

Friedrich-Wilhelm Wellmer

Lebensdauer und Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe

Abstract

The future availability of mineral resources can normally be quantified on the basis of the life span of the reserves, i.e. until they are exhausted, which is the ratio of the known reserves to the current rate of production. However, quantification reflects only the situation at a single moment within a system that is subject to dynamic developmental processes. Dynamic development not only applies to production but also to our knowledge about the resources. The dynamic nature of the latter depends, among other factors, on the intensity of exploration, the type of deposit and the price level. To examine whether supplies of a commodity can be secured in the future, many factors must be taken into consideration, e.g. the recycling and/or substitution potential, whether the specific consumption of the commodity in the manufacture of the relevant products can be reduced, or whether technical innovations will ultimately substitute these products for completely different ones using different raw materials.

In this light, the most critical mineral resources are not those that, at this moment, have the shortest life span, but those for which the substitution potential (alternative materials) is the lowest, i.e. those that offer the least flexibility.

If one considers human creativity as one of the main factors, apart from supply and demand, that controls the availability of the essential mineral resources, then no problems can be foreseen in the near or more distant future with respect to availability.

The least flexible mineral resources are the fertilizers, potash and phosphate; paradoxically, however, the lifespan of the known reserves and resources of these two minerals is very long. So far, all forecasts of dwindling reserves of mineral resources have proved to be "self-destroying prophecies". It is highly unlikely, even in the long term, that the controls governing the availability of mineral resources will change so radically that the above forecast will suddenly become a "self-fulfilling prophecy".

Zusammenfassung

Zur Orientierung der zukünftigen Verfügbarkeit von Rohstoffen dient in der Regel die „Reservenlebensdauer“ bzw. „Reichweite“ der Vorräte, der Quotient aus den zur Zeit bekannten Vorräten und dem aktuellen Verbrauch. Sie ist nur eine Momentaufnahme eines sich dynamisch entwickelnden Systems. Nicht nur der Verbrauch entwickelt sich dynamisch, sondern auch der Kenntnisstand der Ressourcen. Er ist u. a. abhängig von der Explorationsintensität, dem Lagerstättentyp und dem Preisniveau. Für die Frage der Versorgungssicherheit müssen auch Aspekte wie Recycling- und Substitutionsmöglichkeiten, Verringerung des spezifischen Rohstoffeinsatzes oder völlig andere technische Lösungen betrachtet werden.

Unter diesen Gesichtspunkten sind nicht die Rohstoffe am kritischsten zu sehen, bei denen die augenblickliche Momentaufnahme der „Lebensdauer“ zahlenmäßig am kürzesten ist, sondern bei denen die Ausweichmöglichkeit, die Flexibilität, am geringsten ist.

Führt man die menschliche Kreativität als Teil eines Regelkreises ein, im Wechselspiel zwischen Angebot und Nachfrage der Wirtschaft die notwendigen mineralischen Rohstoffe zur Verfügung zu stellen, sind bei keinem mineralischen Rohstoff für die nähere und weitere Zukunft Verfügbarkeitsprobleme erkennbar.

Die Rohstoffe mit der geringsten Flexibilität sind die Düngemittelrohstoffe Kali und Phosphat, bei denen die Reichweite der bekannten Reserven und Ressourcen aber sehr hoch ist, so daß man fast von einem Rohstoffparadoxon sprechen kann.

Alle Prognosen über die Begrenztheit der Rohstoffreserven haben sich bisher immer als „self-destroying prophecies“ erwiesen. Es ist nicht erkennbar, warum der Regelkreis zur Versorgung mit mineralischen Rohstoffen von der „self-destroying-prophecy“ in eine „self-fulfilling prophecy“ umschlagen sollte.

1. Die Reservenlebensdauer bzw. die Reichweite der Vorräte

Um die Lebensdauer von Rohstoffen und ihre zukünftige Verfügbarkeit zu quantifizieren, wird normalerweise die Kennziffer „Reservenlebensdauer“ bzw. „Reichweite der Vorräte“ berechnet; ab jetzt wird nur noch der erste Begriff „Reservenlebensdauer“ verwendet. Sie ist der Quotient aus den zur Zeit bekannten Reserven und der aktuellen Produktion. Man unterscheidet zwei Arten von Lebensdauer kennziffern, die statische und die dynamische. Bei der statischen Lebensdauer wird die aktuelle Produktion als fixe Größe betrachtet, bei der dynamischen der Verbrauch mit einer angenommenen durchschnittlichen Wachstumsrate dynamisiert. In beiden Fällen jedoch werden die Reserven als statisch betrachtet, und hierin liegt der Grund, der immer wieder zu Fehlinterpretationen führt. Warum? Auch die Reservenanzahl ist eine dynamische Größe, im

Grunde eine viel dynamischere als dynamisierte Verbrauchszahlen. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbaren Reservenzahlen können sich konkret immer nur auf die dann bekannten und wirtschaftlich gewinnbaren Reserven beziehen. Sie können nicht die noch zukünftig zu entdeckenden Reserven mit einbeziehen. Damit kann die Kennziffer Reservenlebensdauer immer nur eine statistische Momentaufnahme eines sich dynamisch entwickelnden Systems sein. Für sich alleine genommen ist diese Kennziffer aussagegelos. Es müssen auf jeden Fall Zeitreihen betrachtet werden. Die Reservenzahlen selbst sind abhängig von zahlreichen Einflußgrößen, die nachfolgend kurz skizziert werden.

Einige wesentliche Einflußgrößen seien kurz erläutert:

Die Reservenzahl ergibt sich im Grunde als Summe aller *Explorationsbemühungen*, d. h. die weltweit von den Explorations- und Bergbaufirmen entdeckten Reserven. Diese Unternehmen haben nicht zur Aufgabe, das weltweite Potential eines Rohstoffes zu bestimmen, sondern sie müssen, um zu überleben oder gar zu wachsen, die Menge der Reserven, die sie abgebaut haben, wieder neu entdecken und weitere wirtschaftliche Lagerstätten hinzufinden. Diese wollen sie möglichst bald in Produktion nehmen. Sie explorieren, um Reserven zu finden, die sofort und nicht erst weit in der Zukunft, in 20 oder 40 Jahren, abgebaut werden können.

1. Der *Lagerstättentyp* spielt selbstverständlich eine große Rolle. Rohstoffe, die in lang aushaltenden kontinuierlichen Schichten auftreten, wie Kohle in Flözen oder Phosphat, lassen sich leichter abschätzen und weiter extrapolieren als solche, die in kleinen linsigen Vorkommen auftreten, wie z. B. Uran. Dies ist der wesentliche Grund, daß in der Bandbreite der Lebensdauerdaten der Energierohstoffe Kohle weit an der Spitze steht, Uran dagegen am unteren Ende.

Am Beispiel Chrom läßt sich der Einfluß der Lagerstättentypen gut zeigen. Es gibt zwei unterschiedliche Typen von Chromerzlagerstätten, flözförmige, also leicht berechenbare (dies sind die großen Lagerstätten Südafrikas und Simbabwe, s. Tab. 1) und linsige, sogenannte podiforme, die extrem schwierig zu explorieren und dementsprechend schwer abzuschätzen sind (Abb. 1). Das heißt, die Vorratszahlen haben durch diese einerseits sehr guten, andererseits extrem schwierigen Extrapolationsmöglichkeiten eine Tendenz ("bias") zugunsten der flözförmigen Lagerstätten, die bei Chrom 79 % aller bekannten weltweiten Reserven ausmachen. Die Verteilung der insgesamt nicht bekannten Potentiale dürfte eine ganz andere sein und eher in der Nähe der jetzigen Produktionen liegen, die zu 44 % aus podiformen Lagerstätten und nur zu 56 % aus flözförmigen kommen (WELLMER & BERNER, 1997).

2. Auch die *Größenverteilung* spielt eine Rolle. Für alle Rohstoffe gilt die statistische Regel, daß es wenige sehr große Lagerstätten und viele kleine gibt.

Die wenigen Großlagerstätten bestimmen aber ganz wesentlich die Verfügbarkeit eines Rohstoffes. So sind in 1 % der Erdöllagerstätten, den sogenannten „giants“, etwa 75 % der bekannten ursprünglichen Welterdölvorräte konzentriert (IVANHOE & LECKIE, 1993). Beim Kupfer sind in 10 % der Lagerstätten 84 % der Weltkupfervorräte konzentriert, beim Zink sind es dagegen nur 71 % (SINGER, 1995). Die

rein rechnerisch größere Reichweite der Vorräte bei Kupfer im Vergleich zu Zink spiegelt genau diese statistische Verteilung wider. Sie sagt jedoch nichts über die zukünftig noch zu entdeckenden neuen Kupfer- oder Zinkreserven aus.

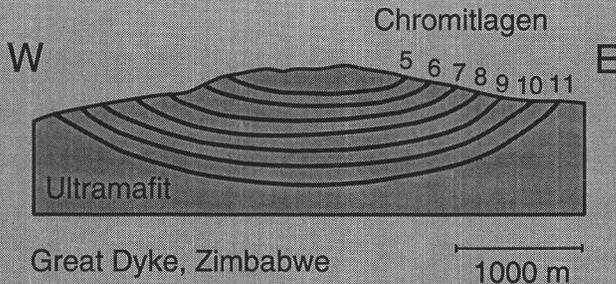
Tabelle 1: Chromit: Produktion und Reserven 1994 für verschiedene Lagerstättentypen

Land	Produktion 1994 1000 met. t	Weltproduktion %	Reserven 1994 1000 met. t	Weltreserven %
stratiform				
Simbabwe	517	5,76	141.000	10,01
Südafrika	3600	40,10	959.000	68,11
Brasilien	360	4,01	8000	0,57
Finnland	573	6,38	29.000	2,06
Indien	909	10,13	59.000	4,19
Madagaskar	90	1,00	2.000	0,14
Total stratiform	5049	56,25	1,108.000	78,69
podiform				
Albanien	223	2,48	6000	0,43
Griechenland	4	0,04	1000	0,07
Iran	129	1,44	2000	0,14
Kasachstan	2389	26,61	255.000	18,11
Kuba	50	0,56	2000	0,14
Oman	6	0,07	2000	0,14
Pakistan	23	0,26	1000	0,07
Philippinen	69	0,77	7000	0,50
Russische Föderaton	143	1,59	5000	0,36
Sudan	7	0,08	2000	0,14
Türkei	790	8,80	8000	0,57
Vietnam	4	0,04	1000	0,07
VR China	50	0,56	2000	0,14
andere Länder	41	0,45	6000	0,43
Total podiform	3927	43,75	300.000	21,31
Welt	8976		1,408.000	

Quelle: BGR Mineral Commodity Data Base

3. Das *Preisniveau* hat einen ganz wesentlichen Einfluß. Steigt das Preisniveau, kann die Bauwürdigkeitsgrenze gesenkt werden, d. h. auch niedrighaltigere Vorräte können wirtschaftlich gewonnen werden. Man kann für viele Rohstoffe ableiten, daß mit Senken der Bauwürdigkeitsgrenze die Vorräte nichtli-

Stratiforme Chromiterzkörper (Profil)



Podiforme Chromiterzkörper (Profil)

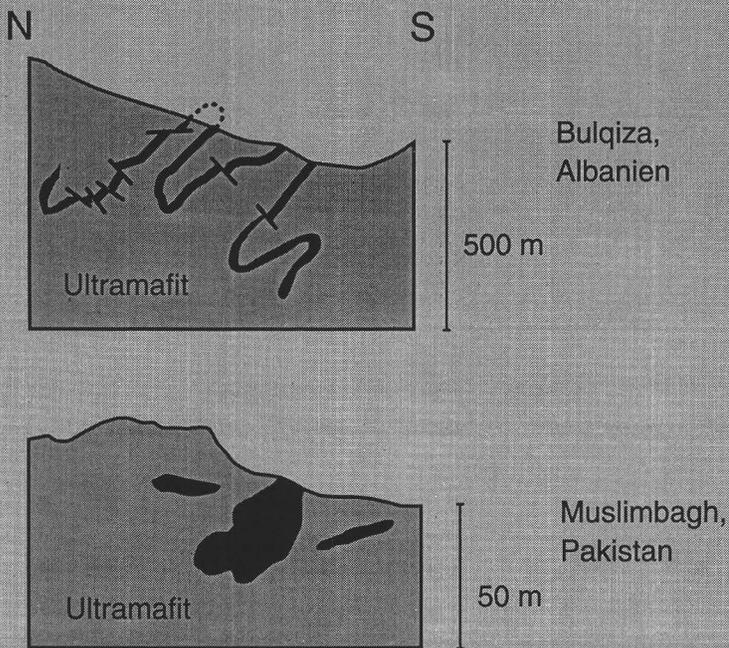


Abb. 1: Beispiel für flözartige und podiforme Chromerzlagerstätten

near zunehmen. (Bei einer gewissen statistischen Verteilung folgt diese Vorratszunahme einem exponentiellen Gesetz, das nach dem amerikanischen Geologen Lasky benannt wurde [LASKY, 1950].) Abb. 2 zeigt dies beispielhaft für die Zinkreserven. Bergwerke folgen bei der Festlegung der Bauwürdigkeitsgrenzen dem generellen Preistrend. Viele Schwankungen in den Zeitreihen von Lebensdauerkurven erklären sich so aus den zyklischen Preisschwankungen der Rohstoffe.

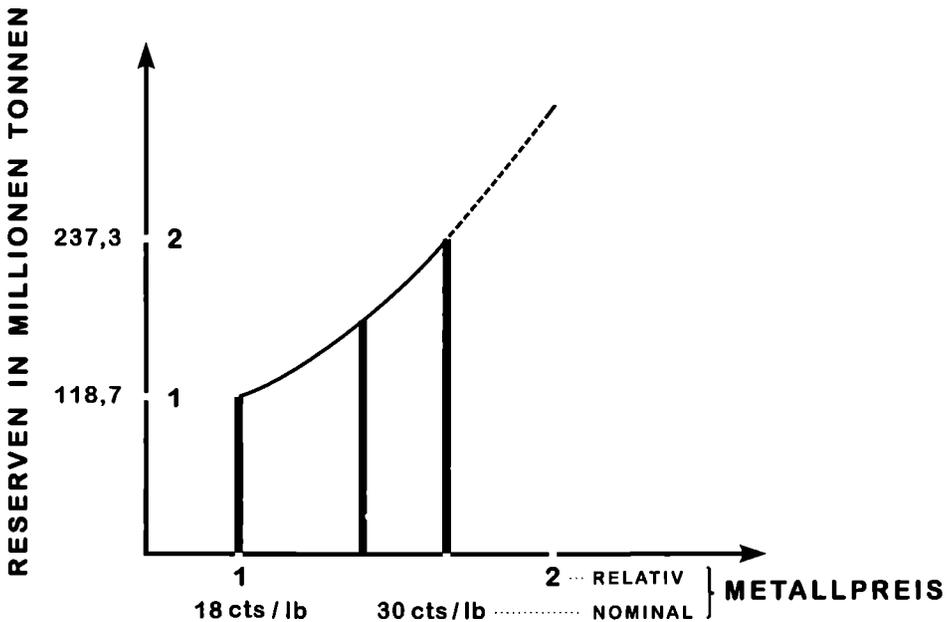


Abb. 2: Zunahme der Zinkreserven mit dem Preis (nach BENDER, 1977 auf der Basis von Daten 1972 des US Bureau of Mines)

4. Die *technologischen Grenzen* haben einen Einfluß auf die Reservenzahlen. Ein gutes Beispiel ist die Teufengrenze der Offshore-Exploration auf Kohlenwasserstoffe, die immer tiefer liegende Öl- und Gasfelder erkundete und Potentiale in wirtschaftlich gewinnbare Reserven verwandelte. War die größte Wasserteufe für Offshore-Bohrungen 1955 30 m, so lag sie 1970 bei 114 m, 1988 bei 412 m und 1996 bei 2300 m (SHELL, 1996).

Seit dem 2. Weltkrieg sind durch die stark gestiegene Nachfrage mehr Rohstoffe als in der ganzen Menschheitsgeschichte zuvor verbraucht worden. Es ist daher eine landläufige Meinung, daß wir immer ärmere Lagerstätten abbauen müssen, um unseren Bedarf zu decken. Das ist falsch. Dieser Eindruck ist durch die sogenannten „porphyrischen“ Kupferlagerstätten entstanden, in denen die Kupferminerale dispers und fein verteilt auftreten und die als Massenerlagerstätten in großen Tagebauen abgebaut werden können. Durch immer größere Abbaueinheiten und größere LKWs ließen sich große Rationalisierungser-

folge erzielen, so daß immer niedrighaltigere Vorkommen in Betrieb genommen werden konnten. Waren es um die Jahrhundertwende Lagerstätten mit 1 % Kupfer wie in Bingham bei Salt Lake City in den USA, so waren es in den sechziger und siebziger Jahren Lagerstätten in den USA und Kanada mit 0,4 %. Die untersten Bauwürdigkeitsgrenzen für marginal gewinnbare Reserven, bei denen gerade noch die Betriebskosten gedeckt werden, liegen bei einigen Großtagebauen bei 0,2 % Kupfer. Kupfer war aber eine Ausnahme. Mittlerweile gehen auch bei Kupfer die durchschnittlichen Lagerstättengehalte nach oben (BENDIEK, 1995) und folgen damit dem Trend, der für andere Rohstoffe schon seit langem gilt. Im Jahre 1970 gab es in Deutschland z. B. noch 73 Eisenerzgruben, die Eisenerzkonzentrate mit knapp 34 % Eisen produzierten. Heute gibt es praktisch keine Eisenerzgrube mehr in Deutschland und die durchschnittlichen Eisenerzgehalte liegen weltweit bei 63 % (SIEBEL, 1993).

Dieser Trend kann sich sicherlich nicht ungebrochen fortsetzen und es wird irgendwann wieder zu einer Trendumkehr kommen, so daß auch wieder ärmere Lagerstätten abgebaut werden.

An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, daß der generelle Trend der Rohstoffpreise über Jahrzehnte in realen Preisen (d. h. die nominalen Preise sind korrigiert worden, um die Inflationseffekte herauszurechnen) praktisch gleich geblieben ist (s. Abb. 3 beispielhaft für Kupfer und Blei). Somit sind niedrighaltigere Ressourcen, die durch echte Preissteigerung in realen Werten auf ein langfristig höheres Preisniveau bauwürdig würden, noch gar nicht in Angriff genommen worden (s. auch oben Punkt 4).

Dies sind nur einige der wichtigsten Einflußfaktoren auf die jeweils gültige Reservenzahl, die die Kennziffer Reservenlebensdauer beeinflussen und die Dynamik dieser Kenngröße illustrieren sollen. Man könnte viele andere Einflüsse auf die Reservenzahlen noch hinzufügen, z. B.: Steigen die Steuern und/oder die Förderabgaben, muß die Bauwürdigkeitsgrenze erhöht werden, d. h. die Vorräte werden geringer. Lagerstätten in infrastrukturell ungünstig gelegenen Gebieten benötigen höhere Gehalte. Verbessert sich die Infrastruktur durch Investitionsmaßnahmen der Regierung, können früher marginale oder submarginale Vorräte bauwürdig werden, d. h. aus Ressourcen werden Reserven etc.

Tabelle 2 gibt die statischen Reservenlebensdauerzahlen für einige Rohstoffe wieder, wie oben erläutert als Momentaufnahme für 1995/96 in einem dynamischen System. Abb. 4 zeigt Zeitreihen für Kupfer, Blei und Zink, die das dynamische System von 1955 bis 1996 abbilden und die stark schwankende Lebensdauerzahlen verdeutlichen. Diese sind im wesentlichen durch Preisschwankungen und damit Änderungen der Bauwürdigkeitsgrenzen (s. o. Punkt 3) und wechselnde Explorationsintensität bedingt. Trotz im Durchschnitt bei vielen Rohstoffen steigenden Lagerstättengehalten, gestiegenen Produktionen und im Langfristrend gleichen realen Preisen hat sich der langfristige Trend der Lebensdauer kennziffern bei den einzelnen Rohstoffen kaum geändert, d. h. die bisherige Exploration ist sehr erfolgreich gewesen, und konnte so ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Produktion und Reserven halten.

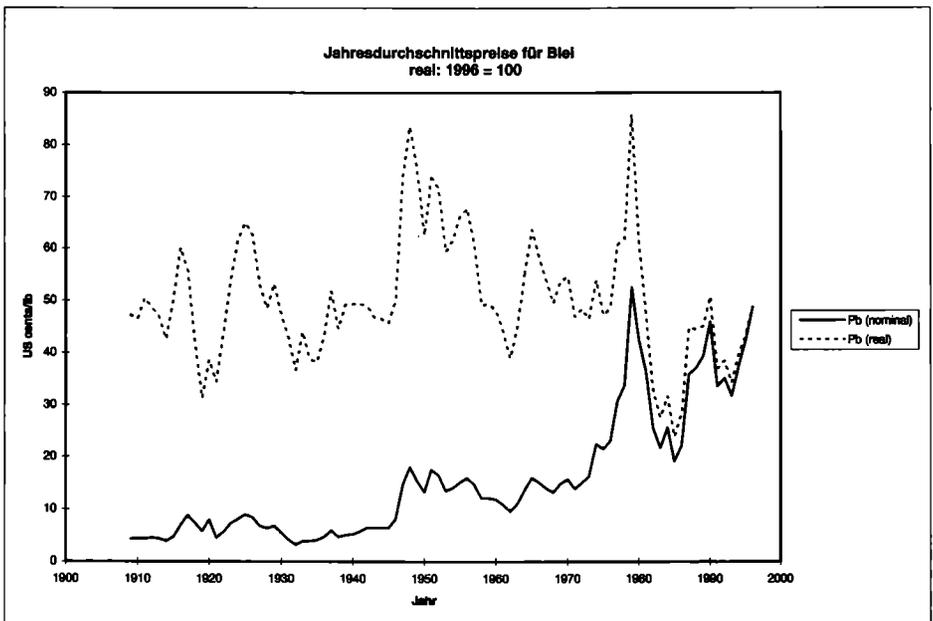
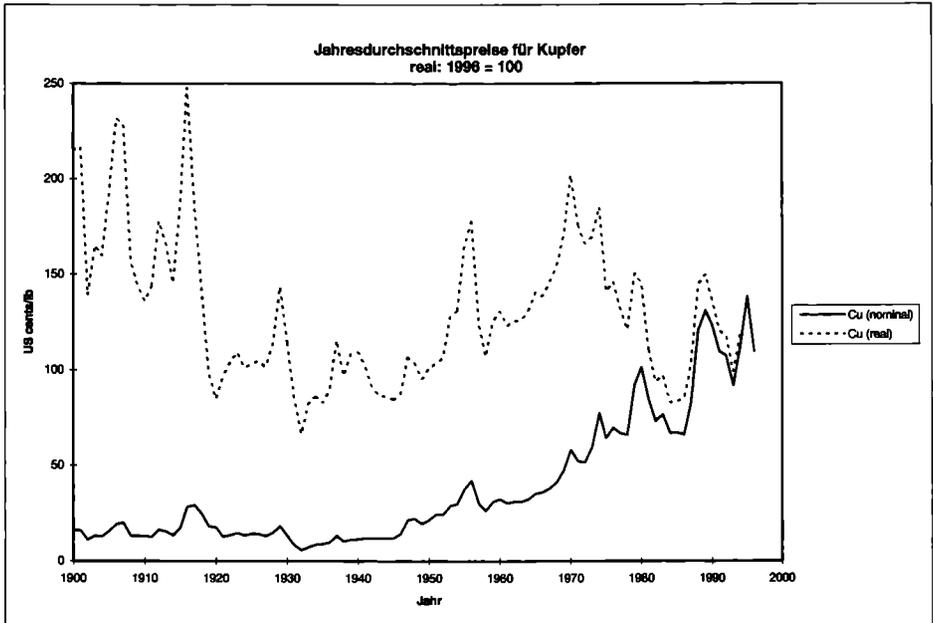


Abb. 3: Preisentwicklung für Kupfer und Blei in realen und nominalen Preisen

Tabelle 2: Statische Lebensdauer ausgewählter Rohstoffe

Rohstoff	1995 Bergbauproduktion 1000 t	1995 Bergbauproduktion 1000 t Inh.	Vorräte 1995 sicher & wahrscheinl. 1000 t	Vorräte 1995 sicher & wahrscheinl. 1000 t Inh.	Statische Lebensdauer Jahre
Eisenerz	1.019.879	569.128	150.000.000		147
Bauxit	112.931	25.093	23.000.000		204
Manganerz	20.500	8200		680.000	83
Chromit	12.242	3770	3.700.000		302
Titan-Rohstoffe	6100	2378	179.850		76
Kupfer		9988		310.000	31
Zink		6791		140.000	21
Blei		2629		68.000	26
Nickel		1013		47.000	46
Zinn		189		7000	37
Antimon		119		4200	35
Molybdän		119		5500	46
Vanadium		32,3		10.000	310
Wolfram		22,8		2100	92
Niob und Tantal		18,3		3522	192
Kobalt		18,0		4000	222
Silber		13,5		280	21
Gold		2,0		44	22
Platinmetalle		0,3		56	187

(Quelle: BGR Mineral Commodity Data Base)

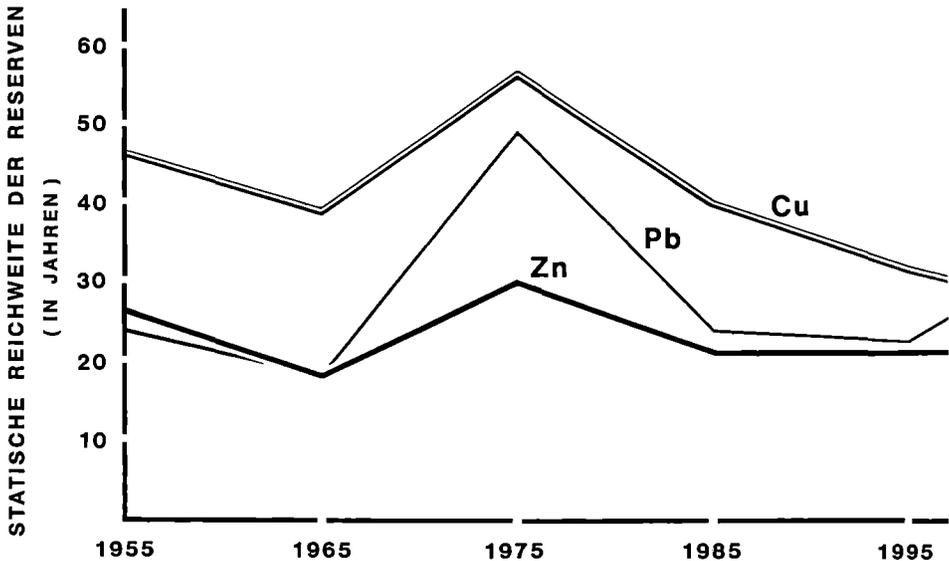


Abb. 4: Entwicklung der statischen Lebensdauer kennziffern für Blei, Zink und Kupfer

Will man auf Grund dieser Kenntnisse nun die Frage beantworten, wie groß die Lebensdauer der mineralischen Rohstoffe ist, müßte man die Zeitreihen (s. Abb. 4) soweit in die Zukunft extrapolieren, bis sie die Reichweite null erreichen. Da man das Gesamtpotential, das einmal in Reserven umgewandelt werden kann, bei den mineralischen Rohstoffen heute bei weitem nicht kennt, ist das nicht möglich. Würde man das Gesamtpotential abschätzen können, könnte man auch mit der Lebenszykluskurve arbeiten, auch „Hubbert-Kurve“ genannt; benutzte Hubbert sie doch 1956, um den Zeitpunkt der maximalen Ölförderung in den USA für 1969 vorausszusagen (HUBBERT, 1969). Er verschätzte sich nur um 1 Jahr. Die Lebenszykluskurve ist eine glockenförmige Kurve. Die Förderung steigt bis zu einem Maximum und fällt dann wieder ab. Beim Maximum sind etwa 50 % der Gesamtreserven verbraucht. Das ist der sogenannte „depletion midpoint“. Da man die Gesamtreserven des konventionell gewinnbaren Erdöls heute bereits recht gut abschätzen kann, ist dies der einzige Rohstoff – bedingt vielleicht noch Erdgas –, bei dem man mit diesem Instrument arbeiten kann (HILLER, 1997).

2. Die Regelkreise zur Rohstoffversorgung

Es wird also deutlich, daß die vorhandenen Kennziffern bei den mineralischen Rohstoffen auf die Frage der zukünftigen Verfügbarkeit keine Antwort geben. Es wurde bereits auf den Zusammenhang zwischen Preishöhe und Reservenzahl eingegangen. Führt man jetzt die „menschliche Kreativität“ mit in die

Betrachtungen ein, so kann man Regelkreise mit Rückkopplungseffekten erkennen, die vielleicht eher eine Antwort auf die Frage der zukünftigen Verfügbarkeit geben. Wird ein Rohstoff knapp, steigen die Preise. Dann können, wie oben ausgeführt, auch niedrighaltigere Lagerstätten abgebaut werden; gleichzeitig wird es attraktiver, höhere Explorationsrisiken einzugehen, z. B. in größeren Teufen zu suchen. Auch wird es lohnend, die Recyclingraten zu steigern, nach Substitutionsmöglichkeiten zu suchen, den spezifischen Materialeinsatz noch weiter zu reduzieren oder nach ganz anderen technischen Lösungen zu forschen, wie z. B. statt der Nachrichtenübermittlung mit Kupfer-Kabeln nicht nur eine Substitution durch Glasfaserkabel, sondern über die Satelliten.

Um die Regelkreise besser zu verstehen, soll mit dem Spinnennetz-Theorem begonnen werden, das den Zusammenhang zwischen Angebot und Nachfrage vereinfachend darstellt, indem es eine sofortige Adjustierung des Angebots auf eine geänderte Nachfrage annimmt (GUTMAN, 1983) (Abb. 5). Wir beginnen beim Punkt A_1 , bei dem Nachfrage und Angebot ausgeglichen sind und einer Nachfrage Q_1 ein Preis P_1 gegenübersteht. Angenommen, es droht bei einem großen Produzenten ein Streik, die Verbraucher fürchten einen Versorgungsengpaß. Der Preis steigt auf P_2 . Bei diesem Preis kann das Angebot Q_2 produziert werden (man kann sich vorstellen, daß in Gruben bisher submarginale Vorräte, die schon aus- und vorgegraben sind, jetzt zusätzlich gefördert werden); ein derartig hohes Angebot kann aber nur zu einem niedrigeren Preis P_3 abgesetzt werden. Der Preis verfällt

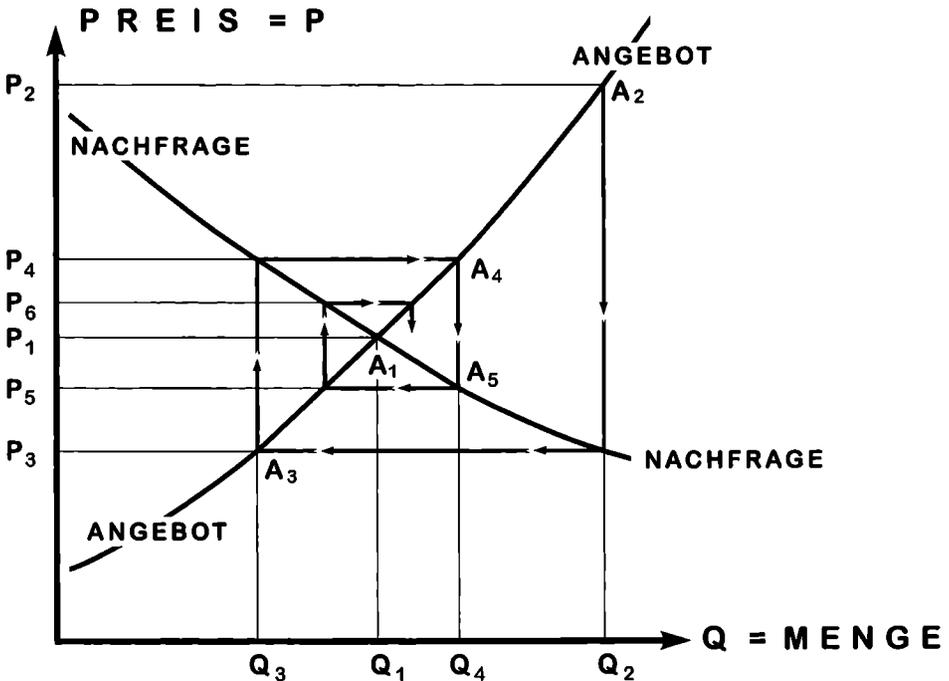


Abb. 5: Das Spinnennetz-Theorem

also. Beim Preis P_3 kann jedoch nur die Menge Q_3 produziert werden. Diese geringere Menge bewirkt eine Verknappung des Angebotes und einen höheren Preis, nämlich P_4 . Dieser Preis führt zu einem Angebot Q_4 , das immer noch über der Nachfrage liegt und zu einer Preissenkung auf das Niveau P_5 führt, etc.

Wenn auch natürlich ein vereinfachendes Modell, stellt es doch die stark schwankenden Rohstoffpreise und die ausgelösten Effekte – jedenfalls des ersten Zyklusses – recht gut dar. Hohe Preissteigerungen führen zu verstärkten Anstrengungen z. B. der Substitution. Die Shaba-Krise 1978, einer der wenigen Fälle, in denen es wirklich einmal in der Nachkriegszeit physische Verfügbarkeitsprobleme bei einem Rohstoff gegeben hat, in diesem Falle Kobalt, bei dem Zaire das größte Förderland ist, führte zu Preissteigerungen auf das Fünffache des früheren Preises. Die Forschungen, Substitutionsmöglichkeiten für Kobalt zu finden, wurden intensiviert und führten schon bald zu Ergebnissen, z. B. zur Entwicklung von neuen Ferriten, um Kobalt in Magneten zu ersetzen. Obwohl Kobalt vorher als strategischer Rohstoff mit einer relativ geringen Nachfrageelastizität galt, kam es zu einer Adjustierung der Nachfrage, wie oben modelliert (WELLMER & SCHMIDT, 1989).

Hält der Preispeak lange genug an, kommt es auch zu neuen Investitionen und damit zu zusätzlichen Angebotsmengen. Oft ist der Markt dann überversorgt und es kommt wieder zu Preiseinbrüchen, manchmal auf ein Preisniveau, das tiefer liegt als früher. Molybdän ist hierfür ein gutes Beispiel (Abb. 6).

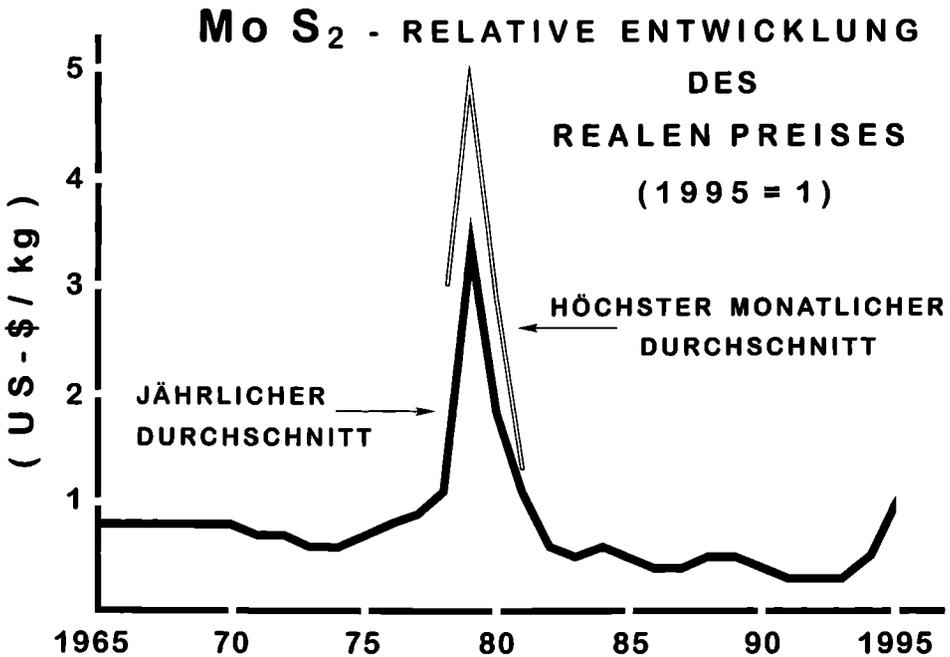


Abb. 6: Relative Preisentwicklung bei Molybdän

Da Bergbauinvestitionen sehr kapitalintensiv sind, läßt dann die Anpassung in der Regel lange auf sich warten. Insbesondere Lagerstätten mit hohen Vorräten wie den porphyrischen Kupfer- oder Molybdänlagerstätten werden meist auch über Verlustjahre lange weiter betrieben in der Hoffnung auf wieder steigende Preise und damit der Möglichkeit, das eingesetzte Kapital, das sonst überwiegend verloren wäre, wieder herauszuholen.

Preissteigerungen führen aber auch zu verstärkten Explorationsaktivitäten. Abb. 7 zeigt beispielhaft die Korrelation zwischen Uranpreis und Uranexplorationsausgaben in Kanada (CRANSTONE, 1997). Mit der Exploration wollen wir uns näher befassen, schafft sie doch zukünftige Versorgungsströme. Der Regelkreis, der die Explorationsaktivitäten kontrolliert, gibt vielleicht eine bessere Antwort auf die zukünftige Verfügbarkeit von Rohstoffen als eine rein statische Betrachtung von Lebensdauer kennzahlen.

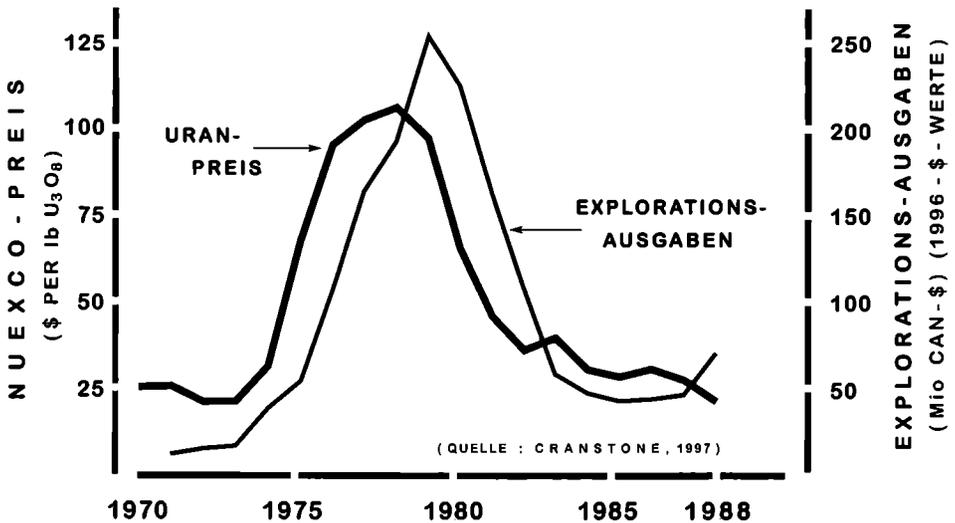


Abb. 7: Entwicklung von Uranpreis und Uranexplorationsangaben in Kanada (nach CRANSTONE, 1997)

Immer wieder kann beobachtet werden, daß sich Meinungen herausbilden, es komme zu zukünftigen Versorgungengpässen, die zu wesentlichen Explorationsanstrengungen und -erfolgen geführt haben. Ein gutes generelles Beispiel ist die Studie über die „Grenzen des Wachstums“, die 1972 auf Initiative des Club of Rome veröffentlicht wurde (MEADOWS et al., 1974). Sie führte zu einem bisher beispiellosen Explorationsboom mit vielen neuen Entdeckungen. Das Explorationsförderprogramm der deutschen Bundesregierung, das von 1971 bis 1990 mit einem Gesamtaufwand von 540 Millionen DM lief, war zwar bereits vorher konzipiert, praktisch aber eine Reaktion der damals vorherrschenden Meinung einer Rohstoffknappheit, die sich in der Studie für den Club of Rome manifestierte. In dem Explorationsförderprogramm konnten Rohstoffunternehmen mit Sitz in der Bundesrepublik Deutschland für Explorationsprojekte weltweit

auf mineralische Rohstoffe bedingt im Erfolgsfall rückzahlbare Zuschüsse in Höhe von in der Regel 50 % der Gesamtexplorationskosten erhalten gegen die Zusicherung, die entdeckten und dann geförderten Rohstoffe in die Europäische Union zu verbringen (BARTHEL et al., 1991).

Andere Beispiele sind der Explorationsboom auf Uran, der 1973 begann, als man meinte, die bekannten Uranreserven würden nicht ausreichen, den zukünftigen Bedarf für die Versorgung der bestehenden und geplanten Kernkraftwerke zu decken, sowie der Boom der Nickelexploration zu Beginn der siebziger Jahre, als man der Meinung war, zur zukünftigen Deckung des Nickelbedarfs seien nicht nur Investitionen in lateritische Nickellagerstätten in großem Umfang notwendig, sondern auch die Gewinnung von Nickel aus den Manganknollen der Tiefsee (WELLMER & BERNER, 1997). In beiden Fällen wurden diese Einschätzungen nach Meinungen vieler durch längerfristige Preissteigerungen beim Uran (s. Abb. 7) und kurzfristige drastische Preissteigerungen auf Grund eines Streiks bei dem weltgrößten Nickelproduzenten in Kanada 1969 von 1\$/lb auf maximal 6,70\$/lb unterstrichen – obwohl Preise nur die Einschätzung der momentanen physischen Versorgungslage widerspiegeln, aber kaum die für die zukünftige Versorgungslage relevanten Reserven oder gar Ressourcen.

Auf derartige Einschätzungen und Ideengebäude, die zu großen Explorationsanstrengungen führten, soll näher eingegangen werden. Die Soziologie kennt den Begriff der Situationen. Basierend auf dem Theorem von Thomas – wenn die Menschen Situationen als real ansehen, sind sie in ihren Konsequenzen real – definierte Merton die sich selbst erfüllende Prophezeiung („self-fulfilling prophecy“, MERTON, 1957). Ein Beispiel wären die Entwicklungen beim Tantal, die zwischen 1979 und 1981 zu drastischen Preissteigerungen führten. Die Tantalverbraucher waren damals der Meinung, daß mit einer Tantalknappheit längerfristig zu rechnen sei. Das führte zum Aufbau größerer Lager als normal, zum Horten, damit wirklich zu Knappheiten am Markt und somit zu weiteren Preissteigerungen. Nachträglich sind viele Insider zu der Beurteilung gekommen, daß es im Grunde überhaupt keine physische Knappheit bei den Verbrauchern gegeben habe; also sich eine „self-fulfilling prophecy“ abspielte.

Nun gibt es auch das Gegenteil, die sich nicht bewahrheitende Prophezeiung („self-destroying prophecy“, HONOLKA, 1976). Die Einschätzung von längerfristigen Knappheiten bei den mineralischen Rohstoffen gehört hierzu. Immer führen derartige Einschätzungen zu verstärkten Bemühungen, die betreffenden Rohstoffe zu explorieren und zu entdecken. Längerfristige Knappheiten lassen höhere Preise erwarten, somit eine gute Chance, gefundene Lagerstätten auch zügig in Produktion nehmen zu können und damit sozusagen eine gute „Prämie“ als Belohnung für das Risiko der Exploration zu erhalten. Exploration auf Erzlagerstätten ist hochrisikoreich. Beginnt man bei null „auf der grünen Wiese“, die sogenannte „grass roots exploration“, so ist die Wahrscheinlichkeit, eine wirtschaftlich ausbeutbare Lagerstätte zu finden, etwa 1:1000, d. h. man benötigt im Durchschnitt statistisch ca. 1000 Ansätze, um einmal fündig zu werden (SAMES & WELLMER, 1981).

Damit ist die Frage über die Lebensdauer und Verfügbarkeit von mineralischen Rohstoffen identisch mit der Frage, wie lange Einschätzungen von zu-

künftigen Knappheiten „self-destroying prophecies“ bleiben und wann sie zu „self-fulfilling prophecies“ werden. Bei keinem mineralischen Rohstoff – im Gegensatz zu Erdöl und bedingt zu Erdgas, wie oben erläutert – ist heute auch auf lange Sicht ein Umschlagen von der „self-destroying prophecy“ zur „self-fulfilling prophecy“ erkennbar.

Oben wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Explorationsausgaben sehr durch das Preisniveau eines Rohstoffes bestimmt werden (s. Abb. 7). Je größer die Zahl der Explorationsprojekte, desto größer natürlich auch die Chance fündig zu werden. Für den Erfolg der Exploration ist das notwendige Budget allerdings nur eine der Voraussetzungen. Wie in jeder Forschung ist auch bei der Exploration das Entscheidende der Ideenreichtum und die Phantasie, die richtigen Explorationsansätze zu finden. Trägt man Zufundraten gegen Preise auf, so sieht man einerseits die zyklische Natur der Entdeckungsraten, andererseits zeigt sich, daß die hohen Fundraten nur teilweise mit Preispeaks zusammenfallen. Beispielhaft ist dies in den Abb. 8 a, b und c für die Entdeckungsraten Kupfer in den USA und Uran und Wolfram in Kanada gezeigt. Da von der Entdeckung einer Lagerstätte bis zur Inbetriebnahme durch ein Bergwerk sowieso viele Jahre vergehen und über solche Zeiträume sich Preise nicht vorhersagen lassen, verfolgen große Bergbau- und Explorationsfirmen in der Regel gerne langfristige Explorationskonzepte, so daß Entdeckungen auch in Preisbaissen gemacht werden. Brillante Ideen für neue Explorationsansätze tauchen unabhängig vom Rohstoffpreis auf. Das gilt auch für Paradigmawechsel (WAGNER, 1997).

Ein gutes Beispiel ist die Entdeckung der porphyrischen Kupferlagerstätte Afton in British Columbia/Kanada. Eine 1964 abgebohrte mineralisierte Zone, die bereits seit 1898 in Ansätzen bekannt war, wies lediglich unwirtschaftliche Kupfergehalte von 0,2 % auf. Die Paragenese von metallischem Kupfer und sekundären Sulfiden deutete auf supergene Anreicherung hin, und der Schluß vieler Bergbaugesellschaften, daß damit das primäre Erz noch ärmer sein müsse, erschien gerechtfertigt. Eine kanadische Juniorgesellschaft – Juniorgesellschaften sind Explorationsgesellschaften, die keine eigenen Bergwerke besitzen und die Explorationsgelder über den Verkauf von Aktien mobilisieren und im allgemeinen risikobereiter sind als etablierte Firmen –, nämlich Afton Mines, löste sich als Outsider vollkommen von dieser Vorstellung und erbohrte 1971 mit eigenen Mitteln einen Erzkörper mit 20 Millionen t und einem Durchschnittsgehalt von 1 % Cu in der Teufe. Es stellte sich heraus, daß die mit 0,2 % Cu ausbeißende supergene Zone nur den erzarmen Randbereich einer tektonisch verkippten Paläoanreicherung des Tertiärs bildete, die überhaupt nichts mit der rezenten Landoberfläche zu tun hat (CARR & REED, 1976).

Übrigens ist diese Entdeckungsgeschichte auch ein Beispiel dafür, daß altbekannte Regionen, die schon viele Explorationsaktivitäten gesehen haben, durch eine zündende Idee wieder attraktiv werden. Die Entdeckung des hochhaltigen Erzkörpers Afton löste natürlich weitere Aktivitäten in der Umgebung auch durch andere Explorationsgesellschaften aus. Der Erzkörper Afton selbst lag unter der wichtigsten kanadischen Verkehrsachsen, nämlich dem Transcanada Highway, der für den Tagebau Afton (Inbetriebnahme 1977) verlegt werden mußte.

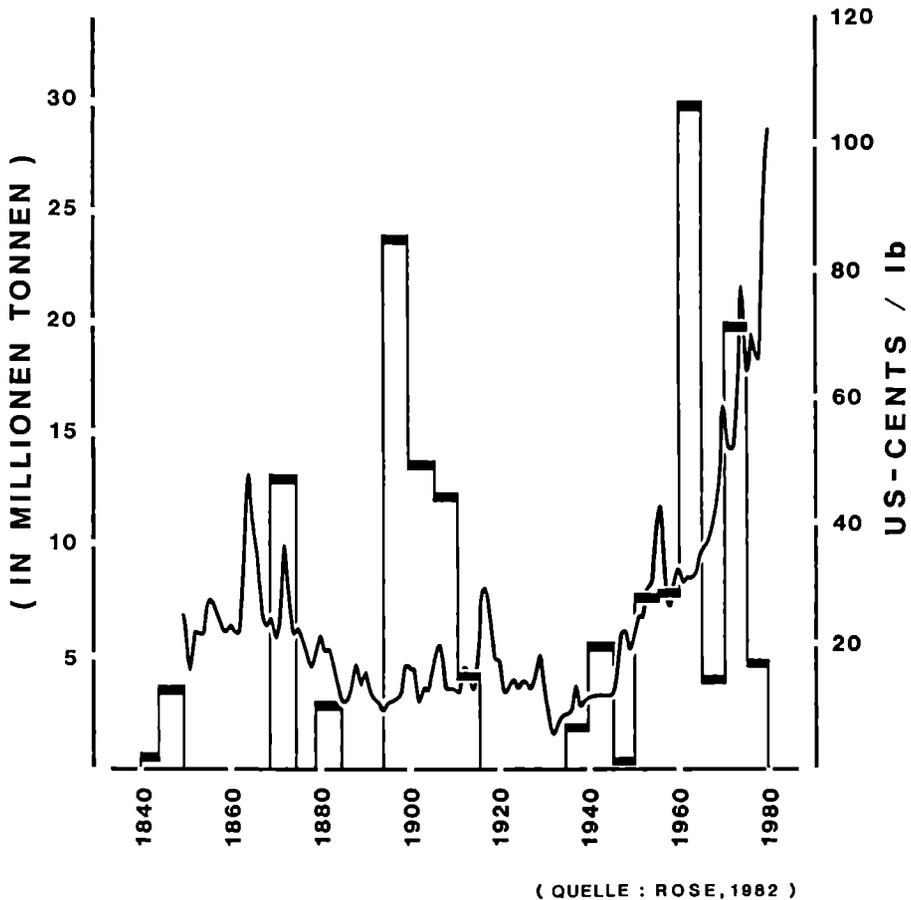
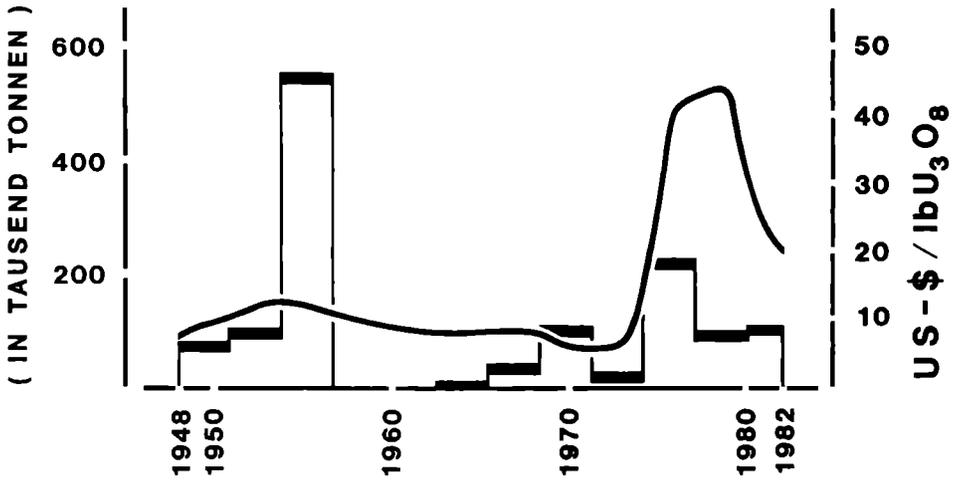


Abb. 8: Entwicklung der Entdeckungsraten und Preise für:
a) Kupfer in den USA (nach ROSE, 1982)

Unter dem Aspekt Paradigmawechsel müssen auch die Lagerstätten gesehen werden, die in Explorationsprogrammen für ganz andere Rohstoffe als die tatsächlich gefundenen entdeckt wurden (Tab. 3). Das jüngste Beispiel ist die Entdeckung des potentiell sehr großen Nickellagerstättendistriktes Voisey's Bay in Neufundland/Kanada im Jahr 1994 in einer ursprünglich auf Diamanten konzipierten Explorationskampagne.

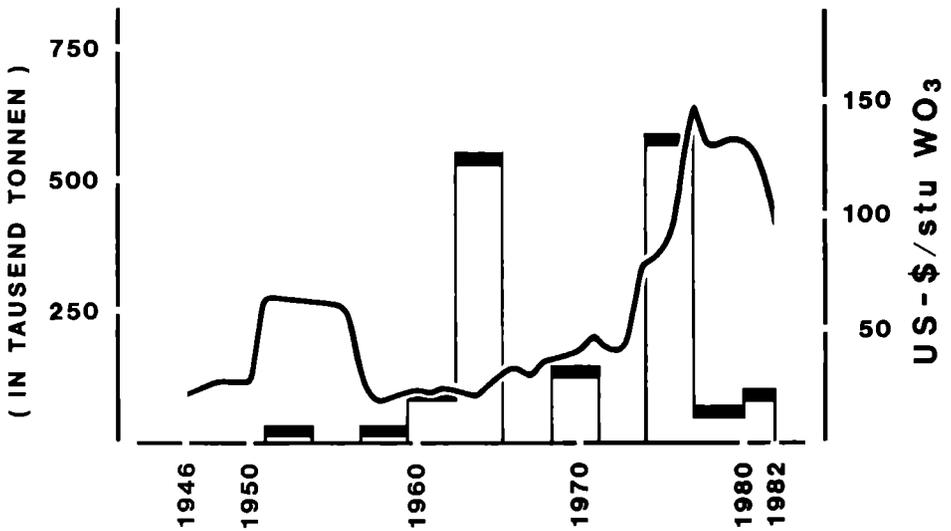
Diese Beispiele zeigen also, daß es sehr schwierig ist, Explorationseffizienz für einen Rohstoff über kurze Zeiträume zu messen. Wiederum müssen lange Zeitreihen betrachtet werden, ähnlich wie bei den Zeitreihen für die Lebensdauer der Reserven.

Statt neue primäre Lagerstätten zu suchen, zu entdecken und auszubeuten, kann natürlich auch die Nutzung der Sekundärlagerstätten verstärkt werden, d. h. das Recycling ist in seiner Intensität wiederum sehr abhängig vom Preisniveau. Die



(QUELLE : CRANSTONE, 1988)

b) Uran in Kanada (nach CRANSTONE, 1988)



(QUELLE : CRANSTONE, 1988)

c) Wolfram in Kanada (nach CRANSTONE, 1988)
 (Preise nach Metallstatistik, Metallgesellschaft AG)

Tabelle 4 zeigt den augenblicklichen Stand bei den wesentlichen Metallen. Die gleiche Preisabhängigkeit gilt für die Substitution, den sparsamen Einsatz von Materialien oder die Suche nach alternativen technischen Lösungswegen. Abb. 9 zeigt als Beispiel Zinn. Der Rückgang der Recyclingquote in der westlichen Welt fällt zusammen mit dem Fallen des nominalen und realen Zinnpreises seit 1980. Zeitverzögert findet der Trend zum immer sparsameren Einsatz von Zinn bei der Weißblechherstellung in den USA (nur hier liegen gute Statistiken vor) ein Ende.

Tabelle 3: Lagerstätten, die in Explorationskampagnen auf andere Rohstoffe entdeckt wurden

Lagerstätte	Lokation	Rohstoff	ursprünglich gesucht
Schaft Creek	British Columbia, Kanada	Cu (Cu porphyry)	Asbest
Howards Pass	Yukon Territory / Northwestern Territories	Pb/Zn (Sedex)	Vanadium
Mount Emmons	Colorado, USA	Mo (Mo porphyry)	ursprünglich Pb-Zn auf Gängen, Mo-Lagerstätte, später erkannt
Voisey's Bay	Newfoundland, Kanada	Ni	Diamanten, 1995 entdeckt
Crow Butte	Wyoming, USA	U (in Sandsteinen, ISL)	als radiometrische Anomalie in Ölbohrungen entdeckt
Venetia, Kimberlitschlot	Northern Province, Südafrika	Diamanten	Cu, Pb, Zn
Witwatersrand	Südafrika	Uran/Gold	ursprünglich nur Gold-lagerstätte, Uran erst in den Fünfzigern entdeckt

Die Substitutionsmöglichkeiten werden oft nur kurzfristig eingeschätzt. Das ist für eine globale Betrachtung der Rohstoffverfügbarkeiten sicherlich zu eng gesehen. Besonders gering werden Substitutionspotentiale bei den Stahlveredlern gesehen. Oft schreibt die Normung gewisse Rohstoffe vor, aber auch hier gibt es von Land zu Land Variationen. Beispielhaft ist in Tabelle 5 der Mangengehalt verschiedener unlegierter Stähle für Druckbehälter nach verschiedenen nationalen und internationalen Normen aufgelistet. Für längerfristige Betrachtungen muß man auch die Möglichkeiten in Betracht ziehen, Normungen und technisch eingefahrene Wege zu ändern, um zu anderen technischen Lösungen zu kommen.

Vergleicht man den Einsatz der Stahlveredler in den großen, statistisch sicherlich vergleichbaren Industrienationen Deutschland, Japan und die USA, so sieht man Ähnlichkeiten, aber auch deutliche sektorale Unterschiede (Tab. 6a und b), die einen Hinweis auf längerfristige Flexibilitäten geben können. Vergleicht man z. B. beim Vanadium den Einsatz in den USA und Deutschland, so sieht man, daß der sektorale Einsatz bei Baustählen und anderen Verwendungen fast identisch ist, bei den Werkzeugstählen Deutschland deutlich mehr Vanadium einsetzt als die USA, während es bei den Röhrenstählen umgekehrt ist.

ENTWICKLUNG DES ZINN - VERBRAUCHS

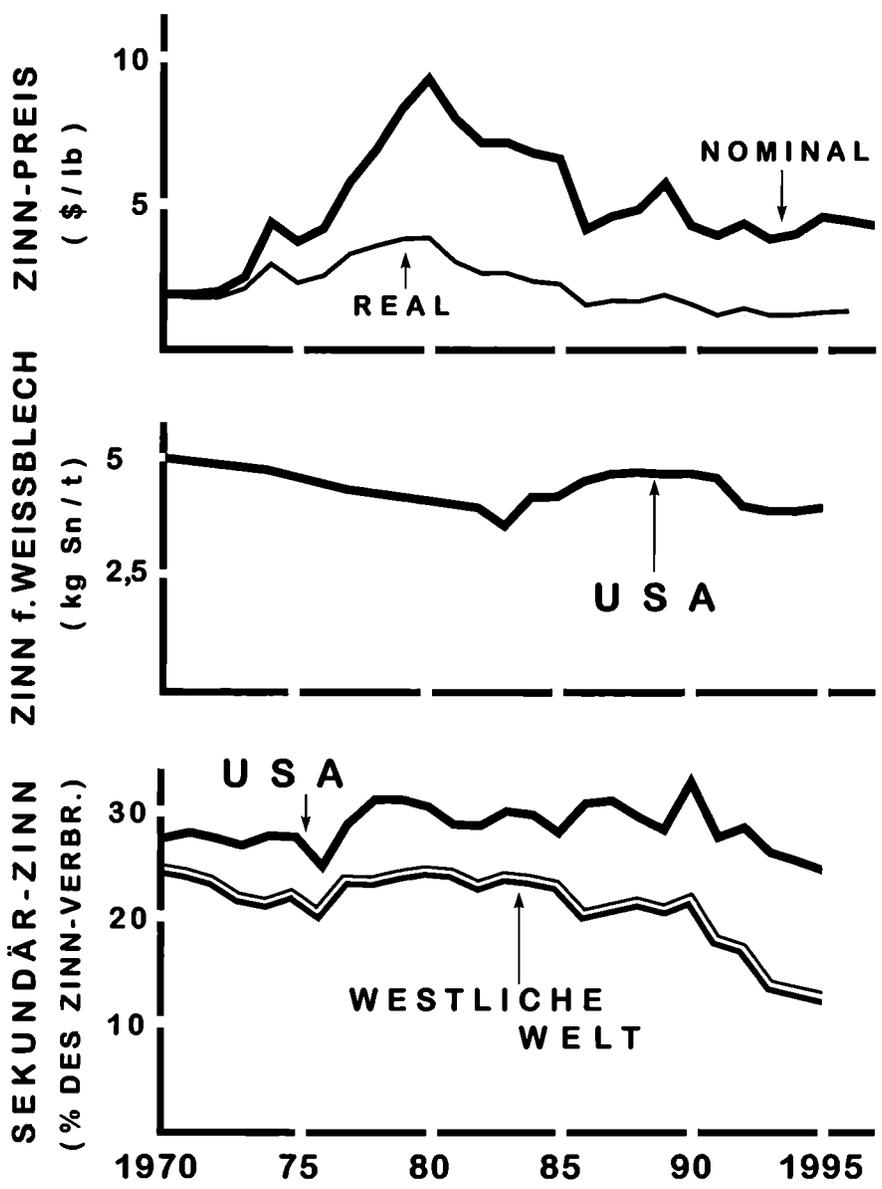


Abb. 9: Zinn: Entwicklung des Preises, Einsatz bei der Weißblechherstellung und Recyclingquoten (Quelle: BGR Mineral Commodity Data Base)

Tabelle 4: Anteil des Sekundärmaterials am Gesamtverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland in vH

	0-5	5-10	10-30	30-50	50
Aluminium				x	
Kupfer				x	
Blei					x
Zink			x		
Zinn		x			
Antimon			x		
Stahl				x	
Chrom			x		
Titan	x				
Kobalt		x			
Mangan			x		
Molybdän			x		
Nickel			x		
Niob	x				
Tantal		x			
Vanadium		x			
Wolfram				x	
Zirkon			x		
Gold				x	
Silber				x	
Platin					x
Palladium				x	

Tabelle 5: Einfluß der Normung auf Rohstoff-Verbräuche

Stahl: Unlegierte Stahlbleche für Druckbehälter				
USA	ASTM A 445	max. 0,33 % C	0,85 bis	1,20 % Mn
USA	ASTM A 515	max. 0,35 % C	max.	1,20 % Mn
Polen/Euronorm	EN 10028-2	max. 0,20 % C	0,50 bis	1,40 % Mn
ISO	ISO 9328-2	max. 0,20 % C	0,50 bis	1,40 % Mn
Japan	JISG 3103	max. 0,35 % C	max.	0,90 % Mn

Ein fast schon klassisches Beispiel wie nicht nur durch den Antrieb der Kostenersparnis, sondern auch durch ein gesteigertes Umweltbewußtsein die Recyclingquoten gesteigert und damit Primärrohstoffe gespart werden können, ist das Behälterglasrecycling in der Bundesrepublik Deutschland. Die Quote stieg von 6,5 % (Einsatz von Altglas am Gesamtverbrauch) im Jahre 1974 auf 78,8 % 1996. Da Altglas als amorphe Substanz bei niedrigeren Temperaturen

schmilzt als kristalliner Quarz, wird Energie gespart und damit der CO₂-Ausstoß verringert. Der CO₂-Ausstoß reduziert sich weiterhin dadurch, daß bei Altglas auch die anderen Primärrohstoffe Kalk, Dolomit und Natriumkarbonat nicht neu zugesetzt werden müssen (BOSSE, 1995).

Tabelle 6a: Vanadium (1993)

	USA %	Deutschland %	Mittel %	Abweichung vom Mittel % (relativ)
Anwendung bei Eisen/Stahl	95	96		
davon				
Werkzeugstähle	9	17	13	30,7
Baustähle	20	22	21	4,8
Röhrenstähle	33	20	26,5	24,5
andere Anwendungen	5	4		

(Quelle: Minerals Yearbook, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung)

Tabelle 6b: Nickel (1994)

	USA %	Japan %	Deutschland %	Mittel %	durchschnittliche Abweichungen vom Mittel % (relativ)
Rostfreie und legierte Stähle	49	69	73	63,7	15,3
Nichteisenlegierungen	29	10	20	19,7	32,6
Elektroplattierungen	16	7	4	9	51,9
andere Anwendungen	6	14	3	7,7	55

(Quelle: Minerals Yearbook 1996–1997)

3. Technische Verfügbarkeit

Bisher ist überwiegend über die geologische Verfügbarkeit gesprochen worden, weniger jedoch über die technische. Rohstoffe stehen erst dann zur Verfügung zur Verfügung, wenn Lagerstätten bergmännisch erschlossen worden sind. Somit spielt unter dem Aspekt der Verfügbarkeit auch die Vorlaufzeit eine Rolle, die benötigt wird, neue Lagerstätten in Produktion zu nehmen. Gemeinhin wird angenommen, daß diese Vorlaufzeiten länger geworden sind. Dieser Frage wurde kürzlich in einer Untersuchung der ISMI-Gruppe (International Strategic Minerals Issues), in der die geologischen Dienste von Australien, Deutschland, Großbritannien, Kanada, Südafrika und den USA zusammenarbeiten, nachgegangen (WELLMER et al., 1997).

Verschiedene Vorlaufzeiten wurden definiert (WELLMER, 1992). Danach umfaßt die Vorlaufzeit I den gesamten Zeitraum von der Entdeckung einer Lager-

stätte bis zum Beginn des Abbaus, einschließlich eventueller, nicht berücksichtigter, Unterbrechungen, die Vorlaufzeit II den gleichen Zeitraum ohneletzt genannte. Beide Zeiträume geben in der Regel nur Auskunft über individuelle Größen, die z. B. durch Einflüsse wie die Politik der Explorationsfirmen oder Einschätzung der zukünftigen Marktentwicklung u. a. gesteuert werden. Unter dem wirtschaftlich notwendigen Aspekt einer sicheren Kalkulation der Versorgung wäre die Vorlaufzeit IV wie folgt der richtige Parameter (Vorlaufzeit III s. u.).

Die Vorlaufzeit IV beginnt mit einem plötzlichen Preisanstieg eines Rohstoffs, der Bergbaufirmen veranlaßt, die Wirtschaftlichkeit von schon bekannten, aber noch nicht in Produktion befindlichen Lagerstätten zu überprüfen. Das Ende der Vorlaufzeit IV wäre danach der Betriebsbeginn. Da diese Zeit mit nicht-vertraulichen Daten, mit denen ISMI ausschließlich arbeitet, schwierig zu recherchieren ist, wurde mit der Vorlaufzeit III gearbeitet, die folgendermaßen definiert ist: Vorlaufzeit III beginnt nach dem letzten „Shelving-Stadium“ (eine Zeit, in der das Projekt aus augenblicklicher Unwirtschaftlichkeit nicht weiter bearbeitet wird), d. h. mit Beginn der letzten Untersuchungsphase, die ohne Unterbrechung zu einer positiven Feasibilitystudie und dann zur Produktionsaufnahme führt. Sollten die Projektarbeiten überhaupt nie unterbrochen worden sein, dann wäre Vorlaufzeit III identisch mit der klassischen Vorlaufzeit von der Lagerstättenentdeckung bis zur Produktionsaufnahme (Vorlaufzeit I).

Tabelle 7: Ergebnisse der ISMI-Vorlaufstudie (Vorlaufzeit III)

Rohstoff	Ländergruppierungen	20 % untere Percentile	Median	Zahl der Gruben
Gold	Entwicklungsländer	4,3	6,3	45
	Industrieländer	2,1	3,0	138
Buntmetalle	Entwicklungsländer	5,0	7,6	68
	Industrieländer	4,0	5,7	95
Nickel	Entwicklungsländer	6,2	6,6	15
	Industrieländer	4,5	5,9	27
porphyrische Kupferlagerstätten	Entwicklungsländer	6,3	8,5	25
	Industrieländer	5,7	7,0	22

Die Ergebnisse dieser ISMI-Studie sind in Tabelle 7 summiert. Die wichtigsten Ergebnisse sind: Es gibt keine Hinweise, daß sich die Vorlaufzeiten (Vorlaufzeit III) während der letzten 15 Jahre verlängert haben. Der Medianwert für die meisten Projekte ist 5–9 Jahre; für Goldprojekte 2–5 Jahre. Signifikante neue Versorgungsmengen (die unteren 20 % Percentil-Werte) sind für die meisten Projekttypen nach 4–6 Jahren verfügbar. Vorlaufzeiten in Entwicklungsländern sind nur wenig länger als in Industrieländern mit Ausnahme von Goldprojekten, bei denen die Medianwerte der Vorlaufzeiten in Entwicklungsländern 60–100 % länger sind. Für die meisten Rohstoffe und Ländergruppierungen

sind die Vorlaufzeiten für Tagebaue länger als für Untertagegruben. Zwischen den Vorlaufzeiten und den Kapazitäten konnte keine signifikante Korrelation gefunden werden.

4. Abschießende Betrachtung zu den Regelkreisen der Rohstoffversorgung

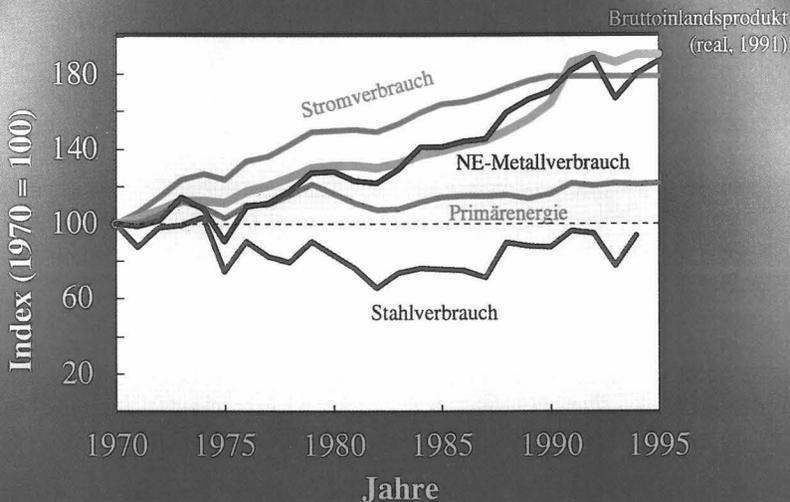
Sicherlich kann sich der Trend, wie oben bereits angedeutet, zu immer hochhaltigeren Lagerstätten und hoher Verfügbarkeit bei relativ niedrigen Preisen nicht ungebrochen fortsetzen. Das heißt auch, daß Rohstoffe sehr viel teurer werden können, u. U. auch auf ein Preisniveau steigen können, das langfristig wesentlich über dem historischen oder dem heutigen liegt. Wie oben abgeleitet, ist ein Steigen der Preise ja gerade ein Mechanismus, durch den das Angebot an wirtschaftlich gewinnbaren Vorräten überproportional gesteigert wird. Das Preisniveau regelt auch die Intensität der Exploration, die Nutzung sekundärer Lagerstätten durch das Recycling, die Anstrengungen zum sparsameren Einsatz von Rohstoffen oder die Suche nach völlig anderen Wegen zur Erreichung des technischen Zieles. Hier spielt die Ressource der menschlichen Kreativität eine entscheidende Rolle. Der frühere Direktor des US Geological Survey, McKelvey, hat versucht, dies in eine Formel zu bringen (McKELVEY, 1972):

$$L = \frac{R \cdot E \cdot I}{P}$$

Hierbei ist L der Lebensstandard der Bevölkerung, gemessen durch den Verbrauch an Gütern und Dienstleistungen, R der Verbrauch von allen Arten von Rohstoffen (einschließlich Metallen, Nichtmetallen, Wasser, Boden und biologischen Rohstoffen), E ist der Energieverbrauch, P die Zahl der Bevölkerung, die sich diesen Nutzen teilt und I ist ein Maß für den Einfallsreichtum auf politischem, sozioökonomischem und technologischem Gebiet. An dieser Formel muß man unter heutigen Gesichtspunkten Kritik üben. Nach der ersten Ölkrise 1973 hat sich in vielen Industrienationen der Energieverbrauch und auch vieler anderer Rohstoffe von der Entwicklung des Bruttosozialproduktes entkoppelt (WELLMER & KÜRSTEN, 1994). Bei den metallischen Rohstoffen gilt das insbesondere für Eisen und Stahl, während andere, die für hochwertige, intelligente Produkte notwendig sind, wie z. B. die Buntmetalle oder gewisse Stahlveredler, immer noch mit der Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes korrelieren. Abb. 10 zeigt dies beispielhaft für die Bundesrepublik Deutschland. Im Sinne eines immer sparsameren Materialeinsatzes mit dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung muß diese Entwicklung auch weitergetrieben werden. Von Bedeutung ist in der Formel von McKelvey jedoch der Einfallsreichtum I.

In funktionsfähigen Märkten haben die oben diskutierten Regelkreise unter Einsatz des menschlichen Einfallsreichtums die Rohstoffversorgung bisher sichergestellt. Es gibt bislang keinen Grund zur Annahme, daß dies in Zukunft nicht der Fall sein sollte. Eduard Pestel, ein Mitbegründer des Club of Rome, sei zitiert, der in seinem letzten Fernsehinterview sagte, daß er im Hin-

Deutschland: BIP, Energie- und Metallverbrauch



BGR

Abb. 10: Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und der Energie- und Metallverbräuche in der Bundesrepublik

blick auf die Ressourcen dieser Erde optimistisch sei. Wenn die Änderungen nicht zu schnell kämen, würde der Mensch immer neue Lösungen finden. Die Zeitdauer, also der Zeitpuffer, neue Lösungen zu finden, wird durch die eingangs diskutierte Lebensdauer der Reserven gegeben.

Nach diesem Konzept der Regelkreise zur Rohstoffversorgung sind die Rohstoffe am kritischsten zu sehen, bei denen die Flexibilität zu reagieren, am geringsten ist. Das sind bei den mineralischen Rohstoffen die Düngemittelrohstoffe Kali und Phosphat. Beide Rohstoffe werden, fast vergleichbar mit der Energie, verbraucht. Die Pflanzen brauchen sie zum Wachstum. Sie können nicht rezykliert und auch nicht – wie bei den Energierohstoffen durch andere Energierohstoffe – substituiert werden. Bei Kali und Phosphat sind allerdings die bekannten Reserven und Ressourcen sehr groß (KÄDING, 1995); damit haben sie statistisch eine lange Lebensdauer der Reserven, so daß man fast von einem Rohstoffparadoxon sprechen könnte.

Noch ein letztes Wort zur Lebensdauer der Reserven von Seltenen Erden und den Rohstoffen, die für High-Tech-Anwendungen wichtig sind, die sogenannten „electronic metals“, wie Gallium und Germanium. Die Lebensdauer der Seltenen Erden beträgt mehrere hundert Jahre. Die Vorräte sind riesig; viele

Lagerstätten sind bekannt und können wegen fehlender Märkte nicht in Produktion gebracht werden (WELLMER et al., 1988). Die sogenannten „electronic metals“ werden beibrechend mit anderen Rohstoffen wie Zink oder Aluminium (Bauxit) gewonnen. Daher interessiert das Angebot aus den Primärlagerstätten und dem wirklich gewonnenen Anteil. Dies ist in Tabelle 8 dargestellt. Der „Deckungsgrad“ (letzte Spalte) liegt bei allen weit über 1, so daß auch hier Knappheiten nicht erkannt werden können.

Tabelle 8

	Weltproduktion in t	verfügbare Menge in t	Reservenbasis in t	verfügbare Menge Weltproduktion
Gallium	60	2200	1 Mio.	≈ 35
Thallium	15	150	1000	10
Indium	150	500	8100	> 3
Germanium	45	500	500 (US)	≈ 10
Rhenium	29	50–150	13500	≈ 4
Arsen	32.570	80.000	20–30 x	> 2
(Trioxid zu 76 % As)	(davon 1 % in der Elektronik)		Weltproduktion	

(Quelle: W. SIMON 1994, Mineral Commodity Summaries, US Bureau of Mines, BGR Mineral Commodity Data Base)

Obwohl es auf der Hand liegt, soll hier auch etwas zum spezifischen Verbrauch oder dem ebenso oft benutzten Begriff *Pro-Kopf-Verbrauch* gesagt werden. Im Gegensatz zu den eben genannten Düngemitteln und Energieträgern werden die meisten mineralischen Rohstoffe im eigentlichen Sinn gar nicht verbraucht. Sie bleiben physisch auf der Erde – sieht man von Teilmengen bei der Müllverbrennung und den nicht wiederkehrenden Satelliten und Weltraumsonden ab. So liegen die größten Kupferkonzentrationen im Kabelgeflecht der Metropolen. Deutschland liegt z. B. im Pro-Kopf-Verbrauch bei allen Metallen in der Spitzenposition. Doch jeder weiß, daß diese in Form von Produkten des „Exportweltmeisters“ sowohl als Ware wieder das Land verlassen, als auch als Autos, Maschinen etc. im Land verbleiben und später hier oder anderswo als Sekundärrohstoff wieder zur Verfügung stehen.

5. Danksagung

Der Autor dankt Herrn Dr. P. Kiehl, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, für die Daten der Tabelle 5, Herrn Prof. Dr. K. Weis, Technische Universität München, für die Diskussion über den Begriff der Situationen, Frau Dr. I. Häußler, den Herren Dr. F. Barthel, Dr. U. Berner, Dr. H.-R. Bosse, Dr. M. Dalheimer, Dr. K. Fesefeldt, A. Thormann und Dr. H. Wagner, Bundesanstalt für

Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover und Berlin, für umfangreiche Recherchen, sowie Frau R. Draws für das Erstellen der Zeichnungen und Frau S. Ebert für die Erstellung des Manuskriptes.

Literatur

BARTHEL, F., BUSCH, K., KÖNNECKER, K., THOSTE, V., WAGNER, H. (1991): Zwanzig Jahre Explorationsförderung für mineralische Rohstoffe durch das Bundesministerium für Wirtschaft. – Geol. Jb. A 127, 271–288, Hannover.

BENDER, F. (1977): An earth scientist's view of metallic resources. – In: BENDER, F. (Hrsg.): The importance of the geosciences for the supply of mineral raw materials. Schweizerbart, Stuttgart, 117–136.

BENDIEK, A. B. (1995): Der technische Fortschritt und sein Einfluß auf die langfristige Realpreisentwicklung von mineralischen Rohstoffen. Mainz-Aachen, 227 S.

BOSSE, H.-R. (1995): Rohstoffeinsparung durch Hohlglas-Recycling. Zeitschrift für angewandte Geologie 41, 45–47.

CARR, J. M., REED, A. J. (1976): Afton: A supergene copper deposit. – In: SUTHERLAND-BROWN, A. (Hrsg.): Porphyry Deposits of the Canadian Cordillera. CIM Spec. Vol. 15, 376–387.

CRANSTONE, D. A. (1988): The Canadian mineral discovery experience since World War II. – In: TILTON, EGGERT & LANDSBERG (Hrsg.): World mineral exploration. Washington D. C. (Resources for the Future).

CRANSTONE, D. A. (1997): Mineral exploration in Canada. Geowissenschaften, 15, 10/11 (im Druck).

GUTMAN, G. O. (1983): Cyclical characteristics of the mining industry. Studie für Australian Mining Industry Council, Canberra.

HILLER, K. (1997): Depletion mid-point and the consequences for oil supplies. Proc. 15th World Petroleum Congress, Beijing (im Druck).

HONOLKA, H. (1976): Die Eigendynamik sozialwissenschaftlicher Aussagen: Zur Theorie der self-fulfilling prophecy. Campus, Frankfurt/M.

HUBBERT, M. K. (1969): Energy resources in: Resources and man, a study and recommendations by National Academy of Sciences. – National Research Council. Freeman, San Francisco, 259 S.

IVANHOE, L. F., LECKIE, G. G. (1993): Global oil and gas fields, sizes tallied, analysed. – Oil and Gas Journal 91, 87–91, (Febr. 5).

KÄDING, K.-C. (1995): Kali- und Steinsalzvorkommen. – Verbreitung, Vorräte, Bergbau. Kali und Steinsalz, 10, 319–325.

LASKY, S. G. (1950): How tonnage and grade relations help predict ore reserves. – Eng. Min. J., 81–85.

McKELVEY, V. E. (1972): Mineral resource estimates and public policy. – American Scientist 60, 32–40.

MEADOWS, P. H., MEADOWS, P. L., RANDERS, J., BEHRENS, W. W. (1974): The limits to growth: A report for the Club of Rome's Project in the Predicament of Mankind (2nd edition). Universe Books, New York, 176 S.

MERTON, R. K. (1966): Die Eigendynamik gesellschaftlicher Voraussagen. – In: TOPITSCH, E. (Hrsg.): Logik der Sozialwissenschaften (3. Auflage). Kiepenheuer & Witsch, Köln, 144–161.

Metallgesellschaft AG: Metallstatistik, verschiedene Jahrgänge, Frankfurt/M.

ROSE, A. W. (1982): Mineral adequacy, exploration success and mineral policy in the United States. – J. Geochem. Exploration 16, 163–182.

SAMES, C. W., WELLMER, F. W. (1981): Exploration I: Nur wer wagt, gewinnt – Risiken, Strategien, Aufwand, Erfolg. Glückauf 117, 10.

Shell AG (1996): Perspektiven für Erdöl und Erdgas im 21. Jahrhundert. – Aktuelle Wirtschaftsanalyse 10, 27, 1–11, Hamburg.

SIEBEL, C. N. A. (1993): Strukturwandel im Eisenerzbau. – In: EICHMEYER, H. (Hrsg.) 5. Kohle-Stahl-Kolloquium Berlin 1993, Systemdruck, Berlin, 89–108.

SIMON, W. (1994): Unternehmensstrategien zur Beeinflussung der Angebotselastizität auf Nebenmetall-Märkten. – Dissertation RWTH Aachen, 400 S.

SINGER, D. A. (1995): World class base and precious metals deposits – a quantitative analysis – Econ. Geol. 90, 88–104.

WAGNER, M. (1997): Ökonomische Bewertung von Explorationserfolgen über Erfahrungskurven. – Dissertation TU Berlin, 225 S.

WELLMER, F.-W. (1992): The concept of lead time. – Minerals Industry International, 1005, 39–40.

WELLMER, F.-W., BERNER, U. (1997): Factors useful for predicting future mineral-commodity supply trends. – Geol. Rundschau 86, (im Druck).

WELLMER, F.-W., KÜRSTEN, M. (1994): Changing resources in societies: metals towards new materials, fossil fuel towards renewables. A changing role for geological surveys? – Geol. Survey Canada, Misc. Report 55, 73–87.

WELLMER, F.-W., SCHMIDT, H. (1989): Versorgungslage bei Rohstoffen. – Stahl und Eisen 109, 2, 55–60.

WELLMER, F.-W., HANNAK, W., KRAUSS, U., THORMANN, A. (1988): Deposits of rare metals. – In: KÜRSTEN M. (Hrsg.): Raw materials for new technologies, Schweizerbart, Stuttgart, 71–121.

WELLMER, F.-W., DEYOUNG, J. H. JR., GÜNTHER, M., WAGNER, H. (1997): The study of lead times. – US Geological Survey Circular (im Druck).

Anschrift des Verfassers:

Präsident Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm WELLMER
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Postfach 510153
D-30631 Hannover