

Rohstoffverknappung bei Metallen?

von

Peter Paschen

Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten;
Grundlagen der Rohstoffversorgung, Heft 9,
Neue Rohstoffe für neue Technologien - Symposium in Wien
am 21. und 22. März 1988, Wien 1988.

Rohstoffverknappung bei Metallen?

P. Paschen

1. Versorgungssituation

Dieser Bericht beschränkt sich auf mineralische Rohstoffe und bei den mineralischen Rohstoffen auf diejenigen, die zur Metallgewinnung dienen. Es werden also weder Energierohstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran) noch die auch in der deutschen Sprache so genannten "non-metallic minerals" behandelt - etwa vom Asbest bis zum Flußspat.

Als Anfangsbemerkung mag dienen, daß das Vorhandensein von Metallen auf der Erde mit dem "Clarke-Wert" angegeben wird, der Angabe in Gramm pro Tonne (g/t) oder ppm als Durchschnittsgehalt in der Erdkruste, wobei eine Konvention besagt, daß mit "Erdkruste" die obersten 16 km von der Erdoberfläche aus nach innen bezeichnet werden. Dieser Clarke-Wert erscheint für alle Metalle mit ausreichender Genauigkeit festzustehen.

Tabelle 1 gibt in der Spalte 2 den Clarke-Wert an. Macht man sich die Mühe, die Tonnage dieser 16 km dicken Erdkruste, also dieses 16 km dicken Kugelmantels auszurechnen, so kommt man auf $22,2 \cdot 10^{18}$ t - selbstverständlich eine unvorstellbar große Zahl (im deutschen Sprachgebrauch 22,2 Trillionen Tonnen). Die Gehalte der Metalle in der Erdkruste in g/t mit dieser Erdmantelmasse multipliziert, ergibt die rein physisch vorhandene Menge an Metallen in der Erdkruste, Spalte 3 in der Tabelle. Vor der Tonnage erscheint die Reihung. Silizium ist vor Aluminium, Eisen, Magnesium und Titan das am häufigsten vertretene metallische Element auf dieser Erde. Auf den Plätzen 6 bis 10 erscheinen - vielleicht für viele doch etwas überraschend - Mangan, Zirkon, Vanadium, Chrom und Nickel, im wesentlichen also Stahlveredler.

Die großen Nichteisenmetalle Zink und Kupfer folgen dahinter. Gallium erwartet man sicher nicht so weit vorne und Zinn, Silber und Gold vielleicht doch nicht so weit hinten.

In der Spalte 4 dieser Tabelle ist der Verbrauch an den Metallen im Jahre 1985 angegeben, so daß sich durch Division der Spalte 3 durch Spalte 4 eine statistische Gesamtverfügbarkeit ergibt, die gültig wäre, wenn man die gesamte Erdkruste ausbeuten könnte. Interessanterweise steht in der Reihenfolge der Spalte 5 nunmehr das Gallium an erster Stelle, gefolgt vom Silizium, Magnesium, Zirkon und Hafnium (!) mit 10, 12 Jahren. Im Bereich von 10^9 Jahren liegen die

Hauptgebrauchsmetalle Eisen und Aluminium, alle Stahlveredler außer Molybdän, die Platinmetalle (!) sowie die Nebenmetalle Germanium, Indium, Arsen, Wismut, Selen. Es fällt auf, wie hoch der Zirkon- und Hafniumgehalt der Erdkruste ist. Zu den schwächer vertretenen Metallen gehören Blei, Gold, Antimon.

In eine realistischere Größenordnung werden diese Zeiträume gebracht, wenn man die zur Zeit bekannten Erz-Reserven der einzelnen Metalle darstellt. Das hierbei entscheidende Kriterium ist das Wort "Erz". Damit wird eine über den Durchschnitt (Clarke-Wert) hinausgehende Anreicherung eines Metalls (meist nur in einer Teufe bis 2000 Meter) bezeichnet, aber nur dann, wenn aus dieser Anreicherung heraus das Metall wirtschaftlich gewinnbar ist. Hiermit wird eine Grenze definiert, die fließend ist.

Die wirtschaftliche Gewinnbarkeit bedeutet nichts anderes, als daß die Erlöse für den Verkauf des Metalls höher sein müssen als die Kosten einer Herstellung. Daß sich diese Grenze eigentlich ständig verschiebt, wird klar, wenn man an kostensenkende Einflüsse wie

- technisch-wirtschaftlicher Fortschritt der Gewinnungsmethoden,
- "economy of scale"
- Energiepreissenkungen,
- Rationalisierung/Mechanisierung/Automatisierung,

oder an kostensteigernde Einflüsse wie

- Lohnerhöhungen, Streiks,
- Sozialgesetzgebung,
- Umweltgesetzgebung,
- künstliche Verknappung

denkt.

Die Veränderung der Grenze, ab der man von einem "Erz" spricht, wird besonders sinnfällig am Beispiel des Kupfers. Noch vor wenigen Jahrzehnten lag die Grenze bei 1 % Cu, heute nähert sich sich 0,1 %.

Ein weiterer entscheidender Unterschied zwischen Spalte 6 und Spalte 3 in Tabelle 1 ist nicht qualitativ ("wirtschaftliche" Gewinnbarkeit), sondern quantitativ. Es sind heute bei weitem nicht alle Erzlagerstätten bekannt, und von der Teufe her haben wir die Erde überhaupt erst ein bißchen angekratzt. Es wäre auch vollkommen sinnlos, mit dem Geld von 1988 die Prospektion für 2088

durchzuführen. Im allgemeinen gibt man sich mit einem Zeitabschnitt von 20, 30 oder 50 Jahren zufrieden.

Man kann die durch Division der Spalte 6 durch die Spalte 4 errechnete Verfügbarkeit eines Metalls in Jahren also immer nur auf den jeweiligen Zeitpunkt beziehen, hier "Wert 1986". Dies nicht beachtet zu haben, war einer der Fehler des Berichts des ersten Clubs von Rom.

Die Spalte 7, die so definierte statistische Verfügbarkeit 1986, weist für die Metalle Silizium, Magnesium, Kobalt Zeiträume von über 100.000 Jahren aus, über 1000 Jahren liegen Gallium, Germanium, Selen, Titan, Tellur, Zirkon, Hafnium, Chrom und Aluminium. Am unteren Ende der Skala liegen zur Zeit Silber, Quecksilber, Blei, Indium, Tantal, Wismut, Zink und Gold (alle weniger als 50 Jahre).

Bei allem bisher Gesagten ist noch nicht eine einzige Tonne eines wiederverwerteten Metalls berücksichtigt, das ganze sogenannte "Recycling". Jede Tonne aus Schrott rückgewonnenen und wieder verwerteten Metalls streckt die Erzreserven im gleichen Maße. Bei einer Recyclingquote von 50 % verdoppeln sich schon die Verfügbarkeitsjahre. An der Verbesserung und der Vervollständigung der Wiedergewinnungsverfahren ("Sekundärmetallurgie") wird zur Zeit intensiv gearbeitet, obwohl bei manchen Metallen die Gewinnung aus Erzen ("Primärmetallurgie") zur Zeit billiger ist als auch nur die Schrottsammelaktion! Die Recyclingquoten liegen heute bei den Hauptmetallen zwischen 20 % bei Zink und 50 % bei Blei.

Ein weiteres Regulativ in der Versorgungssituation ist der Preis des Metalls. Trotz zahlreicher Kartellierungsversuche (das bisher größte Desaster solcher Art Preisabsprachen war der Zusammenbruch des Zinnkartells 1985), politisch-militärisch bedingter Lagerhaltungen (sogenannte strategische Reserven), Notenbankhortungen (vor allem bei Gold), Zoll- und Binnenmarkthochpreispolitik verschiedener Länder - trotz allem funktioniert erstaulicherweise auf den internationalen Metallmärkten noch das eherne Gesetz von Angebot und Nachfrage. Dies hat zwar für Hartwährungsländer offenkundige Nachteile, da die bedeutenden Metallbörsen in den Ländern liegen, deren Währungen immer wieder zu eklatanten Schwächeanfällen neigen (England, USA, Malaysia), hat aber für die Ressourcenschonung auch einen ungeheuren Vorteil. Sobald wirklich einmal ein wichtiges Metall knapp zu werden droht, steigt sein Preis. Der höhere Preis macht dann auch ärmere Erze wirtschaftlich gewinnbar - die als "Erz" klassifizierten Vorräte steigen, die Verknappung bildet sich (zumindest zunächst auf höherem Preisniveau) zurück.

Aus allen vorgestellten Zahlen läßt sich unter den Metallen kein einziger "nicht ausreichend verfügbarer Rohstoff" ausmachen, und somit auch keine daraus resultierende Substitutionstendenz. Es kann also in bewußter Kontradiktion zum Club von Rom gesagt werden: "Die Metallvorkommen dieser Welt sind unerschöpflich".

2. Substitutionstendenzen

Trotzdem gab es in der Vergangenheit immer wieder zeitlich begrenzte Versorgungsengpässe, und das wird wohl auch in Zukunft immer einmal wieder vorkommen. In solchen Situationen wird es dann zur Substitution eines Metalls durch einen anderen Stoff (in vielen Fällen durch ein anderes Metall) kommen. Es soll aber betont werden, daß eine solche Substitution nicht unmittelbar aus der Verknappungssituation ("short supply") erwächst, sondern aus dem erhöhten Preis.

Für eine bestimmte Anwendung wird ein Metall einfach zu teuer, und wenn man nicht mehr durch einen Minderverbrauch dieses Metalls bei der Herstellung desselben Fertigteils gegensteuern kann (Beispiel: Verminderung der Schichtdicke bei der Stahlblechverzinkung oder -verzinnung), dann versucht man auf billigere Materialien auszuweichen. Man nennt dies "preisinduzierte" Substitution. Unter diesem Aspekt sind die folgenden Betrachtungen zu sehen.

Es darf nicht vergessen werden, daß Substitution auch immer mit Umstellungskosten verbunden ist, die durch einen angemessenen Vorteil des neuen Materials aufgewogen werden können. Vielfach liegt die Substitutionsschwelle so hoch, daß scheinbar längst fällige Umstellungen nur sehr langsam in Gang kommen.

Hauptmetalle

Bei Eisen, besser gesagt, bei Massenhählen, ist keine preisinduzierte Substitution zu erwarten. Baustähle werden wahrscheinlich aus Qualitätsgründen (Korrosion) gewisse Einbußen hinnehmen müssen; sie können z.T. durch neue, preiswerte nichtrostende Stähle wie 3Cr12 (12 % Cr) ersetzt werden. Die Substitution von Stahl durch Leichtmetalle im gesamten Verkehrssektor beruht auf der Gewichtsersparnis und dem dadurch verringerten Kraftstoffverbrauch.

Aus dem gleichen Grund beginnt eine gewisse Substitution von Aluminium im Flugzeugbau durch Carbonfaserwerkstoffe und Metall-Kohlenstoffaserkombination. Hier wird substituiert, obwohl der neue

Werkstoff teurer ist! - Die Umweltgesetzgebung in den hochindustrialisierten Ländern wird die Primäraluminiumerzeugung wegen der höheren Strompreise verteuern, ja, zum Teil vernichten (Beispiel Japan). Ob daraus eine gewisse Substitution des Aluminiums in den Weiterverarbeitungsprodukten entstehen wird, ist nicht undenkbar.

Kupfer ist als typisches Börsenmetall in seinem Preis sehr konjunkturunabhängig. Jedoch hat 1984/85 der Kupferpreis seine Funktion als Knappheitsindikator in vielen Ländern eingebüßt. Preissteigerungen waren nicht Ausdruck realer Veränderungen auf der Angebotsseite, sondern vor allem Konsequenzen gravierender Wechselkursänderungen. Dieses Problem gilt im übrigen für alle Metalle. Hierdurch können preisinduzierte Substitutionen ausgelöst werden, die aber auch gar nichts mehr mit Verknappungserscheinungen zu tun haben.

Kupfer ist wegen seiner hohen Dichte gefährdet, weil für dasselbe Fertigteil mehr Masse bezahlt werden muß. Zu dem klassischen Substitutionsbeispiel der Hochspannungsleitungen (durch Aluminium) kommt das moderne der Nachrichtenübertragung (durch Glasfaser). Durch die Vielzahl seiner guten Eigenschaften wie Leitfähigkeit, Umform- und Zerspanbarkeit, Korrosionsbeständigkeit und nicht zuletzt auch durch seine schöne Farbe wird Kupfer aber für vieles unersetzlich bleiben.

Der Kupfermarkt war noch vor 1 Jahr durch Überkapazitäten und Preisverfall gekennzeichnet. Selbst Stilllegung von Bergwerkskapazitäten in den USA führte kaum zum Preisanstieg, da Chile mit seinen weltniedrigsten Gewinnungskosten und seiner schwachen Währung den Weltmarkt überschwemmt. Kupfer war eine "hard selling commodity", was großvolumige Substitutionen sehr unwahrscheinlich machte. Zur Zeit liegen die Kupferpreise wieder relativ hoch.

Zink und Blei werden zwar in Tabelle 1, Spalte 7, mit nur 45 bzw. 27 Jahren Verfügbarkeitsdauer ausgewiesen, dies ist jedoch lediglich eine Folge der mangelnden Prospektionstätigkeit, die ihrerseits durch die niedrigen Preise dieser beiden Metalle bedingt ist. Schon vor 30 Jahren hörte man, daß es nur noch für 30 Jahre Zinkerze gäbe! Zink hat im Korrosionsschutz von Stahl (Karosserieblech, Leitplanken, Masten, Bauwesen) eine sehr starke Stellung erreicht, die bei den geringen Zinkauflagen und der daher sehr geringfügigen Verteuerung des Grundwerkstoffs kaum angreifbar erscheint. Die Substitution von Zink bei dekorativen Druckgußteilen (Beschläge u.ä.) ist dagegen in vollem Gange. Kunststoffartikel mit oder ohne galvanischer Auflage

sind billiger. Bei funktionellen Druckgußteilen gibt es eine gewisse Substitution wegen des hohen Gewichts im Kraftfahrzeugbau.

Blei muß man wohl in seinem Hauptverwendungsgebiet Akkumulatoren als relativ stark gefährdet ansehen, und zwar mehr bei den Starterbatterien (hohes Gewicht im Kraftfahrzeug) als bei den stationären Batterien (Notstromaggregate u.ä.). Es wird seit Jahrzehnten an neuen Batteriesystemen gearbeitet, ein Durchbruch und damit eine Substitution des Bleis ist bisher nicht gelungen. Dabei spielt sicher auch die 100%ige Recyclierbarkeit der Altbatterien eine positive Rolle. Kabelmäntel aus Blei gehen wegen des hohen Gewichts zurück, Bleitetraäthyl aus Umweltschutzgründen. Insgesamt macht der extrem niedrige Bleipreis jegliche Substitution schwierig.

Auf den Zusammenbruch des Zinnkartells wurde bereits hingewiesen. Hier war erfolglos versucht worden, die Marktgesetze außer Kraft zu setzen. Durch künstliche Verknappung wurde ein derartig hoher Preis möglich gemacht, daß die Substitution geradezu provoziert wurde. Die Folge war ein echter Verbrauchsrückgang um etwa 15 % in der westlichen Welt. Es wird schwer sein trotz des stark gesunkenen Preises seit dem Desaster, alle Märkte zurückzuerobern. Zinn ist ein klassisches Beispiel für die preisinduzierte Substitution: Ersatz des verzinnnten Weißblechs durch Aluminium.

Magnesium hat in der Vergangenheit einen Substitutionsverlust im Motorenbau (Volkswagen) durch nicht ausreichende Eigenschaften bei hohen Temperaturen hinnehmen müssen. Im übrigen ist aber Magnesium ein Metall, das in der Zukunft eher selbst andere Materialien verdrängen wird, wenn es gelingt, den Preis noch zu senken (geringes Gewicht; Stahlschwefelung; Verbundwerkstoffe).

Legierungsmetalle für Stahl

Bei einigen dieser sogenannten Stahlveredler bestehen deutliche Versorgungsunsicherheiten aus politischen Gründen: Chrom und Vanadium aus Südafrika, Kobalt und Tantal aus Zaire, Wolfram aus China, Vanadium aus der UdSSR. Sollten diese Länder einmal die westliche Welt nicht mehr beliefern wollen oder können, wäre mit einer vorübergehend angespannten Liefersituation zu rechnen. Wegen der kaum zu ersetzenden rost-, verschleiß- und hitzebeständigen chromlegierten Stähle, "refractory metals" und Superlegierungen hat die Republik Südafrika hier eine wirkungsvolle Gegenboykottmaßnahme in der Hand.

Nickel ist wohl das interessanteste Metall dieser Gruppe, es gewinnt und verliert. Schon im letzten Krieg wurde Nickel in Stählen teilweise durch Stickstoff ersetzt, zur Zeit wird es in Nordamerika durch Zink in Münzmetall ersetzt. Andererseits schiebt sich neuerdings eine Ni-Cr-Co-Mo-Legierungsgruppe für Wärmetauscher und kerntechnische Anwendungen in den Vordergrund ("Nicrofer", "Inconel") mit hoher thermischer und mechanischer Überlastbarkeit. Dies sind Verdrängungswettbewerbe zwischen den Metallen aufgrund überlegener Qualitätsmerkmale.

Wolfram ist in Schnellarbeitsstählen nur teilweise durch Molybdän substituierbar, in Hartmetall und in Glühfäden wohl unersetzlich, bei der breiten Produktionsstreuung geografisch braucht aber mit Versorgungsproblemen nicht gerechnet zu werden. Die Wiederaufarbeitung von Schrott (20 %) ist besser entwickelt als bei V, Nb, Mo, Co.

Bei Kobalt überwiegen die Anwendungen in Spezialstählen und in nichtmetallischen Anwendungen in Kompositwerkstoffen und Hartmetallen. Das Risiko, das in den Lieferländern Zaire und Zambia begründet liegt, wird kaum zu großen Preisschüben und damit zur Substitutionsgefährdung führen.

Niob und Tantal sind in guter geografisch-politischer Streuung ausreichend vorhanden. Die Substitutionsmöglichkeiten für Niob sind sehr begrenzt. Beim Ersatz durch Vanadium oder Molybdän in hochfesten Stählen müssen Qualitätseinbußen hingenommen werden, Tantal und Titan können Niob in Superlegierungen ersetzen, doch ist Tantal wesentlich teurer. Deshalb ist auch Tantal das eher substituierungsgefährdete dieser beiden Schwestermetalle. Es wird in der Elektronik und in Hartmetallen sowie als Legierungselement in hochbeanspruchten Superlegierungen verwendet. Dabei ist es durch Niob, durch Aluminium sowie durch keramische Erzeugnisse gefährdet. Eine gewisse Tendenz geht z.Zt. zu Strahltriebwerken mit höherem Tantalanteil.

Mangan ist so überreichlich vorhanden, daß es in diesem Zusammenhang keiner Erwähnung bedarf.

Die Molybdänvorräte liegen überwiegend in der westlichen Welt und sind teilweise an Kupfererze gebunden. Der Molybdänverbrauch geht zu 80 % in die stark konjunkturabhängige Stahlproduktion ein. Besondere Substitutionsmöglichkeiten oder -anstrengungen sind nicht erkennbar. Generell gilt für Stahlveredler und Stahl: Langfristig ist eine gewisse Substitution durch HL-Keramik zu erwarten. Hierbei handelt es sich wieder um Metallverbindungen: Oxide, Carbide usw.

Titan ist in seinen Verbrauchssektoren noch immer stark von der Luft- und Raumfahrtindustrie abhängig. Es sind weder Versorgungsengpässe noch Preissteigerungen verhersehbar.

Edelmetalle

Bei Gold und Silber könnte man am ehesten Versorgungsengpässe bei der Produktion von Neumetallen befürchten. Dem kann man entgegenhalten, daß etwa 90 % des von der Menschheit im Laufe ihrer Geschichte erzeugten Goldes noch heute verfügbar sind. Sie lagern in Tresoren der Notenbanken oder befinden sich als Schmuck in privatem Besitz. Bei dieser Verwendung gibt es bei Gold trotz seines ausgeprägten Spekulationscharakters keine Substitutionsgefährdung.

Silber ist in seinen Vorkommen an Bleierze gekoppelt und teilt daher dessen gering erscheinenden Versorgungsgrad. Bei nur leicht zunehmenden Verbrauchsmengen in der Elektronik, EDV und Chemie und stagnierendem oder fallendem Verbrauch für Silberwaren, Lote und im Fotosektor erscheint insgesamt kein Grund für Preissteigerungen vorzuliegen, abgesehen von gelegentlichen Spekulationen und Hortungen.

Auch bei Platin ist zur Zeit die Produktion höher als der Verbrauch. Bei langsam steigendem Bedarf für Katalysatoren dürfte es keine Versorgungsschwierigkeiten geben, doch muß hier wieder auf die überragende Position Südafrikas hingewiesen werden. Südafrika könnte bei der Sperrung seiner Lieferungen fast die gesamte, auf Abgaskatalysatoren zielende Umweltschutzanstrengung der westlichen Industriestaaten zusammenbrechen lassen. Substitutionsmöglichkeiten sind zur Zeit nicht gegeben. Es sollten erhebliche Prospektionsanstrengungen unternommen werden. Schmuckwaren und Elektroindustrie sind weitere Pt-Märkte.

Auch das Edelmetallrecycling muß verstärkt werden. Neue Wege werden im Kfz-Katalysator-Recycling beschritten werden müssen.

Neben- und Sondermetalle

Von den in Tabelle 1 aufgeführten Neben- und Sondermetallen muß man wohl höchstens bei Indium und Zirkon mit einem merklichen Preissteigerungspotential rechnen. Bei Indium ist der Grund, daß es nur 6 wesentliche Anbieter gibt. 1975 bis 1980 gab es schon einmal eine ausgeprägte Hausse mit einer Verzehnfachung des ursprünglichen Preises. Bei Zirkon werden als Formsand und als Zirkondioxid

in Feuerfestmaterial relativ hohe Verbrauchszuwachsraten prognostiziert. Dabei sind Chromit und Olivin nur minderwertige Substitutionsgüter. Zirkonmetall hängt mit der Konjunktur für Kernkraftwerke zusammen. Auch bei Zirkon ist die Angebotsseite oligopolistisch strukturiert. Mehr Anbieter bei beiden Metallen wären von Vorteil.

Die elektronikorientierten Metalle Silizium, Gallium, Arsen, Kadmium, Selen, Germanium sind eher noch in der Phase der sinkenden Preise für die aus ihnen hergestellten Erzeugnisse. Hier bestehen auch gewisse gegenseitige Substitutionsmöglichkeiten, sodaß wohl keines dieser Elemente einen separaten Preishöhenflug ansteuern kann. Die Quecksilber- und Antimonanwendungen gehen generell zurück.

Zusammenfassung

Mineralische Rohstoffe zur Metallgewinnung sind in der Erdkruste überreichlich vorhanden. Die heute bekannten Erzreserven mit unter heutigen Kosten/Erlös-Relationen wirtschaftlich gewinnbarem Metallinhalt sind zwar wesentlich geringer, sind aber vom Prospektionsstand, Stand der Technik und von wirtschaftlich-politischen Faktoren abhängig. Nur 8 von 34 hier angegebenen Metallen zeigen heute eine Verfügbarkeit von unter 50 Jahren: Ag, Hg, Pb, In, Ta, Bi, Zn, Au. Auch zunehmendes Recycling wird die Vorräte strecken.

Im marktwirtschaftlich orientierten internationalen Metallhandel ist über Angebot und Nachfrage der Preis eines Metalls der wichtigste Knappheitsindikator. Nur von überhöhten Preisen können für die Metalle Substitutionstendenzen ausgehen, nicht von mangelnder Versorgung. Die wenigen Gefährdungsfälle aus heutiger Sicht sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 1: Versorgungssituation

	Metall	Clarkwert (Durchschnitts- gehalt in der Erdkruste) in ppm	Rang	Metallmasse in der Erdkruste (22,2.10 ¹⁸ t) in t	Metallverbrauch 1985 in t	Gesamt-Verfügbar- keit (Jahre) Spalte 3:4	Rang	Z.Zt. bekannte Erz-Reserven Metallinhalt in t	Statistische Ver- fügbarkeit (Jahre) Wert: 1986 Spalte 6:4
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hauptmetalle	Fe	56300	(3)	1,250.10 ¹⁸	0,700.10 ⁹	2.10 ⁹	(3)	0,089.10 ¹²	127
	Al	82300	(2)	1,827.10 ¹⁸	0,016.10 ⁹	114.10 ⁹	(4)	0,020.10 ¹²	1250
	Cu	55	(12)	1,221.10 ¹⁵	9,613.10 ⁶	127.10 ⁶	(8)	1,146.10 ⁹	119
	Zn	70	(11)	1,554.10 ¹⁵	6,492.10 ⁶	239.10 ⁶	(10)	0,290.10 ⁹	45
	Pb	12,5	(16)	0,278.10 ¹⁵	5,421.10 ⁶	51.10 ⁶	(11)	0,145.10 ⁹	27
	Sn	2	(19)	0,044.10 ¹⁵	0,213.10 ⁶	206.10 ⁶	(13)	0,037.10 ⁹	174
	Mg	23300	(4)	0,517.10 ¹⁸	0,291.10 ⁶	2.10 ¹²	(2)	0,100.10 ¹²	100.000
Legierungsmetalle für Stahl	Ni	75	(10)	1,655.10 ¹⁵	0,787.10 ⁶	2.10 ⁹	(12)	0,093.10 ⁹	118
	Cr	100	(9)	2,220.10 ¹⁵	4,000.10 ⁶	1.10 ⁹	(5)	6,959.10 ⁶	1740
	Co	25	(13)	0,555.10 ¹⁵	0,040.10 ⁶	14.10 ⁹	(7)	5,000.10 ⁹	100.000
	Nb	20	(14)	0,444.10 ¹⁵	0,030.10 ⁶	15.10 ⁹	(20)	8,000.10 ⁶	260
	Ta	2	(19)	0,044.10 ¹⁵	1,000.10 ³	44.10 ⁹	(32)	0,030.10 ⁶	30
	Mn	950	(6)	0,021.10 ¹⁸	0,012.10 ⁹	2.10 ⁶	(6)	5,160.10 ⁹	430
	Mo	1,5	(21)	0,033.10 ¹⁵	0,100.10 ⁶	300.10 ⁶	(19)	9,000.10 ⁶	90
	V	135	(8)	3,000.10 ¹⁵	0,030.10 ⁶	100.10 ⁹	(15)	0,017.10 ⁹	565
	W	1,5	(22)	0,033.10 ¹⁵	0,040.10 ⁶	1.10 ⁹	(22)	3,280.10 ⁶	82
Ti	5700	(5)	0,127.10 ¹⁸	0,090.10 ⁶	2.10 ⁹	(9)	0,700.10 ⁹	9000	
Edelmetalle	Au	0,004	(33)	0,089.10 ¹²	1,500.10 ³	60.10 ⁶	(31)	0,040.10 ⁶	27
	Ag	0,07	(29)	1,554.10 ¹²	0,016.10 ⁶	100.10 ⁶	(27)	0,250.10 ⁶	16
	Pt	0,005	(32)	0,111.10 ¹²	0,150.10 ³	2.10 ⁹	(30)	0,070.10 ⁶	500
	Pd	0,01	(31)	0,222.10 ¹²					
Nebemetalle	Cd	0,2	(24)	4,440.10 ¹²	0,018.10 ⁶	246.10 ⁶	(17)	0,010.10 ⁹	555
	Hg	0,08	(28)	1,776.10 ¹²	6,200.10 ³	286.10 ⁶	(29)	0,155.10 ⁶	25
	Sb	0,2	(25)	4,440.10 ¹²	0,054.10 ⁶	32.10 ⁶	(21)	5,074.10 ⁶	94
	As	1,8	(20)	0,040.10 ¹⁵	0,025.10 ⁶	2.10 ⁹	(18)	0,010.10 ⁹	400
	Bi	0,17	(26)	3,774.10 ¹²	4,600.10 ³	1.10 ⁹	(28)	0,185.10 ⁶	40
	Se	0,05	(30)	1,110.10 ¹²	1,500.10 ³	1.10 ⁹	(16)	0,015.10 ⁹	10.000
	Te	0,001	(34)	0,022.10 ¹²	0,150.10 ³	100.10 ⁶	(25)	1,000.10 ⁶	7.000
	Ge	1,5	(23)	0,033.10 ¹⁵	0,090.10 ³	370.10 ⁹	(24)	1,000.10 ⁶	10.000
	Ga	15	(15)	0,333.10 ¹⁵	0,035.10 ³	10.10 ¹²	(23)	1,500.10 ⁶	43.000
	In	0,1	(27)	2,222.10 ¹²	0,060.10 ³	37.10 ⁹	(33)	1,600.10 ³	27
Sondermetalle	Zr	165	(7)	3,663.10 ¹⁵	5,000.10 ³	1.10 ¹²	(14)	0,022.10 ⁹	4.400
	Hf	3	(17)	0,066.10 ¹⁵	0,100.10 ³	1.10 ¹²	(26)	0,444.10 ⁶	4.400
	Si	281500	(1)	6,249.10 ¹⁸	2,700.10 ⁶	2.10 ¹²	(1)	1,000.10 ¹²	100.000

Tabelle 2: Substitutionsgefährdungen bei Metallen

Metalle	Verwendungsgebiet	Gefährdungsgrund	Substituierendes Material
Kupfer	Elektrotechnik Nachrichtentechn.	Gewicht/Preis Gewicht/Preis	Aluminium Glasfaser
Zink	Dekorativ- u. Funktionsteile in Druckguß	Gewicht/Preis	Kunststoff
Blei	Starterbatterien Kabelmäntel Tetraäthyl	Gewicht/Preis Gewicht Umwelt	? Aluminium keines
Zinn	Verpackung	Preis	Aluminium
Chrom	Edelstähle	Politisch: Südafrikaproblem	?
Tantal	Elektronik, Hartmetall, Legierg.	Preis	Niob, Aluminium Keramik
Platin	Abgaskatalysatoren	Politisch: Südafrikaproblem	?