

9

METALLE UND HALBMETALLE

IN DIESEM KAPITEL GEHT ES UM

Eigenschaften von Metallen und Legierungen	das Vorkommen der Metalle	die Metallurgie – die Gewinnung der Metalle aus den Erzen
Eisen und Stahl	Aluminium	Kupfer
	Halbmetalle	

9.1 Eigenschaften von Metallen und Legierungen



Abb. 116.1 Quecksilber

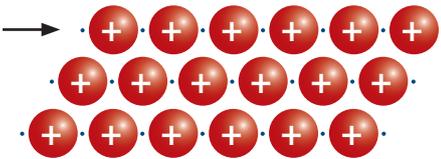


Abb. 116.2 Metalle sind verformbar



Abb. 116.3 Biegen eines Profils

MERK & WÜRDIG

- In einem **Metallgitter** sind Elektronen frei beweglich und bewirken die **gute Wärme- und elektrische Leitfähigkeit** der Metalle.
- Die **Verformbarkeit** von Metallen wird durch **Störstellen im Metallgitter** und durch **Legierung** beeinflusst. Durch eine Häufung von Störstellen wird das Metall aber spröde.

9.1.1 Eigenschaften von Metallen (*properties of metals*)

Alle Metalle besitzen gemeinsame Eigenschaften. Dazu zählen ihre **Verformbarkeit** (z. B. durch Walzen, Schmieden, Ziehen), ihre **Leitfähigkeit** für Strom und Wärme, ihr **metallischer Glanz** und ihre **Legierbarkeit**. Die Ursache für die typischen Metalleigenschaften ist die Metallbindung (**Seite 46**). Metalle sind bei Raumtemperatur meist fest (Ausnahme Quecksilber, **Abb. 116.1**). Sie behalten ihre Eigenschaften im flüssigen Zustand und verdampfen erst bei sehr hohen Temperaturen.

Metalle sind verformbar (*metals are ductile*)

Eine charakteristische Eigenschaft von Metallen ist ihre Verformbarkeit. Man kann Silber und Gold zu Folien aushämmern (Blattgold) oder zu Drähten ausziehen. Auch harte Metalle wie Chrom, Eisen und Nickel sind gut verformbar (Rohre, Profile, Drähte, Bleche). Wirkt auf ein Metall eine Kraft von außen ein, so beginnen sich die Metallkationen zu verschieben. Da alle Metallkationen gleich geladen sind und das Elektronengas dazwischen frei beweglich ist, wirken keine Kräfte der Verformung entgegen (**Abb. 116.2**).

Die Verformbarkeit wird im Wesentlichen durch den Gitteraufbau des Metalls, durch Störstellen im Gitter und Legierungen (*alloys*) beeinflusst. Eine lokale Häufung solcher Störstellen wirkt der Verformung des Metalls allerdings entgegen und das Metall wird spröde.

Metalle leiten Wärme (*metals conduct heat*)

Wird ein Metallstab an einem Ende erhitzt, so werden die Gitterbausteine des Metalls zu heftigen Schwingungen angeregt. Sie beschleunigen ihrerseits die Elektronen und diese wiederum bei ihrer Bewegung durch das Metall andere Gitterbausteine. So wird in kurzer Zeit Wärme auf den ganzen Stab übertragen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen im Metall bewegen, ist sehr hoch. Dabei stoßen sie wie die Teilchen eines Gases dauernd mit anderen Elektronen und den Gitterbausteinen zusammen und ändern dabei ständig ihre Richtung. Die Elektronen bewegen sich also **regellos**.

Metalle leiten elektrischen Strom (*metals conduct electricity*)

Die elektrische Leitfähigkeit entsteht durch die freie Beweglichkeit der Elektronen im **Elektronengas**. Legt man eine Spannung an das Metall an, geht die regellose Bewegung der Elektronen in eine gezielte Bewegung hin zum positiven Pol über. Diese hat allerdings nur eine Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Stunde. Bei steigender Temperatur sinkt die elektrische Leitfähigkeit der Metalle, weil die Bewegung der Metallkationen die Bewegung der Elektronen stört.

Eigenschaft	Bedeutung
Härte	mechanischer Widerstand, den der Körper dem Eindringen eines anderen Körpers entgegensetzt
Bruchfestigkeit	mechanische Spannung (= Kraft/Fläche), die bei gleichmäßiger Steigerung der Belastung zum Bruch führt. Je nach Belastung heißt sie Zug-, Druck-, Biegezug-, Scher- oder Torsionsfestigkeit.
Elastizität	Fähigkeit, nach Verformung die Ursprungsform wieder anzunehmen (= reversiblen Verformung)
Duktilität	Eigenschaft, sich unter Belastung plastisch zu verformen (= irreversible Verformung)
Oxidierbarkeit	unedle Metalle bilden leicht Oxide (insbesondere Hauptgruppenelemente), Halbedelmetalle (Cu, Sb, Bi, ...) und Edelmetalle, die nur oxidierbar sind (Au, Ag, Platin-Metalle, Hg)
Korrosionsbeständigkeit	Beständigkeit gegen chemische Angriffe
Dichte	Die Dichte von Metallen liegt zwischen 0,534 g/cm ³ (Li) und 22,42 g/cm ³ (Ir). Man unterscheidet Leichtmetalle (Dichte < 4,5 g/cm ³) und Schwermetalle (ρ > 4,5 g/cm ³).

Tabelle 116.1 Überblick zu wichtigen Eigenschaften von Metallen

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen recherchierst du fachspezifische Informationen in Fachliteratur und im Internet.

Ü 9.1

Nenne Gründe dafür, dass man Kupfer und nicht Eisen für Stromkabel verwendet.

Ü 9.2

Erläutere, aufgrund welcher typischen Eigenschaften Gold und Silber in der Schmuckindustrie verwendet werden.

Ü 9.3

Erkläre, warum man für Schmuckstücke meist nicht reines Gold, sondern Goldlegierungen verwendet.

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen führst du eine naturwissenschaftliche Untersuchung durch und interpretierst ihre Ergebnisse.

Ü 9.4

Halte einen Kunststoff- und einen Metalllöffel in siedendes Wasser und beobachte nach einiger Zeit den Unterschied der Reaktionen. Erkläre, worauf dieser Unterschied zurückzuführen ist.

Ü 9.5

Nimm eine Büroklammer und biege sie mehrmals hin- und her. Beobachte, was passiert. Deute deine Beobachtungen.

9.1.2 Legierungen (*alloys*)

Eine Legierung (*alloy*) ist ein metallischer Werkstoff, der zumindest aus zwei Elementen besteht: Messing (*brass*) setzt sich beispielsweise aus Kupfer und Zink zusammen, Bronze (*bronze*) aus Kupfer und Zinn. Legierungsbestandteile können Metalle oder Nichtmetalle (z. B. Kohlenstoff in Eisen bei Stahl) sein. Die Herstellung der Legierung erfolgt überwiegend über das Aufschmelzen von Metallmischungen (Schmelzmetallurgie).

Warum haben Legierungen andere Eigenschaften als ihre Bestandteile?

Im Vergleich zum reinen Metall können Legierungen völlig andere Eigenschaften besitzen. So können sie z. B. mechanisch stabiler oder widerstandsfähiger gegen Korrosion sein, eine bessere Leitfähigkeit für Wärme oder Strom besitzen u. v. m. Wenn sich in einem reinen Metall die einzelnen Schichten im Kristallgitter durch Kraftanwendung leicht verschieben lassen, so ist das Metall weich. Bei Einlagerung von Fremdatomen in das Kristallgitter kann die Ordnung gestört werden, weshalb sich die Metallkationen nicht mehr so leicht verschieben lassen. Die Legierung ist daher härter als das reine Metall.

Arten der Legierungsbildung (*types of alloys*)

Wie ein Legierungselement im Gitter des Metalls eingebaut wird, ist abhängig vom Größenverhältnis zwischen Legierungselement und Hauptmetall und der Mischbarkeit. Bei annähernd gleicher Atomgröße werden im Gitter des Hauptmetalls dessen Atome durch Atome des Legierungselements ersetzt (**Substitutionsmischkristall**), z. B. bei Mn – Fe, Ag – Au, Ni – Cu. Ist das Legierungselement sehr viel kleiner, wird es in den Zwischenräumen des Metallgitters der Metallkationen eingebaut (**Einlagerungsmischkristall**), was z. B. bei Stahl C – Fe der Fall ist.

Sind zwei Metalle im festen Zustand miteinander nicht mischbar (ein Einbau wie oben ist nicht stabil), dann bilden sich reine Kristalle der Legierungsbestandteile in mikroskopischer Verteilung, die nebeneinander vorliegen (**Kristallgemisch**).



Abb. 117.1 Blechblasinstrumente aus Messing, einer Legierung aus Kupfer und Zink

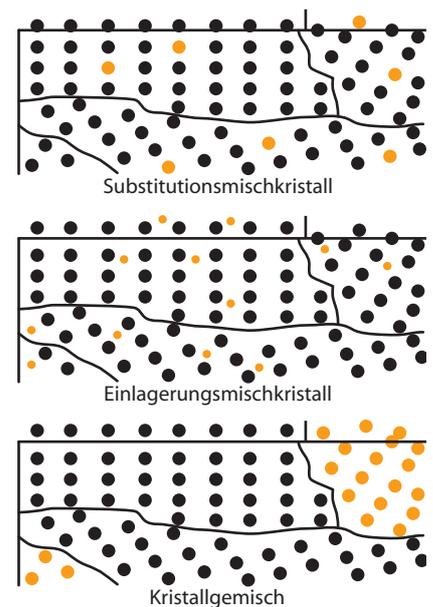


Abb. 117.2 Mischkristalltypen

Hauptelement	Legierung	Zusammensetzung	Eigenschaften	Anwendungen
Kupfer	Gelbmessing	67 % Cu, 33 % Zn	dehnbar, polierbar	Beschläge
Eisen	rostfreier Stahl	81 % Fe, 0,4 % C, 18 % Cr, 1 % Ni	korrosionsbeständig	Besteck
Blei	Lötzinn	67 % Pb, 33 % Sn	Schmelzpunkt: 181 °C	Lötstellen
Silber	Sterlingsilber	92,5 % Ag, 7,5 % Cu	glänzende Oberfläche	Besteck
Silber	Zahnamalgam	70 % Ag, 18 % Sn, 10 % Cu, 2 % Hg	leicht zu bearbeiten	Zahnfüllungen

Tabelle 117.1 Beispiele für Legierungen

ERGÄNZUNG & AUSBLICK

Die technische Bedeutung der Metalle

Technologischer Fortschritt ist stark mit der Verwendung von Metallen verbunden. Als Gradmesser für den Metallbedarf dient Eisen und Stahl: Die Jahresproduktion weltweit lag 2021 bei 1,9 Mrd. Tonnen; im Jahr 2000 waren es 850 Mrd. Tonnen.

Moderne Kommunikationstechnologie und der Wandel zu erneuerbaren Energien und Energiespeichertechnologien feuert den Bedarf an Spezialmetallen an. In einem Handy sind beispielsweise außer Kunststoffen (aus Erdöl) Kupfer, Kobalt, Gold, Silber, Platin und Tantal verbaut, weiters auch Metalle der Seltenen Erden wie Lanthan oder Neodym. Der Hauptmetallanteil im Akku ist Lithium. Hauptlieferanten sind wenige, rohstoffreiche Nationen (z. B. Chile, Australien – Li; VR China – Seltene Erden), in denen Rohstoffe meist unter nicht umweltgerechten und menschenunwürdigen Bedingungen (Ausbeutung, Gesundheitsgefährdung) abgebaut werden.

9.2 Vorkommen der Metalle (occurrence of metals)

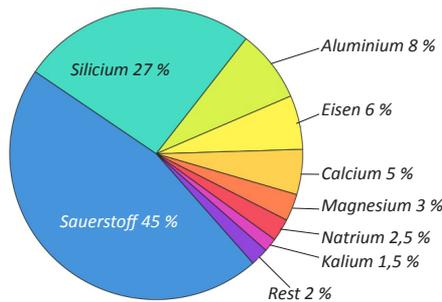


Abb. 118.1 Anteile der Elemente in der Erdkruste



Abb. 118.2 Nuggets sind natürlich vorkommende Metallklumpen (hier: Gold).

Die äußerste, etwa 16 km dicke Schicht der Erde wird als **Erdrinde** oder **Erdkruste** bezeichnet. Sie besteht zu ca. drei Vierteln aus Sauerstoff und Silicium, die gemeinsam die Verbindung Siliciumdioxid SiO_2 (Quarz, Sande, Silikate) bilden.

Sauerstoff findet sich auch in Verbindungen mit Metallen wie Aluminiumoxid, Eisenoxid oder Calciumcarbonat (Kalk, Marmor). Der Rest der Erdkruste enthält im Wesentlichen nur sechs Metalle. Den größten Anteil macht Aluminium, gefolgt von Eisen aus. Die restlichen Elemente bilden unter 2 % der Erdkruste. Viele sind äußerst selten (z. B. Gold mit $4 \cdot 10^{-7}$ %).

Erze und gediegenes Vorkommen (ores and native metals)

Im Allgemeinen kommen Metalle in Form von chemischen Verbindungen (Oxide, Sulfide, Carbonate, Silikate, u. a.) im Gemenge mit **taubem Gestein** vor. Dieses ist nicht verwertbar. Nur Edelmetalle wie Kupfer Cu, Silber Ag, Platin Pt und Palladium Pd findet man teilweise, und Gold Au vorwiegend in **gediegenem Vorkommen** in elementarer Form. Gesteine mit so hohen Metallanteilen, dass eine Metallgewinnung wirtschaftlich interessant ist, bezeichnet man als **Erze**.

Erze werden im Bergbau **unter Tage** in einer Tiefe von ca. 2 000 m gewonnen. Eine Ausnahme bildet der steirische Erzberg, bei dem Eisenerz im Tagbau gewonnen wird. Dort wird von den wichtigen Schwermetallen derzeit nur Eisen in Form von Spateisenstein (Eisencarbonat FeCO_3 mit 31 bis 32 % Eisen) abgebaut. Erze lassen sich z. B. nach Goldschmidt in 3 Gruppen einteilen: chalcophil (erzliebend, Affinität zu Schwefel), lithophil (steinliebend, Affinität zu Sauerstoff) und siderophil (eisenliebend, Affinität zu Eisen).

Name	Affinität zu	Beispiel	Erz	Metallgehalt
chalcophil	Schwefel	Ag, Cu, ...	z. B. Kupferkies CuFeS_2	ca 1% Cu
lithophil	Sauerstoff	Al, Ca, ...	z. B. Bauxit $\gamma\text{-Al(OH)}_3$	ca. 25% Al
siderophil	Eisen	C, Co, ...	z. B. Magnetit Fe_3O_4	60 – 66% Fe

Tabelle 118.1 Einteilung der Erze gemäß der Klassifikation von Goldschmidt

MERK & WÜRDIG

- Natürliche Vorkommen von reinen Metallen in elementarer Form bezeichnet man als **gediegen**.
- Verbindungen, die in einem Mineral oder Gestein neben dem Erz vorliegen, heißen **taubes Gestein** oder **Gangart**.

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen recherchierst du zu den gesellschaftspolitischen Konsequenzen der Rohstoffgewinnung und benennst Eigenschaften und Herstellungsverfahren von Metallen.

Ü 9.6

Recherchiere, welche Nationen bei der Gewinnung von Metallen (Li, Co) führend sind und welchen Einfluss die hohe Nachfrage nach Metallen auf die Umwelt sowie auf die Arbeits- bzw. Lebensbedingungen der Menschen in den Abbauregionen hat.

Ü 9.7

Erkläre, warum es keine gediegenen Vorkommen von Natrium und Magnesium gibt.

Ü 9.8

Erkläre, was „Gold waschen“ bedeutet und recherchiere, wo man in Österreich Gold waschen kann.

Ü 9.9

Ermittle aktuelle Daten zur Gewinnung von Fe, Al, Au und Ag. Welche Länder sind jeweils die weltgrößten Produzenten? Wie hoch ist ihre Jahresproduktion? Verwende dazu folgende Stichwörter: Jahresproduktion, Welt, Eisen, Aluminium, Gold, Silber. Halte deine Rechercheergebnisse in einer Tabelle fest.

9.3 Metallurgie (metallurgy)

Die Gewinnung von Metallen aus Erzen

Metallurgie oder **Hüttenkunde** bezeichnet Verfahren zur Gewinnung der Metalle aus Erzen oder Altmetallen (Recycling) sowie deren **Raffination** (= Reinigung) und **hüttentechnische Verarbeitung** zu Gussteilen und Halbzeugen.

Die meisten Metalle liegen in niedrigen Konzentrationen vor, sodass durch physikalische und/oder chemische Abtrennung der Gangart (= taubes Gestein) eine Anreicherung des Metalls notwendig ist. Ist der Anteil des Metalls im Gestein zu gering, ist dieses Vorkommen nicht abbauwürdig. Bei wenigen Metallen (Fe, Al) sind die Erze so konzentriert, dass eine Aufbereitung nicht notwendig ist.

Name	Was passiert dabei?	Ziel
Abbau	sprengen, baggern	Stückiges Gestein mit passender Größe
Erzaufbereitung	brechen, zerkleinern, mahlen, sortieren, klassieren	Entfernung des tauben Gesteins, angereichertes Gestein
Vorbehandlung der Erze	vom Erz zum Metalloxid	Entfernung der Begleitstoffe
	Brennen ohne Luftzufuhr	Carbonat wird zum Oxid CO ₂ entweicht
	Rösten mit Luftzufuhr	Sulfid wird zum Oxid, SO ₂ entweicht
Rohmetallgewinnung	Reduktion von Metalloxiden mit Koks, Kohle, CO, H ₂ , Al, ... zum Metall	Rohmetall (geringere Reinheit)
Raffination	–	reines Metall

Tabelle 119.1 Schritte der Hüttentechnologie

Erzaufbereitung (ore dressing)

Zur Reduktion von Transportkosten erfolgt die Erzaufbereitung noch im Ursprungsland. Erst das angereicherte Konzentrat wird weltweit gehandelt. Durch das Brechen, Zerkleinern und ggf. Mahlen des Gesteins brechen Erz und Gangart meist wegen ihrer unterschiedlichen Festigkeit auseinander und können dann entsprechend sortiert und klassiert werden. Zum Trennen (= Sortieren) werden die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Bestandteile genutzt.

Eigenschaft	Verfahren
Benetzbarkeit	Flotation
In einen Behälter mit Wasser wird ein Feststoffgemisch eingerührt. Luft wird von unten eingeblasen und haftet sich an nicht-benetzbare Partikel wie sulfidische Erze. Durch den Auftrieb wandern sie nach oben und werden abgetrennt (Abb. 119.3).	
Magnetisierbarkeit	Magnetscheider
Feststoffgemische laufen auf einem Förderband und passieren einen Permanentmagneten, der magnetisierbare Stoffe aus dem Stoffstrom herauszieht. So lässt sich auch Schrott in Eisenmetalle und Nicht-Eisenmetalle trennen (Abb. 119.4).	

Tabelle 119.2 Trennmethode zur Erzaufbereitung

Da die Metalle in den Erzen als Kationen vorliegen, erfolgt ihre Gewinnung ausschließlich durch Reduktion, wobei man meist von den Oxiden ausgeht. Carbonate werden durch **Brennen**, Sulfide durch **Rösten**, d. h. Erhitzen mit Luftsauerstoff, in die Oxide überführt.



Das dabei gewonnene Schwefeldioxid kann zu Schwefelsäure (Seite 89) weiterverarbeitet werden.



Abb. 119.1 Steirischer Erzberg

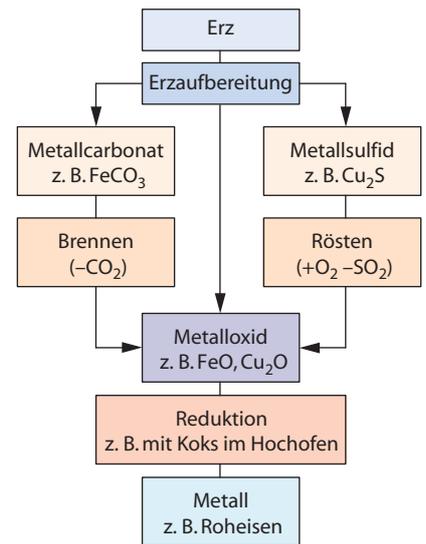


Abb. 119.2 Der metallurgische Prozess vom Erz zum Metall

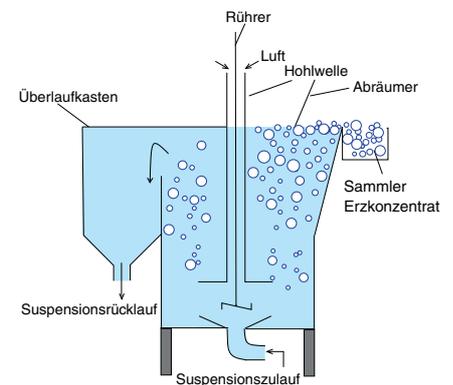


Abb. 119.3 Flotation

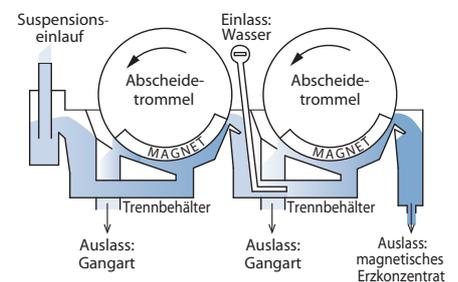


Abb. 119.4 Magnettrennung

Metall	Reduktionsmittel
K, Na, Ca, Mg, Al, Ti	H ₂ , Elektrolyse
Zn, Fe, Pb	C, CO
Au, Ag, Pt, Pd	gediegene Vorkommen

Tabelle 120.1 Metalle und Reduktionsmittel

Reduktion der Metallverbindungen

Das billigste und vorwiegend verwendete Reduktionsmittel ist der Kohlenstoff in Form von Koks oder Kohlenstoffmonoxid CO (Seite 121). Sind Elemente unedler als Kohlenstoff (z. B. Alkali- und Erdalkalimetalle) oder bilden die Elemente stabile Kohlenstoffverbindungen wie Carbide (z. B. Al₄C₃, Cr₇C₃, TiC), so erfolgt die Reduktion (Seite 104) der Metalle mit Wasserstoff, metallothermisch oder durch Elektrolyse. Titandioxid wird mit Wasserstoff reduziert, Chromoxid durch Aluminium und Aluminiumoxid durch Elektrolyse aus der Schmelze.



BEISPIEL 9.A



Abb. 120.1 „Schweißen“ von Schienen

Thermitreaktion – die metallothermische Reduktion von Eisen

Bei der Thermitreaktion wird Eisen(III)-oxid mit Aluminium zu Eisen reduziert. Die Mischung aus Al-Grieß und pulverigem Eisenoxid ist unter dem Markennamen *Thermit* bekannt. Das in einem Tongefäß vorgelegte Thermitgemisch wird durch den Thermitanzünder, eine Art Wunderkerze aus Bariumperoxid mit Magnesium, zur Reaktion gebracht. Durch die stark exotherme Reaktion schmilzt das reduzierte Eisen und fließt in eine Form ab. Das Aluminiumoxid schwimmt aufgrund der geringeren Dichte oben auf dem Eisen. Auf diese Weise lassen sich Eisenbahnschienen miteinander verbinden. Die überstehenden Eisenstöße werden danach abgeschliffen.

MERK & WÜRDIG

- Vor der **Reduktion** der Metalle aus den Verbindungen werden **Erze angereichert und aufbereitet**.
- Beim **Brennen** werden Erze wie **Metallcarbonate** durch Zersetzung bei hohen Temperaturen in **Metalloxide** übergeführt.
- Beim **Rösten** werden **Metallsulfide** durch Oxidation mit Sauerstoff bei hohen Temperaturen in Metalloxide übergeführt. Dabei entsteht Schwefeldioxid.

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen beschreibst du Herstellungsverfahren von Metallen in der Fachsprache.

Ü 9.10

Gib an, was man unter dem Aufbereiten von Erzen versteht.

Ü 9.11

Name the side products of roasting oxides and sulfides.

Ü 9.12

Erkläre, warum für die Gewinnung der Edelmetalle kein Reduktionsmittel benötigt wird.

Ü 9.13

Die technische Reduktion von Kupfer erfolgt durch eine Reaktion von Kupfer(I)-sulfid mit Kupfer (II)-oxid: $\text{Cu}_2\text{S} + 2 \text{CuO} \rightarrow 4 \text{Cu} + \text{SO}_2$. Bestimme, welches Element oxidiert wird.

9.4 Eisen und Stahl (iron and steel)

Vorkommen (occurrence)

Technisch und mengenmäßig ist Eisen das bedeutendste Metall. Es kommt nicht rein, sondern nur chemisch gebunden in Form von Eisenerzen vor. Wichtige Kriterien für die Eisenerzgewinnung sind Eisenanteil und Reduzierbarkeit des Erzes, die Größe der Lagerstätte sowie die Förder- und Transportkosten zur Verhüttung. Große Eisenerzvorkommen gibt es in China, Australien, Brasilien, Russland und Indien.



Abb. 120.2 Eisenerz Magnetit

Chemische Formel	Bezeichnung	Eisengehalt	Reduzierbarkeit
Fe ₃ O ₄	Magneteisenstein, Magnetit	60 – 70 %	schwer
Fe ₂ O ₃	Roteisenstein, Hämatit	40 – 60 %	leicht
Fe ₂ O ₃ · 1,5 H ₂ O	Brauneisenstein, Limonit	30 – 50 %	leicht
FeCO ₃	Spateisenstein, Siderit	25 – 45 %	leicht

Tabelle 120.2 Eisenerze und ihre Eigenschaften

Erzaufbereitung

Im Hochofen muss das Erz stückig sein, also eine Größe von 6 bis 30 mm besitzen. Höhere Anteile an feineren Erzen führen zu schweren Störungen der Durchgasung im Hochofen. Erz wird daher in Brechern oder Mühlen zerkleinert und von nicht eisenhaltigen, unmagnetischen Bestandteilen befreit. Auf Halden werden die verschiedenen Erzgütern so aufgeschichtet, dass beim Einbringen in den Hochofen eine gleichbleibende Qualität gewährleistet ist.

Eisenhaltige Abfälle aus dem gesamten Hüttenbereich (z. B. Stäube aus Hochofen und Stahlwerk, Walzzunder) werden recycelt und zusammen mit Feinerz (0,1 bis 6 mm) mit Koks und Kalk vermischt. Anschließend wird das Mischgut in der Sinterbandanlage auf ca. 1 300 °C erhitzt. Dabei verbinden sich die Erzkörner zu einem porigen Sinterkuchen, der auf eine Größe von 6 bis 30 mm gebrochen wird.

Die beim Zerkleinern anfallenden Feinststäube (< 0,1 mm) werden beim Pelletieren in großen Drehtellern mit einem Bindemittel zu Kügelchen (Pellets) geformt. Diese werden ebenfalls bei 1 300°C gebrannt und versintert.

Kohleaufbereitung – Kokerei

In der Kokerei wird eine Mischung der verschiedenen Steinkohlesorten in Kokskammern unter Luftabschluss auf über 1 000 °C erhitzt. Dadurch werden „flüchtige Bestandteile“ aus der Kohle ausgetrieben. Der reine Koks wird aus der Kammer gedrückt, mit Wasser abgekühlt und stückig gebrochen. Die flüchtigen Bestandteile der Kohlen werden gesammelt, gereinigt und zu 100 % als Heizgas verwendet. Schwefelhaltige Abgase werden zu Schwefelsäure weiterverarbeitet.

Anforderungen an den Koks	Nebenprodukte der Kokerei
Hoher C-Anteil, Aschegehalt, S-Gehalt (niedrig = günstig)	Kokereigas (Methan, Benzol, SO ₂ , NH ₃)
Abrieb- und Druckfestigkeit, Größe: 4 – 20 cm, Porosität	Benzol, Schwefelsäure (SO ₂), NH ₄ SO ₄ (SO ₂ , NH ₃), Teer

Tabelle 121.1 Anforderungen an die Kokerei

9.4.1 Herstellung von Roheisen – der Hochofen

Im Hochofen wird Roheisen durch Reduktion oxidischer Eisenerze mit Koks erzeugt. Rund 50 % der Kosten der Eisengewinnung sind Energiekosten zum Erwärmen der Feststoffe, Verbrennung des Koks und Schmelzen des Eisens.

Der Hochofen ist ein Schachtofen aus einem Stahlpanzer. Mit einer bis 1,20 m dicken feuerfesten Ausmauerung hält der Stahlpanzer auch Temperaturen stand, bei der das Eisen flüssig ist. Samt Aufbauten kann er über 100 m Höhe erreichen. Ein Hochofen „arbeitet“ 24 Stunden, bleibt bis zu 15 Jahre in Betrieb und wird erst dann wieder neu ausgemauert („zugestellt“).

Der Hochofenprozess arbeitet nach dem „Gegenstromprinzip“

Der Hochofen (Abb. 121.5) wird oben am Gichtsystem mit Stückerz, Sinter oder Pellets (als Eisenträger), Koks (C) und Zuschlägen (z. B. Kalk) – gesamt spricht man von **Möller** – schichtweise beschickt (Schrägaufzug). Zuschlagsstoffe binden Fremdstoffe wie Quarz (SiO₂) in der leicht schmelzbaren Schlacke (*slag*).

Die Beschickung wandert von oben nach unten und wird dabei chemisch und physikalisch verändert. Die Temperatur im Hochofen steigt dabei nach unten hin an und die Komponenten dehnen sich aus. Daher ist der Hochofen kegelförmig gebaut.

Die Gasphase bewegt sich entgegen der Bewegungsrichtung der Beschickung von unten nach oben durch den Schacht. Über Düsen einer Ringleitung wird im Bereich der **Rast** ca. 1 200 °C heiße Luft (= Wind) gleichmäßig von allen Seiten in den Ofen eingeleitet.



Abb. 121.1 Stückerz



Abb. 121.2 Pelletiertrömmel



Abb. 121.3 Sinterpellets



Abb. 121.4 Koksofen

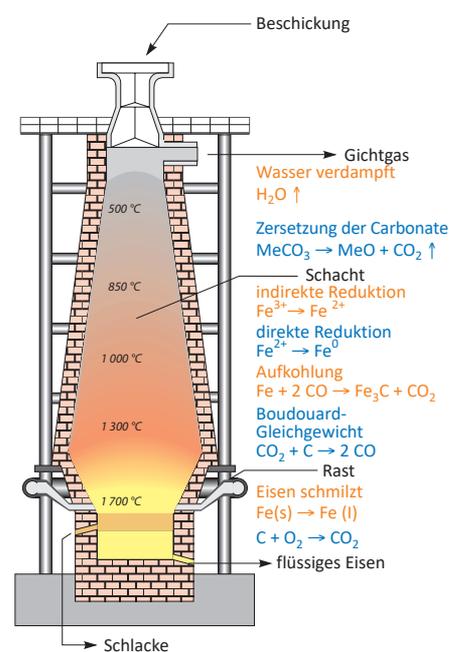


Abb. 121.5 Die Vorgänge im Hochofen

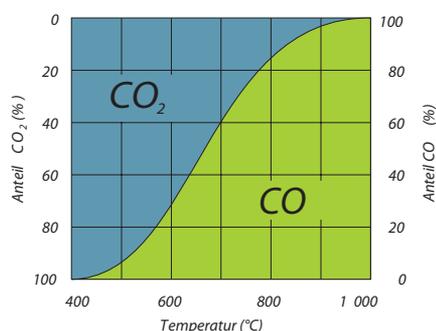


Abb. 122.1 Boudouard'sches Gleichgewicht



Abb. 122.2 Hochofenschlacke wird zur Herstellung von Zement und Beton verwendet

Dort verbrennt der Koks und erzeugt die Reaktionswärme, die zum Erhitzen der Beschickung bzw. zum Schmelzen des bereits reduzierten Eisens notwendig ist. Mit dem Schmelzen verringert sich das Volumen, daher verschmälert sich der Durchmesser des Hochofens im unteren Bereich.

Reaktionen im Hochofen	
Zersetzung der Carbonate	z. B. $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$
Indirekte Reduktion von Eisenoxid	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightleftharpoons 2 \text{FeO} + 3 \text{CO}_2$
Direkte Reduktion von Eisenoxid	$\text{FeO} + \text{C} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}$
Aufkohlung des Eisens	$3 \text{Fe} + \text{C} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{C}$
Verbrennung von Koks	$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$
Boudouard-Gleichgewicht (CO/CO ₂)	$\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2 \text{CO} \quad \Delta H = +172 \text{ kJ/mol}$

Tabelle 122.1 Anforderungen an die Kokerei

Abstich von Roheisen und Schlacke

Im unteren Bereich sammeln sich die flüssigen Bestandteile. Die leichtere Schlacke schwimmt auf dem flüssigen Eisen, da sie nicht mit Eisen mischbar sind. Beide Flüssigkeiten werden an verschiedenen Stellen des Hochofens durch periodisches Anbohren der Hochofenausmauerung abgestochen. Die Bohrlöcher werden anschließend wieder verstopft.

Der Schmelzpunkt des Eisens wird durch die gelösten Begleitelemente (v. a. Kohlenstoff) von 1 540 °C auf unter 1 200 °C herabgesetzt. Das im Hochofen entstehende Roheisen hat einen Kohlenstoffgehalt von bis zu 5 %. Es ist daher spröde und kann nur gegossen werden (Gusseisen). Zur Herstellung von Stahl muss der Kohlenstoffgehalt unter 1,7 % gesenkt werden.

Roheisen	Hochofenschlacke	Gichtgas
ca. 95 % Fe; 3 bis 5 % C	39,2 % SiO ₂ ; 38,7 % CaO	20 % CO/CO ₂ ; 3 % H ₂
Gusseisen, Stahl	Hüttensand (Zement) Hüttenwolle (Isolierung)	Winderhitzung Stromerzeugung

Tabelle 122.2 Produkte des Hochofens

EXPERIMENT 9.1



Abb. 122.3 Reduktion von Eisenerz

FeO: **Gefahr!** CO: **Gefahr!**

Das Experiment führt die Lehrkraft im Abzug durch. Achtung: Es entsteht Kohlenmonoxid!

Der Hochofen im Reagenzglas

- Ca. 0,1 g nicht-magnetisches Eisenoxid (FeO, oder Fe₂O₃) werden mit 0,3 g gemahlener Holzkohle (Achtung! keine S-haltige Kohle) in ein Reagenzglas gegeben.
- Im Abzug wird das Gemisch mit einem Bunsenbrenner etwa 5 bis 10 Minuten bis zur Rotglut erhitzt. Am besten befestigt man das Reagenzglas mit einer Klemme auf einem Stativ.
- Man lässt das Gemisch auskühlen und leert es in eine Kristallisierschale. Prüfe mit einem Magneten, ob metallisches Eisen entstanden ist.

9.4.2 Herstellung von Roheisen – Direktreduktion, Corex

Beim Direktreduktionsverfahren wird Eisenerz zu einem Eisenschwamm reduziert. Als Reduktionsmittel dient ein Gasmisch aus CO und H₂. Das Verfahren ist heute prinzipiell Stand der Technik. Das Eisenerz wird wie beim Hochofen in einem Schachtofen reduziert, es gibt aber auch liegende Drehrohröfen. Bei der Direktreduktion wird das Eisen jedoch nicht aufgeschmolzen.



Abb. 122.4 DRI – direct reduced iron

Damit das reduzierte Eisen nach Verlassen des Ofens nicht wieder durch die Luft oxidiert wird, wird gekühlt. Im Vergleich zum Roheisen aus dem Hochofen hat der Eisenschwamm eine geringere Reinheit, weil keine Schlacke gebildet wird. Der Kohlenstoffgehalt ist meist < 1 % (günstig für Stahl max. 2 % C).

Das **Corex-Verfahren** ist ein zweistufiges Verfahren, das einen Direkt-Reduktionsschacht mit einem Einschmelzvergaser kombiniert. Im Schachtofen wird Eisenerz zu Eisenschwamm reduziert. Die Kohle wird im Kopf des Einschmelzvergasers bei ca. 1 100 °C verkocht und sofort mit Sauerstoff verbrannt. Dadurch liefert sie die Einschmelzenergie für das Eisen. Das dabei entstehende Reduktionsgas (CO und H₂) wird entnommen und dem Reduktionsschacht zugeführt. Wie beim Hochofenprozess wird auch hier eine Schlacke gebildet, wodurch eine höhere Reinheit erreicht werden kann.

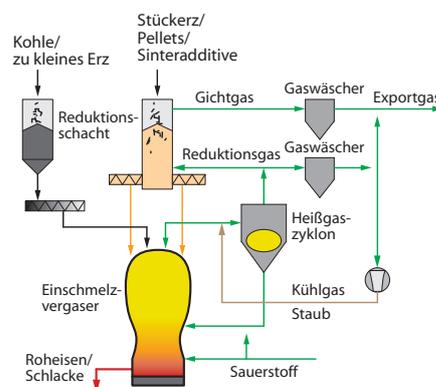


Abb. 123.1 Fließbild einer Corex-Anlage

Merkmal	Hochofen	Direktreduktion	Corex-Prozess
Reduktionsmittel	Koks, max. 20 % H ₂	kein Koks – CO/H ₂ , max. 100 % H ₂	kein Koks – CO/H ₂
Energieträger	Koks	dtz. Erdgas	dtz. Kohle
Erz	Verschlackung möglich	max. 10 % Gangart	Verschlackung möglich
Temperatur	bis 2 000 °C	bis 1 000 °C	bis 2 000 °C
Produkte	Roheisenschmelze ca. 4 % C HO-Schlacke	fester Eisenschwamm max. 1 % C	Roheisenschmelze ca. 4 % C Corex-Schlacke
Vor-/Nachteil	Reinheit des Roheisens/Hohe Emissionen	CO ₂ -Emissionsreduktion möglich	Reinheit des Roheisens/CO ₂ -Emission

Tabelle 123.1 Vergleich der Roheisenherstellprozesse

9.4.3 Herstellung von Stahl aus Roheisen

Das im Hochofen gewonnene Roheisen enthält noch Verunreinigungen wie Silicium, Phosphor und Schwefel, hauptsächlich aber Kohlenstoff (> 4 % C). Dadurch ist das Roheisen spröde (Gusseisen) und wenig belastbar.

Die Entfernung der Verunreinigungen erfolgt durch Sauerstoff. In Konvertern verschiedener Bauart (z. B. LD-Tiegel) werden die unerwünschten Bestandteile mit Luft oder reinem Sauerstoff verbrannt. Das Gas wird dabei je nach Verfahren von unten durch die Schmelze geleitet (OBM-Verfahren) oder von oben aufgeblasen (LD-Verfahren). Diesen Vorgang nennt man **Frischen**.

Bei der Oxidation der Begleitelemente C, Si, Mn und P werden große Wärmemengen frei und die Temperatur steigt von ca. 1 350 °C auf 1 650 °C. Zum Kühlen wird Schrott verwendet (Aufheizen und Schmelzwärme). 20 bis 30 % des gesamten Materialeinsatzes werden über Schrott eingebracht. Je nach Stahlsorte wird der Kohlenstoff völlig entfernt oder nur der Kohlenstoffanteil verringert. Die Blaszeit beträgt 15 bis 20 Minuten. Sauerstoffblasverfahren dienen zur Erzeugung **unlegierter Massenstähle**.

Beim Linz-Donawitz-Verfahren (LD-Verfahren, **Abb. 124.1**) wird der Converter mit Schrott und flüssigem Roheisen beschickt. Durch Aufblasen von Sauerstoff über eine wassergekühlte Kupferlanze auf das flüssige Roheisen werden der Kohlenstoff und die Verunreinigungen oxidiert. Nach dem Blasen wird der Tiegel umgelegt, der Rohstahl fließt durch das Abstichloch in die Stahlgießpfanne. Dann wird der Converter auf die andere Seite gekippt und die Schlacke fließt über die Converteröffnung in eine Schlackenpfanne.

Die Einstellung der genauen Stahlzusammensetzung erfolgt in der **Sekundärbehandlung**. Durch Einspulen von Drähten in die Schmelze wird der genaue Gehalt an Legierungsbestandteilen (Mangan, Chrom, Nickel u. a.) justiert, um die gewünschten Eigenschaften des Stahls zu erzielen. Überschüssiger Sauerstoff wird z. B. durch Anlegen eines Vakuums entgast.

ERGÄNZUNG & AUSBLICK

Dekarbonisierung der Roheisen- und Stahlherstellung

Eigentlich könnte man Stahl als nachhaltigen Rohstoff bezeichnen: Er kann lange verwendet und nahezu unbegrenzt recycelt werden. Wegen des hohen Bedarfs an Kohle für die Erzeugung des Roheisens gilt die Stahlindustrie trotz optimierter Prozesse als klimaschädlich. Ca. 7 % des weltweiten CO₂-Ausstoßes sind auf sie zurückzuführen. Verantwortlich ist die Verbrennung des Koks, der die hohen Temperaturen erzeugt und für die Reduktionsreaktion eingesetzt wird. Wasserstoff H₂ soll als klimaneutrales Reduktionsmittel und Energielieferant eine Alternative bieten. Bisher ist der Einsatz im Hochofen technisch nur bis zu ca. 20 % möglich.

Intensive Forschungen zur Vermeidung von kohlebasierter Energie und CO₂-Emissionen betreffen u. a. das Elektrostahlwerk: In Österreich arbeitet die voestalpine in Testlaboren am **Grünen Stahl**: In einem Pilotprojekt soll durch den Lichtbogen Wasserstoff zu Plasma ionisieren und Eisenerz in einem Schritt gleichzeitig geschmolzen und reduziert werden. Anstelle von CO₂ würde nur Wasserdampf entstehen.

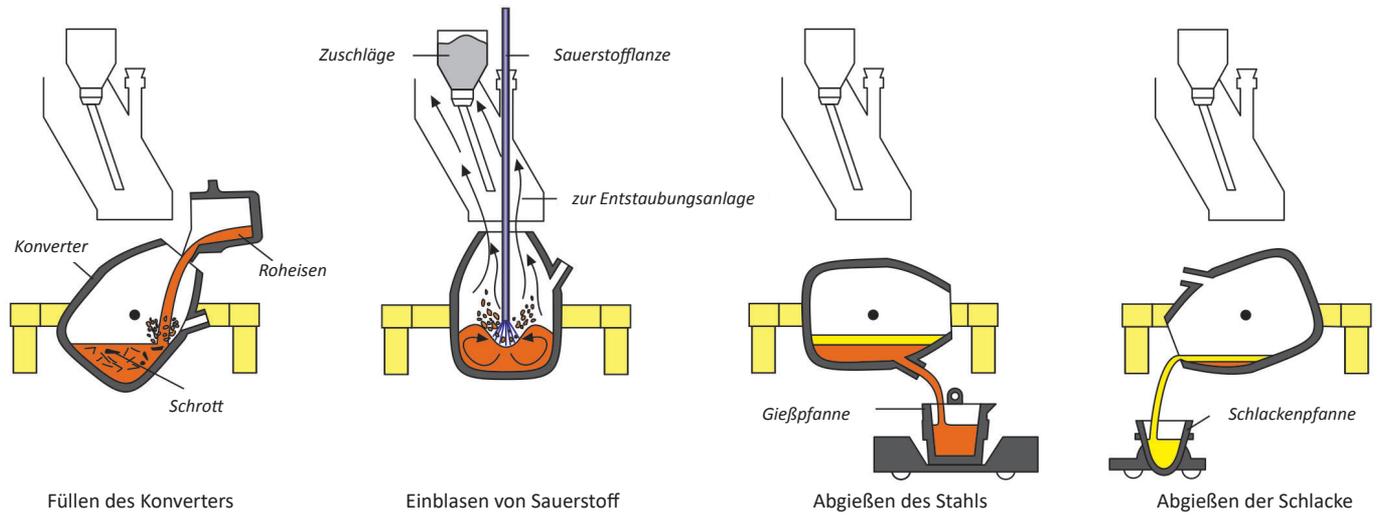


Abb. 124.1 Vorgänge beim LD-Verfahren

9.4.4 Herstellung von Stahl aus Schrott – Recycling

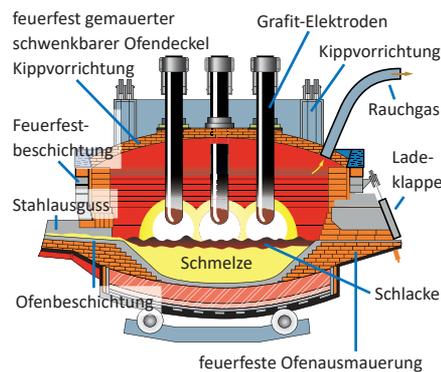


Abb. 124.2 Elektrostahlwerk

Beim Elektrostahl-Verfahren wird die erforderliche Wärme durch einen Lichtbogen oder über Induktion erzeugt. Der Lichtbogenofen wird von oben mit Schrott (sortiert und kontrolliert), mit Eisenschwamm und geringen Mengen Roheisen beschickt. Zur Einstellung der Legierung werden Erze und Zuschläge gegeben. Von den Grafitelektroden zum Schmelzgut verläuft ein Lichtbogen, der Temperaturen bis zu 3 500 °C erzeugt. Es können auch schwerschmelzende Ferro-Legierungen wie Eisen-Wolfram eingeschmolzen werden.

Das Bad befindet sich in einem kippbaren, kreisförmigen Herd mit Bodenabstich (10 bis 400 t). Der Vorteil besteht darin, dass man jede Stahlsorte unabhängig vom Einsatz (Schrott, Eisenschwamm, Roheisen) erzeugen kann. Der Lichtbogenofen wird zum Recycling von Massestählen und zur Herstellung von Qualitäts- und hochlegierten Edelstählen eingesetzt. Dieses Verfahren ist allerdings ein langsamerer Prozess.

MERK & WÜRDIG

Im **Hochofen** wird Eisenerz mit Koks zu flüssigem Roheisen reduziert.

Roheisen wird zur **Herstellung von Stahl** oder als **Gusseisen** verwendet.

Im **LD-Stahlwerk** wird der Kohlenstoffgehalt durch **Aufblasen von Sauerstoff (= Frischen)** reduziert. Zum Kühlen wird Schrott verwendet, der schmilzt und sich mit der Stahlschmelze verbindet.

Im **Elektrostahlwerk** wird Schrott recycelt, es werden hochlegierte Edelstähle erzeugt.

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen beschreibst du Eigenschaften und Herstellungsverfahren von wichtigen Metallen.

Ü 9.14

Zähle auf, welche Stoffe dem Hochofen zugeführt werden und welche herauskommen.

Ü 9.15

Recherchiere im Internet, welche Arten von Schlacke voestalpine Stahl produziert. Gib an, wozu sie verwendet werden. Stichwörter: Schlacke, voestalpine, Stahl.

Ü 9.16

Lade das Infoblatt „Eigenschaften und Verwendung von Eisen und Stahl“ von www.hpt.at/sbp_180013 herunter. Recherchiere dann, welche Lieferanten von Eisen und Stahl sich in der Nähe deines Wohnorts bzw. des Schulstandorts befinden. Ermittle, welche Stahlsorten mit welchen Eigenschaften produziert bzw. gehandelt werden.



Abb. 124.3 Bauxitabbau im Tagebau. Der Name stammt vom südfranzösischen Ort Le Baux, wo Bauxit erstmals gefunden wurde.

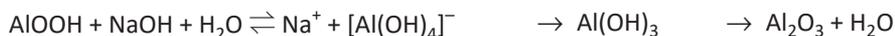
9.5 Aluminium (*aluminium*)

Vorkommen (*occurence*)

Aluminium ist das häufigste Metall in der Erdkruste ($w(\text{Al}) = 7,5 \%$) und liegt ausschließlich in Form oxidischer Verbindungen vor. Wirtschaftlich wird Aluminium nur aus Bauxit gewonnen. Dieses besteht hauptsächlich aus einer Mischung von $\text{Al}(\text{OH})_3$ und $\text{AlO}(\text{OH})$ (55 – 60 %), sowie Fe_2O_3 (max. 28 %). Die wichtigsten Erzvorkommen sind in Australien, China und Brasilien. Für die Schmelzflusselektrolyse zu Aluminium (Herstellung von Primäraluminium) benötigt man reines Aluminiumoxid.

Gewinnung von Aluminiumoxid – Bayer-Verfahren

Bauxit wird gebrochen, gemahlen und mit Natronlauge vermengt. Nach ca. 8 h bei 7 bar und 180 °C geht Aluminiumoxid in Lösung. Unlösliche Stoffe wie Eisen- und Titanoxid werden als Rotschlamm abgetrennt. Die Lösung wird gekühlt und Al als Aluminiumhydroxid ausgefällt, filtriert und bei 1 200 °C zu technisch reinem Al_2O_3 gebrannt. Aus 2 bis 3 t Bauxit entsteht ca. 1 t Aluminiumoxid.



Gewinnung von Primäraluminium durch Schmelzflusselektrolyse

Da Aluminiumoxid (Al_2O_3) einen hohen Schmelzpunkt besitzt (2 050 °C), arbeitet man mit einem Gemisch Kryolith (Na_3AlF_6) zu Al_2O_3 4 : 1 (Schmelzpunkt < 1 000 °C). Kryolith wird künstlich hergestellt, da die natürlichen Vorkommen erschöpft sind.

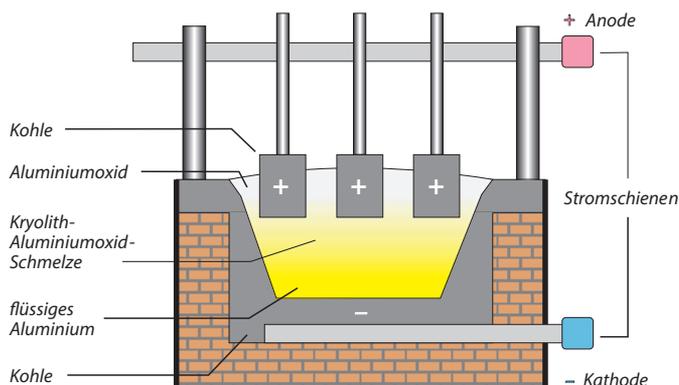


Abb. 125.2 Schnitt durch eine Elektrolysezelle

Die Elektrolysezelle ist eine Stahlwanne (zum Hitzeschutz mit Schamottziegeln ausgemauert). Boden und Seitenwände sind mit Kohlenstoffsteinen ausgekleidet, die als Kathode fungieren. Die Kohlenstoffanoden tauchen in die Elektrolytschmelze und werden bei der Reaktion mit Sauerstoff (Bildung von CO , CO_2) verbraucht. Die Gase werden abgesaugt und von Staub (Kryolith) befreit.

Das abgeschiedene Al ist schwerer als die Elektrolytschmelze, lagert sich als flüssiges Metallbad am Boden ab und wird von Zeit zu Zeit ebenfalls abgesaugt. Im selben Maß, in dem kontinuierlich Al_2O_3 elektrolytisch in Al und O_2 zersetzt wird, löst sich in der Salzschnmelze wieder neues Aluminiumoxid auf.

Herstellung von Sekundäraluminium aus Schrott – Recycling

Aluminium kann unbeschränkt ohne Qualitätsverlust wiederverwendet werden. Die hohen Betriebskosten für elektrische Energie (1 t Al benötigt 14 MWh) machen die Aluminium-Produktion unwirtschaftlich. Nur ca. 5 % der Energie wird beim Recycling durch Aufschmelzen von metallischem Aluminium (**Sekundäraluminium**) benötigt. In Europa werden 52 %, weltweit ca. 30 % des produzierten Aluminiums durch Recycling hergestellt (Stand: 2017).

Der Aluminiumschrott wird von Fremdmaterial und Beschichtungen getrennt und in Trommelöfen bei 800 °C eingeschmolzen. Dabei entsteht eine dünne Oxidhaut aus Aluminiumoxid. Diese wird vor dem Abguss durch Kratzvorrichtungen von der Oberfläche des Metallbads abgeschöpft. Die Partikel heißen **Kratze**. Sie werden wieder dem Ofen zugegeben (Recycling des am Oxid haftenden Al).

Eigenschaften und Verwendung von Aluminium

Unlegiertes Aluminium lässt sich sehr gut verformen und verarbeiten. Die Anwendungen sind zahlreich: Fässer, Al-Dosen, Folien, Stromschienen, Freileitungen, Al-Pulver zum Aufdampfen auf Glas (Spiegel). Die **Legierungen** des Al mit Mn, Mg, Cu, Si sind die wichtigsten Werkstoffe im Leichtmetallbau. Die **Verfestigung** wird meist durch **Mischkristallbildung** herbeigeführt. Eine Besonderheit sind härtbare Al-Legierungen. Durch eine spezielle Wärmebehandlung lassen sich intermetallische Verbindungen als zusätzliche Phase im Gefüge bilden (**Ausscheidungshärtung**).

Naturwissenschaften für Höhere technische Lehranstalten, Band 2 (Auflage 2,00) | SBNR 180013 | Leseprobe © Verlag HPT, 2022



Abb. 125.1 Schmelzflusselektrolyse Aluminium

Verbrauch je t Aluminium
2 t Al_2O_3 (aus 4 – 5 t Bauxit)
0,4 – 0,8 t Anodenkohle
4 kg Kryolith
15 – 20 kg AlF_3
13 000 – 16 000 kWh (Stromausbeute 85 – 95 %) theoret. 8,6 kWh/kg

Tabelle 125.1 Verbrauch von Rohstoffen und Energie bei der Primäraluminium-Erzeugung



Abb. 125.3 Aluminiumgranulat



Abb. 125.4 Aludosen sind der „Rohstoff“ für die Herstellung von Sekundäraluminium.



Abb. 125.5 Abguss der Al-Schmelze