

Weiterentwicklung der Bildungsstandards in der Sekundarstufe I in den Naturwissenschaften

Illustrierende Lernaufgabe für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Altes Kupfer – alles Schrott?

Diese Aufgabe wurde von Fachexpertinnen und Fachexperten der Länder, überwiegend Lehrkräften, entwickelt. Die Aufgabenentwicklungsgruppe wurde von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Fachdidaktik Chemie beraten. Das Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen hat den Prozess koordiniert.

Zusammenfassung:

Im Rahmen der vorliegenden Aufgabe erschließen sich die Lernenden Kenntnisse über die Eigenschaften von Kupfer und dessen Verwendungsmöglichkeiten. Darüber hinaus erarbeiten sie Informationen zur Kupfergewinnung und setzen sich mit Recyclingverfahren auseinander. Unter Berücksichtigung von ökonomischen, ökologischen, sozialen und normativen Gesichtspunkten entwickeln sie Handlungsoptionen im Umgang mit Kupferabfällen. Diese Lernaufgabe eignet sich für den Chemieunterricht sowie als Teil eines fächerübergreifenden Projekts zum Thema „Nachhaltigkeit und Ressourcennutzung“.

Kompetenzbereiche und relevante Standards	Sachkompetenz <i>Die Lernenden ...</i> S 1.3 nutzen Stoffeigenschaften, um Stoffe zu klassifizieren oder identifizieren. Erkenntnisgewinnungskompetenz <i>Die Lernenden ...</i> E 1.5 beschreiben in erhobenen oder recherchierten Daten Trends, Strukturen und Zusammenhänge, erklären diese und ziehen geeignete Schlussfolgerungen – auch unter Nutzung digitaler Werkzeuge. Kommunikationskompetenz <i>Die Lernenden ...</i> K 1.1 recherchieren zu chemischen Sachverhalten in unterschiedlichen, auch digitalen, Quellen.
--	---

	K 1.3 wählen mit Blick auf die Fragestellung relevante Informationen aus. K 2.1 stellen Zusammenhänge zwischen Alltagsphänomenen und chemischen Sachverhalten her. K 2.2 wählen aus, auf welche Weise fachliche Inhalte sach-, adressaten- und situationsgerecht weitergegeben werden. K 3.1 dokumentieren und präsentieren den Verlauf und die Ergebnisse ihrer fachlichen Arbeit, Überlegungen oder Recherchen adressatenbezogen auch unter Nutzung digitaler Werkzeuge. K 3.2 beschreiben, veranschaulichen oder erklären chemische Sachverhalte strukturiert. K 3.3 argumentieren fachlich folgerichtig. K 3.4 vertreten ihre Standpunkte zu chemischen Sachverhalten fachlich begründet und reflektieren Einwände. K 3.5 beachten Urheberchaft, belegen verwendete Quellen und kennzeichnen Zitate. Bewertungskompetenz <i>Die Lernenden ...</i> B 1.1 unterscheiden zur Bewertung von Sachverhalten und Informationen unterschiedliche Kriterien (z. B. naturwissenschaftlich, ökonomisch, normativ, sozial). B 1.2 nutzen zur Bewertung von Sachverhalten und Informationen naturwissenschaftliche Kriterien und setzen diese zu anderen Kriterien in Beziehung. B 1.3 diskutieren und bewerten Aspekte gesellschaftsrelevanter Fragen und Aussagen aus unterschiedlichen Perspektiven. B 2.1 nutzen zur Entwicklung von Handlungsoptionen naturwissenschaftliche Kriterien, setzen diese zu anderen Kriterien in Beziehung und wägen diese ab. B 2.4 beurteilen die Bedeutung chemischer Kenntnisse für Anwendungsbereiche und Berufsfelder. B 3.2 analysieren Entscheidungen in Hinblick auf Handlungsergebnisse
Basiskonzepte	Konzept vom Aufbau und von den Eigenschaften der Stoffe und ihrer Teilchen, Konzept der chemischen Reaktion, Energiekonzept

konkrete Inhalte	◆ Eigenschaften des Kupfers und die daraus resultierenden Verwendungen ◆ Gewinnung von Reinkupfer aus verschiedenen Verfahren (Primärherstellung aus Kupfererzen und Sekundärherstellung durch Recycling und Biomining) ◆ Ökonomische, ökologische und soziale Aspekte der Gewinnung von Kupfer nach diesen drei Verfahren
Materialien	M 1 – Kupfer – ein wichtiges Gebrauchsmetall M 2 – Expertengruppe 1: Kupfer – aus Alt mach Neu M 3 – Expertengruppe 2: Kupfer aus Chile M 4 – Expertengruppe 3: Leben mit dem Kupferbergbau M 5 – Expertengruppe 4: Biomining – die andere Art der Kupfergewinnung
Abschluss	Mittlerer Schulabschluss (MSA)
Jahrgangsstufe	2. Lernjahr
Lernvoraussetzungen	◆ Eigenschaften und Verwendung der Metalle ◆ Gewinnung aus Erzen
Bearbeitungszeit	120 Minuten, gegebenenfalls mit vorbereitender Hausaufgabe
Hilfsmittel	digitale Endgeräte, Auflistung oder Fotos von Altgeräten mit Kupferbauteilen bzw. kupferhaltigen Gegenständen
Differenzierungsmöglichkeit	Die Lernaufgabe kann offener gestaltet werden, indem die Lernenden sich zusätzlich selbstständig im Internet informieren.
fachpraktischer Anteil	ja ☐ nein ☒

1 Aufgabe

Es wird mal wieder Zeit – aus allen Ecken des Hauses werden Sachen zusammengesucht, die sich dort schon lange angesammelt haben und darauf warten, aussortiert zu werden. Einige Dinge sind kaputt, andere werden nicht mehr benötigt: Alte Computer, Handys, Kupferkabel, Messingtürgriffe, eine Bronzestatue. Beim Anblick dieser Fundstücke stellt sich unweigerlich die Frage: Ist das alles Schrott?

Teilaufgabe 1: Bestandsaufnahme

Sucht bei euch Zuhause nach Gegenständen, die nicht mehr verwendet werden und die Kupfer enthalten. Erstellt eine Liste. In Zweifelsfällen macht ein Foto und fragt eure Lehrkraft.

Teilaufgabe 2: Eigenschaften und Gewinnung von Kupfer

Sammelt mithilfe des Textes “Kupfer – ein wichtiges Gebrauchsmetall” (M 1) in Einzelarbeit Informationen über die Herstellung und die Eigenschaften von Kupfer.

- Nennt Verwendungsmöglichkeiten des Metalls Kupfer unter Begründung der bei der Verwendung genutzten Eigenschaften.
- Erstellt ein Fließschema über die Arbeitsschritte vom Kupfererz bis zum Reinkupfer. Gebt eine mögliche Reaktionsgleichung für die Herstellung von Rohkupfer aus Kupferkies an. Erläutert die Begriffe Kupfererz, Rohkupfer und Reinkupfer.

Teilaufgabe 3: Entwicklung des Kupferpreises

Findet euch in Stammgruppen zusammen. Recherchiert die Entwicklung des Kupferpreises in den letzten 10 Jahren und diskutiert mögliche Gründe für dessen Veränderung über die Zeit.

Teilaufgabe 4: Gruppenpuzzle I – Erarbeitungsphase in Expertengruppen

Entsendet je zwei Mitglieder eurer Stammgruppe in die Expertengruppen. Erarbeitet euch mit Hilfe des Textes für eure Expertengruppe (M 2–5), welche Möglichkeiten Deutschland theoretisch hätte, um seinen Bedarf an Reinkupfer für die Industrie zu decken. Bearbeitet dazu in den Expertengruppen die folgenden Aufgaben:

- Fasst die wichtigsten Schritte der dargestellten Möglichkeit der Kupfergewinnung zusammen. Nutzt dazu – wo möglich – die chemische Formelschreibweise.
- Beurteilt die dargestellte Möglichkeit der Kupfergewinnung unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Gesichtspunkten.
- Dokumentiert eure Ergebnisse. Nutzt eure Ergebnisse, um in eurer Stammgruppe zu argumentieren.

Teilaufgabe 5: Gruppenpuzzle II – Wissensvermittlung in Stammgruppen

Wenn ihr aus den Expertengruppen in den Stammgruppen zurück seid, ...

- stellt euren Mitschülerinnen und Mitschülern die erarbeiteten Möglichkeiten der Beschaffung von Reinkupfer in Deutschland vor,
- bewertet vergleichend die verschiedenen Möglichkeiten der Beschaffung von Reinkupfer aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Sicht gemeinsam und
- dokumentiert die Ergebnisse eurer Gruppe mithilfe eines digitalen Posters.

Teilaufgabe 6: Abschließende Bewertung

Entscheidet auf der Grundlage eurer bisherigen Ergebnisse begründet, was ihr persönlich mit den im Haus gefundenen Gegenständen anfangen würdet.

2 Material für Lernende

Material 1

Kupfer – ein wichtiges Gebrauchsmetall

Das rotbraun glänzende Metall Kupfer kommt heute in fast allen Lebensbereichen vor. Es findet Verwendung in Autos, Nutzfahrzeugen, Zügen und Flugzeugen, in der Computertechnik, der Energietechnik und im Haushalt, wo es als Wärmeaustauscher in Heizungen, Durchlauferhitzern und Kühlschränken eingesetzt wird. Darüber hinaus wird Kupfer auch in Messinglegierungen für Türgriffe, in Legierungen für Schmuck und sogar in Raumfahrzeugen verwendet.

Im Altertum wurde Kupfer auf der Insel Zypern als Gebrauchsmetall genutzt, weil es dort gediegen, also als reines Metall an der Erdoberfläche, vorkam. Die Römer nannten Kupfer deshalb „aes cyprium“ („Erz aus Zypern“), woraus sich später der lateinische Name „cuprum“ entwickelte. Bis heute ist dieser Name im chemischen Symbol für Kupfer „Cu“ verewigt.

Kupfer hat Eigenschaften, die das Metall sehr wertvoll für uns Menschen macht. So leitet Reinkupfer (99,9 % Cu) sehr gut den elektrischen Strom und ist sehr gut wärmeleitfähig. Es bildet an der Luft eine dünne Oxidschicht, welche das Metall vor Korrosion schützt (reagiert nicht oder wenig mit Substanzen seiner Umgebung wie Sauerstoff oder Wasser) und es ist gut verformbar. Seine metallisch-warme Farbe empfinden viele Menschen als sehr schön. Kupfer wirkt, wie einige andere Metalle, bakterizid (Bakterien abtötend). Es kann leicht mit anderen Metallen gemischt werden. Diese Legierungen wie Messing oder Bronze zeichnen sich durch besondere Eigenschaften, beispielsweise in ihrer Farbe oder Verformbarkeit aus.

Kupfer wird heute aus natürlich vorkommenden Kupfererzen wie Kupferstein (Cu_2S) und Kupferkies (CuFeS_2) gewonnen. Diese Erze befinden sich oft bis zu 1.100 m tief unter der Erdoberfläche und werden im Bergbau zutage gefördert, zerkleinert und verkauft. Im Jahr 2023 wurden über 1,23 Millionen Tonnen Kupfererz nach Deutschland importiert. Von diesen Kupfererz-Importen stammten 26,2 % aus Brasilien und knapp 20 % aus Chile. Innerhalb der EU waren Spanien und Portugal die wichtigsten Kupfererz-Lieferanten für Deutschland.

Die importierten Kupfererze werden zu Rohkupfer (Kupfergehalt von 97 %) verarbeitet. In der Metallurgie nennt man diesen Vorgang „Verhüttung“. Dazu wird das zerkleinerte Kupfererz zunächst unter Zusatz von Koks und einigen Hilfssubstanzen in einem sogenannten „Schwefelbesmelzofen“ geröstet, d. h. das Gemisch wird unter Zugabe von Luftsauerstoff stark erhitzt. Dabei reagiert der Kupferkies (CuFeS_2) zu Kupferstein (Cu_2S), Eisen(II)-oxid (FeO) und Schwefeldioxid (SO_2). Eisen(II)-oxid schwimmt auf dem flüssigen Kupferstein und kann leicht abgegossen werden. Der Kupferstein wird glutflüssig in einen sogenannten Konverter gegossen und in diese Schmelze wird nochmals Luft eingeblasen. Der Kupferstein setzt sich mit dem Sauerstoff zu Rohkupfer und Schwefeldioxid um. Das Rohkupfer (Kupferanteil 97 %) wird jetzt in Platten gegossen und elektrolytisch gereinigt. Das erhaltene Reinkupfer wird dann zu den gewünschten Gegenständen verarbeitet.

Im Jahr 2006 lag der globale Kupferbedarf bei 17 Millionen Tonnen. 2023 wurden rund 27 Millionen Tonnen des Rohstoffs verbraucht und Prognosen gehen davon aus, dass sich der weltweite Bedarf an Kupfer in den kommenden Jahrzehnten weiter erhöhen wird.

Material 2**Expertengruppe 1: Kupfer – aus Alt mach Neu**

In Deutschland fallen jährlich große Mengen an Altschrott an, darunter ausrangierte Autos, Computer, Kabel und Messingbeschläge. Recyclinghöfe und Autoverschrottungsfirmen sammeln diese Altgeräte und -fahrzeuge. Zusätzlich importiert Deutschland kupferhaltigen Schrott aus anderen Ländern. Im Jahr 2022 wurden in Deutschland 609.000 Tonnen Reinkupfer produziert. Davon stammten 245.000 Tonnen aus Recyclingrohstoffen.

Der Recyclingprozess beginnt mit der Identifizierung und Trennung kupferhaltiger Bauteile. Gegebenenfalls werden diese vorbehandelt, um Verunreinigungen wie Plastik oder andere Metalloxide zu entfernen. Anschließend werden die Kupferteile zerkleinert. Kupferschrott mit einem Kupferanteil von 2 % bis 96 % wird direkt im Schmelzofen zu Rohkupfer verarbeitet und zu Platten gegossen. Diese durchlaufen anschließend eine elektrolytische Reinigung zur Gewinnung von Reinkupfer.

Neben Altschrott ist auch „Neuschrott“ eine wichtige Kupferquelle. Dieser entsteht bei der Herstellung von Kupferprodukten, etwa durch Produktionsfehler oder Überproduktion. Mit einem Kupfergehalt von 99,9 % wird Neuschrott unmittelbar wieder eingeschmolzen und wiederverwendet.

Recyceltes Kupfer weist die gleichen Eigenschaften auf wie Kupfer, das aus Erz gewonnen wurde, es spart jedoch viele Ressourcen. So benötigt die Produktion von Kupfer aus Kupferschrott nur 20 % der Energie, die für die Gewinnung aus Erzen erforderlich wäre. Auch die Emission von klimaschädlichen Gasen und der Wasserverbrauch sind bei der Kupferproduktion aus Altkupfer deutlich geringer.

Material 3**Expertengruppe 2: Kupfer aus Chile**

Chile verfügt mit 27,9 % über die derzeit größten Kupferreserven der Welt. Etwa 1.650 km nördlich der Hauptstadt Santiago de Chile liegt der weltgrößte Kupfertagebau Chuquibambilla, der von der Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO), einem staatlichen Bergbaukonzern, betrieben wird. Das Bergwerk wurde nach der inzwischen verlassenen Stadt Chuquibambilla benannt.

Es hat eine Ausdehnung von rund 4 km Länge, 3 km Breite und eine Tiefe von 1.100 m. Die hier gewonnenen Erze werden entweder direkt vor Ort zu Rohkupfer verhüttet oder in andere Länder der Welt exportiert.

Die Kupfererz-Aufbereitung geht mit einem hohen Schwefeldioxydausstoß einher. Dieses farblose Gas gefährdet sowohl die Gesundheit der lokalen Bevölkerung, als auch die Umwelt. Obwohl seit 1989 Rauchgasentschwefelungsanlagen installiert wurden, werden jährlich immer noch 100.000 Tonnen schädliches Schwefeldioxyd freigesetzt.

Zudem verbrauchen Abbau und Verarbeitung von Kupfer große Mengen Wasser. Das in der Wüste Atacama liegende Bergwerk benötigte allein im Jahr 2011 56.118.000 m³ Oberflächenwasser und 9.000 m³ Wasser aus der öffentlichen Wasserversorgung, um den Betrieb aufrecht zu erhalten. Dabei gehört die Atacama Wüste zu den trockensten Gebieten der Erde. Durch den Bergbau und den Klimawandel hat sich in Chile in den letzten Jahren ein Wassermangel entwickelt, der sich in Zukunft voraussichtlich weiter verschärfen wird. Die Auswirkungen des Wassermangels auf angrenzende Ökosysteme sind schon jetzt erheblich. So hat die Biodiversität in den Feuchtgebieten am Fluss Loa merklich abgenommen. Einige Feuchtgebiete in dieser Region sind bereits vollständig verschwunden. Eine Vielzahl von Arten, die nur in diesem Gebiet leben, ist unwiederbringlich ausgestorben.

Material 4

Expertengruppe 3: Leben mit dem Kupferbergbau

1971 wurden unter der Regierung von Salvador Allende die größten Kupferbergwerke Chiles verstaatlicht. Dies ermöglichte die Schaffung von Arbeitsplätzen und sicherte die wirtschaftliche Bedeutung des Kupferbergbaus für das Land. Die Menschen fanden Beschäftigung und konnten ihre Familien besser versorgen. Allerdings litten sowohl die Bergarbeiter als auch die lokale Bevölkerung bald unter gesundheitlichen Problemen wie Staublunge, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Atembeschwerden, die durch die im Bergbau entstehenden arsen- und schwermetallhaltigen Stäube verursacht wurden. Die gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen des Bergbaus waren so gravierend, dass sie 2002 zur Umsiedlung der Bevölkerung der Stadt Chuquicamata führten. Aufgrund der schlechten Arbeitsbedingungen, mangelhaften Arbeitsschutzmaßnahmen und niedrigen Löhne kommt es bis heute immer wieder zu Protesten der chilenischen Bergbauarbeiterinnen und Bergbauarbeiter.

Gleichzeitig treten immer wieder Konflikte um die Ressource Wasser auf. Der Loa-Fluss entspringt in den Anden und mündet im Pazifik. Er wird mehrmals gestaut und sein Wasser für industrielle Zwecke, wie den Bergbau, genutzt. Die anfallenden Abwassermengen werden fast ungereinigt wieder in den Loa-Fluss eingeleitet. Der staatliche Bergbaukonzern Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) erwarb im Rahmen der Wasserprivatisierung die Nutzungsrechte an den Wasserressourcen im Loa-Becken, ohne die indigene Bevölkerungsgruppe der Chiu-Chiu zu berücksichtigen, die sich traditionell durch Landwirtschaft ernährt und auf die betroffenen Wasserquellen angewiesen ist. Wassermangel führt immer wieder zu geringen Ernteerträgen. Auch die Bewässerung der Felder mit schwermetallhaltigem Wasser bedroht die Ernährung der indigenen Bevölkerung und gleichzeitig verschmutzt diese die Böden, und der Ernteertrag sinkt weiter. Bis heute ist dieser Konflikt nicht ausreichend geklärt.

Auch auf die angrenzenden Ökosysteme hat der Bergbau erhebliche Auswirkungen. Nicht weit entfernt vom Loa-Fluss befinden sich mehrere Naturschutzgebiete, wie der Nebelwald von Fray Jorge, Salar de Atacama, der Nationalpark Llanos de Challe und das Reserva nacional Pampa del Tamarugal, die durch den Wassermangel und die Wasserverschmutzung des Flusses indirekt bedroht sind. In diesen Naturschutzgebieten leben seltene Arten, wie die Chileflamingos und der Tamarugo-Baum, deren Bestand durch die Umweltveränderungen zunehmend gefährdet wird.

Material 5

Expertengruppe 4: Biomining – die andere Art der Kupfergewinnung

Beim Kupferabbau fallen große Mengen an Abraum (Erze mit einem geringen Kupferanteil) an, die mit den üblichen Verfahren der Kupfergewinnung ökonomisch nicht sinnvoll weiter verarbeitet werden können.

Seit Anfang der 1970er Jahre hat sich jedoch die Methode des Biomining etabliert, bei der dieser Abraum durch bestimmte Bakterien weiter nutzbar gemacht werden kann. Beim Biomining werden bestimmte Mikroorganismen eingesetzt, um aus Erzmineralien mit wenig Kupferanteil Kupfer zu gewinnen. Das Erz des Metalls Kupfer kommt im Abraum als wasserunlösliche Verbindung vor. Durch die Bakterien werden die Kupfer-Ionen in wasserlösliche Verbindungen überführt.

Bei der sogenannten Haufen- oder Haldenbiolaugung wird der Abraum zerkleinert, um eine große Oberfläche zu schaffen. Danach wird der Abraum mit angesäuertem Wasser besprüht und die Bakterien wandeln die wasserunlöslichen Kupferverbindungen aus dem Abraum mithilfe des sauren Sprühwassers in die wasserlösliche Verbindung Kupfer(II)-sulfat um. Dabei gewinnen die Bakterien durch weitere, ebenfalls ablaufende biologische Prozesse ihre Energie zum Leben. Das lösliche Kupfer(II)-sulfat reichert sich im Wasser an und kann jetzt am Fuß der Halde aufgefangen und durch mehrfache Filtration von dem wasserunlöslichen Rest des Abraums getrennt werden. In die gereinigte Kupfer(II)-sulfat-Lösung wird danach ein festes, unedleres Metall (z. B. Eisen in Form von Schrott) gegeben. Durch eine Redoxreaktion fällt das reine Kupfer aus und Eisen-Ionen entstehen (Zementation). Das Kupfer kann jetzt wieder aus der Lösung filtriert werden. Um die hohe Reinheit des Kupfers zu erhalten, muss das gewonnene Kupfer elektrolytisch gereinigt werden. Die von Kupfer gereinigte Sulfat-Lösung kann wieder auf die Halde gesprüht werden, bis nur noch geringste Spuren der Kupfer-Ionen vorhanden sind.

Wird dieses Verfahren korrekt betrieben, dann ist es nicht nur kostengünstig, sondern es werden auch keine Schadstoffe wie Schwermetall-Ionen oder Schwefeldioxid frei. Im Verfahren selbst wird auch kein Kohlenstoffdioxid freigesetzt. Jedoch benötigt man für jeden Verfahrensschritt Maschinen, welche Kohlenstoffdioxid aus der Verbrennung von Antriebsstoffen erzeugen. Da für das Besprühen Wasser verwendet wird, muss genügend Wasser für den Prozess zur Verfügung stehen, auch wenn das Biomining im Kreislaufprinzip erfolgt. Es wird geschätzt, dass ca. 10 bis 20 % des aus Bergwerken gewonnen Kupfers durch Biomining erzeugt wird.

3 Weiterführendes Material

- ◆ Der Norrdeutsche Rundfunk hat eine 45-minütige Dokumentation zu den sozialen, ökologischen und gesundheitlichen Auswirkungen der Kupferherstellung produziert. Darin wird auch ein Renaturierungsprogramm sowie die Möglichkeit zur umweltfreundlichen Kupfergewinnung in Kanada vorgestellt.

Carlberg, T. (2022, 14. November). *Schmutziges Kupfer: Die dunkle Seite der Energiewende* [Video]. NDR. https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/45_min/Schmutziges-Kupfer-Die-dunkle-Seite-der-Energiewende,sendung1284160.html

- ◆ Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe hat eine Handreichung zur Kupferproduktion und den damit verbundenen Nachhaltigkeitsaspekten erstellt. Das Dokument enthält Informationen zur Bedeutung von Kupfer in der modernen Wirtschaft sowie zu den geologischen Aspekten von Kupferlagerstätten und den Prozessen des Kupferbergbaus und der Aufbereitung. Zudem werden verschiedene Nachhaltigkeitsaspekte wie Wasserverbrauch, Flächenbedarf, Energieverbrauch und Emissionen in der Kupferindustrie behandelt und über Recyclingmöglichkeiten sowie Initiativen zur Förderung einer verantwortungsvollen Kupferproduktion informiert.

Gilsbach, L. (2020, Juli). *Kupfer: Informationen zur Nachhaltigkeit*. BGR. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kupfer.pdf?__blob=publicationFile&v=2

4 Hinweise zur Durchführung

Zielsetzung

Das Thema „Kupfergewinnung“ bietet Lernenden die Möglichkeit, chemische Prozesse und Verfahren anhand eines Metalls zu untersuchen, das in ihrer Lebenswelt allgegenwärtig ist. Auf diese Weise können die Schülerinnen und Schüler die Stoffeigenschaften von Kupfer und dessen vielfältige Verwendungsmöglichkeiten an konkreten Beispielen des Alltags kennenlernen. Durch die Recherche und Analyse des Kupferpreises kann zudem die Erkenntnisgewinnungskompetenz gefördert werden. Gleichzeitig stärkt das Zusammentragen, Austauschen und Diskutieren von Methoden zur Gewinnung von Reinkupfer und deren Folgen die Kommunikationsfähigkeit der Lernenden. Die kritische Auseinandersetzung mit den ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten der Kupfergewinnung erweitert nicht nur die Bewertungskompetenz der Schülerinnen und Schüler, sondern sensibilisiert sie auch für zukunftsrelevante Themen wie nachhaltige Ressourcennutzung und innovative Recyclingtechnologien. Diese Verknüpfung von Theorie und Praxis, verbunden mit dem Blick auf zukünftige Herausforderungen, macht „Kupfergewinnung“ zu einem idealen Thema für einen modernen, kompetenzorientierten Chemieunterricht, der die Lernenden bestmöglich auf die Anforderungen einer sich stetig wandelnden Welt vorbereitet und ihnen die Möglichkeit bietet, die Bedeutung chemischer Prozesse für Industrie und Alltag zu verstehen.

Didaktische Hinweise

Als Einstieg in das Thema erhalten die Lernenden eine Hausaufgabe: Sie sollen eigenständig eine Liste von Gegenständen aus ihrem Lebensumfeld erstellen, die Kupfer enthalten und nicht mehr benötigt werden (**Teilaufgabe 1**). Bei Unsicherheiten können sie zusätzlich Fotos der entdeckten Objekte mitbringen, die dann im Unterricht gemeinsam besprochen werden. Diese Teilaufgabe stellt gezielt den Bezug zur Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler her. Die Ergebnisse der Hausaufgabe werden im Klassenverband präsentiert.

Beim Zusammentragen der verschiedenen Gegenstände und Altgeräte wird die Vielfalt der Verwendungsmöglichkeiten von Kupfer deutlich. Dies bietet eine ideale Überleitung zur **Teilaufgabe 2**, in der sich die Lernenden in Einzelarbeit mit den Stoffeigenschaften von Kupfer und den daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten auseinandersetzen. Auf diese Weise entwickeln die Schülerinnen und Schüler nicht nur ein Bewusstsein für die Allgegenwart von Kupfer in Haushalt, Technik und Industrie, sondern nähern sich auch schrittweise der wissenschaftlichen Betrachtung seiner Eigenschaften.

Anschließend erstellen die Lernenden ein Fließschema zu den einzelnen Arbeitsschritten der Kupferverhüttung und klären die zentralen Begriffe „Kupfererz“, „Rohkupfer“ und „Reinkupfer“. Die Schülerinnen und Schüler erhalten so einen groben Überblick, bevor in den folgenden Teilaufgaben eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Thema „Kupfer und Kupfergewinnung“ erfolgt.

Teilaufgabe 3 bildet den Übergang zum Gruppenpuzzle, dem methodischen Kern der Lernaufgabe. Im Zuge dieser Teilaufgabe finden sich die Lernenden in Stammgruppen zusammen, in denen sie gemeinsam zur Entwicklung des Kupferpreises in den vergangenen zehn Jahren recherchieren und Faktoren identifizieren, die einen Einfluss auf seine Entwicklung haben. Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass der Kupferpreis durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren bestimmt wird (u. a. geopolitische Ereignisse,

Währungswechselkurse, ökologische und soziale Entwicklungen). Auf diese Weise verknüpft auch diese Teilaufgabe chemische Inhalte mit realen, lebensweltbezogenen Phänomenen. Es wird zudem deutlich, dass die chemische Forschung und Industrie einen wichtigen Wirtschaftsfaktor darstellen.

In **Teilaufgabe 4** folgt schließlich die Erarbeitungsphase in den Expertengruppen. Dafür werden aus jeder Stammgruppe je zwei Schülerinnen bzw. Schüler in eine der vier Expertengruppen entsendet, in der sie mit Hilfe eines Textes (M 2–5) jeweils eine Methode zur Gewinnung von Reinkupfer (Bergbau, Recycling oder Biomining) kennenlernen und die damit verbundenen ökonomischen, ökologischen und sozialen Folgen beurteilen.

Im Zuge der **Teilaufgabe 5** kehren die Lernenden dann in ihre Stammgruppen zurück und präsentieren sich gegenseitig die Erkenntnisse aus ihren jeweiligen Expertengruppen. Auf diese Weise setzen sie die verschiedenen Möglichkeiten zur Gewinnung von Reinkupfer (Bergbau, Recycling und Biomining) wie ein Puzzle zu einem Gesamtbild zusammen. Sie vergleichen und diskutieren dabei die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und sozialer Auswirkungen und halten ihre Ergebnisse in einem gemeinsamen digitalen Poster fest. Dadurch werden die Ergebnisse zusammengefasst und strukturiert. Zur Erstellung des Posters können kostenlose und datenschutzfreundliche Anwendungen wie [CryptPad](#) oder [Excalidraw](#) genutzt werden. Die Beiträge der Stammgruppen sollten anschließend im Klassenverband vorgestellt werden. Im Zuge dessen können auch die digitalen Poster präsentiert werden.

Abschließend kann eine kurze Plenumsdiskussion erfolgen, bei der die Lernenden auf Grundlage des erarbeiteten Wissens begründet darlegen, was sie mit den von ihnen im Rahmen der Hausaufgabe gefundenen Gegenstände machen würden (**Teilaufgabe 6**).

Differenzierungsmöglichkeiten

Als Alternative zur Nutzung der Materialtexte können die Lernenden selbstständig Informationen zum Thema in Lehrbüchern oder dem Internet sammeln. Die Recherche sollte folgende Aspekte umfassen: Kupferabbau, Kupferrecycling, Biomining, Umweltauswirkungen, soziale Aspekte (z. B. Arbeitsbedingungen im Kupferbergbau) sowie gesundheitliche Folgen des Kupferabbaus. Die einzelnen Themen können zwischen den Expertengruppen aufgeteilt werden, sodass das Grundkonzept des Gruppenpuzzles erhalten bleibt. Sollen die Schülerinnen und Schüler eine eigenständige Recherche durchführen, muss jedoch mehr Zeit für Teilaufgabe 4 eingeplant werden, da die Lernenden zunächst selbst geeignete Quellen finden müssen, wodurch sich die Schwierigkeit und der Zeitbedarf für die Aufgabe erhöhen.

Über die Teilaufgaben hinaus können zudem weiterführende Themen mit den Lernenden behandelt werden. In diesem Zusammenhang könnten beispielsweise die Auswirkung aktueller politischer Entscheidungen, wie die Vereinheitlichung von Ladegeräten für Smartphones oder das Anrecht von Nutzerinnen und Nutzern auf Reparatur durch den Hersteller auf die Verfügbarkeit von Reinkupfer diskutiert werden. Ebenso kann in leistungsstarken Klassen die Herstellung von Kupfer aus Kupfererz durch die Reduktion mit Wasserstoff behandelt werden.

5 Lösungshinweise und Bezug zu den Standards

Es werden folgende Abkürzungen verwendet:

- ◆ S – Standards der Sachkompetenz,
- ◆ E – Standards der Erkenntnisgewinnungskompetenz,
- ◆ K – Standards der Kommunikationskompetenz,
- ◆ B – Standards der Bewertungskompetenz.

1.	Sucht bei euch Zuhause nach Gegenständen, die nicht mehr verwendet werden und die Kupfer enthalten. Erstellt eine Liste. In Zweifelsfällen macht ein Foto und fragt eure Lehrkraft.	S 1.3	E	K	B
----	---	----------	---	---	---

Die Lösungen der Lernenden können für diese Teilaufgabe sehr vielfältig sein. So könnten beispielsweise folgende Gegenstände genannt werden:

- Defekte Küchengeräte (z. B. Wasserkocher, Toaster oder Mikrowelle)
- Veraltete Computerteile (z. B. Motherboards, Prozessoren)
- Ausrangierte Mobiltelefone und Netzteile
- Elektrokabel und -leitungen (z. B. altes LAN-Kabel)
- Töpfe, Pfannen oder Rührschüsseln aus Kupfer
- Dekorative Objekte (z. B. Vasen oder Figuren aus Bronze oder Messing)

2.	Sammelt mithilfe des Textes „Kupfer – ein wichtiges Gebrauchsmetall“ (M 1) in Einzelarbeit Informationen über die Herstellung und die Eigenschaften von Kupfer. • Nennt Verwendungsmöglichkeiten des Metalls Kupfer unter Begründung der bei der Verwendung genutzten Eigenschaften. • Erstellt ein Fließschema über die Arbeitsschritte vom Kupfererz bis zum Reinkupfer. Gebt eine mögliche Reaktionsgleichung für die Herstellung von Rohkupfer aus Kupferkies an. Erläutert die Begriffe Kupfererz, Rohkupfer und Reinkupfer.	S	E 1.5	K 1.3 2.1 2.2 3.2	B
----	---	---	----------	-------------------------------	---

Verwendungsmöglichkeiten von Kupfer

Verwendung	Eigenschaft von Kupfer (Begründung)
Teile von Computern, in Energietechnik, in Fahrzeugen als Kupferkabel und elektrischen Leitungen	Sehr gute elektrische Leitfähigkeit

Wärmeaustauscher in Heizungen, Durchlauferhitzern oder Kühlschränken	Sehr gute Wärmeleitfähigkeit
Autos, Nutzfahrzeuge, Züge, Flugzeuge - Karosserie - Verkabelung und Elektrik - Sitzheizung, Ölkühler	Bildung von Oxidschicht (Korrosionsschutz) Sehr gute elektrische Leitfähigkeit Sehr gute Wärmeleitfähigkeit
Schmuck	Leichte Verformbarkeit, warme Farbe
Messingtürgriffe	Gute Legierungsfähigkeit, bakterizide Eigenschaften

Fließschema zur Verhüttung von Kupfer

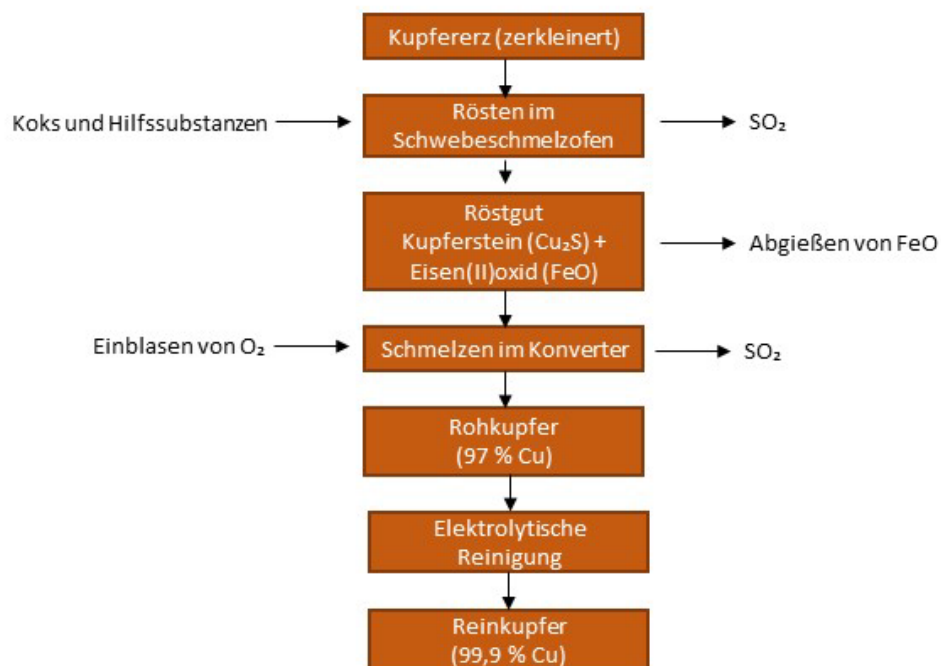
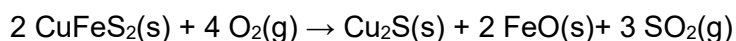


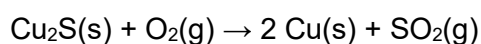
Abbildung 1: Fließschema Kupferverhüttung. (IQB e. V.)

Reaktionsgleichungen

Mögliche Reaktionsgleichung von Kupferkies mit Sauerstoff



Reaktionsgleichung vom Kupfer(II)-sulfid zum Rohkupfer



Zu klärende Begriffe

Kupfererz: Gestein, welches Kupferverbindungen enthält

Rohkupfer: Kupfer mit einem Reinheitsgrad bis zu 97 %

Reinkupfer: Kupfer mit einem Reinheitsgrad von 99,9 %

3.	Findet euch in Stammgruppen zusammen. Recherchiert die Entwicklung des Kupferpreises in den letzten 10 Jahren und diskutiert mögliche Gründe für dessen Veränderung über die Zeit.	S	E 1.5	K 1.1	B 1.1 1.2 2.1
----	--	---	----------	----------	------------------------

Im Zuge dieser Teilaufgabe stellen die Lernenden fest, dass der Kupferpreis in den letzten zehn Jahren zwar Schwankungen unterlag, Prognosen aber davon ausgehen, dass er in den kommenden Jahren stark ansteigen wird. Als Begründung für diese Preisentwicklung könnten u. a. folgende Punkte genannt werden:

- Die Energiewende führt zu einer steigenden Nachfrage nach Kupfer, da Kupfer ein essentieller Bestandteil von Elektrofahrzeugen, Solarpanelen und Windturbinen ist.
- Streiks und Verhandlungen über bessere Arbeitsbedingungen und höhere Löhne in den Bergbauregionen können die Produktion verlangsamen oder stoppen, was zu Angebotsengpässen und in der Folge zu höheren Preisen führt.
- Aufgrund von Umweltbedenken werden einige Kupferminen geschlossen, beispielsweise das Bergwerk Cobre Panama in Lateinamerika. Dadurch wird das Angebot verringert, was zu einer Verknappung am Markt führt.
- Eine Schwächung des US-Dollars könnte zu steigenden Rohstoffpreisen führen, wovon auch der Kupferpreis betroffen wäre.

Insgesamt sollte herausgestellt werden, dass der Kupferpreis durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren bestimmt wird (u. a. geopolitische Ereignisse, Währungswechselkurse, ökologische und soziale Entwicklungen), die einen Einfluss auf Angebot und Nachfrage von Kupfer haben und damit den Preis beeinflussen.

4.	Entsendet je zwei Mitglieder eurer Stammgruppe in die Expertengruppen. Erarbeitet euch mit Hilfe des Textes für eure Expertengruppe (M 2–5), welche Möglichkeiten Deutschland theoretisch hätte, um seinen Bedarf an Reinkupfer für die Industrie zu decken. Bearbeitet dazu in den Expertengruppen die folgenden Aufgaben: • Fasst die wichtigsten Schritte der dargestellten Möglichkeit der Kupfergewinnung zusammen. Nutzt dazu – wo möglich – die chemische Formelschreibweise. • Beurteilt die dargestellte Möglichkeit der Kupfergewinnung unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Gesichtspunkten. • Dokumentiert eure Ergebnisse. Nutzt eure Ergebnisse, um in eurer Stammgruppe zu argumentieren.	S	E 1.5	K 1.3 2.2 3.1 3.2 3.3	B
----	--	---	----------	--------------------------------------	---

Expertengruppe 1

Zusammenfassung:

Im Text „Kupfer – aus Alt mach Neu“ wird Recycling als eine Möglichkeit der Kupfergewinnung dargestellt. Einerseits fallen große Mengen an Kupferschrott in Deutschland an, z. B. in Form von ausrangierten Fahrzeugen, Computern, Kabeln oder Messingbeschlägen, andererseits wird Kupferschrott aus dem Ausland nach Deutschland importiert. Beim Recycling von Altkupfer müssen zunächst kupferhaltige Bauteile erkannt und ausgebaut sowie eventuelle Verunreinigungen und Plastikreste entfernt werden. Anschließend wird der Kupferschrott zerkleinert und zu Rohkupferplatten geschmolzen, die anschließend elektrolytisch gereinigt und so zu Reinkupfer verarbeitet werden. Neben dieser Variante des Recyclings von Altkupfer gibt es noch die Wiederverwertung von sogenanntem „Neuschrott“. Dieser entsteht etwa bei Produktionsfehlern im Herstellungsprozess. Neuschrott kann einfach wieder zu Reinkupfer eingeschmolzen werden. Im Jahr 2022 konnten auf diese Weise 245.000 Tonnen Reinkupfer aus Recyclingmaterialien gewonnen werden.

Bewertung:

Kupferrecycling ist eine umweltfreundliche Möglichkeit zur Kupfergewinnung, da weniger Energie und Wasser aufgewendet werden müssen, als bei der Kupfergewinnung aus Erzen. Zudem ist der Ausstoß von klimaschädlichem CO₂ geringer. Da recycletes Kupfer dieselben Eigenschaften aufweist wie aus Erzen gewonnenes Kupfer, stellt das Kupferrecycling aus ökonomischer Sicht eine effiziente Nutzung der vorhandenen Ressourcen dar und reduziert die Abhängigkeit von Primärrohstoffen. Die Recyclingindustrie schafft zudem Arbeitsplätze in verschiedenen Bereichen, von der Sammlung über die Aufbereitung bis zur Verarbeitung des recycelten Kupfers.

Expertengruppe 2

Zusammenfassung:

Im Text „Kupfer aus Chile“ geht es um die Gewinnung von Kupfer durch Bergbau. Am Beispiel des Chuquicamata Bergwerks in Chile wird dargelegt, dass Kupfererz zunächst in Minen abgebaut und dann entweder direkt vor Ort zu Rohkupfer verarbeitet oder in andere Länder exportiert wird.

Bewertung:

Der Abbau von Kupfererzen ist ein wichtiger Wirtschaftszweig in Chile, denn einerseits schafft er viele Arbeitsplätze in den Bergbauregionen, andererseits ist der Export von Kupfer eine wichtige Einnahmequelle. Der Bergbau hat jedoch starke Auswirkungen auf Menschen und Umwelt. So geht die Aufbereitung des Gesteins mit einem hohen Ausstoß von Schwefeldioxid einher. Dieses Gas ist schädlich für die menschliche Gesundheit sowie für die Umwelt. Ein weiteres Problem ist der hohe Wasserverbrauch beim Abbau und bei der Verarbeitung von Kupfer. Der hohe Wasserverbrauch führt in Chile zu einem Wassermangel, der einerseits Auswirkungen auf die Biodiversität in angrenzenden Ökosystemen, andererseits auch auf das Leben der lokalen Bevölkerung hat.

Expertengruppe 3

Zusammenfassung:

Der Text „Leben mit dem Kupferbergbau“ führt den Kupferbergbau in Chile als eine Möglichkeit zur Kupfergewinnung an, ohne jedoch konkret auf die einzelnen Verfahrensschritte einzugehen. Dafür werden zahlreiche ökonomische, ökologische und soziale Aspekte genannt, die mit dem Bergbau einhergehen.

Bewertung:

Aus wirtschaftlicher Sicht wurden mit den Kupferbergwerken in Chile zahlreiche Arbeitsplätze geschaffen, sodass die Bergarbeiter ihre Familien versorgen konnten. Zudem wurde der Kupferabbau zu einem wichtigen Wirtschaftszweig des Landes. Die Arbeiterinnen und Arbeiter in den Bergwerken leiden jedoch bis heute unter schlechten Arbeitsbedingungen, mangelhaften Arbeitsschutzmaßnahmen und niedrigen Löhnen, was immer wieder zu Protesten führt. Außerdem geht der Kupferabbau mit starken gesundheitlichen Problemen bei den Bergarbeiterinnen und Bergarbeitern und der lokalen Bevölkerung einher, da beim Bergbau schwermetallhaltiger Staub entsteht. In Chuquicamata waren die Auswirkungen so schlimm, dass 2002 die Bevölkerung der gesamten Stadt umgesiedelt werden musste, sodass viele Menschen ihre Heimat verloren.

Der Bergbau verursacht darüber hinaus gravierende Umweltprobleme: So verschmutzt die Kupferindustrie Böden und Gewässer. Der hohe Wasserverbrauch sowie die Privatisierung des Wassers führen zudem dazu, dass viele Naturschutzgebiete mit seltenen Tier- und Pflanzenarten sowie die indigene Bevölkerungsgruppe der Chiu-Chiu bedroht sind, welche das Wasser für die Bewässerung ihrer Felder benötigen.

Expertengruppe 4Zusammenfassung:

Der Text „Biomining – die andere Art der Kupfergewinnung“ stellt das Biomining vor, einen Vorgang, bei dem aus Erzen mit geringem Kupferanteil mithilfe von Bakterien Kupfer gewonnen wird. Bei der sog. Haufen- oder Haldenbiolaugung werden diese Erze (Abraum) zunächst zerkleinert und anschließend mit angesäuertem Wasser und Laugungsbakterien besprüht. Gelöstes Kupfer(II)sulfat entsteht. Es wird aufgefangen und durch Filtration gereinigt. Danach wird ein festes, unedles Metall (z. B. Eisenschrott) hinzugegeben. Durch eine Redoxreaktion fällt das reine Kupfer aus und kann abfiltriert werden: $\text{CuSO}_4(\text{aq}) + \text{Fe}(\text{s}) \rightarrow \text{Cu}(\text{s}) + \text{FeSO}_4(\text{aq})$. Durch eine elektrolytische Reinigung entsteht schließlich Reinkupfer.

Bewertung:

Vorteile der Methode sind zum einen der geringe Ressourcenverbrauch, da selbst aus Erzen mit einem geringen Kupferanteil Kupfer gewonnen werden kann, zum anderen werden keine Schadstoffe freigesetzt. Allerdings muss für das Biomining genügend Wasser zu Verfügung stehen und es werden Maschinen benötigt, die CO_2 freisetzen. Ökonomische Vorteile des Biomining liegen in der Schaffung von Arbeitsplätzen und in den geringen Kosten des Verfahrens.

5.	Wenn ihr aus den Expertengruppen in den Stammgruppen zurück seid, ...	S	E	K	B
				2.2	1.1
	• stellt euren Mitschülerinnen und Mitschülern die erarbeiteten Möglichkeiten der Beschaffung von Reinkupfer in Deutschland vor,			3.1	1.2
				3.2	1.3
				3.3	2.1
	• bewertet vergleichend die verschiedenen Möglichkeiten der Beschaffung von Reinkupfer aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Sicht gemeinsam und			3.4	2.4
				3.5	

	dokumentiert die Ergebnisse eurer Gruppe mithilfe eines digitalen Posters.				
--	--	--	--	--	--

Die Lernenden tauschen ihre Arbeitsergebnisse aus und diskutieren die verschiedenen Möglichkeiten der Kupfergewinnung (Bergbau, Recycling, Biomining) sowie die mit ihnen verbundenen ökonomischen, ökologischen und sozialen Folgen. Das digitale Poster könnte beispielsweise so aussehen:

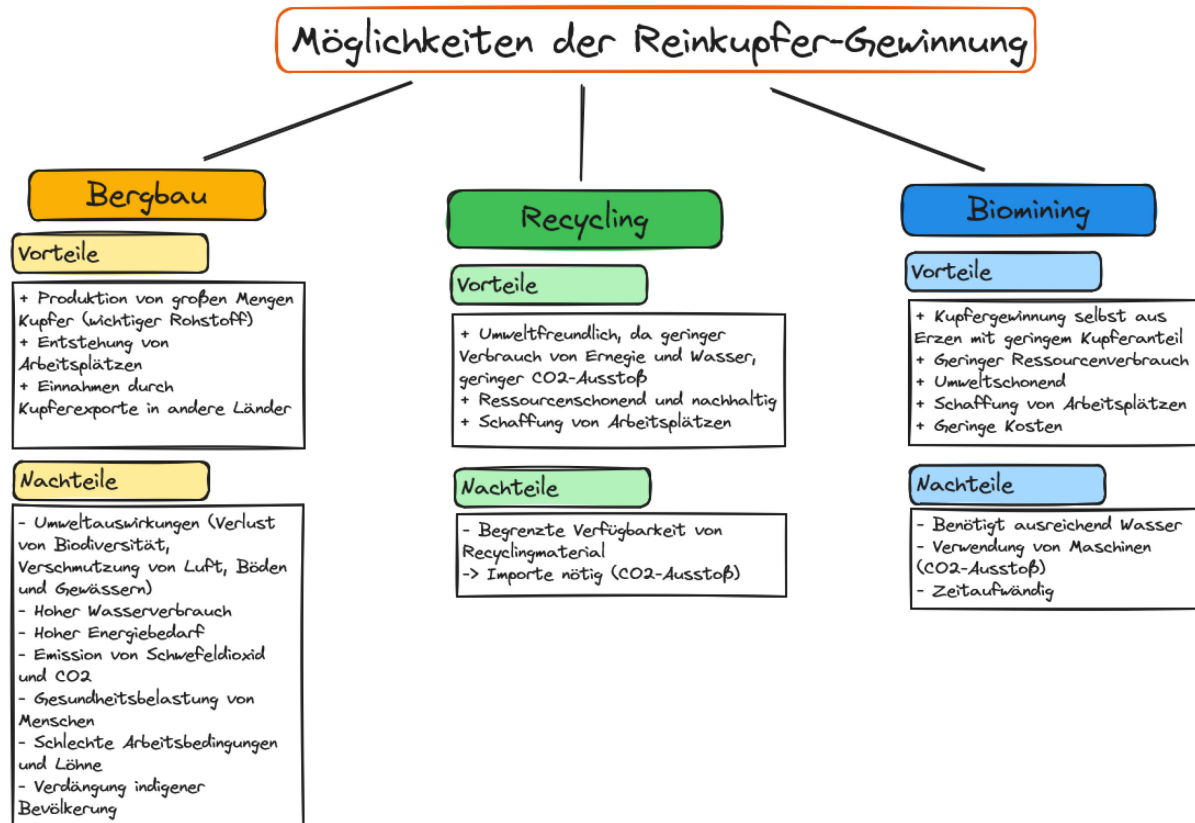


Abbildung 2.: Digitales Lernposter. (IQB e. V.)

6.	Entscheidet auf der Grundlage eurer bisherigen Ergebnisse begründet, was ihr persönlich mit den im Haus gefundenen Gegenständen anfangen würdet.	S	E	K	B
					1.1
					1.2
					1.3
					2.1
					2.4
					3.2

Die Lernenden entscheiden begründet, wie sie mit den kupferhaltigen Gegenständen, die sie im Rahmen der Teilaufgabe 1 gefunden haben, umgehen möchten. Mögliche Vorschläge könnten sein:

- Recycling:** Kupfer ist ein wertvoller Rohstoff, der recycelt werden kann. Alte Kupfergegenstände können an Recyclingstellen abgegeben werden, wo sie in neue Produkte umgewandelt werden. Dies ist ökologisch vorteilhaft, da es die Notwendigkeit verringert, neues Kupfer zu gewinnen, und die Umweltbelastung reduziert.

- Verkauf: Alte kupferhaltige Gegenstände wie Rohre, Kabel oder Geräte können an Schrotthändler verkauft werden. Da Kupfer einen hohen Marktwert hat, kann dies eine wirtschaftlich vorteilhafte Möglichkeit sein, nicht mehr benötigte Gegenstände loszuwerden.
- Verschenken oder Upcyclen: Kupfer ist ein wertvolles und vielfältig einsetzbares Metall, dessen Produktion und Aufbereitung viele Ressourcen benötigt. Statt Gegenstände aus Kupfer in der Garage oder dem Keller einstauben zu lassen, kann man sie weiterverschenken. Alternativ kann man alte Kupferteile in DIY-Projekten kreativ nutzen, z. B. für Garten- und Balkondekorationen wie Windlichter oder Skulpturen. Auf diese Weise bekommen sie ein zweites Leben.

6 Quellenangaben

- ◆ Abbildung 1: Copyright Grafik: IQB e. V. (2024, 05. August). *Fließschema Kupferverhüttung*. Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de>
- ◆ Abbildung 2: Copyright Grafik: IQB e. V. (2024, 05. August). *Digitales Lernposter*. Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de> [erstellt mit ExcaliDraw: <https://draw.kits.blog/>]
- ◆ Material 1: In Anlehnung an:
 - ◆ BGR. (2021, 31. August). *Weltweiter Bedarf an Kupfer für ausgewählte Zukunftstechnologien in den Jahren 2018 und 2040 (in Tonnen)*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/586810/umfrage/kupfernachfrage-ausgewaehlter-zukunftstechnologien-weltweit/>
 - ◆ ICSG. (2024, 20. Februar). *Weltweite Kupfernachfrage in den Jahren von 2006 bis 2023 (in Millionen Tonnen)*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156043/umfrage/weltweite-kupfernachfrage-seit-2006/>
 - ◆ *Kupfer: Verhüttung von Kupfer*. (o. D.). Mineralienatlas – Fossilienatlas. <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Kupfer/Verh%C3%BCttung#Herstellung.24von.24Kupferlegierungen>
 - ◆ Kupferverband e. V. (o. D.). *Geschichte: Metall der Menschheit*. kupfer_. <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/kupfer/metall-der-menschheit/>
 - ◆ Kupferverband e. V. (o. D.). *Gewinnung*. kupfer_. <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/kupfer/produktionsprozesse/gewinnung/>
 - ◆ Statistisches Bundesamt. (2024, 22. Juli). *Anteile ausgewählter Länder an dem Import von Kupfererz in Deutschland im Jahr 2023*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1345016/umfrage/verteilung-der-deutschen-importmenge-von-kupfererz-nach-laendern/>
 - ◆ Statistisches Bundesamt. (2024, 22. Juli). *Jährliche Importmenge von Kupfererz in Deutschland in den Jahren 2006 bis 2023 (in 1.000 Tonnen)*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1344473/umfrage/importmenge-von-kupfererz-in-deutschland/>
 - ◆ Statistisches Bundesamt. (2023, 30. November). *Menge der Importe von Kupfererz in Deutschland nach ausgewählten Exportländern im Jahr 2022 (in 1.000 Tonnen)*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1344954/umfrage/kupferimportmenge-von-deutschland-nach-ausgewaehlten-laendern/>
 - ◆ Wirtschaftsvereinigung Metalle e.V. (o. D.). *NE-Metalle und ihre Eigenschaften: Ohne NE-Metalle kein modernes Leben*. <https://www.wvmetalle.de/ne-metalle#Kupfer>
- ◆ Material 2: In Anlehnung an:
 - ◆ Bastian, D., Bookhagen, B., Eicke, C., Elsner, H., Henning, S., Kern, M., Kuhn, K., Liesegang, M., Lutz, R., Mähltitz, P., Moldenhauer, K., Pein, M., Schauer, M., Schmidt, S., Schmitz, M., Szurles, M., & Wittenberg, A. (2023). *Deutschland – Rohstoffsituation 2022*. BGR. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2022.pdf;jsessionid=E4D0A853F6E47E2AD3818DA1EFF1AD75.inter-net001?_blob=publicationFile&v=6

- ◆ Deutsches Kupferinstitut. (o. D.). *Recycling von Kupferwerkstoffen*. <https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf>
- ◆ EuRIC. (o. D.). *Fakten Metallrecycling*. https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/06-Publikationen/04-Broschueren/0608-EuRIC_Metal_Recycling_Factsheet_GER_002.pdf
- ◆ Kupferverband e. V. (o. D.). *Ressourcenschonung dank Recycling*. kupfer_. <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/recycling/>
- ◆ Material 3: In Anlehnung an:
 - ◆ Rüttinger, L., Griestop, L., & Schüler, F. (2014). *Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Kupfergewinnung in Chuquicamata, Chile*. adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_fallstudie_kupfer_chile.pdf
- ◆ Material 4: In Anlehnung an:
 - ◆ BirdLife International. (2018, 9. August). *Phoenicopterus chilensis*. IUCN Red List Of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/species/22697365/132068236>
 - ◆ *Chiles Nationalparks: Unberührte Wildnis in allen Facetten erleben!* (o. D.). Chile Reisen & Informationsportal. <https://chile.de/nationalparks/>
 - ◆ Rüttinger, L., Griestop, L., & Schüler, F. (2014). *Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Kupfergewinnung in Chuquicamata, Chile*. adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_fallstudie_kupfer_chile.pdf
 - ◆ González, M. (1998, 1. Januar). *Prosopis tamarugo*. IUCN Red List Of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/species/32037/9676582>
- ◆ Material 5: In Anlehnung an:
 - ◆ Berger, W., Borg, G., Brandl, H., Dold, B., Drobe, M., Glombitza, F., Gutzmer, J., Kalin, M., Kamradt, A., Kassahun, A., Kutschke, S., Kothe, E., Krüher, M., Ondruschka, J., Pinka, J., Pollmann, K., Pratzka, V., Radehaus, P., Reimer, W., ... Zehnsdorf, A. (2013, Januar). *Geobiotechnologie: Stand und Perspektiven. Ein Statuspapier des Temporären Arbeitskreises Geobiotechnologie in der DECHEMA e. V.* DECHEMA. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/PP_Geobiotechnologie_einzel-called_by-dechema-original_page-124930-original_site-dechema_eV-view_image-1.pdf
 - ◆ BGR. (o. D.). *Metall-Biolaugung (Biomining)*. https://www.bgr.bund.de/DE/The-men/Min_rohstoffe/Biomining/biomining_node.html
 - ◆ *Erzlaugung*. (o. D.). Mineralienatlas – Fossilienatlas. <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Erzlaugung?lang=de>