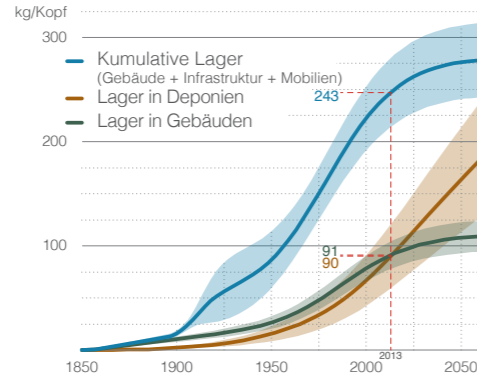


3. Primär-/Sekundärrohstoffe

Die meisten geogenen Kupfervorkommen der Schweiz liegen in den Walliser und Ostschweizer Alpen.⁴⁶ Ein Abbau lohnt sich aus wirtschaftlichen Gründen zurzeit nicht; eine wirtschaftlich nutzbare primäre Kupferlagerstätte gibt es in der Schweiz nicht. Dagegen verfügt die Schweiz über grosse sekundäre Kupferreserven: gut 725 000 t Kupfer dürften allein auf Schweizer Deponien lagern. Dies entspricht 2013 etwa 90 kg pro Kopf (Abb. 4), rund einem Drittel der kumulativen Lagermenge der Schweiz (Abb. 3).²

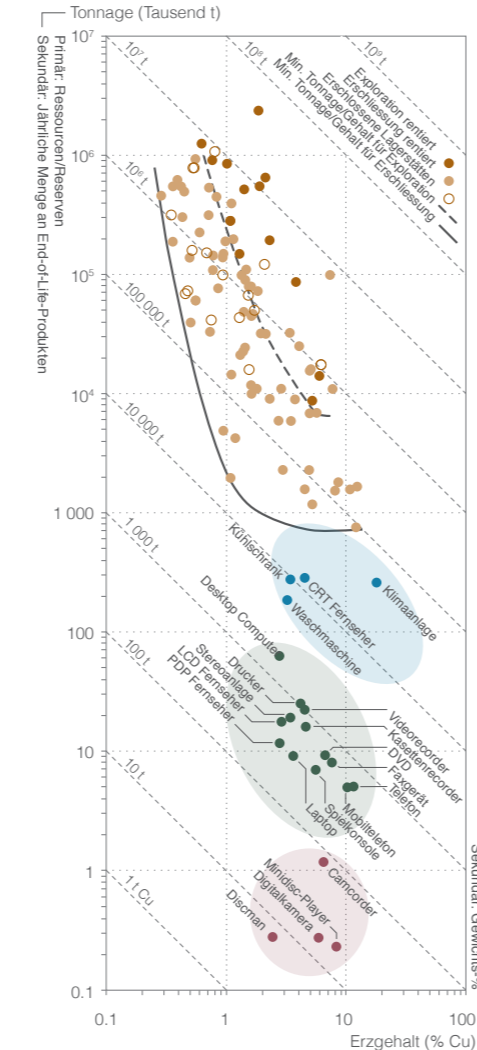
Heute abbauwürdige geologische Kupferlagerstätten weisen im Durchschnitt Erzgehalte von 6‰ (6 g Cu/kg Gestein^{6,39}) auf, während Elektroabfälle etwa 50 g Cu/kg⁵⁰, und Gebäudeabbruchmaterial sowie Schlacke aus der Kehrichtverbrennung etwa 5 g Cu/kg Abfall⁵⁸ enthalten. Das sich im Umlauf befindende Kupfer ist vor allem in der Infrastruktur und in Elektrogeräten enthalten und folglich im urbanen Raum konzentriert (Abb. 3, Abb. 9). Bezüglich End-of-Life Kupferrecycling ist die Schweiz in der Führungsgruppe (global: 43-53%⁵¹, Schweiz: ca. 50%²). Die prognostizierte zukünftige Entwicklung zeigt einen weiteren Zuwachs der In-Use- und Deponie-Kupferlager (Abb. 4).² Noch im Jahr 2000 sah es so aus, als wachse die deponierte Kupfermenge

stetig und überhole irgendwann sogar die Menge der kumulativen Lager (Abb. 4). Mit den aktuellen Bemühungen von Verwaltung und Industrie, so viel Kupfer wie möglich zurückzugewinnen, dürfte die braune Kurve in Abb. 4 stärker abflachen. Könnten 100% des verwendeten Kupfers recycelt werden, liesse sich allein dadurch ca. 75% des Kupferbedarfs der Schweiz decken.



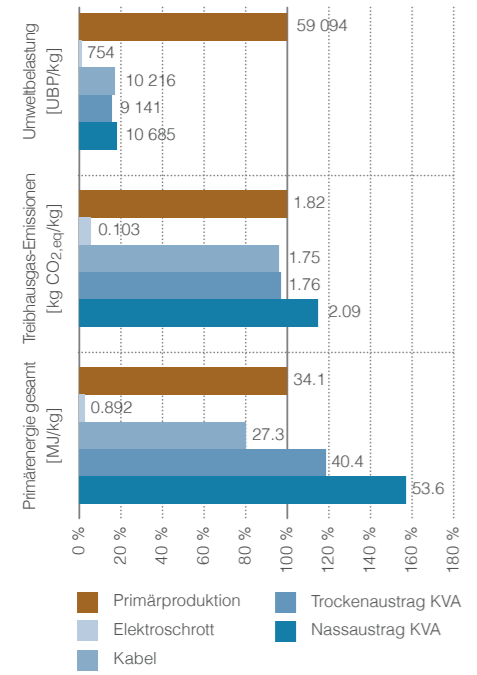
▲ Abb. 4 Entwicklung der Kupferlager in der Schweiz (2). Mittels geplanten Rückgewinnungsverfahren (Kupfer aus KVA-Schlacke) dürfte das Reservoir Deponie langsamer anwachsen als hier dargestellt. Schattiert: Standardabweichung.

► Abb. 5 Tonnage-Erzgehalt-Diagramm für weltweite primäre (8) (braune Farbtöne) und sekundäre (36) (blau, grün, rot) Kupferressourcen. Schattierte Bereiche kennzeichnen eine mögliche Klassifikation sekundärer Ressourcen nach (36). Gemäss dieser Zusammenstellung enthalten die jährlich (!) anfallenden Alt-Klimaanlagen mehr Kupfer als die magerste primäre Lagerstätte. Die Bedeutung der Achsen ist für primäre und sekundäre Ressourcen leicht unterschiedlich (vgl. Grafik).



4. Umwelt

Kupfer kann für aquatische Ökosysteme toxisch sein; für höhere Lebewesen ist es wenig gefährlich.^{22,31} Als Metall ist es für Protisten, v.a. Bakterien, tödlich.³¹ Wenn Kupfer korrodiert, kommt es unweigerlich zu Emissionen



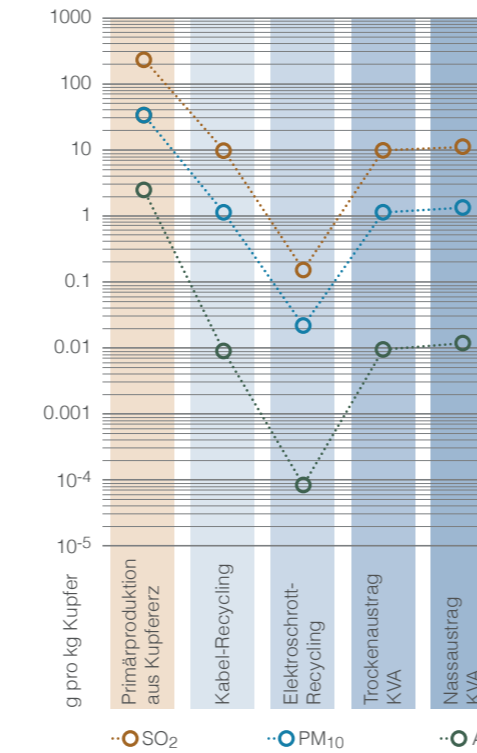
in die Natur, meist in den Boden oder ins Wasser (Abb. 3).² In der Schweiz wurden im Jahr 2000 pro Person ca. 100 g Kupfer in die Umwelt gespült, insgesamt 800 t.² 70% dieser Emissionen gehen auf Düngemittel und Pestizide zurück, 20% auf Korrosion an Gebäuden; Einträge durch Infrastruktur und Mobilien sind gering.²

Bei der Primärproduktion von Kupfer ergeben sich einige Umweltprobleme: zum einen belasten Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂) und Flugstaub die Atmosphäre, andererseits können Arsen und das hydrometallurgische Verfahren zur Wasserverschmutzung beitragen.³¹

Eine Ökobilanzierung zeigt, dass mit dem Recycling von Kupferkabeln ein Vielfaches der Energie, die bei der Primärproduktion anfiel, eingespart wird (Abb. 6).⁵⁹ Kupferrecycling aus Schlacken von Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) braucht im direkten Vergleich zwar mehr Energie als die Primärproduktion, unter Berücksichtigung der von der schweizerischen Gesetzgebung erfassten Umweltauswirkungen schneidet es jedoch deutlich besser ab, da weitere Faktoren in die Berechnung der UBP einbezogen

▲ Abb. 6 Ökobilanzierung für primäres Kupfer (braun), sowie für sekundäres Kupfer aus Kabel- und Elektroschrott bzw. Trocken- und Nassaustrag aus KVA-Schlacken (Blautöne). Werte absolut und prozentual bezogen auf die Umweltwirkung der Primärproduktion (59). Umweltbelastungspunkte (UBP) beinhalten nebst Energieaufwand und Emissionen auch Land-, Wassernutzung sowie Deponien; Treibhausgaspotential: kumulative Wirkung verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Wirkung von CO₂; Primärenergie gesamt: kumulierter Energieaufwand (erneuerbare und nicht erneuerbare Energiequellen) für die gesamte Bereitstellungskette. Elektroschrott- und Kabelrecycling sind umweltfreundlicher als die Primärproduktion.

werden (Abb. 6).⁵⁹ Die Schadstoffemissionen des Kupferrecyclings sind markant kleiner als die der Primärproduktion (Abb. 7).

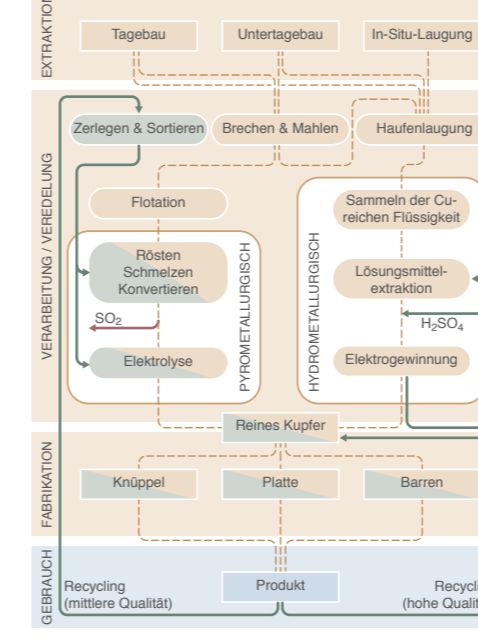


▲ Abb. 7 Massenbezogene Schadstoffemissionen primärer (brauner Balken) und sekundärer (blaue Balken) Kupferproduktion. SO₂: Schwefeldioxid, PM₁₀: Partikel < 10 µm, As: Arsen (10). Primärproduktion führt zu deutlich höheren Emissionen als die Rückgewinnungsprozesse.

5. Technologie

Heute wird Kupfer meist im Tagebau, seltener im Untertagebau oder durch In-Situ-Laugung, gewonnen.⁵ Das gewonnene Erz wird mechanisch und chemisch angereichert; aus dem Konzentrat kann auf pyro- oder hydrometallurgischem Weg reines Kupfer hergestellt werden (Abb. 8).⁵

Die Wiedergewinnung von Kupfer braucht je nach Produkt deutlich weniger Energie als dessen primäre Herstellung, und



das Recycling schneidet punkto Umweltbelastung deutlich besser ab (Abb. 6). Kupfer und seine Legierungen lassen sich beliebig oft rezyklieren, ohne ihre Eigenschaften zu verlieren.^{5,31}

Es gibt unterschiedliche Recycling-Verfahren. So wird leicht separierbarer, qualitativ hochwertiger Kupferschrott, wie er beispielsweise in Elektro- und Elektronikgeräten vorkommt (Abb. 5), von anderen Materialien getrennt, umgeschmolzen und direkt als hoch-qualitatives Sekundärkupfer eingesetzt.³¹ Dasselbe gilt für hochwertige Kupferlegierungen. Je geringer die Qualität des sekundären Kupfers und je schwieriger seine Separation von anderen Materialien, desto aufwendiger ist auch seine sekundäre Aufbereitung (Abb. 8).³¹ Kupferschrott mittlerer Qualität, wie er z.B. in Kupferkabeln vorkommt, wird erneut dem pyrometallurgischen Prozess zugeführt, um die für elektronische Anwendungen erforderliche Reinheit zu gewährleisten. Dieser Mehraufwand rechtfertigt daher ein sorgfältiges Trennen von End-of-Life-Produkten und den darin

◀ Abb. 8 Primär- (Braun) und Sekundärproduktion (Grün) von Kupfer (5,31). Recycling- (grün) und Schadstoffflüsse (rot) sind hervorgehoben; Flüsse der Primärproduktion sind schwächer dargestellt (gestrichelte Linien). Aus Schwefeldioxid, das im pyrometallurgischen Prozess anfällt, kann Schwefelsäure (z.B. für den hydrometallurgischen Prozess) hergestellt werden.

enthaltenen Kupferschrott. Abfälle, die Kupfer geringerer Qualität oder nur wenig davon enthalten, wie z.B. KVA-Schlacke, sind am aufwendigsten zu rezyklieren.³¹ Ähnlich der Primärproduktion wird das Ausgangsmaterial geschreddert und die kupferhaltige Fraktion mechanisch angereichert. Danach folgt die Raffination mittels pyrometallurgischem Verfahren. Wird der mechanischen Aufbereitung ein nass-chemischer Extraktionsschritt angehängt, ist die Veredelung nach dem hydrometallurgischen Verfahren sinnvoller.

Ob ein kupferhaltiges Produkt wirtschaftlich recycelt werden kann hängt unter anderem von seinem Kupfergehalt, der Qualität und Menge des verwendeten Kupfers, seiner geographischen Verbreitung, sowie der jährlich anfallenden Menge ab (Abb. 9).^{5,22,31}

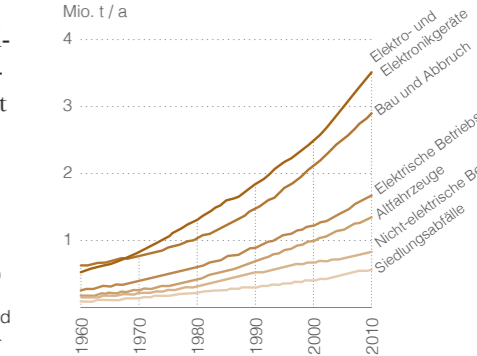


Abb. 9 Weltweit anfallende Abfall-Mengen mit unterschiedlichen Kupfergehalten (17).

6. Ökonomie

Im Jahr 2012 wurden mehr als 120 000 t Kupfer in die Schweiz importiert; etwa 100 000 t wurden exportiert (Abb. 10).¹⁴ Dabei machten «Waren», also Halbfertig und Fertigprodukte, den Grossteil aus.¹⁴ Trotzdem unterscheiden sich die Import- und Exportwarenströme: Während über 98% der importierten Waren tatsächlich Halbfertigprodukte sind, bestehen 86% aller exportierter Waren aus Abfällen und Schrott. Dies schlägt sich auch im Preis nieder: während der Import einer Tonne Kupfer im Jahr 2012 durchschnittlich ca. 9 500 CHF kostete, war die exportierte Tonne im Durchschnitt 7 200 CHF wert.¹⁴

Die Kupferpreise sind im Zeitraum 2005 bis 2011 um etwa 330% angestiegen (Abb. 2, Abb. 11), bedingt vor allem durch Nachfragewachstum der BRICS-Staaten, jedoch auch durch Oligopolbildung auf den Märkten.

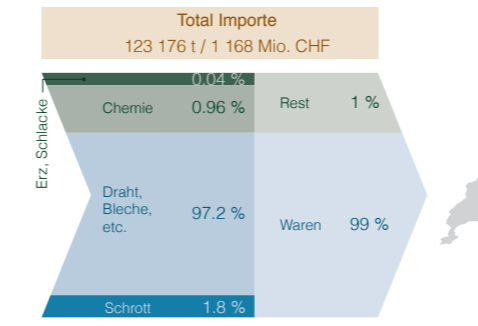


Abb. 10 Art der Kupferimporte und -exporte im Jahr 2012 (10). Nicht massstäblich.

Dass einzelne Firmen einen Grossteil des Marktes einer natürlichen Ressource wie Kupfer kontrollieren, birgt die Gefahr gezielter Preismanipulationen durch künstliche Angebotsverknappung. Zudem erhöhen Spekulationen die Preisvolatilität (Abb. 11).^{15,54}

Um das kommerzielle Interesse Privater an der Sekundärrohstoff-Quelle zu wecken, müssen die Gestehungskosten unter den internationalen Handelspreisen liegen. Angesichts eventueller spekulativer Preiselemente sind Gestehungskosten interessant, die bei 70% der Weltmarktpreise liegen. Bei einem öffentlichen Aufbereiter können Überlegungen hinzukommen, die sich einer ökonomischen Bewertung mindestens teilweise entziehen. In diesem Sinne kommen etwa die Unabhängigkeit der Versorgung, Planungssicherheit oder Reduktion der Umweltbeeinträchtigung in Frage.

Im Falle der Kupferaufbereitung aus Elektroschrott scheint es heute für Private möglich, Gewinne zu erzielen. Gesetzliche Vorgaben und vorgezogene Entsorgungsgebühren wirken hier unterstützend. Ob die Kupfer-Rückgewinnung aus KVA-Schlacke finanziell interessant ist, kann noch nicht endgültig abgeschätzt werden. Aufgrund der Vielzahl von rückgewinnbaren Metallen kann dies aber angenommen werden. Die Gewinnungskosten lassen sich nach der finanziellen Wertigkeit der Metalle auf mehrere Kostenträger verteilen. Der Anteil Kupfer wird auf etwa 20% geschätzt. Zu berücksichtigen ist ferner, dass Kosten für Behandlung und Deponie eingespart werden können.

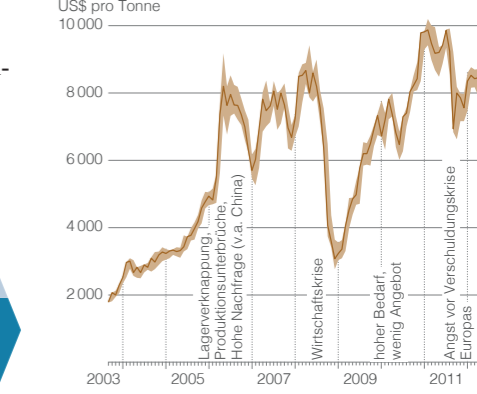


Abb. 11 Monatliche Kupferpreise von September 2003 bis September 2013 (15, 54). Der schattierte Balken gibt die Differenz zwischen Höchst- und Tiefstpreis wieder, die dunkelbraune Linie den Monatsabschluss.

7. Gesellschaft

In der Schweizer Maschinen-, Elektro- und Metallindustrie (MEM) sind rund tausend Unternehmen tätig und generieren über 9% des Bruttoinlandproduktes.⁴² Für etwa 400 dieser Firmen ist Kupfer ein wichtiger Rohstoff.

Schätzungsweise sind in der Schweiz etwa 6500 Personen mit dem Recycling von Metallen, unter anderem auch Kupfer, beschäftigt.⁵⁷ Der Recyclingsektor stellt somit einen wichtigen Arbeitgeber dar.

Häufig werden bei der Rohstoffproduktion und dem Recycling technische Fragen prioritär behandelt, soziale und kulturelle Aspekte gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung und werden sogar vielfach ausschlaggebend.⁴⁰ Im Minensektor kommt dies durch die vielfach von der einheimischen Bevölkerung geforderte Lizenz zum Wirtschaften (social license to mine) zum Ausdruck, für welche auch die Zertifizierung von Handelsketten ein Kriterium sein kann.

Tab. 1 Mögliche soziale Indikatoren (11).

Auswirkungen auf Menschen	Beispiel-Zielwerte
Gesundheitsschäden	Emissionen
Soziale Akzeptanz	Arbeitslosenquote
Erhalt der Ästhetik	Sichtbarkeit der Anlage/Aktivitäten
Soziale Gerechtigkeit	Haushalte mit Abfallrecycling
Lebensqualität	Einfluss auf lokale Wirtschaft

Verschiedene Indikatoren (Tab. 1)¹¹ werden zur Bewertung der sozialen Wirkung von Projekten verwendet.^{4,11}

Ein Vergleich zwischen den sozialen Auswirkungen der primären Rohstoffförderung^{3,18} oder des informellen Recyclings im Ausland¹ mit den Auswirkungen der sekundären Kupferproduktion durch Recycling in entwickelten Ländern zeigt, dass die im Ausland stattfindenden Prozessschritte bezüglich Menschenrechts-, Arbeits- und Gesundheitsbedingungen eine deutlich schlechtere Bewertung erhalten.

Bezüglich Kupferrecyclingpotenzial sind Elektro- und Elektronikgeräte-Abfälle von grosser Relevanz (Abb. 5, Abb. 9).¹⁷ Zur Schliessung von Rohstoffkreisläufen wäre es daher sinnvoll, diese Altgeräte in der Schweiz zu demontieren und das enthaltene Kupfer zu rezyklieren, statt ins Ausland zu exportieren. Zudem würden in der Schweiz zusätzliche Arbeitsplätze entstehen.

Andererseits leben viele Menschen in Entwicklungsländern davon, diese Altgeräte zu zerlegen und mit einfachsten Methoden die darin enthaltenen Metalle zu rezyklieren. Behielten wir alle Altgeräte bei uns, entzögen wir ihnen die Lebensgrundlage.⁶⁰

Die in Entwicklungsländern üblichen Recyclingmethoden sind jedoch sehr ineffizient⁴⁰ und schaden Umwelt und Gesundheit. Zur Lösung dieses Zielkonflikts müsste der informelle Recyclingsektor in Entwicklungsländern in formalisierte Handelsketten eingebunden werden. Würden Abfallsammler mit dem nötigen Material und Know-How versorgt, könnten arbeitsintensive «low-tech» Prozessschritte wie die manuelle Demontage nach wie vor günstiger als in Europa durchgeführt werden. Die technisch anspruchsvollen Folgeschritte würden gleichzeitig effizienter und sozialverträglicher.

Oft sind das gesellschaftliche Verantwortungsbewusstsein der Konsumenten sowie freiwillige Initiativen der industriellen Produzenten zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen ungenügend und die Implementierung strategischer Instrumente durch die öffentliche Hand ist erforderlich, um das Abfallmanagement nachhaltiger zu gestalten.

1. Bedeutung von Kupfer

Kupfer ist ein rötliches, duktiles, schmelzbares Übergangsmetall, das Wärme und elektrischen Strom gut leitet und häufig in der Bau- und Elektroindustrie Verwendung findet (Abb. 1).^{12,31,54} Kupfer ist als essentielles Spurenelement wegen seiner katalytischen Funktion auch für das Leben wichtig; zu viel oder zu wenig Kupfer ist für viele Lebewesen schädlich.^{12,31} In der Natur kommt Kupfer selten in elementarer Form vor; abbauwür-

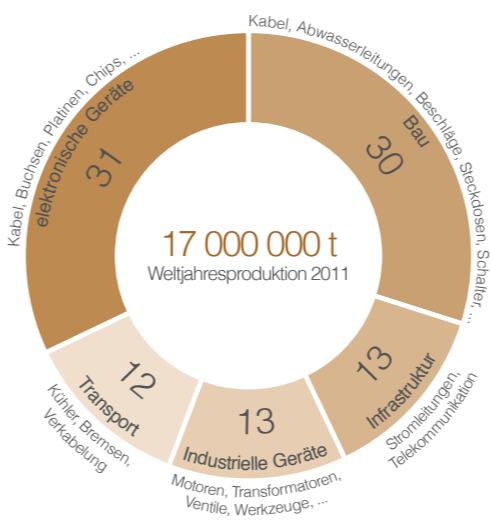


Abb. 1 Verwendung von Kupfer (24, 54). In Prozent.

dig sind meist seine Sulfide, allen voran das Mineral Chalkopyrit (CuFeS₂).⁵ Dieses wird durch magmatische oder vulkanische Aktivitäten in porphyrischen oder vulkanogen-exhalativen Kupferlagerstätten gebildet; aber auch exogene sedimentäre Prozesse können Kupfer anreichern.⁵ Die grössten Kupferreserven liegen in Chile, gefolgt von Australien, Peru, den USA und Mexiko.⁵⁴

Durch den steigenden Bedarf an Kupfer (Abb. 2), vor allem durch die Nachfrage aus

aufstrebenden Industrienationen (insbesondere den BRICS-Staaten), nehmen die wirtschaftlich gewinnbaren Kupfererzgehalte immer weiter ab (im letzten Jahrhundert von weltweit 23% auf 0.6%³⁹). Dies führt zu höherem Material- und Energieaufwand bei der Primärextraktion. Die einhergehende Kostenzunahme bedingt teilweise einen Anstieg des Kupferpreises über die letzten Jahrzehnte (Abb. 2).

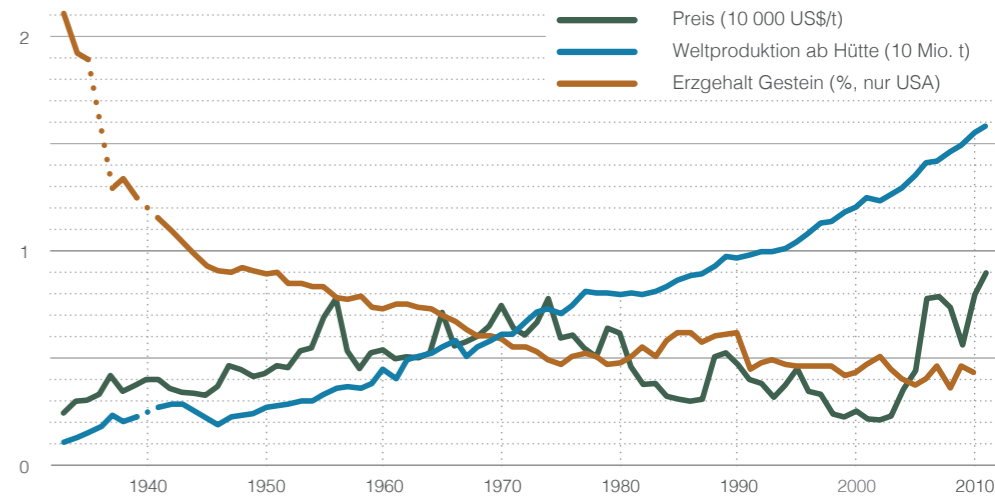


Abb. 2 Preis, Produktion und Erzgehalt von Kupfer, 1933–2011 (54). Preis inflationsbereinigt, Referenzjahr 2011.

8. Ressourcenmanagement: Das Ganze im Überblick

Die öffentliche Hand fühlt sich verantwortlich, die Nutzung der bisher nicht ausgeschöpften Potenziale in der KVA-Schlacke, in Deponien sowie in urbanen Lagern voranzubringen. Sie will eine hohe Rückgewinnungsrate sicherstellen. Aufgrund eines hohen ökonomischen Interesses am Kupfer, das Metall wird aktuell zu rund 6500 CHF/t gehandelt, soll der Grossteil des sekundären Kupfers auf privatwirtschaftlicher Basis zurückgewonnen werden.

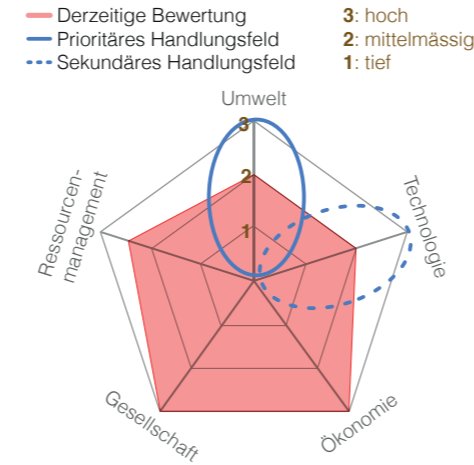
Die Rückgewinnung von Kupfer aus Elektroschrott funktioniert aufgrund der gesetzlichen Vorgaben (VREG) und des vorgezogenen Entsorgungsbeitrags zufriedenstellend. Aus diesem Prozess werden pro Jahr ca. 3000t sekundäres Kupfer gewonnen. Die Umweltbehörde kann sich hier auf eine Kontrollfunktion beschränken. Allenfalls sind technologische Verbesserungen zu unterstützen, welche die Rückgewinnung erhöhen könnten. Es soll sichergestellt werden, dass die Sekundärrohstoffe mit vergleichbar hohen ökologischen und sozialen Standards aus exportiertem Elektroschrott zurückgewonnen werden.

Die grossen Kupfer-Mengen im Deponieabfall (3000t/a) rechtfertigen Anstrengungen, Kupfer aus der KVA-Schlacke zurückzugewinnen. Auch dieser Vorgang ist – mindestens über alle verwertbaren Metalle gerechnet – gewinnbringend möglich. Die Umweltbehörde kann hier die notwendige Initialzündung geben, um die verfügbaren Technologien weiter zu entwickeln. Über die Gesetzgebung kann sie dafür sorgen, dass Kupfer aus KVA-Schlacke tatsächlich auch zurückgewonnen wird.

► **Abb. 8** Beurteilung des Urban Mining Potenzials von Kupfer (KVA-Schlacke und Elektroabfälle) anhand qualitativer Experteneinschätzung. **Kriterien:** *Umwelt:* Langzeitrisiko Schlacke, Probleme durch Dissipation (Eisenbahntrasse, Eintrag aus Dächern und Dachrinnen); *Technologie:* Rückgewinnung aus Schlacke und Elektroschrott; *Ökonomie:* braucht keine Massnahmen, läuft von selbst; *Gesellschaft:* Abbau hauptsächlich durch Mininggesellschaften mit geregelten Arbeitsverträgen und -schutz; *Ressourcenmanagement:* keine Kritikalität, aber es braucht eine Weiterentwicklung des Stands der Technik (SdT).

Offene Fragen

1. Wie kann der KVA-Trockenausstrag der Schlacke bei weiteren Anlagen verbreitet werden?
2. Wie kommt man zu aktuelleren Zahlen für die Ökobilanzierung der Primärgewinnung von Kupfer?
3. Wie kann eine nachhaltige Recyclingkette für Elektroschrott im Ausland gewährleistet werden?



2. Systemverständnis

Der Kupferbedarf der Schweiz wird gänzlich durch Importe und Recycling gedeckt (Abb. 3).² Die sich im Umlauf befindende Kupfermenge (Lager) ist durch Einfuhr von Halbfertigprodukten und Waren beständig angestiegen; sie betrug im Jahr 2000 etwa 220 kg/Kopf² (globaler Durchschnitt 35–55 kg¹⁶) mit einem Netto-Import von 5.5 kg/(Kopf · Jahr)². Jeder Schweizer brauchte im Jahr 2000 etwa 8 kg Kupfer, knapp dreimal mehr als der globale Durchschnitt.² Gleichzeitig produzierte jeder Schweizer 6 kg Kupferabfall, wovon 4.2 kg rezykliert und 1.8 kg entsorgt wurden.² Die Kupfermenge auf Deponien wird in den nächsten 50 Jahren das am schnellsten wachsende Reservoir sein, vor allem durch den Eintrag von Mobilien (Abb. 3, Abb. 4).² Die Rückgewinnung von Kupfer aus KVA-Schlacke ist dabei nicht berücksichtigt²; die Prognose dürfte daher die mit der heutigen Abfallbewirtschaftung tatsächlich deponierte Menge überschätzen. Kupfererträge in die Umwelt sind relativ gering und unter Punkt 4 ausgeführt.

Lagerzuwachs sowie Abfall-Mengenflüsse, gekoppelt mit steigenden Kosten und Preisen, rechtfertigen einen erhöhten Aufwand zur Rückgewinnung. Dies einerseits um die schon deponierten Mengen zurück-

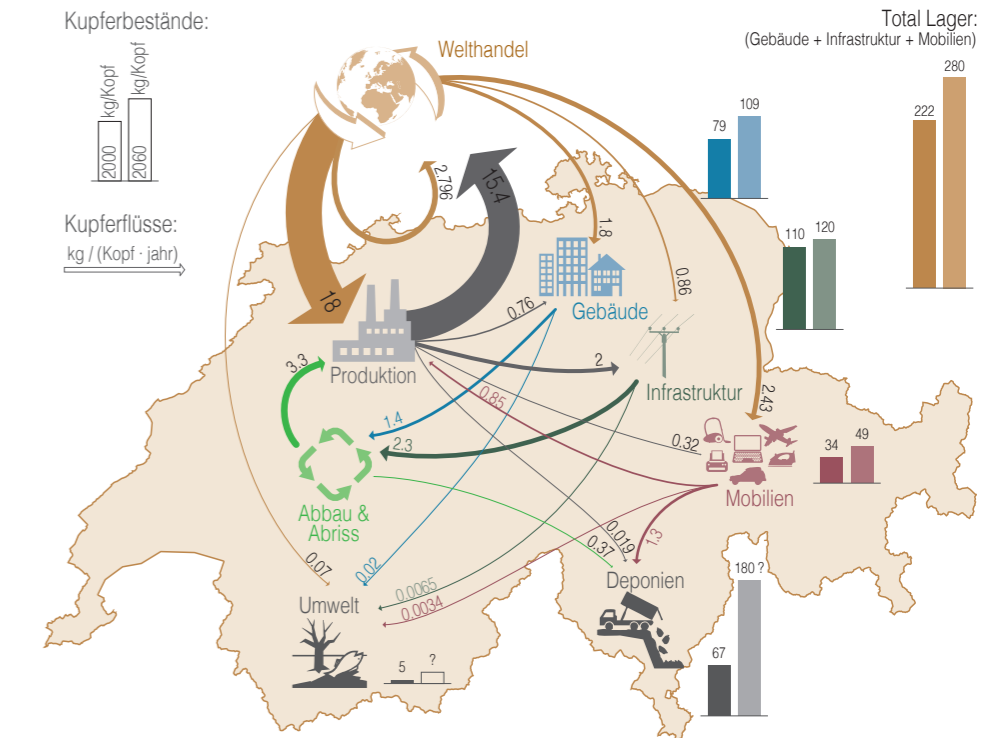


Abb. 3 Kupferflüsse (kg /Kopf · Jahr) und -lager (kg /Kopf (2)); Flüsse: Jahr 2000, Lager: Jahre 2000 und 2060.

zugewinnen, andererseits um die jährlich anfallenden ca. 3000t Kupfer in Deponieabfall² (20Mio. CHF) zu verringern. Obwohl auch mit der höchstmöglichen Recyclingquote nicht auf die primäre Kupferproduktion verzichtet werden kann, ist das Recycling eine gute Möglichkeit, den Marktanteil und

die Auswirkungen der Primärproduktion zu minimieren.²⁰

Die grössten Kupferflüsse betreffen die Schweiz nur bedingt: der Handel über die Grenze fällt am meisten ins Gewicht (Abb. 3, Abb. 10).^{2,14}