

Themenbereich A: Grundlagen
Themenblock 2: Umweltbezogenes Material- und Prozesswissen

A2.2

METALLE

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH

Autorinnen und Autoren:

Dirk Jepsen (Ökopol), Evelyn Schönheit (FÖP), Susanne Volz (Ökopol),
Dr. Olaf Wirth (Ökopol) und Till Zimmermann (Ökopol)

A2.2

METALLAUSWAHL

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Grundlegende Eigenschaften und Verwendungsbereiche von Metallen
 - 2.1 Vorkommen, Klassifizierung und Eigenschaften von Metallen
 - 2.1.1 Entwicklungstrends
 - 2.2 Verwendung von Metallen in Deutschland
 - 2.3 Kritikalität von Metallen
- 3 Recyclingsituation und Rezyklierbarkeit
- 4 Umweltwirkungen
 - 4.1 Primärproduktion
 - 4.2 Lokale und soziale Implikationen der Primärgewinnung
 - 4.3 Sekundärproduktion / Recycling
- 5 Fazit
- 6 Literaturverzeichnis

1 EINLEITUNG

Metalle sind heute praktisch allgegenwärtig. Von klassischen Massenmetallen wie Eisen bzw. Stahl, Aluminium und Kupfer bis zu sogenannten Technologiemetallen wie Indium, Gallium, Germanium oder Seltenen Erden finden sich Metalle in fast allen Produkten. Die globale Metallproduktion hat sich in den letzten 100 Jahren um fast das 20-fache gesteigert, während gleichzeitig die Anzahl technologisch relevanter Metalle aus dem Periodensystem deutlich gewachsen ist. Auf den Verbrauch und die Nachfrage von Metallen speziell in Deutschland wird in Abschnitt 1.2 näher eingegangen.

Die Anwendung von Metallen liegt in ihren Eigenschaften begründet. Bereits seit Jahrhunderten werden Eigenschaften wie Glanz, Härte, Zähigkeit und plastische Verformbarkeit geschätzt. Im Laufe der Zeit kamen Eigenschaften wie thermische und elektrische Leitfähigkeit und magnetisches Verhalten hinzu, die schließlich auch durch katalytisches Verhalten oder Halbleitereigenschaften ergänzt wurden. Die Entwicklung der Verwendung von Metallen ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

A2.2

2 GRUNDLEGENDE EIGENSCHAFTEN UND VERWENDUNGSBEREICHE VON METALLEN

2.1 VORKOMMEN, KLASSIFIZIERUNG UND EIGENSCHAFTEN VON METALLEN

Rund Zweidrittel aller in der Natur vorkommenden chemischen Elemente sind Metalle. Sie lassen sich auf verschiedene Weise kategorisieren:

- In Eisen- und Nichteisenmetalle, die weiter unterschieden werden in
 - In Leicht- und Schwermetalle und
 - In Edelmetalle und Buntmetalle, sowie
 - In Massenmetalle und Technologiemetalle.

Eisenmetalle umfassen typischer Weise Eisen und Legierungen mit einem Eisenanteil über 50 %, alle Metalle außer Eisen und Legierungen mit maximale 50 % Eisenanteil gelten entsprechend als Nichteisenmetalle. Nichteisenmetalle lassen sich weiter unterscheiden in Schwer- und Leichtmetalle, wobei typischer Weise eine Dichte von 5 g/cm^3 als Grenze angesetzt wird sowie in Edelmetalle (Gold, Silber, Platingruppenmetalle) und Buntmetalle (alle anderen Nichteisenmetalle wie Kupfer, Aluminium, Zink, Nickel, Kobalt usw.).

Etwas jünger ist die Einteilung in Massenmetalle und Technologiemetalle. Zu den Massenmetallen zählen Eisen und Stahl, Kupfer, Aluminium, Blei und Zink, die in vergleichsweise großen Mengen gefördert und angewendet werden. Unter Technologiemetallen werden typischer Weise solche Metalle gefasst, die in relativ geringen Mengen in Produkten eingesetzt werden und durch die besondere Funktionalitäten moderner Produkte erreicht werden können. Hierzu zählen beispielsweise Halbleitermaterialien wie Indium, Gallium und Germanium oder Metalle mit besonderen magnetischen Eigenschaften wie Neodym, Terbium und Dysprosium. Eine klare Definition für die Klassifizierung in Massen- und Technologiemetalle gibt es jedoch nicht, entsprechend lässt sich keine scharfe Einteilung vornehmen.

2.1.1 Entwicklungstrends

Historisch wurden Metalle lange Zeit in erster Linie als formgebende Werkstoffe in elementarer Form oder in einfachen Legierungen angewendet, beispielsweise in Werkzeugen oder Münzen, später beispielsweise im Fahrzeugbau. Mit fortschreitender technologischer Entwicklung stiegen die Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe bezüglich Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit, Verarbeitbarkeit usw. Metalle wurden zunehmend miteinander kombiniert und bisher nicht eingesetzte Metalle fanden Einzug in die Produkte. Heute beispielsweise ist Stahl fast immer mit Elementen wie Vanadium, Chrom, Mangan, Nickel, Niob oder Molybdän legiert. Aluminium wird

häufig mit Kupfer, Mangan, Silicium, Magnesium oder Zink legiert, Kupfer beispielsweise mit Zink, Zinn, Aluminium, Strontium, Eisen oder Blei. Durch zusätzliches Beschichten (Galvanisieren) von Metallen oder Kunststoffen mit beispielsweise Kupfer, Nickel, Chrom oder Zink können weitere technische und optische Eigenschaften erreicht werden.

In vielen Anwendungsbereichen wurden durch die neuen Materialkombinationen enorme Verbesserungen der Eigenschaften verwirklicht. Festere, zähere und härtere Legierungen ermöglichen längere Produktlebensdauern in einer Vielzahl von Anwendungen. Besonders leichte Legierungen ermöglichen moderne Leichtbauanwendungen in der Fahrzeugtechnik. Im Bereich der Permanentmagnete wurden erst durch die Anwendung von Samarium-Kobalt-Magneten und später von Neodym-Eisen-Bor Magneten die magnetischen Eigenschaften um Größenordnungen verbessert, was kompaktere Bauformen (beispielsweise von Elektromotoren) und höhere Leistungen (beispielsweise von Windkraftanlagen) ermöglicht. Im Bereich der Elektronik wurden durch neue Materialkombinationen kompaktere, leistungsfähigere Produkte ermöglicht, im Bereich der Photovoltaik erlauben moderne Halbleitermaterialien (Cadmium-Tellurid, Indium-Gallium-Di-Selenid, Germaniumarsenid) leichtere, flexibel einsetzbare Module mit hohen Leistungen für verschiedenste Anwendungen. In vielen heutigen Produkten sind viele verschiedene Legierungen und Materialverbindungen verbaut, wodurch verschiedenste Anforderungen erfüllt werden.

In zahlreichen dieser Anwendungen besteht ein direktes oder indirektes Potenzial Umweltwirkungen zu reduzieren. Produkte wie Windenergieanlagen, Photovoltaikzellen und Elektroautos sind elementare Bestandteile von Entwicklungsstrategien hin zu einer „Low-Carbon-Society“. Indirekte Potentiale ergeben sich beispielsweise durch reduzierte Gewichte (geringere Emissionen im Transport), längere Produkthaltbarkeit (reduzierter Ressourcenverbrauch) und höhere Effizienzen (niedrigerer Energieverbrauch).

Gleichzeitig ist der Entwicklungstrend von einfachen Metallen hin zu hochfunktionalen Legierungen mit verschiedenen Problematiken verbunden, auf die in gesonderten Abschnitten eingegangen wird:

- Mit der zunehmenden Anwendung einer Vielzahl von Metallen wachsen die Risiken, die im Falle eines Versorgungsengpases bestehen (--> Abschnitt 1.3).
- Die Vielzahl an Metallen, die zudem häufig in geringen Mengen und verschiedensten Kombinationen eingesetzt werden, lässt sich häufig nur schwierig separieren und bedeutet eine große Herausforderung für das Produktrecycling (--> Abschnitt 2).
- Die steigende Nachfrage und die entsprechende Produktion der nachgefragten Metalle führt zu signifikanten Umweltwirkungen (--> Abschnitt 3).

2.2 VERWENDUNG VON METALLEN IN DEUTSCHLAND

Für viele Metalle ist Deutschland einer der größten Verbraucher an Metallen: Bei Aluminium, Blei, Kupfer, Nickel und Zinn gehört Deutschland zu den fünf größten Verbrauchern weltweit (vgl. Abbildung 2). Ein besonders hoher Verbrauch Deutschlands zeigt sich auch bei verschiedenen Technologiemetallen wie Gallium und Germanium (Verbrauchsanteil Deutschland 15 bis 25 %; Erdmann und Behrendt 2011). Auch bei Palladium, Silber, Wolfram und Bismut liegt der Anteil Deutschlands am weltweiten Verbrauch bei über 10 % (Erdmann und Behrendt 2011).

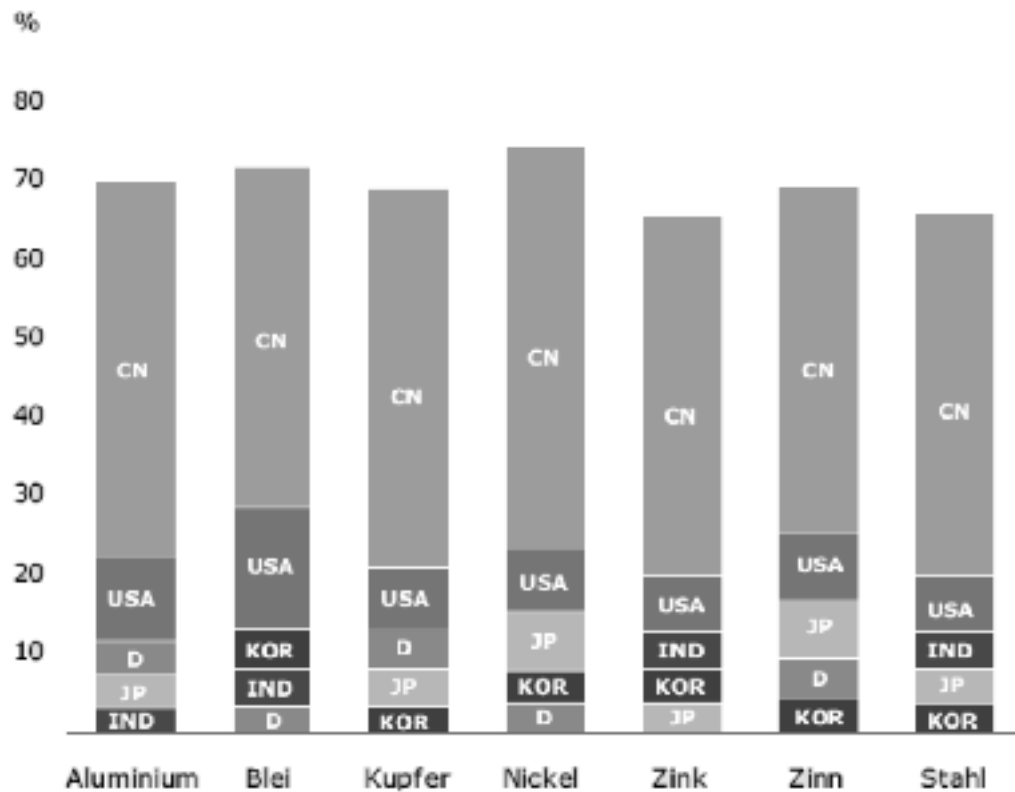


Abbildung 2: Globale Nachfrage im Jahr 2014¹ - Anteile der größten Verbraucher (BGR 2015)

2.3 KRITIKALITÄT VON METALLEN

Die wachsende Verwendung einer Vielzahl verschiedener Metalle (vgl. Abschnitt 1) führt zu einer zunehmenden Abhängigkeit der Rohstoffversorgung. Umgekehrt können Versorgungsengpässe signifikante Auswirkungen auf einzelne Unternehmen und ganze Wirtschaftszweige haben. Zur Bewertung dieser beiden Dimensionen, des Risikos eines Versorgungsengpasses und den potentiellen Auswirkungen eines solchen Engpasses hat sich die Methode der Kritikalitätsbewertung etabliert. Metalle mit einem hohen Versorgungsrisiko und gleichzeitig hohen potentiellen Auswirkungen eines Versorgungsengpasses werden als kritische Metalle bezeichnet. Die beiden Dimensionen werden jeweils mit verschiedenen Kriterien bewertet. Die potentiellen Auswirkungen werden anhand Kriterien wie unter anderem Anteil am Weltverbrauch, Sensitivität der Wertschöpfungskette, globale Nachfrageimpulse durch Zukunftstechnologien bewertet. Zur Bewertung des Versorgungsrisikos finden sich Kriterien wie Länderkonzentration der globalen Reserven, Unternehmenskonzentration der Produktion und Recyclingfähigkeit.

Für Deutschland wurde im Jahr 2010 eine Bewertung kritischer Rohstoffe durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt und wurden in sechs Zonen gegliedert: Eine Zone geringe Kritikalität (geringes Versorgungsrisiko, geringe Vulnerabilität) (Zone I), eine Zone mit geringem Versorgungsrisiko und hohe Vulnerabilität (Zone II), eine Zone mit hohem Versorgungsrisiko, geringer Vulnerabilität (Zone III), eine Zone mittlerer Kritikalität (mittleres Versorgungsrisiko, mittlere Vulnerabilität) (Zone IV), eine Zone hoher Kritikalität (Zone V) und eine Zone höchster Kritikalität (Zone VI). Als besonders kritisch (Zone höchster Kritikalität) wurden Germanium, Rhenium und Antimon identifiziert. In der Zone hoher Kritikalität finden sich unter anderem die Seltenen Erden, Wolfram, Indium, Gallium und Silber.

Metalle mit einem hohen Versorgungsrisiko und hohen potentiellen Auswirkungen im Falle eines Versorgungsengpasses (hier: Vulnerabilität genannt) haben u.a. eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit für enorme Preisschwankungen. Im Falle der Seltenen Erden sind beispielsweise die Preise in

A2.2

3 RECYCLINGSITUATION UND REZY- KLIERBARKEIT

Grundsätzlich lassen sich Metalle aufgrund ihrer inhärenten Eigenschaften beliebig oft recyceln. Die tatsächlichen Recyclingraten sind jedoch weit entfernt von einer vollständigen Kreislaufführung. In Tabelle 1 sind die Recyclingraten verschiedener Metalle aufgeführt. Es zeigt sich, dass bei zahlreichen Metalle, insbesondere den sog. Technologiemetallen, praktisch keinerlei Kreislaufführung stattfindet. Bei den Massenmetallen wie Blei, Eisen oder Aluminium sind die Recyclingraten deutlich höher, aber auch hier ist die Situation weit von geschlossenen Kreisläufen entfernt.

Tabelle 1: Recyclingraten verschiedener Metalle (Graedel et al. 2011)

Metall	Zeichen	EOL-RR
Blei	Pb	98-99%
Chrom	Cr	87-93%
Titan	Ti	93%
Eisen	Fe	97-99%
Zinn	Sn	75%
Platin	Pt	60-70%
Palladium	Pd	60-70%
Aluminium	Al	42-70%
Kobalt	Co	68%
Wolfram	W	10-66%
Nickel	Ni	57-83%
Rhodium	Rh	50-60%
Zink	Zn	19-60%
Niob	Nb	50-56%
Kupfer	Cu	40-50%
Mangan	Mn	91%
Rhenium	Re	45%
Silber	Ag	50-50%
Magnesium	Mg	30%
Molybdän	Mo	30%
Iridium	Ir	20-30%
Gold	Au	15-20%
Ruthenium	Ru	5-10%
Vanadium, Lithium, Zirkon, In- dium, Gallium, Germanium, Bismut, Tantal, Seltene Erden	V, Li, Zr, In, Ga, Ge, Bi, Ta, SRE (Y, Sc, La, Ce, Cr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)	<1%

Eine zentrale Voraussetzung für das Recycling ist die funktionierende Sammlung der Produkte am Produktlebensende. Doch auch wenn die Produkte im vorgesehenen Abfallstrom landen, kommt es in vielen Fällen nicht zu einer Rückgewinnung der enthaltenen Metalle. Hierfür gibt es verschiedene mögliche Ursachen:

- Das Metall dissipiert bereits in der Produktnutzung und steht für ein Recycling nicht zur Verfügung (bspw. Katalysatormaterialien).
- Die für das Produkt vorgesehene Recyclingroute zielt nicht auf ein Recycling des jeweiligen Metalls ab. Hierfür gibt es verschiedene mögliche Gründe, von denen in der Regel mehrere gleichzeitig auftreten:
 - Das Metall ist in einer Weise verbaut bzw. ins Produkt eingebracht, die eine Separierung und anschließende spezifische Behandlung erschwert oder unmöglich macht.
 - Das Metall ist in einer so geringen Menge im Produkt bzw. im Abfallstrom enthalten, dass kein ökonomischer Anreiz für eine Rückgewinnung besteht (Aufwand vs. Nutzen der Rückgewinnung).
 - Es stehen dem Recycler keine Informationen bzw. Erkenntnisse darüber zu Verfügung, welche Metalle im entsorgten Produkt enthalten sind.
 - Die üblichen Recyclingverfahren zielen auf die Rückgewinnung eines anderen Metalls ab (häufig Massen- und/oder Edelmetalle), was einer Rückgewinnung des betrachteten Metalls entgegensteht.

Es steht kein (ökonomisch rentabel durchführbares) Recyclingverfahren für das betrachtete Metall zur Verfügung.

Das Metallrad (Wheel-of-metals, Abbildung 4) veranschaulicht einige dieser Problematiken im Metallrecycling. Die Recyclingrouten für Metalle richten sich im Wesentlichen nach den Prozessrouten für die Primärgewinnung und bestehen folglich für die folgenden Metalle: Eisen (Fe), Aluminium (Al), Titan (Ti), Magnesium (Mg), Lithium (Li), Seltene Erden (RE), Strontium (Sr), Kupfer und Nickel (Cu, Ni), Blei (Pb), Zink (Zn), Nickel und Chrom (Ni, Cr) und Mangan (Mn) (innerer Kreis in der Abbildung). Innerhalb dieser Recyclingrouten besteht die Möglichkeit bestimmte andere Metalle ebenfalls zurückzugewinnen (grüne Punkte in der Abbildung). So kann im Kupferrecycling beispielsweise Gold (Au) oder Platin (Pt) zurückgewonnen werden. Für andere Metalle besteht in den verschiedenen Recyclingrouten jedoch keine oder nur eine eingeschränkte Möglichkeit zur Rückgewinnung (gelbe und rote Punkte). In der Kupferroute gilt dies beispielsweise für die Seltenen Erden (REs).

Die Metalle, die nicht zurückgewonnen werden, landen je nach Prozessroute und Eigenschaften in Schlacke, Stäuben oder als Verunreinigung im recycelten Metall. Im recycelten Metall können diese Verunreinigungen einen negativen Einfluss auf die Eigenschaften haben, so reduziert Kupfer als Verunreinigung im Stahl beispielsweise dessen Bearbeitbarkeit deutlich, reduziert Festigkeit und Schweißbarkeit.

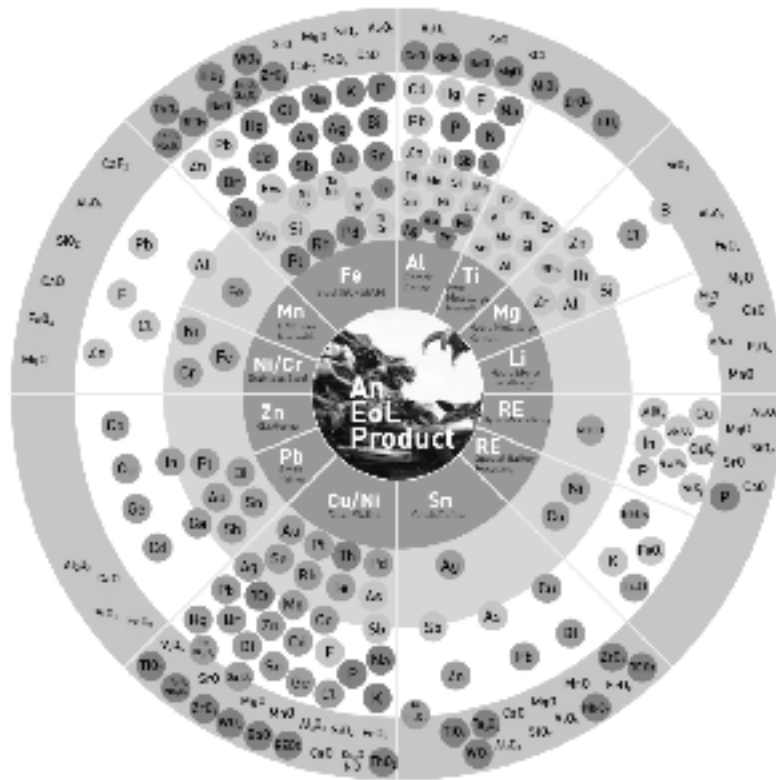


Abbildung 4: „Wheel-of-metals“ (Reuter et al. 2013)

4 UMWELTWIRKUNGEN

4.1 PRIMÄRPRODUKTION

Die Produktion von Primärmetallen gliedert sich typischer Weise in

- Erzabbau,
- Aufkonzentrierung/ Anreicherung,
- Raffination und
- Verhüttung.

jeweils mit verschiedenen möglichen Prozessrouten. Im Folgenden werden die Schritte der Primärproduktion am Beispiel von Aluminium erläutert.

Das wesentliche Rohmaterial zur Herstellung von Aluminium ist Bauxit, das in Bauxitminen abgebaut, angereichert und anschließend in mehreren Schritten zu Aluminium weiterverarbeitet wird. Den nächsten Schritt nach Abbau und Aufkonzentrierung stellt mit der Raffination die Gewinnung von Aluminiumoxid dar. Dies geschieht heute üblicherweise im Bayer-Prozess. Neben Bauxit wird in diesem Schritt Natriumhydroxid (NaOH) und Kalk benötigt. Zunächst wird aus dem Bauxit bei Temperaturen zwischen 100 und 350°C Aluminiumhydroxid gewonnen, das im Folgenden bei etwa 1.100°C kalziniert wird. Das Endprodukt der Raffination ist Aluminiumoxid (Al_2O_3), das als feinkörniges weißes Pulver vorliegt. Hierbei fällt sogenannter Rotschlamm an, ein Gemisch, das neben Natronlauge u.a. Eisen-, Aluminium- und Titanoxide, Silikate, Kieselsäureverbindungen, Schwermetalle und andere toxische Substanzen enthält, und das typischerweise in abgedichteten Deponien eingelagert wird. Im nächsten Schritt, der Verhüttung, wird aus Aluminiumoxid in einem elektrolytischen Prozess, dem Hall-Héroult Prozess, Aluminium gewonnen. Aus 1.920 bis 1.925 kg Al_2O_3 werden 1.000 kg Aluminium erzeugt. Weitere Rohmaterialien stellen hier Aluminiumfluorid (Na_3AlF_6) und die Kohlenstoff (Graphit)-Anode dar. Aus den verschiedenen Schritten dieser Prozesskette mit den jeweils benötigten Inputs (Energie, Material, Hilfs- und Betriebsstoffe) und Outputs (Emissionen und Abfälle) ergeben sich signifikante Umweltwirkungen.

Für die Gewinnung einer Tonne Aluminium werden z.B. in etwa folgende Inputmengen benötigt:

- Bauxit: 2.065-2.275 kg/t
- NaOH (50%): 30 -70 kg/t
- CaO: 30 - 80 kg/t
- Wasser 1.000-5.000 kg/t
- Energieverbrauch 7,6-11,7 GJ/t

Neben dem Energieverbrauch zeigt sich also auch ein hoher Wasserverbrauch. Gleichzeitig entstehen zwischen 1.000 und 3.000 kg Rotschlamm. Pro Kilogramm Aluminium werden dabei 8 bis 12 kg CO_2 ausgestoßen.

Entsprechend setzen sich auch bei anderen Metallen die Umweltwirkungen der Primärgewinnung aus den Energie- und Materialverbräuchen sowie den anfallenden Abfällen in den einzelnen Schritten der Prozesskette zusammen. Die Umweltwirkungen, die mit der Produktion (Abbau, Verhüttung, Raffination) von Metalle einhergehen, tragen signifikant zu den weltweiten Treibhausgasemissionen bei. So war beispielsweise in 2007 die Eisen- und Stahlproduktion für 30 % der globalen industriellen CO_2 Emissionen von 7,6 Gt CO_2 verantwortlich, die Aluminiumproduktion für 2 % (IEA 2010). Dies ist u.a. in einem hohen Energieverbrauch der Metallproduktion begründet, so war bspw. die Eisen- und Stahlindustrie in 2009 der zweitgrößte industrielle Verbraucher von Energie (IEA 2012). Abbildung 5 veranschaulicht die Beiträge der verschiedenen Metalle zu den gesamten THG-Emissionen und dem gesamten KEA der Metallproduktion. Den größten Beitrag leisten hier die Massenmetalle Eisen und Stahl, Aluminium und Kupfer.

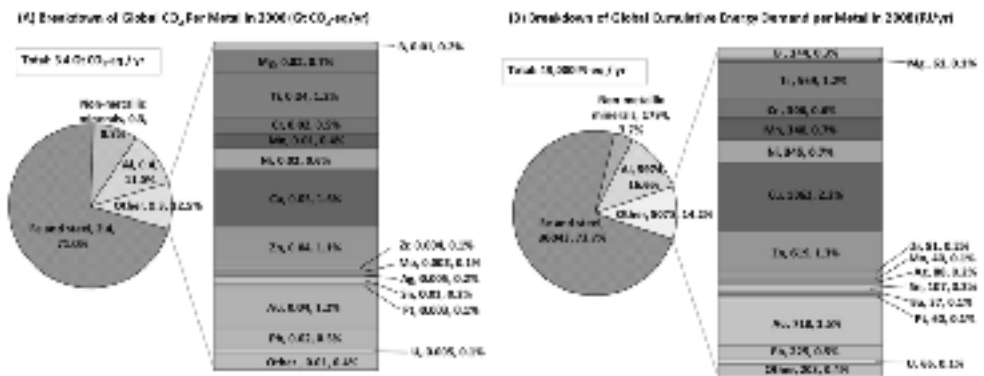


Abbildung 5: Globale CO₂ Emissionen und KEA nach Metallen (Nuss und Eckelman 2014)

Auch wenn sie nicht absolut zu den größten Erzeugern von THG-Emissionen zählen, sind die meisten Technologiemetalle jedoch mit noch höheren Umweltwirkungen pro Masseneinheit verbunden als die Massenmetalle Eisen oder Aluminium. Abbildung 6 zeigt die Treibhausgaspotentiale verschiedener Metalle im Periodensystem der Elemente bezogen auf ein Kilogramm Metall. Hier zeigen die Edelmetalle (Platingruppenmetalle und Gold) das höchste Treibhauspotential, während sich Eisen, Mangan und Titan eher am unteren Ende finden (Nuss und Eckelman 2014)

H																	He
Li	Be	Transition Metals										B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La-Lu*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac-Lr**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
*Group of Lanthanide		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
**Group of Actinide		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Abbildung 6: Treibhausgaspotentiale von Metallen im Periodensystem der Elemente (Nuss und Eckelman 2014)

4.2 LOKALE UND SOZIALE IMPLIKATIONEN DER PRIMÄRGEWINNUNG

Bezogen auf ein einzelnes Produkt haben insbesondere die spezifischen Treibhausgaspotentiale wie in Abbildung 6 dargestellt Relevanz, wobei zu beachten ist (und in den entsprechenden Themenpapieren beschrieben ist), dass das Treibhauspotenzial nur eine von vielen Umweltwirkungen darstellt, obgleich es in der öffentlichen Diskussion eine besonders wichtige Rolle hat.

4.3 SEKUNDÄRPRODUKTION / RECYCLING

Die Sekundärproduktion von Metallen aus dem Recycling von Schrotten, entsorgten Produkten etc. ist meist mit geringeren Umweltwirkungen verbunden als die Primärproduktion. Dies betrifft sowohl die eher globalen Umweltwirkungen wie den Beitrag zum Klimawandel als auch die im vorherigen Abschnitt beschriebenen lokalen ökologischen und sozialen Wirkungen.

Dies ist für den Produktdesigner auf zweierlei Weisen von Relevanz. Auf der Inputseite, der Materialauswahl für das Produkt, besteht durch die Verwendung von Sekundärmaterialien die Möglichkeit Materialien mit deutlich reduzierten Umweltwirkungen zu wählen. Auf der Outputseite, als in Hinblick auf eine spätere Entsorgung des Produkts, besteht die Möglichkeit sich für Materialkombinationen zu entscheiden, die sich später auch einem (hochwertigen) Recycling zuführen lassen und somit am Produktlebensende dazu beitragen, Primärmetalle durch Sekundärmetalle zu substituieren. Komponenten aus verschiedenen Metall (-kombinationen) sollten so verbunden sein, dass sie sich problemlos am Lebensende separieren lassen (vgl. Ausführungen in Abschnitt 2).

Die Umweltwirkungen im Recycling setzen sich aus den Schritten der Sammlung, Sortierung, Aufbereitung und stofflichen Rückgewinnung zusammen. Typischer Weise sind diese Schritte jedoch mit deutlich geringeren Umweltwirkungen als die Primärgewinnung verbunden. Die Umweltvorteile, die durch das Recycling entstehen, sind von Metall zu Metall unterschiedlich. Die Sekundärproduktion von Kupfer benötigt beispielsweise etwa 40 % weniger Energie als die Primärproduktion. Bei Aluminium und den Platingruppenmetallen fallen die Unterschiede noch deutlicher aus. Hier benötigt die Sekundärproduktion nur etwa 5 % der Energie der Primärproduktion. Entsprechende Vorteile zeigen sich bei den Treibhausgasemissionen und anderen Wirkungskategorien.

A2.2

5 FAZIT

Die ökologischen und sozialen Auswirkungen, die sich aus dem Einsatz von Metallen ergeben sind komplex und vielschichtig. Bezüglich der Material- bzw. Metallauswahl ist nicht nur entscheidend, wie die geforderten Materialeigenschaften am besten erreicht werden können, sondern auch, welche Umweltwirkungen sich aus dem Einsatz der gewählten Metalle ergeben. Grundsätzlich ergeben sich die Umweltwirkungen aus der Gesamtheit aller Lebensabschnittsphasen, so dass auch ein eventueller Umweltnutzen während der Nutzungsphase (z.B. durch Leichtbau o.ä.) berücksichtigt werden sollte.

Dennoch kann durch die Beantwortung der nachfolgenden, grundsätzlichen Fragen ein umweltfreundlichere Metallauswahl erreicht werden:

- Umweltwirkungen des Materialeinsatzes:
 - Können (alternativ) Metalle eingesetzt werden, deren Rohstoffabbau und Grundmaterialherstellung mit geringeren Umweltwirkungen verbunden sind?
 - Sind Metalle mit zertifizierter Rohstoffherkunft verfügbar?
- Rezyklierbarkeit des Produktes
 - Kann durch das Produktdesign verhindert werden, dass durch Legierungsbestandteile oder gemeinsam im Produkt enthaltenen Metalle Ausbeute oder Qualität des Metallrecycling beeinträchtigt werden
- Ist durch das Nutzungssystem der gestalteten Produkte gewährleistet, dass die Metallanteile in den Produkten nach dem Ende des Lebensweges tatsächlich einem gezielten Metallrecycling zugeführt werden?

A2.2

6 LITERATURVERZEICHNIS

BGR (2015): Deutschland – Rohstoffsituation 2014. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Erdmann, Lorenz; Behrendt, Siegfried (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Final report. Hg. v. kfw Bankengruppe. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Berlin. Online verfügbar unter www.kfw.de/kfw/de/1/II/Download_Center/Fachthemen/Research/PDF-Dokumente_Sonderpublikationen/Rohstoffkritikalitaet_LF.pdf, zuletzt geprüft am 30.12.2011.

Graedel, Thomas E.; Allwood, Julian M.; Birat, Jean-Pierre; Buchert, Matthias; Hagelüken, Christian; Reck, Barbara K. et al. (2011): Recycling Rates of Metals. A Status Report. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.

IEA (2010): Energy technology perspectives 2010. Paris: OECD/IEA.

IEA (2012): Energy technology perspectives 2012. Pathways to a Clean Energy System. Paris: OECD, IEA.

Nuss, Philip; Eckelman, Matthew J. (2014): Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. In: *PLoS ONE* 9 (7), S. e101298. DOI: 10.1371/journal.pone.0101298.

Reuter, Markus A.; Hudson, Christian; Hagelüken, Christian; Heiskanen, Karl; Meskers, Christina E.M.; van Schaik, Antoinette (2013): Metal Recycling. Opportunities, Limits, Infrastructure. UNEP report. Unter Mitarbeit von Helmut Antrekowitsch, Jürgen Antrekowitsch, Diran Apelian, Bo Björkman, Bart Blanpain, Françoise Bodenat et al. Nairobi: United Nations Environment Programme.

Zimmermann, Till (2015): Cycles of Critical Metals: Dissipative Losses and Potential Optimizations: Bremen, Universität Bremen, Diss., 2015.



Impressum

Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes
im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens FKZ 371295303

durch

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH, Nernstweg 32–34, 22765 Hamburg
Tel.: +49 (0)40/39 100 2-0; Fax.: +49 (0)40/39 100 2-33; Internet: www.oekopol.de