

## 8. Übergangsmetalle

### 8.2. Gewinnungsverfahren: Beispiel 2: Kupfer

Vorlesung: Anorganische Chemie II, Metalle



SS 2021, Caroline Röhr



Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

Förderung und Anreicherung

Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

Literatur



## Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

    Förderung und Anreicherung

    Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

Literatur

## Einleitung

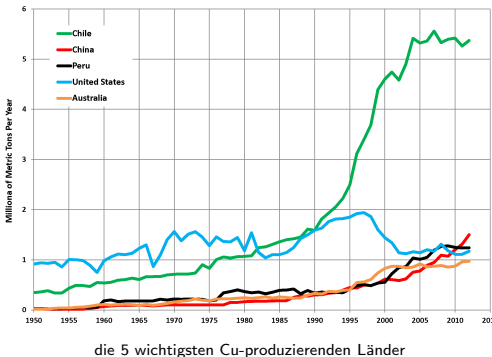
- ▶ mit Abstand wichtigstes 'Nichteisen' (NE) Metall
- ▶ sehr alter Werkstoff (**Geschichtliches**)
  - ▶ 50 000 - 10 000 v. Chr. (Chalkolithikum) Verwendung des natürlich vorkommenden Metalls
  - ▶ 4 000 v. Chr.: erstes Erschmelzen von Kupfer aus Erz
  - ▶ 3 000 - 1 200 v. Chr.: Bronzezeit (Cu:Sn-Legierungen)
- ▶ **Eigenschaften:**
  - ▶ guter elektrischer Leiter ( $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ )
  - ▶ guter Wärmeleiter (Wiedemann-Franz'sches Gesetz)
  - ▶ Schmelzpunkt: 1083 °C
  - ▶ chemisch inert, relativ edel ( $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$ ;  $E_0 = + 0.34 \text{ V}$ )
  - ▶ sehr duktil/dehnbar (f.c.c.-Struktur)
  - ▶ viele Legierungen (Bronze, Messing)
- ▶ **Verwendung**
  - ▶ Elektro- und Elektronik-Industrie
  - ▶ Maschinen- und Anlagenbau
  - ▶ Bausektor, Architektur
  - ▶ ...



## Einleitung (Fort.)

### ► Produktion:

- Weltjahresproduktion: 16 890 000 t/a (2020)
- Preis: 7 960 € pro t (11.7.2021)
- ca. 1/3 aus Rückgewinnung/Recycling (D ca. 50 %)
- Hauptproduzent Chile (Codelco), vor Peru und China



### ► Rohstoffe:



Einleitung

**Rohstoffe**

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

Förderung und Anreicherung

Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

Literatur

## Rohstoffe

### 1 Sulfide

- ▶ ca. 85 % aller Erze Fe<sup>III</sup>-haltig:
  - ▶ Kupferkies:  $\text{Cu}^{\text{I}}\text{Fe}^{\text{III}}\text{S}_2$
  - ▶ Buntkupferkies:  $\text{Cu}_5^{\text{I}}\text{Fe}^{\text{III}}\text{S}_4$
- ▶ Hauptvorkommen: Südamerika, USA, Kanada
- ▶ geringe Cu-Gehalte der Gesteine: 0.6-5 % Cu
- ▶  $\mapsto$  für pyrometallurgische Verfahren

### 2 Oxide, basische Carbonate

- ▶ Rotkupfererz (Cuprit):  $\text{Cu}_2^{\text{I}}\text{O}$
- ▶ Malachit:  $\text{Cu}_2^{\text{II}}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)$  (grün)
- ▶ Azurit:  $\text{Cu}_3^{\text{II}}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$  (blau)
- ▶  $\mapsto$  für hydrometallurgische Verfahren

### 3 Cu-Schrott (sekundäre Quellen)

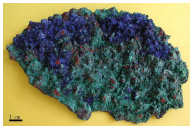
- ▶ gediegenes Kupfer selten
- ▶ technisch: bis 50 % Rücklauf, Recycling steigend
- ▶  $\mapsto$  direkt zur Raffination



Kupferkies



Cuprit:  $\text{Cu}_2\text{O}$



Azurit und Malachit



Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

    Förderung und Anreicherung

    Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

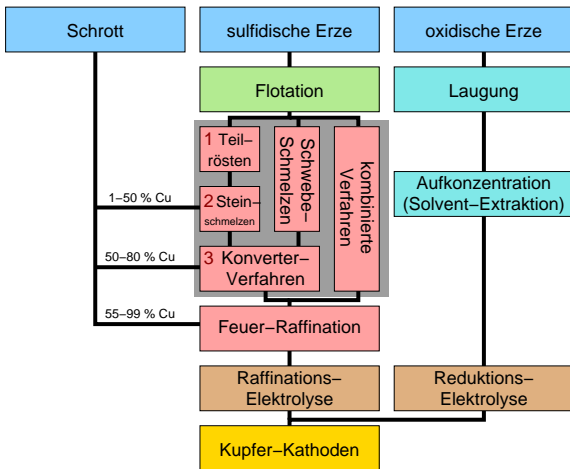
Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

Literatur



# Übersicht: Verfahren zur Kupfergewinnung



## 8. Übergangsmetalle

└ Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

└ Förderung und Anreicherung

Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

    Förderung und Anreicherung

    Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

Literatur

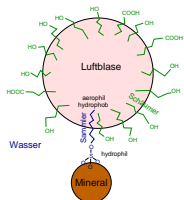
## Förderung und Aufbereitung

- ▶ **Förderung**
  - ▶ ab ca. 1 Gew.-% Cu förderungswürdig
  - ▶ Abbau i.A. Übertage
- ▶ **Mahlen**
  - ▶ in Brechern und Mühlen
  - ▶ bis Korngröße von ca. 0.1 mm
- ▶ **Flotation**



## Cu-Anreicherung: Flotation

- ▶ **Prinzip:** Ausschwimmen selektiv hydrophobisierter Minerale aus einer Trübe
- ▶ **Teilprozesse:**
  - ▶ Sammleradsorption (durch Regler modifizierbar)
  - ▶ Bildung von Gasblasen durch Schäumer und feinverteilte Luft
  - ▶ hydrophobisierte Mineral-Körner haften an Gasblasen
  - ▶ Aufschwimmen beladener Gasblasen und Schaumbildung
- ▶ **verwendete Stoffe:**
  - ▶ **Sammler:**
    - ▶ längere Kohlenwasserstoffreste mit polarer Gruppe
    - ▶ Adsorption der polaren Gruppe am Mineral
    - ▶ für Cu-Sulfide: Xanthogenate; Alkyl/Aryl-Dithio-Phosphate
  - ▶ **Schäumer:**
    - ▶ Tenside ohne Sammlerwirkung, z.B. aliphatische C<sub>5</sub>- bis C<sub>8</sub>-Alkohole, Terpenalkohole, hydroxylierte Polyether HO(RO<sub>x</sub>)H
  - ▶ **Regler: diverse weitere Zusätze:**
    - ▶ Beleber und Drücker zur Verbesserung der Selektivität der Trennung (pH-Wert-Regulierung, Komplexbildung, etc.)
- ▶ **Apparate:**



## Cu-Anreicherung: Apparate und Prozesse für die Flotation

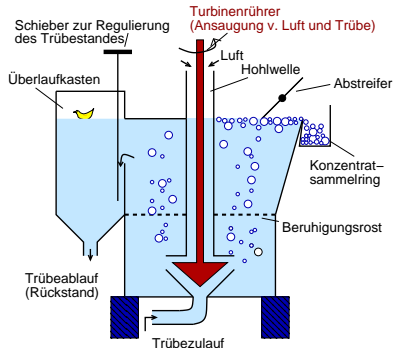
### ► Prozess-Schritte

- Trübe wird in gesonderten Behältern angemischt
- Zugabe von Sammlern, Schäumern, Drückern, Belebarn etc. (sog. Konditionierung)

### ► Apparate:

- mechanische Flotationszellen →
- pneumatische Zellen (ohne Rührer)

- **Produkt:** Sulfid-Mineralerale mit ca. 20-30 Gew.-% Cu



## 8. Übergangsmetalle

└ Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

└ Pyrometallurgische Gewinnung

Einleitung

Rohstoffe

**Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)**

Förderung und Anreicherung

**Pyrometallurgische Gewinnung**

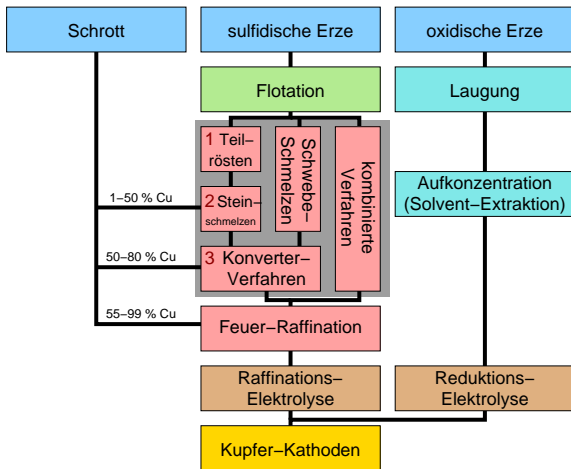
Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

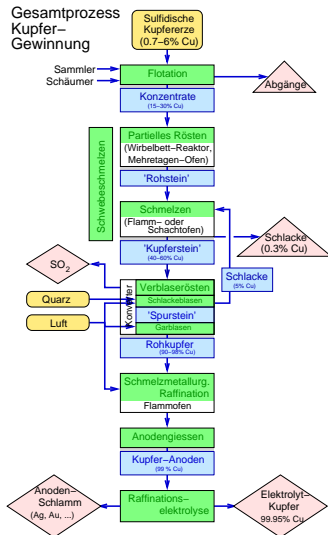
Literatur

# Übersicht: Verfahren zur Kupfergewinnung



## Pyrometallurgische Gewinnung: Übersicht

- ▶ Hauptproblem: hoher Fe-Gehalt aller sulfidischen Erze
- ▶ zusätzliches Trennproblem: Zn, As, Pb, Sb, Sn, Co, Ni, Ag, Au etc.
- ▶ Reduktion klassisch (bis ca. 1980) in drei Schritten bis zum Rohkopper:
  - ① im Röstofen zu Rohstein ( $\text{Cu}_2\text{S} + \text{Fe}^{\text{II}}\text{S} + \text{Fe}_3^{\text{II,III}}\text{O}_4$ )
  - ② im Schmelzprozess zu Kupferstein\* ( $\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS}$ )
  - ③ im Konverter durch 'Verblaserösten' zu Blisterkopper (Cu)
- ▶ heute aktuelles Hauptverfahren: ① und ② kombiniert im Schmelzschwebe-Ofen
- ▶ neuere Entwicklungen: Kombination aller Teilschritte ①+②+③ (kontinuierlich)

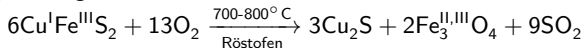




## ① partielles Rösten

- ▶ partielle Reduktion von  $\text{Fe}^{\text{III}}$  zu  $\text{Fe}^{\text{II,III}}$  mit  $\text{O}_2$

- ▶ Reaktionsgleichung:



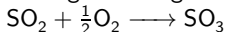
- ▶ exotherm,  $T=700-800^\circ\text{C}$ , d. h. keine flüssigen Produkte

- ▶  $\text{SO}_2$  zur Herstellung von  $\text{H}_2\text{SO}_4$

- ▶ Bauarten für **Röstöfen**

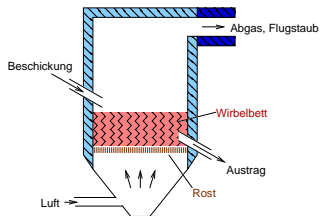
- ▶ (Haldenrösten)
- ▶ (Etagenröst-Ofen)
- ▶ Wirbelschicht-Ofen →

- ▶ wichtiges Gleichgewicht:



- ▶ (s. Schwefelsäure-Herstellung)
- ▶ Verhindern von  $\text{SO}_3$  und damit Sulfat-Bildung (z.B. durch niedrigen Druck)

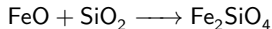
- ▶ **Produkt:** fester 'Rohstein'



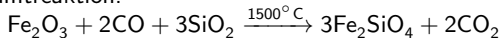
Prinzip von Wirbelschicht-Reaktoren

## ② 'Stein-Schmelzen'

- ▶ a: Reduktion des verbliebenen  $\text{Fe}^{\text{III}}$  mit  $\text{CO}$  zu  $\text{Fe}^{\text{II}}$
- ▶ b: Verschlacken des  $\text{Fe(II)-Oxids}$



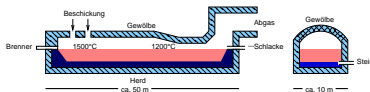
- ▶ Gesamtreaktion:



- ▶ endotherm, d.h. etwas C muss verbrannt werden (analog Hochofenprozess bei der Roheisengewinnung)

## ▶ Öfen:

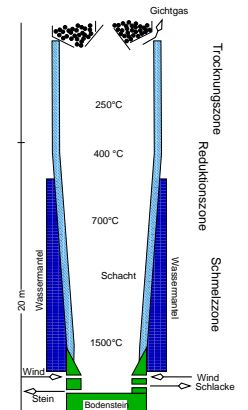
- ▶ Wassermantelschachtofen →



- ▶ Flammofen

## ▶ Produkte:

- ▶ flüssige Schlacke:  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ,  $\rho = \text{ca. } 3 \text{ g/cm}^3$  (wertvoller Schotter für Bahn- und Strassenbau)
- ▶ flüssiger 'Kupferstein':  $\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS}$ ;  $\rho = 4-6 \text{ g/cm}^3$
- ▶ bleibt flüssig für den Konverter

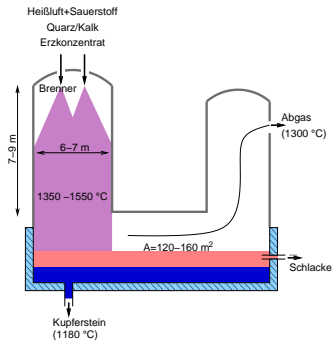


Wassermantelschachtofen:  
(rechteckig, ähnlich Fe-Hochofen)



## ① + ②: Schwebeschmelzen (Outokumpu flash smelting)

- ▶ seit ca. 1980 Hauptverfahren zur direkten Gewinnung von 'Kupferstein' (ca. 50 %)
- ▶ Entwicklung der finnischen Fa. Outokumpu (ab 1947)
- ▶ bei Betrieb mit  $O_2$ -angereicherter Luft autogenes Verfahren (kein Vorwärmen erforderlich)
- ▶ **Schmelzschwebeofen** →
- ▶ div. modifizierte Apparate
  - ▶ Teniente converter
  - ▶ Ausmelt furnace
  - ▶ ISASMELT Reaktor
- ▶ **Produkte:**
  - ▶ flüssige Schlacke:  $Fe_2SiO_4$
  - ▶ flüssiger 'Kupferstein':  $Cu_2S + FeS$
  - ▶ sehr heißes Abgas, ca. 15-20 %  $SO_2$  (Luft/ $O_2$ -Vorwärmung;  $\mapsto$  zu  $H_2SO_4$ )



## 8. Übergangsmetalle

└ Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

└ Pyrometallurgische Gewinnung

... bis hierher ...

⇒ !! Cu<sup>I</sup> noch nicht reduziert !!

⇒ !! noch viel Eisen als Fe<sup>II</sup>S enthalten !!



### ③ Verblaserösten

- ▶ mehrere Teilschritte in **Konvertern** (diskontinuierlich!)
- ▶ flüssiger Kupferstein → in Konverter eingiessen
- ▶ **A: 'Schlackenblasen'**
  - ▶  $\text{FeS} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{FeO} + \text{SO}_2$  (-468.5 kJ/mol)
  - ▶ Verschlackung mit Quarzzuschlag:  $2\text{FeO} + \text{SiO}_2 \longrightarrow \text{Fe}_2\text{SiO}_4$
  - ▶ nach ca. 1 h: Fe verschlackt, Schlacke (oben) wird abgossen
  - ▶ **Produkte:**
    - ▶ Schlacke (noch ca. 5% Cu → Rückführung zu Schritt ②)
    - ▶ **Spurstein:** reines  $\text{Cu}_2\text{S}$
- ▶ **B: Garblasen**
  - ▶ Cu zu  $\frac{2}{3}$  zu  $\text{Cu}_2\text{O}$  abrösten (Garblasen, Rösten, exotherm)
 
$$2\text{Cu}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$$
 (-798.7 kJ/mol)
  - ▶ dann 'Reaktion'
 
$$\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{Cu}_2\text{O} \longrightarrow 6\text{Cu} + \text{SO}_2$$
 (+140.6 kJ/mol)
  - ▶ insgesamt: 'Röstreaktion'
 
$$3\text{Cu}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 6\text{Cu} + 3\text{SO}_2$$
 (-652.3 kJ/mol)
  - ▶ einfache und elegante Reduktion, seit der Bronzezeit bekannt (auch für Pb und Hg möglich)
  - ▶ **Produkt:** **Blasenkupfer**, Rohkupfer oder Blister-Kupfer: 94-97 % Cu



## Konverter und -betrieb

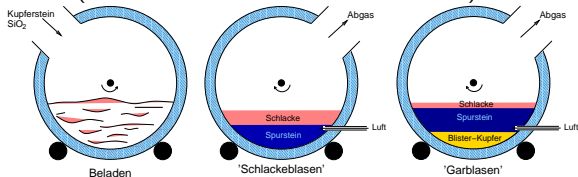
### ► Konverter-Typen

- Vertikal-Konverter (Bessemer-Birne)
- Horizontal/Trommel-Konverter, z.B. Peirce-Smith-Konverter

### ► Trommel-Konverter für Cu-Gewinnung

- Durchmesser: 2.5 bis 6 m, Länge 4 bis 8 m
- 10 - 70 t Beladung
- Windpressung mit  $p = 1.8$  bis  $2.1$  atm,  $\dot{V} = 240$  m<sup>3</sup>/min
- 20-40 Düsen mit  $\varnothing = 2-4$  cm ca. 60-100 cm über dem Boden

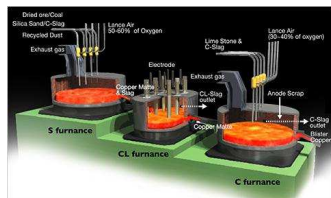
### ► Betriebsmodi (Schnitte durch die Konvertertrommel)



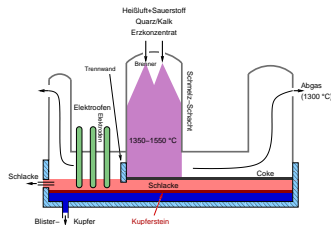
1. Befüllen des Konverters mit flüssigem Kupferstein und SiO<sub>2</sub>
2. 'A: Schlackeblasen': O<sub>2</sub>/Luft in Kupferstein-Schmelze einblasen  $\mapsto$  Schlacke-Menge nimmt zu, Kupferstein  $\mapsto$  Spurstein
3. Abgießen der Schlacke
4. 'B: Garblasen': O<sub>2</sub>/Luft in Spursteinschmelze  $\mapsto$  mehr Blister-Kupfer

## ① + ② + ③: kombinierte Verfahren

- ▶ aktuelle Entwicklung: kontinuierliche Prozesse, die alle Schritte ① und ② und ③ kombinieren
- ▶ Integration des Konverterschlittes kritisch
- ▶ verschiedene Verfahren/Apparate
  - ▶ Mitsubishi-Prozess (10 %): Smelter (S) – Slag-Cleaning (CL) – Converter (C)
  - ▶ KIVCET-Ofen
  - ▶ Noranda reactor (2 %)
- ▶ obwohl bessere Verfahren z.B. bzgl.
  - ▶ Energieverbrauch
  - ▶ Umweltschutz
  - ▶ Optimierung der Produktionsabläufe (kontinuierlich!)
- ▶ nicht weit verbreitet, da Einsatz von Cu-Schrott problematisch
- ▶ s. Zugabe von Schrott unterschiedlichen Cu-Gehaltes in den drei Teilprozessen



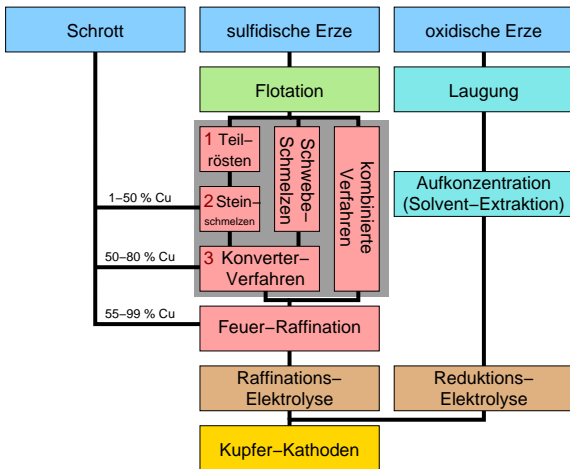
Mitsubishi-Prozess



KIVCET-Ofen



# Übersicht: Verfahren zur Kupfergewinnung



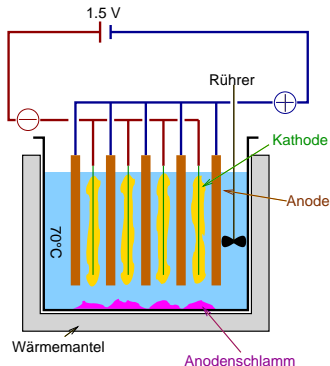


## 1. Raffination: schmelzmetallurgische Reinigung (Feuerraffination)

- ▶ Verschlacken bzw. Austreiben/Abtrennen der Begleitmetalle Zn, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Fe, Co sowie Ni (und von Rest-Schwefel) als Oxide
- ▶ nur Ag, Au und Pt verbleiben im Cu
- ▶ **Apparate:** kleine Flammöfen oder Konverter
  - ▶ +  $O_2$   $\mapsto$  flüchtige Oxide, z.B.  $As_2O_5$ , ZnO usw.
  - ▶ +  $SiO_2$   $\mapsto$  Verschlackung von Sn, Ni, Co, Fe usw.
  - ▶ danach Reduktion mit Erdgas (Entfernung von Restsauerstoff)
- ▶ **Produkt:** Garkupfer, Anodenkupfer: 99 %
  - ▶  $\mapsto$  zu Anodenplatten (3-5 cm dick) vergiessen

## 2. Raffination (Reinigungs-Elektrolyse)

- ▶ Anodenplatten und dünne Cu-Kathoden
- ▶ Reaktionen in den **Elektrolysezellen**: →
  - Anode  $\text{Cu}_{\text{gar}} \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$
  - Kathode  $2\text{e}^- + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Cu}_{\text{rein}}$
- ▶ Bedingungen:  $I = 10\,000\text{ A}$ ;  $U = 0.4\text{ V}$ ;  
Stromdichte:  $150\text{-}240\text{ A/m}^2$ ; ca.  $0.2\text{ kWh/kg Cu}$
- ▶ Elektroden parallel verschaltet
- ▶ **Produkte**:
  1. Reinkupfer, Elektrolytkupfer, Kathodenkupfer  $>99.95\%$  Cu
  2. in Lösung: Ni, As, Sb
  3. 'Anodenschlamm': Edelmetalle (Ag, Au, Pt) → wesentlicher Rentabilitätsfaktor der primären Cu-Herstellung



Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

    Förderung und Anreicherung

    Pyrometallurgische Gewinnung

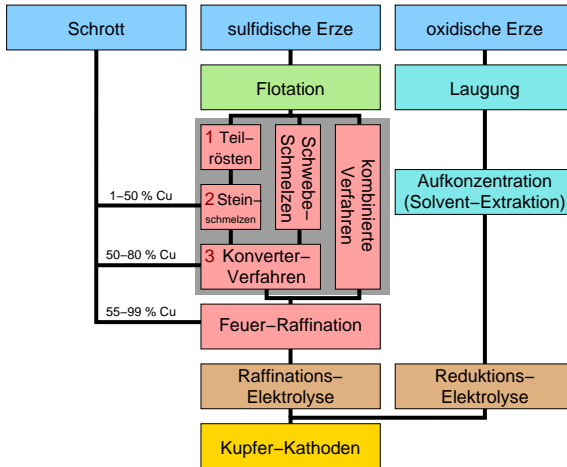
**Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)**

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

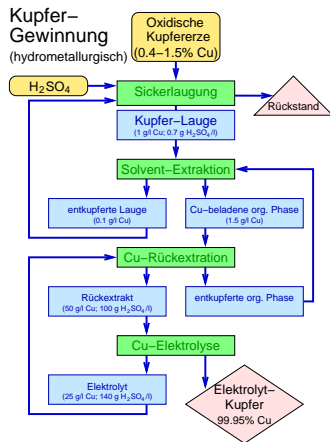
Literatur

# Übersicht: Verfahren zur Kupfergewinnung



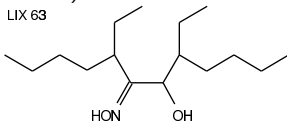
## Hydrometallurgische Gewinnung (SX/EW\*)

- ▶ oxidische Erze (auch Cu-arm, < 0.5 %)
- ▶ auch Cu-Schrott
- ▶ 'Laugung'
  - ▶ i.A. mit verd. Schwefelsäure
  - ▶ alternativ: Bakterienlaugung ('Bioleaching')
- ▶ stark verdünnte Cu-Lösungen
- ▶ Aufkonzentration durch Solventextraktion
  - ↓
- ▶ z.T. auch direkte 'Zementation' der kupferarmen Lösungen zu Cu-Pulver durch Zugabe von Eisen-Schrott

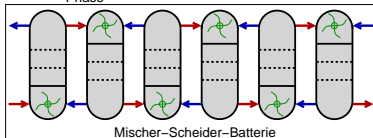
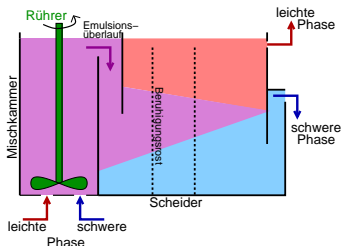


## Hydrometallurgische Gewinnung: Solventextraktion

- ▶ Extraktion mit  $\alpha$ -Hydroxyoximen (z.B. LIX 63) in Kerosin



- ▶ **Apparate:** Mischer-Scheider-Batterien →
- ▶ **Produkte:**
  - ▶ Cu-reiche organische Phase
  - ▶ Cu-arme wässrige Phase, Rückführung zur Laugung
- ▶ Rückextraktion der organischen Phase, z.B. 'Auflösen' des Cu-Komplexes durch pH-Wert-Änderung
- ▶ anschließend: Gewinnungselektrolyse ↓



## Gewinnungs-Elektrolyse

- ▶ Dauerkathoden aus Edelstahl (ISA-Prozess)
- ▶ Elektrolysezellen ähnlich der Raffinationselektrolyse
- ▶ Abscheidung von Cu an der Kathode:



- ▶ läuft mehrere Tage bis Wochen
- ▶ Abtrennen ('Strippen') des Kupfers von der Dauerkathode
- ▶ Umschmelzen
- ▶ **Produkte:**
  - ▶ Reinkupfer, Elektrolytkupfer, Kathodenkupfer >99.95 % Cu



Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

    Förderung und Anreicherung

    Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

**Verwendung, Eigenschaften, Legierungen**

Zusammenfassung

Literatur



## Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

### ▶ Produktion/Preis

- ▶ Weltjahresproduktion: 16 890 000 t/a (2020)
- ▶ Preis: 7 960 € pro t (11.7.2021)

### ▶ Eigenschaften

- ▶ Schmelzpunkt: 1083 °C
- ▶ ⊕ beste elektronische Leitfähigkeit aller Metalle
- ▶ ⊕ gute Wärmeleitfähigkeit
- ▶ ⊕ gute Oxidationsbeständigkeit
- ▶ ⊖ hohe Dichte:  $\rho = 8.92 \text{ g/cm}^3$
- ▶ ⊖ sehr weich (f.c.c.-Typ), rein als Material ungeeignet

### ▶ Verwendung

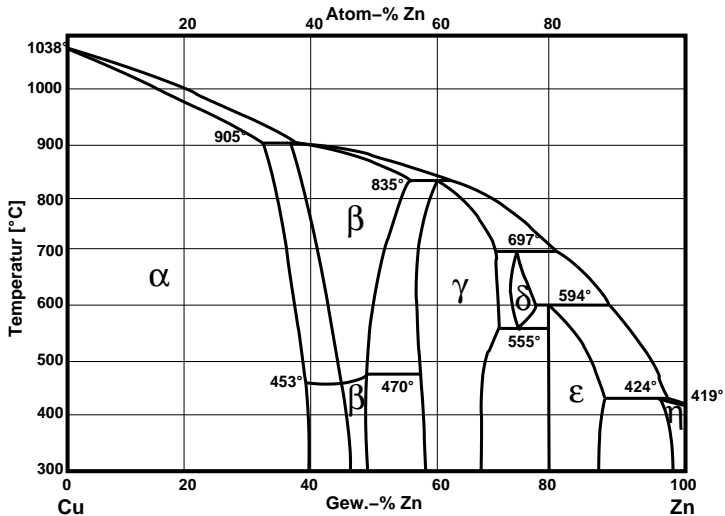
- ▶ **Elektrotechnik:** bester elektrischer Leiter
- ▶ **Anlagen- und Apparatebau:** hoher Schmelzpunkt, gute chemische Beständigkeit, guter Wärmeleiter; vielfältige Umformverfahren möglich (Walzen, Giessen, spanende Verarbeitung, Polieren, ...)
- ▶ **Bausektor:** inert, guter Wärmeleiter, schöne Oberfläche, antibakteriell
- ▶ **Alltag:** Münzen, Schmuck, Skulpturen, Haushaltswaren, Musikinstrumente ..

### ▶ Legierungen ('Bronzen')

- ▶ Messing: Cu-Zn (wichtigste, gut verarbeitbare NE-Metalllegierung)
- ▶ Bronze: Cu-Sn
- ▶ Bleibronzen: Cu-Pb (Gleitwerkstoffe, Lagermetall)
- ▶ Aluminiumbronzen: 5-12 % Al (hart, zäh  $\mapsto$  Uhrfedern usw.)
- ▶ Nickelbronzen: z.B. Konstantan: 60 % Cu, 40 % Ni:  $\sigma$  fast  $T$ -unabhängig



## Phasendiagramm Cu-Zn (Messing)



Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

    Förderung und Anreicherung

    Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

**Zusammenfassung**

Literatur

## Zusammenfassung

- ▶ wichtigstes NE-Metall; Hauptproduzent: Chile
- ▶ Rohstoffe: sulfidische und oxidische Erze auch sehr niedriger Cu-Konzentration, Cu-Schrott (Recycling) zunehmend wichtiger
- ▶ Abbau über Tage
- ▶ pyrometallurgische Gewinnung (ca. 85 %)
  - ▶ Flotation zum Aufkonzentrieren
  - ▶ 3 Prozessschritte: Teilrösten, Steinschmelzen, Reduktion im Konverter
  - ▶ Feuerraffination
  - ▶ Raffinationselektrolyse
- ▶ hydrometallurgische Gewinnung (ca. 15 %)
  - ▶ Laugung von oxidischen Erzen (oder Cu-armem Schrott) mit Schwefelsäure
  - ▶ Solventextraktion zum Aufkonzentrieren
  - ▶ Gewinnungselektrolyse
- ▶ Eigenschaften und Verwendung
  - ▶ Elektotechnik, Apparate- und Maschinenbau, Bausektor, usw.



Einleitung

Rohstoffe

Pyrometallurgische Gewinnung (sulfidische Erze, Cu-Schrott)

Förderung und Anreicherung

Pyrometallurgische Gewinnung

Hydrometallurgische Gewinnung (oxidische Erze, Cu-Schrott)

Verwendung, Eigenschaften, Legierungen

Zusammenfassung

Literatur

## Literatur

### Bücher und Artikel

- ▶ Winnacker-Küchler: Chemische Technologie, Band VI (Metallurgie)
- ▶ J. Grzella, P. Sturm, J. Krüger, M. A. Reuter, C. Kögler, Th. Probst: Metallurgical Furnaces; in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH (2005).
- ▶ Informationsmaterial des DKI (Deutsches Kupfer-Institut)

### Links zu Web-Seiten

- ▶ [Video zu beiden Arten der Gewinnung](#)
- ▶ [Cu-Elektrolyse \(Glencore\)](#)
- ▶ [Schmelzverarbeitung](#) (leider etwas schlechte Auflösung, aber beeindruckende Bilder zur Pyrometallurgie von Cu)
- ▶ – weitere s. Web-Seite –

