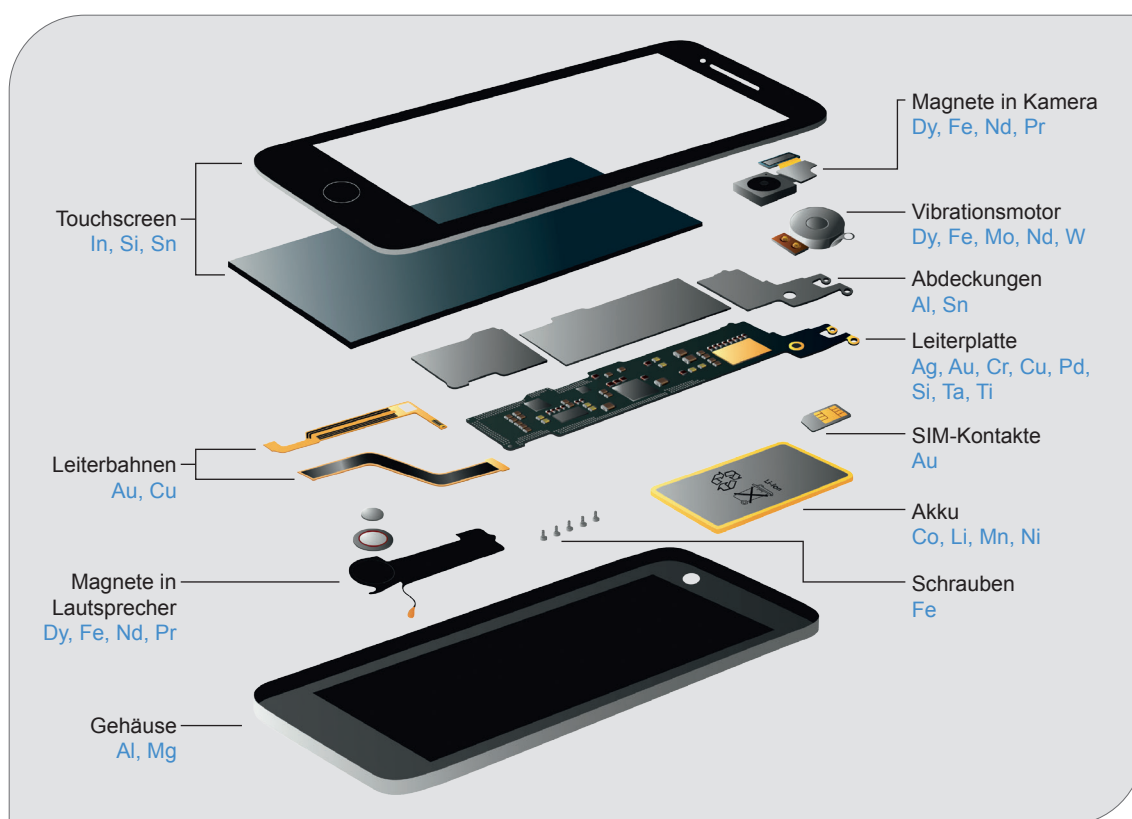


METALLE IN SMARTPHONES

Britta Bookhagen, Dennis Bastian



Zerlegtes Smartphone und darin vorkommende Metalle (© BGR/PrinzMayer)

In diesem Bericht wird der Metallgehalt¹ in Smartphones dargestellt und mögliche Einflüsse auf den Rohstoffmarkt untersucht. Hierfür werden sowohl das primäre Angebot für die Herstellung, als auch die derzeit potenziell zur Verfügung stehenden Anteile durch Recycling von Smartphones betrachtet. Die hier gezeigten Ergebnisse basieren auf BOOKHAGEN ET AL. 2020.

EINLEITUNG

Abfälle von Elektro- und Elektronikgeräten (waste electrical and electronic equipment, WEEE) sind weltweit einer der am schnellsten wachsenden Abfallströme (EU COMMISSION 2020). Genaue Daten über die exakten Metallgehalte von Geräten aus diesen Kategorien sind jedoch nicht immer öffentlich verfügbar. Mobiltelefone² werden häufig als repräsentatives Beispiel für WEEE aus der Kategorie der Informations- und Kommuni-

¹ Mit Metallen sind hier im folgenden sowohl Metalle, Halbmetalle, als auch andere metallische Elemente wie die Lanthanoide gemeint.

² Eine Klasse von Mobiltelefonen sind Smartphones, die i. Allg. ein Betriebssystem zur Ausführung von externen Applikationen sowie statt einer Tastatur ein Touchscreen, Internetkonnektivität und Multimedia-Funktionen wie eine Kamera besitzen.

kationstechnologien (IKT) herangezogen, da sie ähnlich wie Tablets, Notebooks und Laptops eine große Anzahl verschiedener, teilweise seltener und wertvoller Metalle enthalten. Weiterhin stehen den hohen Verkaufszahlen (1,8 Milliarden verkaufte Mobiltelefone 2019) eine weltweit nur geringe Recyclingquote von 5–10 % gegenüber (STATISTA 2019).

Die Gesamtanzahl aller global verkauften Mobiltelefone lag im Zeitraum 2012 bis 2019 bei 14,64 Mrd. Geräten. Smartphones machen dabei seit 2014 den größten Teil der verkauften Mobiltelefone aus. Im Jahr 2019 wurden global 1,4 Milliarden Smartphones verkauft (von 1,8 Mrd. Mobiltelefonen), und von 2012 bis 2019 wurden insgesamt 10,2 Milliarden Smartphones verkauft (STATISTA 2019). Zum Vergleich: In Deutschland wurden 2019 rund 22 Millionen Smartphones verkauft (STATISTA 2019).

Die Angaben über Wert und Metallgehalt in Mobiltelefonen sind nicht immer zugänglich und stammen häufig von Recyclingunternehmen, bei denen Stichproben aus einer heterogenen Menge an Mobiltelefonen analysiert und auf eine Tonne Geräte (ca. 9.000–10.000 Stück ohne Akkumulator, kurz Akku) interpoliert wird. Auch die Wege von Mobiltelefonen im Recycling sind nicht immer transparent; häufig erscheinen die Gründe für eine Sammlung von Mobiltelefonen trotz des gutgemeinten Zwecks nicht immer plausibel. Unwissenheit, wie die Geräte nach der durchschnittlichen Nutzungsdauer von 2–3 Jahre entsorgt werden sollen, teilweise impraktikable Rücknahmeangebote und Sorgen über Datenschutz, aber auch ideelle Werte sind nur einige Punkte, weshalb viele Mobiltelefone in den Schubladen der Konsumenten landen (BITKOM 2020). Nach neuesten Schätzungen schlummern allein in Deutschland rund 200 Mio. Mobiltelefone in den Haushalten (BITKOM 2020). Damit sind die Geräte, wenn sie letztendlich dem Recycling zugeführt werden, bereits mehrere Jahre alt. Grundsätzlich ist das Entsorgen im Hausmüll verboten.

Im Folgenden werden die Metallinhalte repräsentativer Geräte für Smartphone-Modelle von

2012 bis 2017 einen Rohstoff-Kontext gestellt und damit die Geräte untersucht, die durchschnittlich derzeit dem Recycling zur Verfügung stehen. Hierfür werden aktuelle Metallpreise und das Recycling genauer untersucht sowie typische Metallinhalte im Bergbau mit denen in Smartphones verglichen.

METALLGEHALT UND METALLWERT VON SMARTPHONES

Metallgehalt

Bei allen Angaben handelt es sich um Durchschnittswerte aus drei repräsentativen Smartphone-Modellen für den Zeitraum 2012 bis 2017, die für diese Untersuchungen manuell zerlegt und deren einzelne Bestandteile in einer nasschemischen Analyse untersucht wurden (Aufbereitung mit Mikrowellen-unterstützter Säuredigestion und Analyse mit optischer Emissionsspektrometrie mittels induktiv-gekoppelten Plasmas (ICP-OES) und induktiv-gekoppelter Massenspektrometrie (ICP-MS)). Die genaue Methodik wird in BOOKHAGEN ET AL. 2018 beschrieben.

Smartphones wiegen im Durchschnitt 110 g (ohne Akku) und bestehen zu rund 45 Gew.-% aus Metallen, 32 Gew.-% aus Glas, 17 Gew.-% aus Kunststoffen und 6 Gew.-% aus Materialverbunden (mechanisch nicht trennbare Kunststoffe und Metalle). Insgesamt wurden 51 % des Smartphone-Gewichts quantifiziert. Das wichtigste Bauteil in Bezug auf die Metalle ist die Leiterplatte, die zu 83 Gew.-% bestimmt wurde; die verbleibenden Gewichtsanteile der Leiterplatte bestehen hauptsächlich aus Kunststoffen und Keramiken.

In den Analysen wurden 66 Elemente identifiziert, davon wurden 53 quantifiziert (Abb. 1). Die häufigsten Metalle (als Gewichtsanteil) mit über einem Gramm je Gerät sind in absteigender Reihenfolge Eisen (Fe), Silizium (Si), Magnesium (Mg), Aluminium (Al), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Chrom (Cr). Zusammen mit den Metallen Zinn

1 H Hydrogen																	2 He Helium																														
3 Li Lithium	4 Be Beryllium																	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon																								
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium																	13 Al Aluminium	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon																								
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton																														
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon																														
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57–71 Lanthanoids	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon																														
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89–103 Actinoids	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson																														
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>57 La Lanthanum</td> <td>58 Ce Cerium</td> <td>59 Pr Praseodymium</td> <td>60 Nd Neodymium</td> <td>61 Pm Promethium</td> <td>62 Sm Samarium</td> <td>63 Eu Europium</td> <td>64 Gd Gadolinium</td> <td>65 Tb Terbium</td> <td>66 Dy Dysprosium</td> <td>67 Ho Holmium</td> <td>68 Er Erbium</td> <td>69 Tm Thulium</td> <td>70 Yb Ytterbium</td> <td>71 Lu Lutetium</td> </tr> <tr> <td>89 Ac Actinium</td> <td>90 Th Thorium</td> <td>91 Pa Protactinium</td> <td>92 U Uranium</td> <td>93 Np Neptunium</td> <td>94 Pu Plutonium</td> <td>95 Am Americium</td> <td>96 Cm Curium</td> <td>97 Bk Berkelium</td> <td>98 Cf Californium</td> <td>99 Es Einsteinium</td> <td>100 Fm Fermium</td> <td>101 Md Mendelvi-um</td> <td>102 No Nobelium</td> <td>103 Lr Lawrencium</td> </tr> </tbody> </table>																		57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelvi-um	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium
57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium																																	
89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelvi-um	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium																																	
<p> ■ > 1 g ■ > 0,1 g (< 1 g) ■ > 0,01 g (< 0,1 g) ■ < 0,01 g — enthalten, nicht quantifiziert </p>																																															

Abb. 1: Enthaltene Elemente in den untersuchten Smartphones. Angepasst aus BOOKHAGEN ET AL. 2020.

(Sn), Zink (Zn) und Strontium (Sr) machen diese 10 Metalle bereits 93 Gew.-% der 53 Metalle des gesamten Smartphones aus. Die Edelmetalle und Sondermetalle kommen nur in geringen Mengen vor, sind aber unersetzlich für die Funktionalität der Smartphones.

Metallwert

Wegen der starken und kurzfristigen Preisschwankungen durch die Auswirkungen der Covid-19-Pandemie wurden hier für alle Preise die Durchschnittswerte des ersten Halbjahres 2020 verwendet (jeweils Durchschnitt der Prei-

se Januar–Juli 2020), da dieser Zeitraum repräsentativer ist als ein monatlicher Preis.

Der Gesamtwert der 53 Metalle, anteilig nach ihrem Gewicht im Smartphone und mit Preisen vom ersten Halbjahr 2020 berechnet, liegt derzeit bei **1,11 €** je Smartphone.³

Die 12 wertvollsten Metalle, berechnet nach anteiligem Gehalt im Smartphone sind (sortiert nach absteigendem anteiligem Wert): Gold, Palladium, Kupfer, Nickel, Silizium, Magnesium, Platin, Neodym, Aluminium, Tantal, Zinn und Eisen (Abb. 2).

³ Der hier berechnete reine Metall- oder Materialwert ist nicht mit den Kosten von Bauteilen, z. B. einem Prozessorchip, identisch. Der Metallwert ist der theoretische Wert, den das aufgeschmolzene Metall zum bestehenden Metallpreis erreichen würde.

Zum Beispiel ist Gold mit nur durchschnittlich 0,017 g je Gerät enthalten, stellt aber derzeit 73 % des gesamten Metallwertes eines Gerätes; Eisen ist mit 15,98 g das masseanteilig häufigste Metall, stellt aber weniger als 1 % des gesamten Metallwertes.

Die wichtigsten Bauteile von Smartphones werden hier kurz separat beschrieben:

- Obwohl die **Leiterplatte** mit durchschnittlich 15,73 g nur 14 Gewichtsprozent des gesamten Gerätes von 110,76 g ausmacht, liegt der Wert der Metalle der Leiterplatte bei 0,93 € und umfasst damit bereits 84 % des Metallwertes des gesamten Gerätes. Die Leiterplatte enthält 90 Gew.-% des gemessenen Goldes, 98 Gew.-% des Kupfers,

99 Gew.-% des Palladiums, 86 Gew.-% des Indiums und 93 Gew.-% des Tantalums in einem Smartphone.

- Untersuchte Seltenerdelementmagnete vom Typ NdFeB stammen aus dem **Lautsprecher**, der **Kamera** und dem **Vibrationsmotor**, zusammen ergeben diese ein durchschnittliches Gewicht von etwas über 1 g je Gerät. 96 Gew.-% der gemessenen Seltenen Erden Elemente (SEE) in Smartphones befinden sich in diesen Magneten. Die verbleibenden 4 Gew.-% der SEE sind in Spuren im Display und auf der Leiterplatte verteilt. Für die Magnete je Gerät ergibt sich ein reiner Metallwert von 0,02 €, der zu 96 % von den Seltenen Erden Neodym, Dysprosium und Gadolinium gebildet wird. Insgesamt finden sich durchschnittlich 0,3034 g

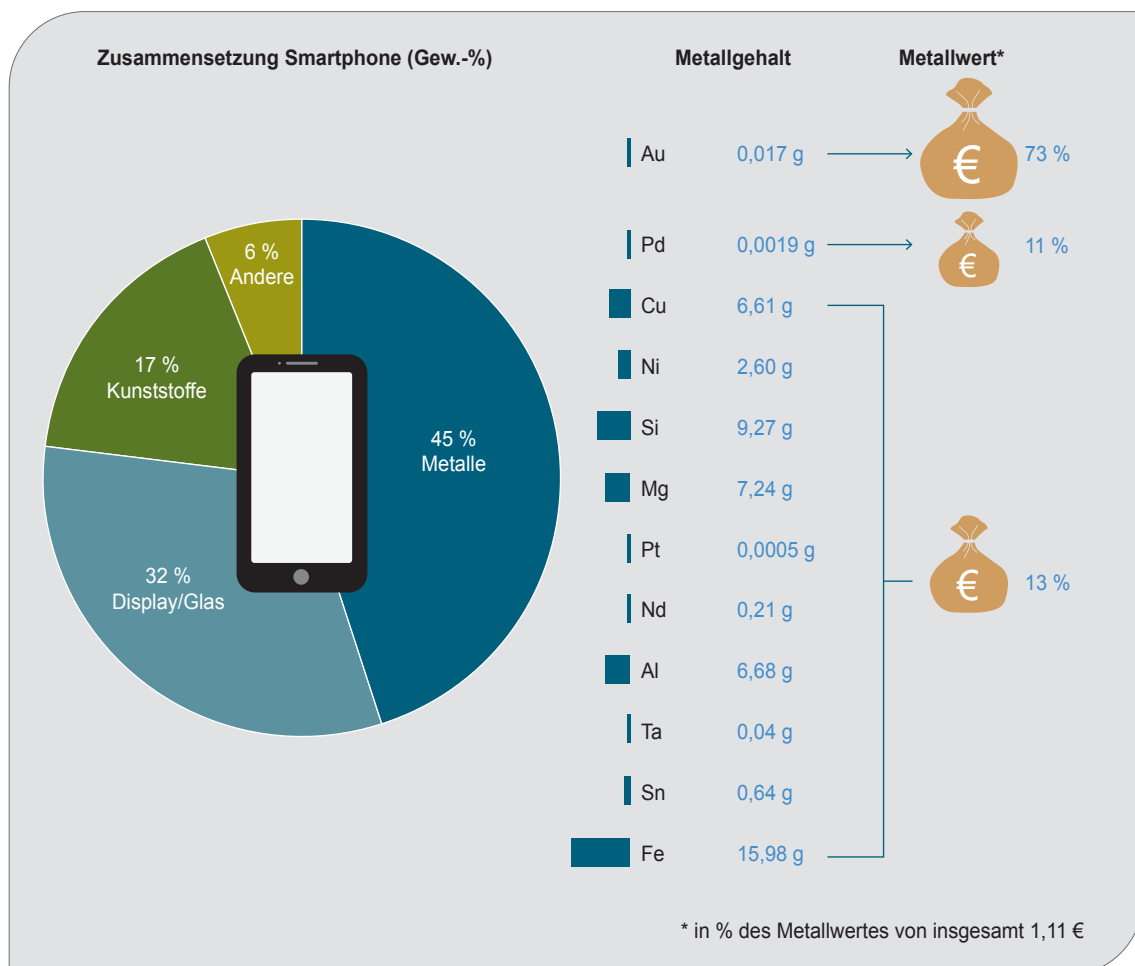


Abb. 2: Durchschnittliche Zusammensetzung von Smartphones (links); Metallgehalte in Smartphones von 12 Metallen (mittig, nach absteigendem Wert anteiliger Metallwerte sortiert); diese 12 Metalle stellen bereits 97 % des reinen Metallwertes von 53 Metallen mit insgesamt 1,11 € dar. Preise Durchschnitt 1. Halbjahr 2020. Angepasst nach BOOKHAGEN ET AL. 2020, erweitert und aktualisiert (© BGR/PrinzMayer)

Seltene Erden Elemente (SEE) je Gerät. In neuen Smartphones mit bis zu drei Kameras können diese Gehalte höher liegen.

- Das **Display** ist aus vielen verschiedenen Schichten und je nach Technologie anders aufgebaut; die Touchscreen-Funktion ermöglicht eine dünne Indiumzinnoxid-Schicht (ITO), die gleichzeitig transparent und leitend ist. In Smartphones beträgt der reine Indium-Gehalt eines Displays 0,0004 g je Gerät. (Auf der Leiterplatte befinden sich weitere 0,0022 g. Der reine Metallwert für diese insgesamt 0,0026 g Indium liegt damit unter einem Cent je Smartphone).

Im Jahr 2019 wurden damit für die verkauften 1,4 Mrd Smartphones rund 22.400 Tonnen Eisen, 10.100 Tonnen Magnesium, 9.250 Tonnen Kupfer, 9.450 Tonnen Aluminium, 24 Tonnen Gold und 3 Tonnen Palladium verwendet.

Die Metallgehalte für die im Zeitraum 2012 bis 2019 verkauften 10,2 Mrd. Smartphones liefern noch eindrücklichere Zahlen, Tabelle 1 zeigt die hier enthaltenen Werte.

RECYCLING VON SMARTPHONES

Recycling kann einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung des Rohstoffangebots und damit auch der Verfügbarkeit leisten. Das Recycling von Metallen erhöht im Allgemeinen die Material- und Energieeffizienz von Produktsystemen während des gesamten Lebenszyklus, denn die Umweltauswirkungen und der Energieverbrauch von Sekundärmetallen (d.h. aus dem Recycling zurückgewonnenen Metallen) sind für die meisten Metalle niedriger als bei der Primärgewinnung (Gunn 2014). Bei einigen Rohstoffen, insbesondere den Massenmetallen wie Stahl, Kupfer und Aluminium, gibt es etablierte Recyclingverfahren. Qualitativ sind viele Metalle beliebig oft verwendbar. Sie werden somit gebraucht und nicht verbraucht (für gewisse Speziallegierungen kann allerdings nur noch ein sogenanntes Downcycling stattfinden, z.B. bestimmte Aluminiumlegierungen). Genauso wie bei den Primärrohstoffen spielen bei der (Rück-)Gewinnung von Sekundärrohstoffen aber nicht nur die hier dargestellten Metallgehalte eine wichtige Rolle, sondern auch verschiedene andere Fakto-

Tab. 1: Metallinhalt in 10,2 Mrd verkauften Smartphones (2012–2019) und deren Wert, sortiert nach absteigendem anteiligem Wert.

Metall	Metallinhalt in 10,2 Mrd verkauften Smartphones in [t]	Wert in [€] je Metall für 10,2 Mrd verkaufte Smartphones Preise Durchschnitt 1. Halbjahr 2020
Au	172	8.203.632.387
Pd	19	1.211.935.928
Cu	67.333	333.771.315
Ni	26.550	299.244.092
Si	94.503	155.504.834
Mg	73.762	123.066.699
Pt	5	120.238.377
Nd	2.159	103.483.472
Al	68.126	98.158.198
Ta	410	95.854.144
Sn	6.509	94.104.281
Fe	162.838	65.426.623

ren. Neben den Problemen beim Rücklauf und der Sammlung der Altgeräte (Erreichbarkeit, logistischer Aufwand, Transportwege, etc.) treten für das fachgerechte Recycling von Smartphones auch Herausforderungen bei den Trennverfahren und Recyclingtechnologien auf (GRAEDEL ET AL. 2011). Der Wert der zurückgewonnenen Metalle (bei den gegebenen Metall- und Schrottpreisen) muss alle Prozesse zu ihrer Gewinnung wirtschaftlich tragen; ebenso sind die physikalischen und thermodynamischen Grenzen zur Rückgewinnung zu beachten (d. h. welche kombiniert vorliegenden Elemente mit Hilfe pyro- und/oder hydrometallurgischer Verfahren getrennt werden können und welche Elemente in die Schlacke übergehen und hier nur noch mit erhöhtem Energieaufwand extrahiert werden können; siehe REUTER ET AL. 2013). Insbesondere in Bezug auf die aufzuwendende Energie ist Recycling daher auch unter ökologischen Gesichtspunkten zu betrachten.

Neben der Rückgewinnung der Metalle spielt auch die Schadstoffentfrachtung eine Rolle, insbesondere der Akkus, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird.

In Hinsicht auf eine Kreislaufwirtschaft zeigt sich daher, dass dem Recycling von Smartphones nicht nur ökonomische und physikalisch-thermodynamische Grenzen, sondern auch ökologische Grenzen gesetzt sein können: Wenn das Recycling der Komponenten zu einer größeren Umweltbelastung führt (Trennung, Transport, Vorbehandlung, Energie und Emissionen)

als durch die Rückgewinnung eingespart werden können. Hier sind detaillierte Daten für jedes Metall notwendig. Das bedeutet, ein hundertprozentiges Recycling aller Metalle in einer komplexen multimetallinen Matrix wie Smartphones ist technisch und thermodynamisch nicht realisierbar, wirtschaftlich nicht durchführbar, und ökologisch nicht sinnvoll (GRAEDEL ET AL. 2011; REUTER und VAN SCHAİK 2012; REUTER ET AL. 2019).

Vereinfacht gesagt gibt es zwei Treiber für das Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten: Es ist gesetzlich vorgeschrieben (in Deutschland nach dem ElektroG, der nationalen Umsetzung der europäischen WEEE-Richtlinie) und/ oder es lohnt sich ökonomisch.

Die wertgebenden Metalle und ökonomischen Treiber für das Recycling von Smartphones sind die fünf Metalle Gold, Kupfer, Silber, Palladium und Platin. Diese sind durch Standard-Recyclingverfahren in einer typischen Kupferschmelze durch Elektrolyse relativ einfach zu gewinnen und die Rückgewinnung (Ausbeute) dieser fünf Metalle kann bei bis zu 98 % liegen. In integrierten Prozessanlagen können noch weitere Elemente wie Arsen, Blei, Indium, Nickel etc. zurückgewonnen werden (GRAEDEL ET AL. 2011).

Mit diesen fünf Metallen können also derzeit rund 85 % des reinen Metallwertes eines Smartphones wiedergewonnen werden. Der größte Materialwert ist auf Gold (73 %) zurückzuführen, obwohl Kupfer mengenmäßig den weitaus größeren Teil ausmacht. Allerdings schwanken

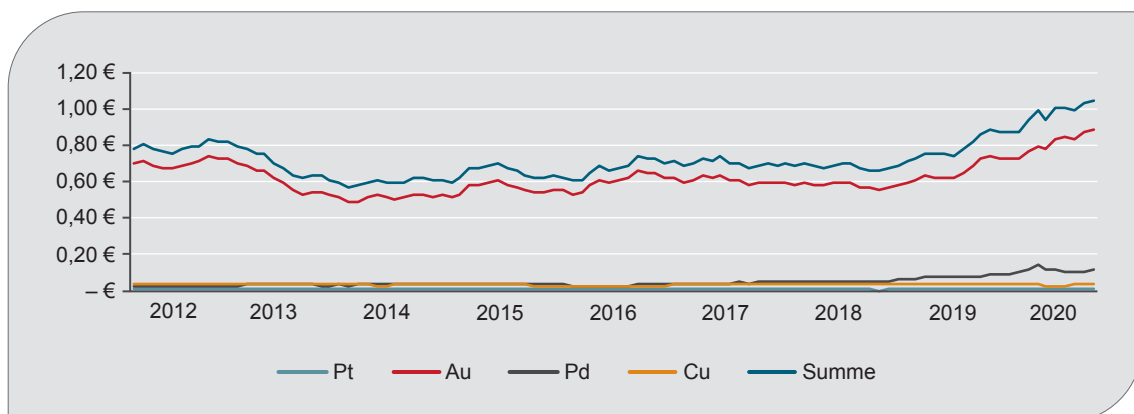


Abb. 3: Reiner Metallwert von Au, Cu, Pt, Pd in Smartphones, anteilig berechnet.

die Preise der Metalle zeitweise stark und damit auch der Metallwert eines Smartphones. Bspw. hat sich der Preis von Platin zwischen 2012 bis 2019 fast halbiert, der von Palladium hat sich dafür im selben Zeitraum mehr als verdoppelt. Für die Metalle Au, Cu, Pd und Pt sind die anteiligen Werte in einem Smartphone von 2012–2020 in Abb. 3 dargestellt (Ag ist nicht abgebildet, dieser Wert liegt um 0,01 €). Insbesondere aufgrund des hohen Goldpreises der letzten Monate liegt der Wert dieser vier Metalle derzeit (Stand Aug. 2020) bei einem neuen Höchstwert von 1,05 €. Da sie in hohen Ausbeuten zurückgewonnen werden, liegt der Recyclingwert von Smartphones derzeit damit bei rund 1 €. In den letzten Jahren schwankte der Wert für diese Metalle allerdings stark, bspw. lag er im Jahr 2019 noch bei 0,81 €, im Jahr 2014 jedoch nur bei 0,60 €. (jeweils Jahresdurchschnittspreise).

Recyclingpotenzial

Ein Vergleich der sogenannten urbanen Mine (oder auch dem anthropogenen Lager) von Smartphones mit dem Metallgehalt in der Primärproduktion, d.h. ein einfaches „Metallgehalt in Smartphones vs. Metallinhalt in Erz“, wie es in dieser Studie durchgeführt wird, kann und ist nicht dazu gedacht, die komplexen Fragestellungen des Recyclings und die entscheidenden Faktoren dafür zu erfassen. Die detaillierten Informationen darüber, wie viel von welchen Metallen in der Unterhaltungselektronik im Vergleich zu ihrem Inhalt im Primärerz enthalten sind, können jedoch die Diskussion um zukünftige Potenziale und Recyclingtechnologien für eine Kreislaufwirtschaft mit Daten unterstützen und öffentliche Missverständnisse über die Möglichkeiten/Potenziale und Grenzen des Recyclings von Smartphones verdeutlichen.

In Abb. 4 sind die Rohstoffgehalte ausgewählter Metalle aus den Primärerzen den Gehalten in Smartphones gegenübergestellt. Die Inhaltsangabe mg/kg (Milligramm pro Kilogramm) entspricht der ebenfalls häufig verwendeten Angabe ppm (parts per million) und g/t (Gramm pro Tonne).

In Tabelle 2 sind die durchschnittlichen Gehalte ausgewählter Metalle in der Erdkruste den Gehalten in abgebauten Erzen und in Smartphones gegenübergestellt. Das Vorkommen in der Erdkruste ist lediglich ein ungefährender Indikator dafür, wie „selten“ ein Metall ist. Es gibt einen wichtigen Unterschied zwischen physischer Seltenheit (geologisch gegeben durch das Vorkommen in der Erdkruste) und wirtschaftlicher Knappheit (durch von Menschen gemachte Marktkräfte oder mangelnden Abbau) (SCHULZ ET AL. 2017).

Der Bezug zu den Metallmärkten ist hier ebenfalls dargestellt. Der Metallgehalt aller von 2012 bis 2019 verkauften 10,2 Milliarden Smartphone-Geräte könnte – theoretisch – 119 Tage das weltweite Angebot für Gallium, 100 Tage das für Tantal, 32 Tage für Palladium, 19 Tage für Gold und 9 Tage für die Seltenen Erden aufrechterhalten.

Die wertgebenden Metalle Gold, Kupfer und Palladium sind in Smartphones in deutlich höheren Konzentrationen enthalten als in aktuell abgebauten Erzen im Bergbau, teilweise gilt dies auch für Platin (siehe Abb. 4). Für das Recycling von Smartphones ohne Akku ist dabei Kobalt nicht von Interesse, welches in Smartphones in zu geringen Mengen (insgesamt 0,05 g) und zu komplex und dissipativ verteilt vorkommt. Dies gilt auch für Indium und die Seltenen Erden aus den Displays, sowie für Tantal, Gallium und Germanium von der Leiterplatte. Smartphones sind für das großtechnische Recycling dieser Metalle derzeit nicht relevant. Im Vergleich zu den Primärrohstoffen ist hier eine höhere Anreicherung in Smartphones auch nur bedingt oder gar nicht gegeben (bspw. Co und Ge). Unter anderem wären zusätzliche Vorsortierungs- und Trennwege nötig, großtechnische Prozesse müssten anders abgestimmt und der technische Aufwand dem geringen Gesamtgehalt gegenübergestellt werden. Tantal bspw. berechnet sich mit 0,040 g je Gerät und einem derzeitigen Preis (1. Halbjahr 2020) von rund 234.000 € pro Tonne auf einen Gesamtwert von 0,009 € für ein Smartphone. Somit stecken 410 Tonnen Tantal in den 10,2 Milliarden verkauften Smartphones von 2012 bis 2019, was ca. 27 % der Jahresproduktion von 2016 entspricht. Jedoch gelangt Tantal bei den

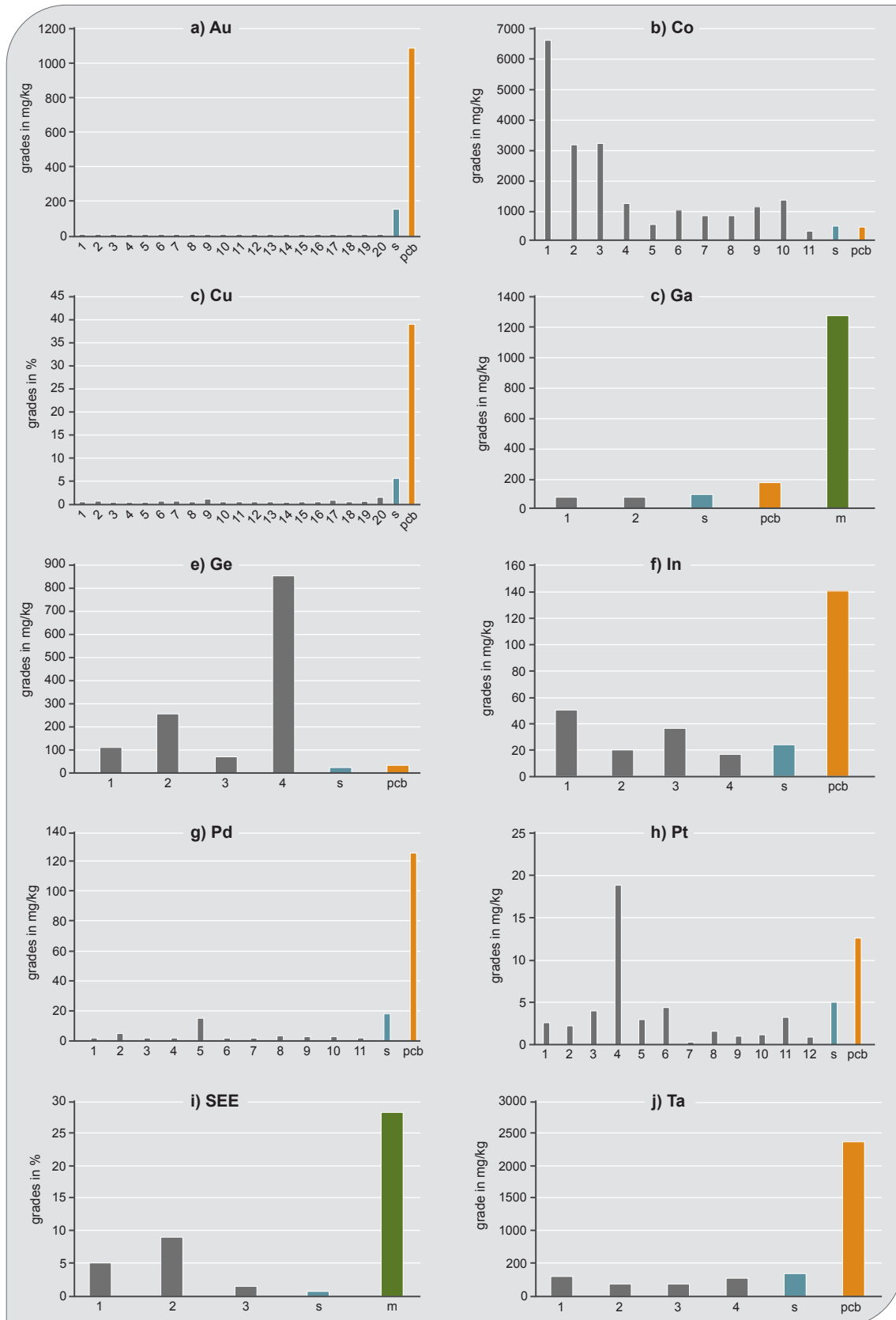


Abb. 4: Vergleich aktueller Erzgehalte im Bergbau (grau) mit den Metallinhalten in Smartphones (farbig: gesamtes Smartphone (s) blau; Leiterplatte (pcb) orange; Magnet (m) blau). Die Nummern auf der X-Achse repräsentieren die jeweils größten Lagerstätten nach Produktionsmenge in absteigender Reihenfolge. Angepasst aus BOOKHAGEN ET AL. 2020.

Tab. 2: Durchschnittsgehalte ausgewählter Metalle in der Erdkruste, aus der Bergbauproduktion und in Smartphones sowie der Metallgehalt in 10,2 Mrd Smartphones und deren theoretischer Anteil an der globalen Jahresproduktion in Tagen. Angepasst nach BOOKHAGEN ET AL. 2020.

Metall	Ø-Gehalt in der Erdkruste [mg/kg]	Ø-Gehalt in Erzen aus der Bergbauproduktion [mg/kg]	Ø-Gehalt in Smartphones [mg/kg]	Inhalt in 10,2 Mrd verkauften Smartphones 2012–2019 [t]	Jahresproduktion 2016 in [t]	Alle Smartphones von 2012–2019 könnten theoretisch die Produktion aufrecht erhalten für ...
Gold (Au)	0,004	0,6–4,6 ¹⁾	155	172	3.222 ¹⁾	~ 19 Tage
Kobalt (Co)	25	1.000–6.000 ¹⁾	496	411	110.696 ¹⁾	~ 2 Tage
Kupfer (Cu)	60	3.400–20.000 (Ø 4.900)	57.896	67.333	23.350.000*	~ 1 Tag
Gallium (Ga)	18	Ø 57; bis zu 120	82	70	282*	~ 119 Tage
Germanium (Ge)	1,6	30–279; bis zu 850	3	3	104*	~ 13 Tage
Indium (In)	0,049	25–50	23	19	689*	~ 14 Tage
Palladium (Pd)	0,015	0,03–14,28	17	14	221*	32 Tage
Platin (Pt)	0,0005	0,03–19,2	5	5	192*	~ 9 Tage
SEE (Seltene Erden Elem.)	0,3–63	300–88.000 SEE	2.749 SEE	2.251 (SEE)	127.400 ¹⁾	~ 9 Tage
Tantal (Ta)	0,7–2	182–250 ¹⁾	362	410	1491 ¹⁾	~ 100 Tage

¹⁾ nur konventioneller Bergbau, ASM (Au), illegaler (SEE) nicht mit aufgeführt

* Raffinate (keine Bergbaudaten vorhanden). Verändert nach BOOKHAGEN ET AL. 2020

pyrometallurgischen Ansätzen zur Rückgewinnung von Kupfer und den Edelmetallen in die Schlacke, wo es oxidiert wird. Die Rückgewinnung wird hier durch zu hohe Kosten (niedrige Gehalte bei hohem Energiebedarf) behindert (ÜBERSCHAAR ET AL. 2017). Für das Beispiel Tantal müsste daher eine spezielle Vorsortierung und Anreicherung stattfinden, dies wird ebenso für andere Metalle gelten.

Ausnahmen bilden die Seltenen Erden und Gallium, für die sich in Zukunft das Recycling der Seltenerdsmagnete lohnen könnte, sofern die Trennungs- und Aufbereitungsverfahren der Magnete hierfür effizient aufgebaut werden. Ebenso könnte Indium von Leiterplatten relevant werden, dieses wird teilweise in wenigen Anlagen bereits zurückgewonnen. Nicht nur für diese Optionen

spielt auch das in der Kreislaufwirtschaft viel diskutierte „Design for Recycling“ eine wichtige Rolle: Bei der Herstellung von Konsumgütern sollte eine spätere Recyclingfähigkeit direkt mit eingeplant werden (HAGELÜKEN und CORTI 2011), so dass bspw. die Magnete leichter entfernt werden können.

Insbesondere um auch Abhängigkeiten von Importen zu verringern könnte optimiertes Recycling in Zukunft eine größere Rolle spielen. Deutschland ist für Metallrohstoffe zum größten Teil von Importen abhängig. Abbildung 5 zeigt die jeweils drei größten Bergbauländer für die betrachteten Rohstoffe. Eine Versorgung nur mit Sekundärrohstoffen ist allerdings nicht durchführbar, da die Mengen nicht ausreichen; der primäre Abbau ist somit auch mittelfristig weiterhin

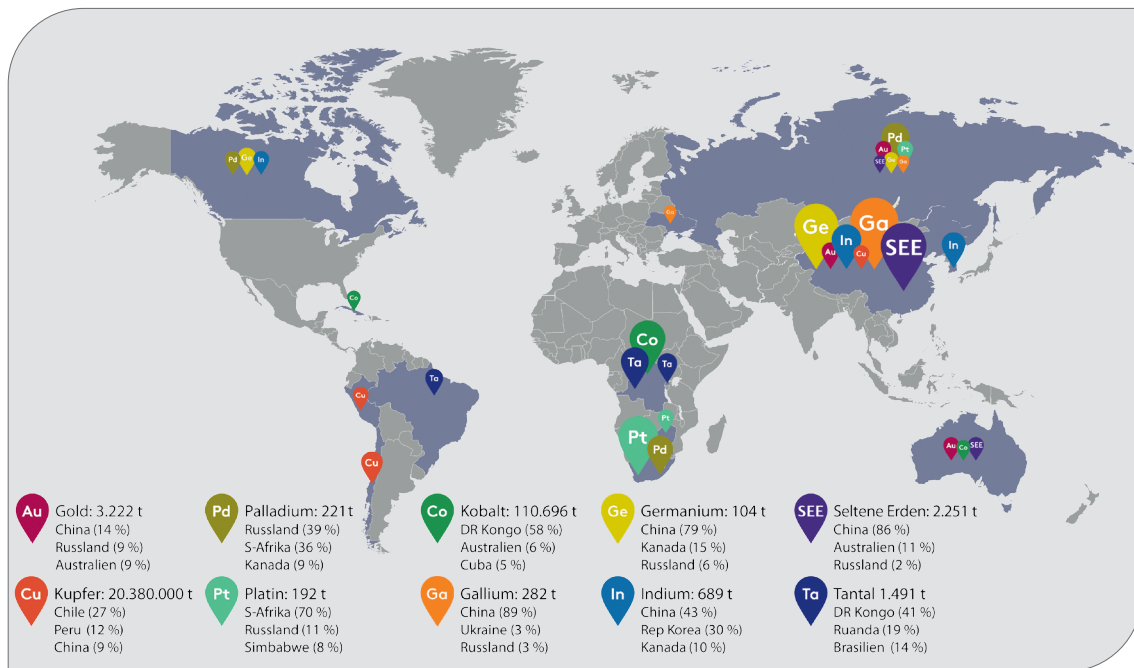


Abb. 5: Top 3 Abbauländer (Bergbauproduktionsdaten 2016) ausgewählter Metallrohstoffe, in Klammern prozentualer Anteil an Gesamtproduktion (© BGR/PrinzMayer).

nötig, um den steigenden Bedarf an Rohstoffen zu decken.

Der in den Geräten enthaltene Kunststoff wird in der Regel nicht separat verwertet, sondern als Energielieferant und Reduktionsmittel für die Rückgewinnungsprozesse verwendet. Die Kunststoffe wurden für diese Studie nicht weiter untersucht, die Materialwerte liegen je Gerät bei wenigen Cent.

Ein einfacher Vergleich zeigt die Bedeutung von Smartphones für Gold: Durchschnittlich finden sich 4 g/t Gold in einem Golderz. In einer Tonne Smartphones finden sich 155 Gramm Gold. Für 1 Gramm Gold benötigt man daher mindestens 250 Kilogramm Golderz, die abgebaut und weiterverarbeitet werden müssen – oder 6,4 Kilogramm Smartphones bzw. rund 59 Smartphones.

Im Vergleich zu ihrem relativ geringen Massenanteil könnte das Recycling von Edelmetallen größere Umweltvorteile gegenüber anderen Metallen haben. Um eine Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen, wie von der Europäischen Kommission vorgeschlagen (EU COMMISSION 2020), bei der jedes Metall zählt, könnten für die Zukunft andere Ansätze als die derzeitigen

massenbasierten oder wirtschaftlich motivierten erforderlich sein. Diese neuen Ansätze sind vielleicht nicht immer die wirtschaftlichsten Optionen, könnten aber auch Umwelt-, Sozial- und Ressourcenaspekte berücksichtigen. Wie bereits erwähnt, ist ein hundertprozentiges Recycling nicht realisierbar. Ein ganzheitlicher Ansatz, der definiert, welche Metalle wichtig sind, warum und wie sie gezielt eingesetzt und recycelt werden sollten, ist daher erforderlich.

Ein Smartphone mit einem Gewicht von durchschnittlich 110 g benötigt theoretisch, wenn nur mit Primärmetallen hergestellt, 4,7 kg (mit höherwertigen Erzen) bis zu 138,7 kg (mit niedrigen Erzgehalten) Gestein, um alle 53 Metalle für die Herstellung eines einzigen Smartphones herzustellen. Vier Metalle und ihr jeweiliger Anteil in Erzen machen über 80 Gew-% dieser 138,7 kg Gestein bei niedrigen Erzgehalten aus: Au (42 Wt-%), Pd und Pt (rund 30 %), und SEE (9 Wt-%). Dies ist lediglich eine absolute Gewichtsberechnung von Erz und Wirtgestein; es kann nicht zwingend als Indikator für z. B. CO₂-Nutzung oder Energiebedarf verwendet werden, dafür müssen verschiedene Berechnungen für jedes Metall einzeln einbezogen werden. Am Beispiel Kupfer zeigt sich, dass aufgrund techni-

scher Entwicklungen auch die Aufbereitung von im Mittel geringerer Erzgehalte im Bergbau im Vergleich nicht pauschal zu einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen (pro Kilogramm Kupfer-Metall) geführt haben (siehe SCHMIDT ET AL. 2020). Dennoch ist die Treibhausgas-Bilanz für Kupfer aus der Sekundärproduktion in der Regel besser als für Kupfer aus der Primärproduktion. Dies gilt jedoch nicht für alle Produkte bzw. Rohstoffe. Bei Indium beispielsweise ist für bestimmte Produkte (z. B. aus dem Recycling von LCD-Bildschirmen) die Sekundärproduktion mit höheren Treibhausgas-Emissionen verbunden als die Primärproduktion (SCHMIDT ET AL. 2020).

FAZIT

Verglichen mit anderen Gütern, die weitaus mehr Rohstoffe benötigen, erscheint der globale Rohstoffbedarf von Smartphones auf den ersten Blick gering. Aufgrund der großen Anzahl von durchschnittlich 53 enthaltenen Metallen und den hohen Verkaufszahlen mit 1,4 Milliarden Stück im Jahr 2019 ist der Rohstoffbedarf am Beispiel Smartphone dennoch gut sichtbar. Der hohe Wert der Metalle, die in den Smartphones enthalten sind, insbesondere von Gold und Palladium, zeigt die Notwendigkeit einer nachhaltigen Verwendung und des Recyclings. Das Smartphone steht hier stellvertretend für die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), da Geräte aus diesem Bereich ebenfalls in hohen Stückzahlen vertrieben werden und ähnliche Metalle benötigen. Der Bedarf an Rohstoffen wird zusätzlich auch durch die Entwicklung neuer Technologien – zum Beispiel Digitalisierung und Elektromobilität – weiter ansteigen.

Der auf den ersten Blick gering erscheinende Metallwert je Gerät von derzeit 1,11 € gewinnt erst aufgrund der schieren Menge der verkauften Geräte an Dimension. Insbesondere zeigt sich an der gesamten Wertigkeit, dass bereits über 85 % des Wertes eines Smartphones durch lediglich fünf Metalle (Ag, Au, Cu, Pd, Pt) generiert werden. Wenn eine Weiterverwendung und eine Reparatur von Mobiltelefonen und Smartphones nicht mehr möglich sind, sollten die Ge-

räte daher gemäß der Abfallhierarchie fachgerecht recycelt werden.

Um den globalen Rohstoffbedarf nachhaltig zu decken, sind große Herausforderungen beim Recycling der Rohstoffe in den Altprodukten zu bewältigen. Recycling ist für die Schadstoffentfrachtung sowie Rohstoffrückgewinnung aus Elektro(nik)altgeräten bereits ein wichtiger Weg, auch wenn zahlreiche Potenziale für das Recycling noch ungenutzt sind. Derzeit ist das Recycling der meisten Hochtechnologie-Metalle wie Indium, Tantal, Gallium, Germanium und der Seltenen Erden aus Smartphones nicht in großtechnischen Recyclinganlagen umgesetzt. Diese Metalle sind in zu geringen Mengen in den Produkten enthalten, dissipativ in den Geräten verteilt sowie zu komplex verbaut. In Anbetracht der zu geringen Rücklaufmengen und der heute großtechnisch verfügbaren Recyclinganlagen und -prozesse ist ein Recycling derzeit ökonomisch und auch ökologisch nicht für alle Metalle umsetzbar. Bei zunehmenden Masseströmen der IKT-Produkte könnte sich dies jedoch ändern. Ein direkter Vergleich der Metallinhalte aus primären und sekundären Lagerstätten, wie dies hier durchgeführt wurde, kann aufgrund verschiedener Faktoren lediglich ein Indiz für potenzielle Recyclingoptionen sein.

Selbst bei der Umsetzung sehr effektiver Recyclingtechnologien wird es jedoch weiterhin notwendig sein, auf primäre Rohstoffe zurückzugreifen, um den globalen Rohstoffbedarf decken zu können.

LITERATUR

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2020): Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff.; Hannover [Stand 10.09.2020]

BITKOM 2020: Deutsche horten fast 200 Millionen Alt-Handys. Pressemitteilung: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-horten-fast-200-Millionen-Alt-Handys> (abgerufen am 9.6.2020)

- BOOKHAGEN, B., BASTIAN, D., BUCHHOLZ, P., FAULSTICH, M., OPPER, C., IRRGEHER, J., PROHASKA, T., KOEBERL, C. (2020): Metallic Resources in Smartphones. *Resources Policy*. Vol 60. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101750>
- BOOKHAGEN, B., OBERMAIER, W., OPPER, C., KOEBERL, C., HOFMANN, T., PROHASKA, T., IRRGEHER, J. (2018): Development of a versatile analytical protocol for the comprehensive determination of the elemental composition of smartphone compartments on the example of printed circuit boards. *Analytical Methods*. <https://doi.org/10.1039/C8AY01192C>
- DERA – DEUTSCHE ROHSTOFFAGENTUR IN DER BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2019): DERA-Rohstoffliste 2019. – DERA Rohstoffinformationen 32: 116 S., Berlin. URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffliste-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 9.6.2020)
- DAMM, S. (2018): Rohstoffrisikobewertung Tantal. DERA-Rohstoffinformationen 31. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-31.pdf (abgerufen am 7.9.2020)
- EU COMMISSION (2020): A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European Economic and social committee and the committee of the regions. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_en_3.pdf (abgerufen am 7.9.2020)
- GRAEDEL, T.E., ALLWOOD, J., BIRAT, J.P., RECK, B.K., SIBLEY, S.F., SONNEMANN, G., BUCHERT, M., HAGELÜKEN, C. (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report ISBN 978-92-807-3161-3. <https://www.resourcepanel.org/reports/metal-recycling> (abgerufen am 7.9.2020)
- HAGELÜKEN, C. and CORTI, C.W. (2011): Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through ‘Design for Recycling’. *Gold Bulletin*
- REUTER, M. and VAN SCHAİK, A. (2012): Opportunities and limits of recycling: A dynamic-model-based analysis. *MRS Bulletin*. <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.57>
- REUTER, M. A., HUDSON, C., VAN SCHAİK, A., HEISKANEN, K., MESKERS, C., HAGELÜKEN, C. (2013): Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. ISBN: 978-92-807-3267-2. <https://www.resourcepanel.org/reports/metal-recycling> (abgerufen am 7.9.2020)
- REUTER, M.A., VAN SCHAİK, A., GUTZMER, J., BARTIE, N., ABADIAS-LLAMAS, A. (2019): Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. *Annu. Rev. of Mater. Res.* 49:253-274. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-010057>
- SCHMIDT, M., SCHÄFER, P. and RÖTZER, N. (2020): Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz. In: HOLM ET AL. (Hrsg.): Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz. Berlin: 2020.
- SCHULZ, K.J., DEYOUNG, J.H., BRADLEY, D.C. and SEAL II, R.R. (2017): Critical mineral resources of the United States – an introduction, In: SCHULZ, K.J., DEYOUNG, J.H., SEAL, R.R. and BRADLEY, D.C. (eds.). Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply: USGS Professional Paper 1802. <https://doi.org/10.3133/pp1802A>
- STATISTA – Dossier Smartphones. <https://www.statista.com/study/10490/smartphones-statista-dossier> (abgerufen am 7.6.2019)
- ÜBERSCHAAR, M., JALALPOOR, D.D., KORF, N., ROTTER, V.S. (2017): Potentials and Barriers for Tantalum Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment. *Journal of Industrial Ecology*. 21(3) 700–714. <https://doi.org/10.1111/jiec.12577>

IMPRESSUM

Herausgeber:

© **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Oktober 2020**

B1.1 Deutsche Rohstoffagentur (DERA)
in der Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)

Wilhelmstraße 25-30 | 13593 Berlin-Spandau

E-Mail: dera@bgr.de

www.deutsche-rohstoffagentur.de

www.bgr.bund.de