

Kupfer

Informationen zur Nachhaltigkeit



29

63,546

Cu

Kupfer

AUF EINEN BLICK

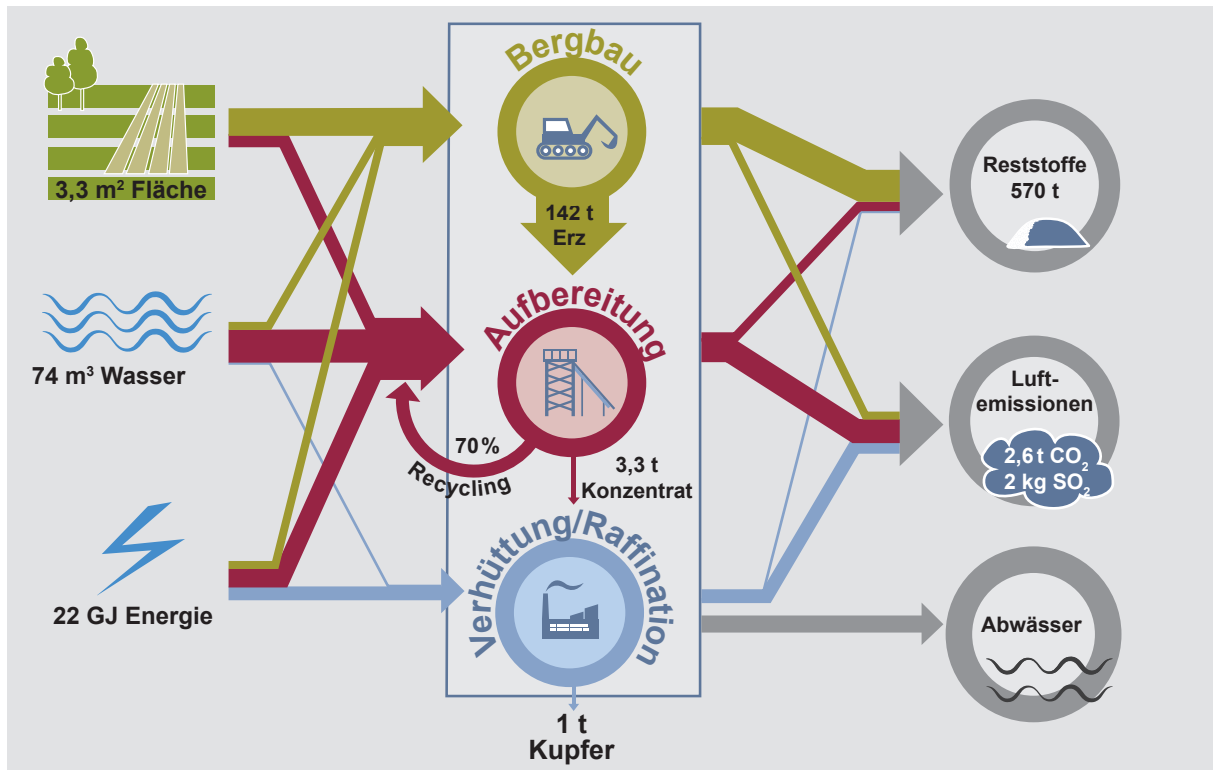


Abb. 1: Massenströme in Verbindung mit der Primärproduktion von einer Tonne Kupfer. Quellen: Siehe Kapitel 4 und 5.

Anmerkung: Die angegebenen Verbräuche und Emissionen sowie die Anteile der unterschiedlichen Prozessschritte an diesen basieren auf berechneten und zum Teil gemessenen globalen Daten sowie Daten der chilenischen Kupferindustrie. Sie dienen einer Illustration der Größenordnung involvierter Massenströme und sollen nicht als exakte Daten interpretiert werden. Die tatsächlichen Werte und Verhältnisse variieren je nach Bergbaustandort stark, z. B. wird der CO₂-Ausstoß und der Anteil der unterschiedlichen Prozessschritte daran signifikant durch die den Energiemix beeinflusst.

- Der relativ geringe Kupfergehalt im Erz bedingt, dass beträchtliche Mengen bergbaulicher Reststoffe bei der Gewinnung von einer Tonne Kupfer anfallen.
- Die Bildung saurer Grubenwässer ist im Kupferbergbau ein verbreitetes Phänomen, das unter anderem durch die geochemischen Eigenschaften der bergbaulichen Reststoffe beeinflusst wird.
- Der hohe Wasserbedarf, v. a. im Bergbau und in der Aufbereitung, von bis zu 350 m³ pro Tonne Kupfer und die mögliche Beeinträchtigung der Wasserqualität können, wie etwa in Peru, zu lokalen Konflikten führen.
- Moderne Abscheideeinrichtungen in Kupferhütten helfen den Austrag von metallreichen Stäube zu minimieren und über 99 % der Schwefeldioxidemissionen aufzufangen, welche dann zur Herstellung von Schwefelsäure genutzt werden.
- Ein großer Teil der Wertschöpfung bei der Erzeugung einer Tonne Kupfer findet am Bergbaustandort statt. Dies ist besonders für Kupfer produzierende Entwicklungsländer wie zum Beispiel die Demokratischen Republik Kongo bedeutend.
- Im Rahmen der 2019 gegründeten Copper Mark Initiative verpflichten sich Unternehmen der Kupferindustrie zu verantwortungsvoller Produktion nach definierten Nachhaltigkeitsstandards sowie deren Überprüfung.

INHALT

1. Relevanz von Kupfer	S. 3
2. Von der Lagerstätte zum Metall	S. 3
3. Recycling	S. 7
4. Nachhaltigkeitsaspekte des Bergbaus	S. 8
5. Nachhaltigkeitsaspekte der Weiterverarbeitung	S. 14

1 RELEVANZ VON KUPFER

Kupfer ist nach Eisen und Aluminium der mengenmäßig meist geförderte metallische Rohstoff. Weltweit entfallen derzeit knapp 70% des Bedarfs an Raffinadekupfer auf Asien, 15% auf Europa und 10% auf Nordamerika [1]. Man unterscheidet generell zwischen Primärkupfer, das in mineralischer Form im Bergbau gewonnen und anschließend aufbereitet wird (Kapitel 2), und sekundärem Kupfer, das durch Recycling gewonnen wird (Kapitel 3). Die deutschen Kupferimporte in Konzentrationen sowie in Roh- und raffinierter Form lagen 2018 in der Größenordnung von 1,1 Mio. t, womit Deutschland unter den Top 10 der Importeure weltweit liegt. Der Verbrauch an primärem Raffinadekupfer im selben Zeitraum lag bei etwa 1,2 Mio. t [2].

Aufgrund seiner exzellenten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit ist Kupfer unverzichtbar im Bereich der Energieinfrastruktur, im Personen- und Güterverkehr sowie in der klassischen Elektroindustrie. Im alltäglichen Leben findet sich Kupfer praktisch überall wieder, so etwa bei der Erzeugung elektrischer Energie und deren Übertragung vom Kraftwerk zum Endverbraucher, in der Elektroinstallation von Gebäuden, in Elektrogeräten und in der Bordelektronik von Autos und Flugzeugen sowie als Oberleitung im Schienenverkehr. Die hohe thermische Leitfähigkeit erlaubt zudem den Einsatz von Kupfer als Wärmetauscher und trägt z. B. bei Stromkabeln zur Wärmeableitung bei, wodurch deren Strombelastbarkeit erhöht und der Materialaufwand bei gleicher Leistung verringert wird. Entsprechend werden etwa 57% des gesamten Kupfervolumens in Deutschland in der Kabel- und Elektroindustrie verwendet. Daneben sind die Baubranche sowie der Automobil- und Maschinenbau weitere wichtige Verbraucher [2].

Die tragende Rolle von Kupfer in unserer Gesellschaft wird aufgrund seiner immensen Bedeutung für unser alltägliches Leben auch in Zukunft bestehen bleiben. Globale Megatrends wie eine wachsende Weltbevölkerung, ein global steigender Wohlstand sowie Anstrengungen zur Dekarbonisierung der Gesellschaft führen zu einem weiterhin steigenden Kupferbedarf [1]. So ist der Ausbau erneuerbarer Energien und deren Nutzung in alternativen Antriebstechnologien auf die Verfügbarkeit von Kupfer für elektrische Leitungen angewiesen.

Beispielsweise benötigt eine 5-MW-Off-shore-Windkraftanlage samt Infrastruktur bis zu 30 t Kupfer [3]. Unter Annahme von 3.066 Wind-Volllaststunden pro Jahr (Auslastung von 35%) und eines mittleren CO₂-Ausstoßes von 474 g CO₂/kWh durch die Stromerzeugung in Deutschland [4] hilft jede in einer Windkraftanlage eingesetzte Tonne Kupfer damit ca. 240 t CO₂ pro Jahr

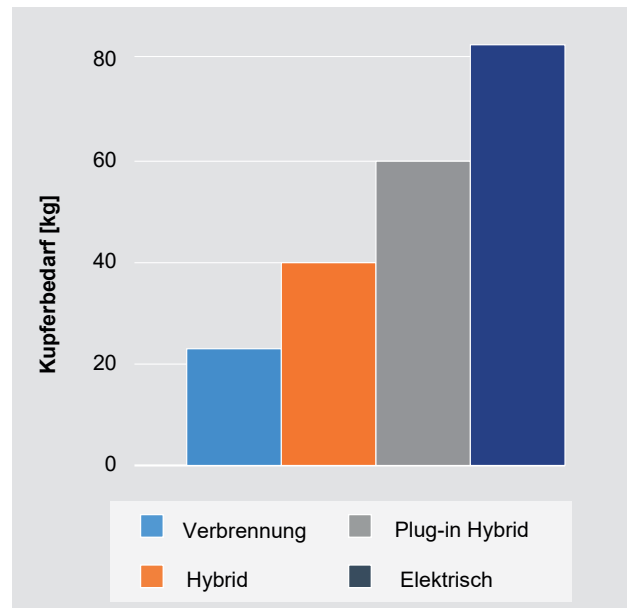


Abb. 2: Kupferbedarf pro Fahrzeug in der Elektromobilität im Vergleich zum Verbrennungsmotor. Daten: ICA 2017 [5].

einzusparen, was etwa das 100fache des durch die Produktion des Kupfers erzeugten Ausstoßes ist. Auch die Nutzung elektrischer Antriebsmotoren in Pkw geht mit einem erhöhten Kupferbedarf einher. Im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren ist der Kupferbedarf bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen mit ca. 80 kg etwa vier Mal höher (Abb. 2). Bis 2027 wird der Kupferbedarf für den Bereich E-Mobilität global auf knapp 1,8 Mio. t geschätzt, was einer Zunahme von etwa 800% im Vergleich zu 2017 entspricht [5].

2 VON DER LAGERSTÄTTE ZUM METALL

2.1 Geologie

Der Kupferanteil der Erdkruste liegt im Mittel bei etwa 0,005 – 0,01%. Mit einem derzeitigen mittleren Erzgehalt der im Abbau befindlichen Lagerstätten von 0,6 – 0,7% ist also eine 60 – 140fache Anreicherung notwendig, um eine abbauwürdige Kupferlagerstätte zu bilden.

Kupfer kommt fast ausschließlich als Mineral in sulfidischer oder oxidischer Form vor. Kupferminerale können in drei wesentliche Gruppen unterteilt werden. Die durch hydrothermale Prozesse entstehenden hypogenen Minerale wie Bornit, Chalkopyrite und Enargit, die durch supergene Prozesse entstehenden oxidischen Minerale wie Cuprit und Malachit sowie die supergenen sekundär sulfidischen Minerale wie Chalkosin und

Covellit. Wie später dargelegt, hat dies einen ganz erheblichen Einfluss auf die nachhaltigkeitsrelevanten Herausforderungen in der Kupfergewinnung.

Aus geologischer Perspektive ist ein Großteil der heutigen Kupferproduktion an vier Typen von Lagerstätten gebunden, die sich in ihrem geologischen Kontext, im Erzgehalt und Tonnage sowie ihren Begleitmetallen wesentlich unterscheiden können. Daneben existieren noch weiteren Lagerstättentypen. Entsprechend können die mineralogischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Kupfererze und Nebengesteine stark variieren, was einen großen Einfluss auf ökonomische und ökologische Aspekte der Lagerstättennutzung hat. Den heute wichtigsten Typ von Kupferlagerstätten bilden porphyrische und damit assoziierte Kupferskarn-Lagerstätten, die zurzeit für etwa 60 – 70 % der Weltkupferproduktion verantwortlich sind und deren hydrothermale Entstehung im Zusammenhang mit Vulkanismus steht. Beispiele sind die großen Lagerstätten in Chile, Peru oder auch Indonesien. An zweiter Stelle folgen sedimentäre Kupferlagerstätten, aus denen etwa 15 % des weltweiten Kupfers stammt. Diese sind vorwiegend in Sambia und in der Demokratischen Republik (DR) Kongo zu finden. Auch in Polen ist der Kupferbergbau an diesen Lagerstättentyp gebunden. Zusammen mit vulkanogenen Massivsulfid- und Eisen-Oxid-Kupfer-Gold-Lagerstätten (engl.

IOCG-Deposits) stellen porphyrische und sedimentäre Kupferlagerstätten ca. 94 % der primären, d.h. aus dem Bergbau stammenden Weltkupferproduktion [6]. Die Notwendigkeit des Vorhandenseins bestimmter, je nach Lagerstättentyp unterschiedlicher, geologischer Bedingungen zur Entstehung einer Kupferlagerstätte bedingt, dass diese nicht gleichmäßig über die Erde verteilt sind, sondern häufig in Provinzen vorkommen (Abb. 3).

2.2 Bergbau

Kupfererz wird vorwiegend im industriellen Großbergbau gefördert. Im Jahr 2018 lag die globale Bergbauproduktion bei etwa 20,6 Mio. t Kupferinhalt. Eine Übersicht der geographischen Verteilung der größten Bergbauprojekte findet sich in Abb. 3.

Die wichtigsten Produzentenländer und Produktionszahlen im Fünjahresmittel (2014 – 2018) sind Chile (5,7 Mio. t), Peru (2,0 Mio. t), China (1,7 Mio. t), USA (1,3 Mio. t) und die DR Kongo (1 Mio. t), wobei die Bedeutung Perus und der DR Kongo stark gewachsen ist mit 2,4 Mio. t bzw. 1,2 Mio. t (2018) [1].

Die wichtigsten Bergbaufirmen und deren Anteil an der primären Kupferproduktion 2018 waren Codeco (9%), Glencore (7,0%), Freeport-McMoRan (6,9%),

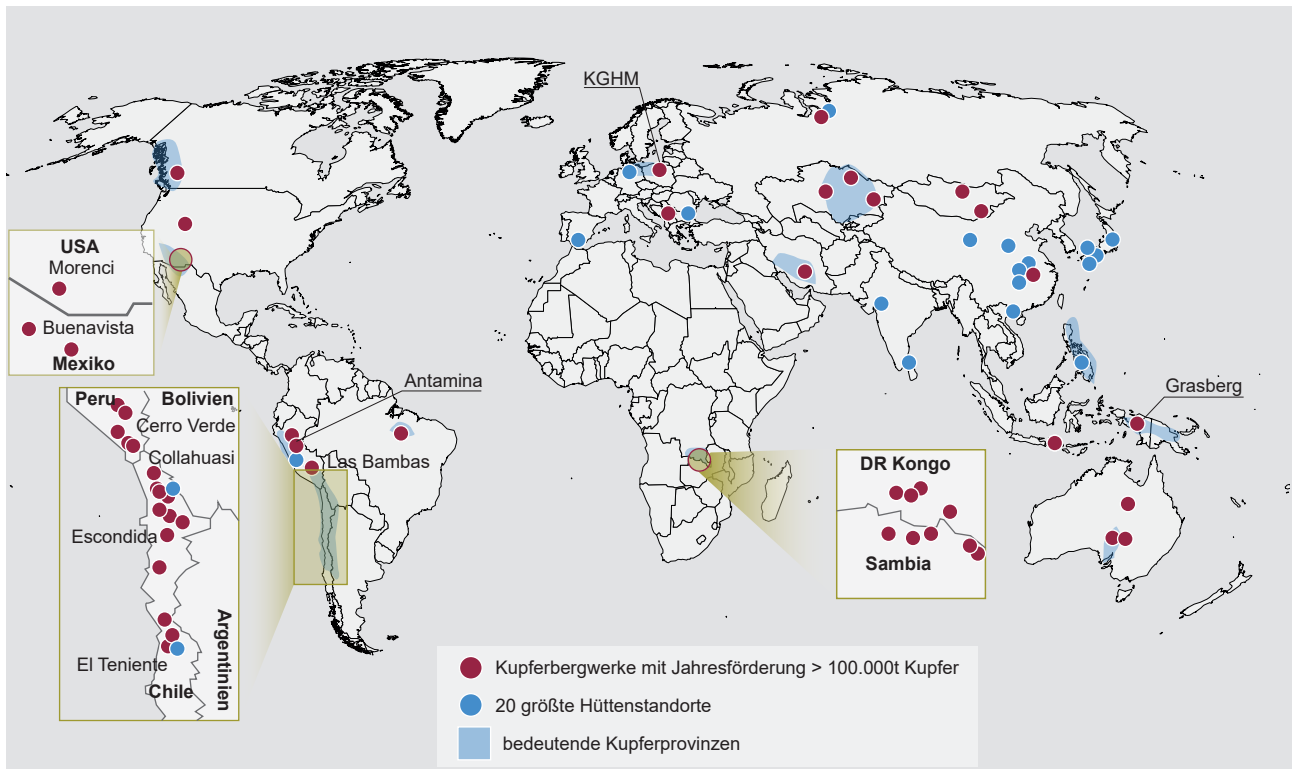


Abb. 3: Kupferbergwerke mit einer Jahresförderung > 100.000 t (Stand 2018) und die 20 größten Hüttenstandorte nach Kapazität (Stand 2019). Die zehn größten Bergwerke sind mit Namen genannt. Daten: HEDENQUIST et al. 2012 [6] S&P 2019 [7]; ICSG 2019 [8]

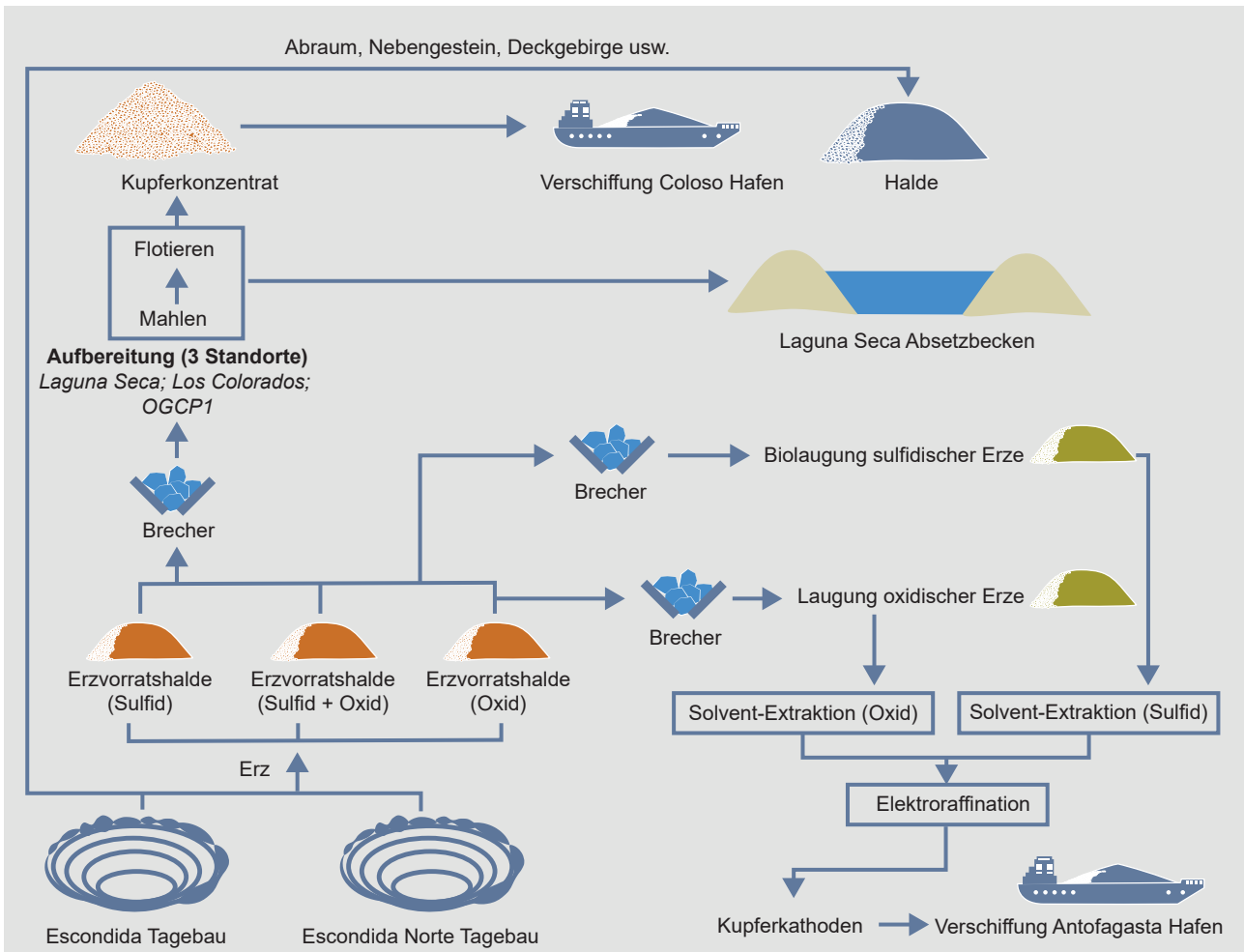


Abb. 4: Vereinfachte Übersicht der Materialströme im weltgrößten Kupferbergwerk Escondida, Chile. Das Beispiel verdeutlicht, dass eine klare Trennung der verschiedenen Abbau- und Aufbereitungsverfahren nicht immer vorhanden ist.

BHP Group (6,2%) und Southern Copper (4,8%). Gemessen an der Kupfer-Jahresproduktion im Jahr 2018 war Escondida das größte Kupferbergwerk der Welt (1,2 Mio. t; Chile) gefolgt von Collahuasi (0,55 Mio. t; Chile) sowie Grasberg (0,55 Mio. t; Indonesien) [1,7].

Im Jahr 2018 wurden die globalen Kupferreserven auf 839 Mio. t geschätzt [1]. Schätzungen der Ressourcen sind weniger verbreitet, mit 3.034,7 Mio. t im Jahr 2015 jedoch bedeutend höher [9]. Ausgehend von den größten derzeit in Planung befindlichen Projekten ist auch in Zukunft der Schwerpunkt der Bergwerksförderung in Chile, Peru und der DR Kongo zu erwarten.

Im globalen Maßstab wird der Großteil des Kupfererzes im Tagebau gefördert. Viele Betriebe beginnen auch als Tagebau und mit fortschreitendem Abbau der Lagerstätte erfolgt die Produktion auch Untertage. Eine wirtschaftliche Gewinnung von Kupfererz im reinen Untertagebergbau geht häufig mit der Förderung als Nebenprodukt anderer Metallerze einher oder erfordert höhere Kupfergehalte im Erz. Eine vereinfachte

Darstellung der Stoffströme in einem Kupferbergwerk ist in Abb. 4 am Beispiel des Abbaustandortes Escondida illustriert. Generell wird das Erz zunächst durch Sprengung gelöst und anschließend zu Brechern transportiert, wo eine Vorzerkleinerung stattfindet. Von dort gelangt das Erz in die weitere Aufbereitung, die vorwiegend von der Erzminerologie bestimmt wird und auf pyrometallurgischem oder hydrometallurgischem Weg erfolgt.

2.3 Aufbereitung –

Pyrometallurgisch

Für die pyrometallurgische Verarbeitung, die für etwa 80% der primären Kupfergewinnung eingesetzt wird, wird zunächst ein Kupferkonzentrat erzeugt. Das vorgebrochene Erz wird dabei zunächst unter Zugabe von Wasser auf ca. 50 µm Korngröße gemahlen. Der für eine optimale Ausbringung notwendige Mahlgrad unterscheidet sich je nach Erz was den Energieverbrauch wesentlich beeinflusst (siehe Kapitel 4). Im Anschluss

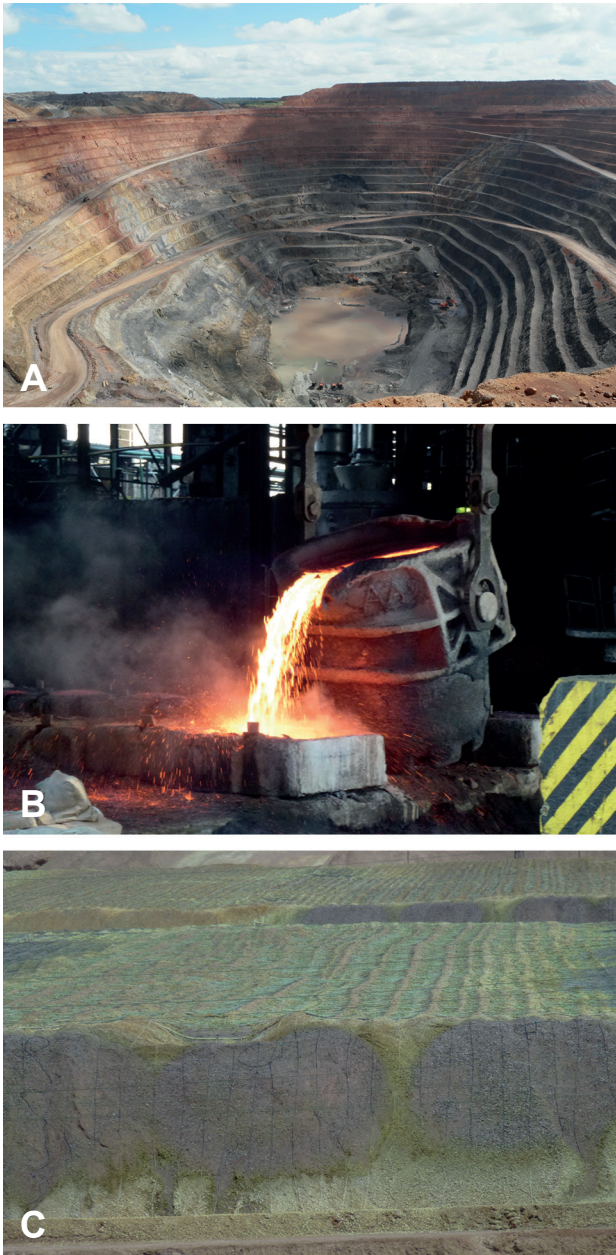


Abb. 5: A: Kupfer-Kobalt Tagebau Mutanda in der D.R. Kongo. B: Anodengießen in der Tsumeb Kupferhütte, Namibia. C: Erzlaugung, Chile. Fotos: BGR.

werden während der Flotation die kupferhaltigen Wertminerale vom Nebengestein abgetrennt. Häufig werden mehrere Flotationsstufen eingesetzt, um ein Kupferkonzentrat mit etwa 25% – 35% Kupfergehalt zu erzeugen.

Die anfallenden Reststoffe werden als Aufbereitungsabgänge bezeichnet (engl. tailings). Diese enthalten noch geringe Mengen des Wertminerals und der eingesetzten Prozesschemikalien. In manchen Fällen kann ein Teil der Aufbereitungsabgänge weiter verwendet werden z. B. als Versatz zur Stabilisierung des Grubengebäudes Untertage. Es gibt unterschiedliche Arten der finalen Verbringung von Aufbereitungsabgängen, wobei

die geeignetste für jeden Bergbaustandort individuell unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte bestimmt werden sollte. In den meisten Fällen findet eine Ablagerung als Suspension in großen Absetzbecken (engl. tailings dam) statt. Ein Teil des eingespülten Wassers kann zur Wiederverwendung zurückgewonnen werden.

Das erzeugte Kupferkonzentrat wird anschließend in einer Kupferhütte, manchmal in der Nähe des Abbaus, weiterverarbeitet. Die drei führenden Länder bei der Verhüttung sind China, Chile und Japan. Der größte deutsche und europäische Kupferproduzent ist die Aurubis AG in Hamburg. Die dortige Hütte hat eine Jahreskapazität von 450.000 t Kupfer. Während der Verhüttung wird das Kupferkonzentrat zunächst bei 750° C geröstet, um die im Konzentrat vorhandenen Eisensulfide zu oxidieren. Anschließend werden diese im Schmelzprozess unter Zugabe von Koks und Kohle als Schlacke abgeschieden und sogenannter Kupferstein mit einem Kupfergehalt 30 – 80% entsteht. Während des folgenden Konvertierens werden weitere Verunreinigungen entfernt und es wird Kupfer mit einem Reinheitsgrad von 94 – 97% erzeugt. Heutzutage sind Verfahren in Betrieb, die diese Schritte in einem Prozess vereinen können. In der anschließenden Schmelzraffination werden weitere Verunreinigungen entfernt und das erhaltene Kupfer mit einem Reinheitsgrad von etwa 99% zu Kupferanoden gegossen (Abb. 5B). Aus den Kupferanoden werden mit Hilfe der Elektrolyse während der Raffination Kupferkathoden gewonnen, die einen Reinheitsgrad von 99,95 – 99,99% aufweisen. Bei diesem Prozess entsteht Anodenschlamm als Nebenprodukt. In diesem finden sich wertvolle und seltene, auch im Erz und Konzentrat vorhandene Metalle wie z. B. Gold, Silber und die Platin-Gruppen-Elemente wieder, die im Anschluss gewonnen werden können.

Die in der Verhüttung anfallenden Nebenprodukte sind die erwähnte Schlacke, welche zum Großteil aus Eisen und Siliziumoxiden besteht, und Schwefeldioxidemissionen, die in der Regel zur Produktion von Schwefelsäure genutzt werden. Die entstehenden Abgase sind mit Stäuben angereichert, die Metalle wie Blei, Zink, Arsen, Antimon oder Nickel enthalten können und aus der Abluft abgeschieden und im Prozess recycelt werden müssen.

Aufbereitung – Hydrometallurgische Laugung und Elektrowinnung

Auf hydrometallurgischem Weg werden oxidische Erze und bestimmte sulfidische Erze aufbereitet. Bei der hydrometallurgischen Gewinnung wird das gebrochene Kupfer mit Hilfe von verdünnter Schwefelsäure gelaugt. Die häufigste Art der Laugung ist die Haufenlaugung,

bei der das Kupfererz aufgehaldet und anschließend mit verdünnter Schwefelsäure benetzt wird (Abb. 5C). Die Schwefelsäure läuft durch das Erz und löst dabei das Kupfer aus den Mineralen. Die an der Basis der Halde aufgefangene Lösung hat einen Kupfergehalt von etwa $1 - 6 \text{ g/m}^3$, enthält aber auch noch Verunreinigungen wie Eisen und Mangan [10]. Bei der Bio-Laugung wird Kupfer mit Hilfe mikrobieller Aktivität in einem ähnlichen Prozess gewonnen. Je nach Mineralogie und den geotechnischen Charakteristiken der Halden beträgt die Laugungszeit zwischen 90 Tagen und 3 Jahren. Abhängig von Erztyp und Mineralogie existieren verschiedene Modifikationen dieses grundlegenden Prozesses, so z. B. die Tanklaugung, bei der auch mit erhöhten Temperaturen und Drücken gearbeitet werden kann.

Aus der kupferhaltigen Lösung wird dann über Zwischenschritte und unter Verwendung von organischen Phasen und starken Säuren ein kupferreiches Elektrolyt erzeugt, dessen Kupfergehalt hoch genug ist, um aus diesem mit Hilfe der Elektrolyse Kupferkathoden mit einem Reinheitsgrad $>99\%$ zu gewinnen. Man spricht hier auch vom SX-EW-Prozess (Solvent Extraction / Electrowinning). Die Prozesslösungen können hierbei im Kreis geführt und wiederverwendet werden.

3 RECYCLING

Kupfer ist ein Metall, das sich ohne Funktionalitätsverlust unendlich häufig recyceln lässt. Aus Nachhaltigkeitsperspektive ist ein geordnetes, formelles Recycling unter Verwendung moderner Technologien zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für Kupfer besonders erstrebenswert.

Der Anteil an Sekundärmaterial an der gesamten Kupferraffinadeproduktion liegt global bei derzeit etwa 17% . In Deutschland liegt dieser Anteil mit rund 41% um einiges höher [1,2]. Weltweit größter Nettoexporteur von Kupferschrotten sind die USA, gefolgt von Großbritannien und Frankreich. Größte Nettoimporteure sind China, Südkorea, Malaysia und Deutschland, letzteres mit einem Anteil der weltweiten Gesamtimporte von etwa $5 - 10\%$. Haupthandelspartner Deutschlands ist die EU [1]. Je nach Quelle können diese Zahlen leicht variieren. Die größte deutsche und auch weltweit eine der größten Kupferrecyclinganlagen wird von der Aurubis AG in Lünen betrieben, wo pro Jahr etwa 200.000 t Sekundärkupfer produziert werden [2].

Hochwertige Kupferschrotte sind begehrt und können sehr nahe am Preis von primär erzeugtem Kupfer liegen. Die lange Lebensdauer vieler Kupferprodukte

bedeutet, dass das verwendete Kupfer erst nach längerer Zeit dem Recycling wieder zur Verfügung steht. Mit dem gleichzeitig jährlich wachsenden Kupferbedarf bedingt dies, dass der Gesamtkupferbedarf zurzeit nur teilweise aus dem Recycling gedeckt werden kann.

Bei sekundärem Kupfer unterscheidet man im Wesentlichen zwischen Neuschrotten und Altschrotten. Erstere sind meist sortenrein und können häufig direkt wieder eingeschmolzen und verwendet werden. Hierzu zählen z. B. Produktionsabfälle aus der Halbzeugfertigung. Zum anderen gibt es Altschrotte aus Wirtschaftsgütern wie z. B. Fernsehern oder aus der Automobilindustrie. Bei diesen ist ein direktes Einschmelzen aufgrund von Verunreinigung nicht möglich. Die Aufbereitung des Recyclingmaterials kann durch auf Sekundärkupfer spezialisierte Hütten erfolgen oder es kann bei gegebenen Voraussetzungen in die primäre Kupfergewinnung eingebracht werden.

Der genaue Recyclingprozess ist abhängig vom Kupfergehalt der Schrotte. Kupferschrotte mit niedrigem Kupfergehalt werden zunächst unter Zugabe von Koks oder Eisenschrotten in einem Schmelzofen aufkonzentriert oder direkt in den Schmelzprozess der primären Kupfererzeugung eingebracht. Kupferschrott mit höherem Kupfergehalt kann, wie bei der primären Kupferverhüttung, in einem Konverter weiterverarbeitet werden. Sehr kupferreiche Schrotte können direkt während des Anodengießens in den Prozess eingebracht werden. Die letzten Verunreinigungen in den Kupferanoden werden während der Elektrolyse entfernt, so dass Kupfer mit einem Reinheitsgrad von $99,99\%$ entsteht und auch die weiteren im Kupferschrott vorhandenen Metalle wie Gold und Silber zurückgewonnen werden können.

Im Allgemeinen ist durch den Wegfall der bergbauartigen Förderung und Erzaufbereitung der Ressourcenbedarf beim Kupferrecycling wesentlich geringer als bei der Primärgewinnung. Die am Bergwerk entstehenden Inanspruchnahmen von z. B. Land- und Wasserressourcen sowie die damit assoziierten Folgen entfallen. Der Energiebedarf von sekundär gewonnenem Kupfer ist etwa $30 - 80\%$ niedriger im Vergleich zur Primärgewinnung. Entsprechend sind auch die Treibhausgasemissionen beim Recycling mit ca. $0,2 - 1,9 \text{ t CO}_2\text{e}$ (CO_2 -Äquivalent) pro Tonne Kupfer niedriger [11]. Diese Variation ist wesentlich von der Komplexität des zu recycelnden Materials bzw. dessen Kupfergehalt beeinflusst. Endgeräte mit relativ geringer Kupferkonzentration, in denen viele verschiedene Materialien verbaut sind und in denen Kupfer mit anderen Metallen legiert wurde, sind wesentlich aufwändiger und damit ressourcenintensiver zu recyceln als z. B. Produkte bei denen Kupfer noch in Reinform vorliegt und die direkt wieder

eingeschmolzen werden können. Wie auch bei der Gewinnung primären Kupfers entstehen bei der Verhüttung sekundärer Materialien Abfälle und Emissionen in Luft und Abwässer, die aufgefangen und gereinigt werden müssen. Bedingt durch das Einbringen unterschiedlicher Materialien, können sich die Emissionen von denen der primären Kupfergewinnung unterscheiden.

4 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DES BERGBAUS

4.1 Umwelt

Flächenbedarf

Der Hauptteil der heutigen Kupferbergwerks-Produktion geschieht im Tagebau, welcher im Vergleich zum Untertagebergbau mit einem höheren Flächenbedarf einhergeht. Dies ist zum einen durch den Tagebau selbst, aber auch durch den höheren Flächenbedarf für Reststoffhalden und Infrastruktur bedingt. Der heute größte Kupfer-Tagebau ist in Bingham Canyon in der Nähe von Salt Lake City, USA, mit einer Breite von 4 km und einer Tiefe von 1,2 km. Größere Bergwerke plus Infrastruktur können leicht eine Fläche von mehr als 20 – 30 km² umfassen. Aufgrund des geringen Erzgehaltes sind im Kupferbergbau insbesondere die Absetzbecken und Reststoffhalden flächenintensiv. Im Vergleich liegt der Flächenverbrauch von Untertagebergwerken zur Kupfergewinnung eher im Bereich von 5 km². Für Tagebaue- bzw. Untertagebergwerke ist neben dem direkten Einfluss der Grube, der Halden und der Aufbereitungsanlagen der indirekte Einfluss auf den Flächenverbrauch z. B. durch Straßen, Bergbausiedlungen, Häfen usw. häufig größer. Es gibt Schätzungen die davon ausgehen, dass 2011 global etwa 4.000 km² Fläche direkt durch den Kupferbergbau beansprucht wurden [12]. Global wurden 2016 etwa 66 km² Fläche für den Kupferbergbau neu erschlossen, was in etwa der Größe Manhattans entspricht. Angaben über den Flächenverbrauch pro Tonne Erz werden mit 2,3 ha pro Mio. t Erz angegeben [13], variieren jedoch stark im Bereich von 2 – 4,5 ha pro Mio. t Kupfererz [14]. Bei einem mittleren Erzgehalt von 0,7% würde dies einem Flächenverbrauch pro Tonne Kupfer von 3 – 6,5 m² entsprechen.

Die Flächen werden in der Regel einige Jahrzehnte in Anspruch genommen. Eine Nachnutzung ist möglich und sollte von Beginn an Teil der Abbauplanung sein. Gleichzeitig ist eine langfristige geochemische und geotechnische Stabilisierung der Aufbereitungsabgänge und Reststoffhalden von großer Bedeutung. Inwieweit dies adäquat stattfindet, hängt wesentlich vom Be-

treiber, aber auch von den Regulierungen und deren Durchsetzung im Abbau land selbst ab. Pauschale Aussagen lassen sich aufgrund der globalen Verteilung des Kupferbergbaus auf mehr als 50 Länder nicht treffen. Ein gutes Beispiel für eine gelungene Rehabilitation findet sich in Kanada im Kupferbergwerk Highland Valley, wo in einem ehemaligen Absetzbecken ein Seeökosystem etabliert wurde, das jetzt als Naherholungsmöglichkeit dient.

Die Landinanspruchnahme beeinflusst das lokale Ökosystem und die Biodiversität. Das Ausmaß ist je nach Bergbaustandort verschieden, was eine individuelle Beurteilung der Situation von Ort notwendig macht. So ist in den ariden Kupferbergbauregionen der USA und Chiles die Biodiversität häufig gering und hochspezialisiert, wohingegen z. B. in tropischen Abbauregionen Indonesiens oder Papua-Neuguineas eine extrem hohe Biodiversität vorzufinden ist, die durch den Kupferbergbau beeinträchtigt werden kann [15].

Wasserverbrauch

Aus globaler Perspektive finden sich große Kupfervorkommen heute gehäuft in Gebieten mit erhöhtem Wasserstress, was zwar in keinerlei Wirkungszusammenhang steht [16], Wasser aber zu einem zentralen Aspekt der Nachhaltigkeit in der Kupfergewinnung macht. Eingriffe in die lokale Hydrologie erfolgen durch die Wasserentnahme, die Entwässerung der Grube (Abb. 7A) oder zum Teil auch durch Umleiten von Oberflächengewässern. In der Konkola Kupfermine in Sambia werden aus der Bergwerksentwässerung z. B. 400.000 m³ Wasser pro Tag in Oberflächengewässer eingeleitet, um einen sicheren und effektiven Abbau zu ermöglichen.

Die Aufbereitung, also das Mahlen und Flotieren, erfordert im Kupferbergbau etwa 70% des Gesamtwasserbedarfs, wie das Beispiel Chiles in Abb. 6 zeigt. Gleichzeitig dient es als Transportmedium, um die entstehenden Aufbereitungsabgänge zu den Absetzbecken zu transportieren. Dort kann dann eine Wiedergewinnung stattfinden und so eine Verringerung des Bedarfs an neu entnommenem Wasser erreicht werden. Es hat jedoch umweltrelevante und zum Teil ökonomische Vorteile die Aufbereitungsabgänge einzudicken, bevor diese final verbracht werden. In den allermeisten Fällen ist es zumindest ökologisch sinnvoll, die Menge an recyceltem/wiederverwendetem Wasser zur Deckung des Gesamtwasserbedarfs zu maximieren. In der chilenischen Kupferindustrie liegt die Recyclingquote bei etwa 70% (Abb. 6), in manchen Fällen, wie zum Beispiel in der Lumwana Kupfermine in Sambia, kann der Anteil des recycelten Wassers auch bei 90% liegen.

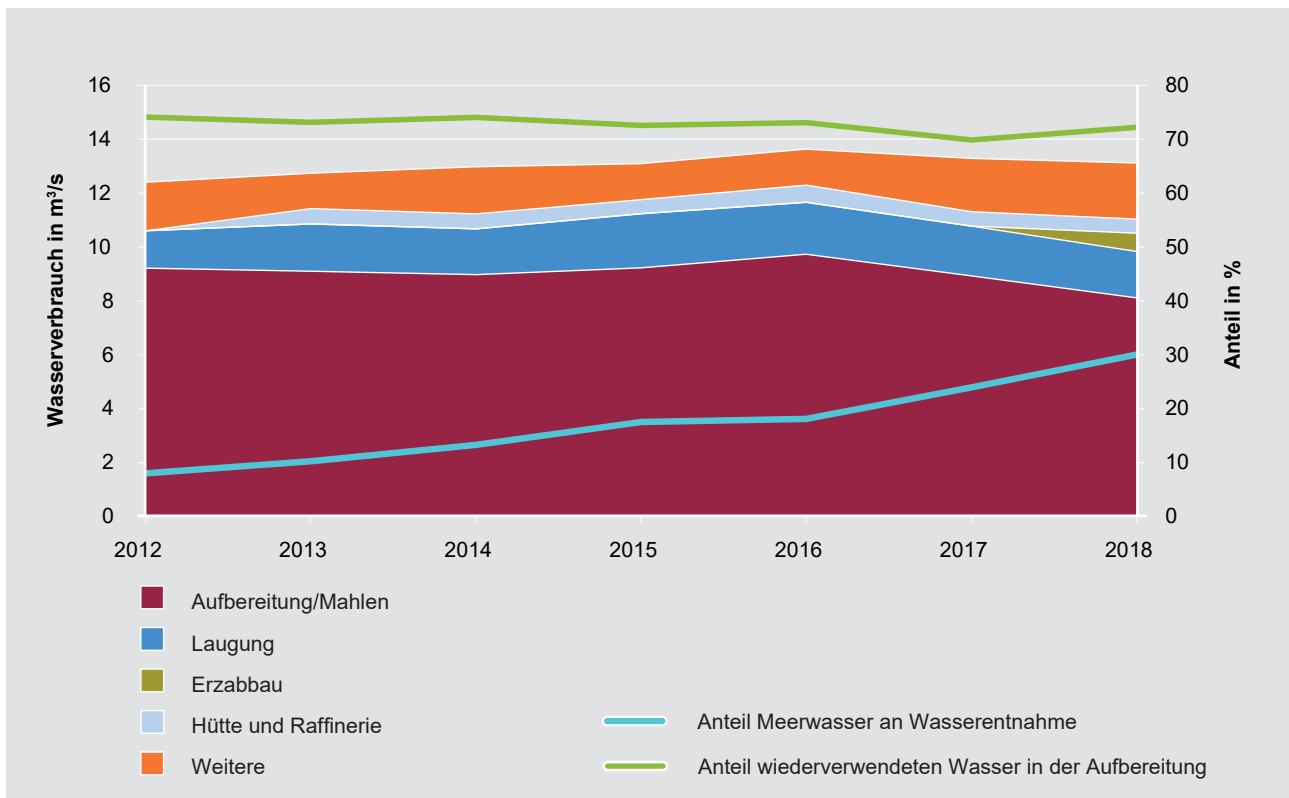


Abb. 6: Wassernutzung in der chilenischen Kupferindustrie in m³ pro Sekunde. Daten: Cochilco 2019 [17].

Im globalen Mittel liegt die Menge an neu entnommenem Wasser pro Tonne Kupfererz bei etwa 0,5 m³ [18], kann jedoch auch bedeutend höher [19] oder niedriger [20] ausfallen, je nach lokaler Situation. Der Gesamtwasserbedarf in der Aufbereitung einer Tonne Kupfererz, der also auch recyceltes Wasser umfasst, liegt in der Größenordnung von 1,5 m³ – 5 m³ [21]. Der Bedarf an neu entnommenem Wasser für die hydrometallurgische Aufbereitung einer Tonne Erz ist mit etwa 0,17 m³ geringer, variiert jedoch auch im Bereich von 0,08 – 0,25 m³ pro Tonne Erz [18]. Bei einem Fördervolumen von 50 Mio. Tonnen Erz kann der Wasserbedarf eines großen Bergbaubetriebes damit in der Größenordnung einer deutschen Großstadt liegen. Wasser aus Oberflächen- und Grundwasser kann ebenso genutzt werden, wie aufbereitetes Siedlungsabwasser oder solches, das aus der Entwässerung des Bergwerks stammt. Wie in Abb. 6 dargestellt, wird in den ariden Gebieten Chiles und Perus immer häufiger, auch aufgrund gesetzlicher Vorgaben, auf die Entsalzung von Meerwasser zurückgegriffen um die Frischwasserressourcen zu schonen. Jedoch sind die für eine Meerwasserentsalzung notwendigen Investitions- und Betriebskosten beträchtlich, insbesondere durch einen hohen Energiebedarf für Entsalzung und Transport des Wassers. In dem größten Kupferbergwerk der Welt, Escondida, hat der Betreiber zur Sicherung der Wasserversorgung 3,5 Mrd. USD in eine Entsalzungsanlage investiert, die seit 2018 2.500 l Frischwasser

pro Sekunde bereitstellt. Eine direkte Aufbereitung mit Meerwasser ist aufgrund der Mineralogie des Erzes nicht immer möglich, im Kupferbergwerk Las Luces in Chile jedoch erfolgreich. Eine angemessene Einschätzung der Umweltauswirkungen der Wassernutzung im Kupferbergbau erfordert eine gute Kenntnis der lokalen hydro(geo)logischen Bedingungen.

Energieverbrauch

Für die Gewinnung von Kupfer muss Energie für das Lösen, das Laden, den Transport und die Aufbereitung des Erzes aufgewandt werden. Je tiefer ein Bergwerk, desto größer die Transportdistanzen, was auch einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Untertagebetriebe müssen zudem bewettert werden und haben daher in der Regel einen höheren Energieverbrauch pro Tonne Erz als Tagebaue. Etwa 60 – 90 % des Energieverbrauches bei der Erzeugung einer Tonne Kupfer entfallen auf Bergbau und Aufbereitung, wobei die Aufbereitung tendenziell der Hauptenergieverbraucher ist [22]. Die Anteile variieren jedoch stark mit den lokalen Bedingungen. Im Wesentlichen setzt sich der Gesamtenergieverbrauch aus Kraftstoffen wie z. B. Diesel und elektrischer Energie zusammen. Kraftstoffe werden zum Großteil im Abbau, elektrische Energie in der Aufbereitung eingesetzt. Je niedriger der Erzgehalt, desto höher der Energieverbrauch, da für jede Tonne Kupfer mehr Erz bewegt werden muss. Zudem haben die Erzhärtigkeit und der je nach Erz variierende Mahlgrad

einen wichtigen Einfluss auf den Energiebedarf eines Bergwerks.

Bedingt durch Faktoren wie zunehmende Abbautiefen und den weltweit abnehmenden Erzgehalt ist der Energieverbrauch pro Tonne Kupferkonzentrat in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen und liegt derzeit im Mittel in der Größenordnung von 8.300 MJ [23], was ca. 200 MJ pro Tonne Erz entspricht, also etwa dem wöchentlichen Stromverbrauch eines Ein-Personen-Haushaltes (ca. 2.600 kWh Jahresverbrauch). Der Gesamtenergiebedarf großer Abbaubetriebe ist enorm und z. B. im Falle des Kupferbergwerks Cerro Verde in Peru verantwortlich für 9% des gesamten peruanischen Stromverbrauchs.

Emissionen

Aufgrund des geringen Kupfergehaltes im Erz der häufig im Bereich von 0,5 – 1,5% liegt, der teilweise vorhandenen Überdeckung der Lagerstätte und der Form der Erzkörper fallen im Kupferbergbau beträchtliche Mengen an bergbaulichen Rückständen an. Dies sind Aufbereitungsabgänge, Rückstände der Erzlaugung sowie Deckgebirge und taubes Nebengestein. Unter Annahme eines Kupfergehaltes im Erz von 0,7% und einem Erz Abraumverhältnis von 3 : 1 fallen pro Tonne erzeugtem Kupfer etwa 570 t bergbauliche Rückstände an. Generell ist die Masse bergbaulicher Abfälle im Tagebau größer als im Untertagebau, da in letzterem

selektiver abgebaut und höher gehaltige Erze gefördert werden.

Allgemein geht von den Reststoffen, abhängig von den lagerstättenspezifischen mineralogischen und geochemischen Eigenschaften, der Art der Aufbereitung sowie den lokalen Bedingungen eine Gefahr für die Umwelt aus, die wesentlich auf die mit Kupfer assoziierten Schwermetalle (z. B. Zink, Blei) und Metalloide (z. B. Arsen, Antimon) zurückzuführen ist. Primäres Transportmedium ist Wasser, das für etwa 70% des Schadstoffaustrags verantwortlich ist. Aufgrund der häufig sulfidischen Mineralogie von Kupferlagerstätten ist die Bildung saurer Grubenwässer eine besondere Herausforderung (Abb. 7B). Die oxidative Verwitterung (eisen)sulfidischer Minerale führt zur Bildung von Schwefelsäure und daraufhin zur Freisetzung von teilweise toxischen Elementen, die neben Kupfer im Gestein vorhanden sind. Viele dieser Elemente sind unter den sauren Bedingungen sehr mobil und können so in die Umwelt gelangen. Dies ist besonders in vulkanogenen Massivsulfiderz-Lagerstätten (VMS) ein großes Problem. Die zur Römerzeit abgebauten VMS-Lagerstätten des iberischen Pyritgürtels führen noch nach 2.000 Jahren zu einer erheblichen Umweltbelastung. Auch in den großen porphyrischen Kupferlagerstätten ist dies häufig ein Problem. In den sedimentären Kupferlagerstätten in zentralafrikanischen Ländern hingegen ist das Problem aufgrund der anderen Mineralogie und Nebengesteinschemie, die letztendlich auf eine andere Entstehung zurückzuführen ist, wenig ausgeprägt. Jedoch sind unter den hier oft vorliegenden neutralen/alkalischen Bedingungen andere, häufig mit Kupfer assoziierte Elemente wie Cadmium oder Mangan ebenfalls sehr mobil.

Verschiedene Lösungen existieren, um die Risiken bergbaulicher Reststoffe zu minimieren. Eine mengenmäßige Reduzierung ist zunächst erstrebenswert, wie z. B. im Kupferbergwerk Pyhäsalmi, Finnland, wo die Aufbereitungsabgänge Untertage zur Stabilisierung des Grubengebäudes wiederverwendet werden. Wo eine solche Nutzung nicht möglich ist, ist die derzeit gängigste Praxis die Lagerung der bergbaulichen Reststoffe auf Halden und in Dämmen, die über den Lebenszyklus eines Bergwerks beträchtliche Größen erreichen können. Im Kupferbergwerk Bingham Canyon, USA, hat das seit 1999 aktive Absetzbecken eine Fläche von ca. 13 km² erreicht und ca. 1 Mrd. Tonnen Aufbereitungsabgänge aufgenommen. Maßnahmen zum Erosionsschutz, das Vermeiden der Entstehung kontaminierter Sickerwässer bzw. das Auffangen dieser sind geeignete Maßnahmen, das mit Reststoffhalden und Dämmen assoziierte Risiko zu minimieren. Hierfür stehen verschiedene Techniken zu Verfügung, deren Eig-



Abb. 7: A: Grubenentwässerung (Pumpen und Pipelines) in der Batu Hijau Kupfermine, Indonesien. B: Grubenwasserversauerung in Peru. Fotos: BGR.

nung stark von den lokalen Bedingungen abhängt. Das Entwässern der Aufbereitungsabgänge vor der Ablagerung ist aus Nachhaltigkeitssicht besonders geeignet, jedoch ab einem bestimmten Grad der Entwässerung derzeit aus technischen / ökonomischen Gründen auf Förderraten von < 100.000 t Erz pro Tag begrenzt d. h. eher für kleinere und mittelgroße Bergwerke geeignet. Ein Beispiel für eine fast vollständige Entwässerung ist im Bergwerk Cobre Las Cruces, Spanien, zu finden, wo aufgrund des extremen Versauerungspotentials eine „trockene“ Ablagerung der Aufbereitungsabgänge in speziellen Halden stattfindet, um den Schadstoffaustrag zu minimieren. Da Aufbereitungsabgänge häufig als Suspension in die Absetzbecken eingespült werden, sind diese im Fall eines Dammbrechens fließfähig, was ein großes Risiko für Menschen und Umwelt darstellt. Im August 2014 brach in Kanada ein Absetzbecken im Kupferbergwerk Mt. Polley und ca. 25 Mio. m³ bergbauliche Reststoffe und Abwässer entluden sich in nahegelegene Flüsse und Seen. Neben der Minimierung von wasserqualitätsbezogenen Risiken hilft eine Entwässerung der Aufbereitungsabgänge auch das Risiko und die Auswirkungen eines Dammbrechens signifikant zu verringern.

Aus Umweltperspektive kritisch diskutiert wird die Verbringung von Aufbereitungsabgängen am Meeresboden, was z. B. im Kupferbergwerk Batu Hijau in Indonesien praktiziert wird. In vielen Ländern verboten ist die Entsorgung der Aufbereitungsabgänge über Flüsse, wie z. B. in den Kupferbergwerken Grasberg in Indonesien und OK Tedi in Papua-Neuguinea praktiziert. Bei letzterem ist aufgrund dieser Praxis ein 70 – 90%iger Rückgang der Fischpopulationen im aufnehmenden Fluss festgestellt worden. Die Methode wurde in beiden Bergwerken gewählt, da die Gewährung der Standsicherheit eines Damms unter den dortigen Bedingungen (hohe Niederschläge, Erdbebenregion, ausgeprägte Topographie) eine extreme Herausforderung darstellt. Das Beispiel verdeutlicht die Komplexität einer angemessenen Beurteilung individueller Situationen.

Die Treibhausgasemissionen, die durch den Energieverbrauch in Bergbau und Aufbereitung entstehen, sind schwer allgemein zu beziffern. Sie variieren stark, je nach Energiemix der Energieversorgung, Abbautiefe, Erzgehalt usw. und werden auf 30 – 40 kg pro Tonne Kupfererz geschätzt [23]. Dies entspricht etwa dem Ausstoß eines Mittelklasse Pkw (ca. 140g CO₂/km) auf etwa 200 km. Tendenziell ist der CO₂-Ausstoß auf dem hydrometallurgischen Weg geringer als auf dem pyrometallurgischen Weg [24]. Daten aus dem Jahr 2009 für Chile deuten an, dass bei der pyrometallurgischen Erzeugung einer Tonne Kupfer, die direkten und indirekten Emissionen (CO₂e) aus Bergbau bzw. Aufbereitung

etwa im Verhältnis von etwa 1 : 2 stehen [17]. Auch in der Kupfergewinnung finden erneuerbare Energien zunehmend Eingang. So stellt zum Beispiel im Bergwerk Gabriela Mistral in der Atacama Wüste Chiles ein Solarthermie-Kraftwerk 80.000 MWh Heizenergie für die elektrolytische Kupfergewinnung zur Verfügung.

Etwa die Hälfte der weltweiten Kupferproduktion findet in den ariden Gebieten Süd- und Nordamerikas sowie Australiens statt. Aride klimatische Bedingungen fördern die Entstehung von Stäuben durch Winderosion von Absetzbecken, Halden, Tagebauen und Transportwegen. Während des aktiven Bergwerkbetriebes wird in der Regel Wasser zur Unterdrückung der Staubemissionen verwendet. Nach Beendigung des Bergbaus ist eine Stabilisierung und Rekultivierung der Flächen und Halden ein wirksames Mittel, Staubemissionen entgegen zu wirken.

4.2 Soziale und sozioökonomische Bedeutung

Lokale Wirtschaftsentwicklung

Die Kupferindustrie bietet häufig gut bezahlte Arbeitsplätze für hoch und gering Qualifizierte, insbesondere auch in entlegenen Gebieten, wo Einkommensmöglichkeiten ansonsten begrenzt sind. In Chile gibt es etwa 100.000 Beschäftigte im Bergbau. Schätzungen gehen davon aus, dass dort für jeden Arbeitsplatz in einem Kupferbergwerk 3,7 weitere Arbeitsplätze in andere Branchen geschaffen werden [25]. Globale Schätzungen existieren nicht. Der internationale Kupferverband (International Copper Association), der mit seinen Unternehmen etwa 40% der Weltkupferproduktion umfasst, gibt an, dass seine Mitglieder etwa 300.000 direkte Arbeitsplätze in der Kupferindustrie bereitstellen. Was auf globalem Maßstab gering erscheint, kann auf lokaler Ebene signifikant sein, wie z. B. im Kupferbergwerk Cerro Verde, Peru, wo zurzeit knapp 4.100 Personen dauerhaft und zu Spitzenzeiten knapp 20.000 Personen beschäftigt waren. In Deutschland waren im Jahr 2018 etwa 17.000 Personen in der Kupferindustrie beschäftigt [2].

Konflikte

Konflikte können zwischen dem Unternehmen und der Belegschaft oder mit externen Parteien auftreten. Arbeitsbedingungen und Lohnzahlungen sind insbesondere im ersten Fall Hauptkonfliktsachen. Konflikte, die ein gewisses Maß überschreiten und z. B. gewalttätig ausgetragen werden, sind häufiger in Ländern mit schwächerer Regierungsführung zu beobachten, werden aber auch wesentlich von der Unternehmenskultur bestimmt. So haben Nichtregierungsorganisatio-

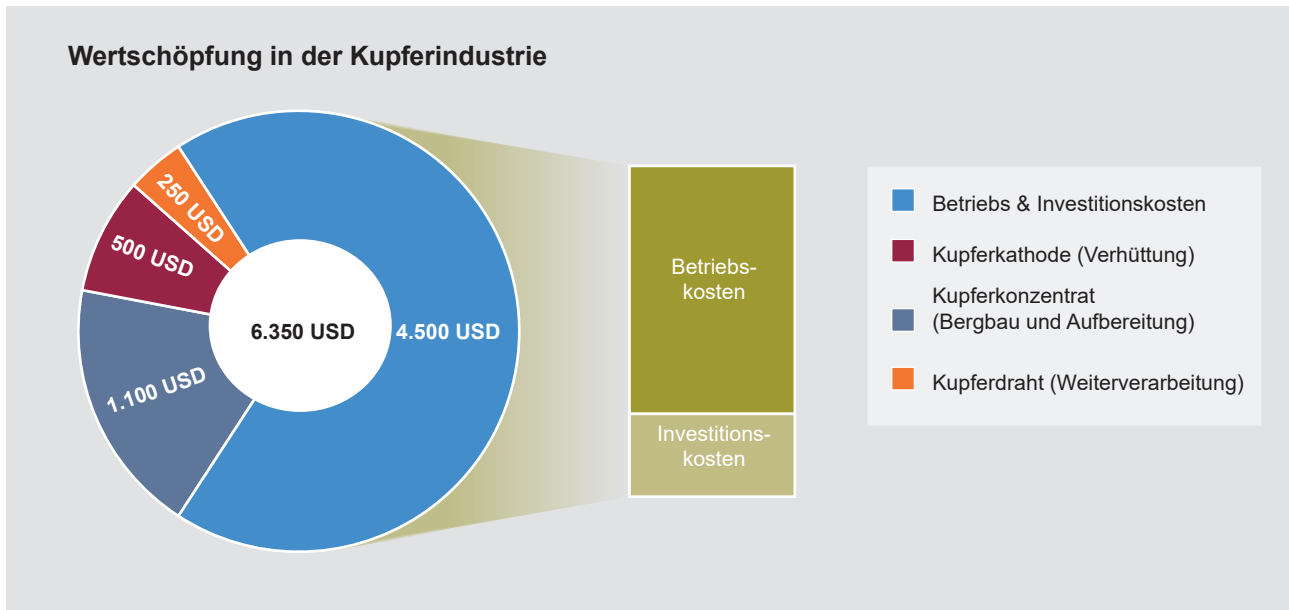


Abb. 8: Exemplarisch berechnete Wertschöpfung bei der Erzeugung 1 t Kupfer. Preisannahme 6100 USD pro Tonne Kupfer (Kathode, ohne Weiterverarbeitung). Quelle BGR.

nen zum Beispiel in Sambia insbesondere chinesische Betreiber von Kupferbergwerken und -hütten für die Arbeitsbedingungen kritisiert. Vorwürfe betreffen das Fehlen persönlicher Schutzausrüstung, Zwang zu Arbeiten unter lebens- und gesundheitsgefährdenden Bedingungen, Diskriminierung von Gewerkschaftsvertretern sowie Arbeitsbelastungen von 80 Wochenstunden für 1/4 des im sambischen Kupferbergbau üblichen Gehaltes. Beschwerden oder Proteste wurden mit Gehaltskürzungen oder Entlassungen bestraft und Angestellte so zur Arbeit gezwungen. Ein Vorgehen, was auch aus China selbst berichtet wurde [26].

Auf externer Ebene kann z. B. die Landnutzung und der Wasserverbrauch durch den Bergbau zu Konflikten mit der lokalen Bevölkerung führen, wenn diese ihre ursprüngliche Lebensgrundlage hierdurch gefährdet sieht. Ein prominentes Beispiel aus dem Kupferbergbau ist der Fall des Kupferbergwerks Tia Maria in Peru. Dort kam es noch im Vorfeld der Produktion zu massiven, gewalttätigen Protesten und der Ausrufung des Notstandes. Untersuchungen in Peru zeigen, dass die primären Konfliktursachen im Bergbau ein erhöhter Wasserstress sowie bereits in der Vergangenheit aufgetretene Konflikte zwischen Bergbaubetreibern und der lokalen Bevölkerung sind. Zudem spielt die Größe des Bergbauinvestments und die Verteilung des Einkommens aus dem Bergbau eine wichtige Rolle. Interessanterweise scheint die Menge des auf lokaler Ebene ankommenden Geldes nur eine untergeordnete Rolle zu spielen [27]. Viel wichtiger ist, wie zielführend dieses verwendet wird, was, wie in Kapitel 3.3 geschildert, wesentlich von der Governance der staatlichen Stellen

und der Unternehmen abhängt. Weitere Konfliktgründe sind Umsiedlungen und assoziierte Kompensationszahlungen.

In den zum Teil entlegenen Gebieten, in denen Kupfer abgebaut wird, stehen zunehmend auch die Rechte und Ansprüche indigener Völker im Fokus. Diese haben häufig eine sehr enge Verbindung zu dem von ihnen besiedelten Land, womit eine bergbauliche Nutzung oder Umsiedlung häufig schwer vereinbar ist. So wird z. B. im Kontext des brasilianischen Sossego Kupferbergwerks oder des Tampakan Kupfer-Gold-Projektes auf den Philippinen von Auseinandersetzungen zwischen indigener Bevölkerung und Bergbaufirmen berichtet.

Ökonomische Bedeutung

Der Kupferbergbau ist in vielen Staaten eine wichtige Einnahmequelle. Auf staatlicher Ebene bildet der Kupferbergbau in einigen Ländern das Fundament der gesamten Wirtschaft. In Chile, dem größten Kupferproduzenten der Welt, machen die Exporte von Kupfer etwa 50% des Wertes der Gesamtexporte (Jahresmittel 2003 – 2016) aus und bilden mit einem Anteil von ca. 13% (Jahresmittel 2008 – 2015) einen signifikanten Anteil am BIP des Landes [28]. Der hohe Umsatz, der im Kupferbergbau in einzelnen Betrieben erzielt wird, bedingt, dass größere Betriebe zumindest lokal meist der größte Steuerzahler sind. Das Kupferbergwerk Escondida entrichtete im Jahr 2019 knapp 900 Mio. USD an staatlichen Abgaben, was etwa 17% des Umsatzes entsprechen dürfte. Neben den steuerlichen Einkünften profitieren Staaten von weiteren ökonomischen Vorteilen, die durch den Bergbau entstehen können, so etwas

den Steuern, die die Beschäftigten zahlen. Insgesamt deuten Erhebungen darauf hin, dass im Kupfersektor etwa 94% des Umsatzes eines Unternehmens reinvestiert werden, das heißt für Löhne, Steuern, lokale Entwicklungsprojekte, Kapitalgeber und Betriebskosten aufgewendet werden [25]. Daneben profitieren Staaten auch wesentlich von den Investitionen im Zusammenhang mit der Erschließung eines Kupfervorkommens, die leicht mehrere Milliarden USD umfassen können. Zur Erschließung der mongolischen Kupferlagerstätte Oyu Tolgoi im Tagebau- und Untertagebergbau sind z. B. Investitionen in Höhe von ca. 13 Mrd. USD erforderlich [29]. Dies ist mehr als das Gesamt BIP der Mongolei im Jahr 2017 (11,5 Mrd. USD).

Betrachtet man die Gesamtwertschöpfung vom Bergbau bis zur Halbzeugfertigung (Abb. 8), fällt der Hauptanteil der Wertschöpfung in den Bereich des Bergbaus und der Aufbereitung. Entsprechend können auch hier die größten positiven ökonomischen Effekte erzielt werden, was eine Chance auch für rohstoffreiche Entwicklungsländer ist, auch wenn sie keine Infrastruktur zur Weiterverarbeitung haben.

Governance

Das Potential des Kupferbergbaus, aber auch des Bergbaus allgemein, die nachhaltige Entwicklung eines

Landes zu stärken oder aber auch diese zu gefährden, wird maßgeblich von der Integrität, Transparenz, Rechtschaffenheit, Kompetenz und Durchsetzungskraft der staatlichen Institutionen sowie den gesetzlichen Rahmenbedingungen, also der Governance eines Landes, beeinflusst. Sie bestimmt maßgeblich, ob die endliche Ressource Kupfer für eine langfristige und positive Entwicklung des Abbaulands genutzt werden kann. Die World Governance Indikatoren (WGI) [30] erfassen dies allgemein auf Länderebene, wohingegen die Resource Governance Indikatoren (RGI) [31] speziell auf die Governance des Rohstoffsektors eines Landes abzielen. Für die führenden Kupfer produzierenden Länder ist die Resource Governance tendenziell höher als die allgemeine Governance. In Abb. 9 sind die gemittelten WGI der 15 wichtigsten Kupfer produzierenden Länder dargestellt. Etwa 45% der Weltkupferproduktion stammen aus Ländern mit einer schwachen bis mittleren Governance (WGI < 0,5).

Die Extractive Industry Transparency Initiative (EITI) ist eine Initiative, die auf eine Erhöhung der Transparenz von Zahlungen (Abgaben der Unternehmen und Einnahmen des Staates) im Rohstoffsektor abzielt [32]. Von den weltweit 15 größten Kupfer produzierenden Ländern haben 4 die EITI-Standards implementiert und 3 weitere sind Mitglied der Initiative. Der derzeitige

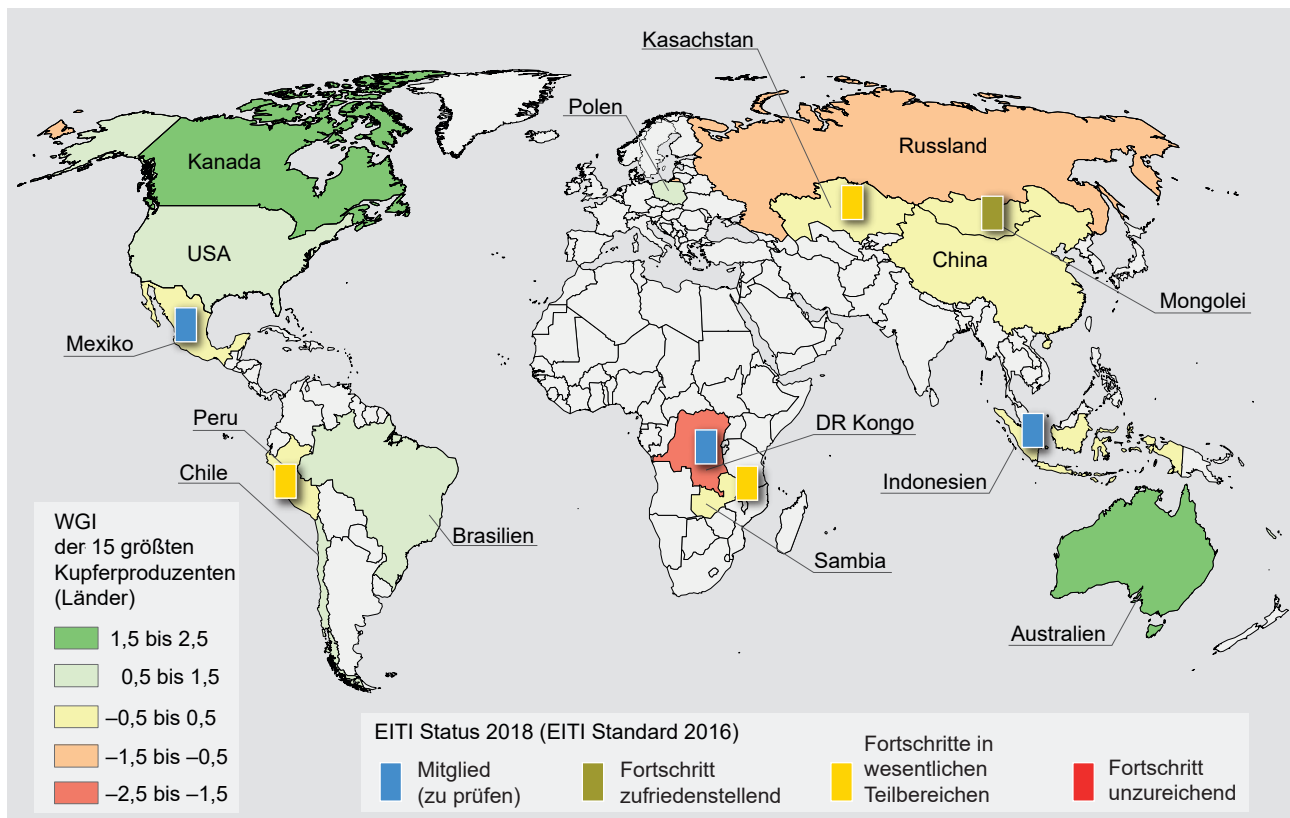


Abb. 9: Governance im Kupferbergbau. WGI = Worldwide Governance Indicators 2018 [30], gemittelt. EITI = Extractive Industry Transparency Initiative [32].

EITI-Status der größten Kupfer produzierenden Länder ist in Abb. 9 dargestellt.

Neben der Governance eines Landes spielt auch die Governance des Abbaununternehmens eine wichtige Rolle. Ob und zu welchen nachhaltigkeitsrelevanten Standards sich ein Unternehmen bekennt und diese effektiv implementiert, ist daher die zweite Säule, die die Nachhaltigkeit der Kupferförderung beeinflusst. Sieben der zehn größten Kupferbergbaukonzerne der Welt sind in der Industrievereinigung International Council on Mining and Metals (ICMM) zusammengeschlossen, deren Ziel es ist, durch ökologische und soziale Standards im Bergbau die nachhaltige Entwicklung zu fördern. Hierfür werde soziale und umweltrelevante Best-Practice-Standards definiert, die durch die ICMM-Mitglieder implementiert und unabhängig verifiziert werden. Knapp die Hälfte der globalen Bergwerksproduktion von Kupfer (45%) entfällt auf ICMM-Unternehmen.

5 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DER WEITERVERARBEITUNG

Die Kupferverhüttung und Raffination greift weniger stark in die natürliche Umwelt ein als der Bergbau auf Kupfererz. Jedoch werden auch hier natürliche Ressourcen wie Wasser, Boden und Luft in Anspruch genommen, woraus ein nachhaltigkeitsrelevanter Umwelteinfluss resultieren kann.

In der Verhüttung und Raffination von Kupfer ist ein effektives Management der Abgasemissionen von besonderer Bedeutung. Durch die Oxidation der sulfidischen Erze während des Röstens entsteht Schwefeldioxid, das aus der Abluft abgeschieden werden muss. Hohe Schwefeldioxidemissionen aus veralteten Kupferhütten haben z. B. in Sambia in der Vergangenheit zu gesundheitlichen Problemen geführt. Die Stadt Norilsk in Russland zählt aufgrund der Emissionen der dortigen Nickel-Kupferhütten zu einem der am stärksten verschmutzten Orte der Welt. Heute besitzen viele Kupferhütten moderne Abscheide-Einrichtungen, die es erlauben, über 99% des Schwefeldioxids aufzufangen und die Emissionen damit auf ca. 2 kg SO₂ pro Tonne Kupfer zu verringern. Das Schwefeldioxid wird zur Produktion von Schwefelsäure genutzt, die in der elektrolytischen Kupferraffination Verwendung findet oder zum Beispiel zur hydrometallurgischen Gewinnung von Kupfer weiterverkauft werden kann. Pro Tonne pyrometallurgisch erzeugtem Kupfer entstehen so 2,5 – 4 Tonnen Schwefelsäure [10].

Daten aus der Berichterstattung führender Kupferproduzenten weltweit deuten auf einen Gesamtenergiebe-

darf zur Erzeugung einer Tonne Kupfer, unter Einbezug des Bergbaus und der Aufbereitung, von 10 – 70 GJ hin. Der Mittelwert liegt hier bei 22,2 GJ [24], was in der Größenordnung des Jahresverbrauchs eines deutschen Vierpersonenhaushaltes liegt. Etwa 27% davon entfallen auf die Verhüttung und etwa 7% auf die Raffination [22]. Variationen im Energiebedarf bei der Verhüttung sind wesentlich auf die Zusammensetzung des Konzentrates zurückzuführen. Mit diesem Energieverbrauch ist ein Ausstoß von Treibhausgasen assoziiert, welcher je nach Energiemix stark variiert. Letzterer beeinflusst auch ganz wesentlich den Anteil der unterschiedlichen Prozessschritte zur Erzeugung einer Tonne Kupfer am CO₂-Gesamtausstoß. Über den gesamten Prozess der Kupfererzeugung fallen so pro Tonne Kupfer im Mittel 2.6 t CO₂e an, jedoch variiert dieser Wert aufgrund unterschiedlicher Abbau- und Aufbereitungsmethoden, Erztypen- und Gehalte zwischen 1 und 9 t CO₂e [14,24].

Neben den Treibhausgasen sind auch Stäube in der Abluft vorhanden, die je nach Zusammensetzung des ursprünglichen Erzes Schwermetalle wie Kupfer, Antimon, Blei, Bismut, Arsen, Nickel, Zink und Selen enthalten können. Konzentrate, die aufgrund der Erzminerologie z. B. sehr hohe Arsengehalte aufweisen, haben auf dem Weltmarkt einen geringeren Wert. Für die Bergbauunternehmen kann es ab bestimmten Gehalten unerwünschter Elemente sogar schwer werden, ihr Kupferkonzentrat überhaupt an eine Kupferhütte zur Weiterverarbeitung zu verkaufen. Da bis zu 10% der Konzentratmasse in den Abluftstäuben verloren gehen kann und diese 20 – 40% Kupfer enthalten können, fangen moderne Filteranlagen die Stäube auf und recyceln diese im Prozess, um das Kupfer so wieder zu gewinnen [10]. Unzureichend gefilterte Abluft hat in vielen Fällen zu einer starken Schwermetallbelastung von Böden und Gewässern in der Umgebung von Kupferhütten geführt. Im Zusammenhang mit der Tuticorin-Kupferhütte in Südindien etwa schwelt seit längerem ein Konflikt, da diese für Luft- sowie Gewässerverschmutzungen und damit verbundene gesundheitliche Auswirkungen auf die lokale Bevölkerung verantwortlich gemacht wird. Im Verlauf des Konfliktes kam es immer wieder zu teilweise gewalttätigen Protesten und einer Stilllegung der Anlage.

Der Wasserverbrauch bei der Verhüttung und Raffination von Kupfer ist im Vergleich zum Verbrauch bei Abbau und Aufbereitung eher gering. Der Gesamtwasserverbrauch für eine Tonne Kupfer liegt im Mittel bei 74 m³ [24], was etwa einem deutschen Vierpersonenhaushalt im Jahr entspricht. Wie auch bei der Energie variiert der Wert aufgrund unterschiedlicher Faktoren, wie z. B. dem Erzgehalt, im Bereich von wenigen Kubikmetern

bis zu 350 m³ [24]. Der Anteil der Kupferverhüttung an diesem Verbrauch ist jedoch gering und wird für Chile im Bereich von 4 % angegeben [17]. Die Beeinträchtigung des Abwassers durch Schwermetalle ist hingegen eine mögliche Herausforderung. Gewässerbelastungen durch Einleitungen einer Kupferhütte haben z. B. in Chile zu Protesten der lokalen Bevölkerung, deren Lebensgrundlage der Fischfang bildet, geführt. Der größte deutsche Kupferproduzent Aurubis gibt für seine Hütten und Raffinerien an, 1,1 g Gesamtmetalle pro Tonne erzeugten Kupfers in die Gewässer einzuleiten [33].

Wie zuvor dargestellt (Abb. 8) ist die Wertschöpfung bei der Verhüttung von Kupfer im Vergleich zum Bergbau geringer. Ebenso ist die Anzahl an Arbeitsplätzen geringer, jedoch werden häufig höher qualifizierte Arbeitskräfte gebraucht. Um den Beitrag der Kupferindustrie zu den nachhaltigen Entwicklungszielen der UN aufzuzeigen und zu fördern, hat die International Copper Association (ICA) 2019 die Initiative Copper Mark gegründet [34]. Diese bewertet die nachhaltigkeitsrelevanten Leistungen teilnehmender Unternehmen anhand der 32 von der Responsible Minerals Initiative (RMI) in ihrem Risk Readiness Assessment Tool definierten, Risikokategorien [35], die die Bereiche Umwelt, Soziales und Governance umfassen. Dies ermöglicht Interessenten, wie z. B. Akteuren des Finanzwesens oder nachgelagerten Unternehmen der Lieferkette, eine bessere Einschätzung nachhaltigkeitsbezogener Aspekte unternehmerischen Handelns in der Kupferindustrie vorzunehmen und in ihre Entscheidungen zu integrieren. Die London Metal Exchange, einer der größten Handelsplätze für Metalle weltweit, hat kürzlich ebenfalls Standards (LME Responsible Sourcing) eingeführt, die Unternehmen verpflichten, einen Nachweis über die verantwortliche Gewinnung der angebotenen Rohstoffe zu liefern. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Einhaltung der Sorgfaltspflichten entsprechend dem OECD Leitfaden für Minerale aus Konflikt- und Hochrisikogebieten, die Unternehmen müssen aber auch Zertifizierungen bezüglich Umwelt- und Arbeitsschutz (ISO 14001, OHSAS 18001) nachweisen [32,36].

6 QUELLENACHWEIS

- [1] DORNER U (unveröffentlicht) Rohstoffrisikobewertung - Kupfer. Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- [2] BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2019) Rohstoffsituationsbericht 2018, Hannover.
- [3] KAISER O, SEITZ H (2014) Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen - Kurzanalyse Nr.9. VDI ZRE Publikationen, Berlin.
- [4] ICHA P, (2019) Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [5] ICA – INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION (2017) The Electric Vehicle Market and Copper Demand <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2017/06/2017.06-E-Mobility-Factsheet-1.pdf> [Stand 1.4.2020].
- [6] HEDENQUIST JW, HARRIS M, CAMUS F (2012) Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe. Society of Economic Geologists.
- [7] S&P GLOBAL MARKET INTELLIGENCE (2018): SNL Metals & Mining Data – kostenpflichtige Datenbank; New York [Stand: 01.06.2020].
- [8] ICSG – INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP (2019) The world copper factbook 2019, ICSG, Lissabon.
- [9] MUDD G, JOWITT S (2018) Growing Global Copper Resources, Reserves and Production: Discovery Is Not the Only Control on Supply. Economic Geology 113 (6): 1235–1267.
- [10] SCHLESINGER ME, SOLE KC, DAVENPORT WG (2011) Extractive Metallurgy of Copper. Elsevier, Oxford.
- [11] NILSSON EA, ARAGONÉS M, ARROYO F, DUNON V, ANGEL H, KOMNITSAS K, WILLQUIST K (2017) A Review of the Carbon Footprint of Cu and Zn Production from Primary and Secondary Sources. Global Environmental Change 39: 305-315.

- [12] MURGUIA DI (2015) Global area disturbed and pressures on biodiversity by large-scale metal mining, University of Kassel
- [13] MARTENS P, RUHRBERG M, MISTRY M (2002) Flächeninanspruchnahme des Kupferbergbaus. *Erzmetall* 55: 287–293.
- [14] TOST M, BAYER B, HITCH M, LUTTER S, MOSER P, FEIEL S (2018) Metal Mining's Environmental Pressures: A Review and Updated Estimates on CO₂ Emissions, Water Use, and Land Requirements. *Sustainability* 10, 2881.
- [15] ZORN S (2018) Despite our best intentions: Papua New Guinea's Ok Tedi mine and the limits of expert advice. *Mineral Economics* 31: 12-21.
- [16] NORTHEY S, MUDD G, WERNER TT, JOWITT SM, HAQUE N, YELLISHETTY M, WENG Z (2017) The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global environmental change* 44: 109–124.
- [17] COCHILCO – COMISIÓN CHILENA DEL COBRE (2019) Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1999-2018. Santiago de Chile.
- [18] GUNSON AJ (2013) Quantifying, reducing and improving mine water use. University of British Columbia.
- [19] MUDD G (2008) Sustainability Reporting and Water Resources: a Preliminary Assessment of Embodied Water and Sustainable Mining. *Mine Water Environment* 27: 136–144.
- [20] LEMUS MT, DUCIOS JP (2008) Derechos, Extracciones y Tasa de Consumo de Agua Sector Minero Regiones Centro-Norte de Chile, Santiago de Chile.
- [21] Bleiwas DI (2012) Estimated water requirements for the conventional flotation of copper ores. U.S. Geological Survey Open-file Report 2012-109.
- [22] ELSHKAKIA, GRAEDEL TE, CIACCI L, RECK B (2016) Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change* 39: 305–315.
- [23] NORGATE T, HAQUE N (2010) Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production* 18: 266–274.
- [24] NORTHEY S, HAQUE N, MUDD G. (2013) Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. *Journal of Cleaner Production* 40: 118–128.
- [25] COPPER ALLIANCE (2020) Sustainable Copper. <https://sustainablecopper.org/> [Stand 23.04.2020].
- [26] HUMAN RIGHTS WATCH (2011) "You'll Be Fired if You Refuse" Labor Abuses in Zambia's Chinese State-owned Copper Mines. Human Rights Watch, New York.
- [27] SALEM J, AMONKAR Y, MAENNLING N, LALL U, BONNAFOUS L, THAKKAR K (2018) An analysis of Peru: Is water driving mining conflicts? *Resource Policy* In Press. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.09.010>.
- [28] FERNANDEZ V (2018) Copper mining in Chile and its regional employment linkages. *Resources Policy* In Press. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.03.017>.
- [29] HUME N (2018) Can Mongolian copper power the green revolution?. *The Financial Times*. <https://www.ft.com/content/1a39210c-91cc-11e8-bb8f-a6a2f7b-ca546>. [Stand 23.04.2020].
- [30] WORLD BANK GROUP (2019): Worldwide Governance Indicators. <https://info.worldbank.org/governance/wgi/> [Stand: 23.4.2020.]
- [31] RESOURCE GOVERNANCE INDEX (2017). <https://resourcegovernance.org/> [Stand 23.04.2020].
- [32] EITI – EXTRACTIVE INDUSTRY TRANSPARENCY INITIATIVE (2020) <https://eiti.org/> [Stand 03.07.2020].
- [33] AURUBIS AG (2019) Nachhaltigkeitskennzahlen – Update 2018/19. https://www.aurubis.com/binaries/content/assets/aurubisrelaunch/files/verantwortung/2018-19/aurubis-update-nachhaltigkeitskennzahlen-2018_19-.pdf [Stand 01.04.2020].
- [34] The Copper Mark (2020). <https://coppermark.org/> [Stand 23.04.2020].
- [35] RMI – RESPONSIBLE MINERALS INITIATIVE (2019) Risk Readiness Assessment Issue Areas and Industry Norms. http://www.responsiblemineralsinitiative.org/media/docs/RRA/2019_RRA_Issue_Areas_and_Industry_Norms_FINAL.pdf [Stand 23.04.2020].
- [36] OECD (2016) OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas, Third Edition. OECD Publishing, Paris.

IMPRESSUM

Herausgeber:

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe
Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit
Stilleweg 2
30655 Hannover

E-Mail: mineralische-rohstoffe@bgr.de
www.bgr.bund.de

Autoren:

Lucas Gilsbach

Unter Mitarbeit von:

Ulrike Dörner

Layout:

Jolante Duba

Titelfoto:

© Dirk Hoffmann – fotolia.com

Stand:

Juli 2020