

Umweltforschung in Baden-Württemberg

Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums
Umweltforschung Baden-Württemberg 2018

19./20. April 2018
Schwabenlandhalle Fellbach
Guntram-Palm-Platz 1, 70734 Fellbach

NEXUS – Vergleichende Analyse der Ressourceneffizienz von Primär- Sekundärrohstoffgewinnung

von

Mario Schmidt, Nadine Rötzer
Hochschule Pforzheim
Institut für Industrial Ecology INEC

Förderkennzeichen: L75 16001

Die Arbeiten dieses Projekts werden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt

NEXUS – Vergleichende Analyse der Ressourceneffizienz von Primär- und Sekundärrohstoffgewinnung

Förderkennzeichen: L75 16001

Autoren: Nadine Rötzer, Mario Schmidt

Laufzeit: 1.12.2015-31.12.2018

Einleitung

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen steht heute mehr im Mittelpunkt als je zuvor. Seitens der Politik, Wissenschaft und Gesellschaft wird ein nachhaltiger Umgang mit den vorhandenen Ressourcen gefordert, um auch zukünftig eine Versorgung sicherzustellen. Doch wie lange reichen die Rohstoffe in unserer Erde und wie knapp sind diese wirklich? Im Laufe der Zeit wurden verschiedenen Konzepte entwickelt wie z. B. die statischen Reichweiten oder die Kritikalität, um den begrenzten Charakter unserer Rohstoffvorkommen zu erfassen und zu bewerten. Ein weiterer Ansatz bei der Betrachtung der Rohstoffverfügbarkeit basiert auf den Metallgehalten der Erze (engl. Ore Grade). Zahlreiche Arbeiten zeigen, dass diese im Laufe der Zeit stets abnehmen und auch zukünftig sinken werden (siehe u. a. Mudd 2009; Northey et al. 2014; Calvo et al. 2016; Crowson 2012). Auf dieser Basis wird oft argumentiert, dass die Menschheit alle qualitativ hochwertigen Lagerstätten zuerst ausgebeutet hat und nun immer mehr auf die verbleibenden schlechteren zurückgreifen muss. Damit stoßen wir an die Grenzen der Rohstoffverfügbarkeit, da die Konzentration einzelner Rohstoffe in unserer Erde so gering sein wird, dass ein Abbau nicht mehr möglich ist. Dass die Gehalte der zur Deckung des Bedarfs abgebauten Erze sinken, steht außer Frage. Was jedoch hinterfragt werden muss, ist, weshalb die Konzentration von Kupfer, Zink und Gold sowie vielen weiteren Metallen und Rohstoffen in den verarbeiteten Erzen abnimmt. Ist dies tatsächlich ein rein geologisches Phänomen oder aber nicht vielmehr ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren? Diese Frage spielt in dem NEXUS-Projekt eine zentrale Rolle, da sie Ausgangspunkt für weitere Überlegungen zu den geeigneten Indikatoren und den eigentlichen Schutzgütern von entsprechenden Handlungsstrategien ist. Dieser Frage soll im Folgenden am Beispiel Kupfer nachgegangen werden. Kupfer ist ein oft verwendetes Metall in der Diskussion um die Verfügbarkeit von Rohstoffen. Gründe hierfür sind die mengenmäßig starke Verwendung von Kupfer in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, die gute Datenverfügbarkeit und die Vergesellschaftung mit vielen anderen Metallen.

Entwicklung der Erzgehalte

Eine der bekanntesten Arbeiten zur Entwicklung der Erzgehalte geht auf Mudd (2009) zurück. Sie wird immer wieder zitiert, etwa vom International Resource Panel der UNEP. Dabei kommt es häufig zu Interpretationen, die nicht immer mit der ursprünglichen Datengrundlage verträglich sind. Der Autor arbeitet in seinem Report „The Sustainability of Mining in Australia“ die Entwicklung der australischen Rohstoffgewinnung und deren Implikationen für die Umwelt heraus. Er betrachtet dabei nicht nur Kupfer, sondern auch weitere wichtige mineralische Rohstoffe wie Kohle, Uran, Eisen, Aluminium, Mangan, Sand, Kupfer, Gold, Nickel, Blei-Zink-Silber und Diamanten. Als Datenquelle dienen in erster Linie Reports der Minenunternehmen sowie Veröffentlichungen von Behörden wie bspw. Geoscience Australia (<http://www.ga.gov.au/>). Da viele Reportingsysteme wie z. B. der Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (JORC Code; <http://www.jorc.org/>) erst im Laufe des 20. Jahrhunderts eingeführt wurden, sind ältere Daten einzelnen (nicht zwangsweise wissenschaftlichen) Publikationen zu Minen oder Regionen entnommen und nicht für alle Jahre und Rohstoffe vollständig. Dennoch ist der dadurch entstehende Fehler für eine generelle Tendaussage über den langen Zeitraum zu vernachlässigen. Hinsichtlich des Ore Grades zeigt sich bei allen Rohstoffen ein genereller Abwärtstrend (Mudd 2009). Abbildung 1 zeigt den Kupfererzgehalt für Australien über die

Jahre 1842 bis 2007. Betrachtet man diese Werte, so fällt der plötzliche Fall der Erzgehalte um 1885 von einem Niveau von rund 15% auf etwa 5% auf - trotz fast gleichbleibender Produktion. Wirft man hier einen Blick auf die Datenbasis, so zeigt sich, dass die Datenverfügbarkeit in dieser Zeitspanne nicht optimal ist. Um die Jahre 1882 bis 1889 werden nur rund 30% der Kupferproduktion in Australien abgedeckt, davor z. T. deutlich weniger. Allgemein beträgt die Datenverfügbarkeit zwischen etwa 1850 und 1890 mit wenigen Ausnahmen unter 50% der Produktion, in den anderen Zeiträumen liegt sie meist im oberen Viertel (Mudd 2009). Die Daten repräsentieren deshalb weniger einen allgemeinen Trend in der Kupferproduktion, sondern der plötzliche Abfall des Erzgehalts um 1885 kommt unter anderem durch die eingeschränkte Datenverfügbarkeit zustande. Zudem sind die Produktionsmengen in Australien verhältnismäßig gering und verteilen sich auf wenige Minen, daher haben einzelne Minen einen relativ großen Einfluss. Dies zeigt sich unter anderem auch durch den Peak 1928. Eine der großen Minen, Mt Morgan, wurde 1927 durch ein Feuer teilweise zerstört und konnte erst in den 30er Jahren wieder voll produzieren (Mudd 2009). Mt Morgan hatte im Vergleich zu den anderen Minen einen geringen Erzgehalt (0,5-1%) bei einem relativ großen Produktionsanteil (ca. 20%), was zu einer kurzzeitigen Erhöhung des durchschnittlichen Erzgehaltes für diese Jahre führte. Solche Ereignisse sind zufällig, haben jedoch großen Einfluss auf die abgebildeten Erzgehalte. Konnten in den Jahren der geringen Datenverfügbarkeit nur Daten für Minen mit einem überdurchschnittlich hohen (oder geringen) Erzgehalt recherchiert werden, so beeinflusst dies den Verlauf stark.

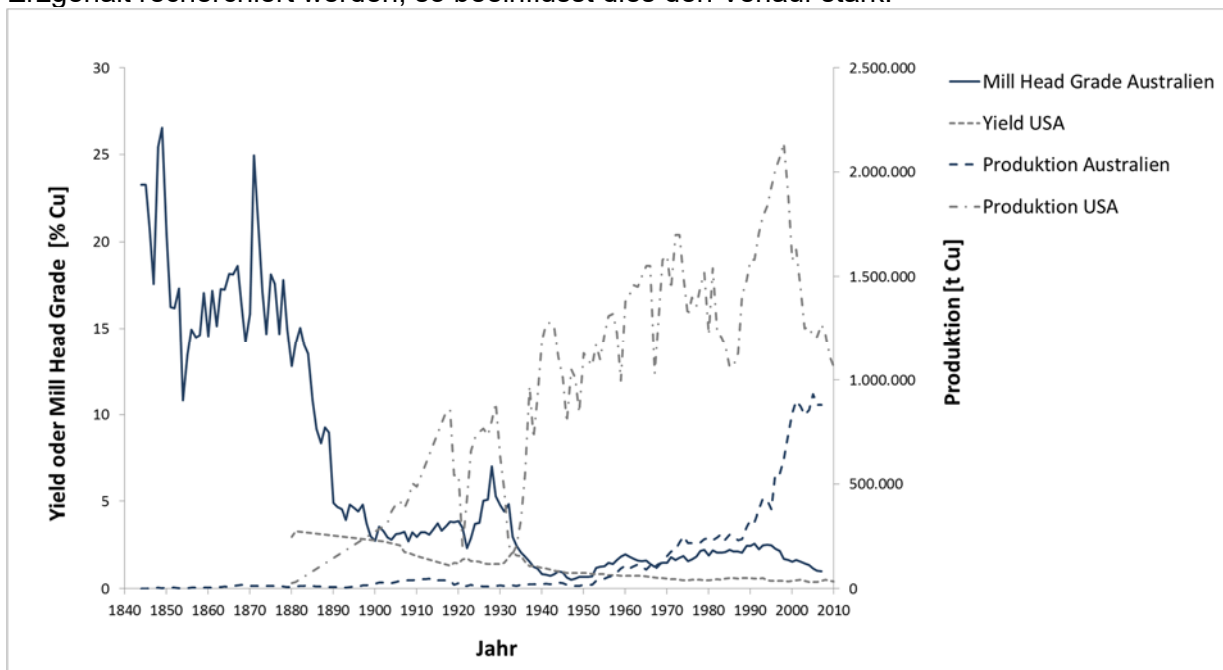


Abbildung 1: Produktion und Ore Grade Cu 1842-2007 (eigene Darstellung basierend auf Daten von Mudd 2009; USGS var.; Leong et al. 1940)

Verschiedene Daten zu Kupfer und anderen Metallen und Mineralien sind ebenfalls für die USA erhältlich. Dazu veröffentlicht der United States Geological Survey (USGS) jährliche Berichte wie das Minerals Yearbook (USGS var.). Die Daten gehen dabei auf Umfragen, die seitens des USGS durchgeführt und statistisch ausgewertet werden, zurück. Die ersten online verfügbaren Ausgaben stellen Daten Ende der 1920er Jahre bereit. Die durch den USGS verfügbaren Daten zur Entwicklung des Erzgehalts von Kupfer in den Vereinigten Staaten sind ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt. Für die Jahre vor 1928 wurden aus anderen Veröffentlichungen Daten recherchiert. Auffällig ist, dass die abgebauten Erzgehalte in den Vereinigten Staaten prinzipiell geringer sind, als die in Australien und etwas flacher verlaufen. Crowson (2012) bestätigt das auch im Vergleich zum globalen Durchschnitt für die letzten Jahrzehnte. Eine Begründung liegt unter anderem in den jeweilig vorhandenen Lagerstätten. In den USA sind dies hauptsächlich porphyrische, die (worauf später noch eingegangen wird)

durchschnittlich einen sehr geringen Ore Grade haben (Crowson 2012; Weber 2015a). In Australien haben Lagerstätten des Typs IOCG den größten Anteil an den Ressourcen (im Jahr 2010 u. 2013 ca. 60%), dieser Lagerstättentyp hat durchschnittlich einen höheren Erzgehalt als porphyrische Lagerstätten (Jaireth et al. 2010, Weber 2015a, 2015b).

Zudem sind für die USA und Australien unterschiedliche Werte angegeben. Der USGS berichtet den Yield, für Australien ist die Mill Head Grade angegeben, dies führt im Falle der USA zu einer abgeflachten Kurve. Der Yield (engl.; Gewinn) gibt die Ausbeute an Metall pro Menge abgebautem Erz an. Besonders ältere Daten spiegeln oft diesen Wert wider. Im Vergleich zur Mill Head Grade, welche den Metallgehalt des in der Mühle verarbeiteten Erzes angibt, beinhaltet der Yield auch die technische Effizienz der eingesetzten Verfahren und ist daher etwas niedriger als die entsprechende Mill Head Grade. Yield und Mill Head Grade gleichen sich aber mit der Steigerung der Effizienz im Laufe der Jahre immer mehr an, daher werden auch die in Abbildung 1 abgebildeten Daten mit zunehmender Zeit vergleichbarer (Corry und Kiessling 1938). Oft sind die beiden Angaben aber nicht eindeutig zu trennen bzw. es liegen für einzelne Jahre nicht beide Angaben vor. Für das 19. Jahrhundert sowie die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts ist oft der Yield angegeben. Mudd (2009) korrigiert diesen in seiner Arbeit, sofern möglich, anhand Effizienzangaben zum jeweiligen Zeitraum. Der USGS gibt in seinen Minerals Yearbooks für alle Jahre den Yield an, die abgebildete Kurve beinhaltet daher die Effizienz der eingesetzten Verfahren. Das bedeutet, dass sie wie bereits erwähnt noch steiler sein müsste, würde man durchgehend den Erzgehalt des tatsächlich verarbeiteten Erzes betrachten. Neben den Begriffen Yield und Head Grade wird häufig auch der Begriff Ore Grade verwendet, dieser ist nicht einheitlich definiert und wird vielseitig verwendet, bezieht sich jedoch meist auf den Metallgehalt der vorhandenen Reserven und/oder Ressourcen. Dabei sind die Reserven der Teil der Rohstoffe, der bekannt ist und unter derzeitigen Bedingungen wirtschaftlich abgebaut werden kann. Die Ressourcen hingegen beschreiben die bekannten Vorräte an Rohstoffen, die unter aktuellen Bedingungen nicht wirtschaftlich gewonnen werden können. Darüber hinaus gibt es noch das Geopotential, welches das vorhandene, aber derzeit noch nicht bekannte Potential an weiteren Rohstoffvorkommen beinhaltet. Die Grenzen von Reserven und Ressourcen sind daher dynamisch und verändern sich z. B. mit dem aktuellen Preis (Wellmer 2014). Oft werden die erläuterten Begriffe nicht eindeutig getrennt oder es ist nicht auf den ersten Blick zu erkennen, welche Daten abgebildet sind. Grundsätzlich ist bei allen Angaben ein Abwärtstrend zu erkennen, dennoch ist es zum Verständnis der aktuellen Diskussion wichtig, sich der Unterschiede bewusst zu sein. Die in Abbildung 1 gezeigten Daten spiegeln daher den Gehalt des jeweils im Prozess bearbeiteten Erzes wider. Im Falle der USA ist zusätzlich die Prozesseffizienz enthalten. Erzgehalte von Ressourcen sind erst seit Mitte der 1950er Jahre (einheitlich) dokumentiert. Der tatsächliche Metallgehalt der vorhandenen Ressourcen kann aus Abbildung 1 nur teilweise abgeleitet werden, da hier mehrere Faktoren wie bspw. die verwendeten Technologien eine Rolle spielen, welche die Wahl der abgebauten Erze beeinflussen (West 2011; Crowson 2012; Lagos et al. 2018; Corry und Kiessling 1938; Leong et al. 1940; David und Wright 1997). Auch Mudd (2009) deutet in seiner Arbeit auf diesen Punkt hin. In Folgendem soll daher auf die verschiedenen Einflussfaktoren eingegangen werden.

Einflussfaktoren auf den Erzgehalt

Rohstoffvorkommen und Bedarf

Rohstoffe kommen in allen Schichten der Erde vor. Der für die Menschen zugängliche und somit im Hinblick auf die Rohstoffgewinnung bedeutendste Teil ist die Erdkruste. Diese macht nur rund ein halbes Prozent der gesamten Erdmasse aus und besteht hauptsächlich aus Sauerstoff und Silicium (Anderson 1989; Javoy 1999; Grotzinger und Jordan 2017). Die für die Diskussion der sinkenden Erzgehalte interessanten Rohstoffe sind u. a. die Metalle. Viele sind nur in sehr geringen Mengen in der Erdkruste enthalten. So beträgt der durchschnittliche Anteil an z. B. Kupfer in der Erdkruste etwa 28 ppm, der von Gold nur 1,5 ng/g (Rudnick und Gao 2014). Der Abbau dieser durchschnittlichen Konzentration ist (zumindest derzeit) wirtschaftlich

nicht möglich. Jedoch fand durch unterschiedliche geologische Prozesse eine lokale Anreicherung dieser Elemente statt und bietet uns somit einen geeigneten Ausgangspunkt für deren Gewinnung. Der durchschnittlich notwendige Anreicherungsfaktor unterscheidet sich dabei von Rohstoff zu Rohstoff. Um bspw. Aluminium gewinnbringend abbauen zu können, muss dieser etwa 4 betragen, was zu einem durchschnittlichen Erzgehalt von 30% führt. Bei Chrom hingegen, welches ebenfalls mit einem Erzgehalt von 20 bis 30% abgebaut wird, muss aufgrund der geringen Durchschnittskonzentration in der Erde eine Anreicherung um das ca. 3000-fache stattfinden. Für Kupfer und Nickel liegt der notwendige Anreicherungsfaktor bei etwa 75, für Gold ist eine Anreicherung um das ca. 250-fache notwendig (Evans 1992). Zusätzlich besteht aber auch ein Unterschied zwischen den verschiedenen Lagerstätten eines Metalls. Kupfer bietet hier ein anschauliches Beispiel. Der größte Teil (etwa 60%) der derzeit bekannten globalen Ressourcen ist in sogenannten porphyrischen Lagerstätten enthalten, gefolgt von sedimentgebundenen Vererzungen (ca. 15%) und Iron Oxide Copper Gold Lagerstätten (IOCG, ca. 10%). Jeder dieser Lagerstättentypen zeichnet sich durch u. a. eine unterschiedliche Mächtigkeit sowie mittlere Kupfergehalte aus. IOCG-Lagerstätten besitzen im Durchschnitt 6 Mio. Tonnen an Wertmetall bei einem Gehalt von ca. 0,9% Cu, sedimentgebundene Vererzungen 4,5 Mio. Tonnen bei etwa 1,9% und porphyrische Lagerstätten etwa 3 Mio. Tonnen bei rund 0,5% Erzgehalt, ein weiterer Lagerstättentyp, die Massive Sulfides hingegen haben nur etwa 0,3 Mio. Tonnen Wertmetall bei einem Gehalt von ca. 1,4% Kupfer (Weber 2015b). Abbildung 2 zeigt die derzeit bekannten Ressourcen (Lagerstätten) nach Typ, Mächtigkeit und Cu-Gehalt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das meiste Kupfer in großen Lagerstätten enthalten ist, die sich jedoch durch einen geringen Erzgehalt auszeichnen.

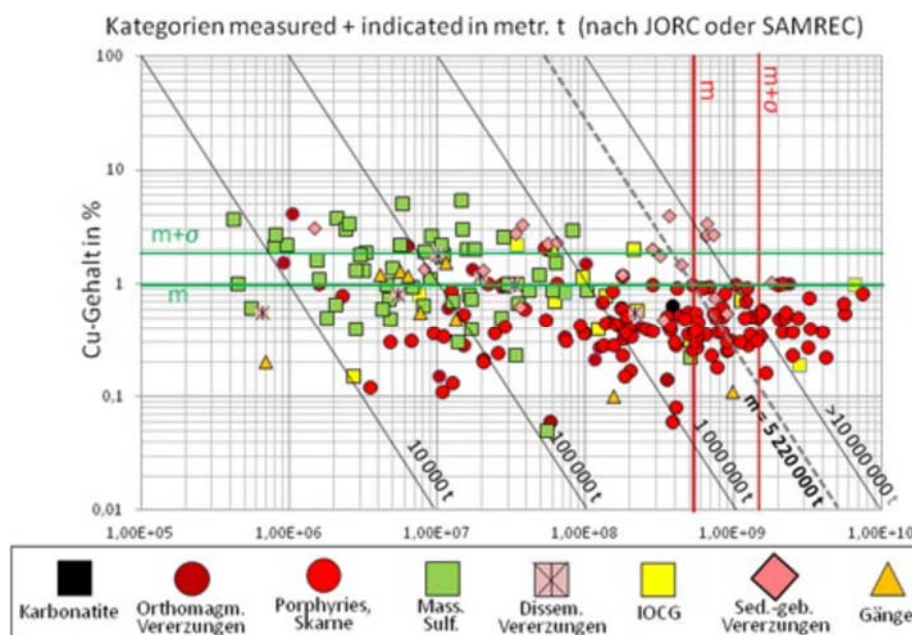


Abbildung 2: Ressourcen und Cu-Gehalte von Kupferlagerstätten nach Lagerstättentyp (Weber 2015b)

Um den hohen Kupferbedarf langfristig zu decken, ist der Abbau niedrigwertiger Lagerstätten daher unumgänglich (Corry und Kiessling 1938). Stellt man den Erzgehalten die Produktion über die vergangenen Jahrzehnte gegenüber, so wird dies nochmals verdeutlicht (siehe Abbildung 1). Die wachsende Bevölkerung, deren Entwicklung und damit einhergehend die zunehmende Verwendung von Technologien lassen den jährlichen Bedarf an Rohstoffen stetig steigen, damit steigt die Produktion. Wurde anfangs noch regional und für den Eigenbedarf abgebaut, baut man heute enorme Mengen ab und es wird auf immer größere Lagerstätten mit einem geringeren Erzgehalt zurückgegriffen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es keine Lagerstätten mit einem höheren Metallgehalt mehr gibt. Als Beispiel ist hier das Timok Project (<http://www.nevsun.com/projects/timok-project/>) zu nennen. Ein Teil der Ressourcen weist einen Kupfergehalt von 17 bis 19% bei einer Menge von etwa 2,7 Megatonnen Kupfer auf (Nevsun Resources Ltd. 2017). Dies entspricht in etwa dem jährlichen Verbrauch der USA um

die letzte Jahrtausendwende, aktuell ist der Verbrauch sogar geringer. Würde man heute also lediglich wenige Tonnen an Kupfer benötigen bzw. nur diesen Teil abbauen, so könnte man diese sicherlich aus Quellen beziehen, die einen höheren Metallgehalt besitzen als das durchschnittlich verwendete Erz.

Häufig sind Erze mit einem hohen Metallgehalt auch Teil einer größeren Lagerstätte. Hochwertige Erze entstehen oft durch sekundäre Anreicherungen, d. h. sie stellen die oxidische Zone einer Lagerstätte dar, welche sich durch einen höheren Metallgehalt auszeichnet. Wurde früher nur dieser Teil abgebaut, nutzt man heute das gesamte Vorkommen, dadurch sinkt der durchschnittliche Erzgehalt der Lagerstätte bzw. des abgebauten Erzes (West 2011). Zu Beginn des Kupferabbaus in Australien war der Erzgehalt der abgebauten oxidischen Zonen noch so hoch, dass die Erze nach Wales verschifft wurden, um dort metallurgisch aufbereitet zu werden. Zudem war das notwendige Know-How dort vorhanden. Erst im Laufe der Jahre, als die Erzgehalte sanken, wurden Metallhütten vor Ort errichtet (Winter Birrell 2005).

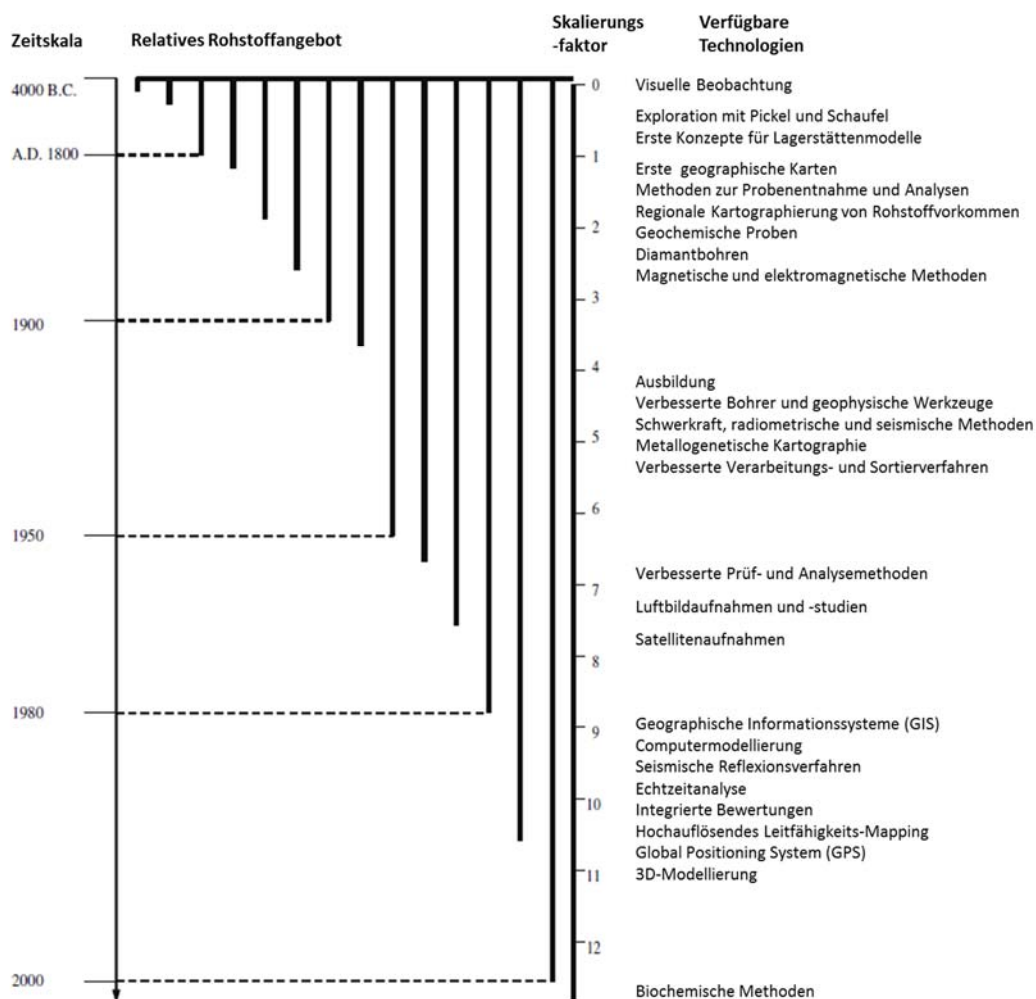


Abbildung 3 Entwicklung der Explorationstechnologien und relativer Ressourcenverfügbarkeit (in Anlehnung an Peters 1987)

Exploration

Dass heute die gesamten Vorkommen inklusive der niedrighaltigen Erze abgebaut werden, hängt auch mit dem zunehmenden Verständnissgewinn hinsichtlich des Vorkommens und Aufbaus von Lagerstätten zusammen sowie den dazu notwendigen Technologien. Wurde früher nur mit bloßem Auge exploriert, kamen nach und nach ausgereifere Methoden hinzu. Zudem stieg auch der wirtschaftliche Druck auf die Minenbetreiber, welcher eine exaktere

Exploration notwendig machte, da nur so eine konkrete Aussage über die Ergiebigkeit einer Lagerstätte gemacht werden konnte und Investoren anlockte. Die ersten Einrichtungen, die sich mit dem Abbau aus wissenschaftlicher Sicht beschäftigten, wurden Mitte des 18. Jahrhunderts gegründet, rund 100 Jahre später wurde der USGS ins Leben gerufen, zudem wurden ab diesem Zeitpunkt schon geologische Erkundungen in allen industriellen Ländern durchgeführt. Ende des 19. Jahrhunderts konnten dank technischer Innovationen wie den Diamantbohrern tiefere, genauere und auch günstigere Erkundungen durchgeführt werden. Im 20. Jahrhundert kamen weitere technische Entwicklungen hinzu wie z. B. Flugbildvermessungen und Satellitenbilder. Ab den 80er Jahren wurden dann beispielsweise Geografische Informationssysteme (GIS) und Computermodelle genutzt. Neben den technischen Innovationen führte auch ein zunehmendes Verständnis des Aufbaus der Erde wie z. B. die Entdeckung der Plattentektonik in den 60er Jahren dazu, dass gezielter gesucht werden konnte. Daraus resultierten genauere Modelle einzelner Lagerstätten und somit auch Entdeckungen neuer Teile bereits abgebauter Lagerstätten (Winter Birrell 2005; Wilburn et al. 2001; Peters 1987). Durch diese Entwicklungen konnte die Ressourcenbasis stets vergrößert werden. Seit dem Jahr 1800, also in den letzten gut 200 Jahren, wurden etwa zwölf Mal so viele Ressourcen entdeckt, wie die 5800 Jahre davor (siehe Abbildung 3) (Wilburn et al. 2001; Peters 1987; Winter Birrell 2005). Betrachtet man die Reservenzahlen für Kupfer der letzten 50 Jahre, so lässt sich ebenfalls ein Anstieg verzeichnen. Dies zeigt, dass durch Explorationsarbeiten und die Entwicklung der Gewinnungstechnologien (auf welche im Folgenden noch eingegangen wird) die Verminderung der Reserven durch den Abbau kompensiert werden kann. Grundsätzlich werden in Zeiten einer hohen Nachfrage und damit verbundenen hohen Metallpreisen, die durch ein Angebotsdefizit entstehen, auch vermehrt Explorationsarbeiten durchgeführt (Wellmer et al. 1994; Tilton und Lagos 2007).

Minengröße und strukturelle Veränderungen

Die Wahl auf große Lagerstätten fällt nicht nur aufgrund des hohen Bedarfs, sondern auch aus wirtschaftlichen Gründen. Die Exploration und Erschließung einer Lagerstätte ist trotz der genannten Fortschritte mit hohen finanziellen Aufwänden verbunden. Heutige Unternehmen sind darauf bedacht, ihre Investitionen auf eine möglichst große Menge an Produkten, in diesem Fall Kupfer bzw. Kupfererz, und damit Zeit zu verteilen, um so ihren Gewinn zu maximieren. Ebenfalls werden bei einer großen Produktionsmenge Skaleneffekte realisiert (Crowson 2003). Beide angeführten Argumente können mit Daten zu Kapazitäten einzelner Minen (Abbildung 4) verdeutlicht werden.

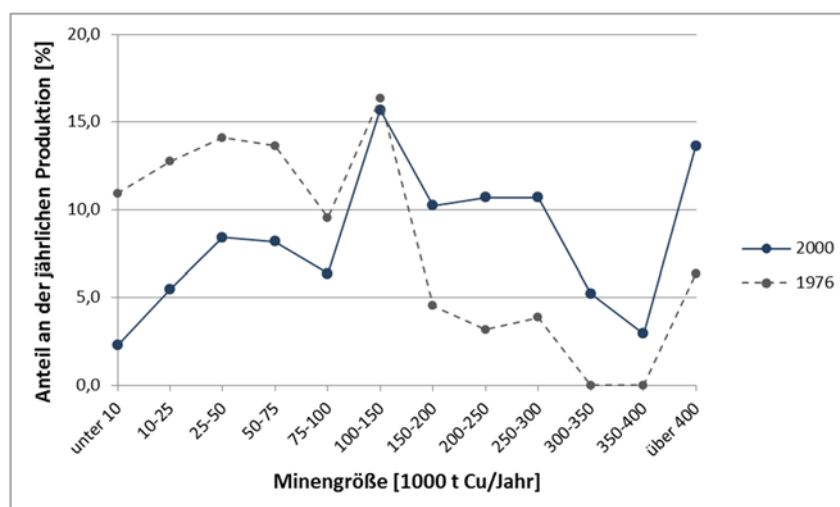


Abbildung 4: Entwicklung der Minengröße (in Anlehnung an Crowson 2003)

Wurde die Entscheidung für die Erschließung einer Mine vor den 1980ern noch auf Basis des zu erwartenden Kupferpreises getroffen, so werden heute hauptsächlich nur noch Lagerstätten

abgebaut, die zu den größten der Welt gehören (Schodde 2006).

Meist sind diese großen Lagerstätten porphyrisch. Der Trend hin zu diesen Lagerstätten geht schon auf die Jahrhundertwende zurück. War 1907 der Anteil an porphyrischen Lagerstätten in den USA noch bei etwa 10% des abgebauten Erzes, so betrug er 1914 schon etwa 50% und Mitte der 30er Jahre etwa 70% (Corry und Kiessling 1938). Weltweit lag der Anteil an porphyrischen Lagerstätten an der globalen Minenproduktion 1975 bei 34% und 1998 bei 62%, danach folgte ein leichter Rückgang auf 55% im Jahr 2009 (Crowson 2012). Dadurch wird deutlich, dass der vermehrte Abbau porphyrischer Lagerstätten erheblich zur Senkung des Erzgehalts beigetragen hat. Die Zeit ab den 1920er Jahren wird auch als „The Porphyry Era“ bezeichnet (Corry und Kiessling 1938). Diese Ära ist ebenfalls durch eine regionale Verlagerung der Minenproduktion gekennzeichnet. 2008 kam fast die Hälfte des gewonnenen Erzes aus Lateinamerika, welches geologisch bedingt große porphyrische Lagerstätten enthält. 1931 lag dessen Anteil bei knapp unter 20% (Crowson 2012; Julihn und Meyer 1933). Die Entwicklung hin zu großen porphyrischen Lagerstätten spiegelt sich nicht nur in der Größe der einzelnen Minen sowie deren geographischen Lage wider, sondern auch in der Struktur der Minenbetreiber. In den 20er Jahren stellten die drei Unternehmen Anaconda Copper Mining Company, Kennecott Copper Corporation und Phelps Dodge Corporation ca. 35% der gesamten amerikanischen Kupferproduktion her, etwa 10 Jahre später waren es schon 74% (Leong et al. 1940).

Porphyrische Lagerstätten waren schon vor der Jahrhundertwende bekannt, jedoch war es noch nicht möglich, diese gewinnbringend abzubauen, sie wurden als wertlos angesehen. Erst mit der Entwicklung entsprechender Technologien war auch der Abbau niedrighaltiger Lagerstätten möglich (Corry und Kiessling 1938; Leong et al. 1940).

Technologische Entwicklungen

Verbunden mit dem Trend zu den porphyrischen Lagerstätten ist auch der Trend hin zum Tagebau. Dies führt zu einem weiteren Absinken des Erzgehalts. Vergleicht man die über- und untertage abgebauten Erze, so ist ein deutlicher Unterschied in ihrem Gehalt zu erkennen. Dies lässt sich beispielhaft an den Daten für die USA von Leong et al. (1940) für die Jahre 1917 bis 1936 sowie basierend auf Weber (2015a) durchgeführten Auswertungen weltweit für das Jahr 2013 zeigen. Im erstgenannten Zeitraum lag die Differenz bei durchschnittlich 1,3 Prozentpunkten, 2013 bei etwa 0,5 Prozentpunkten (bei einem Verhältnis von Über- zu Untertagebaubetrieben von etwa zwei Drittel zu einem Drittel).

Der Tagebau ist eine hochproduktive Abbautechnik, da viele der großen Lagerstätten nahe an der Oberfläche liegen. Die damit verbundene Methode ist als Jackling-Methode bekannt und zählt zu den wichtigsten Erneuerungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Daniel C. Jackling, auf welchen die Methode zurückgeht, wird auch als Henry Ford des Kupferbergbaus bezeichnet. Er wendete die in anderen Industrien bereits eingesetzten Methoden der Massenproduktion auf den Kupferbergbau erfolgreich an. In Bingham Canyon bspw. wurden innerhalb kürzester Zeit alle Untertagebauminen zu Tagebauten umgewandelt und das Erz mit massenproduktionstauglichen Maschinen abgebaut (Brunn 2011; Arrington und Hansen 1963; David und Wright 1997). Zu dieser Zeit war es für die kleinen Untertage betriebenen Minen schwer mitzuhalten.

Hinzu kamen noch zahlreiche technologische Fortschritte, die u. a. zur Realisierung des Massenabbaus notwendig waren. Diese Fortschritte fanden sowohl für den Tagebau als auch für den Untertagebau von niedrigwertigen Erzen statt. Im Tagebau wurde etwa ab der Jahrhundertwende wie oben beschrieben auf große Schaufelbagger zurückgegriffen, diese Technik war vom Eisenerzabbau übernommen worden. Neu war die Erfindung des Block-Caving-Verfahrens zur Gewinnung von Kupfererzen mit geringem Gehalt im Untertagebau, welches sich die Schwerkraft zunutze macht (Corry und Kiessling 1938; Leong et al. 1940). Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Abbaumethoden von 1880 bis 1936. Beim Kupferabbau liegt der Anteil am Tagebau zur heutigen Zeit bei etwa 80 bis 95% (Giurco 2005).

Doch auch schon vor dieser Zeit gab es Fortschritte, die den Abbau beeinflussen. Wurde Kupfer etwa bis zum Jahr 1880 größtenteils noch von Hand abgebaut, erfolgte nach und nach

der Einsatz ausgereifterer und vermehrt mechanisierter Technologien. Anfangs legten Arbeiter mit Schaufeln das Erz frei und zerkleinerten es ebenfalls händisch, um es dann auf von Tieren gezogene Kutschen aufzuladen. Erst nach und nach erfolgte die Mechanisierung der zum Abbau erforderlichen Schritte. Hinzu kam ab der Jahrhundertwende die zunehmende Nutzung von Elektrizität anstatt Dampf, was die Produktivität nochmals stark erhöhte (siehe dazu Abbildung 6) (Leong et al. 1940; Corry und Kiessling 1938; Committee on Resources and Man 1969).

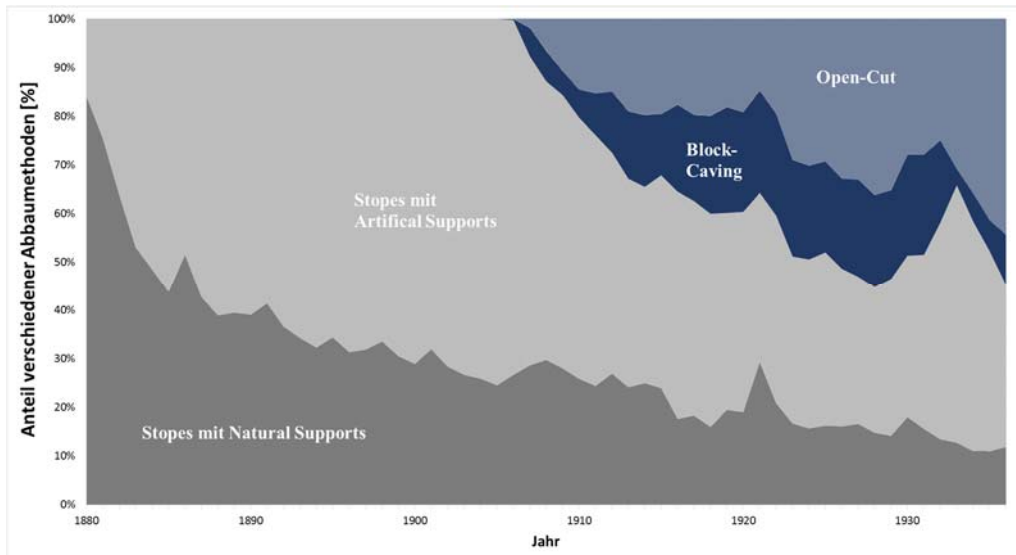


Abbildung 5: Entwicklung der verwendeten Abbaumethoden (in Anlehnung an Leong et al. 1940)

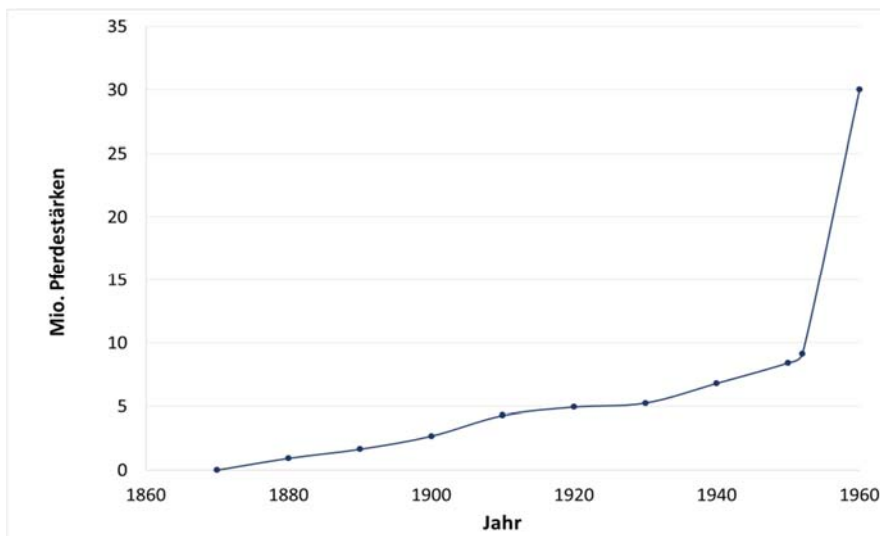


Abbildung 6: Mechanisierung im Bergbau verwendete mechanische Leistung aller Kupferminen in den Vereinigten Staaten von 1870 bis 1952 (in Anlehnung an Committee on Resources and Man 1969).

Doch nicht nur die Mechanisierung allein, sondern auch die Verbesserung und Steigerung der Effizienz einzelner Technologien in allen Bereichen - Abbau, Konzentration und Raffination - fand statt. Ende des 18. Jahrhunderts wurden die Bohrer schrittweise optimiert und mithilfe von Druckluft betrieben sowie Sprengstoff anstatt von Schwarzpulver verwendet (David und Wright 1997; Leong et al. 1940). Diese Verbesserung wirkte sich besonders auf den Untertagebau aus und erhöhte die Effizienz der eingesetzten Arbeiter, so konnte deren Arbeitskraft anderweitig verwendet werden. Ebenfalls wurden die Transportsysteme verbessert und erste Belüftungsanlagen eingebaut. Im Tagebau machten sich Anfang des 20. Jahrhunderts besonders die effizienteren Ladevorrichtungen bezahlt. Anstatt auf dampfbetriebene wurde auf elektrische Schaufeln gesetzt, die anstatt auf einem Lastwagen auf einer Raupe angebracht waren. Damit war eine Steigerung um bis zu 200% der verladenen

Menge möglich. Allgemein wurde beim Transport auf größere und/oder elektrisch betriebene Geräte gesetzt (Leong et al. 1940). Diese Entwicklungen könnte man zusammenfassend als Verlagerung der Tätigkeiten vom Abbau ausgewählter reichhaltiger Erze hin zum großflächigen Abbau niedrigwertiger Erze beschreiben (Corry u. Kiessling 1938). Auch in der Zerkleinerung und Konzentration von Erzen trugen technische Verbesserungen und Innovationen zum Erfolg der Erze mit geringem Erzgehalt bei. Eine der hier entscheidenden Erfindungen war die Schaumflotation. Die durch den technischen Fortschritt erlangte Effizienzsteigerung wird sehr schön durch ein Beispiel aus Corry und Kiessling (1938) verdeutlicht: Anfang des 20. Jahrhunderts lag die Ausbringungseffizienz nach dem Mahlen bei etwa 60 bis 75%. Erst ab Mitte der 30er Jahre konnten ca. 90% des im Erz enthaltenen Kupfers auch gewonnen werden. Dies bedeutet, dass aus einem Erz mit einem Gehalt von 1% Kupfer im Jahr 1935 (90%-Effizienz) die gleiche Menge an Kupfer gewonnen werden konnte wie mit einem 1,5%igem Erz im Jahr 1900 (60%-Effizienz). Metallgehalt und Gewinn (engl. Yield) passten sich also im Laufe der Zeit an. Ebenfalls führte dies auch dazu, dass alte Aufbereitungsrückstände nun zum Teil als Erz angesehen und nochmals bearbeitet wurden. Nach und nach wurde auch der Abbau komplexerer und chemisch vielfältigerer Erze möglich, da die Trenntechnologien zunehmend verbessert wurden (Wilburn et al. 2001). Neben den rein technologischen Fortschritten wurde auch stets mehr in die Ausbildung der Arbeiter investiert, was ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Ausbeute hatte (Corry und Kiessling 1938; Leong et al. 1940). Zu den neueren technologischen Entwicklungen zählt das hydrometallurgische Verfahren, bei welchem das Metall mittels Chemikalien aus dem Gestein gelöst und dann weiterverarbeitet wird. Diese Methode wird für oxidisch gebundenes Kupfer, welches zuvor nicht abgebaut werden konnte, sowie für sulfidische Erze mit einem sehr geringen Erzgehalt verwendet. Es wurde 1968 eingeführt und hatte seinen „Durchbruch“ Mitte der 80er Jahre. Seither steigt der Anteil an der Gesamtproduktion. Zu Beginn der 90er Jahre lag der Anteil an der amerikanischen Produktion bei etwa 30%, 2005 bei rund 45% (USGS var.; Wilburn et al. 2001). Weiterhin gibt es noch zahlreiche Innovationen und Verfahrensvarianten beispielsweise des Schmelzverfahrens. Die herausragenden technischen Verbesserungen wurden jedoch Anfang des 20. Jahrhunderts eingeführt, heutige Innovationen (abgesehen vom hydrometallurgischen Verfahren) sind häufig Prozessverbesserungen zur Senkung des Verbrauchs an Hilfs- und Betriebsstoffen sowie zur Minderung von Emissionen. Dennoch sind neue sprunghafte Innovationen nicht auszuschließen (z. B. Tiefseebergbau). Die genannten Verbesserungen führten auch zu einer fortlaufenden Reduzierung der Produktionskosten (Schodde 2010).

Preis und Nebenprodukte

Ziel technischer Innovationen und Verbesserungen war hauptsächlich eine Minderung der Herstellkosten. Grundsätzlich ist der Kupferpreis daher stets gesunken (David und Wright 1997). Der aktuelle Marktpreis hat jedoch auch Einfluss auf das abgebaute Erz. In Zeiten niedriger Preise fand ein selektiver Abbau statt. D. h. es wurden nur ausgewählte Erze abgebaut, vorzugsweise mit hohen Metallgehalten. Zu Zeiten hoher Marktpreise wird vorher als wertlos angesehener Abraum zu Erz. Betrachtet man den Preis für Kupfer und die Erzgehalte in den USA, so lässt sich diese Auswirkung um das Jahr 1930 zeigen. Damals sanken die Kupferpreise verhältnismäßig stark, dies führte zu einem verminderten Abbau (Kiessling 1933). Zur gleichen Zeit lässt sich aber ein Anstieg des durchschnittlichen Erzgehalts feststellen. Dies bestätigen auch Berichte des USGS. Ab dem Jahr 1933 ist ein Aufwärtstrend des Kupferpreises zu beobachten und ein Absinken des durchschnittlichen Erzgehalts von 1,9% im Jahr 1934 auf 1,5% im Jahr 1936. Da die veröffentlichten Berichte keine Daten aus Alaska beinhalten, ist dieser Trend etwas verstärkt dargestellt (Furness und Meyer 1938). Abbildung 7 zeigt die relative Preis- und Erzgehaltsänderung im Vergleich zum Vorjahr für die Jahre 1920 bis 2010. Eine positive Preisänderung ist meist mit einer negativen Änderung des Kupfergehalts des abgebauten Erzes verbunden und umgekehrt. In der Auswertung sind nicht alle Aspekte berücksichtigt, so kann sich z. B. aufgrund von angehäuften Vorräten eine leichte zeitliche Verschiebung der Auswirkungen ergeben, des Weiteren wird der Kupferpreis von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die hier nicht

berücksichtigt sind.

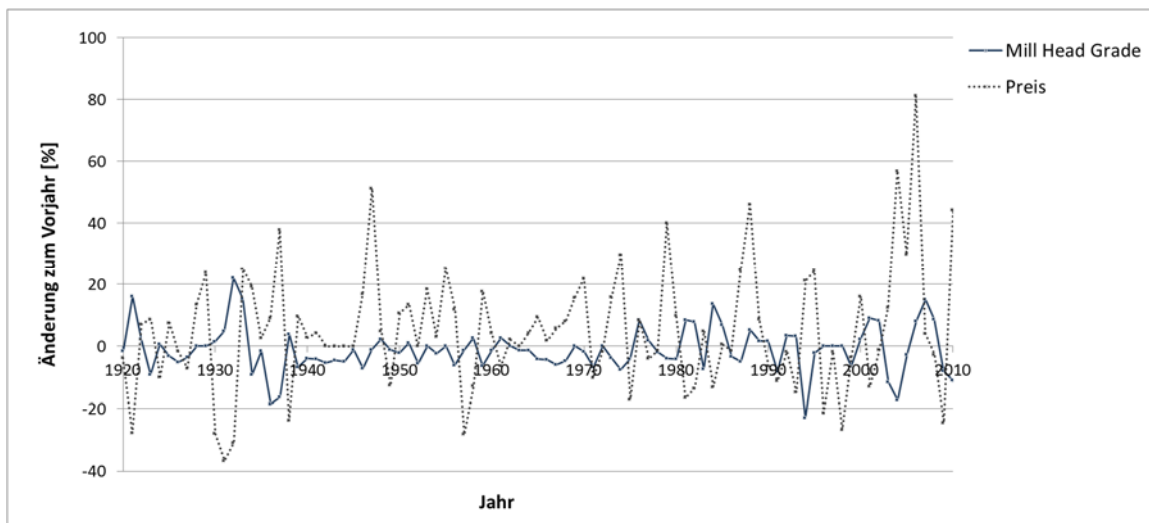


Abbildung 7: Einfluss der Kupferpreisänderungen auf den abgebauten Erzgehalt (eigene Darstellung basierend auf Daten von USGS var.)

Neben den Preisen für das Hauptprodukt beeinflusst auch der Anteil an Nebenprodukten den Abbau. Häufig sind neben Kupfer, Molybdän, Gold und Silber auch andere Edelmetalle enthalten. Auch eine Vergesellschaftung mit Nickel, Zink und Blei kommt vor. Dies hängt vom jeweiligen Lagerstättentyp an. Porphyrische Lagerstätten enthalten meist Kupfer, Gold, Silber und Molybdän. Sedimentgebundene Lagerstätten, wie sie hauptsächlich in Afrika vorkommen, enthalten neben Kupfer noch Kobalt. Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der Menge an Molybdän, Gold und Silber, die in den USA als Nebenprodukt bei der Kupfergewinnung pro Tonne Kupfer gewonnen werden (über einzelne Jahre). Die gewonnene Menge an Silber ist dabei recht stabil über den ausgewerteten Zeitraum, wohingegen der Anteil an Gold sinkt. Im Jahr 2000 wurden im Vergleich zum Jahr 1950 etwa 45% weniger Gold pro Tonne Kupfer gewonnen. Bei Molybdän ist der Fall umgekehrt. Hier stieg die Produktion aus der Kupfergewinnung auf über das Doppelte (in den ausgewerteten Zahlen ist auch die Nebenproduktmenge aus anderen Massenmetallen enthalten, der Anteil ist jedoch im Vergleich zu Kupfer zu vernachlässigen). Dies liegt zum einen im steigenden Bedarf für Molybdän begründet, der ab Mitte der 30er Jahre stetig zunimmt und erst gegen Anfang der 80er Jahre abflacht.

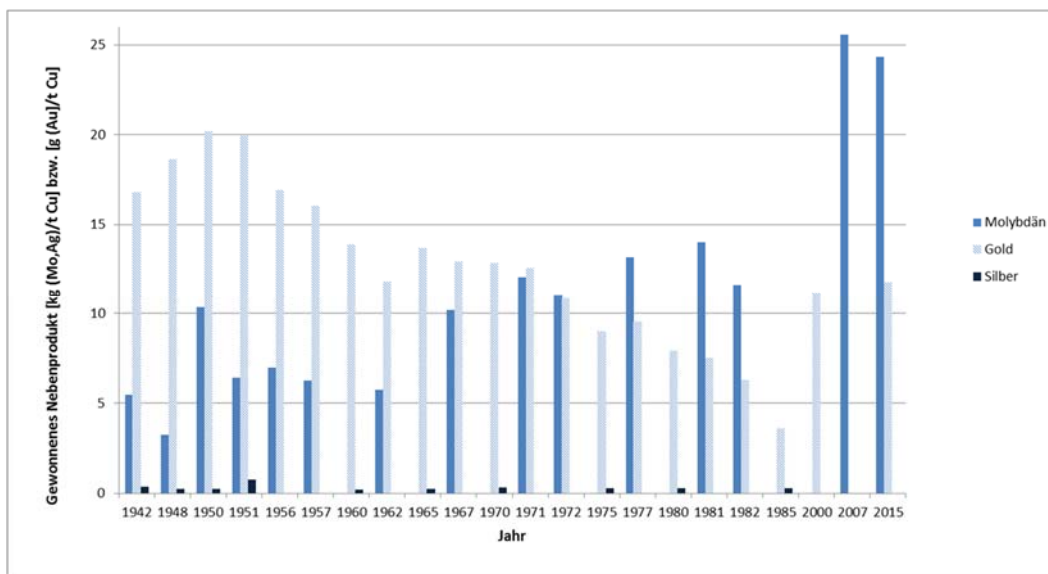


Abbildung 8: Durchschnittlich gewonnene Nebenprodukte pro Tonne Kupfer in den USA (eigene Darstellung basierend auf Daten von USGS var.)

Zum anderen am steigenden Anteil der porphyrischen Lagerstätten an der gesamten Kupfergewinnung, da nur diese Molybdän als Nebenprodukt enthalten (eine Aufschlüsselung des produzierten Kupfers nach Lagerstättentyp ist nicht möglich, jedoch Beginn der große Umschwung auf porphyrische Lagerstätten bereits Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts). Der Anteil des Molybdäns, welches als Nebenprodukt hauptsächlich aus Kupfer gewonnen wird, stieg von 27% im Jahr 1942 auf über 56% im Jahr 2015. Die andere Hälfte der jährlichen Produktion wird derzeit als Hauptprodukt gewonnen. Für Kobalt lässt sich hier leider keine Aussage treffen, da dieses kaum in den Vereinigten Staaten produziert wird. Abgesehen vom Kupfergehalt lässt sich also zeigen, dass die Menge an gewonnenen Nebenprodukten insgesamt gestiegen ist und somit vermehrt zur Wirtschaftlichkeit einer Mine beiträgt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Erzgehalte der abgebauten Lagerstätten sanken im Laufe der letzten Jahrhunderte. Dies lässt sich nicht nur für Kupfer, welches hier beispielhaft verwendet wurde, bestätigen, sondern auch für viele andere Metalle. Dieser Trend kann unterschiedlich interpretiert werden. Zum einen kann man diese Entwicklung negativ sehen und darin, wie anfangs erläutert, die Erschöpfung der Ressourcen erkennen. Aber man kann diesen Trend auch positiv interpretieren und darin den enormen technologischen Fortschritt sehen. Nur so können heute die großen Mengen an Rohstoffen bereitgestellt werden, die von der Menschheit beansprucht werden.

Es konnte gezeigt werden, dass der exponentielle Anstieg des Verbrauchs an z. B. Kupfer zum Abbau immer größerer Lagerstätten führte, die geologisch bedingt häufig einen geringen Erzgehalt aufweisen. Zum Abbau dieser Lagerstätten wurden neue Technologien entwickelt und so haben es z. B. große Schaufelbagger und die Schaumflotation erst möglich gemacht, Erze mit einer geringen Konzentration an Metall abzubauen. Denn was Ende des 20. Jahrhunderts als Erz bezeichnet wurde, war zu Beginn desselben Jahrhunderts noch Abraum, da es nicht möglich war, den Rohstoff unter ökonomischen Bedingungen zu gewinnen. Dies zeigt sich auch durch die langfristig sinkenden Preise. Daher ist der Erzgehalt allein nicht geeignet, um eine Aussage über die Rohstoffverfügbarkeit zu treffen, sondern vielmehr, um zu zeigen, welchen riesigen Fortschritt die eingesetzten Technologien gemacht haben. Dennoch führen die sinkenden Erzgehalte zu einem vermehrten Aufwand an Einsatzstoffen, Abraum, Emissionen etc., welcher nicht außer Acht gelassen werden darf, da er erheblichen Einfluss auf unsere Umwelt hat. Und eben dieser mit den sinkenden Erzgehalten verbundene steigende ökonomische und ökologische Aufwand sowie die zunehmenden Nutzungskonflikte führen zu einer Einschränkung der Ressourcenverfügbarkeit. Diese lassen sich aber nicht mehr mittels der Rohstoffmengen (Reserven, Ressourcen, Fördermengen, Erzgehalt etc.) geeignet bewerten, sondern bedürfen anderer Indikatoren, die sich vor allem an den zu betrachtenden Schutzgütern und tatsächlichen Knappheiten (z.B. Fläche, Umweltmedien, Energie usw.) anlehnen.

Literaturverzeichnis

- Anderson, Don L. (1989): *Theory of the earth*. [Nachdr.]. Boston [u.a.]: Blackwell Scientific Publ.
- Arrington, L. J.; Hansen, G. B. (1963): *The richest hole on earth. A history of the Bingham Copper Mine*. Utah State University Press. Logan, Utah (Monograph Series, Volume XI, Number 1). Online verfügbar unter garybhansen.com/pdfs/misc/rchsthole.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2018.
- Brunn, S. D. (2011): *Engineering Earth. The impacts of megaengineering projects*. Dordrecht: Springer.
- Calvo, Guiomar; Mudd, Gavin; Valero, Alicia; Valero, Antonio (2016): *Decreasing ore grades in global metallic mining. A theoretical issue or a global reality?* In: *Resources* 5 (4), S. 36. DOI: 10.3390/resources5040036.
- Committee on Resources and Man (Hg.) (1969): *Resources and man. A study and recommendations*. National Academy of Sciences, National Research Council: W. H. Freeman and Company.
- Corry, A. W.; Kiessling, O. E. (1938): *Mineral technology and output per man studies. Grade of ore. Works Projects Administration National Research Project E-6*. Philadelphia.

- Crowson, P. (2003): Mine size and the structure of costs. In: *Resources Policy* 29 (1–2), S. 15–36. DOI: 10.1016/j.resourpol.2004.04.002.
- Crowson, P. (2012): Some observations on copper yields and ore grades. In: *Resources Policy* 37 (1), S. 59–72. DOI: 10.1016/j.resourpol.2011.12.004.
- David, A. P.; Wright, G. (1997): Increasing returns and the genesis of American resource abundance. In: *Industrial and Corporate Change* 6 (2), S. 203–245. DOI: 10.1093/icc/6.2.203.
- Evans, Anthony M. (1992): Erzlagerstättenkunde. Stuttgart: Ferdinand Enke.
- Furness, J. W.; Meyer, H. M. (1938): Copper. In: H. H. Hughes (Hg.): *Minerals Yearbook 1938*. Washington D.C.: United States Government Printing Office (Minerals Yearbook), S. 81–108. Online verfügbar unter <http://digiocoll.library.wisc.edu/cgi-bin/EcoNatRes/EcoNatRes-idx?type=article&did=EcoNatRes.MinYB1937.i0008&id=EcoNatRes.MinYB1937&isize=M>, zuletzt geprüft am 08.01.2018.
- Giurco, D. (2005): Towards sustainable metal cycles. The case of copper. Sydney: University of Sydney (PhD Thesis).
- Grotzinger, J.; Jordan, T. (2017): *Press/Siever Allgemeine Geologie*. Unter Mitarbeit von Volker Schweizer. 7. Aufl. Springer Spektrum: Berlin Heidelberg.
- Jaireth, S.; Porritt, K.; Hoatson, D. M. (2010): Australian copper resources. Sheet 2: Deposit types. 1:10 000 000 scale map. Geoscience Australia. Canberra, Australia. Online verfügbar unter <https://www.data.gov.au/dataset/australian-copper-resources-sheet-1-resources-by-region-sheet-2-deposit-types-may-2010>, zuletzt geprüft am 20.12.2017.
- Javoy, M. (1999): Chemical earth models. In: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 329 (8), S. 537–555. DOI: 10.1016/S1251-8050(00)87210-9.
- Julihn, C. E.; Meyer, H. M. (1933): Copper. In: O. E. Kiessling (Hg.): *Minerals Yearbook 1932-1933*, 1932-33. Washington D.C.: United States Government Printing Office, S. 27–52. Online verfügbar unter <http://digiocoll.library.wisc.edu/cgi-bin/EcoNatRes/EcoNatRes-idx?id=EcoNatRes.MinYB193132>, zuletzt geprüft am 28.12.2017.
- Kiessling, O. E. (Hg.) (1933): Mineral resources of the United States, 1930. Part I - Metals. US Department of Commerce; Bureau of Mines. Washington D.C.: United States Government Printing Office. Online verfügbar unter <http://digiocoll.library.wisc.edu/cgi-bin/EcoNatRes/EcoNatRes-idx?id=EcoNatRes.MinYB1993v1>, zuletzt geprüft am 08.01.2018.
- Lagos, G.; Peters, D.; Videla, A.; Jara, J. J. (2018): The effect of mine aging on the evolution of environmental footprint indicators in the Chilean copper mining industry 2001–2015. In: *Journal of Cleaner Production* 174, S. 389–400. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.290.
- Leong, Y. S.; Erdreich, E.; Burrit, J. C.; Kiessling, O. E.; Nighman, C. E.; Heikes, G. C. (1940): Technology, employment and output per man in copper mining. Works Projects Administration National Research Project E-12. Philadelphia.
- Mudd, G. M. (2009): The sustainability of mining in Australia : Key production trends and environmental implications. Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute (Research Report No RP5). Online verfügbar unter <http://users.monash.edu.au/~gmudd/publications.html>, zuletzt geprüft am 28.11.2017.
- Nevsun Resources Ltd. (2017): 2017 press releases. Mineral resource statement for Timok Upper Zone Project - Cukaru Peki Deposit - Serbia. Online verfügbar unter <http://www.nevsun.com/news/2017/october26-updated-pea-for-timok-upper-zone-copper-project/>, zuletzt geprüft am 06.12.2018.
- Northey, S.; Mohr, S.; Mudd, G. M.; Weng, Z.; Giurco, D. (2014): Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. In: *Resources, Conservation and Recycling* 83, S. 190–201. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.10.005.
- Peters, W. C. (1987): *Exploration and mining geology*. Second edition. New York, N.Y.: John Wiley and Sons Inc. Online verfügbar unter <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/6221858>.
- Rudnick, R. L.; Gao, S. (2014): Composition of the Continental Crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. (Hg.) (Hg.): *Treatise on Geochemistry Second Edition*. 2. Auflage. Oxford: Elsevier, S. 1–51.
- Schodde, R. (2006): What do we mean by a world-class-deposit? And why are they special? AMEC Conference. bhpbilliton. Perth, 2006. Online verfügbar unter <https://www.bhp.com/-/media/bhp/.../2006/ameconference.pdf>, zuletzt geprüft am 16.01.2018.
- Schodde, R. (2010): The key drivers behind resource growth. an analysis of the copper industry over the last 100 years. MEMS Conference Mineral and Metal Markets over the Long Turn. Phoenix, 03.03.2010. Online verfügbar unter <https://www.slideshare.net/RichardSchodde/growth-factors-for-copper-schodde-sme-mems-march-2010-final>, zuletzt geprüft am 19.03.2018.
- Tilton, J. E.; Lagos, G. (2007): Assessing the long-run availability of copper. In: *Resources Policy* 32 (1-2), S. 19–23. DOI: 10.1016/j.resourpol.2007.04.001.
- USGS (var.): *Minerals Yearbook*. Volume I. -- Metals and Minerals. Jahre 1932-2015. Hg. v. U.S. Geological Survey. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/myb/>.
- Weber, L. (2015a): Daten zu Interpretation von Reserven- und Ressourcenangaben. Eigene Auswertung.
- Weber, L. (2015b): Interpretation von Reserven- und Ressourcenangaben aus wirtschaftsgeologischer Sicht. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 160 (2), S. 71–78. DOI: 10.1007/s00501-015-0347-4.
- Wellmer, Friedrich-W.; Böttcher, Gerd; Schmidt, H. (1994): Gewinnung mineralischer Rohstoffe und IDNDR. In: *Geographische Rundschau* 46 (7-8), S. 450–456.
- Wellmer, Friedrich-Wilhelm (2014): Wie lange reichen unsere Rohstoffvorräte? – Was sind Reserven und Ressourcen? In: *UmweltWirtschaftsForum* 22 (2), S. 125–132. DOI: 10.1007/s00550-014-0318-3.
- West, James (2011): Decreasing metal ore grades. Are they really being driven by the depletion of high-grade deposits? In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (2), S. 165–168. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00334.x.
- Wilburn, D. R.; Goonan, T. G.; Bleiwas, D. I. (2001): Technological advancement. A factor in increasing resource use. U.S. Geological Survey; U.S. Department of the Interior (Open File Report, 2001 - 197, Version 1.03). Online verfügbar unter <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr01197>, zuletzt geprüft am 21.12.2017.
- Winter Birrell, R. (2005): The development of mining technology in Australia. Doctor Thesis. University of Melbourne, Department of History, zuletzt geprüft am 09.01.2018.