Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *120(2014), 81–96*

Axel Müller

Urban Mining von elektronischem Abfall – Herausforderungen aus der Sicht eines Geologen

Kurzfassung

Der Begriff „Urban Mining“ umschreibt die qualitative und quantitative Beurteilung und Gewinnung von Rohstoffen anthropogener Lagerstätten. Aufgrund des rasant steigenden Verbrauchs von kostbaren und kritischen Metallrohstoffen in der Elektronik- und Hochtechnologieindustrie, wie zum Beispiel Au, Ag, W, Co, REE, Pd, Ta, In Ga, und Ge, werden im zunehmenden Maße Möglichkeiten für die Aufbereitung und Wiedergewinnung dieser Sekundärrohstoffe aus elektronischen Abfall diskutiert und entwickelt. Die Hauptherausforderungen einer wirtschaftlichen Wiedergewinnung dieser Metalle sind eine funktionierende Einsammlungsinfrastruktur, eine verlust- und energiearme mechanische Trennung und Zerkleinerung von elektronischen Bauteilen, und die Entwicklung metallurgischer Technologien zur Extrahierung der Metalle. Am konkreten Beispiel der chemischen Zusammensetzung von Mobiltelefonen werden der gegenwärtige Stand und die Potentiale des Metallrecyclings diskutiert und mit Aufwendungen und Kosten der Gewinnung dieser Metalle durch konventionellen Bergbau verglichen.

1. Einleitung

Momentan steht unsere Gesellschaft am Anfang einer bedeutenden Verlagerung von der Nutzung natürlicher Rohstofflagerstätten zu anthropogenen Lagerstätten. Aufgrund dieser Entwicklung wurde der Begriff „Urban Mining“ oder urbaner Bergbau geprägt, der die qualitative und quantitative Beurteilung (Erkundung) und Gewinnung von sogenannten Sekundärrohstoffen anthropogener Lagerstätten umschreibt. Die technologische Entwicklung und Expansion des urbanen Bergbaus ist aufgrund des rasant steigenden Gebrauchs von kostbaren und kritischen Rohstoffen u.a. in der Elektro- und Hochtechnologieindustrie notwendig, um dem weltweit steigenden Lebens-

standard gerecht zu werden. Unter urbanem Bergbau ist vor allem das Recycling von stofflich und chemisch komplexen und schwer trennbaren Abfällen zu verstehen, ähnlich dem konventionellen Bergbau, bei dem Erzminerale aus meist polymineralisch zusammengesetzten Gesteinen mit Hilfe verschiedener Aufbereitungs- und metallurgischer Verfahren gewonnen werden. Das Recycling von monostofflichen und leicht trennbaren Abfällen, wie zum Beispiel Bauschutt, Schrott, Glas und Papier, wird schon seit längerem praktiziert; im Falle von Bauschutt und Metallen schon seit dem Altertum. Anders verhält es sich mit komplex zusammengesetztem, elektronischem Abfall, wie zum Beispiel Mobiltelefonen. Deren Recycling erfordert spezifische Aufbereitungstechniken und metallurgische Verfahren, für die es momentan nur Lösungsansätze gibt. Der Stand der Technologieentwicklung zur Verwertung von elektronischem Abfall entspricht jedoch bei weitem nicht den heutigen Anforderungen und der bestehenden Notwendigkeit. Das geringe ökonomische Interesse und damit das Zurückbleiben der Technologieentwicklung für die Aufbereitung von elektronischem Abfall führt dazu, dass einige westliche Industriestaaten, Schätzungen zu folge 50 bis 80 % des Elektronikschrottes in Schwellen- und Entwicklungsländer exportieren, wo der Abfall mit primitiven Mitteln und großer Belastung von Mensch und Umwelt und nur zu einem geringen Teil aufbereitet wird (z.B. Bock 2012).

Das momentan geringe industrielle Interesse an der Technologieentwicklung ist vor allem dadurch begründet, dass die Preise der primären Rohstoffe nach wie vor viel niedriger sind, als die Kosten für die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus elektronischem Abfall (z.B. Kausch et al. 2014). Ein Preisangleich wird frühestens in 10 bis 15 Jahren erwartet (Aussage von Stefan Gäth in Achtnich 2012). Der derzeitige Preisunterschied erstaunt jedoch, wenn man bedenkt, dass die Menge und der Wert des anfallenden elektronischen Abfalls in den letzten zwei Jahrzehnten stark angestiegen sind. Der Anstieg ist durch (1) den steigenden Anteil von elektronischen Geräten in Haushalten und der Industrie, (2) die kürzer werdende Produktlebensdauer und (3) die steigende Anzahl und Menge verwendeter, hochwertiger Elemente, sogenannter Technolgieelemente, verursacht. „Technologieelement“ ist ein beschreibender Begriff, der v.a. Edelmetalle und Spezialmetalle umfasst, die für die Produktion alternativer Energie und anderer Hochtechnologieanwendungen notwendig sind. Sie sind unentbehrlich für die technische Funktionalität aufgrund ihrer oft einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften, wie Leitfähigkeit, Schmelzpunkt, Dichte, Härte, katalytische,

optische und magnetische Eigenschaften. Sie werden in relativ geringen Mengen benötigt und oft in speziellen Legierungen.

„Kritische Elemente“ sind solche von hoher ökonomischer und strategischer Bedeutung und für die ein potentielles Versorgungsrisiko besteht. Dieses Risiko wird bestimmt durch die politische Stabilität der rohstoffproduzierten Länder und Gebiete und die Sicherheit der Versorgungswege. Die Rohstoffkritikalität ist somit eine geopolitische Evaluierung und keine geologische, das heißt die Menge der vorhandenen und bekannten Ressourcenmenge eines Rohstoffes ist nicht berücksichtigt. Neunzehn der 21 kritischen Rohstoffe sind Bestandteil von Mobiltelefonen.

Im Folgenden sollen am Beispiel des Mobiltelefons die chemische Komplexität und die damit verbundenen Herausforderungen der Aufbereitung sowie der gegenwärtige Stand der Technologieentwicklung aufgezeigt werden.

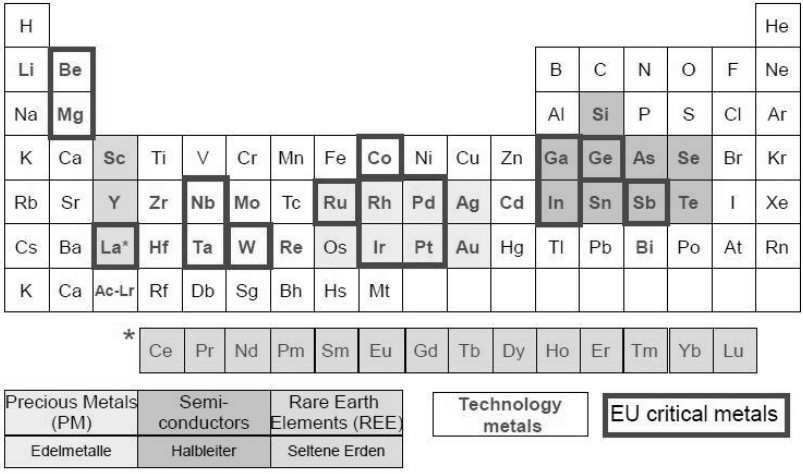

Abbildung 1. Periodensystem der Elemente (ohne Actinoide) in dem die Technologieelemente in roter Schrift hervorgehoben sind. Von den Seltenen Erden werden vor allem Nd, Gd, Tb und Dy als Technologieelemente bewertet. Eine Anzahl der Technologieelemente sind sogenannte kritische Elemente, die violett eingerahmt sind. Für Erklärung siehe Abbildung 2.

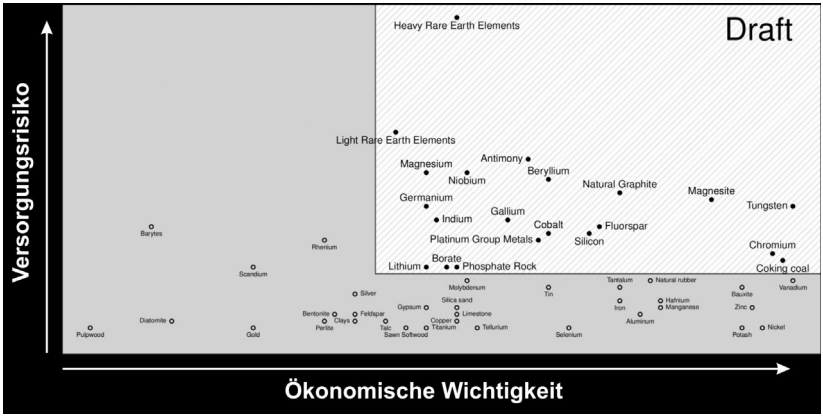

Abbildung 2. Entwurf der Europäischen Rohstoffkommission zur Kritikalität von Rohstoffen (Stand April 2014). Alle Rohstoffe bzw. Elemente, die sich im rot schraffierten Feld befinden, werden als kritisch bewertet. In die Bewertung der Rohstoffkritikalität gehen die ökonomische Wichtigkeit (x-Achse) und das potentielle Versorgungsrisiko (y-Achse) ein.

2. Die chemische Zusammensetzung von Mobiltelefonen

Mobiltelefone sind komplex zusammengesetzte Objekte in Bezug auf ihre Konstruktion und die verwendeten chemischen Stoffe, Elemente und deren Legierungen. Ihr Aufbau ist komplizierter als natürliche Gesteine und Erze, aus denen traditionell Metalle und andere Rohstoffe gewonnen werden. Hinzu kommt, dass die Bauteile klein sind und eine starke Größenvariation aufweisen, von zum Beispiel ca. 10 µm des sphärischen Graphits in der Mobiltelefonbatterie bis zum ca. 10 cm großen Plastikgehäuse. Die enorme Größenvariation, die komplexe Konstruktion und die Vielzahl der verwendeten Stoffe und Legierungen machen eine mechanische Trennung der einzelnen Stoffe praktisch unmöglich.

Abbildung 3 zeigt die Hauptbauteile eines Mobiltelefons. Jedes dieser Bauteile hat, abgesehen vom Plastikgehäuse, wiederum eine komplexe stoffliche Zusammensetzung. Als Beispiel ist der Aufbau des 10-mm großen Mikrovibrationsmotors in Abbildung 4 gezeigt. Dieser Motor besteht aus einem Gehäuse, zwei Leiterplatten, einem Neodymmagnet, der Motorwelle und deren Lager, einem Kommutator, zwei Schwingspulen, zwei Abtastbürsten und einem Gegengewicht.

Die in Abbildung 4 gezeigte chemische Zusammensetzung der einzelnen metallischen Bauteile wurde im Zusammenhang dieser Studie mit einem ana-

lytischen Rasterelektronenmikroskop Typ LEO 1450VP mit einem energiedispersiven Röntgenfluoreszenzspektrometer von Oxford Instruments bestimmt. Folgende zehn Metalle konnten als Hauptbestandteile (>3 Gew.-%) im Mikrovibrationsmotor nachgewiesen werden: Fe, Ni, Cu, Cr, Au, Ag, W, Pd, Nd, und Pr. Die meisten Metalle sind Bestandteil von Legierungen, wie z.B. der oberflächenvernickelte Neodymmagnet, das Nickel-Wolfram-Gegengewicht und die Silber-Palladium-Abtastbürsten. Solche künstlich geschaffenen Legierungen sind metallurgisch schwer trennbar. Das Beispiel verdeutlicht die stoffliche Komplexität in sehr kleinem Maßstab. Mit konventionellen Trennungsprozessen sind die Stoffe eines solchen winzigen Bauteils nicht zu trennen.

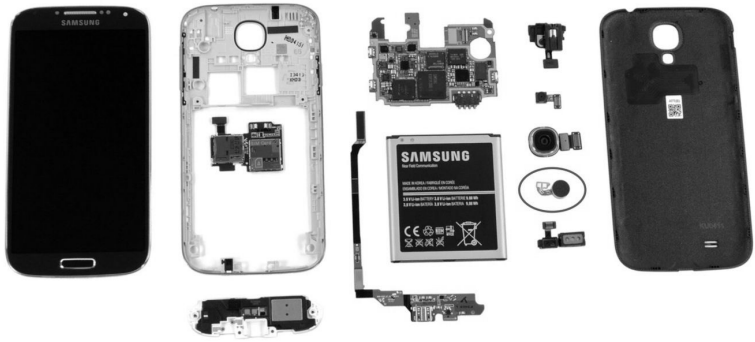

Abbildung 3. Ein Mobiltelefon, zerlegt in seine Hauptbauteile. Jedes Bauteil hat seinen eigenen komplexen Aufbau. Der des rot eingekreisten Mikrovibrationsmotors ist in der folgenden Abbildung 4 näher erklärt.

Aufgrund der stofflichen Komplexität ist es sehr aufwendig, die chemische Gesamtzusammensetzung eines Mobiltelefons über die Bestimmung der Zusammensetzung der einzelnen Bauteile zu berechnen. Das ist auch der Hauptgrund, dass Angaben über die Gesamtchemie von Mobiltelefonen in den öffentlichen Medien oft unvollständig oder ungenau sind. Müller (2013) publizierte eine komplette Liste aller im Mobiltelefon nachweisbaren Elemente am Beispiel von drei unterschiedlichen Mobiltelefontypen. Die Telefone und deren Lithium-Ionen-Batterien wurden getrennt analysiert. Die Herausforderung bestand darin, die Mobiltelefone und ihre Batterien auf eine kleinstmögliche Partikelgröße zu zerkleinern, da eine chemische Gesamtanalyse eine

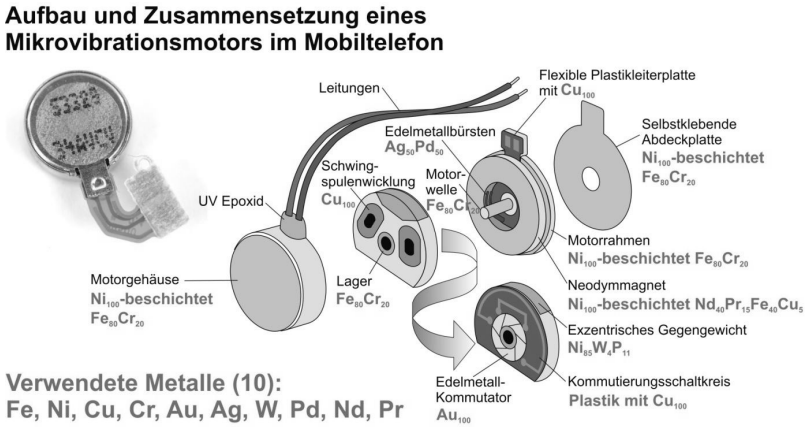

Abbildung 4. Aufbau eines Mikrovibrationsmotors im Mobiltelefon. Der Motor hat einen Durchmesser von 10 mm. Die tiefgestellten, blauen Zahlen entsprechen den Gehalten (in Gew.-%) der Metalle in den einzelnen Bauteilen. Der absolute Messfehler ist 3 Gew.-%.

Abbildung 5. Mobiltelefon vom Typ Nokia 5130 XpressMusic vor (links oben; Herstellerfoto) und nach der gepulsten Hochspannungsfragmentierung. Quelle: Müller (2013).

komplette Auflösung der Bauteile in einer Säuremixtur erfordert. Für die Zerkleinerung der Mobiltelefone und Batterien wurde die Methode der gepulsten Hochspannungsfragmentierung gewählt, die von der Schweizer Firma Selfrag mit durchgeführt wurde (Selfrag 2014). Das Resultat der Fragmentierung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 1 zeigt die Durchschnittskonzentrationen aller nachweisbaren chemischen Elemente >10 mg kg^{-1} in Mobiltelefonen und >2 mg kg^{-1} in Lithium-Ionen-Batterien. Insgesamt wurden 46 Elemente mit Konzentrationen >10 mg kg^{-1} in Mobiltelefonen nachgewiesen. Das entspricht 50% aller natürlich vorkommenden Elemente.

Die Masse dieser Elemente in einem Mobiltelefon ist verschwindet gering. Die gesamte Produktion von 1.806.964.700 Mobiltelefonen im Jahre 2013 (Gartner Inc. 2014) erforderte jedoch Rohstoffmengen von 36 t Au, 131 t Ag und 27.408 t Cu (Tabelle 1). Diese Mengen entsprechen 1.31 % der weltweiten bergbaulichen Goldproduktion von 2013 (2.770 t Au; USGS 2014), 0.49 % der Silberproduktion (26.600 t Ag; USGS 2014) und 0.15 % der Kupferproduktion (17.900.000 t; USGS 2014). Die Menge der Mobiltelefone macht diese zu einer anthropogen Rohstofflagerstätte sofern alle Mobiltelefone dem Recyclingsystem zugeführt werden und unter Berücksichtigung der Minimumfördergehalte im konventionellen Bergbau. Diese Gehalte entsprechen den Elementkonzentrationen in einem Gestein, die es zur abbauwürdigen Lagerstätte machen. Bestimmend sind dabei der Rohstoffpreis und die Abbau- und Aufbereitungskosten. Die Aufbereitungskosten von elektronischen Abfall sind jedoch nach wie vor viel höher als die des bergbaulichen Abbaus und demzufolge sind Minimumwiedergewinnungsgehalte für Metalle bis zu 40 mal höher als bergbauliche Fördergehalte (Tabelle 2; Hakelüken 2014).

In Tabelle 1 sind neben den Elementkonzentrationen auch die Anreicherung dieser Elemente in Mobiltelefonen und Batterien im Vergleich zur durchschnittlichen Zusammensetzung der kontinentalen Erdkruste nach Rudnick und Gao (2005) angegeben. Zum Beispiel sind die teuren Edelmetalle Au ca. 170.000 mal und Ag ca. 17.000 mal und das Übergangsmetall Cu ca. 7.000 mal in den Mobiltelefonen mehr angereichert als in der Erdkruste.

Mobiltelefon						**Lithiumbatterie**					
A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**A**	**B**	**C**	**D**	**G**	**H**
	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}		g	t		mg kg^{-1}	mg kg^{-1}		g	t
C	269.000	30.610	n.b.	21,251	38.399,8	C	264.333	13.796	n.b.	5.8153	10508.1
Cu	192.000	56.027	6.857	15,168	27408,0	Co	171.000	109.995	9884	3.7620	6797.8
Si	53.533	6.307	0	4,229	7641,9	Al	156.967	77.127	2	3.4533	6239.9
Fe	46.867	22.289	1	3,702	6690,2	Cu	102.433	44.356	3658	2.2535	4072.1
Ca	18.667	1.858	1	1,475	2664,7	Li	19.890	12.577	829	0.4376	790.7
Al	18.200	1.473	0	1,438	2598,1	Ni	18.710	25.021	398	0.4116	743.8
Ni	16.150	12.923	344	1,276	2305,4	Mg	12.367	6.841	1	0.2721	491.6
Sn	11.770	3.894	5.605	0,930	1680,2	Fe	10.267	2.350	0	0.2259	408.1
Zn	10.520	14.647	157	0,831	1501,7	Si	8.867	3.365	0	0.1951	352.5
Cr	5.860	1.782	64	0,463	836,5	K	5.667	3.215	0	0.1247	225.3
B	4.203	621	247	0,332	600,0	N	5.167	7.391	62	0.1137	205.4
Ba	3.700	608	6	0,292	528,2	F	5.067	1.762	9	0.1115	201.4
Nd	2.627	1.298	97	0,208	375,0	Mn	2.947	3.272	4	0.0648	117.2
Ti	1.933	777	5.039	0,153	276,0	Ca	2.700	794	0	0.0594	107.3
Mg	1.800	361	1.204	0,142	257,0	Sn	1.610	864	767	0.0354	64.0
Sr	1.663	1.522	5	0,131	237,4	Ti	1.567	1.069	4083	0.0345	62.3
P	1.633	403	2	0,129	233,2	P	1.520	407	2	0.0334	60.4
S	1.267	58	20	0,100	180,8	Cl	933	1.021	3	0.0205	37.1
Co	955	582	55	0,075	136,3	Na	890	779	0	0.0196	35.4
N	933	577	11	0,074	133,2	Ba	641	471	1	0.0141	25.5
Ag	915	526	17.264	0,072	130,7	Br	583	1010	365	0.0128	23.2
Mn	676	86	1	0,053	96,5	S	400	608	6	0.0088	15.9
Pr	654	299	92	0,052	93,4	Cr	377	111	4	0.0083	15.0
F	533	153	1	0,042	76,1	B	313	122	18	0.0069	12.5
Na	437	110	0	0,034	62,3	Zn	163	101	2	0.0036	6.5
Ta	409	203	455	0,032	58.4	Pb	145	197	9	0.0032	5.8
Cl	267	115	1	0,021	38.1	Nd	101	29	4	0.0022	4.0
Au	255	120	170.222	0,020	36.4	As	60	8	12	0.0013	2.4
W	190	127	100	0,015	27.2	Sr	40	17	0	0.0009	1.6

Mobiltelefon						**Lithiumbatterie**					
A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**A**	**B**	**C**	**D**	**G**	**H**
	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}		g	t		mg kg^{-1}	mg kg^{-1}		g	t
Dy	146	58	37	0,012	20.8	Au	35	16	23311	0.0008	1.4
Br	135	136	85	0,011	19.3	V	32	6	0	0.0007	1.3
Pb	106	15	6	0,008	15.2	W	27	32	14	0.0006	1.1
Li	105	57	4	0,008	14.9	La	23	14	1	0.0005	0.9
Gd	83	39	21	0,007	11.9	Pr	23	8	3	0.0005	0.9
Ge	79	54	57	0,006	11.3	Ga	21	10	1	0.0005	0.8
Mo	75	6	68	0,006	10.8	Se	16	8	176	0.0003	0.6
As	64	31	13	0,005	9.1	Sb	10	8	25	0.0002	0.4
In	56	48	995	0,004	8.0	Nb	10	3	1	0.0002	0.4
Ga	38	8	2	0,003	5.5	In	9	14	162	0.0002	0.4
V	36	10	0	0,003	5.1	Bi	7	7	44	0.0002	0.3
Sb	25	11	63	0,002	3.6	Mo	6	2	5	0.0001	0.2
Se	18	4	198	0,001	2.5	Dy	6	3	1	0.0001	0.2
Y	17	6	1	0,001	2.5	Ta	4	3	5	0.0001	0.2
La	14	4	0	0,001	2.0	Gd	4	1	1	0.0001	0.2
Ho	13	6	15	0,001	1.8	Y	3	0	0	0.0001	0.1
Sc	12	3	1	0,001	1.7	Sm	3	4	1	0.0001	0.1
Nb	10	4	1	0,001	1.4	Rb	2	2	0	0.0000	0.1

A Element
B Durchschnittskonzentration
C Standardabweichung
D normalisiert zur Durchschnittszusammensetzung der Erdkruste
E Gewicht des Elements in einem Telefon
F Gewicht des Elements in 1,8 Milliarden Telefonen
G Gewicht des Elements in einer Batterie
H Gewicht des Elements in 1,8 Milliarden Batterien

Tabelle 1. Durchschnittskonzentrationen der in drei verschiedenen Mobiltelefonen und deren Batterien vorkommenden Elemente. Ebenfalls aufgelistet sind Anreicherungen der Elemente im Vergleich zur durchschnittlichen Zusammensetzung der kontinentalen Erdkruste nach Rudnick und Gao (2005; mit einem korrigierten Goldwert von 0,0015 mg kg^{-1}), das Gewicht der Elemente in einem Mobiltelefon (79 g) und einer Lithium-Batterie (22 g) und die notwendig Tonnage der Element um 1.806.964.000 Mobiltelefonen herzustellen. Die Zahl entspricht der weltweit verkauften Mobiltelefone im Jahre 2013 (Gartner Inc. 2014).

Element	Durchschnittskonzentration in Telefon/ Batterie	Bergbaufördergehalt in Gestein	Wiedergewinnungsgehalt in E-Abfall	Abbau- und Aufbereitungskosten	Rohstoffpreise 2013
	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}		
Mobiltelefon					
Cu	192.000	8.000	120.000	3.500 U$/t	6.000 U$/t
Ni	16.150	10.000	keine Angaben	8.000 U$/t	15.000 U$/t
Sn	11.770	16.000	keine Angaben	10.000 U$/t	20.000 U$/t
Ag	915	350	50	10 U$/oz	20 U$/oz
Ta	409	300	Aufbereitung nicht entwickelt	?	300.000 U$/t (Tantaloxid)
Au	26	4	200	600 U$/oz	1.200 U$/oz
Lithium-Batterien					
Co	171.000	5.000	keine Angaben	5.000 U$/t	30.000 U$/t
Cu	102.433	8.000	120.000	3.500 U$/t	6.000 U$/t
Li	19.890	15.000	keine Angaben	Von Mineralien: 4.500 U$/t Von Brines: 2.000 U$/t	Batteriegrad Lithium karbonat/ hydroxid: 6.000 U$/t
Ni	18.710	10.000	keine Angaben	8.000 U$/t	15.000 U$/t
Sn	1.610	16.000	keine Angaben	10.000 U$/t	20.000 U$/t
Ta	4	300	Aufbereitung nicht entwickelt	?	300.000 U$/t (Tantaloxid)

Tabelle 2. Durchschnittszusammensetzung einiger wertvoller Elemente, die in Mobiltelefonen und ihren Lithium-Batterien enthalten sind. Die Daten sind verglichen mit konventionellen Minimumbergbaufördergehalten aus Gestein, den Minimum-Wiedergewinnungsgehalten aus elektronischen Abfall nach Umicore (Hagelüken 2014), den Bergbau- und Aufbereitungskosten (aus Gestein) und den durchschnittlichen Rohstoffpreisen. Bei allen Daten handelt sich um Annährungswerte für 2013, die aus verschiedenen bergbauindustriellen Quellen zusammengestellt wurden.

3. Aufgaben eines effektiven Recyclings von Mobiltelefonen

Momentan steht unsere Gesellschaft vor großen Herausforderungen, um die steigenden Mengen des anfallenden elektronischen Abfalls zu recyceln. Prinzipiell sind es sieben Parameter, die ein effektive, umweltfreundliche und gewinnbringende Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen aus Mobiltelefonen und anderen elektronischen Abfall bestimmen:

1. Ein Produktdesign, das die Trennung von Materialen erleichtert
2. Ein deckendes Netzwerk von Sammelstationen
3. Schaffen eines besseres Bewusstseins für Recycling in der Bevölkerung
4. Kontrolle und Transparenz des Recyclingkreislaufes
5. Entwicklung von verlustarmen und energieeffektiven Verfahren zu physikalischen Trennung von Materialien
6. Entwicklung von energie- und gewinnungseffektiven metallurgischen Verfahren oder umweltfreundlichen Leaching-Verfahren zur Trennung der Metalle
7. Ausreichende Recyclingkapazitäten

Zum heutigen Zeitpunkt ist jedoch keiner dieser Punkte voll erfüllt. Das liegt vor allem daran, dass der ökonomische Gewinn, das heißt der finanzielle Anreiz für die Profitsicherung der Privatindustrie derzeit zu gering ist, um die logistischen und technologischen Aufgaben zu erfüllen. Das Design von Mobiltelefonen ist nicht ausgelegt, um das Zerlegen in Einzelbestandteile zu erleichtern. Die bestimmenden Kriterien für das Produktdesign sind die Funktionalität und visuelle Attraktivität. Unzureichendes Bewusstsein der Designer bzw. die Auflagen der Industrie behindern nach wie vor ein Recyclingfreundliches Produktdesign. Das Netzwerk von Sammelstation ist in den westlichen Ländern momentan im Aufbau. In den meisten Ländern wird es aber noch Jahre dauern, bevor solche Netzwerke eingerichtet werden. In den Ländern, wo bereits ein mehr oder weniger funktionierendes Netzwerk von Sammelstellen besteht, wird es jedoch nur von wenigen Konsumenten genutzt. Weltweit werden nur 3 bis 5 % der Altmobiltelefone dem Recyclingprozess zugeführt, dass heißt, der Großteil der Mobiltelefone kommt erst gar nicht in den Recyclingkreislauf. Das Bewusstsein und die Einsicht der Notwendigkeit von Recycling sind bei der Bevölkerung nur im geringen Masse ausgeprägt; bessere Information und Aufklärung sind nötig. Von den 3 bis 5 % der abgelieferten Altmobiltelefone werden 50 bis 80 % in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert, wo sie mit einfachen Technologien und geringem Wiedergewinnungsgrad aufbereitet werden (z.B. Bock 2012). Demzufolge werden nur 1 bis 2 % der Altmobiltelefone der kompetenten Recyclingindustrie zugeführt. Eine Kontrolle und Transparenz des Recyclingkreislaufes sind notwendig, um den teilweise illegalen Export von elektronischem Abfall in Länder, in denen keine effektive und umweltverträgliche Recyclingindustrie existiert, zu verhindern. Das unprofessionelle Recycling von elektronischem Abfall birgt große gesundheitliche Gefahren für Menschen und die Schädigung von Umwelt. Elektronischer Abfall enthält neben den wiederge-

winnbaren Materialien auch einige toxische Stoffe wie As (64 mg kg^{-1}, Tabelle 1) und Pb (106 mg kg^{-1}; Tabelle 1). Auch Spuren (4 bis 10 mg kg^{-1}) von polychlorierten Biphenylen (PCB) wurden in den Plastikteilen von Mobiltelefonen nachgewiesen (Ottesen 2013). PCB sind krebsauslösende organische Chlorverbindungen, die bis in die 1980er Jahre in Kunststoffen und anderen Materialien verwendet wurden. Bei der Verschwelung von PCB können auch giftige Dioxine und Furane gebildet werden. Trotz des Anwendungsverbotes in der EU seit 1980 sind die PCB aufgrund des Plastik-Recyclingkreislaufes in geringen Mengen allgegenwärtig. Diese giftigen und umweltgefährdenden Stoffe müssen während der Aufbereitung isoliert und umweltverträglich entsorgt werden. Verfahren einer verlustarmen mechanischen Trennung und Zerkleinerung von elektronischen Bauteilen von Mobiltelefonen existieren momentan nur ansatzweise. Dasselbe gilt für die metallurgische Aufbereitung von elektronischem Abfall, wie im folgenden Kapitel naher erläutert ist.

4. Industrielle Vorreiter der metallurgischen Aufbereitung von Mobiltelefonen

Der treibende Faktor für die Entwicklung von Recyclingverfahren von elektronischem Abfall ist der Wiedergewinnungsgrad der Edelmetalle Au, Ag und Pd, sowie des Übergangsmetalls Cu. Diese Metalle werden auch als die „bezahlenden“ Elemente genannt. Laut Cui und Zhang (2008) decken die Edelmetalle 70% der Recyclingkosten von Mobiltelefonen im Falle einer hundertprozentigen Wiedergewinnung. Neuere Zahlen der “bezahlenden” Elemente und Stoffe in Mobiltelefonabfall sind: Plastik <1 %, Fe <1 %, Al <1 %, Cu 5 %, Au 81 %, Ag 6 %, und Pd 6 % (Hagelüken 2014). Das heißt, dass nur 4 Metalle 98 % der Recyclingkosten decken. Diese Metalle müssen aber eine bestimmte Minimumkonzentration im Abfall aufweisen (siehe Tabelle 2). Das Recycling von zusätzlichen Metallen bringt somit momentan keinen nennenswerten Gewinn, obwohl eine Reihe der verwendeten Technologiemetalle, wie In, Ta und Nd, teuer sind und als versorgungskritisch eingestuft werden (Abbildung 2). Der Grund liegt in der sehr geringen Konzentration der Technologiemetalle im Mobiltelefonabfall (weit unter 1 Gew.-%).

Die metallurgische Trennung von künstlich hergestellten Legierungen in Form von Kleinstbauteilen stellt nicht nur eine finanzielle sondern auch eine technologische Herausforderung dar. Die künstliche Anreicherung der Metalle und deren Legierungen im Mobiltelefonabfall widerspricht thermodynamischen Gesetzen, was deren Trennung sehr erschwert. Der Unterschied

zwischen natürlicher und künstlicher Anreicherung ist in Abbildung 6 am Beispiel der Seltenen Erden illustriert. Die Konzentrationen der Seltenen Erden in der kontinentalen Erdkruste und in Mobiltelefonen ist im Diagramm der Abbildung 6 gegen die der Chondrite normalisiert. Chondrite sind Meteorite, die annähernd der Durchschnittszusammensetzung des Universums entsprechen. Die relative gleichmäßige rote Linie entspricht der Durchschnittszusammensetzung der kontinentalen Kruste. Die gleichmäßige Anreicherung der Seltenen Erden ist durch die ähnlichen Eigenschaften der Seltenen Erden bedingt. Im Gegensatz dazu sind die Selten-Erd-Verteilungen der Mobiltelefone und deren Batterien sehr unregelmäßig. Fünf Seltene Erden sind dabei stark angereichert: Praseodym, Neodym, Gadolinium, Dysprosium und Holmium.

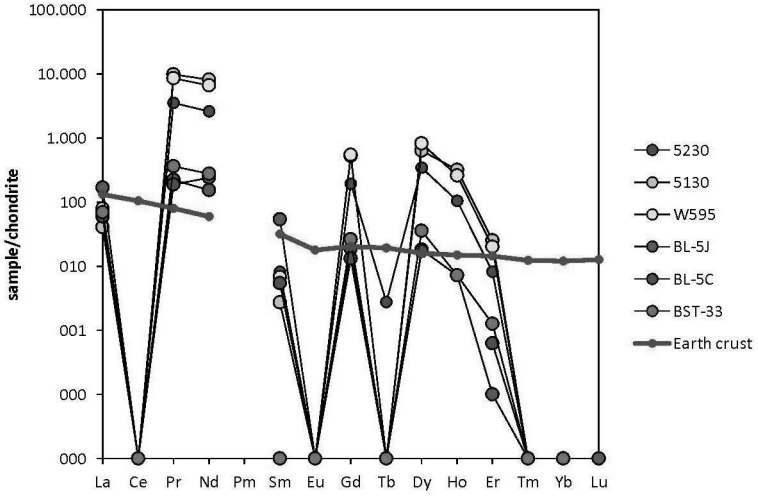

Abbildung 6. Seltene Erden Verteilung in der kontinentalen Erdkruste (rote Linie), in Mobiltelefonen (5230, 5130, W595) und deren Lithium-Ionen-Batterien (BL-5J, BL-5C, BST-33). Alle Werte sind normalisiert zur Zusammensetzung von Chondriten, welche die durchschnittliche Zusammensetzung des Universums repräsentieren. Quelle: Müller (2013).

Die Metalle, die sich während Schmelzaufbereitung an die „bezahlenden Metalle“ aufgrund thermodynamischer Gesetzmäßigkeiten binden, sind Te, Se und Bi sowie die Platingruppenmetalle Ru, Rh, Pd, Os, Ir und Pt (Hagelüken 2014). Relativ begrenzte Zusatzkosten entstehen bei die Extrahierung der unedlen Metalle Pb, Ni, Sn, Sb, (In, As), die jedoch zusätzliche Trennungs- und

Veredelungsprozesse verlangt. Hohe Zusatzkosten verursacht die Wiedergewinnung der Metalle Ta, Ga, REE, W, sowie eines Teil des In, die in die Schlacke eingehen. Dies erfordert eigene Schmelz-, Extrahierung- und Anreicherungsprozesse, die momentan nicht ökonomisch sind.

Der Vorreiter der metallurgischen Wiedergewinnung von Metallen aus elektronischen Abfall in Europa ist die belgische Firma Umicore (Umicore 2014). Umicores Schmelzwerk-Raffinerie in Hoboken in Antwerpen hat die Kapazität, 350.000 Tonnen elektronischen Abfall pro Jahr zu verarbeiten. Momentan kann die Anlage 17 Metalle (Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Cu, Pb, Ni, Sn, Bi, Se, Te, Sb, As, In) wiedergewinnen unter Anwendung speziell entwickelter metallurgischer Verfahren. Zusätzlich können Co und REE mit Hilfe spezifischer Prozesse aus Altbatterien gewonnen werden. Um die künstlich geschaffenen Metallverbindungen zu trennen, entwickelte Umicore zwei getrennte Verhüttungslinien: Eine für die Anreicherung der Edel- und Übergangsmetalle – die Kupferlinie – und eine für die Anreicherung der unedlen Metalle – die Bleilinie. Dabei werden die Eigenschaften von Cu und Pb ausgenutzt, andere Metalle zu binden. Edelmetalle wie Pd, Pt, Rh, Au und Ag binden sich an Cu. Die Spezialmetalle In, Bi, Se und Te binden sich an Pb.

Der zweite Akteur in Europa ist seit Januar 2012 die schwedische Bergbaufirma Boliden, die elektronischen Abfall mit der sogenannten Kaldo Technologie verwertet (Boliden 2014). Mit Bolidens Schmelzhütten in Rönnskär können 120.000 t elektronischen Abfalls pro Jahr recycelt werden. Die theoretische Recyclingkapazität entspricht 2 Millionen Mobiltelefonen pro Tag. Mit der Kaldo Technologie können jedoch nur Cu, Au und Ag wiedergewonnen werden.

In Asien agiert die japanische Recyclingfirma Dowa Eco-System Co., deren Schmelz- und Raffinerieanlagen in Kosaka in der Lage sind, 17 Metalle aus elektronischem Abfall wiederzugewinnen (Dowa Eco-Systems Co. 2014). Diese Firma entwickelte unter anderem Verfahren zur Wiedergewinnung von In aus LCT-Bildschirmen und Sb aus Siliziumhalbleiterplatten. Verfahren zur Wiedergewinnung von Nd und Dy sind in der Entwicklung. Dowa Eco-System Co. ist somit die Firma mit der weltweit besten Effektivierung der Abfallwirtschaft, die ihre Expertise jetzt auch in Thailand und Südostasien anwendet.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend muss gesagt werden, dass die energie- und gewinnungseffektive Aufbereitung von Mobiltelefonen erst in den Anfängen steckt und

weltweit qualifiziert nur von drei Firmen betrieben wird. Hinzu kommt, dass momentan nur ca. 1 bis 2 % der Altmobiltelefone dem Recyclingsystem zugeführt werden. Das liegt zum einen an der unzureichend oder nicht ausgebauten und nicht-transparenten Einsammlungslogistik und zum anderen am geringen Bewusstsein der Notwendigkeit von Altmobiltelefonrecycling. Vielleicht ist deshalb die Schublade momentan der beste Ort für die Lagerung von Altmobiltelefonen; zumindest solange, bis Einsammlungslogistik und Recyclingverfahren verbessert sein werden. Oder man schickt sein gebrauchtes Mobiltelefon direkt zu den Recyclinganlagen in Belgien oder Japan.

Danksagung

Der Autor dankt Jörg Matschullat und Bernd Müller für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Die Studie wurde finanziell unterstützt durch das EURARE Projekt der Europäischen Kommission „Entwicklung einer nachhaltigen Nutzung europäischer Seltene Erden Lagerstätten“ (http://www.eurare.eu).

Hinweis: Die farbigen Versionen der Abbildungen können der Präsentation zum Vortrag entnommen werden:
http://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2014/04/12-Mueller.pdf

Literaturverzeichnis

Achtnich T. (2012). Die Story im Ersten: Sklavenarbeit für unseren Fortschritt. ARD/SWR Filmdokumentation. Unter: < http://www.youtube.com/watch?v=NhY_WgQyhog> [Stand: 06.05.2014]

Bock C. (2012). Afrikas giftigste Müllhalde - Der Handel mit Elektroschrott in Ghana. Unter: <http://www.3sat.de/page/?source=/scobel/160141/index.html> [Stand: 06.05. 2014].

Boliden (2014). Recycling of electronic scrap. <http://www.boliden.com/Operations/Smelters/E-scrap-project/> [Stand 13.05.2014].

Cui J., Zhang L. (2008). Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A review. Journal of Hazardous Materials, 158: 228-256.

Dowa Eco-Systems Co. (2014). Dowa Eco-Systems - environmental management and recycling business. <http://www.dowa-eco.co.jp/en/recycle.html> [Stand 13.05.2014].

Gartner Inc. (2014). Gartner Says Annual Smartphone Sales Surpassed Sales of Feature Phones for the First Time in 2013. Unter: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2665715> [Stand 10.05.2014].

Hagelüken C. (2014). Exploiting our urban mine in electronic products – a good opportunity and a complex challenge. Tagungspräsentation NGU Dagen, Trondheim, 2. Februar 2014. Unter: <http://www.ngu.no/upload/Arrangement/ngudagen2014/hageluken.pdf> [Stand 10.03.2014].

Kausch P., Bertau M., Gutzmer J., Matschullat J. (Hrsg.)(2014) Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge. Springer Spektrum, Heidelberg, 281 S.

Müller A. (2013). The chemistry of the mobile phones Nokia Nuron 5230, Nokia 5130 and Sony Ericsson W595. NGU Rapport 2013.026.

Ottesen R.T. (2013). Verbotenes Umweltgift in Mobiltelefonen. <http://www.ngu.no/no/Aktuelt/2013/Forbudt-miljogift-i-mobiltelefoner/> [Stand 13.05.2014]. (in Norwegisch)

Rudnick R.L., Gao S. (2005). Composition of the continental crust. In: Holland H.D., Turekian K.K. (Editoren) Treatise on Geochemistry – The crust. S. 1-56.

Selfrag (2014). Selfrag – High voltage pulse power fragmentation. Unter: <www.selfrag.com> [Stand 10.05.2014]

Umicore (2014). Excellence in recycling. <http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/> [Stand 13.05.2014].

USGS (2014). Commodity statistics and information. Unter: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> [Stand 10.05.2014].