien wie Umweltrelevanz, Vorkommen in EAG und Rückgewinnungspotenzial wurde gemeinsam mit dem Fachausschuss die Ausgangsliste auf sieben Metalle reduziert: Gallium, Antimon, Tantal, Magnesium, Silizium-Metall, Neodym und Indium.

Eine erste Analyse der verbleibenden sieben Metalle zeigte deutliche Unterschiede im aktuellen und zukünftigen Rückgewinnungspotenzial. Bei **Neodym** ist eine Rückgewinnung bereits möglich, die verfügbaren Mengen sind jedoch gering. **Antimon** in flammschutzhaltigen Kunststoffen wird heute beseitigt. Erste Verfahren des chemischen Recyclings zur Trennung und Rückgewinnung existieren im Labormassstab. Für **Silizium-Metall** nimmt der Bedarf aufgrund der wachsenden Photovoltaikproduktion stark zu. Gleichzeitig ist die Produktion sehr energieintensiv. **Tantal** und **Magnesium** gelten derzeit als mengenmässig weniger relevant und verhältnismässig gut ersetzbar. **Gallium** ist besonders interessant aufgrund des Bedarfs in LEDs. Die Rückgewinnung von **Indium** aus Bildschirmen hat Potenzial, müsste jedoch weiterhin durch geeignete Rahmenbedingungen unterstützt werden.

Der Fachausschuss verwies dabei insbesondere auf folgende zentrale Herausforderungen bei der Rückgewinnung dieser Metalle:

- Geringe oder unklare Mengen und Lokalisierung der Metalle in EAG
- Begrenzte industrielle Rückgewinnungsmöglichkeiten
- Wirtschaftliche Machbarkeit chemischer Recyclingverfahren
- Sicherstellung der Qualität von zurückgewonnenen Materialien
- Abnehmende Gehalte in modernen Geräten
- Hohe Personalkosten für manuelle Trennung
- Mangelhafte Datenlage und fehlendes Design for Recycling

Der Fachausschuss wählte schlussendlich die zwei STM Antimon und Gallium für eine detailliertere Untersuchung aus, da diesen beiden Metalle besonders geeignet erschienen, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Dabei konzentrierte sich die Untersuchung auf die Rückgewinnung von Gallium aus LEDs sowie von Antimon aus bromierten Kunststoffen.

Gallium

Gallium ist ein strategisch wichtiger Rohstoff, der vor allem in modernen Technologien wie LED-Leuchten und Leistungselektronik eingesetzt wird. Seine Bedeutung nimmt weltweit zu, während die natürlichen Vorkommen begrenzt sind. Gallium wird vorwiegend als Nebenprodukt bei der Aluminiumproduktion aus Bauxitgestein gewonnen und aus Kohleasche extrahiert. Da sich der Abbau von Bauxit ausschliesslich zur Galliumgewinnung wirtschaftlich nicht lohnt, hängt das weltweite Angebot direkt von der Produktion von Aluminium ab. Über 90% des Primärgalliums stammt derzeit aus China, was zu einer starken Abhängigkeit und Preisvolatilität führt. So führten etwa chinesische Exportbeschränkungen im Jahr 2024 kurzfristig zu erheblichen Preisschwankungen.

Mit dem erwarteten Anstieg galliumhaltiger Abfälle – insbesondere aus ausgedienten LED-Leuchten – gewinnt das Recycling von Gallium zunehmend an Bedeutung. LEDs enthalten bis zu siebenmal mehr Gallium als das Ausgangsgestein aus der Primärproduktion und stellen daher eine potenzielle sekundäre Rohstoffquelle dar. Die Gewinnung von Gallium aus Bauxit ist energieintensiv und mit signifikanten Treibhausgasemissionen verbunden. Angesichts wachsender Abfallmengen könnte Recycling künftig zur nachhaltigen Nutzung beitragen, der CO₂-Fussabdruck und Umweltnutzen ist jedoch noch unklar.

In der Schweiz wurden im Jahr 2020 rund 20 Millionen Leuchtmittel verkauft, wovon der Anteil an LEDs stetig zunimmt. Basierend auf einem durchschnittlichen Leuchtmittelgewicht von 140 g ergibt sich hochgerechnet eine jährliche Gesamtmenge von etwa 2'300 Tonnen LED-Leuchtmitteln. Daraus lässt sich ein theoretisches Rückgewinnungspotenzial von 57 bis 360 kg Gallium pro Jahr ableiten. Ein Teil dieser Geräte gelangt jedoch nicht in die offiziellen Sammelsysteme, sondern wird über Hauskehricht oder Altglas entsorgt, was die effektiv rückgewinnbare Menge reduziert.

Da die globale Nachfrage weiter steigt und gleichzeitiger die Produktion stagnieren oder abnehmen wird, wird der Aufbau von Sekundärproduktionen aus Recyclingmaterialien langfristig unverzichtbar. In der Schweiz ist die wirtschaftliche Rückgewinnung von Gallium aus LEDs derzeit zwar noch nicht rentabel, jedoch könnte die Kombination mit der Rückgewinnung anderer Wertstoffe wie Gold, Kupfer oder Zinn künftig neue Chancen eröffnen.

Antimon

Antimon wird in Elektro- und Elektronikgeräten hauptsächlich in Form von Antimontrioxid (ATO) als Zusatzstoff mit halogenierten Flammschutzmitteln kombiniert eingesetzt. Dadurch verbessert sich die Brandschutzwirkung für Kunststoffe, insbesondere bei Gehäusen, Kabeln und Displays. Diese Kombination führt jedoch dazu, dass das Antimon bei der Entsorgung meist mit den Flammschutzmitteln zusammen verbrannt wird und als Rohstoff verloren geht. Weltweit wurden 2023 rund 106'000 Tonnen Antimon produziert, über die Hälfte davon in China. Diese starke Marktkonzentration führt zu Versorgungsrisiken und Preisschwankungen. Seit 2024 sind die Preise vor allem infolge chinesischer Exportkontrollen um rund 375% gestiegen. ATO gilt als potenziell gesundheitsschädlich, ist aber derzeit weder durch die EU-RoHS-Richtlinie noch durch REACH

verboten. Abfälle mit mehr als 0,1% ATO gelten gemäss EU-Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (EU-CLP-Verordnung) als gefährlich und müssen entsprechend behandelt werden.

Hochgerechnet enthalten die EAG-Massen in der Schweiz jährlich zwischen 36 und 220 Tonnen ATO, was etwa 30 bis 184 Tonnen reinem Antimon entspricht. Damit könnten antimonhaltige Kunststoffe eine bedeutende sekundäre Rohstoffquelle darstellen. Pilotprojekte zeigen, dass Antimon, Brom und Kunststoffe separiert und zurückgewonnen werden können, mit sehr hohen Ausbeuten von über 98%. Solche Verfahren befinden sich derzeit im Labormassstab, könnten aber bei ausreichenden Abfallmengen wirtschaftlich interessant werden. In der Schweiz fällt mit 1'000 bis 23'000 Tonnen geeigneter Kunststoffe jährlich eine Menge an, die eine industrielle Umsetzung grundsätzlich ermöglichen würde. Die grösste Herausforderung liegt jedoch in der technisch sauberen Sortierung der unterschiedlichen Kunststoffarten, da diese oft verschiedene Additive enthalten.

Langfristig könnte die Rückgewinnung von Antimon aus Kunststoffen einen Beitrag zur Rohstoffsicherung leisten – insbesondere wenn gleichzeitig Brom und Kunststoff mitverwertet werden können. Steigende Preise, regulatorische Änderungen und die wachsende Nachfrage könnten das Interesse an solchen Verfahren zusätzlich fördern. In der Schweiz wird empfohlen, die industrielle Entwicklung in Europa weiter zu beobachten, um bei Rückgewinnungsmöglichkeiten frühzeitig reagieren zu können.

Der Zugang zu STM wird in Zukunft zunehmend wichtig. Das Projekt 'Rückgewinnung von STM aus EAG' zeigte, dass viele dieser Elemente grundsätzlich interessant sind, ihre Rückgewinnung heute jedoch häufig durch geringe Mengen, volatile und niedrige Preise oder technische Herausforderungen eingeschränkt wird. Die Untersuchungen zu Gallium in LEDs und Antimon in Kunststoffen verdeutlichen dies, weisen aber zugleich auf künftige Chancen hin, etwa durch den steigenden Bedarf in der Leistungselektronik oder neue Regelungen zum Mindesteinsatz von Rezyklaten. Entscheidend ist, Materialkreisläufe ganzheitlich zu betrachten – von der Rohstoffquelle über Nutzung und Rückgewinnung bis hin zu wirtschaftlicher Tragbarkeit, zukünftigen Entwicklungen und material- bzw. produktspezifischen Qualitätsanforderungen. Nur auf dieser Basis lassen sich Kreisläufe schliessen und die Ressourceneffizienz in der Schweiz nachhaltig steigern.

Résumé

Le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) se concentre jusqu'à présent sur l'élimination des substances polluantes et sur la récupération des métaux en grande quantité, tels que le fer, l'aluminium et le cuivre, ainsi que des métaux très précieux comme l'or, l'argent et le platine, ainsi que des plastiques. En revanche, les métaux rares de haute technologie (MRHT), tels que l'indium, le gallium, le germanium ou le néodyme, qui sont présents en quantités limitées et présentent un intérêt économique moindre, sont généralement perdus. Les principales raisons en sont l'absence d'incitations économiques et le manque de technologies industrielles de récupération. Le projet 'Récupération des MRHT à partir des DEEE' examine, pour certains MRHT sélectionnés, l'état actuel et le potentiel futur de leur récupération à partir des DEEE en Suisse. Deux ont été sélectionnés et examinés de manière particulièrement détaillée.

Sélection de deux MRHT

Pour l'étude, une liste initiale de plus de 50 matériaux différents a été établie. Cette liste comprenait les matériaux figurant sur la liste des matières premières critiques de l'Union européenne (UE) ainsi que les MRHT répertoriés dans l'« Ordonnance sur la restitution, la reprise et l'élimination des appareils électriques et électroniques » (OREA) en Suisse.

Sur la base de différents critères tels que la pertinence environnementale, la présence dans les DEEE et le potentiel de récupération, cette liste a été réduite à sept métaux en collaboration avec le comité spécialisé : gallium, antimoine, tantale, magnésium, silicium métal, néodyme et indium.

Une première analyse des sept métaux restants a révélé des différences marquées dans leur potentiel de récupération actuel et futur. Pour le **néodyme**, une récupération est techniquement déjà possible, mais les quantités disponibles restent faibles. L'**antimoine** présent dans les plastiques ignifugés est aujourd'hui éliminé lors du traitement des déchets. Des procédés de recyclage chimique visant la séparation et la récupération existent à l'échelle du laboratoire.

Pour le **silicium métal**, la demande augmente fortement en raison de la production croissante de photovoltaïque, tandis que sa production est très énergivore. Le **tantale** et le **magnésium** sont actuellement considérés comme moins pertinents en termes de volumes et relativement facilement substituables. Le **gallium** suscite un intérêt particulier en raison de la demande liée aux LED. La récupération de l'**indium** à partir des écrans présente un potentiel, mais devrait encore être soutenue par des cadres appropriés.

Le comité spécialisé a souligné plusieurs défis majeurs concernant la récupération de ces métaux :

- Quantités faibles ou mal connues et localisation des métaux dans les DEEE
- Possibilités industrielles limitées de récupération
- Viabilité économique des procédés de recyclage chimique
- Garantie de la qualité des matériaux récupérés
- Diminution des concentrations dans les équipements modernes
- Coûts élevés de main-d'œuvre pour le tri manuel
- Données insuffisantes et absence de conception facilitant le recyclage

Sur la base de cette analyse, le comité spécialisé a finalement choisi les deux MRHT, antimonio et gallium, pour une analyse plus détaillée, car ces deux métaux semblaient particulièrement adaptés pour générer de nouvelles connaissances. Il a été décidé que l'étude porterait sur la récupération du gallium à partir des LED et de l'antimoine à partir des plastiques bromés.

Gallium

Le gallium est une ressource stratégique utilisée principalement dans les technologies modernes telles que les LED et l'électronique de puissance. Son importance augmente à l'échelle mondiale, alors que les gisements naturels sont limités. Le gallium est obtenu en très petites quantités, principalement comme sous-produit de la production d'aluminium à partir de la bauxite, et peut également être extrait des cendres de charbon. Comme l'extraction de bauxite uniquement pour le gallium n'est pas économiquement viable, l'offre mondiale dépend directement de la production d'aluminium. Plus de 90% du gallium primaire provient actuellement de Chine, ce qui entraîne une forte dépendance et une volatilité des prix. Par exemple, les restrictions à l'exportation imposées par la Chine en 2024 ont provoqué des fluctuations de prix importantes à court terme.

Avec l'augmentation prévue des déchets contenant du gallium – en particulier les LED hors d'usage – le recyclage du gallium prend de plus en plus d'importance. Les LED contiennent jusqu'à sept fois plus de gallium que la roche mère utilisée pour la production primaire, constituant ainsi une source potentielle de matières premières secondaires. La récupération du gallium à partir de la bauxite est énergivore, et le recyclage pourrait donc réduire les impacts environnementaux. L'extraction du gallium à partir de la bauxite est énergivore et entraîne des émissions notables de gaz à effet de serre. Face à l'augmentation des déchets, le recyclage pourrait contribuer à une utilisation durable, mais l'empreinte carbone et les bénéfices environnementaux issus du recyclage restent toutefois encore incertains.

De plus, les quantités annuelles potentielles récupérables à partir des LED sont très faibles. En Suisse, environ 20 millions de lampes ont été vendues en 2020, avec une proportion croissante de LED. Sur la base d'un poids moyen de 140 g par source lumineuse, on obtient une quantité totale théorique d'environ 2 300 tonnes de lampes LED par an. Cela correspond à un potentiel de récupération théorique de seulement 57 à 360 kg de gallium par an. Une partie de ces appareils n'atteint cependant pas les systèmes de collecte officiels, mais se retrouve dans les ordures ménagères ou le verre usagé, réduisant encore la quantité réellement récupérable.

Comme la demande mondiale continue d'augmenter tandis que la production risque de stagner ou de diminuer, le développement de productions secondaires à partir de matériaux recyclés devient stratégiquement important sur le long terme. En Suisse, la récupération économique du gallium à partir des LED n'est actuellement pas rentable, mais la combinaison avec la récupération d'autres métaux précieux tels que l'or, le cuivre ou l'étain pourrait offrir de nouvelles opportunités à l'avenir.

Antimoine

L'antimoine est utilisé dans les équipements électriques et électroniques principalement sous forme d'oxyde d'antimoine (ATO) comme additif dans les retardateurs de flamme halogénés. Cela améliore la résistance au feu des plastiques, notamment pour les boîtiers, câbles et écrans. Cette combinaison entraîne toutefois la perte de l'antimoine lors de l'élimination, puisqu'il est généralement brûlé avec les retardateurs de flamme.

En 2023, environ 106 000 tonnes d'antimoine ont été produites dans le monde, plus de la moitié en Chine. Cette forte concentration du marché engendre des risques d'approvisionnement et des fluctuations de prix. Depuis 2024, les prix ont augmenté d'environ 375% principalement en raison du contrôle des exportations chinoises. L'ATO est potentiellement nocif pour la santé, mais n'est actuellement interdit ni par la directive européenne RoHS ni par le règlement REACH. Les déchets contenant plus de 0,1% d'ATO sont considérés comme dangereux selon le 'Règlement de l'Union européenne sur la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges' et doivent être traités en conséquence.

En Suisse, les masses de DEEE contiennent chaque année entre 36 et 220 tonnes d'ATO, soit environ 30 à 184 tonnes d'antimoine pur. Les plastiques contenant de l'antimoine pourraient donc constituer une source secondaire significative. Les projets pilotes montrent que l'antimoine, le brome et les plastiques peuvent être séparés et récupérés avec des rendements très élevés et une pureté supérieure à 98%. Ces procédés existent actuellement à l'échelle du laboratoire, mais pourraient devenir économiquement intéressants en cas de volumes de déchets suffisants. En Suisse, entre 1'000 et 23'000 tonnes de plastiques techniquement recyclables sont produites chaque année, ce qui

permetterait théoriquement une mise en œuvre industrielle. Le principal défi reste toutefois le tri de qualité des différentes catégories de plastiques, qui contiennent souvent divers additifs.

À long terme, la récupération de l'antimoine à partir des plastiques pourrait contribuer à la sécurisation des matières premières, surtout si le brome et les plastiques peuvent être valorisés simultanément. La hausse des prix, les évolutions réglementaires et la demande croissante pourraient renforcer l'intérêt pour ces procédés. En Suisse, il est recommandé de suivre de près le développement industriel en Europe afin de pouvoir réagir rapidement aux opportunités de récupération.

L'accès aux MRHT devient de plus en plus important. Le projet 'Récupération des MRHT à partir des DEEE' a montré que de nombreux éléments sont fondamentalement intéressants, mais leur récupération aujourd'hui est souvent limitée par des quantités faibles, des prix bas et volatils ou des défis techniques. Les études sur le gallium dans les LED et l'antimoine dans les plastiques l'illustrent clairement, tout en mettant en évidence des opportunités futures, par exemple l'augmentation de la demande en électronique de puissance ou de nouvelles réglementations concernant l'utilisation minimale de matériaux recyclés.

Il est essentiel d'envisager les cycles de matériaux de manière globale — depuis la source des matières premières, en passant par l'utilisation et la récupération, jusqu'à la viabilité économique, les évolutions futures et les exigences de qualité spécifiques aux matériaux ou aux produits. Ce n'est que sur cette base que les cycles peuvent être bouclés et l'efficacité des ressources durablement améliorée en Suisse.

Riassunto

Il riciclaggio dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) si è concentrato finora principalmente sui metalli presenti in grandi quantità, come ferro, alluminio e rame, nonché sui metalli molto preziosi come oro, argento e platino, e delle materie plastiche. I metalli tecnologici rari (MTR), come indio, gallio, germanio o neodimio, presenti in quantità limitate e di minore interesse economico, vengono invece generalmente persi. Le principali ragioni sono la mancanza di incentivi economici e la carenza di tecnologie industriali per il recupero. Il progetto 'Recupero dei MTR dai RAEE' analizza, per alcuni MTR selezionati, lo stato attuale e il potenziale futuro del loro recupero dai RAEE in Svizzera. Due sono stati selezionati ed esaminati in modo particolarmente dettagliato.

Selezione di due MTR

Per lo studio, è stata innanzitutto redatta una lista iniziale di oltre 50 materiali diversi. La lista comprendeva i materiali indicati nella lista delle materie prime critiche dell'UE e i MTR elencati nell'«Ordinanza concernente la restituzione, la ripresa e lo smaltimento degli apparecchi elettrici ed elettronici (ORSAE)» in Svizzera.

Sulla base di diversi criteri, come la rilevanza ambientale, la presenza nei RAEE e il potenziale di recupero, la lista è stata ridotta a sette metalli in collaborazione con il comitato di esperti: gallio, antimonio, tantalio, magnesio, silicio metallico, neodimio e indio.

Una prima analisi dei sette metalli rimanenti ha evidenziato differenze significative nel loro potenziale di recupero attuale e futuro. Per il **neodimio**, il recupero è già possibile, ma le quantità disponibili rimangono limitate. L'**antimonio** presente nelle materie plastiche ignifughe viene attualmente

smaltito. Esistono già processi di riciclaggio chimico volti alla separazione e al recupero, ma solo a livello di laboratorio.

Per il **silicio metallico**, la domanda aumenta rapidamente a causa della crescente produzione di fotovoltaico, mentre la produzione è molto energivora. **Tantalio** e **magnesio** sono attualmente considerati meno rilevanti in termini di quantità e relativamente facilmente sostituibili. Il **gallio** suscita un interesse particolare a causa della domanda legata ai LED. Il recupero dell'**indio** dagli schermi presenta un potenziale, ma dovrebbe continuare a essere supportato da quadri adeguati.

Il comitato di esperti ha sottolineato diverse sfide principali nella gestione del recupero di questi metalli:

- Quantità e localizzazione basse o incerte dei metalli nei RAEE
- Possibilità industriali di recupero limitate
- Fattibilità economica dei processi di riciclaggio chimico
- Garanzia della qualità dei materiali recuperati
- Riduzione delle concentrazioni nei dispositivi moderni
- Costi elevati per il lavoro manuale di separazione
- Dati insufficienti e progettazione non adattano al riciclaggio

Sulla base di questa analisi, il comitato di esperti ha infine deciso di concentrarsi e sulle due MTR antimonio e gallio, poiché questi due metalli sembrano particolarmente adatti a sviluppare nuove conoscenze. È stato stabilito che lo studio si focalizzerà sul recupero del gallio dai LED e dell'antimonio dalle plastiche bromurate.

Gallio

Il gallio è una risorsa strategica utilizzata principalmente nelle tecnologie moderne come i LED e l'elettronica di potenza. La sua importanza cresce a livello mondiale, mentre le risorse naturali sono limitate. Il gallio viene prodotto in quantità molto ridotte, principalmente come sottoprodotto della produzione di alluminio dalla bauxite, e può anche essere estratto dalle ceneri di carbone. L'estrazione della bauxite esclusivamente per il gallio non è economicamente conveniente, pertanto l'offerta mondiale dipende direttamente dalla produzione di alluminio. Attualmente oltre il 90% del gallio primario proviene dalla Cina, il che comporta una forte dipendenza e volatilità dei prezzi. Ad esempio, le restrizioni all'export imposte dalla Cina nel 2024 hanno provocato significative fluttuazioni dei prezzi nel breve termine.

Con l'aumento previsto dei rifiuti contenenti gallio – in particolare LED a fine vita – il riciclaggio del gallio assume una crescente importanza. I LED contengono fino a sette volte più gallio rispetto alla roccia di partenza usata nella produzione primaria, rappresentando quindi una potenziale fonte secondaria di materia prima. La produzione di gallio dalla bauxite è ad alta intensità energetica e comporta emissioni notevoli di gas serra. Il recupero dai LED potrebbe ridurre gli impatti ambientali, sebbene l'impronta di CO₂ e i benefici ambientali rimangono incerti.

Inoltre, le quantità annuali potenzialmente recuperabili dai LED sono molto basse. In Svizzera, nel 2020 sono stati venduti circa 20 milioni di apparecchi di illuminazione, con una quota crescente di LED. Sulla base di un peso medio di 140 g per sorgente luminosa, si ottiene una quantità totale teorica di circa 2'300 tonnellate di LED all'anno. Ciò corrisponde a un potenziale di recupero teorico di soli 57–360 kg di gallio all'anno. Tuttavia, parte di questi apparecchi non raggiunge i sistemi ufficiali di raccolta, ma viene smaltita tramite rifiuti domestici o vetro usato, riducendo ulteriormente la quantità effettivamente recuperabile. Poiché, la domanda globale continuerà ad aumentare e la produzione

potrebbe stagnare o diminuire, lo sviluppo di produzioni secondarie da materiali riciclati diventerà strategico a lungo termine. In Svizzera, il recupero economico del gallio dai LED non è attualmente redditizio, ma la combinazione con il recupero di altri metalli preziosi come oro, rame o stagno potrebbe offrire nuove opportunità in futuro.

Antimonio

L'antimonio è utilizzato negli apparecchi elettrici ed elettronici principalmente sotto forma di ossido di antimonio (ATO) come additivo nei ritardanti di fiamma alogenati. Questo migliora la resistenza al fuoco dei materiali plastici, in particolare per involucri, cavi e display. Tuttavia, questa combinazione comporta la perdita dell'antimonio durante lo smaltimento, poiché viene generalmente bruciato insieme ai ritardanti di fiamma.

A livello mondiale, nel 2023 sono state prodotte circa 106'000 tonnellate di antimonio, oltre la metà delle quali in Cina. Questa forte concentrazione del mercato comporta rischi di approvvigionamento e fluttuazioni dei prezzi. Dal 2024, i prezzi sono aumentati di circa il 375% principalmente a seguito dei controlli sulle esportazioni imposti dalla Cina. L'ATO è potenzialmente nocivo per la salute, ma attualmente non è vietato né dalla direttiva europea RoHS né dal regolamento REACH. I rifiuti contenenti più dello 0,1% di ATO sono considerati pericolosi secondo il 'Regolamento dell'Unione Europea sulla classificazione, etichettatura e imballaggio delle sostanze e delle miscele' e devono essere trattati di conseguenza.

In Svizzera, le masse di RAEE contengono annualmente tra 36 e 220 tonnellate di ATO, corrispondenti a circa 30–184 tonnellate di antimonio puro. I materiali plastici contenenti antimonio potrebbero quindi costituire una fonte secondaria significativa. I progetti pilota dimostrano che antimonio, bromo e plastica possono essere separati e recuperati con rendimenti molto elevati e purezza superiore al 98%. Questi processi esistono attualmente a livello di laboratorio, ma potrebbero diventare economicamente interessanti con volumi di rifiuti sufficienti. In Svizzera, ogni anno si producono tra 1'000 e 23'000 tonnellate di plastica idonea, quantità che permetterebbe teoricamente un'applicazione industriale. La sfida principale rimane la separazione tecnica accurata dei diversi tipi di plastica, che spesso contengono vari additivi.

A lungo termine, il recupero dell'antimonio dalle plastiche potrebbe contribuire alla sicurezza delle risorse, soprattutto se anche il bromo e plastica potranno essere valorizzati. L'aumento dei prezzi, i cambiamenti regolatori e la domanda crescente potrebbero incrementare ulteriormente l'interesse per tali processi. In Svizzera si raccomanda di seguire da vicino lo sviluppo industriale in Europa, per poter reagire tempestivamente alle emergenti opportunità di recupero.

L'accesso ai MTR sta diventando sempre più importante. Il progetto 'Recupero dei MTR dai RAEE' ha dimostrato che molti di questi elementi sono di fondamentale interesse, ma il loro recupero è oggi spesso ostacolato da piccole quantità, prezzi volatili e bassi, oppure da sfide tecniche. Gli studi sul gallio nei LED e sull'antimonio nelle plastiche ne sono un chiaro esempio, evidenziando al contempo anche le opportunità future. Ad esempio, la crescente domanda nell'elettronica di potenza o l'introduzione di nuove normative sull'utilizzo minimo di materiali riciclati potrebbero creare nuovi incentivi al recupero.

È essenziale adottare una visione olistica dei cicli dei materiali- dalle fonti di materie prime, all'uso e al recupero, fino alla valutazione della fattibilità economica, agli sviluppi futuri e ai requisiti specifici

di qualità dei materiali o prodotti. Solo su questa base sarà possibile chiudere i cicli e incrementare in modo sostenibile l'efficienza delle risorse in Svizzera.

Summary

Recycling of waste electrical and electronic equipment (WEEE) has so far focused mainly on the removal of hazardous substances and on the recovery of bulk metals such as iron, aluminium, and copper, as well as high-value metals like gold, silver, and platinum, and plastics. In contrast, so-called rare technology metals (RTM) — such as indium, gallium, germanium, or neodymium — which occur only in small quantities and are of lower economic interest, are mostly lost. The main reasons for this are the lack of economic incentives and the absence of industrial recovery technologies. The project 'Recovery of RTM from WEEE' investigates the current state and future potential of recovering selected RTM from WEEE in Switzerland. Two were selected and examined in particular detail.

Selection of two RTM

For the study, an initial list of over 50 different materials was first compiled. This list included the materials listed in the EU's critical raw materials list as well as the RTM listed in the Swiss "Ordinance on the Return, Take-back and Disposal of Electrical and Electronic Equipment" (OREA).

Based on various criteria, such as environmental relevance, occurrence in WEEE, and recovery potential, the list was narrowed down to seven metals in collaboration with the expert committee: gallium, antimony, tantalum, magnesium, silicon metal, neodymium, and indium.

A first analysis of the seven remaining metals revealed significant differences in their current and future recovery potential. For **neodymium**, recovery is already possible, but the available quantities are limited. Antimony in flame-retardant plastics is currently disposed of. Early chemical recycling processes for separation and recovery exist at the laboratory scale.

For **silicon metal**, demand is increasing rapidly due to growing photovoltaic production, while its production is highly energy-intensive. **Tantalum** and **magnesium** are currently considered less relevant in terms of quantity and relatively easily substitutable. **Gallium** is of particular interest due to its demand in LEDs. The recovery of indium from displays has potential, but would still need to be supported by appropriate frameworks. Recovery of **indium** from displays has potential, but would still need to be supported by appropriate frameworks.

The expert committee highlighted several central challenges for recovering these metals:

- Low or uncertain quantities and locations of these metals in WEEE
- Limited industrial recovery options
- Economic feasibility of chemical recycling processes
- Ensuring the quality of recovered materials
- Declining concentrations in modern devices
- High labor costs for manual sorting
- Insufficient data and lack of recycling-friendly product design

Based on this analysis, the expert committee ultimately selected the two RTM, antimony and gallium, for a more detailed analysis, as these metals appeared particularly suitable for generating new insights. It was decided that the study would focus on gallium recovery from LEDs and antimony recovery from brominated plastics.

Gallium

Gallium is a strategically important resource, primarily used in modern technologies such as LEDs and power electronics. Its global significance is increasing, while natural deposits are limited. Gallium is obtained in very small quantities, mainly as a by-product of aluminium production from bauxite, and can also be extracted from coal ash. Extraction of bauxite solely for gallium is not economically viable, so the global supply depends directly on aluminium production. Currently, over 90% of primary gallium comes from China, resulting in strong dependence and price volatility. For example, Chinese export restrictions in 2024 caused significant short-term price fluctuations.

With the expected increase in gallium-containing waste—particularly end-of-life LEDs—gallium recycling is becoming increasingly important. LEDs contain up to seven times more gallium than the source rock used for primary production, representing a potential secondary raw material source. Gallium recovery from bauxite is energy-intensive and associated with significant greenhouse gas emissions. Recycling from LEDs could reduce environmental impacts, although the carbon footprint and overall environmental benefits remain unclear.

Moreover, the annual quantities potentially recoverable from LEDs are very small. In Switzerland, around 20 million lighting devices were sold in 2020, with a steadily increasing share of LEDs. Based on an average weight of 140 g per device, the total theoretical quantity is approximately 2'300 tonnes of LED lamps per year. This corresponds to a theoretical recovery potential of only 57–360 kg of gallium per year. However, some devices do not enter official collection systems and are disposed of via household waste or glass recycling, further reducing the amount that can actually be recovered. As global demand continues to increase while production may stagnate or decline, developing secondary production based on recycled materials will become strategically crucial over the long term. In Switzerland, economic recovery of gallium from LEDs is currently not profitable, but combining it with the recovery of other valuable metals such as gold, copper, or tin could create new opportunities in the future.

Antimony

Antimony is used in electrical and electronic equipment primarily in the form of antimony trioxide (ATO) as an additive in halogenated flame retardants. This improves the fire resistance of plastics, particularly in housings, cables, and displays. However, this combination causes antimony to be lost during disposal, as it is generally incinerated together with the flame retardants.

Worldwide, approximately 106'000 tonnes of antimony were produced in 2023, more than half of it in China. This strong market concentration leads to supply risks and price fluctuations. Since 2024, prices have increased by around 375% mainly due to Chinese export controls. ATO is potentially hazardous to health but is currently not prohibited under either the EU RoHS Directive or REACH. Waste containing more than 0.1% ATO is considered hazardous according to the 'EU Regulation for classification, labelling and packaging of substances and mixtures' and must be treated accordingly. In Switzerland, WEEE masses contain between 36 and 220 tonnes of ATO annually, corresponding to approximately 30–184 tonnes of pure antimony. Antimony-containing plastics could therefore represent a significant secondary resource. Pilot projects show that antimony, bromine, and plastics can be separated and recovered with very high yields and purities exceeding 98%. These processes currently exist at the laboratory scale but could become economically viable with sufficient waste volumes. In Switzerland, between 1'000 and 23'000 tonnes of suitable plastics are generated each

year, theoretically allowing industrial implementation. The main challenge remains the technically clean sorting of different types of plastics, which often contain various additives.

In the long term, recovering antimony from plastics could contribute to resource security—particularly if bromine and plastics can also be valorised. Rising prices, regulatory changes, and increasing demand could further enhance interest in such processes. In Switzerland, it is recommended to closely monitor industrial developments in Europe to respond promptly to emerging recovery opportunities.

Access to RTM is becoming increasingly important. The project ‘Recovery of RTM from WEEE’ has shown that many of these elements are fundamentally interesting, but their recovery today is often limited by small quantities, volatile and low prices, or technical challenges.

The studies on gallium in LEDs and antimony in plastics illustrate this clearly, while also highlighting future opportunities. For example, increasing demand in power electronics or new regulations on minimum use of recycled materials could create new incentives for recovery.

It is crucial to consider material cycles holistically—from raw material sources, through use and recovery, to economic feasibility, future developments, and material- or product-specific quality requirements. Only on this basis can cycles be closed and resource efficiency in Switzerland be sustainably increased.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Im Zuge der Transformation zur Kreislaufwirtschaft gewinnt die Wiederverwertung von Rohstoffen aus Elektroaltgeräten (EAG) zunehmend an Bedeutung. Die Rückführung konzentrierte sich bisher auf die Industriemetalle Eisen, Aluminium und Kupfer sowie auf Edelmetalle wie Gold, Silber oder Platin. Seltene Technologiemetalle (STM) wie Indium, Gallium, Germanium und Neodym werden heute meist nicht zurückgewonnen und gehen entlang der Recyclingkette verloren. Fehlende ökonomische Anreize und resultierend daraus das Fehlen entsprechender industrieller Rückgewinnungstechnologien sind die Hauptgründe, weshalb diese Metalle bis heute nicht zurückgewonnen werden.

Das BAFU hat zusammen mit der Empa seit 2011 verschiedene Studien zum Vorkommen und zur Rückgewinnung kritischer Metalle aus EAG durchgeführt. Das Projekt [e-Recmet](#) (2013-2015) untersuchte die Rückgewinnung von STM aus EAG am Beispiel von Neodym und Indium. Es konnte aufgezeigt werden, dass für beide STM die Rückgewinnung ökologisch sinnvoll und im Fall von Indium eine marginale Erhöhung des vorgezogene Recyclingbeitrags die zusätzlichen Kosten beinahe decken würde. Für beide STM gab es zum Zeitpunkt der Durchführung der e-Recmet-Studie jedoch noch keine industriellen Rückgewinnungsmöglichkeiten in der EU. Um die rechtlichen Voraussetzungen für die Förderung der Rückgewinnung von STM zu schaffen, fordert die 2022 in Kraft getretenen "Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte" (VREG) in Art. 10 Abs. 1 Bst. d., dass STM wie Indium, Gallium, Germanium, Neodym und Tantal zurückgewonnen werden, wenn es dafür entsprechende Verfahren oder Anlagen gibt.

Das BAFU möchte den aktuellen Entwicklungsstand der Rückgewinnung von STM aus EAG ermitteln und klären, für welche STM im Vollzug der VREG die Anforderungen an die Entsorgung konkretisiert werden könnten. Diese Absicht steht im Einklang mit dem 2024 von der EU erlassenen Critical Raw Materials Act, der die Versorgung der EU mit kritischen Rohstoffen sicherstellen möchte, da diese insbesondere für die grüne und digitale Transformation von grosser Bedeutung sind.

1.2 Ziel des Projekts

Das übergeordnete Ziel besteht darin, effiziente, ökologisch nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige Rückgewinnungspfade zu identifizieren und analysieren.

Konkret soll das Projekt Optimierungspotenziale für die Schliessung von Materialkreisläufen ausgewählter STM aus EAG aufzeigen. Dazu werden der aktuelle Stand der Rückgewinnung und globale Trends analysiert sowie Mengen und Potenziale der Rückgewinnung bewertet. In Zusammenarbeit mit einem Fachausschuss (vgl. Kapitel 1.3) werden bestehende Herausforderungen identifiziert und konkrete Ansatzpunkte entlang der Recyclingkette erarbeitet, um die Rückgewinnung der ausgewählten STM in der Schweiz zu fördern und weiterzuentwickeln. Dabei liegt der Fokus auf den Einflussmöglichkeiten relevanter Akteure in der Schweiz wie Behörden, Betriebe und Rücknahmesysteme. Behandlungen in der Schweiz umfassen dabei die Sammlung, Schadstoffentfrachtung und teilweise weitere Aufbereitungen (mechanisch und/oder manuell),

während die eigentliche Rückgewinnung (z.B. in Schmelzwerken), abgesehen für Eisen, im Ausland stattfindet. Der Einfluss von Schweizer Recyclern beschränkt sich entsprechend auf die vorgängige Separierung und Aufkonzentrierung sowie Auswahl der Abnehmer/Folgebehandler.

1.3 Rollen

Die Zusammenarbeit zwischen dem Bund, wissenschaftlicher Forschung und Praxisakteuren ist entscheidend für die Entwicklung wirksamer, nachhaltiger und gesellschaftlich relevanter Lösungen. Um diese Kooperation erfolgreich zu gestalten, bedarf es klaren Verantwortlichkeiten und ein einheitliches, organisationsübergreifendes Verständnis zu schaffen. Das Projekt unterscheidet grundsätzlich zwischen drei Rollen: dem Auftraggeber (BAFU), dem Projektleitung (EMPA) und einem Fachausschuss (Praxispartner). Hier die Rollenbeschreibung gemäss Hermes:

Auftraggeber

Verantwortlich für Projektziele, Ressourcenbereitstellung, Steuerung des Projektausschusses und Entscheidung über Massnahmen.

Projektleitung

Bestehend aus dem/der Projektleiter:in und den Teilprojektleitern:innen. Führt das Projekt im Auftrag des Auftraggebers, steuert Zeit, Kosten, Qualität, Ressourcen, Stakeholder, Risiken und setzt Entscheidungen um.

Fachausschuss

Berät den Projektleiter, bringt Interessen der vertretenen Organisationen ein, unterstützt Problemlösungen und die Verankerung des Projekts.

Dabei stellt der Einbezug eines Fachausschusses einen zentralen Bestandteil des Projekts dar. Der Fachausschuss hat die Aufgabe, die Auswahl und Analyse der seltenen Technologiemetalle durch praktische Expertise zu ergänzen. Dadurch sollen Herausforderungen und Chancen aus Sicht der Praxis frühzeitig berücksichtigt und das theoretische Wissen mit praktischen Erfahrungen abgeglichen werden. Ziel ist es, die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen und deren Praxisrelevanz sicherzustellen. Durch diese systematische und partizipative Einbindung des Fachausschusses soll das Projekt inhaltlich erweitert und praxisorientiert ausgerichtet werden. Die Kooperation soll zudem eine tragfähige Basis für die weitere Projektentwicklung fördern. Der Fachausschuss setzte sich aus Personen der folgenden Organisationen zusammen (vgl. Tabelle 1):

Tabelle 1: Zusammensetzung des Fachausschusses.

Organisation	Rolle in der Wertschöpfungskette	Vertreten durch:
SENS	Rücknahmesystem	Christian Bollinger
SENS	Rücknahmesystem	Roman Eppenberger
SENS (IPSO ECO AG)	Rücknahmesystem (externer Auditor)	Niklaus Renner
Swico	Rücknahmesystem	Roger Gnos
Swico (DSS+)	Rücknahmesystem (externe Auditorin)	Esther Thiébaud
VSMR	EAG Recycler	Sabine Krattiger
FVG	EAG Recycler	Sacha Moser

FVG	EAG Recycler	David Wampfler
SOREC	EAG Recycler	Christoph Solenthaler
Dockgruppe	Zerlegebetrieb	Heinz Guntli
LeBird	Zerlegebetrieb	Anne-Claude Imhoff
LeBird	Zerlegebetrieb	Sebastien Piguet

1.4 Projektentwicklung

Die Auswahl der beiden zu untersuchenden STM erfolgte schrittweise und in enger Abstimmung mit dem Fachausschuss. Zunächst wurde ein breites Screening potenzieller Metalle durchgeführt und Auswahlkriterien festgelegt. Dabei wurden wissenschaftliche Publikationen, Marktanalysen, Industrierberichte und Statistiken ausgewertet, um den aktuellen Stand der Rückgewinnung sowie Chancen und Herausforderungen zu erfassen. Unter Anwendung der Auswahlkriterien (Filter) entstand eine vorab selektierte Liste möglicher STM, die dem Fachausschuss präsentiert und gemeinsam diskutiert wurde. Offene Fragen und Hinweise wurden durch ergänzende Recherchen vertieft, um weitere Informationen zu den einzelnen Metallen zu gewinnen.

Auf Grundlage dieser Analysen entschied der Fachausschuss, welche zwei STM für eine detaillierte Untersuchung ausgewählt wurden. Für die beiden ausgewählten Elemente, Gallium und Antimon, wurden mögliche Rückgewinnungswege, technische Potenziale, Mengenabschätzungen sowie relevante Markt- und regulatorische Rahmenbedingungen analysiert. Ergänzend wurden Experteninterviews durchgeführt, um Wissenslücken zu schliessen. Die Ergebnisse wurden dem Fachausschuss präsentiert, diskutiert und verifiziert, um daraus strategische Empfehlungen sowie Vorschläge für betriebliche und systemische Rückgewinnungsoptionen abzuleiten.

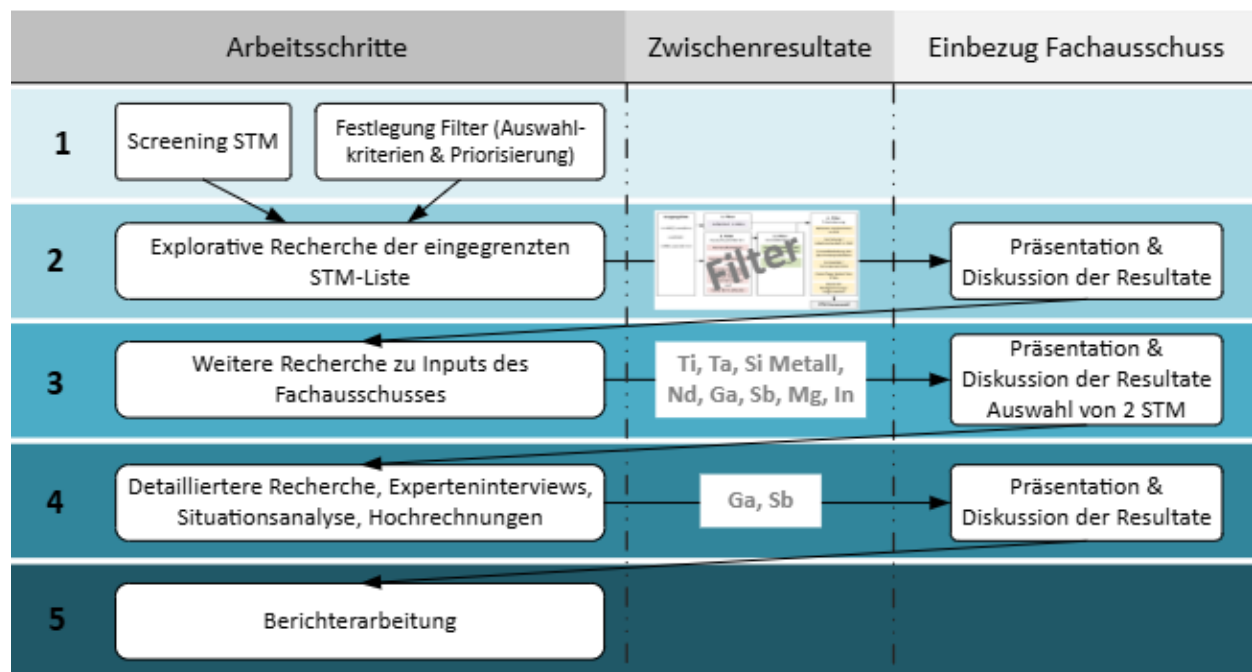


Abbildung 1: Visuelle Darstellung des Vorgehens und der Zwischenresultate entlang der 5 Arbeitsschritte der Phase 1 des Projekts Seltene Technologiemetalle.

2 Methodisches Vorgehen

Die Ausgangsliste der potenziell zu untersuchenden STM umfasste die in der VREG als Beispiele aufgeführten Elemente (Indium, Gallium, Germanium, Neodym und Tantal) sowie die Liste der kritischen und strategisch wichtigen Rohstoffe der EU. Die Liste der EU wurde im Jahr 2023 das fünfte Mal aktualisiert und basiert auf der Studie *Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report* [2]. Sie umfasst 34 kritische Rohstoffe, die anhand von zwei Hauptkriterien identifiziert wurden:

1. **Wirtschaftliche Bedeutung:** Dieses Kriterium beschreibt, wie wichtig ein Rohstoff für die europäische Wirtschaft ist. Massgeblich sind die Einsatzgebiete in verschiedenen Industriezweigen und ob der Rohstoff durch Alternativen ersetzt werden kann.
2. **Versorgungsrisiko:** Dieses Kriterium zeigt, wie gross die Gefahr von Lieferengpässen ist. Dabei werden die Herkunftsländer, deren politische Stabilität und Handelsbeziehungen sowie die Importabhängigkeit der EU berücksichtigt. Das grösste Risiko entsteht in der Gewinnung oder Verarbeitung.

Zur Festlegung einer Vorauswahl von potenziell zu untersuchender STM wurden verschiedene Filter definiert und angewendet (vgl. Abbildung 2).

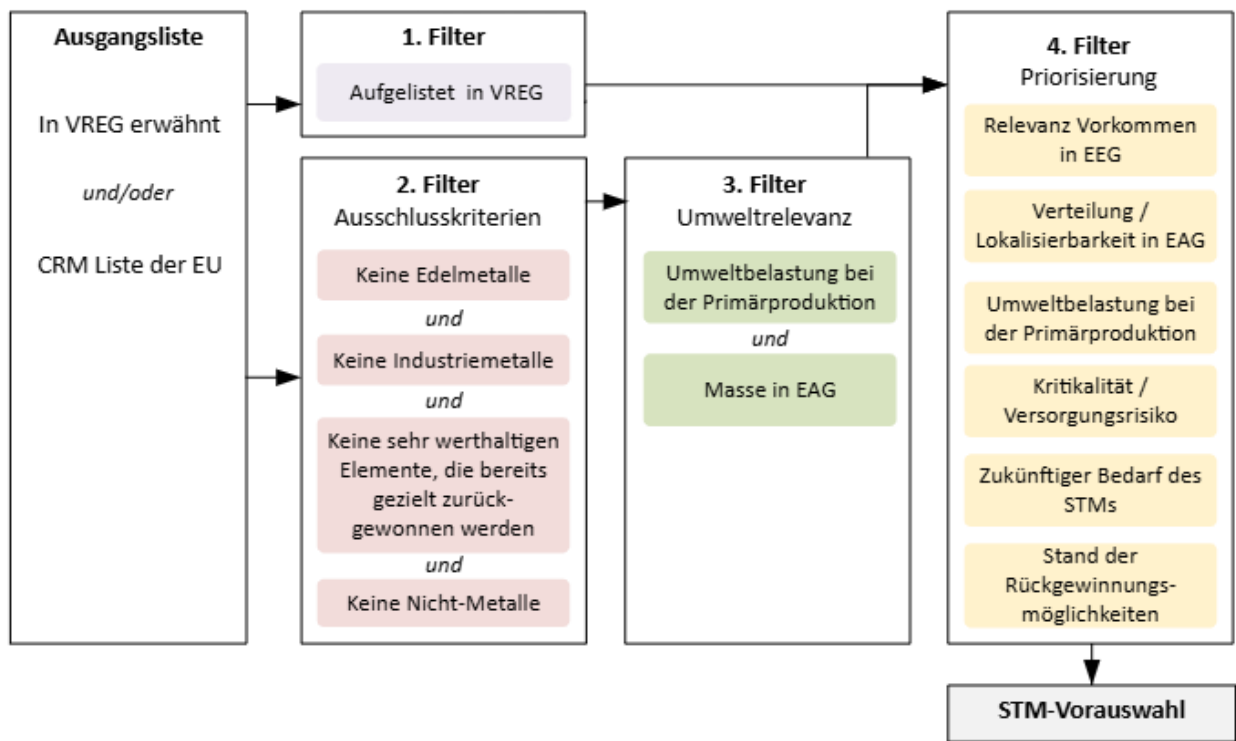


Abbildung 2: Mehrstufiger Kriterienkatalog für die Vorauswahl der STM mit positive Auswahlkriterien (grün) und Ausschlusskriterien (rot).

1. Filter: Aufgelistet in VREG

Die als Beispiele aufgeführten STM in der VREG wurden direkt auf die Liste der vorselektionierten STM gesetzt.

2. Filter: Ausschlusskriterien

Der zweite Filter umfasst vier Ausschlusskriterien. Ausgeschlossen werden Edelmetalle, Industriemetalle sowie andere Elemente, die bereits einen wesentlichen wirtschaftlichen Wert aufweisen. Für diese Rohstoffe existieren bereits Rückgewinnungsverfahren und/oder entsprechende wirtschaftliche Anreize, ihre Rückgewinnung effizient umzusetzen. Da sich das Projekt ausschliesslich auf Metalle konzentriert, werden Nicht-Metalle ebenfalls ausgeschlossen.

3. Filter: Umweltrelevanz

Der dritte Filter dient dazu, die Umweltrelevanz der betrachteten STM sicherzustellen. Diese ergibt sich aus der Umweltbelastung der Primärproduktion sowie den im EAG enthaltenen Massen dieses STM. Aufgrund der Komplexität und begrenzten Datenlage sind die resultierenden Zahlen als Richtwerte zu verstehen. Durch den Recyclingprozess entstehen auch Umweltbelastungen, die jedoch mangels verfügbarer Daten und vergleichbarer Quellen nicht berücksichtigt werden konnten.

Die in EAG vorkommenden Massen der STM wurden der Prosum-Datenbank² [3] entnommen. Wo Angaben fehlten, wurden die Werte abgeleitet (vgl. Anhang 7.1). Für die Berechnung der Umweltbelastung wurden Durchschnittswerte aus den Datenbanken von Ecoinvent und UVEK verwendet. Wenn ein Wert nur in einer der beiden Datenbanken verfügbar war, wurde dieser übernommen. Falls in beiden Datenbanken keine Angaben vorlagen, erfolgte eine Herleitung. Eine Übersicht sämtlicher verwendeter Daten und deren Herleitungen befindet sich im Anhang 7.1.2. Als Umweltbewertungsmethode wurde die Methode der ökologischen Knappheit (gemessen in Umweltbelastungspunkten (UBP) sowie Global Warming Potential (gemessen in Treibhausgasemissionen in kgCO_{2eq}) verwendet. Die UBP wurden anschliessend mit der jeweiligen STM-Masse multipliziert. Die zehn Elemente mit der potenziell höchsten absoluten Umweltbelastung wurden für die weitere Betrachtung ausgewählt. Dabei werden die 5 STM, die in der VREG erwähnt werden, ausser Acht gelassen (da diese für die engere Auswahl bereits gesetzt sind).

4. Filter: Priorisierung

Zur weiteren Fokussierung der Auswahl wurden ergänzende qualitative und quantitative Aspekte berücksichtigt. Diese umfassten unter anderem Aspekte wie:

- Vorkommen in spezifischen EAG-Fractionen: Identifikation relevanter Produktgruppen
- Lokalisierbarkeit: Möglichkeit, das STM innerhalb der Geräte gezielt zu identifizieren und selektiv zu erfassen
- Umweltauswirkungen: Bewertung der Umweltbelastungen entlang des Lebenszyklus und beim Recycling
- Zukünftige Bedarfsentwicklung: Einschätzungen zu erwarteten Nachfragesteigerungen aufgrund technologischer Entwicklungen

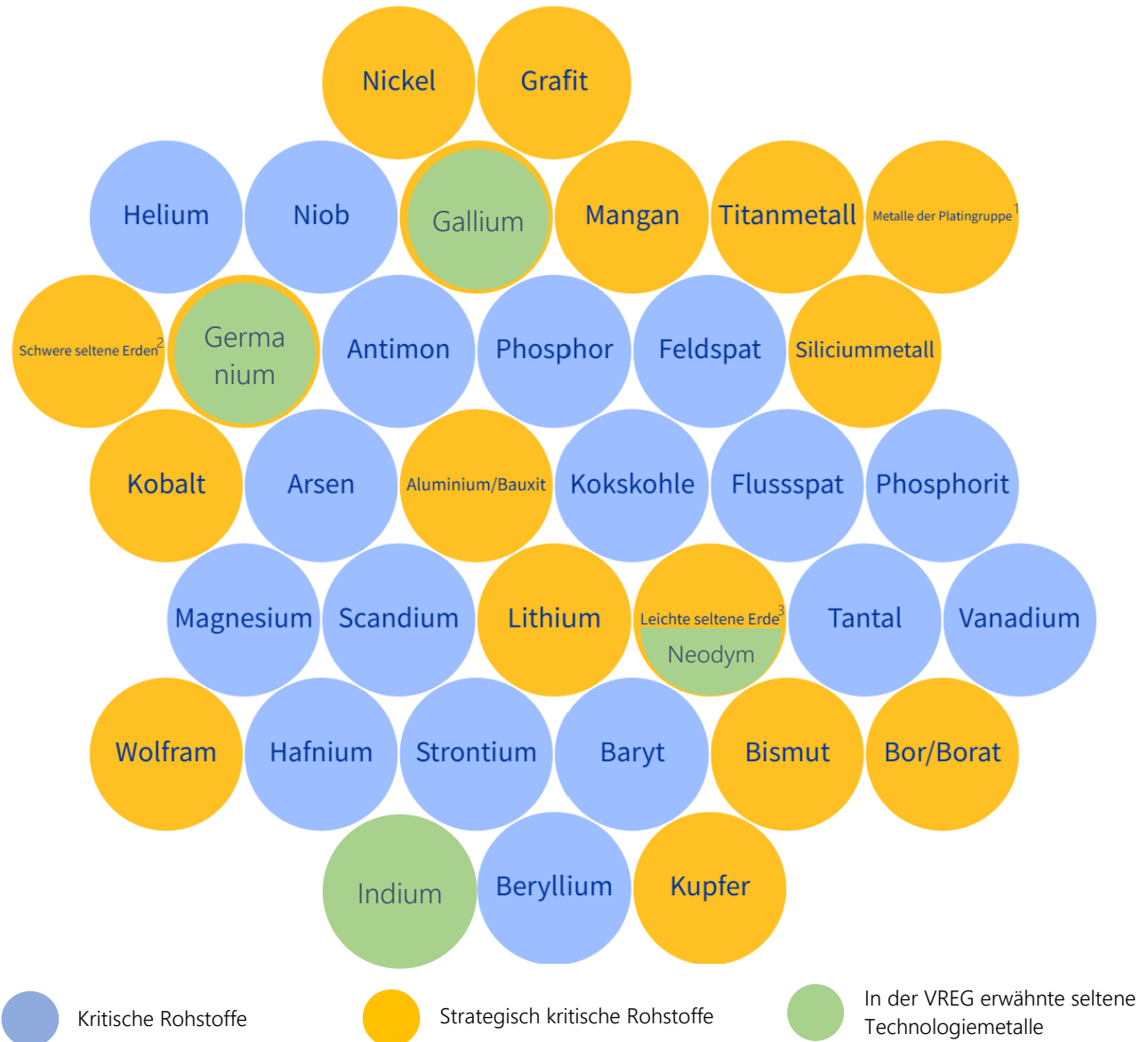
² Prosum Datenbank: Eine Plattform die Daten über in Verkehr gebrachte Produkte, Bestände, Zusammensetzungen und Abfallströme für EAG, Altfahrzeuge und Batterien für alle 28 EU-Mitgliedstaaten sowie die Schweiz und Norwegen aufzeigt. www.urbanmineplatform.eu

- Versorgungsrisiko: Abhängigkeit von Importen aus geopolitisch sensiblen Regionen oder aus einer einzigen Region (Monopolstellung)
- Rückgewinnungsmöglichkeiten: Verfügbarkeit und technischer Stand bestehender oder potenzieller Rückgewinnungsverfahren.

3 Vorauswahl potenzieller STM

3.1 Anwendung der Filter zur Vorauswahl

Ausgangsliste: Die Ausgangsliste der potenziell zu untersuchenden STM umfasste sowohl die von der VREG als Beispiele aufgeführten Elemente (Indium, Gallium, Germanium, Neodym und Tantal) als auch die von der EU definierte Liste kritischer und strategisch wichtiger Rohstoffe (vgl. Abbildung 3). Diese umfasst 34 Rohstoffe/Rohstoffgruppen, wovon 17 als strategisch kritische Rohstoffe definiert sind. Diese Rohstoffe sind nicht direkt kritisch, weil ihre Elemente selten sind, sondern weil die Herstellung dieser Stoffe sehr aufwendig ist, während gleichzeitig eine exponentiell steigende Nachfrage erwartet wird. Dadurch besteht bei diesen Rohstoffen ein grösseres Risiko von Versorgungsengpässen. Beispielsweise ist das Element Silizium nicht als kritisch eingestuft, Silizium-Metall ist hingegen aufgelistet. Die Rohstoffe/Rohstoffgruppen umfassen aufgeschlüsselt mehr als 50 verschiedene Materialien. Mit Ausnahme von Indium gehören die in der VREG erwähnten Elemente ebenfalls zur Liste der kritischen Rohstoffe der EU.



¹**Metalle der Platingruppe:** Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium, Osmium (6 Elemente)

²**Schwere seltene Erden:** Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutetium und Yttrium (10 Elemente)

³**Leichte seltene Erden:** Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym und Samarium (5 Elemente)

Abbildung 3: Die kritischen (blau) und strategisch kritischen (gelb) Rohstoffe und Rohstoffgruppen der EU, ergänzt mit den in der VREG erwähnten STM (grün). Ergänztes Abbildung von Europäischen Rat [4].

Anwendung Filter 1: Die Elemente, welche in der VREG genannt werden, wurden direkt auf die Liste der Vorauswahl gesetzt.

Anwendung Filter 2: Die vier Ausschlusskriterien von Filter 2 (keine Edelmetalle, keine Industriemetalle, keine sehr werthaltigen Elemente, die bereits gezielt zurückgewonnen werden,

keine Nicht-Metalle) wurden auf die Ausgangsliste angewendet, woraus eine Liste mit den nachfolgenden 37 Elementen resultierte:

- Antimon
- Bismuth
- Erbium
- Germanium
- Lanthan
- Mangan
- Praseodym
- Strontium
- Titan
- Yttrium
- Arsen
- Bor
- Europium
- Hafnium
- Lithium
- Neodym
- Samarium
- Tantal
- Vanadium
- Barium (Baryte)
- Cer
- Gadolinium
- Holmium
- Lutetium
- Nickel
- Scandium
- Terbium
- Wolfram
- Beryllium
- Dysprosium
- Gallium
- Indium
- Magnesium
- Niob
- Silizium Metall
- Thulium
- Ytterbium

Anwendung Filter 3: Die verbleibenden Elemente wurden nach ihrer Massen- und Umweltrelevanz sortiert (vgl. Anhang 7.1). Die zehn Elemente mit den höchsten Werten – ausgenommen jene, die bereits in der VREG genannt werden – wurden für die weitere Betrachtung ausgewählt. Zusammen mit den fünf in der VREG aufgeführten Elementen ergab sich eine Liste von insgesamt 15 Elementen:

Titan (Ti), Gallium (Ga), Antimon (Sb), Tantal (Ta), Magnesium (Mg), Silizium-Metall (Si-Metall) Neodym (Nd), Mangan (Mn), Nickel (Ni), Gadolinium (Gd), Wolfram (W), Strontium (Sr), Bor (B), Indium (In) und Germanium (Ge)

Anwendung Filter 4: Für diese 15 Rohstoffe wurde eine explorative Recherche durchgeführt, auf deren Grundlage 7 Elemente in die Vorauswahl aufgenommen wurden. Im Anhang 7.2 findet sich eine Übersicht der Pro-/Kontraargumente für bzw. gegen die Aufnahme eines Elements in die Liste. Die 7 ausgewählten Rohstoffe sind:

Titan (Ti), Gallium (Ga), Antimon (Sb), Tantal (Ta), Magnesium (Mg), Silizium-Metall (Si-Metall) und Neodym (Nd) (vgl. Abbildung 4).

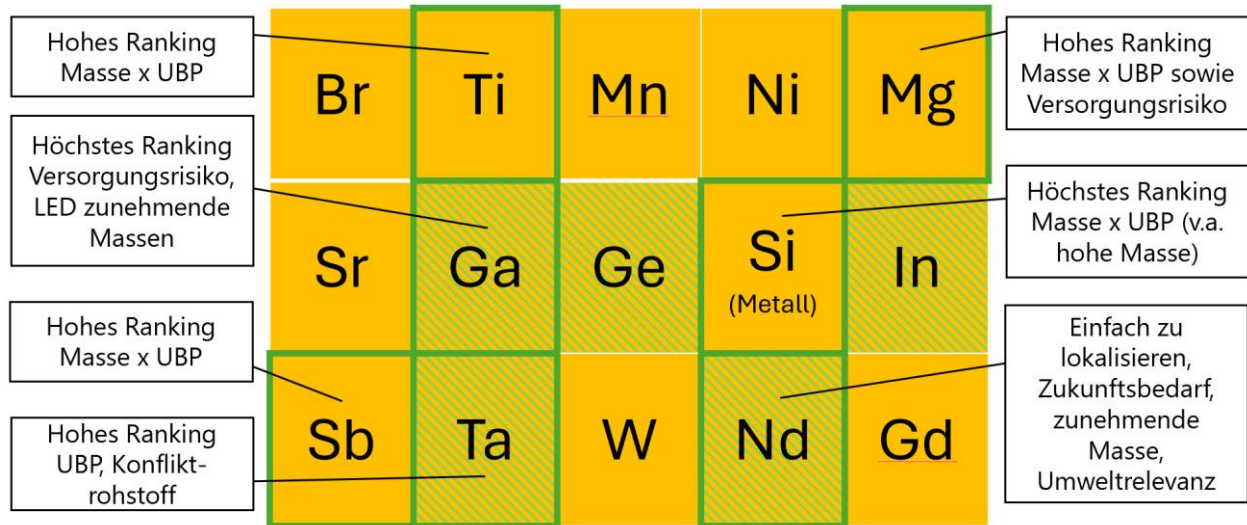


Abbildung 4: Auswahl von 7 seltenen Technometallen aus einer engeren Liste von 15 Elementen (grün umrandet) sowie deren Begründung. Grün schraffiert: STM, die in der VREG erwähnt werden.

3.2 Austausch Fachausschuss

Die angewandte Methode und die sieben Elemente, die in die Vorauswahl kamen, wurden dem Fachausschuss vorgestellt. In der anschliessenden Diskussion wurde Titan von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, während der Wunsch geäussert wurde, das Element Indium in die engere Auswahl aufzunehmen. Im Hinblick auf zentrale Fragestellungen und Herausforderungen beim Recycling von STM wurden folgende Aspekte diskutiert:

- **Materiallokalisierung und Stoffströme:** Die genaue Lokalisierung der STM in EAG-Komponenten sowie deren Verteilung in einzelnen Bauteilen ist unzureichend dokumentiert. Die exakten Anteile der STM in Produkten und Legierungen sind nicht ausreichend bekannt. Zudem erschwert die dynamische Veränderung der Produktzusammensetzung die Prognose künftiger Rückgewinnungspotenziale.
- **Bestehende Recyclingmöglichkeiten und Marktpotenzial:** Es wurde diskutiert, bei welchen Produkten bereits eine Endaufbereitung möglich ist und ob ein Markt für die Rückgewinnung seltener Technometalle existiert – inklusive seiner aktuellen Grösse und Entwicklungsperspektiven.
- **Chemisches Recycling:** Für bestimmte Stoffe sind chemische Verfahren notwendig. Dabei stellen sich Fragen nach der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit eines Aufbaus solcher Verfahren in der Schweiz, dem erforderlichen Mitteleinsatz sowie dem Potenzial für Skaleneffekte.
- **Recyclingqualität und Produkterhalt:** Es sollte geprüft werden, ob aus den entsprechenden Sekundärmaterialien wieder gleichwertige Produkte hergestellt werden können. Dafür müssen die Anforderungen der Abnehmer an die Qualität (Eigenschaften und Reinheitsgrad) der rückgewonnenen Materialien betrachtet werden.

- **Wirtschaftliche Tragbarkeit:** Die wirtschaftliche Umsetzbarkeit von Recyclingprozessen muss sichergestellt oder durch geeignete Gebührenmodelle tragbar gemacht werden. Dies ist eine Grundvoraussetzung für Investitionen in die Rückgewinnungsprozesse.
- **Abnehmende Materialgehalte:** Viele Produkte enthalten immer kleinere Mengen an STM. Dieser Trend erschwert die Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung zusätzlich.
- **Fehlende manuelle Trennmöglichkeiten:** In der Schweiz bestehen aufgrund hoher Lohnkosten und Personalmangel sehr begrenzte Möglichkeiten für manuelle Separationsprozesse. Dies gilt als zentrales Hindernis für hochwertige Rückgewinnung. Manuelle Behandlungen konzentrieren sich entsprechend meist auf die gesetzlich vorgeschriebene Schadstoffentfrachtung, während Wertstoffe vorwiegend über mechanische Prozesse separiert und aufkonzentriert werden.
- **Lagerung als strategische Option:** Die gezielte Lagerung von Komponenten mit hohem Rohstoffgehalt wird als mögliche Vorsorgestrategie für zukünftige Krisen diskutiert, z. B. bei LED-Komponenten. Hierbei könnten spätere technologische Entwicklungen oder Preissteigerungen die Rückgewinnung lohnender machen.
- **Integration der gesamten Wertschöpfungskette:** Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Produktion bis zur Entsorgung – sollten frühzeitig in Prozesse zur Rückgewinnung und Kreislaufwirtschaft eingebunden werden.
- **Mangelhafte Datenlage und Informationsfluss:** Die unzureichende Kenntnis über die Zusammensetzung von Eingangsmaterialien erschwert effizientes Recycling. Eine verbesserte Informationsweitergabe zwischen Produzenten, Verwertern und Recyclern ist notwendig.
- **Design for Recycling:** Recyclinggerechtes Produktdesign wird bislang kaum umgesetzt. Die Hersteller übernehmen nur begrenzt Verantwortung. Zudem fehlt es an regulatorischen Vorgaben und die Schweiz hat nur beschränkten Einfluss auf die internationale Produktgestaltung.

Die Fragestellungen, Inputs und Überlegungen dienten als Grundlage für die weitere Recherche, mit dem Ziel, in einer nächsten Sitzung bis zu zwei seltene Technologiemetalle für eine vertiefte Analyse auszuwählen.

4 Auswahl von zwei STM

4.1 Recherche und Antworten zu Fragen und Rückmeldungen

Tabelle 2 gibt einen Überblick über wichtige Merkmale der Elemente, die als relevant eingestuft wurden (vgl. Kapitel 3). Dazu zählen Neodym, Antimon, Silizium-Metall, Tantal, Gallium, Magnesium sowie Indium, welches auf Wunsch des Fachausschusses zusätzlich aufgenommen wurde.

Tabelle 3 zeigt zentrale positive und negative Aspekte der betrachteten Elemente. Sie geben Hinweise darauf, welche Stoffe sich für eine vertiefte Betrachtung zur Rückgewinnung eignen. Die Bewertung stützt sich auf Faktoren wie Einsatzhäufigkeit, Lokalisierbarkeit, Umweltbelastung sowie bestehende oder fehlende Rückgewinnungsmöglichkeiten.

Tabelle 2: Übersicht der sieben ausgewählten Elemente. Eine dunklere Einfärbung zeigt eine höhere Relevanz in Bezug auf die jeweilige Spalte an. Quellenangaben und Hinweise: siehe nächste Seite.

Element	A	B	C	D	E	F	G
Element	Versorgungsrisiko-Ranking [5] Wertebereich: 0-20	Umweltbelastung [UBP/kg]	Masse in CH EAG im Jahr 2015 [kg/Jahr]	Jährliche Umweltbelastung (D = B * C) [UBP/Jahr]	Verwendungsanteil des Elements in verschiedenen Anwendungen [%]	Marktpreis Primärmaterial 2024 [USD/kg] <i>(kursiv: Materialspezifikation)</i>	Wert der jährlichen Masse in CH EAG (G = C*F) [USD]
Neodym	3.6	64'227	16'560	1.06E+09	80% Magnete, 9% Autokatalysatoren, 4% Batterien, 2% Metalle (exkl. Batterien), 3% Keramik, 2% Glas [6]	56 <i>(Nd-oxide)</i>	927'000
Antimon	1.8	62'382	271'000	1.69E+10	43% Flammenschutzmittel, 32% Blei-Säure Batterien, 14% Bleilegierungen, 6% Kunststoffe, 5% Glas & Keramik [7]	21	5'691'000
Silizium-Metall in PVs	1.4	325'258	25'272	8.22E+09	54% Chemische Anwendungen, 38% Aluminium-legierungen, 6% Solarbereich, 2% Elektronische Anwendungen [8]	4	101'000
Tantal	1.3	560'891	1'700	9.53E+08	36% Kondensatoren, 24% Hochleistungslegierungen, 11% Sputtering Targets, 12% Walzprodukte, 9% Carbide, 8% Chemikalien [9]	170 <i>(Ta2O5)</i>	289'000
Gallium (LEDs)	4.8	326'143	150	4.82E+07	70% Integrierte Schaltkreise, 25% Beleuchtung, 5% CIGS Solarzellen [10]	220 - 500 <i>(Low – High purity, prim-ary/refined)</i>	33'000 - 75'000
Magnesium	4.1	83'047	459'000	3.81E+10	44% Transport (Automobilbranche), 4% Transport (Luft, Schifffahrt, etc.), 19% Verpackungen, 12% Bau, 11% Desulfurierungsmittel, 10% Andere [11]	2.9 – 7.7	1'331'000 - 3'534'000
Indium	-	898'946	760	6.85E+08	60% Flachbildschirme, 11% Lötmetallen, 9% Solarzellen, 7% Wärmeleitmaterial, 6% Batterien, 4% Legierungen/Verbindungen, 3% Halbleiter/LED [12]	300-340	228'000 - 258'000

Quellenangaben und Hinweise zur Tabelle 2:

Spalte A: Das Ranking bezieht sich auf das Supply Risk (SR) Ranking des Joint Research Centre, welches in der 'Foresight Study' [5] im Detail erläutert wird. Gemäss Bericht reicht der Wertebereich theoretisch von 0 bis 20, wobei der höchste ermittelte Wert in der Studie bei ca. 6 liegt. Dabei gelten Elemente mit $SR \geq 1$ als kritisch, mit $SR < 1$ als nicht-kritisch [2], [5].

Spalte B: Die ökologische Bewertung der STM erfolgt nach der Cut-off-Methode und basiert auf Datensätzen der UVEK-Datenbank, die auf dem Bewertungsansatz der 'Ecological Scarcity Factors 2021' beruhen. Die Umweltbelastungspunkte beziehen sich dabei auf die Primärproduktion der Elemente. Im Anhang 7.1.2 und Anhang 7.1.3 findet sich eine Übersicht der verwendeten Daten und der Herleitung von fehlenden Daten.

Spalte C: Abgesehen von Si-Metall wurden stammen die Daten von der Prosum Datenbank [3]: Eine Plattform, die Daten über in Verkehr gebrachte Produkte, Bestände, Zusammensetzungen und Abfallströme für EAG, Altfahrzeuge und Batterien für alle 28 EU-Mitgliedstaaten sowie die Schweiz und Norwegen aufzeigt. Für Silizium-Metall fehlen die Daten in Prosum. Herleitung: PV in CH EAG im Jahr 2022 waren 936 Tonnen [13], Si in den Zellen macht in PV Panels etwa 2.7% [14] aus. ($2.7\% * 936 \text{ Tonnen} = 25'272 \text{ kg}$).

Spalte F: Jährliche Durchschnittspreise 2024 [15]

Tabelle 3: Zentrale positive und negative Aspekte hinsichtlich dem Rückgewinnungspotential der acht ausgewählten STM.

Element	Positive Aspekte	Negative Aspekte
Neodym	<ul style="list-style-type: none"> • Wird in EAG deutlich häufiger verwendet als andere Seltene Erden • Kommt vor allem in grossen Geräten vor • Es bestehen Rückgewinnungsmöglichkeiten • Gut lokalisierbar (Magnete) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ geringe Neodym-Mengen auf Produktebene • Andere Abfallströme enthalten einen deutlich höheren Anteil an Neodym.
Antimon	<ul style="list-style-type: none"> • Bedeutend auch in der Zukunft • Potenzial einen Schadstoff in einen Wertstoff zu verwandeln • Hoher Wert Masse x UBP 	<ul style="list-style-type: none"> • Bisher keine industrielle Rückgewinnungsmöglichkeit (labscale) • Wirtschaftlichkeit wenig wahrscheinlich
Silizium-Metall	<ul style="list-style-type: none"> • Zunehmende Masse • Hoher Wert Masse x UBP 	<ul style="list-style-type: none"> • PV-Herstellung in China, für andere elektrische und elektronische Anwendungen sind die Qualitätsanforderung sehr hoch • Kein seltenes Element
Tantal	<ul style="list-style-type: none"> • Gut lokalisierbar • Hohe Umweltbelastung (Primärproduktion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Substituierbar, Aufkonzentrierung herausfordernd • Rückgewinnungsmöglichkeiten aus EAG nicht bekannt
Gallium (LEDs)	<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Ranking bezüglich Versorgungsrisiko • Mögliche Rückgewinnung weiterer STMs aus LEDs 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufkonzentrierung schwierig (Wirtschaftlichkeit) • Geringe Massen in EAG

	<ul style="list-style-type: none"> • Zunehmende Masse 	<ul style="list-style-type: none"> • Rotschlämme könnten bei Versorgungsschwierigkeiten als Sekundärquelle dienen
Indium	<ul style="list-style-type: none"> • Gut lokalisierbar • Hohe Umweltbelastung (Primärproduktion) • Rückgewinnungsmöglichkeiten theoretisch vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlichkeit schwierig
Magnesium	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ hohe Massenanteil in EAG • Hohen Wert Masse x UBP 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Anwendungsanteil in EAG • Weit verbreitetes Element

4.2 Austausch Fachausschuss und Festlegung von zwei STM

Im Rahmen der erweiterten Recherche zu den acht ausgewählten STM wurden die Ergebnisse dem Fachausschuss vorgestellt und gemeinsam erörtert. Ziel war es, zwei Elemente für eine vertiefte Analyse festzulegen. Die Auswahl, die nach dem Ausschlussprinzip erfolgte, stellt eine Momentaufnahme des aktuellen Stands dar. Mit Blick auf zukünftige Entwicklungen könnten jedoch auch andere Elemente an Bedeutung gewinnen. Die Entscheidung fiel schliesslich auf **Antimon (Sb)** und **Gallium (Ga)**.

Im ersten Schritt wurden **Magnesium** und **Tantal** ausgeschlossen. Magnesium wurde aufgrund seines geringen Anwendungsanteils in EAG und seines weit verbreiteten Vorkommens als weniger relevant eingestuft. Tantal schied aus, weil es sich gut substituieren lässt und eine wirtschaftliche Aufkonzentrierung als herausfordernd gilt.

Für **Indium** liegt bereits eine detaillierte Studie ([e-Recmet](#) (2013-2015)) zum Rückgewinnungspotenzial vor. Diese zeigt auf, unter welchen Voraussetzungen sich eine Rückgewinnung wirtschaftlich lohnen könnte und welcher finanzielle Aufwand dafür nötig wäre. Eine aktuelle Überprüfung der Rahmenbedingungen ergab, dass inzwischen zwar Rückgewinnungstechnologien existieren – was zur Zeit der Studie noch nicht der Fall war [16] – sich jedoch die wirtschaftliche Lage nicht verbessert hat. Im Vergleich zu den anderen Elementen erschien Indium daher weniger vielversprechend.

Silizium-Metall ist zwar aufgrund des wachsenden Bedarfs an Photovoltaikmodulen zunehmend im EAG-Strom vertreten, wird jedoch bereits separat behandelt und steht vermehrt im Fokus wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Aktivitäten. Daher wurde auch dieses Element als weniger wichtig für eine Vertiefung bewertet.

Neodym wurde ebenfalls bereits in der [e-Recmet](#) Studie [16] untersucht und es existieren bereits Rückgewinnungsansätze, die bisher jedoch nur begrenzt umgesetzt werden. Eine vertiefte Untersuchung könnte zwar aufzeigen, wie sich die Rückgewinnung verstärken lässt, dennoch wurde Neodym im Vergleich zu Antimon und Gallium als weniger relevant eingeschätzt.

Antimon und **Gallium** erwiesen sich schliesslich als die beiden interessantesten Optionen für eine vertiefte Betrachtung. Ausschlaggebend war unter anderem das noch begrenzte Wissen zu beiden Stoffen, was zusätzlichen Erkenntnisgewinn verspricht.

Im Fall von **Gallium** ist relevant, dass es in LEDs eingesetzt wird, die neben Gallium auch zahlreiche weitere Elemente enthalten. Im Fall von **Antimon** ist insbesondere die Verwendung in Kunststoffen von Interesse – dort wird es derzeit aufgrund des gleichzeitigen Vorkommens mit bromierten Flammschutzmitteln bei der Entsorgung beseitigt. Eine zentrale Frage ist daher, ob sich antimonhaltige Kunststoffabfälle in Wertstoffe umwandeln lassen und welche Herausforderungen sowie Potenziale dies mit sich bringt.

5 Analyse der Recyclingketten der zwei ausgewählten STM

5.1 Analyse der Recyclingkette von Gallium

5.1.1 Grundlage

Gewinnung

Mit einem natürlichen Vorkommen von 16 ppm ist Gallium eines der selteneren Elemente in der Erdkruste. Rein galliumhaltige Mineralien haben keine direkte wirtschaftliche Bedeutung. Der grösste Teil der Weltproduktion von Gallium wird als Nebenprodukt bei der Produktion von Aluminiumoxid gewonnen [17]. Die Galliumkonzentration in Bauxit reicht je nach Standort zwischen 30 und 80 ppm. Die geringe Galliumkonzentration in Bauxit macht es aufgrund historischer und heutiger Galliumpreise nicht wirtschaftlich, Bauxit ausschliesslich für die Extraktion von Gallium abzubauen. Die Menge an Gallium, die aus Bauxit erhältlich ist, wird somit durch die Menge an produziertem Aluminiumoxid bestimmt.

Eine weitere Primärquelle von Gallium ist Zinkerz. Aufgrund der Umstellung auf hydrometallurgische Zinkgewinnungsmethoden hat die Galliumgewinnung aus Zinkerz jedoch an wirtschaftlicher Bedeutung verloren [18]. Ebenfalls kann aus Kohle und Phosphat Gallium gewonnen werden: Bei der elektrothermischen Herstellung von Phosphor aus Phosphat konzentriert sich Gallium im Rauchstaub – ein potenzieller Ausgangspunkt für dessen Rückgewinnung. Auch die sogenannte Flugasche aus Kohle weist eine erhöhte Galliumkonzentration auf und könnte ebenfalls als Quelle dienen. Im Jahr 2023 wurden insgesamt ca. 450 Tonnen Gallium global produziert [19].

Das in den weltweiten Bauxitvorkommen enthaltene Gallium wird auf über 1 Million Tonnen geschätzt und auch in den weltweiten Zinkvorkommen wird ebenfalls von einer beträchtlichen Menge ausgegangen [20]. Gleichzeitig sind weniger als 10% des Galliums in Bauxit- und Zinkvorkommen technisch gewinnbar [20].

Ökonomisch

Gallium gilt aufgrund der Verwendung in Elektronik und anderen Schlüsseltechnologien sowie den Versorgungsrisiken als kritisches Element. Es wird erwartet, dass die globale Nachfrage an Gallium durch den zusätzlichen Bedarf in der Elektromobilität sowie in der Elektronikindustrie in Zukunft weiter ansteigen wird [21]. Das Produktionspotential von Gallium aus Bauxit wird heute nur zu 5-7% ausgeschöpft [19].

Der Preis für Gallium bewegte sich zwischen 300 – 600 USD pro kg in den Jahren 2000 – 2020, mit einem durchschnittlichen Preis von ca. 450 USD [22]. Die Marktdominanz Chinas führt teilweise zu starken Preisveränderungen. So wurden beispielsweise Exportbeschränkungen durch die chinesische Regierung im Dezember 2024 gegenüber den USA verhängt, was den Preis im Weltmarkt kurzzeitig in die Höhe trieb [23].

Ökologisch

Die Trennung des Nebenprodukts Gallium aus der Bauxit- bzw. Aluminiumproduktion ist mit signifikanten Umwelteinflüssen verbunden. Die vergleichsweise geringen Konzentrationen erfordern grosse Mengen an Energie, Chemikalien sowie Wasser, welches den Fussabdruck der Galliumproduktion erhöht. Der Treibhausgasfussabdruck von primärem Gallium von hoher Qualität befindet sich je nach Studie im Bereich zwischen ca. 86.5 kgCO_{2eq}/kg_{Ga} [24] bis ca. 220 kgCO_{2eq}/kg_{Ga} [25]. Gallium weist ein vielversprechendes Recyclingpotenzial auf, dies wird durch die bereits existierende Wiederverwertung von Gallium von Produktionsabfällen in der Wafer-Industrie aufgezeigt [26]. In EAG ist Gallium in erhöhter Konzentration besonders in LEDs vorzufinden. Die Rückgewinnung aus LEDs ist technisch mittels pyro- sowie hydrometallurgischer Verfahren möglich, wie in verschiedenen Laborstudien bestätigt wurde [26]. Besonders attraktiv ist die Tatsache, dass LEDs einen bis zu siebenfach höheren Galliumgehalt aufweisen als das Gestein aus der Primärproduktion – was sie zu einer potenziellen sekundären Quelle machen könnte [26], [27]. Eine kommerzielle Rückgewinnung von Gallium aus LEDs existiert allerdings noch nicht. Angesichts des erwarteten Anstiegs galliumhaltiger Abfälle in den kommenden Jahren gewinnt das Recycling zunehmend an Bedeutung und könnte wesentlich zur nachhaltigen Rohstoffnutzung beitragen. Ob Recycling von Gallium aus LEDs einen geringeren CO₂-Fussabdruck aufweist, ist noch nicht bestätigt. Eine Studie aus dem Jahr 2020 schätzt die Treibhausgasemissionen von sekundärem Gallium aus LEDs auf bis zu 3'687 kgCO_{2eq}/kg_{Ga} [28].

5.1.2 Globale Entwicklung & Trends

China produziert seit 2015 über 90% des weltweiten Primärgalliums und spielt damit eine zentrale Rolle für die weltweite Versorgung [20]. Eine 2022 veröffentlichte Studie warnt jedoch vor einem potenziellen Versorgungsrisiko, da Chinas Boom in der Primär-Aluminiumproduktion sich abschwächt: Dies könnte die Verfügbarkeit von Gallium in Zukunft erheblich beeinflussen, da neue Aluminiumprojekte mit geringerer Produktionsintensität weniger Gallium als Nebenprodukt liefern würden. Eine weitere Quelle für Gallium ist die Gewinnung aus Kohleasche, die bei der Kohleproduktion anfällt. Aufgrund des Wandels in der Energieerzeugung ist jedoch davon auszugehen, dass zukünftig aus dieser Quelle nur noch geringere Mengen gewonnen werden können [21].

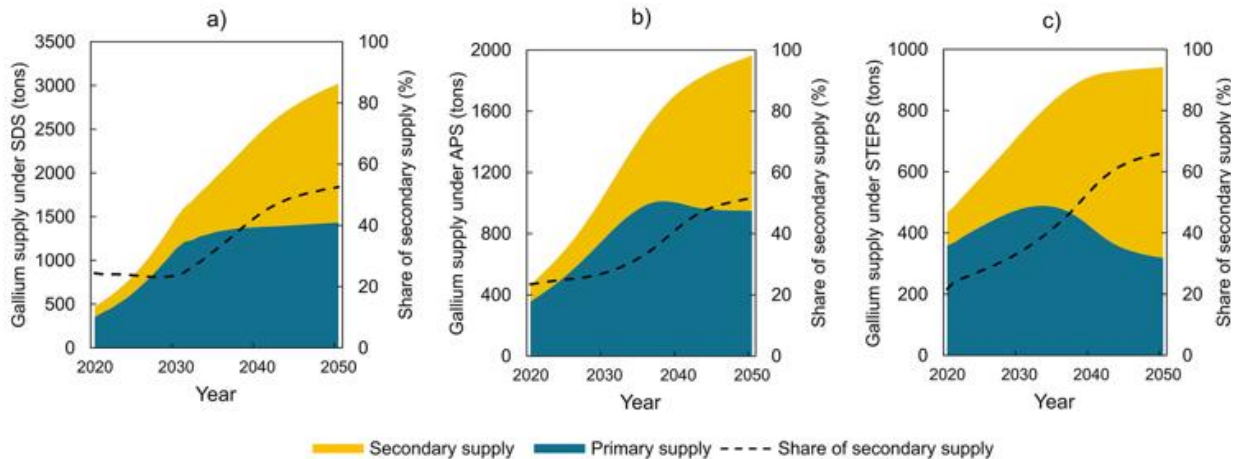


Abbildung 5: Verschiedene Szenarien, welche die globale Galliumproduktion aus primären sowie sekundären Quellen modelliert. Quelle: Song et al., 2022 [21].

Song et al. zeigen, dass die Galliumproduktion in hohem Masse von der Entwicklung der Aluminiumindustrie - insbesondere in China - abhängig ist (vgl. Abbildung 5). Andere Regionen wie die EU, die USA und Japan sind auf Importe angewiesen und verfügen kaum über eigene Produktionskapazitäten. Japan beispielsweise war im Berichtszeitraum der grösste Importeur von veredeltem Gallium [21].

Song et al. entwickelten ein Systemdynamikmodell, das die Gallium-Aluminium-Beziehung in fünf Regionen der Welt bis 2050 analysiert. Es zeigt unterschiedliche Nachfrage- und Angebotsmuster, wobei China weiterhin eine Schlüsselrolle spielt. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer koordinierten globalen Strategie, um die Versorgung mit Gallium langfristig zu sichern [21].

Ein Ausbau von Sekundärproduktionen aus Recycling, wie beispielsweise galliumhaltiger LEDs, wird als notwendig betrachtet für die langfristige Deckung des Bedarfs. Erste Pilotprojekte zur Rückgewinnung von Gallium aus Abfallströmen wurden gestartet [29].

5.1.3 Mengen von LED-Leuchtmitteln in der Schweiz

Um das Potenzial der LED-Leuchtmittel als sekundäre Galliumquelle zu untersuchen, ist die jährlich verfügbare Masse an Material essenziell. Diese Daten sind nicht direkt verfügbar, weshalb sie aus anderen Daten abgeleitet werden müssen. Dabei wurde der Fokus auf die kommerziell verfügbaren LED-Leuchtmittel gelegt, insbesondere LED-Innen- und Aussenleuchtmittel für den Heimgebrauch.

Prozessschritte Berechnung

1. Verkaufszahlen Leuchtmittel in der Schweiz in Stückzahlen pro Jahr [30]
 - ➔ Marktanteil von LED-Leuchtmittel im Leuchtmittelmarkt in der Schweiz pro Jahr
 - ➔ Ziel: Stückzahlen an LED-Leuchtmitteln in der Schweiz pro Jahr
2. Abschätzung durchschnittliches Gewicht einer verkauften LED-Leuchte
 - ➔ Ziel: Abschätzung Gesamtmasse an LED-Leuchtmittel in der Schweiz pro Jahr

3. Gallium-Konzentration in LED-Leuchtmittel anhand verschiedener Studien
 - ➔ Ziel: Potenziell verfügbares Gallium in verkauften LED-Leuchtmittel in der Schweiz

4. Vergleich von potenziell verfügbarem Gallium mit Rücknahmemengen durch Rücknahmesysteme
 - ➔ Ziel: Tatsächlich verfügbares Potenzial an Gallium in LED-Leuchtmitteln anhand der Sammelmengen

Stückzahlen an LED-Leuchtmittel in der Schweiz pro Jahr

Die Abbildungen Abbildung 6-Abbildung 8 beschreiben den Prozessschritt 1. Wurden im Jahr 2014 noch über 35 Millionen Einheiten an Leuchtmitteln in der Schweiz verkauft, so lag die Stückzahl im Jahr 2020 nur noch knapp über 20 Millionen Einheiten (vgl. Abbildung 6) [30]. Dies ist auf die längere Lebensdauer von LED-Leuchtmittel zurückzuführen: Seit 2014 ist der Anteil an LED-Leuchtmitteln im gesamten Leuchtmittelmarkt in der Schweiz deutlich gestiegen (vgl. Abbildung 7) [30].

Basierend auf den absoluten Stückzahlen der verkauften Leuchtmittel sowie dem jährlichen Marktanteil von LED-Leuchtmitteln wurde die Stückzahl, der pro Jahr verkauften LED-Leuchtmitteln bestimmt. Für die Jahre 2024 – 2030 wurde extrapoliert. Ab dem Jahr 2024 wird davon ausgegangen, dass der Anteil von LED-Leuchtmitteln nahezu 100% beträgt. Damit entspricht die Anzahl der verkauften LED-Leuchtmittel ab diesem Zeitpunkt der Gesamtzahl aller verkauften Leuchtmittel. Die jährlich geschätzte Stückzahl an verkauften LED-Leuchtmitteln ist verhältnismässig stabil und bewegt sich zwischen 15.5 – 17 Millionen Einheiten (vgl. Abbildung 8).

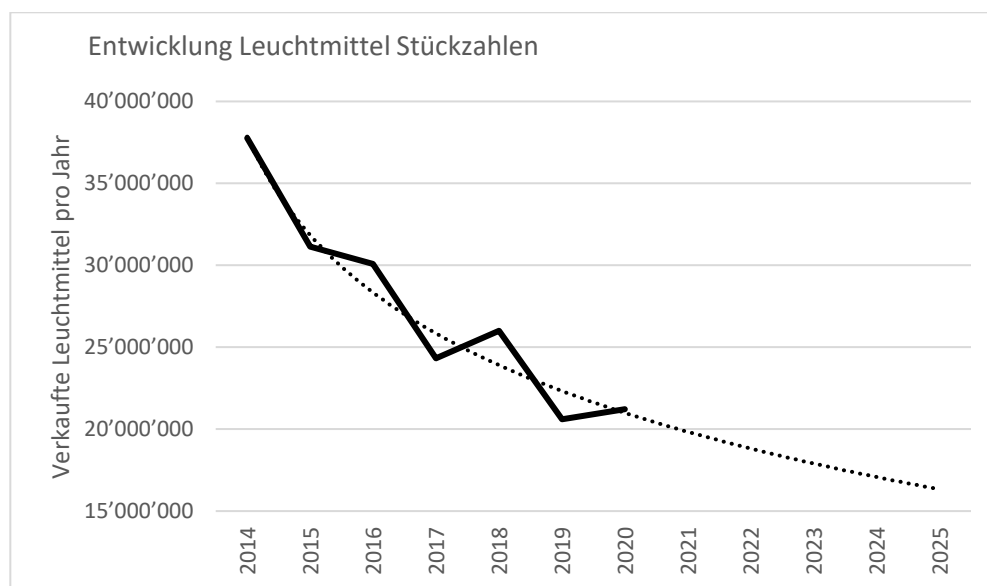


Abbildung 6: Entwicklung der jährlich verkauften Stückzahlen von Leuchtmitteln in der Schweiz im Zeitraum von 2014 – 2020. Der deutliche Rückgang der Stückzahlen ist auf die längere Lebensdauer und zunehmende Verbreitung von LED-Leuchtmitteln zurückzuführen [30].

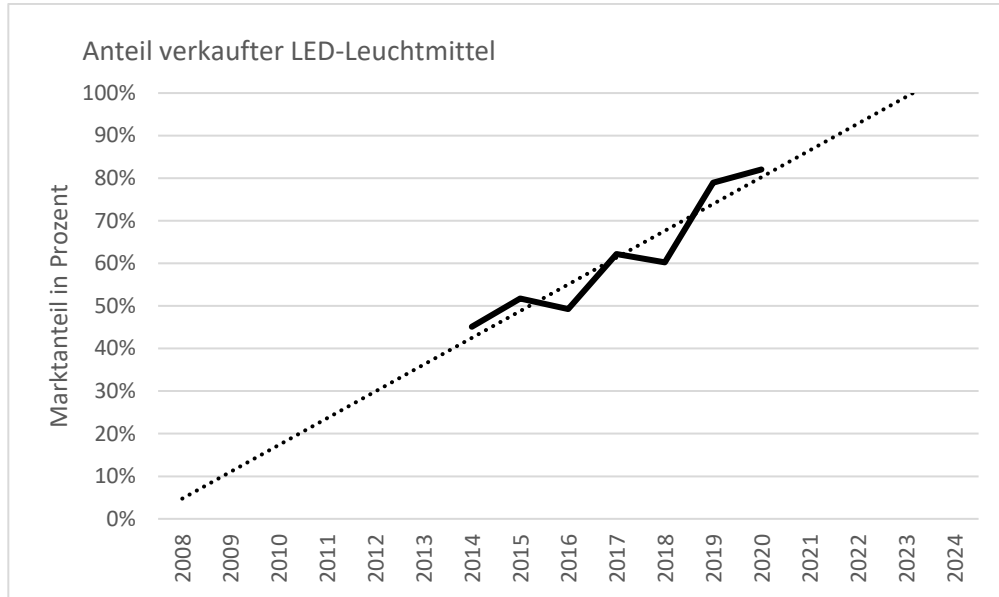


Abbildung 7: Marktanteil von LED-Leuchtmitteln im Zeitraum von 2014 – 2020. Ab 2024 wird ein Marktanteil von nahe 100% geschätzt [30].

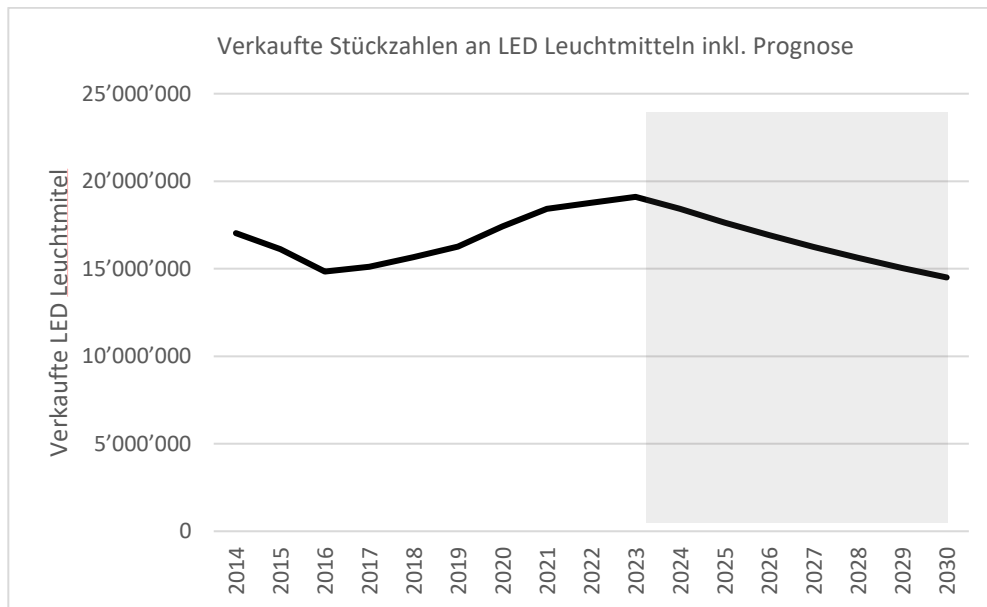



Abbildung 8: Berechnete Anzahl verkaufte LED-Leuchtmitteln pro Jahr anhand der Marktanteilentwicklung, inklusive Projektion bis 2030 (graue Fläche). Die Stückzahlen sind mit ca. 16.5 Millionen Einheiten vergleichsweise konstant.

Abschätzung Gesamtmasse an LED-Leuchtmitteln in der Schweiz pro Jahr

Für die Bestimmung der Gesamtmenge an Gallium aus LED-Leuchtmitteln ist die Gesamtmasse der verkauften LED-Leuchtmitteln zu ermitteln (Prozessschritt 3). Wie in Tabelle 4 erläutert, entspricht das typische Gewicht von LED-Leuchtmitteln je nach Typ von ca. 30 g bis über 1'000 g, wobei sich die meisten Einheiten im unteren Gewichtsbereich befinden. LED-Leuchtmitteln über 1'000 g entsprechen

Spezialanwendungen wie Strassenbeleuchtung, welche nicht im Rahmen der hier betrachteten LED-Leuchtmittel sind und welche im Vergleich zu LED-Leuchtmitteln für den Heimgebrauch in deutlich geringeren Stückzahlen verkauft werden. Deshalb wurden diese nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Kommerziell verfügbare typische LED-Leuchtmitteltypen [31].

Typbeschreibung	Aussehen	Typische Gewichtsverteilung
"Bulb"-type (Kugelförmig)		30 – 150 g
Stabförmige Leuchte		200 – 400g
Grosse LED-Leuchtmittel (z.B. Strassenbeleuchtung)		>1'000g

Anhand dieser Faktoren wurde ein Durchschnittsgewicht von 140 g (Unsicherheitsspanne 90 – 190 g) pro verkaufte Einheit einer LED-Leuchte angenommen. Dadurch lässt sich die Gesamtmasse an jährlich verkauften LED-Leuchtmittel in der Schweiz bestimmen, welche sich anhand der zuvor ermittelten Daten auf ungefähr 2'300 Tonnen (Unsicherheitsspanne 1'500 – 3'100 Tonnen) beläuft.

Potenzial der Rückgewinnung von Gallium aus LED-Leuchtmittel

Basierend auf der Gesamtmasse an jährlich verkauften LED-Leuchtmittel von ca. 2'300 Tonnen kann das Potenzial an Gallium aus diesem Produktstrom ermittelt werden (Prozessschritt 4). Verschiedene Studien, welche die Galliumkonzentration in LED-Leuchtmitteln untersuchten, wurden miteinander verglichen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Ermitteltes Potenzial anhand von verschiedenen Quellen zur Galliumkonzentration in LED-Leuchtmitteln.

Quelle Nr.	Quelle Beschreibung	Galliumkonzentration nach Datenquelle	Zusätzliche benötigte Annahme für Berechnung der Galliummenge pro Einheit
1	Sáez, P. et al 2024 [27]	5'377 mgGa/kg in LED-Chips	Pro LED-Leuchtmittel sind 20 LED-Chips verbaut
2	Oliveira, R.P. et al. 2020 [32]	700 mgGa/kg in SMD LED Module	Gewichtsanteil des SMD-LED Moduls entspricht 3.5% der Gesamten LED-Leuchte
3	Cenci, M et al. 2020 [33]	3'800 mgGa/kg in LED Chips	Pro LED-Leuchte sind 20 LED-Chips verbaut
4	Swico Fachbericht 2024 [34]	15'505 mgGa/kg aus LED-Leuchtfäden	Pro LED-Leuchte sind 8 Fäden a 0.5 g verbaut

Für diese vier Quellen wurden über die Stückzahlen sowie die Gesamtmasse LED-Leuchtmitteln die Mengen an Gallium aus LED-Leuchtmitteln in der Schweiz pro Jahr auf 57 kg/Jahr bis 360 kg/Jahr abgeschätzt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Modellierte theoretische Galliummenge aus jährlich in der Schweiz verkauften LED-Leuchtmitteln, in kg.

Quelle Nr.	Berechnung	Wert	Einheit
1	5'377 mgGa/kg Chips * Gewicht Chips * Anzahl Chips/Leuchtmittel * Anzahl Leuchtmittel/Jahr	358	kg Gallium/Jahr
2	Gewicht Leuchtmittel * Gewichtsanteil SMD-LED Modul * 700 mgGA/kg/SMD-Modul	57	kg Gallium/Jahr
3	3'800 mgGa/kg Chips * Gewicht Chips * Anzahl Chips/Leuchtmittel * Anzahl Leuchtmittel/Jahr	254	kg Gallium/Jahr
4	15'505 mgGa/kg Leuchtfäden * Gewicht Leuchtfäden * Anzahl Leuchtfäden/Leuchtmittel * Anzahl Leuchtmittel/Jahr	99.8	kg Gallium/Jahr

Monitore

Eine weitere EAG-Kategorie, welche signifikante Mengen an LEDs enthalten, sind Computermonitore sowie Notebookbildschirme. Allerdings werden Monitore im Vergleich zu LED-Leuchtmitteln in weitaus geringeren Stückzahlen verkauft, ca. 300'000 Notebooks sowie 200'000 PC-Monitore und 300'000 - 400'000 TVs im Durchschnitt der letzten Jahre [35]. Die durchschnittliche Ga-Konzentration pro Monitor-Einheit wird zwischen 1.6 – 50 mgGa/Einheit geschätzt, wobei verlässliche Daten kaum verfügbar sind [36]. Eine Studie zu LEDs aus dem Swico-/SENS Fachbericht 2024 fand Konzentrationen von unter 0.5 mgGa/Monitor [34].

Anhand dieser Verkaufszahlen von ca. 800'000 Monitoren pro Jahr sowie der Spanne an Ga-Konzentration pro Einheit ergeben sich für die Schweiz weitere 1.3 – 40 kg Ga aus Bildschirmen.

Diese Werte sind mit starken Unsicherheiten behaftet, anhand der Datenlage sowie der Vereinfachung auf einen durchschnittlichen Monitor: Verschiedene Grössen, Bauweisen sowie Produktionsjahr beeinflussen die im Monitor enthaltene Ga-Menge.

Tatsächlich verfügbares Potenzial an Gallium in LED-Leuchtmitteln anhand der Sammelmengen

Anhand von Daten aus dem Fachbericht von Swico & SENS zu EAG-Sammelmengen, gelangen in der Schweiz jährlich etwa 1'000 Tonnen Leuchtmittel zurück in die Rücknahmesysteme, die das Recycling von EAG in der Schweiz regeln [34]. Leuchtmittel werden meist nicht genauer in Unterkategorien separiert, es erfolgt allerdings eine Ausschleusung von quecksilberhaltigen Leuchtmitteln in der Schadstoffentfernung.

Im Vergleich zu den zuvor ermittelten Mengen von etwa 2'300 Tonnen jährlich verkauften LED-Leuchtmitteln zeigt sich, dass ein signifikanter Anteil der Leuchtmittel nicht in die Rücknahmesysteme über die verschiedenen Sammelstellen zurückgeführt wird. Es wird vermutet, dass Leuchtmittel teilweise in Altglasfraktionen oder im Hauskehricht entsorgt werden, wodurch sich das realistisch verfügbare Rückgewinnungspotenzial von Gallium aus LED-Leuchtmitteln durch die Schweizer Recyclingsysteme weiter reduziert (vgl. Abbildung 9).

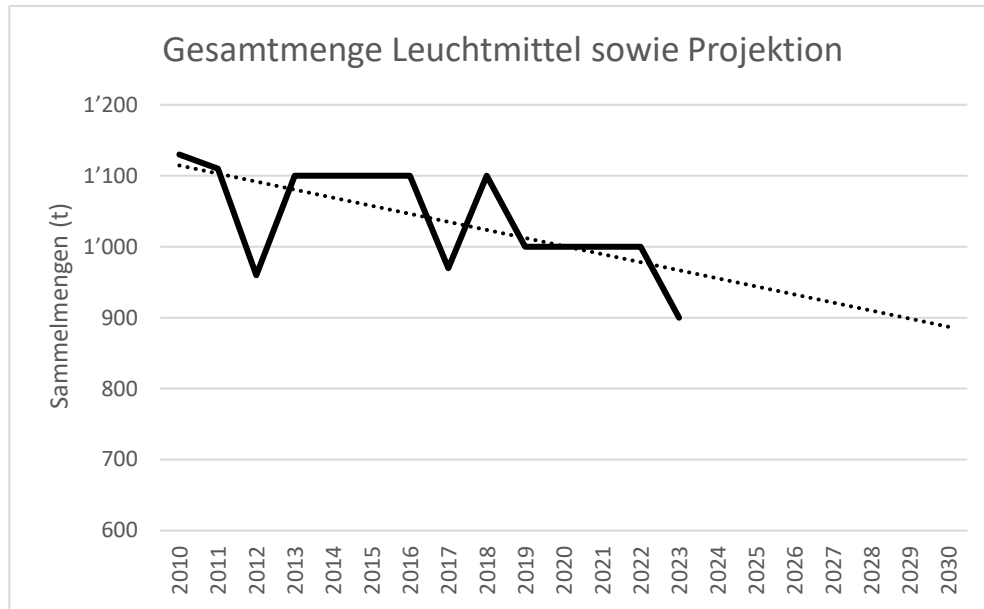


Abbildung 9: Sammelmenigen Leuchtmittel in Tonnen pro Jahr der Schweizerischen Rücknahmesysteme [34].

5.1.4 Schlussfolgerungen Gallium

Gallium spielt bei der globalen Energiewende eine immer wichtigere Rolle, insbesondere durch seine Verwendung in Technologien wie LEDs und Leistungselektronik (Verwendung von Galliumnitrid GaN), z.B. für Photovoltaik-Wechselrichter. Zusätzlich ist es für die Rüstungsindustrie ein zentraler und strategisch wichtiger Rohstoff. Obwohl die in LEDs enthaltenen Galliummengen in absoluten Zahlen sehr gering sind, ist ihr Beitrag im Verhältnis zur Gesamtnachfrage in der Schweiz durchaus relevant. Die weltweite Nachfrage nach Gallium steigt stetig an - angetrieben durch den zunehmenden Einsatz energieeffizienter und grüner Technologien.

Gleichzeitig nimmt die Verfügbarkeit von primären Produktionsquellen ab, da vor allem die Kohleförderung zurückgeht. Da Gallium oft in geringen Konzentrationen in Nebenprodukten wie Flugasche enthalten ist, verringert dieser Rückgang auch die Verfügbarkeit des Metalls als Nebenprodukt. Vor diesem Hintergrund wird die Erschliessung sekundärer Produktionsquellen - zum Beispiel durch Recycling aus der Elektronik - für die langfristige Versorgungssicherheit wichtiger, wie wissenschaftliche Studien zeigen.

Diese Entwicklungen deuten auf einen möglichen Preisanstieg für Gallium in der Zukunft hin. In der Schweiz erscheint die Rückgewinnung von Gallium aus LEDs jedoch aufgrund der geringen Konzentration im Ausgangsmaterial derzeit kaum wirtschaftlich, was die Machbarkeit solcher Recyclingprozesse stark einschränkt.

Die in der Studie geschätzten Galliummengen aus LEDs im EAG-Materialstrom in der Schweiz liegen im Bereich von einigen hundert Kilogramm. Allerdings enthalten LEDs weitere Rohstoffe wie Gold, Kupfer oder Zinn, deren Rückgewinnung wirtschaftlich attraktiv ist. So könnte eine Verbesserung in der Sammlung, Sortierung sowie Recyclingtechnologien die Rückgewinnung von Gallium aus LEDs in Kombination mit der Rückgewinnung anderer Elemente aus LEDs möglich machen.

5.2 Analyse der Recyclingkette von Antimon

5.2.1 Grundlage

Antimon in Kunststoffen

Antimon wird vor allem in Form von Antimontrioxid (Sb_2O_3 , ATO) als synergistischer Zusatzstoff in halogenbasierten Flammenschutzsystemen eingesetzt, insbesondere in Kunststoffen [37]. Während halogenierte Flammenschutzmittel allein nur eine begrenzte Wirkung zeigen, verdoppelt sich ihre Wirksamkeit in Kombination mit ATO typischerweise bei Mischungsverhältnissen von 1:3 bis 1:4 (ATO:Halogen) [37]. Diese Synergie ermöglicht es, den Einsatz von Halogenen zu reduzieren, ohne an FlammSchutzwirkung einzubüssen [37]. Die Rückgewinnung von Antimon ist daher eng mit der Verwertung von Kunststoffen verbunden, die halogenierte FlammSchutzmittel enthalten. Die Grenzwerte von Schwermetallen und FlammSchutzmitteln müssen eingehalten werden, um Kunststoffe oder Kunststoffgemische einer stofflichen Verwertung zuführen zu dürfen. Kunststoffe, die persistente organische Schadstoffe (POP) im Sinne des Stockholmer Übereinkommens enthalten – insbesondere polybromierte Diphenylether (PBDE) wie Tetra-, Penta-, Hexa-, Hepta- oder Decabromdiphenylether – sind so zu entsorgen, dass die enthaltenen POP zuverlässig und vollständig zerstört werden [38]. Dabei wird ebenfalls das in den Kunststoffen enthaltene Antimon in die thermische Verwertung geführt.

Schadstoff oder Wertstoff

Antimon selbst wird sowohl als potenzieller Schadstoff als auch als wertvolle Ressource betrachtet. Während Antimon und seine Trioxidform (ATO) im Verdacht stehen, gesundheitsschädlich und potenziell krebserregend zu sein, ist ATO derzeit nicht in Anhang II der EU-RoHS-Richtlinie³ als beschränkte Substanz eingestuft [37] [39] [40]. ATO wurde als möglicher Kandidat für eine zukünftige Regulierung geprüft, doch die jüngste Bewertung der EU (Dezember 2019) kam zu dem Schluss, dass zum damaligen Zeitpunkt keine Beschränkung im Rahmen der RoHS erforderlich sei [2] [3]. Eine Neubewertung in der Zukunft bleibt möglich [39]. Unter REACH⁴ ist die Verwendung von ATO nicht verboten, sondern reguliert, wobei eine ordnungsgemäße Kennzeichnung und vorsichtige Handhabung erforderlich sind [1][4]. Antimon ist gemäss der Basler Konvention als Schadstoff aufgeführt [42], und laut der EU-CLP-Verordnung⁵ werden Abfälle, die mehr als 0,1% ATO enthalten, als gefährlich eingestuft und müssen entsprechend behandelt werden [43], [44].

5.2.2 Globale Entwicklung & Trends

Im Jahr 2023 wurden 106'000 Tonnen Antimon produziert. China dominiert den Markt mit einem Anteil von fast 60% an der Gesamtproduktion, gefolgt von Tadschikistan mit etwa 16% und Russland mit rund 12%. Diese Zahlen verdeutlichen einen stark konzentrierten Markt, auf dem nur wenige Akteure den Grossteil des weltweiten Antimonangebots kontrollieren [45] (vgl. Abbildung 10).

³ Richtlinie 2011/65/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten

⁴ Regulation on the registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals

⁵ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen

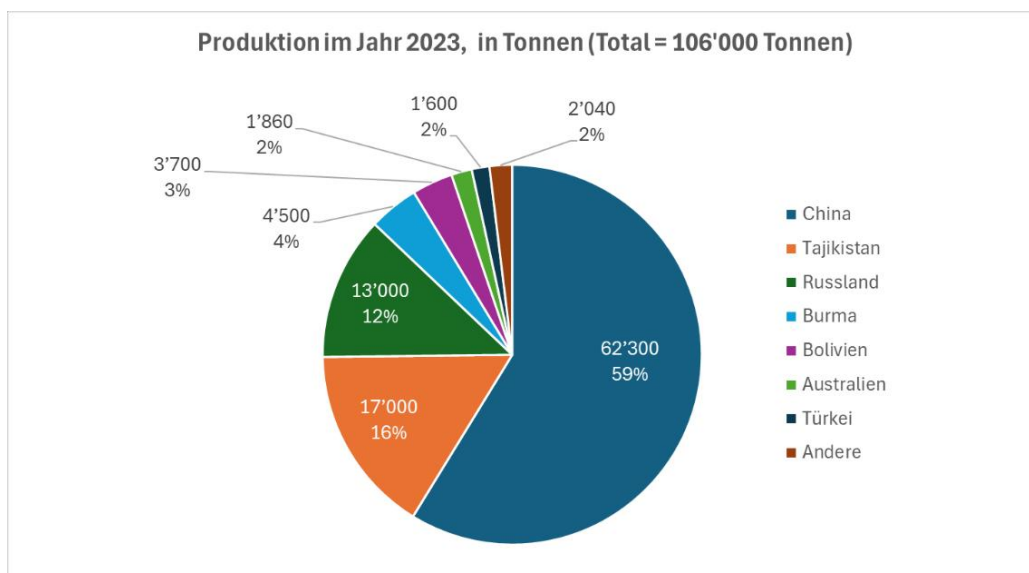


Abbildung 10: Produktion von Antimon im Jahr 2023, in Tonnen. Datenquelle: Mineral Commodity Summary 2024, USGS [46].

Auf der Nachfrageseite entfallen 43% des Antimonverbrauchs in der EU auf Flammenschutzmittel, gefolgt von Blei-Säure-Batterien (32%) und Bleilegierungen (14%) [47] (vgl. Tabelle 7). Es wird erwartet, dass die Verwendung von Antimon in Flammenschutzmitteln künftig weiter zunimmt [48]. Gemäss Campine und PINFA (Phosphorus, Inorganic and Nitrogen Flame Retardants Association) liegt der jährliche Verbrauch von ATO in Kombination mit Flammenschutzmitteln in Europa zwischen 10'000 und 20'000 Tonnen [37].

Tabelle 7: Verwendung von Antimon in der EU [47].

Anwendungen	Anteil	Einsatzbereich
Flammenschutzmittel	43%	Produktion von chemischen Produkten und Chemikalien
Bleisäurebatterien	32%	Produktion von Elektrogeräten
Bleilegierungen	14%	In der Metallverarbeitung (ausgenommen Maschinen und Geräte)
Plastics (Katalysatoren und Stabilisatoren)	6%	Produktion von chemischen Produkten und Chemikalien
Glas und Keramik	5%	Produktion von anderen nicht-metallischen mineralischen Produkten

Für die Zukunft wird ebenfalls mit einer Zunahme von Antimon in anderen Anwendungsbereichen gerechnet, z.B. in Solarglas zur Verbesserung optischer Eigenschaften, in Batterien für Elektrofahrzeuge und in Windkraftanlagen [47]. Darüber hinaus gelten auch digitale Speicheranwendungen (z. B. SIM-Karten), industrielle Automatisierung und Sensortechnologien als potenzielle Wachstumsfelder [47].

Ökonomische Entwicklungen

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass Antimon grösstenteils als Bestandteil eines Bauteils, Materials oder fertigen Produkts nach Europa respektive in die Schweiz gelangt. Als Antimonrohstoff wird das Element auf dem europäischen Zollmarkt mehrheitlich in drei Formen gehandelt: Rohantimon, Antimonerz und Antimonoxid. Die Preise für alle drei Formen zeigen ähnliche Muster (vgl. Tabelle 8). Im Jahr 2023 erreichte Rohantimon einen Preis von 11'059 Euro pro Tonne [49]. Dies entspricht einem Marktwert von ~2 Millionen Euro bei einem jährlichen Volumen von 184 Tonnen Antimon in den Schweizer EAG. Betrachtet man die europäischen Handelsdaten, so überwiegen die Importe deutlich gegenüber den Exporten, mit rund 20'000–25'000 Tonnen Importen gegenüber nur ~5'000 Tonnen Exporten [50] (vgl. Abbildung 11).

Tabelle 8: Durchschnittliche jährlich Preise für Rohantimon, Antimonerz und Antimonoxid auf dem Europäischen Zollmarkt in Euro/Tonne [49].

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
D-Last Price EU-Antimony ores [euros/ton]	4'790	3'093	5'958	7'498	6'491	7'407
D-Last Price EU-Antimony oxides [euros/ton]	6'082	5'180	7'722	10'923	10'188	10'095
D-Last Price EU-Powders of unwrought antimony [euros/ton]	6'002	4'955	8'783	12'396	10'892	11'059

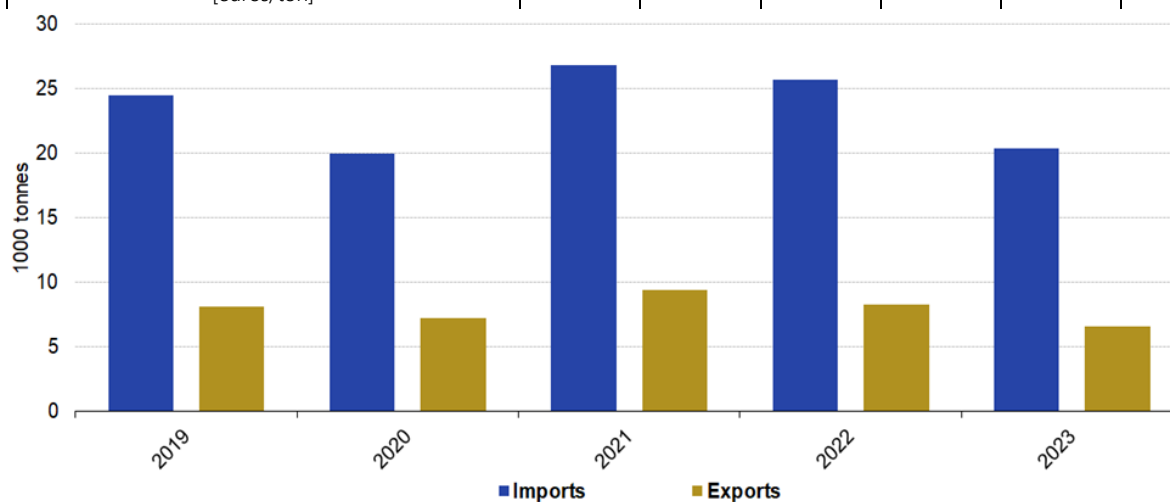


Abbildung 11: Europäische Importe und Exporte von Antimon in Kilotonnen. Quelle: Eurostat, 2024 [50].

Seit September 2024 sind die Antimonpreise aufgrund einer weltweiten Verknappung und chinesischer Exportkontrollen um 375% gestiegen. Dadurch stieg der Preis auf etwa 53'000 Euro pro Tonne [51]. Diese starken Preissteigerungen unterstreichen die wachsende Bedeutung von Antimon.

Reduktion und Substitution

Eine Reduktion von Antimon in EAG-Kunststoffen könnte dazu führen, dass grössere Mengen an Flammenschutzmitteln notwendig werden, um die gleiche Wirkung zu erzielen. Gleichzeitig könnte dies auch die Substitution durch halogenfreie Flammenschutzmittel fördern [37]. ATO-freie und halogenfreie Alternativen stehen zwar bereits zur Verfügung und kommen teilweise zum Einsatz, eignen sich jedoch nicht für alle Anwendungen. Besonders bei Stromkabeln, Adaptern und Displays fehlen bislang gleichwertige Ersatzstoffe [37].

Mögliche Entwicklungsszenarien

Neben der Suche nach Ersatzstoffen ist es wichtig, drei mögliche Zukunftsbilder im Blick zu behalten, die den Umgang mit Antimon und seine Rückgewinnung bestimmen könnten:

- **Fall A Senkung der Grenzwerte von halogenierten Flammschutzmittel**
Sollten die zulässigen Grenzwerte für halogenierte Flammschutzmittel weiter gesenkt werden, steigt der Aufwand für die Sortierung entsprechend an. Dies erschwert das Recycling insgesamt und könnte dazu führen, dass weniger Kunststoffe recycelt werden, da grössere Mengen von potenziell schadstoffhaltigen Kunststoffen aussortiert werden. Gleichzeitig könnte die dadurch zunehmende Masse schadstoffhaltiger (und potenziell antimonhaltiger) Kunststoffe das Interesse einer industriellen Lösung für die Rückgewinnung von Antimon, Brom und Kunststoff verstärken.
- **Fall B: Verbot von halogenierten Flammschutzmittel**
Ein Verbot halogenerter Flammschutzmittel würde auch die Verwendung von Antimon in EAG-Kunststoffen verringern. Dieser Effekt würde sich zwar erst mit zeitlicher Verzögerung im Abfallstrom bemerkbar machen, könnte jedoch das Interesse an Investitionen in Technologien zur industriellen Rückgewinnung von Antimon deutlich mindern. Anwendungen mit Ausnahmeregelungen würden jedoch weiterhin Antimon in den Abfallstrom einbringen.
- **Fall C: Erhöhte Nachfrage nach recycelten Kunststoffen**
Wenn Vorschriften einen höheren Einsatz von recycelten Kunststoffen verlangen, könnte dies sowohl die Nachfrage als auch den Preis für Rezyklate erhöhen. Dadurch gewinnt die Rückgewinnung von Kunststoffen aus kontaminierten Fraktionen an Bedeutung und eröffnet zugleich Möglichkeiten zur gemeinsamen Rückgewinnung von Antimon und Brom.

Direktes Recycling von antimonhaltigen Kunststoffen

Theoretisch wäre auch ein direktes Recycling antimonhaltiger Kunststoffe denkbar, ohne dass die einzelnen Stoffe – wie die Polymermatrix und Additive – voneinander getrennt werden müssen. In der Praxis ist dies jedoch schwierig, da Kunststoffe aus EAG sehr unterschiedlich zusammengesetzt sind und zahlreiche weitere Additive enthalten [52]. Dafür wäre im Vorfeld eine sehr gute Trennung in gleichartige Fraktionen mit stabiler und bekannter Zusammensetzung erforderlich – eine Anforderung, die heute in der Praxis schwer zu realisieren ist. Deshalb setzen Produzenten in der Regel lieber auf Primärkunststoffe oder auf schadstofffreie Sekundärkunststoffe, um die geforderten Qualitätsstandards für Materialien und Endprodukte sicherzustellen [52].

5.2.3 Mengen in der Schweiz

Um das Potenzial von antimonhaltigen Kunststoffen als sekundäre Rohstoffquelle zu bewerten, ist eine Abschätzung der in EAG-Kunststoffen enthaltenen Antimonmasse erforderlich. Da hierfür keine direkten Daten vorliegen, wird die Menge auf Basis verfügbarer Informationen nach drei verschiedenen Ansätzen hergeleitet.

- Die Gesamtmasse an EAG betrug im Jahr 2024 rund 135'200 Tonnen [53]. Davon entfallen etwa 25% [8] [9] bis 40% [56] auf Kunststoffe, entsprechend 34'000–54'000 Tonnen. Bromhaltige, flammgeschützte Kunststoffe machen etwa 33% bis 46% des Kunststoffanteils aus [57]. Unter der Annahme, dass Antimontrioxid (ATO) als Synergist in Konzentrationen von 2% bis 8% verwendet wird [37], ergibt sich schlussendlich eine geschätzte ATO-Menge von 220 bis 2000 Tonnen.
- Eine Bottom-up-Schätzung auf der Grundlage der gemessenen durchschnittlichen Sb-Konzentrationen in gesamten Elektro- und Elektronik-Altgeräten, die zwischen 954 mg/kg [58] bis 1'000 mg/kg [59] liegen, ergibt eine Gesamtmenge von ATO von ungefähr 129 – 135 Tonnen.
- Darüber hinaus wurde eine Schätzung auf Grundlage des angenommenen Gehalts an bromierten Flammenschutzmitteln (brominated flame retardants, BFR) in EAG-Kunststoffen vorgenommen. Gemäss einem Experteninterview befindet sich 1% – 2% Brom in EAG Kunststoffen, die als flammgeschützte Kunststoffe separiert wurden [60]. Ein Anteil von 33% bis 46% bromhaltiger Kunststoffe [57] am gesamten EAG Kunststoff entsprechen in der Schweiz im Jahr 2024 ungefähr 11'000-25'000 Tonnen. Der Bromanteil (1% - 2%) beträgt folglich 110 bis 500 Tonnen. Wird ein Mischungsverhältnissen von 1:3 (ATO:Halogen) [37] angenommen, beträgt die Masse an ATO 37-166 Tonnen im Jahr 2024.

Zusammengefasst lassen diese Schätzmethode darauf schliessen, dass EAG-Kunststoffe in der Schweiz mindestens 36 bis 220 Tonnen ATO enthalten.

Bei einem Antimon Gehalt von 83,58% in ATO (basierend auf der chemischen Zusammensetzung Sb_2O_3) entspricht dies etwa 30 bis 184 Tonnen elementarem Antimon, je nach Annahmen hinsichtlich der Kunststoffzusammensetzung, des Gehalts an Flammenschutzmitteln und der Sb-Konzentrationen.

Potenzial der Rückgewinnung von Antimon aus EAG-Kunststoffen

EAG-Kunststoffe können eine bedeutende sekundäre Quelle für Antimon sein. Eine mögliche Methode, die von Gaudin et al. (2025) beschrieben wird, beginnt mit der Sortierung der gesammelten und zerlegten EAG-Kunststoffe, um bromierte von nicht-bromierten Materialien zu trennen (vgl. Abbildung 12). Die bromierten Kunststoffe werden dann einem lösungsmittelbasierten Auflösungsprozess unterzogen. In diesem aufgelösten Zustand kann Antimon durch einen Flüssig-Flüssig-Extraktionsschritt selektiv extrahiert werden. Dies ermöglicht die Trennung von ATO-haltigen und ATO-freien Fraktionen. Das gelöste Polymer ohne ATO kann darauffolgend durch Ausfällung ohne Qualitätsverlust zurückgewonnen werden, was eine Wiederverwendung ermöglicht. Dieser kombinierte Prozess ermöglicht die Rückgewinnung von Antimon mit Ausbeuten von bis zu 98% als auch von Kunststoffen und Brom [61] [62].

Die Rückgewinnung von Antimon steht allerdings noch vor mehreren technischen Herausforderungen. Zunächst ist eine mechanische Trennung erforderlich, um die relevanten Kunststofffraktionen zu isolieren. Obwohl in der Industrie Sortiertechnologien wie Spektroskopie, dichte-basierte Trennung oder elektrostatische Trennung zum Einsatz kommen, macht die komplexe Materialzusammensetzung die Sortierung von EAG-Kunststoffen herausfordernd. EAG-Kunststoffe unterscheiden sich in Dichte, Masse und Materialeigenschaften und enthalten oft eine Vielzahl von Additiven wie Pigmente, Stabilisatoren und Flammschutzmittel. Diese Faktoren können insbesondere in

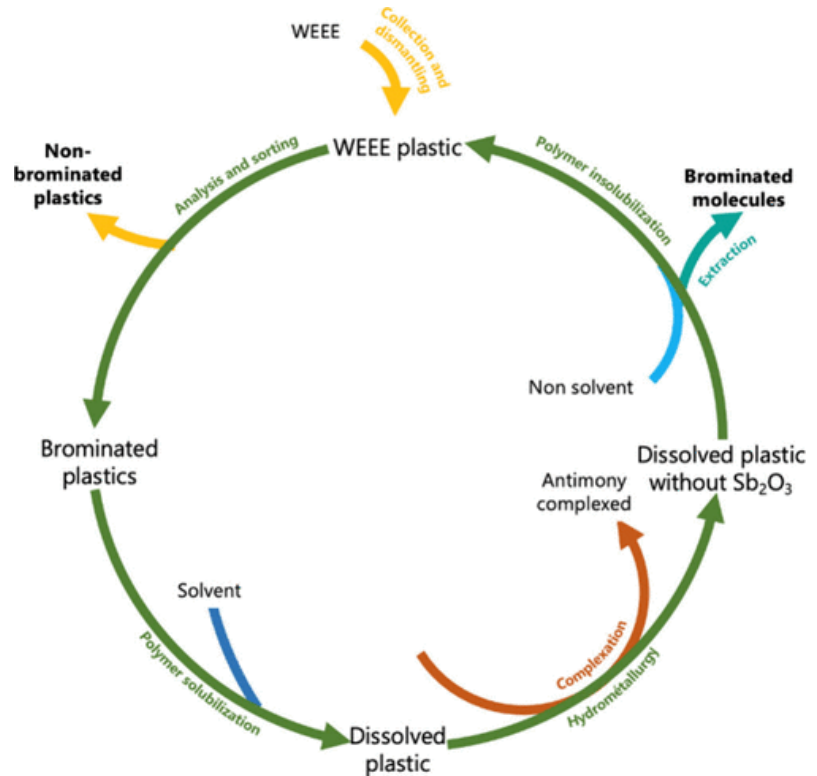


Abbildung 12: Kreislauf von Antimon aus Elektro- und Elektronikspektroskopischen Systemen zu Altgeräten aus Kunststoff. Quelle: Gaudin et al., 2025 [59].

einer falschen Identifizierung führen und erschweren die Sortierung in Fraktionen mit einer homogenen Zusammensetzung. Mehrere Projekte arbeiten an der Verbesserung der Antimongrückgewinnung. Das Projekt [Plast2BCleaned](#) entwickelt beispielsweise ein Verfahren zur Rückgewinnung von Antimontrioxid [62] (vgl. Abbildung 13). Das Verfahren löst den Kunststoff auf und nutzt anschliessend Zentrifugation zur Rückgewinnung von ATO und Heissfiltration zur Trennung des ABS-Polymers von der BFR-haltigen Fraktion. Die wesentliche Innovation dieses Verfahrens liegt in den zusätzlichen Trennschritten, die speziell für die Rückgewinnung von Additiven entwickelt wurden. In Tests mit Referenzproben wurde ATO mit hoher Ausbeute (>99%) und ausreichender Reinheit (>90% ATO, <0,1% Brom) zurückgewonnen [62]. Die Wiederverwendung von ATO ist bereits bei Reinheitsgraden von lediglich 80% möglich [34]. Für den Einsatz in qualitätsanspruchsvolleren Anwendungen sind jedoch weitere Behandlungsschritte, insbesondere thermischer Art, erforderlich [60]. Derzeit existiert eine Pilotanlage im Labormassstab, in der das Verfahren mit gut sortierten Referenzproben erfolgreich erprobt wurde. Die Übertragung auf Industrieebene sowie die Untersuchung der Leistungsfähigkeit unter realen Bedingungen stehen noch aus [62]. Um den Prozess im industriellen Massstab finanziell attraktiv betreiben zu können ist eine Mindestmenge von etwa 5'000 Tonnen pro Jahr an Sb-haltigen Kunststoffabfällen erforderlich, idealerweise bis zu 10'000 Tonnen [34].



Abbildung 13: Prozessübersicht für die Rückgewinnung von ATO, ABS und BFR. Quelle: Plast2bCleaned, 2020 [54].

5.2.4 Schlussfolgerungen Antimon

Antimon tritt aufgrund seiner verstärkenden Wirkung der Flammschutzmittel vor allem in flammenschutzhaltigen EAG-Kunststoffen auf, typischerweise in Form von Antimontrioxid (ATO). Die Rückgewinnung aus EAG muss deswegen zusammen mit halogenierten Flammschutzmitteln betrachtet werden. Berechnungen zufolge liegt die jährliche Menge an ATO in EAG-Kunststoffen in der Schweiz zwischen 36 und 220 Tonnen, dies entspricht 30 bis 184 Tonnen elementarem Antimon. Technologien zur Rückgewinnung von Antimon existieren im Pilotmassstab, insbesondere bei ABS-Kunststoffen, sind jedoch erst ab einer Inputmenge von mindestens 5'000 Tonnen an Sb-haltigen Kunststoffabfallströmen, vorzugsweise über 10'000 Tonnen, wirtschaftlich rentabel. Da in der Schweiz etwa 10'000-23'000 Tonnen solcher Kunststoffe aus EAG anfallen, scheint dies zumindest prinzipiell erreichbar. Eine grosse technische Herausforderung ist die zuverlässige Vorsortierung der relevanten Kunststofffraktionen. Rückgewinnungsprozesse können jedoch durch die gleichzeitige Rückgewinnung von Brom und ABS sowie durch einen Beitrag zu höheren Recyclingquoten einen Mehrwert schaffen. Mit Blick auf die Zukunft dürften die steigende Nachfrage, steigende Preise und mögliche regulatorische Änderungen sowohl das Vorkommen von Antimon in EAG-Kunststoffen als auch die Anreize für dessen Rückgewinnung beeinflussen.

In Experteninterviews wurde der derzeitige Aufbau einer industriellen Lösung durch die Firma Campine erwähnt. Es wird empfohlen die Entwicklung der industriellen Lösung im Auge zu behalten, um als Recycler, Rücknahmesystem (oder engl. "Producer Responsibility Organisation (PRO)") oder Behörde entsprechende Massnahmen zu ergreifen, sollte eine solche Behandlung zur Rückgewinnung von Sb möglich werden.

6 Ausblick

Der Zugang zu seltenen Technologiemetallen wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen, daher ist es wichtig, mögliche Veränderungen der globalen, technischen, und sozialen Rahmenbedingungen zu antizipieren. Eine systemische Sichtweise und Analyse der Recyclingpotentiale von in der Schweiz anfallenden Abfallströmen kann dabei unterstützen. Dieses Projekt hat gezeigt, dass eine Vielzahl von Elementen prinzipiell von ökologischem, technischem und strategischem Interesse sind, aber auch, dass es Hürden für deren Rückgewinnung gibt.

Die detaillierte Analyse von Gallium in LED zeigte auf, dass für eine Rückgewinnung aufgrund zu kleiner Mengen und tiefer Preise zurzeit nicht sinnvoll erscheint. Gallium wird aber in zunehmenden Mengen in der Leistungselektronik eingesetzt, zum Beispiel in Invertern für PV-Anlagen, wodurch der Bedarf an Ga voraussichtlich weiter steigen wird und Rückgewinnungsmöglichkeiten wichtiger werden könnten (vgl. Kapitel 5.1.4).

Für Antimon in Kunststoffen aus EAG zeigte die Analyse, dass entsprechende Mengen vorhanden sind und dass steigende Nachfrage, höhere Preise sowie mögliche regulatorische Änderungen sowohl das Vorkommen von Antimon in EAG-Kunststoffen als auch die Anreize zu dessen Rückgewinnung beeinflussen werden. Dadurch könnten sich künftig industrielle Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Antimon ergeben.

Da sich die Bedingungen für die Rückgewinnung seltener Technologiemetalle durch äussere Einflüsse, technologische Innovationen, und regulatorische Rahmenbedingungen dynamisch verändern, wird es in Zukunft wichtig sein, verschiedene Szenarien für die Potenziale der Rückgewinnung für Materialien aus EAG detaillierter zu untersuchen. Dafür gilt es die sich permanent verändernden Gegebenheiten zu verfolgen und mit «Was wäre, wenn...» Szenarien mögliche Entwicklungen und Interventionsstrategien zu erarbeiten.

Die Analyse zu Gallium und Antimon hat ebenfalls aufgezeigt, dass es eine isolierte Betrachtung einzelner Elemente nur bedingt zielführend ist. EAG Abfallströme bestehen aus komplexen und vielseitigen Materialien. Die Rückgewinnung einzelner Elemente daraus kann in bestimmten Fällen sinnvoll sein, das Recycling von Materialien im Verbund (zum Beispiel Legierungen) oder auch die Weiterverwendung von Komponenten könnte aber in vielen Fällen ökologisch, ökonomisch und technisch sinnvoller sein. Die Qualität und Nachfrage der zurückgewonnenen Materialien ist dabei ausschlaggebend für die weitere Verwendung, das Marktpotential und den ökologischen Nutzen. Weitere Untersuchungen mit dynamischen Modellen können geeignete Interventionen identifizieren, die die Ressourceneffizienz erhöhen und die Umweltbelastung der Schweiz reduzieren können.

7 Anhang

7.1 Anwendung Filter 3: Massen und Umweltrelevanz

Tabelle 9: Anwendung des Filters 3 für die Ermittlung der 10 Elemente mit der höchsten Massen- und Umweltrelevanz (ausgenommen sind die fünf STM, die in der VREG erwähnt werden). Rot markiert sind jeweils Werte, die auf Herleitungen beruhen.

Datenquelle 'Masse in Schweizer EAG': Schwarze Zahlen: Prosum - waste generated in Switzerland, Referenzjahr 2015, www.urbanmineplatform.eu; Rote Zahlen: hergeleitet, entnommen aus Tabelle 10.

Datenquelle 'Umweltbelastung': Entnommen aus Tabelle 11.

Ordnungs- zahl	Name	Kürzel	In VREG erwähnt	Masse in Schweizer EAG [kg]	Umwelt- belastung [UBP/kg]	Masse x UBP [UBP]	Filter 3 Massen und Umweltrelevanz
28	Nickel	Ni		938989	57639	54122285091	x
12	Magnesium	Mg		458697	91642	42035780204	x
51	Antimon	Sb		271196	149626	40578104768	x
25	Mangan	Mn		744695	21412	15945735781	x
22	Titan	Ti		288766	44954	12981236144	x
14	Silicium	Si		25272	229446	5798564872	x
64	Gadolinium	Gd		6514	399468	2602134422	x
60	Neodym	Nd	x	16560	134499	2227300492	
74	Wolfram	W		51951	23237	1207186010	x
38	Strontium	Sr		168043	6770	1137626643	x
73	Tantal	Ta	x	1699	607372	1031758990	
5	Bor (Boron)	B		143490	5444	781134252	x
71	Lutetium	Lu		26	20384895	530007270	
49	Indium	In	x	762	687397	523686702	
59	Praseodym	Pr		2190	186165	407620511	
41	Niob	Nb		6063	45952	278605636	
39	Yttrium	Y		1139	120065	136754217	
68	Erbium	Er		122	683265	83618001	
3	Beryllium	Be		51	1502072	76697314	
33	Arsen	As		421	112401	47274340	
31	Gallium	Ga	x	148	308318	45527431	
62	Samarium	Sm		340	89013	30246261	
21	Scandium	Sc		8	2838812	23999317	
57	Lanthan	La		291	81775	23769416	
23	Vanadium	V		51	277008	13993612	
58	Cer (cerium)	Ce		436	24688	10764906	
66	Dysprosium	Dy		1260	4840	6098823	
2	Lithium	Li		22	106543	2341181	

32	Germanium	Ge	x	22	87229	1949919	
65	Terbium	Tb		141	12456	1762423	
67	Holmium	Ho		1	1248093	812509	
63	Europium	Eu		80	3878	310542	
83	Bismut	Bi		152	1086	164582	
72	Hafnium	Hf		194	839	162685	
69	Thulium	Tm		0	5446496	0	
70	Ytterbium	Yb		0	278150	0	
56	Barium	Ba		0	3166	0	

7.1.1 Herleitung der Masse im CH-EAG Strom von Elementen

Die folgenden Elemente sind nicht in der Prosum-Datenbank aufgeführt. Ihre jährlichen Massen im CH EAG wurden auf Basis der weltweiten jährlichen Fördermenge, des prozentualen Anteils ihrer Anwendung in elektrischen und elektronischen Geräten sowie des Schweizer Anteils an der weltweiten jährlichen EAG-Masse geschätzt.

Im Jahr 2022 wird von einer weltweiten EAG-Masse von 62'000'000 Tonnen ausgegangen [63]. In der Schweiz betrug die Jahresmasse von EAG 204'000 Tonnen im Jahr 2022 [63], was einem Anteil von 0.33% an der weltweiten EAG-Masse entspricht. Dieser Anteil wird mit der jährlich geförderten und in elektronischen und elektrischen Geräten eingesetzten Masse des jeweiligen STMs verrechnet, wodurch sich eine grobe Abschätzung der entsprechenden STM-Masse im Schweizer EAG-Strom machen lässt. Die Zahlen sind nur als Richtwerte zu betrachten.

Ein besonderer Fall ist Silizium-Metall, da die starke und wachsende Nachfrage nach Photovoltaikanlagen (PV) sowie deren lange Lebensdauer bei der herkömmlichen Herleitung zu einer Fehleinschätzung der Silizium-Masse im Schweizer EAG führen würde. Daher wurde die Masse von Silizium-Metall in CH EAG auf Grundlage des Abfallstroms von PV-Anlagen (936 Tonnen PV in CH EAG im Jahr 2022 [13]) und der Zusammensetzung der PV-Module (Si-Anteil in den Zellen: 2,7% der Gesamtmasse eines PV-Panels [14]) geschätzt.

Tabelle 10: Herleitung der jährlich geschätzten Masse von STM im CH EAG-Strom.

Datenquelle 'Weltweite jährliche Förderung' und 'Anwendungen': Entnommen aus den Faktenblätter des SCREEN-Projekts [64]

Datenquelle 'Geschätzte Masse im CH-EAG Strom': Anteil der Schweiz an der weltweiten EAG Masse im Jahr 2022, betrug 0.33% [63]

Element	Weltweite jährlich Förderung [t/Jahr]	Anwendungen (In blau sind die %-Anteile die zu 'elektrischen und elektronischen Geräten' gezählt wurden)	Schlussfolgerung %-Anteil in elektrischen und elektronischen Geräten	Abgeleitete jährlich eingesetzte Masse in elektrischen und elektronischen Geräten (weltweit) [kg/Jahr]	Geschätzte Masse im CH-EAG Strom [kg/Jahr]
Barium	8'986'197	60% Weighting agent in oil and gas well drilling fluids or "muds", 30% Fillers in rubbers, plastics, paints and paper, 10% Chemicals	0%	0,00	0,00
Bor (Boron)	1'090'241	55% Glass, 17% Frits and Ceramics, 15% Fertilizers, 4% Chemical manufacturs, 4% Construction materials, 4% Metals	4%	43'609.64	143.91
Gadolinium	1'974	10% Magnets, 40% MRI, 10% Metal (excl. Batteries), 40% others	60%	1'184.40	3.91
Hafnium	71	61% Superalloys, 15% Plasma cutting tips , 11% Nuclear control rods, 7% Catalyst Precursor , 3% Oxide for opitcal	83%	58,93	0.19
Lutetium	15,49	1% Lightning, 99% others – according to Wikipedia: Oil refineries, Elektronik, Leuchtmittel, specialized equipment, Medizinische Anwendung	50% (Estimation)	7.75	0.03
Thulium	15,44	100% Ceramics	0%	0.15	0.00
Titan	194'455	45% Aerospace, 25% Medical equipment, 10% Automotive, 10% Hand held objects , 5% Plant engineering, 5% Nuclear heat exchanger	45%	87'504.75	288.77
Ytterbium	5'133	100% Ceramics	0%	0	0
Silizium-Metall	-	2.7% Si in den Zellen (100% = gesamtes PV Panel) [14]	-	936'000 [13]	25272

7.1.2 Umweltbelastung

Tabelle 11: Ermittlung der Umweltbelastungspunkte der Primärproduktion von STM. Rot: Fehlende Datensätze. Die Herleitungen sind im Annex 7.1.3 erläutert.

Ordnungs- zahl	Name		Ecoinvent Database Cut-off, ecological scarcity factor		UVEK Database Cut-off, ecological scarcity factor 2021		Durchschnitt: Umweltbelastungs- punkte [UBP / kg]
			Name Datensatz	Umwelt- belastung [UBP/kg]	Name Datensatz	Umwelt- belastung [UBP/kg]	
51	Antimon	Sb	Antimony {GLO} market for Cut-off, S	236871	antimony, at refinery/kg/CN	62382	149626
33	Arsen	As	Arsine {GLO} market for Cut-off, S	107556	Arsine, at plant/GLO U	117246	112401
56	Barium	Ba	Barium oxide {GLO} market for barium oxide Cut-off, S	6006	Barite, at plant/RER U	325	3166
3	Beryllium	Be	Beryllium {GLO} market for beryllium Cut-off, S	1502072			1502072
83	Bismut	Bi	Hergeleitet	1086			1086
5	Bor (Boron)	B	Boric oxide {GLO} market for Cut-off, S	6544	Boric oxide, at plant/GLO U	4344	5444
58	Cer (cerium)	Ce	Cerium oxide {GLO} market for cerium oxide Cut-off, S	33281	Cerium concentrate, 60% cerium oxide, at plant/CN U	16095	24688
66	Dysprosiu m	Dy	Dysprosium oxide {GLO} market for dysprosium oxide Cut-off, S	4840		4840	4840
68	Erbium	Er	Erbium oxide {GLO} market for erbium oxide Cut-off, S	683265		683265	683265
63	Europium	Eu	Europium oxide {GLO} market for europium oxide Cut-off, S	3878		3878	3878
64	Gadoliniu m	Gd	Gadolinium oxide {GLO} market for gadolinium oxide Cut-off, S	399468		399468	399468
31	Gallium	Ga	Gallium, semiconductor-grade {GLO} market for Cut-off, S	290493	Gallium, semiconductor- grade, at plant/GLO U	326142	308318
32	Germaniu m	Ge	Hergeleitet	87229			87229
72	Hafnium	Hf	Hergeleitet	839			839
67	Holmium	Ho	Holmium oxide {GLO} market for holmium oxide Cut-off, S	1248093			1248093
49	Indium	In	Indium {GLO} market for Cut-off, S	475848	Indium, at regional storage/RER U	898946	687397
57	Lanthan	La	Lanthanum oxide {GLO} market for Cut-off, S	145821	Lanthanum oxide, at plant/CN U	17730	81775
2	Lithium	Li	Lithium {GLO} market for Cut-off, S	178055	Lithium, at plant/GLO U	35032	106543
71	Lutetium	Lu	Lutetium oxide {GLO} market for Cut-off, S	20384895			20384895
12	Magnesi m	Mg	Magnesium {GLO} market for Cut-off, S	100236	Magnesium, at plant/RER U	83047	91642
25	Mangan	Mn	Manganese {GLO} market for Cut-off, S	42772	Manganese concentrate, at beneficiation/GLO U	53	21412
60	Neodym	Nd	Neodymium oxide {GLO} market for Cut-off, S	204771	Neodymium oxide, at plant/CN U	64227	134499
28	Nickel	Ni	Nickel, class 1 {GLO} market for nickel, class 1 Cut-off, S	71819	Nickel, 99.5%, at plant/GLO U	43459	57639
41	Niob	Nb	Ferroniobium, 66% Nb {GLO} market for ferroniobium, 66% Nb Cut-off, S	45952			45952
59	Praseody m	Pr	Praseodymium oxide {GLO} market for Cut-off, S	303595	Praseodymium oxide, at plant/CN U	68734	186165

62	Samarium	Sm	Samarium oxide {GLO} market for samarium oxide Cut-off, S	89013			89013
21	Scandium	Sc	Scandium oxide {GLO} market for scandium oxide Cut-off, S	2838812			2838812
14	Silicium	Si	Silicon, electronics grade {GLO} market for Cut-off, S	133634	silicon, electronic grade, at plant/kg/CN U	325258	229446
38	Strontium	Sr	Strontium carbonate {GLO} market for Cut-off, S	6770			6770
73	Tantal	Ta	Tantalum powder, capacitor-grade {GLO} market for tantalum powder, capacitor-grade Cut-off, S	653854	Tantalum, powder, capacitor-grade, at regional storage/GLO U	560891	607372
65	Terbium	Tb	Terbium oxide {GLO} market for terbium oxide Cut-off, S	12456			12456
69	Thulium	Tm	Thulium oxide {GLO} market for thulium oxide Cut-off, S	5446496			5446496
22	Titan	Ti	Titanium {GLO} market for titanium Cut-off, S	81449	Titanium dioxide, production mix, at plant/RER U	8459	44954
23	Vanadium	V	Hergeleitet	277008			277008
74	Wolfram	W	Tungsten carbide powder {CN} tungsten carbide powder production Cut-off, S	23237			23237
70	Ytterbium	Yb	Ytterbium oxide {GLO} market for ytterbium oxide Cut-off, S	278150			278150
39	Yttrium	Y	Yttrium oxide {GLO} market for yttrium oxide Cut-off, S	120065			120065

7.1.3 Herleitungen

Bismuth

Für die Herleitung des Datensatzes wird auf die ergänzenden Informationen der Studie von Nuss und Eckelman (2014) Bezug genommen [65] (vgl. Tabelle 12). Nuss und Eckelman berechnen einen Allokationsfaktor von 0.03% von Bismuth als Nebenprodukt des Blei- und Zinkabbaus. Tabelle 13 weist die berechneten UBPs von Blei, Zink, Silber, Indium und Germanium auf.

Tabelle 12: Bestimmung des Allokationsfaktors von Bismuth als Nebenprodukt des Blei- und Zinkabbaus (Nuss und Eckelman (2014)).

Product	Amount (metric tons)	Allocation (Canadian sustainability report [66])		Allocation [67] (verwendet in der Studie von Nuss und Eckelman)	
		Allocation (%)	Price (\$/kg)	Allocation (%)	Price (\$/kg)
Lead	84'300	13.67	0.89	14.81	2.26
Zinc	296'000	56.71	1.05	59.06	2.57
Silver	590.97	23.25	215.09	22.11	481.36
Bismuth	18	0.02	7.10	0.03	21.12
Indium	30	3.48	634.00	1.62	692.60
Germanium	26.1	2.86	600.00	2.38	1172.00

Tabelle 13: Allokationsfaktoren nach Nuss und Eckelman (2014) und berechnete UBPs der Metalle Blei, Zink, Silber, Indium und Germanium.

Element	Allokationsfaktor gemäss Nuss und Eckelmann (2014) [%]	UBPs
Lead	14.81	9125
Zinc	59.06	11192
Silver	22.11	3063140
Indium	1.62	475848
Germanium	2.38	58153
Total	99.98	3617459

Die Summe der UBPs beträgt 3617459 und deckt 99.98%. Das entspricht einem fehlenden Deckungsgrad von 0.02% für Bismuth. Die Ungenauigkeit zum Allokationsfaktor von 0.03% für Bismuth basiert wahrscheinlich auf Rundungen. Für unsere Berechnungen verwenden wir den höheren Prozentsatz von 0.03%. Nach der untenstehenden Gleichung werden die UBPs für Bismuth berechnet.

$$UBP_{Bi} = UBP_{Pb,Zn,Ag,In,Ge} \frac{AF_{Bi}}{AF_{Pb,Zn,Ag,In,Ge}}$$

UBP: Umweltbelastungspunkte

AF: Allokationsfaktor

Daraus resultieren ein Total von 1086 UBPs (gerundet) für Bismuth.

Germanium

Tabelle 14 führt die Berechnungen des ökonomischen Allokationsfaktor nach Nuss und Eckelman (2014) auf. Für Germanium resultiert ein Allokationsfaktor von 0.03%. Dieser wird auf die UBP der Zink-, Cadmium- und Indiumherstellung angewendet, woraus drei unterschiedliche Datensätze für Germanium resultieren (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 14: Relevante Grössen für die Berechnung des Allokationsfaktors der Zinkproduktion von Nuss und Eckelman[65] basierend auf [68].

(B)

Metal	Quantity [kg]	Metal Content [%]	Metal output (Quantity x Metal content) [kg]	Mass allocation [%]	\$/kg	Value contained in \$	Economic allocation [%]	Previous
Zn	1	100.00%	1	99.84%	2.57	2.57	99.85%	99.86%
Cd	0.00338	45.00%	0.001521	0.15%	0.47 ¹	0.0007	0.03%	-
In	0.34	0.01%	0.000034	0.003%	69.26 ¹	0.0024	0.09%	0.14%
Ge		0.0017%	0.00000578	0.001%	117.20 ¹	0.0007	0.03%	

¹Following (Classen et al., 2009), 10% of the metal price is taken to estimate the residue values.

Aufgrund der ähnlichen ökonomischen Allokationsfaktoren von Germanium, Indium und Cadmium, wird die Annahme getroffen, dass die UBPs von Germanium dem Bereich der UBPs von Indium und

Cadmium entsprechen. Basierend auf dieser Annahme wird der Durchschnittswert der beiden Datensätze B und C verwendet.

Tabelle 15: Berechnung des Datensatzes von Germanium basierend auf den UBP von Indium und Cadmium und den respektiven ökonomischen Allokationsfaktoren nach Nuss und Eckelman (2014).

Wirkungskategorie	UBP [Pt]
Indium {GLO} market for Cut-off, S (0.09%)	475848.4
UBP Germanium (0.03%) berechnet nach UBP Indium (3:1)	158616.1
Cadmium {GLO} market for Cut-off, S (0.03%)	15842.03
UBP Germanium (0.03%) berechnet nach UBP Cadmium (1:1)	15842.03
Durchschnittswert der UBP von Germanium [UBP/kg]	87229

Hafnium

Hafnium ist ein Nebenprodukt von Zirkonium und in Zirkon in Konzentrationen von weltweit etwa 2% des Zirkoniumgehalts vorhanden [69].

Die Herleitung des Datensatzes basiert auf dem Ansatz von Nuss und Eckelman (2014) [56]. Diese stützen sich auf einen Allokationsfaktor von 13% für Hafnium und 87% für Zirkonium (vgl. Tabelle 16). Daraus lassen sich die UBP von Zirkonium und Hafnium berechnen (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 16: Angewendete Allokationsfaktoren der Metallproduktion von Zirkoniumoxid für Zirkonium und Hafnium [65].

	Amount (kg)	Value (\$/kg)	Allocation factor
Zirconium metal	0.98	40.4	0.87
Hafnium metal	0.02	299.8	0.13

Tabelle 17: Berechnung der UBP von Hafnium (und Zirkonium) basierend auf dem verfügbarem Datensatz zu Zirkoniumoxid und dem Allokationsfaktor von 0.13 (0.87).

Wirkungskategorie	UBP [Pt]
Zirconium oxid	6454
Zirconium	5615
Hafnium	839

Vanadium

Vanadium ist zwar weltweit verbreitet, aber in sehr geringen Konzentrationen und vanadium-reiche Erze sind selten zu finden [70]. Der Grossteil der weltweiten Vanadiumproduktion wird als Neben- oder Co-produkt bei der Verarbeitung von Eisen-, Titan- und Uranerzen gewonnen und in geringerem Masse auch aus Phosphat-, Bauxit- und Chromerzen, verbrauchten Katalysatoren und Asche, Rauch oder Koks aus der Verbrennung oder Raffination von Erdöl [71].

Das weitverbreitete Vorkommen und unzureichende Datengrundlage, machen eine Herleitung wie in den vorherigen Fällen nicht möglich. Nach Nuss und Eckelman (2014) besitzt Vanadium ein

ähnliches Global Warming Potential wie Tellurium, Gadolinium, Praseodym, Neodym, Erbium und Selen. Es wird angenommen, dass analog dazu die UBP in einem ähnlichen Rahmen sind. Entsprechend wird für eine Einschätzung der UBP von Vanadium, der Durchschnittswert der UBPs dieser 6 Metalle verwendet. Dieser entspricht 277'008 UBP.

7.2 Pro- / Kontra-Analyse zur Elementauswahl

Name	Pro	Kontra
Silicium (metallisch)	Besonders interessant für Solarzellen, höchste Bewertung bei Umwelt × Masse	Geringe Bewertung beim Versorgungsrisiko
Nickel	Hohe Masse, möglicherweise bereits rückgewonnen? Vielfältige Anwendungen	Geringes Versorgungsrisiko
Magnesium	Masstechnisch interessant, hohes Versorgungsrisiko, hohe Masse, mittlere Umweltbelastung	Bereits relativ hohe Rückgewinnungsrate, kommt hauptsächlich im Transportsektor vor
Antimon	Hohe Bewertung (Masse & Umwelt)	Relativ hohe Rückgewinnungsrate, mittleres Versorgungsrisiko
Titan	Hohe Bewertung bei Umwelt × Masse	Geringes Versorgungsrisiko, mittlere Umweltbelastung. Spezialausrüstung nötig, sinnvoller bei gezielter Rückgewinnung. Unklar, was mit medizinischer Ausrüstung passiert. Schwer auffindbar?
Neodym	Leicht auffindbar, viele verfügbare Informationen, Magnete könnten interessant für weitergehende Rückgewinnung sein (nicht nur Neodym)	Bereits eine Studie von Empa vorhanden
Wolfram	–	Geringes Versorgungsrisiko, relativ hohe Recyclingrate, militärisches Interesse
Strontium	Magnete	Katalysatoren → künftige Bedeutung? Wo sonst ist es auffindbar?
Tantal	Hohe Umweltbelastung, im Schweizer Recht erwähnt	Geringes Versorgungsrisiko, geringe Masse
Gadolinium	–	Geringe bzw. unbekannte Masse
Mangan	Masstechnisch relativ hoch, ökologisch interessant, mittlere Umweltbelastung	Geringes Versorgungsrisiko
Bor	–	Geringe Anwendung in Elektro- und Elektronikgeräten (EEE), vergleichsweise niedrige Bewertung Umwelt × Masse
Indium	Leicht auffindbar	Bereits eine Studie von Empa vorhanden
Gallium	Könnte interessant sein → Halbleiter, Inverter (Galliumarsenid), höchste Risikobewertung, wichtig für zukünftige Anwendungen	Vergleichsweise geringe Bewertung bei Umwelt × Masse
Germanium	Könnte interessant sein → Halbleiter, möglicherweise häufig in Computern	Geringe Bewertung bei Masse & Umweltbelastung

7.3 Literaturverzeichnis

- [1] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), *Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, SN EN 50625-1:2014, 2014.
- [2] European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs., *Study on the critical raw materials for the EU 2023: final report*. LU: Publications Office, 2023. Zugegriffen: 27. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>
- [3] „Prosum Datenbank“, Urbanmineplatform. [Online]. Verfügbar unter: www.urbanmineplatform.eu
- [4] „An EU critical raw materials act for the future of EU supply chains“, European Council - Council of the European Union. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/critical-raw-materials/>
- [5] European Commission. Joint Research Centre., *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study*. LU: Publications Office, 2023. Zugegriffen: 21. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/386650>
- [6] „Rare Earth Elements, Factsheets Updates based on the EU Factsheets 2020“, SCRREEN, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCRREEN2_factsheets_REE-EUROSTAT.pdf
- [7] „Antimony, Factsheets Updates based on the EU Factsheets 2020“, SCRREEN, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCRREEN2_factsheets_ANTIMONY-update.pdf
- [8] „FACTSHEETS UPDATES BASED ON THE EU FACTSHEETS 2020, SILICON METAL“, SCRREEN. [Online]. Verfügbar unter: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCRREEN2_factsheets_SILICON_METAL-update.pdf
- [9] „Tantalum Factsheets Updates based on the EU Factsheets 2020“, SCRREEN, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCRREEN2_factsheets_TANTALUM-update.pdf
- [10] „Gallium Factsheets Updates based on the EU Factsheets 2020“, SCRREEN, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/09/SCRREEN2_factsheets_GALLIUM.pdf
- [11] „Magnesium Factsheets Updates based on the EU Factsheets 2020“, SCRREEN, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://screen.eu/wp-content/uploads/2024/02/SCRREEN2_factsheets_MAGNESIUM_update.pdf
- [12] „Indium Factsheets Updates based on the EU Factsheets 2020“, SCRREEN, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCRREEN2_factsheets_INDIUM-update-.pdf
- [13] SENS eRecycling, „Advance recycling fee: This is how recycling PV modules is financed“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.erecycling.ch/privatpersonen/blog/pv-finanzierung.html>
- [14] Simon Philipps, „PhotovoltaicsReport“. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 29 May 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>; <https://www.erecycling.ch/en/wissenswertes/wissensblog/pv-finanzierung.html>

- [15] „Commodity Statistics and Information“, USGS. Zugegriffen: 7. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information>
- [16] Heinz Böni u. a., „Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym“, Empa, 2015.
- [17] Quest Metals, „Where is Gallium sourced and how is it extracted?“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.questmetals.com/blog/where-is-gallium-sourced-and-how-is-it-extracted>
- [18] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, „Supply and Demand of Lithium and Gallium“, BGR, Hannover, 2016.
- [19] H. U. Sverdrup und H. V. Haraldsson, „Gallium: Assessing the long term future extraction, supply, recycling and price of using WORLD7, in relation to future technology visions in the European Union“, 25. November 2024, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-5390312/v1.
- [20] United States Geological Service (USGS), „Mineral Commodity Summaries 2024“, 2024, [Online]. Verfügbar unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-gallium.pdf>
- [21] H. Song, C. Wang, B. Sen, und G. Liu, „China Factor: Exploring the Byproduct and Host Metal Dynamics for Gallium–Aluminum in a Global Green Transition“, *Environ. Sci. Technol.*, Bd. 56, Nr. 4, S. 2699–2708, Feb. 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c04784.
- [22] DailyMetalPrices, „DailyMetalPrices“, Gallium Prices. Zugegriffen: 3. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=ga&u=kg&d=240>
- [23] Reuters, „China bans export of critical minerals to US as trade tensions escalate“, 3. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reuters.com/markets/commodities/china-bans-exports-gallium-germanium-antimony-us-2024-12-03/>
- [24] H. Luo, Xiaohan Wu, und Tai-Yuan Huang, „Life cycle assessment for primary gallium production at industrial-scale“, Juni 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02492-1>.
- [25] Ecoinvent 3.11, „Gallium High Grade (GLO)“. 2024.
- [26] S. Mir, A. Vaishampayan, und N. Dhawan, „A Review on Recycling of End-of-Life Light-Emitting Diodes for Metal Recovery“, *JOM*, Bd. 74, Nr. 2, S. 599–611, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11837-021-05043-9.
- [27] P. Saez, E. Diez, und M. Gomez, „Sorberent selection for the recovery of gallium and indium from aqueous solutions: a sustainable approach to the recovery of strategic metals from LED lamps“, Bd. *Environ Sci Pollut Res*, Nr. 31, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34942-y>.
- [28] L. Liu, „LCA of rare earth and critical metal recovery and replacement decisions for commercial lighting waste management“, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104846>.
- [29] „Gallium-Recycling: Pilotprojekt in Sachsen gestartet“, *Recycling Magazin*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.recyclingmagazin.de/2025/09/23/gallium-recycling-pilotprojekt-in-sachsen-gestartet/?utm_source=RMNL%5F250926
- [30] Bundesamt für Energie (BFE), „Faktenblatt: Lichtmarkt Schweiz 2020“, Bern, Dez. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/69441.pdf>
- [31] „LED-Leuchtmittel“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/LED-Leuchtmittel>
- [32] R. P. Oliveira, Bothelo Junior, A.B., und Espinosa, D.C.R, „Characterization of Wasted LEDs from Tubular Lamps Focused on Recycling Process by Hydrometallurgy.“, *Energy Technol. 2020 Recycl. Carbon Dioxide Manag. Technol.*, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-36830-2_30.

- [33] M. P. Cenci, F. C. Dal Berto, E. L. Schneider, und H. M. Veit, „Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective“, *Waste Manag.*, Bd. 107, S. 285–293, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.028.
- [34] Swico und SENS eRecycling, „Fachbericht 2024“, S. 21–23, 2024, [Online]. Verfügbar unter: https://www.swico.ch/media/filer_public/d3/c6/d3c611db-6dff-40f1-865b-d586fe790224/fachbericht-2024-sens-swico.pdf
- [35] Statista, „Consumer Electronics Outlook PC-Monitore & Projektoren Schweiz“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/computer-zubehoer/pc-monitore-projektoren/schweiz>
- [36] Y. Han, J. Seo, D. H. Lee, und H. Yoo, „IGZO-Based Electronic Device Application: Advancements in Gas Sensor, Logic Circuit, Biosensor, Neuromorphic Device, and Photodetector Technologies“, *Micromachines*, Bd. 16, Nr. 2, S. 118, Jan. 2025, doi: 10.3390/mi16020118.
- [37] Öko-Institut e. V. (Institut für angewandte Ökologie), „ROHS Annex II Dossier for Diantimony trioxide (flame retardant). Restriction proposal for substances in electrical and electronic equipment under RoHS“, Öko-Institut e. V. (Institut für angewandte Ökologie), 79017 Freiburg, 1, Dez. 2019. Zugegriffen: 5. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user_upload/RoHS_Pack_15/4th_Consultation/Diantimony_trioxide_RoHS_Dossier_V2_final_20191204.pdf
- [38] Bundesamt für Umwelt (BAFU), „Entsorgung von elektrischen und elektronischen Altgeräten (EAG)“, Vollzugshilfe zum Stand der Technik, 2024.
- [39] International Antimony Association, „Product Restrictions“, Regulations & Compliance. Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.antimony.com/regulations-compliance/product-restrictions/>
- [40] Ethan Zhang, „EU RoHS Consultation Project Pack 15 Recommended MCCPs and TBBP-A for Restriction“, *SafeGuardS*, 11. Juni 2020. Zugegriffen: 5. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sgs.com/en-it/news/2020/06/safeguards-08820-eu-rohs-consultation-project-pack-15-recommended-mccps-and-tbbp-a-for-restriction>
- [41] ECHA European Chemicals Agency, „Substance Infocard“, *ECHA CHEM database*. ECHA European Chemicals Agency.
- [42] UN environment programme und Basel Convention, „Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal“. 2023. Zugegriffen: 6. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?e=UNEP-CHW-IMPL-CONVTEXT-2023.English.pdf>
- [43] C. Chaine u. a., „Recycling Plastics from WEEE: A Review of the Environmental and Human Health Challenges Associated with Brominated Flame Retardants“, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Bd. 19, Nr. 2, S. 766, Jan. 2022, doi: 10.3390/ijerph19020766.
- [44] Europäische Union, *Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.*, Bd. L353, 1–1355. 2008. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2008/1272/oj%3Flocale%3Dde&ved=2ahUKEwim_-Pljs6QAxUp9AIHRRQla0QFnoECBsQAQ&usq=AOvVaw1Z6y6PMUeJf2oAdUziNsBF

- [45] U.S. Geological Survey, „Mineral Commodity Summaries, Antimony“. Januar 2024. Zugegriffen: 4. August 2025. [Pdf]. Verfügbar unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-antimony.pdf>
- [46] United States Geological Service (USGS), „Mineral Commodity Summaries 2024“, 2024, [Online]. Verfügbar unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-gallium.pdf>
- [47] S. Dembele, A. Akcil, und S. Panda, „Technological trends, emerging applications and metallurgical strategies in antimony recovery from stibnite“, *Miner. Eng.*, Bd. 175, S. 107304, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107304.
- [48] L. Xu, Z. Zhang, M. E. Isah, und K. Matsubae, „Exploring antimony material flow in the context of energy transition: A scenario-based analysis“, *Resour. Conserv. Recycl.*, Bd. 222, S. 108432, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.resconrec.2025.108432.
- [49] Luca Sazzini, „The importance of antimony and the supply risk for the European Union“. Zugegriffen: 5. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pricepedia.it/en/magazine/article/2024/06/24/the-importance-of-antimony-and-the-supply-risk-for-the-european-union/>
- [50] Eurostat, „Imports and exports of antimony“. Oktober 2024. Zugegriffen: 5. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Imports_and_exports_of_antimony_oct_2024.png
- [51] Financial Times, „The niche minerals now surging in price as defence spending booms“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ft.com/content/e56cd163-d934-4e13-ae00-0a5ddfc8514c>
- [52] Lucie Prins, TNO, „Interview on direct recycling of WEEE plastics containing Antimony“, 3. Juli 2025.
- [53] Fabian Elsener und Andreas Bill, „Erneute Zunahme der verarbeiteten Menge im Jahr 2024“, Mengen 2024. Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fachbericht.ch/en/fachbericht-2025/Mengen-2024.html>
- [54] Plast2b Cleaned, „PLASTICS to be CLEANED by sorting and separation of plastics and subsequent recycling of polymers, bromine flame retardants and antimony trioxide.“, Horizon 2020. Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://plast2bcleaned.eu/wp-content/uploads/2024/07/Project-Sumary_Plast2_V4_compressed.pdf
- [55] Swico und SENS eRecycling, „Fachbericht 2024“, 2024, Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.swico.ch/media/filer_public/d3/c6/d3c611db-6dff-40f1-865b-d586fe790224/fachbericht-2024-sens-swico.pdf
- [56] Swico, SENS eRecycling, und SLRS, „Fachbericht 2021“, Swico, SENS & SLRS, 2021. Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https%3A//www.erecycling.ch/dam/jcr%3Aa780fa0f-668c-4e4e-936d-7c3319e660b9/2021_SENS-eRecycling_Fachbericht.pdf&ved=2ahUKEwjA7-EjPaNaxV0xgIHV10PI4QFnoECBgQAQ&usq=AOvVaw3W4yowpgIB3QcRyALsoNAQ
- [57] A. Jandric, F. Part, N. Fink, M. Huber-Humer, S. Salhofer, und C. Zafiu, „Bromierte Flammenschutzmittel in Elektroaltgeräten: Untersuchung der Brom-Konzentration nach Kunststofftypen und Gerätekategorien mittels Röntgenfluoreszenzanalyse“, *Österr. Wasser-Abfallwirtsch.*, Bd. 72, Nr. 1–2, S. 68–76, Feb. 2020, doi: 10.1007/s00506-019-00639-7.

- [58] Peter Hense, Katharina Reh, Matthias Franke, und Andreas Hornung, „Pyrolysis Decentralized Recovery of High-Tech Metals“, gehalten auf der 21th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis – Pyro 2016, Nancy, 11. Mai 2016. Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/28524cf9-709e-47cb-81b8-a41a17e50e59/content>
- [59] Bettina Liebmann und Maria Tesar, „Antimon Anwendung, Abfallströme, Analytik“, umweltbundesamt 2019, Wien, 2019. Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0690.pdf>
- [60] Dr. Martin Schlummer, „Expert interview“.
- [61] M. Gaudin, V. Semetey, F. Rousseau, und G. Lefevre, „Antimony Trioxide Extraction from E-Waste Brominated Flame-Retardant Laden Plastics by Simultaneous Liquid–Liquid Extraction and Leaching“, *ACS Sustain. Resour. Manag.*, Bd. 2, Nr. 3, S. 473–480, März 2025, doi: 10.1021/acssusresmg.4c00466.
- [62] Judith Kessens u. a., „The PLAST2bCLEANED process for recycling of WEEE Plastics“, 22. Februar 2024. Zugegriffen: 4. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://plast2bcleaned.eu/wp-content/uploads/2024/03/20240222-P2BC-workshop-1-1.pdf>
- [63] Cornelis P. Baldé, u. a., „Global E-waste Monitor 2024“, International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Geneva, Bonn, 2024.
- [64] „Factsheets on Critical Raw Materials - CRMS 2023“, European SCREEN Project. [Online]. Verfügbar unter: <https://screen.eu/crms-2023/>
- [65] P. Nuss und M. J. Eckelman, „Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis“, *PLoS ONE*, Bd. 9, Nr. 7, S. e101298, Juli 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0101298.
- [66] R. H. Nielsen und G. Wilfing, „Hafnium and Hafnium Compounds“, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000. Zugegriffen: 27. August 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a12_559.pub2/abstract
- [67] P. Nuss und M. J. Eckelman, „Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis“, *PLoS ONE*, Bd. 9, Nr. 7, S. e101298, Juli 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0101298.
- [68] Sutter J, „Life Cycle Inventories of Highly Pure Chemicals“. Dübendorf, CH: Ecoinvent Centre, ETh Zurich, 2007.
- [69] R. H. Nielsen und G. Wilfing, „Hafnium and Hafnium Compounds“, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 1. Aufl., Wiley-VCH, Hrsg., Wiley, 2010. doi: 10.1002/14356007.a12_559.pub2.
- [70] „Vanadium mineral resources“, in *Vanadium*, Elsevier, 2021, S. 33–58. doi: 10.1016/B978-0-12-818898-9.00003-6.
- [71] M. Woolery, „Vanadium Compounds“, in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Inc., Hrsg., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, S. 2201140123151512.a01.pub2. doi: 10.1002/0471238961.2201140123151512.a01.pub2.