

Eisen

Eisen (ahd. *īsarn*; aus urgerm. **īsarnan*, entlehnt aus ursprünglich gall. *īsarnon*, vgl. air. *íarn*, wal. *haearn*, einer Adjektivierung zu idg. **ésh₂r* ‚Blut‘) ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Fe (lateinisch *ferum*, ‚Eisen‘) und der Ordnungszahl 26. Es zählt zu den Übergangsmetallen, im Periodensystem steht es in der 8. Nebengruppe (Eisen-Platin-Gruppe), nach der neuen Zählung in der Gruppe 8 oder Eisengruppe. Es ist, auf den Massenanteil (ppmw) bezogen, nach Sauerstoff, Silizium und Aluminium das vierthäufigste Element in der Erdkruste und nach Aluminium das häufigste Metall.

In der Werkstoffkunde gehört Eisen zur Gruppe der Eisenmetalle, die unterteilt ist in Gusseisen und Stahl. Die Unterscheidung beruht darauf, dass Gusseisen einen Kohlenstoff-Gehalt von über 2,06 % hat und nicht plastisch verformbar, insbesondere nicht schmiedbar ist, während Stahl einen Kohlenstoff-Gehalt von deutlich weniger als 2,06 % hat und verformbar, also schmiedbar ist. Diese allein auf den Bestandteilen der Eisenlegierung beruhende Definition ist seit dem frühen 20. Jahrhundert gebräuchlich. Damit umfasst der Begriff *Stahl* auch das damals schon kaum mehr produzierte *Schmiedeeisen*. Dieser Begriff beschreibt nicht die Bestandteile, sondern die über viele Jahrhunderte entwickelte Art und Weise der Herstellung des Werkstoffes, bei dem die Reduzierung des Kohlenstoffanteils durch unterschiedliche Arten des Frischens von Eisen-Luppen mit anschließendem Schmieden erfolgte. Zwar hatte Schmiedeeisen ähnliche Kohlenstoffanteile wie heutiger Stahl, ist aber aufgrund einer geringfügig abweichenden Legierung mit anderen Stoffen und den nicht restlos entfernten Schlackeresten nicht identisch mit modernem Stahl.

1 Geschichte

Belege für die Nutzung von Eisen in den verschiedenen Kulturen durch archäologische Funde sind gegenüber den Funden von Bronze relativ selten. Einerseits wurde Eisen in den ältesten Perioden der Geschichte nur in geringem Umfang genutzt, andererseits neigt Eisen an feuchter Luft, im Wasser und in der nassen Erde zur Korrosion, wodurch viele Gegenstände nicht erhalten blieben. Nur besondere Umstände oder große Ausmaße des Gegenstandes verhinderten den Verlust solcher Stücke.

1.1 Früheste Nutzung von Meteoriteneisen

Bevor die Menschen in den verschiedenen Kulturkreisen lernten, Eisen aus Erz zu gewinnen, nutzten sie das bereits vor der eigentlichen „Eisenzeit“ bekannte und an seinem spezifischen Nickelgehalt von etwa 5 bis 18 % erkennbare Meteoreisen oder auch *Meteoriteneisen*. Aufgrund seiner Seltenheit war dieses „Himmelseisen“ (altägyptisch: bj-n-pt = „Eisen des Himmels“^[15]) entsprechend wertvoll und wurde vorwiegend zu Kultgegenständen und Schmuck verarbeitet. So fand man im Alten Ägypten in zwei Gräbern aus vordynastischer Zeit Schmuckperlen aus Meteoreisen mit einem Nickelgehalt von ca. 7,5 %.^[16] Ebenso konnte die schon früh geäußerte Vermutung bestätigt werden, dass ein bei der Mumie des Pharaos Tutanchamun gefundener Dolch aus Meteoreisen gefertigt worden war.^[17] Die ältesten bekannten Funde aus Meteoreisen stammen allerdings aus Mesopotamien, das von den dort lebenden Sumerern als „urudu-an-bar“ (= *Kupfer des Himmels*) bezeichnet wurde. Unter anderem wurde in der Stadt Ur ein Dolch mit einer Klinge aus Meteoreisen (10,8 % Ni) und goldbelegtem Griff entdeckt, dessen Herstellung auf eine Zeit um 3100 v. Chr. datiert ist.^[18]

1.2 Eisenerzeugung aus Erz

Zu den Anfängen der Eisenverhüttung siehe

→ *Hauptartikel: Hochofen*

1.2.1 Mittelmeerraum und Kleinasien

Die Nutzung von nickelfreiem, also terrestrischem Eisen muss in Mesopotamien ebenfalls schon früh bekannt gewesen sein, belegt durch einen nickelfreien Eisendolch mit Bronzegriff aus der Zeit zwischen 3000 und 2700 v. Chr., der in den Ruinen von Ešnunna bei Tell Asmar im heutigen Irak gefunden wurde.^[18] Aus den Aufzeichnungen der Hethiter im Archiv von Boğazkale (ehemals *Boğazköy*) in Zentralanatolien geht hervor, dass Eisen bereits zur Zeit von König Anitta (ca. 1800 v. Chr.) bekannt war und die Verhüttung von Eisen mindestens seit ca. 1300 v. Chr.^[19] Zwischen 1600 und 1200 v. Chr. blieb die Eisenproduktion weitgehend ein Monopol des Hethitischen Reiches und war ein Faktor für dessen Aufstieg. Ab 1200 v. Chr. wurde in der Levante Stahl durch

Erhöhung des Kohlenstoffanteils produziert.^[20] Die Hethiter stellten aus dem Eisen, das anfänglich mit bis zum achtfachen Gewicht in Gold aufgewogen wurde,^[20] vorwiegend Schmuck her.^[21]

Im alten Ägypten ist die Verhüttung von Eisen erst seit dem 6. Jahrhundert v. Chr. nachgewiesen. Bereits seit dem Alten Reich wurde aber auf Meteoriteneisen zurückgegriffen. Dieses wurde in späteren Texten als *bj3 n pt* („Eisen des Himmels“) bezeichnet und vor allem zur Herstellung von Amuletten und Modellwerkzeugen für das Mundöffnungsritual verwendet.^[22] Ein weiterer bekannter Fund ist eine Dolchklinge als Grabbeigabe Tutanchamuns von ca. 1350 v. Chr., wobei bis heute unklar ist, ob diese aus terrestrischem Eisen oder Meteoriteneisen besteht und ob diese überhaupt in Ägypten gefertigt wurde.^{[23][24]} Ein weiterer Eisenfund in einem Grab bei Abydos aus der 6. Dynastie (2347–2216 v. Chr.) ließ sich zwar als nickelfrei und damit terrestrischen Ursprungs bestimmen, sein früherer Verwendungszweck konnte jedoch nicht ermittelt werden, da das Stück völlig verrostet war.^[16] Ein 1837 in den Fugen der Cheopspyramide gefundenes Eisenmesser, das zunächst in die 4. Dynastie datiert wurde^[25], erwies sich hingegen als modernes Stück.^[26]

Weiterhin gehörten auch die Chalyber zu den Völkern des Mittelmeerraums und Kleinasiens, die bereits gute Kenntnisse über die Nutzung des Eisens als Hüttenwerkstoff gewonnen hatten. Ihr Name lebte in dem griechischen Wort für Stahl (*chalybs*) weiter, im Gegensatz zum gewöhnlichen Eisen (*sideros*).^[27] Früheste Spuren von Eisenverhüttung auf griechischem Gebiet fanden sich in Form von Eisenschlacke aus der Zeit um 2000 v. Chr. in Agia Triada auf Kreta.^[28]

Im Alten Ägypten und in Gerar (Palästina) war die Eisenverhüttung etwa ab 1000 v. Chr. bekannt (für Gerar belegt durch Eisenschmelzöfen und örtlich hergestellte Ackerbaugeräte^[27]) und in China mindestens seit der Han-Dynastie (206 v. Chr. bis 222 n. Chr.)^[29].

1.2.2 Europa

Zu den ältesten europäischen Stücken gehören die eisernen Zelte und Speere, die Graf Gozzadini 1853 in etruskischen Gräbern bei Bologna entdeckt hat. Sie stammen aus dem 9. bis 10. Jahrhundert vor Christus.

Einer der ältesten bekannten Eisenfunde in Deutschland ist ein eiserner Niet als Verbindung zwischen bronzener Lanzenspitze und hölzernem Schaft, der in Helle (Ostprignitz) gefunden wurde und etwa aus der Zeit um 800 v. Chr. stammt.^[27] Im deutschsprachigen Raum markiert allerdings die erst 300 Jahre später beginnende La-Tène-Zeit eine erste Hochkultur mit zahlreichen Eisenverhüttungsplätzen und Eisenfunden.

Neben seiner herausragenden Bedeutung als Werkstoff wurde Eisen in der Alchemie verwendet, wo es mit dem



Eisenausfällungen (rötlich), neben Schwefelausfällungen (gelblich) und Kalkausfällungen (weißlich) am Krafla-Vulkan, Island

Zeichen für Mars/Männlichkeit ♂ assoziiert wurde. Bis ins 18. Jahrhundert waren Rennöfen bzw. Rennwerke mit angeschlossenen Schmieden in Europa weit verbreitet. Flüssiges Roheisen entstand mit diesem Verfahren allerdings nicht, da ein Rennofen nur Temperaturen zwischen 1000 und 1200 °C erreichen konnte, der Schmelzpunkt von reinem Eisen jedoch bei 1538 °C liegt (Schmelzpunkt von reinem Zementit, Fe₃C: 1250 °C). Die Entwicklung von Gusseisen fand erst im 13. Jahrhundert in Schweden (Lapphyttan und Vinarhyttan) statt. Mit der gegossenen Kanonenkugel verbreitete sich die Gusseisenverarbeitung schnell wie die Feldzüge über ganz Europa.

Als die schwindenden Wälder den wachsenden Holzkohlebedarf zur Eisengewinnung in Großbritannien nicht mehr decken konnten, wurde Kohle (genauer das Kohleprodukt Koks) von Abraham Darby als Alternative entwickelt. Diese Umstellung, zusammen mit der Erfindung der Dampfmaschine, gilt als Beginn der industriellen Revolution. Die Hüttenwerke produzierten zunächst hauptsächlich Gusseisen, mit der Einführung des Puddelverfahrens auch Schmiedeeisen.

1.2.3 Eisennutzung und Funde außerhalb Europas und Kleinasiens

Auch in China wurden die ersten Erfahrungen mit Eisen an Meteoriteneisen gewonnen. Erste archäologische Spuren von Schmiedeeisen finden sich im Nordwesten, nahe Xinjiang, aus dem 8. vorchristlichen Jahrhundert. Man vermutet, dass diese Produkte, die mit den Methoden des Nahen Ostens erstellt wurden, durch Handel nach China gelangt sind. 550 v. Chr. wurde der Hochofen entwickelt: Damit war das Herstellen von Gusseisen möglich.

In den Gräbern von Turan, einer Region, die sich über den Osten Irans, den Süden Afghanistans und den Südwesten Pakistans zog, fanden sich eiserne Gegenstände und größere Eisenlager in den Ruinen von Khorsabad. Entdeckt wurden Ringe und Kettenteile zusammen mit etwa 160.000 kg Eisenbarren. Layard stieß bei seinen

Ausgrabungen in Nimrud auf eiserne Waffen wie Helme, Speere und Dolche. Berühmt ist die Eiserne Säule in Delhi, ein sieben Meter hoher schmiedeeiserner Pfeiler aus dem 4./5. Jahrhundert.

In Australien und den umliegenden besiedelten Inseln Polynesiens war dagegen die Nutzung von Eisen bis zur Entdeckung durch europäische Forscher unbekannt. Auch in der ansonsten hochstehenden Kultur der Inkas und Azteken Mittel- und Südamerikas verarbeitete man zwar Gold, Silber, Kupfer und Bronze von guter Qualität und großer Kunstfertigkeit, Eisen jedoch nur in geringer Menge und nur Meteoreisen.^[30]

2 Vorkommen



Raseneisensteinstücke

Eisen steht in der Reihe der *relativen Elementhäufigkeit bezogen auf Silicium* im Universum mit $8,3 \cdot 10^5$ Atomen je $1 \cdot 10^6$ Siliciumatomen an 9. Stelle. Die Fusion von Elementen in Sternen endet beim Eisen, da bei der Fusion höherer Elemente keine Energie mehr frei wird, sondern aufgewendet werden muss (siehe Nukleosynthese). Schwerere Elemente entstehen endotherm bei Supernoexplosionen, die auch für das Verstreu der im Stern entstandenen Materie verantwortlich sind.

Eisen steht in der Reihe der *Elementhäufigkeit nach dem Massenanteil* an 2. Stelle in der gesamten Erde (28,8 %), an 4. Stelle in der Erdhülle (4,70 %) und an 4. Stelle in der kontinentalen Erdkruste (5,63 %); im Meerwasser ist es nur zu 0,002 mg/L enthalten. Eisen ist zusammen mit Nickel wahrscheinlich der Hauptbestandteil des Erdkerns. Vermutlich angetrieben von thermischen Kräften erzeugen Konvektionsströmungen von flüssigem Eisen im äußeren Kern das Erdmagnetfeld.

2.1 Eisen in Erzen

Die ersten Vorkommen, die abgebaut wurden, waren Raseneisenstein und offenliegende Erze. Heute wird

vor allem 40-prozentiges Magneteisenerz abgebaut. Das wichtigste Mineral zur Eisengewinnung ist Magnetit, welches größtenteils aus Fe_3O_4 besteht. Die größten Eisenerzvorkommen finden sich in den sogenannten *Banded Iron Formations* (BIF, gebändertes Eisenerz oder Bändererz), die auch als Taconit oder Itabirit bezeichnet werden und Eisen hauptsächlich in den Mineralen Hämatit und Magnetit enthalten.

2.2 Eisen als Mineral



Gediegenes Eisen in Basalt

Selten kommt Eisen in der Natur auch gediegen vor, meist in Form kleiner Bläschen oder Verdickungen im umgebenden Gestein, aber auch als massige Mineral-Aggregate mit bis zu 25 t Gewicht^[31], und ist deshalb als Mineral anerkannt. Die International Mineralogical Association (IMA) führt es gemäß der Systematik der Minerale nach Strunz (9. Auflage) unter der System-Nr. „1.AE.05“ (Elemente - Metalle und intermetallische Verbindungen - Eisen-Chrom-Familie)^[32] (8. Auflage: I/A.07-10). Die im englischsprachigen Raum ebenfalls geläufige Systematik der Minerale nach Dana führt das Element-Mineral unter der System-Nr. „1.1.11.0“.

Weltweit konnte gediegenes Eisen bisher (Stand: 2010) an 120 Fundorten nachgewiesen werden, wobei die überwiegende Mehrheit allerdings aus meteoritischen Eisenerzen der Varietät Kamacit besteht.^[33]

Eisen kristallisiert im kubischen Kristallsystem, hat je nach Bildungsbedingungen und Reinheitsgrad eine Mohs-Härte zwischen 4 und 5^[34] und eine stahlgraue bis schwarze Farbe. Auch die Strichfarbe ist grau.

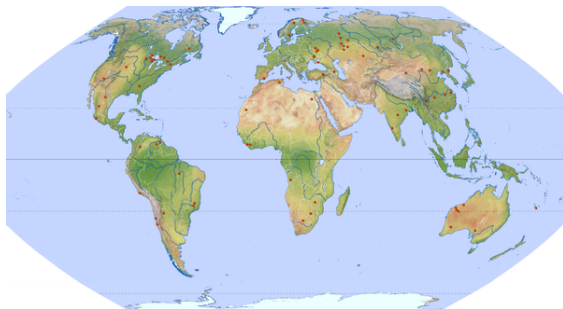
Wegen der Reaktion mit Wasser und Sauerstoff (Rosten) ist gediegenes Eisen nicht stabil. Es tritt daher in Legierung mit Nickel entweder als Kamacit (4 bis 7,5 % Ni) oder Taenit (20 bis 50 % Ni) nur in Eisenmeteoriten auf sowie in Basalten, in denen es manchmal zu einer Reduktion von eisenhaltigen Mineralen kommt. Eisen mit geringeren Nickelanteilen gelten als Varietät desselben und sind unter der Bezeichnung *Josephinit* bekannt^[35], allerdings ist diese Bezeichnung auch ein

Synonym des Minerals Awaruit (Ni_3Fe)^[36].

Eisenerze findet man dagegen vergleichsweise häufig, wichtige Beispiele sind die Minerale Magnetit (*Magnetit*, Fe_3O_4), Hämatit (*Roteisenstein*, Fe_2O_3), Pyrrhotin (*Magnetkies*, FeS) und Pyrit (*Eisenkies*, FeS_2), Siderit (*Eisenspat*, FeCO_3) und das als Gestein geltende Limonit (*Brauneisenstein*, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Das Sedimentgestein *Eisen-Oolith*, manchmal als *Eisenstein* bezeichnet, besteht aus Eisenhydroxidmineralien, verkittet mit tonigen oder kalkigen Bindemitteln. Industriell weniger von Interesse allerdings in der Natur ziemlich häufig antreffbar sind die Minerale Chlorit, Glaukonit und Pyrit. Insgesamt sind derzeit (Stand: 2010) 1424 Eisenminerale bekannt.^[37]

3 Förderung

Siehe auch: Liste der größten Eisenerzförderer und Liste der größten Roheisenerzeuger



Weltweite Förderstellen

Die Volksrepublik China ist mit 629,7 Millionen Tonnen (58,2 Prozent) das im Jahr 2011 bei weitem bedeutendste Herstellerland für Roheisen, gefolgt von Japan 81,0 Millionen Tonnen (7,5 Prozent) und Russland 48,1 Millionen Tonnen (4,4 Prozent). Die drei Staaten hatten zusammen einen Anteil von 70,1 Prozent an der Weltproduktion von 1082,7 Millionen Tonnen. In Europa waren weitere wichtige Produzenten die Ukraine, Deutschland, Frankreich, Italien und Großbritannien.

Weltweit wurden 2011 etwa 2,8 Milliarden Tonnen Eisenerz abgebaut. Die bedeutendsten Eisenerzlieferanten waren die Volksrepublik China, Australien, Brasilien, Indien und Russland. Zusammen hatten sie einen Anteil von 82,5 Prozent an der Weltförderung. Aus dem Eisenerz wurden neben dem Roheisen auch 63,5 Millionen Tonnen Eisenschwamm gewonnen. Zusätzlich wird aus Schrott noch neues Eisen hergestellt.



Eisenproduktion in Coalbrookdale, wo Abraham Darby I 1709 als erster Eisen unter Verwendung von Koks gewonnen hat (Gemälde von Philippe-Jacques de Loutherbourg, 1801)

4 Gewinnung und Darstellung

4.1 Erzgewinnung und -verarbeitung

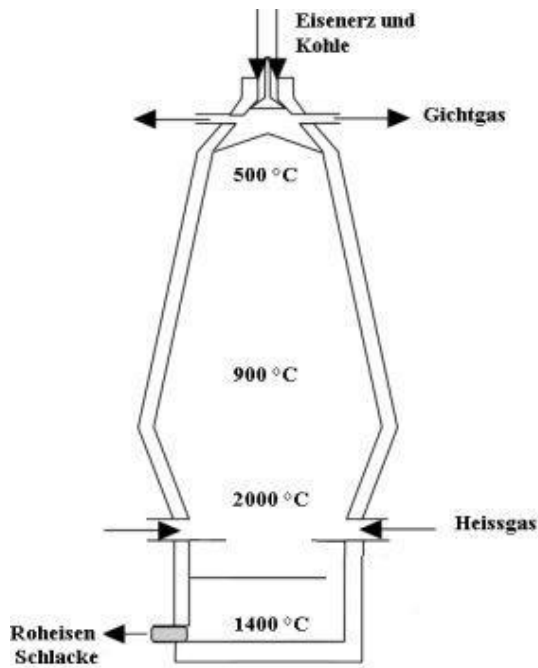
Eisenerz wird im Tagebau und im Tiefbau (Untertagebau) gewonnen. Dort, wo die als abbauwürdig erkannten Eisenerzlagerstätten offen zutage treten, kann das Erz im weniger aufwändigen Tagebau gewonnen werden. Heute wird Eisenerz hauptsächlich in Südamerika, besonders Brasilien, im Westen Australiens, in der Volksrepublik China, in Ost-Europa (beispielsweise Ukraine) und Kanada auf diese Weise abgebaut.

Diese Länder verdrängten in den letzten Jahren die ursprünglich bedeutendsten Eisenerz-Förderländer wie Frankreich, Schweden und Deutschland, dessen letzte Eisenerzgrube in der Oberpfalz 1987 geschlossen wurde.

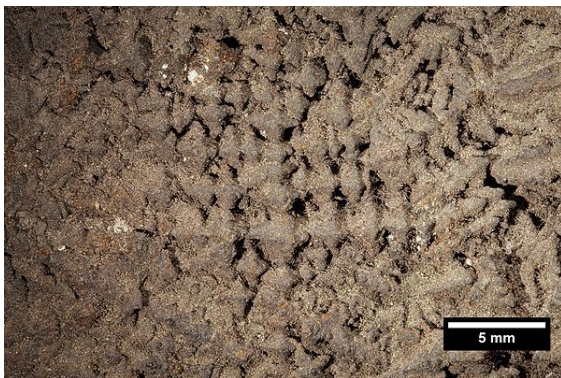
Nur ein kleiner Teil der Erze kann als Stückerz direkt im Hochofen eingesetzt werden. Der Hauptanteil der Eisenerze wird als Feinerz in einer Sinteranlage zu Sinter verarbeitet, denn nur in dieser Form als gesinterte grobe Brocken ist der Einsatz im Hochofen möglich, da das feine Erz die Luftzufuhr (Wind) sehr beeinträchtigen oder sogar verhindern würde. Größere Erzkörner werden nach ihrer Größe sortiert und gesintert. Kleine Erzkörner müssen dazu gemeinsam mit Kalkzuschlagsstoffen auf mit Gas unterfeuerten, motorisch angetriebenen Wanderroste (Rost-Förderbänder) aufgebracht und durch starke Erhitzung angeschmolzen und dadurch „zusammengebacken“ (gesintert) werden. Sehr feines Erz wird pulverfein aufgemahlen, was oft bereits zur Abtrennung von Gangart nötig ist. Dann wird es mit Kalkstein, feinkörnigem Koks (Koksgas) und Wasser intensiv vermischt und auf einen motorisch angetriebenen Wanderrost aufgegeben. Durch den Wanderrost werden von unten Gase abgesaugt. Von oben wird angezündet und eine Brennfront wandert von oben nach unten durch die Mischung, die dabei kurz angeschmolzen (gesintert) wird. Ein wesentlicher Anteil der Erze wird jedoch zu Pellets verarbeitet. Hierzu wird mit Bindemitteln, Zuschlägen und Wasser eine Mischung erzeugt, die dann auf Pelletiertellern zu Kügelchen von

10 bis 16 mm Durchmesser gerollt wird. Diese werden auf einem Wanderrost mit Gasbefeuerung zu Pellets gebrannt. Sinter ist nicht gut transportierbar und wird deshalb im Hüttenwerk erzeugt, Pelletanlagen werden meist in der Nähe der Erzgruben betrieben.

4.2 Eisenerzeugung im Hochofen



Schematischer Aufbau eines Hochofens



Roheisen, Detailaufnahme

Das Eisen wird überwiegend im Hochofen durch chemische Reduktion des Eisenoxids der Eisenerze mit Kohlenstoff gewonnen. Der Hochofen ist ein Schachtofen. Koks und Erz werden abwechselnd in Lagen oben in den Ofen hineingeschüttet. Dazu sind oberhalb des Ofengefäßes i. d. R. zwei Bunker angeordnet, die als Gasschleusen zwischen dem Ofengefäß und der Umgebung dienen. Ganz oben befindet sich innerhalb des Ofengefäßes eine Drehschurre, mit der das Material spiralförmig flächig auf der Beschickungsoberfläche verteilt wird. Die Kokslagen hal-

ten im unteren Bereich des Ofens, wenn das Erz plastisch wird, die Durchströmbarkeit der Schüttung mit Prozessgas aufrecht (Koksfenster).

Der Einsatz sinkt im Ofenschacht ab und wird dabei durch das etwa 2000 °C heiße, aus Kohlenstoffmonoxid und Stickstoff bestehende aufsteigende Prozessgas getrocknet, aufgeheizt, die Eisenoxide reduziert und schließlich geschmolzen (Redoxreaktion). Das Prozessgas wird erzeugt, indem unten in den Ofen durch wassergekühlte Kupferdüsen (Blasformen) auf etwa 1200 °C vorgeheizte Luft eingeblasen wird. Der Sauerstoff der Luft verbrennt mit Koks zu Kohlenstoffmonoxid. Der gesamte Vorgang dauert etwa acht Stunden.

Das übrig bleibende Abgas, das am oberen Ende des Ofenschachtes gewonnen wird, ist brennbar und wird zum Vorheizen der Luft verwendet. Mit Überschussgas wird in einem Kraftwerk Strom erzeugt.

Der Ofen erzeugt neben dem flüssigen Eisen auch flüssige Schlacke. Beides ist miteinander vermischt, hat eine Temperatur von etwa 1450 °C und wird durch ein Stichloch abgezogen, das etwa alle zwei Stunden durch Anbohren geöffnet und jeweils nach etwa einer Stunde durch Verstopfen mit einer keramischen Masse verschlossen wird. Eisen und Schlacke werden außerhalb des Ofens getrennt. Das Eisen wird in Transportpfannen gefüllt und ins Stahlwerk gebracht.

Das Eisen ist bei 1450 °C flüssig, da durch den im Eisen gelösten Kohlenstoff eine Schmelzpunktserniedrigung erfolgt. Die Schlacke wird mit Wasser verdüst. Dabei erstarrt sie durch das Abschrecken als feinkörniges Glas (Schlackensand). Dieser Schlackensand wird fein gemahlen und als Betonzusatzstoff (Füller) verwendet. Ein Hochofen erzeugt pro Tonne Eisen etwa 200 bis 300 kg Schlacke.

Erz und Koks enthalten als Hauptverunreinigung Siliciumdioxid (Quarzsand, Silikate) SiO_2 und Aluminiumoxid Al_2O_3 . Ein kleiner Teil des Siliciumdioxids wird zu Silicium reduziert, das im Eisen gelöst wird. Der Rest bildet zusammen mit dem Aluminiumoxid die Schlacke (Aluminiumsilikate).

Da der Schmelzpunkt eines Gemisches von SiO_2 und Al_2O_3 zu hoch ist, um eine bei 1450 °C flüssige Schlacke zu bilden, wird Calciumoxid zur Schmelzpunktserniedrigung verwendet. Dies wird meist bereits bei der Herstellung des Eisenerzsinters als Kalkstein zugegeben.

Das Eisen des Hochofens (Roheisen) hat nur einen Eisengehalt von etwa 95 %. Es enthält für die meisten Anwendungen zu viel Kohlenstoff, Schwefel, Silicium und Phosphor. Üblicherweise wird daher im Stahlwerk zunächst durch Einblasen von Calciumcarbid, Magnesium oder Branntkalk reduzierend entschwefelt. Die Entschwefelungsschlacke wird abgezogen und das Roheisen dann in einem Konverter (Sauerstoffblasverfahren) unter Zusatz von Branntkalk oxidierend verblasen. Da-

bei wird Silicium zu Siliciumdioxid und Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid verbrannt. Der Phosphor wird als Calciumphosphat gebunden. Das flüssige Eisen hat danach eine Temperatur von etwa 1600 °C. Es enthält soviel Sauerstoff, dass beim Erstarren aus verbliebenem Kohlenstoff Kohlenmonoxidblasen entstehen. Beim heute meist verwendeten **Strangguss** ist dies unerwünscht. Beim Abstechen des Stahls aus dem Konverter in die Gießpfanne wird daher **Aluminium** zugegeben, um den Sauerstoff als Aluminiumoxid zu binden. Bei hohen Anforderungen an die Qualität des Stahls folgen auf den Konverterprozess noch weitere Verfahrensschritte, wie z. B. eine Vakuumbehandlung (**Sekundärmetallurgie**).

4.3 Eisenerzeugung ohne Hochofen

→ *Hauptartikel: Direktreduktion*

Hochöfen haben einen großen Material- und Energiebedarf, der bei ungünstigen Rohstoff- und Energiebedingungen nicht immer bereitgestellt werden kann. Daher wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um die vorhandenen Eisenerze ohne oder nur mit geringem Einsatz von Koks bzw. alternativ mit Steinkohle, Braunkohle, Erdöl oder Erdgas zu reduzieren. Bei der überwiegenden Anzahl der Verfahren fällt das erzeugte Roheisen in fester, poriger Form an, das als **Eisenschwamm** bezeichnet wird.

Bekannte Verfahren sind, sortiert nach dem jeweiligen Reduktionsgefäß, unter anderem:^[40]

1. Eisenerzeugung im Schachtofen:

- **Wiberg-Verfahren**, entwickelt ca. 1918 in Schweden
- **Purofer-Verfahren**, entwickelt in Oberhausen
- **Midland-Ross-Verfahren/Midrex-Verfahren**, entwickelt von der Midland-Ross-Corporation in Cleveland, Ohio

Alle drei Verfahren nutzen einen mehr oder weniger kurzen Schachtofen und als Einsatzstoffe eisenreiche Stückerze, Sinter oder Pellets, die vorgewärmt und am Ofenkopf eingebracht werden. Am Ofengrund wird ein 1000 °C heißes Reduktionsgasgemisch aus Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H₂), Kohlendioxid (CO₂), Wasser (H₂O) und ggf. Methan (CH₄) eingeblasen. Der erzeugte Eisenschwamm hat eine Reinheit von 85 bis 95 %.

- **Corex-Verfahren**

2. Eisenerzeugung in der Retorte:

- **Höganäs-Verfahren**, entwickelt 1908 von E. Sieurin in Höganäs, Schweden

- **HyL-Verfahren**, entwickelt 1957 bei der Gesellschaft Hojalata-y-Lamina S.A. in Monterrey, Mexiko

Sehr reiche Eisenerzkonzentrate werden hier in keramische Retorten oder **Muffeln** eingebracht und entweder mit feinkörniger Kohle, Koksgrus und Kalkstein oder mit Erdgas reduziert. Der erzeugte Eisenschwamm hat eine Reinheit von 80 bis 95 % und wird entweder zur Herstellung von **Sonderstählen** oder als Eisenpulver für die Pulvermetallurgie genutzt.

3. Eisenerzeugung im Drehgefäß:

- **Krupp-Eisenschwammverfahren**
- **RN-Verfahren**, entwickelt von der Republic Steel Corporation und der National Lead Corporation
- **SL-Verfahren**, entwickelt von der Steel Company of Canada und der Lurgi Gesellschaft für Chemie und Hüttenwesen

Eingebracht werden hier Stückerz oder Pellets zusammen mit Kalkstein oder Dolomit in bis zu 110 m lange **Drehrohröfen**, die mit Braunkohle, Koksofengas oder Heizöl auf bis zu 1050 °C aufgeheizt werden. Erzeugt wird Eisenschwamm mit einer Reinheit von 85 bis über 90 %.

- **Dored-Verfahren** (Domnarf-Reduktions-Verfahren), entwickelt bei der Stora Kopparbergs Bergslag in Schweden

Vorgewärmtes Eisenerz wird mit Kohle oder Koks auf einem Roheisensumpf in einen Drehrohröfen eingebracht. Durch Einblasen von reinem Sauerstoff wird das im Reduktionsgas enthaltene Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid verbrannt und der Drehrohröfen auf ca. 1300 bis 1350 °C aufgeheizt. Erzeugt wird flüssiges Roheisen.

4. Eisenerzeugung im Wirbelschichtreaktor

- **H-Iron-Verfahren**, entwickelt von der Hydrocarbon Research Inc. (USA)
- **FIOR-Verfahren** (Fluid Iron Ore Reduction), entwickelt von der Standard Oil Company, New York

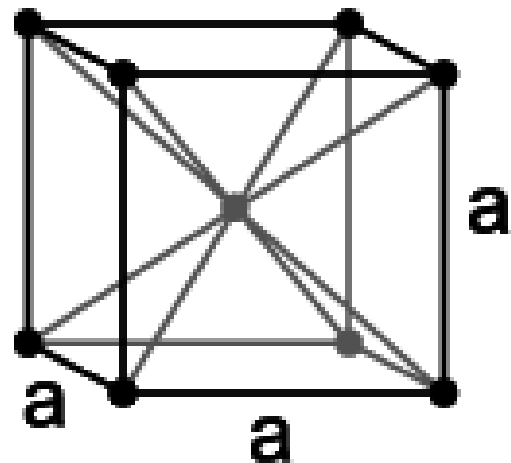
Erzeugt wird Eisenschwamm aus feinkörnigen Eisenerzen, das entweder mit eingeblasenem Wasserstoff, Erdgas oder Raffinerierestgas aufgewirbelt und reduziert wird.

- Finex-Verfahren

5. Eisenerzeugung im Elektroofen

- Ohne Vorwärmung und Vorreduktion der Einsatzstoffe kommen das Tysland-Hole-Verfahren und das Demag-Verfahren aus.
- Elektrokemisk-Verfahren und Strategic-Udy-Verfahren benötigen dagegen die Vorwärmung und Vorreduktion des Erzes durch Drehrohröfen.

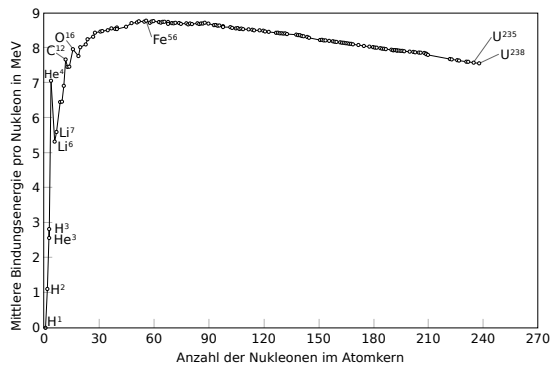
Die Eisenerzeugung in Elektroöfen lohnt allerdings nur, wenn Strom in ausreichender Menge und kostengünstig bereitgestellt werden kann. Je nach Güte von Eisenerz und Kohlenstoffträger liegt der Energieverbrauch zwischen 2000 und 2500 kWh pro Tonne Roheisen.



Kubisch-raumzentrierte Elementarzelle eines Eisenkristalls

5 Eigenschaften

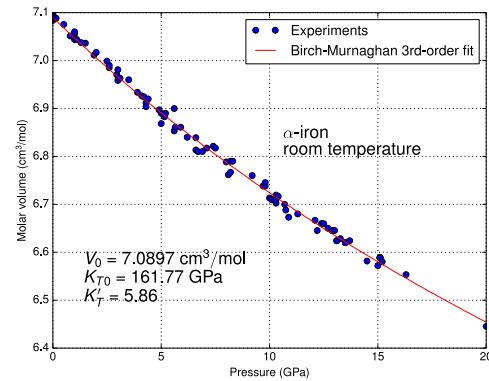
5.1 Physikalische Eigenschaften



Kernbindungsenergie in Abhängigkeit von der Kernmasse: Kurvenmaximum in der Nähe von ⁵⁶Fe

Das durchschnittliche Eisenatom hat etwa die 56-fache Masse eines Wasserstoffatoms. Der Atomkern des Eisenisotops ⁵⁶Fe weist einen der größten Massendefekte und damit eine der höchsten Bindungsenergien pro Nukleon aller Atomkerne auf. Deshalb wird es als Endstufe bei der Energieerzeugung durch Kernfusion in den Sternen betrachtet. Den absolut höchsten Massendefekt hat jedoch ⁶²Ni, gefolgt von ⁵⁸Fe, und erst auf dem dritten Platz folgt ⁵⁶Fe^[41].

Bei Raumtemperatur ist die allotrope Modifikation des reinen Eisens das Ferrit oder α -Eisen. Diese Modifikation



Molvolumen als Funktion des Drucks für α -Eisen bei Raumtemperatur



hochreines (99,97 %+) elektrolytisch hergestelltes Eisen

kristallisiert in einer kubisch-raumzentrierten Kristallstruktur (Wolfram-Typ) in der Raumgruppe $Im\bar{3}m$ (Raumgruppen-Nr. 229) mit dem Gitterparameter $a = 286,6 \text{ pm}$ sowie zwei Formeleinheiten pro Elementarzelle. Diese Modifikation ist unterhalb von $910 \text{ }^\circ\text{C}$ stabil. Oberhalb dieser Temperatur wandelt es sich in die γ -Modifikation oder Austenit um. Diese

besitzt eine kubisch-flächenzentrierte Struktur (Kupfer-Typ) mit der Raumgruppe $Fm\bar{3}m$ (Nr. 225) und dem Gitterparameter $a = 364,7$ pm. Eine dritte Strukturänderung erfolgt bei 1390 °C, oberhalb dieser Temperatur bis zum Schmelzpunkt bei 1535 °C ist wieder das kubisch-raumzentrierte δ -Ferrit stabil. Bei hohem Druck finden ebenfalls Phasenübergänge statt: bei Drücken von mehr als etwa 10 bis 15 GPa und Temperaturen von höchstens einigen hundert Grad Celsius wandelt sich α -Eisen in ε -Eisen, dessen Kristallgitter eine hexagonal dichteste Kugelpackung (hcp) ist, um; bei höheren Temperaturen bis hin zum Schmelzpunkt findet eine entsprechende Umwandlung von γ -Eisen zu ε -Eisen statt, wobei der Druck des Phasenübergangs mit der Temperatur steigt. Darüber hinaus gibt es möglicherweise einen weiteren Phasenübergang von ε -Eisen nach β -Eisen, der bei etwa 50 GPa und mehr als 1500 K liegt; allerdings ist die Existenz dieser β -Phase umstritten, und auch zu ihrer Kristallstruktur gibt es verschiedene Befunde, u.a. eine orthorhombische oder eine doppelte hcp-Struktur.^[42] Diese Umwandlungen nennt man auch die „Polymorphie des Eisens“.^[6]

Das Fehlen einer β -Phase in der Standard-Nomenklatur der Eisenallotrope rührt daher, dass früher angenommen wurde, dass die Änderung des Magnetismus am Curiepunkt bei 766 °C von Ferro- auf Paramagnetismus mit einer Strukturänderung einhergeht und somit eine weitere Modifikation zwischen 766 und 910 °C existiert, die als β -Modifikation oder β -Eisen bezeichnet wurde. Dies stellte sich jedoch nach genaueren Messungen als falsch heraus.

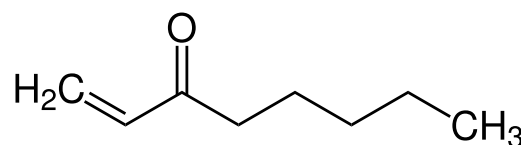
Der Schmelzpunkt des Eisens ist experimentell nur für Drücke von bis zu etwa 50 GPa gut bestimmt. Bei höheren Drücken liefern verschiedene experimentelle Techniken stark unterschiedliche Ergebnisse. So lokalisieren verschiedene Studien den γ - ε -Tripelpunkt bei Drücken, die sich um mehrere Dutzend Gigapascal unterscheiden, und liegen bei den Schmelztemperaturen unter hohem Druck um 1000 K und mehr auseinander. Im Allgemeinen ergeben molekulardynamische Modellrechnungen und Schockexperimente höhere Temperaturen und steilere Schmelzkurven als statische Experimente in Diamantstempelzellen.^[43]

5.2 Chemische Eigenschaften

Eisen ist beständig an trockener Luft, in trockenem Chlor sowie in konzentrierter Schwefelsäure, konzentrierter Salpetersäure und basischen Agenzien (außer heißer Natronlauge) mit einem pH-Wert größer als 9. In Salzsäure sowie verdünnter Schwefel- oder Salpetersäure löst sich Eisen rasch unter Entwicklung von Wasserstoff. An feuchter Luft und in Wasser, das Sauerstoff oder Kohlenstoffdioxid enthält, wird Eisen leicht unter Bildung von Eisenoxidhydrat (*Rosten*) oxidiert. Wird Eisen an trockener Luft erhitzt, so bildet sich eine dünne Schicht von Eisen(II,III)-oxid (Fe_3O_4 , *Eisenhammerschlag*), die stark

gefärbt ist (*Anlassen*). Sehr fein verteiltes, *pyrophores* Eisen reagiert schon bei Raumtemperatur mit Sauerstoff aus der Luft unter Feuererscheinung. Brennende Stahlwolle reagiert in feuchtem Chlor-Gas kräftig unter Bildung von braunen Eisen(III)-chlorid-Dämpfen. Wird ein Gemisch aus Eisen- und Schwefelpulver (im Gewichtsverhältnis 7:4) erhitzt, so entsteht vorwiegend Eisen(II)-sulfid.^[44] Auch mit weiteren Nichtmetallen wie Phosphor, Silicium und Kohlenstoff bildet Eisen bei erhöhter Temperatur Phosphide, Silicide oder Carbide.^[45]

5.3 Geruch des Eisens



Strukturformel von 1-Octen-3-on

Reines Eisen ist geruchlos. Der typische, als metallisch klassifizierte Geruch, wenn man Eisengegenstände berührt, entsteht durch eine chemische Reaktion von Stoffen des Schweißes und des Fetts der Haut mit den sich dabei bildenden zweiwertigen Eisenionen.^[46]

Einer der wichtigsten Duftträger ist 1-Octen-3-on, das noch in großer Verdünnung pilzartig-metallisch riecht. Vorstufe der Geruchsstoffe sind Lipidperoxide. Diese entstehen, wenn Hautfett durch bestimmte Enzyme oder nichtenzymatische Prozesse (z. B. UV-Anteil des Lichts) oxidiert werden. Diese Lipidperoxide werden dann durch die zweiwertigen Eisenionen zersetzt, wobei die Duftstoffe gebildet werden. Die zweiwertigen Eisenionen entstehen durch Korrosion des Eisens bei Berührung mit dem Handschweiß, der korrosive organische Säuren und Chloride enthält.

Beim Verreiben von Blut auf der Haut entsteht ein ähnlicher Geruch. Blut enthält ebenfalls Eisenionen.

6 Isotope

Eisen hat 27 Isotope und zwei Kernisomere, von denen vier natürlich vorkommende, stabile Isotope sind. Sie haben die relativen Häufigkeiten: ^{54}Fe (5,8 %), ^{56}Fe (91,7 %), ^{57}Fe (2,2 %) und ^{58}Fe (0,3 %). Das Isotop ^{60}Fe hat eine Halbwertszeit von 2,62 Millionen Jahren^[11], ^{55}Fe von 2,737 Jahren und das Isotop ^{59}Fe eine von 44,495 Tagen.^[47] Die restlichen Isotope und die beiden Kernisomere haben Halbwertszeiten zwischen weniger als 150 ns und 8,275 Stunden. Die Existenz von ^{60}Fe zu Beginn der Entstehung des Planetensystems konnte durch den Nachweis einer Korrelation zwischen den Häufigkeiten

von ^{60}Ni , dem Zerfallsprodukt von ^{60}Fe , und den Häufigkeiten der stabilen Fe-Isotope in einigen Phasen mancher Meteorite (beispielsweise in den Meteoriten *Semurkona* und *Chervony Kut*) nachgewiesen werden. Möglicherweise spielte die freigesetzte Energie beim radioaktiven Zerfall von ^{60}Fe , neben der atomaren Zerfallsenergie des ebenfalls vorhandenen radioaktiven ^{26}Al , eine Rolle beim Aufschmelzen und der Differenzierung der Asteroiden direkt nach ihrer Bildung vor etwa 4,6 Milliarden Jahren. Heute ist das ursprünglich vorhanden gewesene ^{60}Fe in ^{60}Ni zerfallen. Die Verteilung von Nickel- und Eisenisotopen in Meteoriten erlaubt es, die Isotopen- und Elementhäufigkeit bei der Bildung des Sonnensystems zu messen und die vor und während der Bildung des Sonnensystems vorherrschenden Bedingungen zu erschließen.

Von den stabilen Eisenisotopen besitzt nur ^{57}Fe einen von null verschiedenen Kernspin.

7 Verwendung



Die älteste gusseiserne Brücke (1779/80) über den Severn

Eisen ist der Hauptbestandteil von Stahl. Eisen ist mit 95 Prozent Gewichtsanteil an genutzten Metallen das weltweit meistverwendete. Der Grund dafür liegt in seiner weiten Verfügbarkeit, welche es recht preiswert macht, und darin, dass es hervorragende Festigkeit und Zähigkeit beim Eingehen von Legierungen mit anderen Metallen wie Chrom, Molybdän und Nickel, erreicht, die es für viele Bereiche in der Technik zu einem Grundwerkstoff machen. Es wird bei der Herstellung von Landfahrzeugen, Schiffen und im gesamten Baubereich (Stahlbetonbau, Stahlbau) eingesetzt.

Eisen ist (neben Cobalt und Nickel) eines jener drei ferromagnetischen Metalle, die mit ihrer Eigenschaft den großtechnischen Einsatz des Elektromagnetismus u. a. in Generatoren, Transformatoren, Drosseln, Relais und Elektromotoren ermöglichen. Es wird rein oder u. a. mit Silicium, Aluminium, Kobalt oder Nickel (siehe Mu-Metall) legiert und dient als weichmagnetisches Kernma-

terial zur Führung von Magnetfeldern, zur Abschirmung von Magnetfeldern oder zur Erhöhung der Induktivität. Es wird hierzu massiv und in Form von Blechen und Pulver (**Pulverkerne**) produziert.

Reines Eisenpulver wird auch in der Chemie verwendet.

Industriell sind verschiedene Stähle verbreitet; in Deutschland sind etwa 7.500 Sorten genormt. Eisen wird in den nachfolgend angeführten Formen genutzt:

- **Roheisen** enthält vier bis fünf Prozent Kohlenstoff sowie unterschiedliche Anteile an Schwefel, Phosphor und Silicium. Es ist ein Zwischenprodukt in der Herstellung von Gusseisen und Stahl.
- **Gusseisen** enthält 2,06 bis 6,67 % Kohlenstoff und weitere Legierungselemente, wie beispielsweise Silicium und Mangan. In Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit liegt der Kohlenstoff im Gusseisen als **Carbid** oder elementar als **Graphit** vor. In Anlehnung an das Aussehen der Bruchflächen spricht man im ersten Fall von weißem und im zweiten Fall von grauem Gusseisen. Gusseisen ist sehr hart und spröde. Es lässt sich gewöhnlich nicht plastisch verformen (schmieden).
- **Stahl** enthält zwischen 0,06 % und 2,06 % Kohlenstoff. Im Gegensatz zu Gusseisen ist er plastisch umformbar. Durch Legieren, sowie durch eine geeignete Kombination von thermischer Behandlung (s. **Härten**) und plastischer Formung (**Kaltwalzen**) können die mechanischen Eigenschaften des Stahls in weiten Grenzen variiert werden.
 - Bei unlegierten Stählen mit einem Kohlenstoffgehalt bis 0,8 % spricht man von **Baustahl**, bei über 0,8 % von **Werkzeugstahl**.

In der Medizin werden eisenhaltige Präparate als **Antianämika** eingesetzt, kausal in der Behandlung von **Eisenmangelanämien** und additiv in der Behandlung von durch andere Ursachen hervorgerufenen **Anämien**.

8 Biologische Bedeutung

8.1 Bestandteil von Lebewesen

Eisen ist ein essentielles **Spurenelement** für fast alle Lebewesen, bei Tieren vor allem für die Blutbildung. In pflanzlichen Organismen beeinflusst es die Photosynthese sowie die Bildung von Chlorophyll und Kohlenhydraten.^[44] Im Körper von Menschen und Tieren liegt es oxidiert als Eisen(II) und Eisen(III) vor. Als Zentralatom des Kofaktors **Häm b** in Hämoglobin und Myoglobin und in **Cytochromen** ist es bei vielen Tieren und beim Menschen für Sauerstofftransport und -speicherung sowie für die Elektronenübertragung verantwortlich. In diesen

Proteinen ist es von einem planaren Porphyrinring umgeben.

Weiter ist Eisen Bestandteil von Eisen-Schwefel-Komplexen (so genannte Eisen-Schwefel-Cluster) in vielen Enzymen, beispielsweise Nitrogenasen, Hydrogenasen oder den Komplexen der Atmungskette. Als dritte wichtige Klasse der Eisenenzyme sind die so genannten Nicht-Häm-Eisenenzyme zu nennen, beispielsweise die Methan-Monooxygenase, Ribonukleotid-Reduktase und das Hämerythrin. Diese Proteine nehmen in verschiedenen Organismen Aufgaben wahr: Sauerstoffaktivierung, Sauerstofftransport, Redoxreaktionen und Hydrolysen. Ebenso wichtig ist dreiwertiges Eisen als Zentralion im Enzym Katalase, das in den Peroxisomen der Zellen das im Stoffwechsel entstehende Zellgift Wasserstoffperoxid abbaut.

Die Speicherung des Eisens erfolgt intrazellulär in dem Enzym Ferritin (20 % Eisenanteil) und dessen Abbauprodukt Hämosiderin (37 % Eisenanteil). Transportiert wird Eisen durch Transferrin.^[48]

8.2 Externer Elektronendonator und -akzeptor

Einige Bakterien nutzen Fe(III) als Elektronenakzeptor für die Atmungskette. Sie reduzieren es damit zu Fe(II), was eine Mobilisierung von Eisen bedeutet, da die meisten Fe(III)-Verbindungen schwer wasserlöslich sind, die meisten Fe(II)-Verbindungen aber gut wasserlöslich. Einige phototrophe Bakterien nutzen Fe(II) als Elektronendonator für die Reduktion von CO₂.^[49]

9 Medizinische Bedeutung

9.1 Eisenbedarf und Eisenmangel

→ Hauptartikel: Eisen-Stoffwechsel und Eisenmangel

Vor allem Frauen vor den Wechseljahren leiden häufig an Eisenmangel, der Grund dafür ist die Menstruation. Sie sollten circa 15 Milligramm Eisen pro Tag zuführen, während der Tagesbedarf eines erwachsenen Mannes nur etwa 10 Milligramm beträgt. Außerdem verlieren Frauen zusätzlich bei der Geburt eines Kindes circa 1000 Milligramm Eisen. Durch die gleichzeitige Einnahme von Vitamin C wird die Resorptionsquote von Eisen deutlich erhöht. Besonders reichhaltig ist Eisen in Blutwurst, Leber, Hülsenfrüchten und Vollkornbrot enthalten und nur gering in (Muskel-)Fleisch. Gleichzeitiger Verzehr von Milchprodukten, Kaffee oder schwarzem Tee hemmen jedoch die Eisenaufnahme.

9.2 Toxizität und Eisenüberladung

9.2.1 Menschen

Eisen ist ein wichtiges Spurenelement für den Menschen, kann jedoch bei Überdosierung auch schädlich wirken.^{[50][51][52]} Davon sind insbesondere Menschen betroffen, die an Hämochromatose, einer Regulationsstörung der Eisenaufnahme im Darm, leiden. Das Eisen reichert sich im Verlauf der Krankheit in der Leber an und führt dort zu einer Siderose und weiteren Organschäden.

Weiterhin steht Eisen im Verdacht, Infektionskrankheiten, z. B. Tuberkulose zu fördern, da die Erreger zur Vermehrung ebenfalls Eisen benötigen.^[53] Außerdem kommt es bei einigen neurodegenerativen Erkrankungen wie beispielsweise der Parkinson- oder auch der Alzheimer-Krankheit zu Eisenablagerungen in bestimmten Bereichen des Gehirns. Es ist zurzeit unklar, ob dies eine Ursache oder eine Folge der Erkrankung ist.^[54]

Daher sind Eisenpräparate wie auch andere Nahrungsergänzungsmittel nur zu empfehlen, wenn ein ärztlich diagnostizierter Eisenmangel vorliegt.

9.2.2 Pflanzen

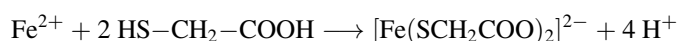
Auch in pflanzlichen Organismen ist Eisen ein essentielles Spurenelement. Es beeinflusst die Photosynthese sowie die Bildung von Chlorophyll und Kohlenhydraten.^[44] Eisenüberladung kann sich jedoch in Form von Eisentoxizität bemerkbar machen. In Böden liegt es bei normalen pH-Werten als Fe(OH)₃ vor. Bei geringem Sauerstoffgehalt des Bodens wird Eisen(III) durch Reduktion zum Eisen(II) reduziert. Dadurch wird das Eisen in eine lösliche, für Pflanzen verfügbare Form gebracht. Nimmt diese Verfügbarkeit unter anaeroben Bedingungen, zum Beispiel durch Bodenverdichtung, zu stark zu, können Pflanzenschäden durch Eisentoxizität auftreten, eine Erscheinung, die besonders in Reisanbaugebieten bekannt ist.^[55]

10 Nachweis

Bei der Nachweisreaktion für Eisen-Ionen werden zunächst die beiden Kationen Fe²⁺ und Fe³⁺ unterschieden.

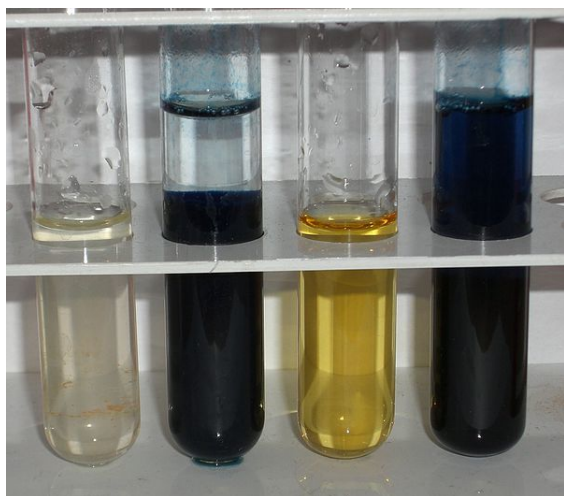
10.1 Eisennachweis mit Thioglykolsäure

Mit Thioglykolsäure lassen sich Fe²⁺- und Fe³⁺-Ionen nachweisen:



Bei Anwesenheit von Fe²⁺- oder Fe³⁺-Ionen entsteht eine intensive Rotfärbung.

10.2 Eisennachweis mit Hexacyanoferraten



Eisensalze und deren Nachweise mit Blutlaugensalzen

Die Fe^{2+} -Ionen lassen sich mit rotem Blutlaugensalz nachweisen:

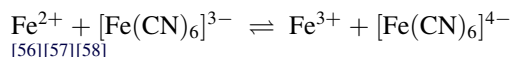


Fe^{3+} -Ionen lassen sich mit gelbem Blutlaugensalz nachweisen:



Bei beiden Nachweisreaktionen entsteht tiefblaues Berliner Blau, ein wichtiger Farbstoff. Es läuft keine Komplexbildungsreaktion ab, sondern lediglich ein Kationenaustausch.

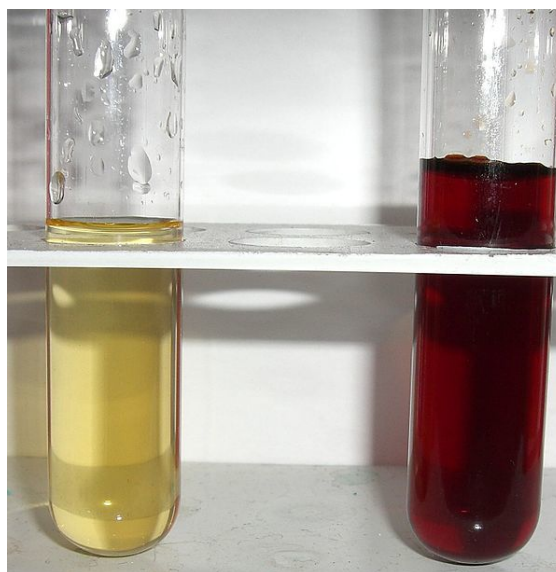
Beide Pigmente sind weitgehend identisch, da zwischen ihnen ein chemisches Gleichgewicht besteht. Dabei geht Fe^{3+} in Fe^{2+} über und umgekehrt:



Die besonders intensive blaue Farbe des Komplexes entsteht durch Metall-Metall-Charge-Transfers zwischen den Eisen-Ionen. Es ist bemerkenswert, dass dieses bekannte Eisennachweisreagenz selbst Eisen enthält, welches durch die Cyanidionen chemisch gut maskiert wird (Innerorbitalkomplex) und somit die Grenzen der chemischen Analytik aufzeigt.

10.3 Eisennachweis mit Thiocyanaten

Alternativ kann man Eisen(III)-salze mit Thiocyanaten (Rhodaniden) nachweisen. Diese reagieren mit Eisen(III)-Ionen zu Eisen(III)-thiocyanat:^[59]



Eisen(III)-Lösung und Eisen(III)-thiocyanat



Es bildet sich das tiefrote Eisen(III)-thiocyanat ($\text{Fe}(\text{SCN})_3$), welches in Lösung bleibt. Allerdings stören einige Begleitkationen diesen Nachweis (z. B. Co^{2+} , Mo^{3+} , Hg^{2+} , Überschuss an Mineralsäuren), so dass u. U. ein Kationentrenngang durchgeführt werden muss.

11 Verbindungen

11.1 Wertigkeiten und Oxidationsstufen

- Fe^{2-} , in $[\text{Fe}(\text{CO})_4]^{2-}$, $[\text{Fe}(\text{CO})_2(\text{NO})_2]$ hier ist der $(\text{NO})^+$ -Ligand ein Kation
- Fe^{1-} , in $[\text{Fe}_2(\text{CO})_8]^{2-}$
- Fe^0 , als $\text{Fe}(\text{CO})_5$, $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ sowie $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$
- Fe^{1+} , äußerst ungewöhnlich, z. B. als $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{NO}]^{2+}$. (Ringprobe, Nachweis von NO_3^-)
- Fe^{2+} , quasi Abgabe der 4s-Elektronen
- Fe^{3+} , Hauptoxidationszahl, quasi Abgabe der 4s-Elektronen und gleichmäßige Besetzung der 3d-Orbitale durch Abgabe eines 3d-Elektrons; diese Ionen sind fast farblos. Lösungen von Fe(III)-Salzen reagieren stark sauer und sind gelb gefärbt. Die Farbe entsteht durch Charge-transfer-Banden von Hydroxo-Ionen, wie bei $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}]^{2+}$.
- Fe^{4+} , kommt in Li_2FeO_3 , BaFeO_3 u. a. sowie in den Katalysezyklen einiger Enzyme vor (zum Beispiel Cytochrom-c-Oxidase, Cytochrom P450, Peroxidasen),

- Fe^{5+} , FeO_4^{3-}
- Fe^{6+} , ist selten (beispielsweise in K_2FeO_4 , BaFeO_4).

11.2 Oxide



Eisenoxidpigment

Eisen bildet mit Sauerstoff zweiwertige und dreiwertige Oxide:

- *Eisen(III)-oxid* (Fe_2O_3) ist eine rote bis braune Substanz und entsteht durch Oxidation von Eisen im Sauerstoffüberschuss. In der Natur tritt es in Form der Minerale Hämatit und Maghemit auf.
- *Eisen(II,III)-oxid* (Fe_3O_4) entsteht auf natürlichem Wege durch vulkanische Vorgänge oder beim direkten Verbrennen von Eisen, z. B. mit dem Schneidbrenner als Eisenhammerschlag und wird als Mineral als Magnetit bezeichnet.
- *Eisen(II)-oxid* (FeO) entsteht nur bei der vorsichtigen Zersetzung von Eisen(II)-oxalat FeC_2O_4 im Vakuum. Es ist schwarz und bis $560\text{ }^\circ\text{C}$ instabil. Als Mineral Wüstit entsteht es meist aus der Umwandlung von Magnetit bei hohen Temperaturen.

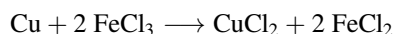
Da diese Oxide keine feste Schutzschicht bilden, oxidiert ein der Atmosphäre ausgesetzter Eisenkörper vollständig. Die poröse Oxidschicht verlangsamt den Oxidationsvorgang, kann ihn jedoch nicht verhindern, weshalb das Brünieren als schwacher Schutz vor Korrosion dient.^[60] Wenn Eisenkörper vor dem endgültigen Verrosten eingesammelt und dem Recycling zugeführt werden, sind verrostetes Eisen und verrosteter Stahl bei der Stahlproduktion im Elektro-Schmelzofen ein begehrter und wertvoller Sauerstoffträger. Dieser Sauerstoff im Eisenschrott wirkt beim „Stahlkochen“ als Oxidationsmittel, um ungewünschte qualitätsmindernde Beimengungen (z. B. Leichtmetalle) zu oxidieren (verbrennen).

Eisenoxide und Eisenhydroxide werden als Lebensmittelzusatzstoffe verwendet (E 172).

11.3 Salze

Eisen bildet zweiwertige und dreiwertige Salze:

- *Eisen(II)-chlorid* ($\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) wird angewendet zum Ausfällen von Sulfiden, Faulgasentschwefelung, Biogasentschwefelung, Chromatreduzierung und Phosphatelimination; dazu gehört die Simultanfällung.
- *Eisen(II)-sulfat* ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) wird wegen seiner Farbe auch Grünsalz genannt, als Mineral Melantherit. Anwendungen wie beim Eisen(II)-chlorid, sowie bei getrocknetem Eisen(II)-sulfat als Chromatreduzierer speziell im Zement gegen die Chromatallergie.
- *Eisen(III)-chlorid* ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kann Kupfer oxidieren und lösen; deshalb kann man wässrige Eisen(III)-chlorid-Lösungen zum schonenden Ätzen von Leiterplatten verwenden.



- *Eisen(III)-chloridsulfat* (FeClSO_4)

Alle Eisensalze werden unter anderem verwendet als Flockungsmittel und zur Phosphatelimination, dazu gehören die Vorfällung, Simultanfällung, Nachfällung und Flockenfiltration sowie das Ausfällen von Sulfiden, Faulgasentschwefelung und Biogasentschwefelung.

11.4 Weitere Eisenverbindungen

Einzelne Eisenverbindungen:

- *Eisencarbid* (Fe_3C)
- *Eisenpentacarbonyl* ($\text{Fe}(\text{CO})_5$), auch IPC (von en: *iron pentacarbonyl*) genannt, entsteht unter Druck aus Eisen und Kohlenmonoxid und bildet nach seiner Zersetzung neben Kohlenmonoxid ein besonders reines Eisenpulver, das Carbonyleisen. Weitere Eisencarbonyle sind $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ und $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$.
- Ferrocen, eine (Sandwichverbindung) aus der Stoffgruppe der Metallocene.

12 Einzelnachweise

- [1] Harry H. Binder: *Lexikon der chemischen Elemente*, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1999, ISBN 3-7776-0736-3.
- [2] Die Werte für die Eigenschaften (Infobox) sind, wenn nicht anders angegeben, aus www.webelements.com (Eisen) entnommen.
- [3] CIAAW, Standard Atomic Weights Revised 2013.

- [4] Ludwig Bergmann, Clemens Schaefer, Rainer Kassing: *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band 6: Festkörper. 2. Auflage, Walter de Gruyter, 2005, ISBN 3-11-017485-5, S. 361.
- [5] Die Werte für die Eigenschaften (Infobox) sind, wenn nicht anders angegeben, aus www.webelements.com (Eisen) entnommen.
- [6] K. Schubert: *Ein Modell für die Kristallstrukturen der chemischen Elemente*. In: *Acta Crystallographica*. 1974, B30, S. 193–204 (doi:10.1107/S0567740874002469).
- [7] Yiming Zhang, Julian R. G. Evans, Shoufeng Yang: *Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks*. In: *Journal of Chemical & Engineering Data*. 56, 2011, S. 328–337 (doi:10.1021/je1011086).
- [8] Die Werte für die Eigenschaften (Infobox) sind, wenn nicht anders angegeben, aus www.webelements.com (Eisen) entnommen.
- [9] William M. Haynes: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 92. Auflage. Taylor & Francis, 2011, ISBN 978-1-4398-5511-9 (hbcnetbase.com).
- [10] Die Werte für die Eigenschaften (Infobox) sind, wenn nicht anders angegeben, aus www.webelements.com (Eisen) entnommen.
- [11] G. Rugel, T. Faestermann, K. Knie, G. Korschinek, M. Poutivtsev, D. Schumann, N. Kivel, I. Günther-Leopold, R. Weinreich, M. Wohlmuther: *New Measurement of the ⁶⁰Fe Half-Life*. In: *Physical Review Letters*. 103, 2009, S. 072502, doi:10.1103/PhysRevLett.103.072502.
- [12] Datenblatt *Iron* bei Sigma-Aldrich, abgerufen am 29. März 2011 (PDF).
- [13] Für Stoffe ist seit dem 1. Dezember 2012, für Gemische seit dem 1. Juni 2015 nur noch die GHS-Gefahrstoffkennzeichnung gültig. Die EU-Gefahrstoffkennzeichnung ist daher nur noch auf Gebinden zulässig, welche vor diesen Daten in Verkehr gebracht wurden.
- [14] Datenblatt *Eisen* (PDF) bei Carl Roth, abgerufen am 14. Dezember 2010. Dies gilt nur für Pulver, kompaktes Eisen ist ohne Gefahrensymbole/R-/S-Sätze.
- [15] Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953, S. 6.
- [16] Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953, S. 38.
- [17] *Meteoritics & Planetary Science*, The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade, 20. Mai 2016
- [18] Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953, S. 40.
- [19] Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953, S. 44.
- [20] Charles Burney: *Historical Dictionary of the Hittites. Historical Dictionaries of Ancient Civilizations and Historical Eras*. Scarecrow Press, 2004. ISBN 9780810865648. S. 135, 136.
- [21] Richard A. Gabriel: *The Great Armies of Antiquity*. Greenwood Publishing Group, 2002. ISBN 9780275978099. S. 75.
- [22] Wolfgang Helck: *Eisen*. In: Wolfgang Helck, Eberhard Otto (Hrsg.): *Lexikon der Ägyptologie*. Band 1, Harrassowitz, Wiesbaden 1975, Spalte 1209–1210.
- [23] Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953, S. 39.
- [24] Eine Analyse des Eisendolchs wurde bisher von der Verwaltung des Ägyptischen Museums verweigert, daher ist unbekannt, ob es sich um Meteoriteneisen oder irdisches Eisen handelt, siehe Bericht des PM-Magazins: *7 Dinge, die es nicht geben dürfte - oder? (Memento vom 31. Juli 2013 im Internet Archive)*
- [25] Howard Vyse: *Operations carried on at the Pyramids of Gizeh in 1837*. Band 1, Fraser, London 1840, S. 275–276.
- [26] Alfred Lucas, John R. Lucas: *Ancient Egyptian Materials and Industries*. 4. Aufl., Arnold, London 1962, S. 237.
- [27] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: *Gemeinfassliche Darstellung des Eisenhüttenwesens*. 17. Auflage, Stahleisen, Düsseldorf 1970/71, S. 5.
- [28] Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953, S. 45.
- [29] Mineralienatlas:Mineralienportrait/Eisen.
- [30] Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953, S. 9-11.
- [31] Handbook of Mineralogy - Iron (englisch, 57 kB; PDF).
- [32] IMA/CNMNC List of Mineral Names - Iron (englisch, PDF 1,8 MB; S. 137).
- [33] Mindat - Localities for Iron.
- [34] Martin Okrusch, Siegfried Matthes: *Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. 7. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2005, ISBN 3-540-23812-3, S. 22.
- [35] Stefan Weiß: *Das große Lapis Mineralienverzeichnis*. 5. Auflage. Christian Weise Verlag, München 2008, ISBN 978-3-921656-17-4.
- [36] Mineralienatlas:Josephinit.
- [37] Webmineral – Mineral Species sorted by the element Fe (Iron).
- [38] United States Geological Survey: *World Production* (PDF; 298 kB).
- [39] World Steel Association: *Daten auf der Homepage abrufbar*.

- [40] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: *Gemeinfassliche Darstellung des Eisenhüttenwesens*. 17. Auflage, Stahleisen, Düsseldorf 1970/71, S. 103–118.
- [41] M. P. Fewell: The atomic nuclide with the highest mean binding energy. In: *American Journal of Physics*. 63, Nr. 7, 1995, S. 653–658. doi:10.1119/1.17828.
- [42] Reinhard Boehler: High-pressure experiments and the phase diagram of lower mantle and core materials. In: *American Geophysical Union (Hrsg.): Review of Geophysics*. 38, 2000, S. 221–245. doi:10.1029/1998RG000053.
- [43] Reinhard Boehler, M. Ross Properties of Rocks and Minerals – High-Pressure Melting. In: *Mineral Physics*, 2. Elsevier, 2007, S. 527–541.
- [44] Eintrag zu *Eisen*. In: *Römpp Online*. Georg Thieme Verlag, abgerufen am 26. Mai 2014.
- [45] Wissenschaft-Online-Lexika: *Eintrag zu Eisen im Lexikon der Chemie*, abgerufen am 9. Januar 2012.
- [46] D. Glindemann, A. Dietrich, H.-J. Staerk und P. Kuschk *Die zwei Gerüche des Eisens bei Berührung und unter Säureeinwirkung – (Haut)Carbonylverbindungen und Organophosphine*, *Angewandte Chemie*, 118 (42), (2006), S. 7163–7166 (doi:10.1002/ange.200602100).
- [47] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, A. H. Wapstra: „The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties“ (PDF; 1,0 MB), in: *Nuclear Physics A*, 729, 2003, S. 3–128.
- [48] Eintrag zu *Ferritin*. In: *Römpp Online*. Georg Thieme Verlag, abgerufen am 26. Mai 2014.
- [49] F. Widdel, S. Schnell, S. Heising, A. Ehrenreich, B. Assmus, B. Schink: *Ferrous iron oxidation by anoxygenic phototrophic bacteria*. In: *Nature* Vol. 362, 1993, S. 834–836.
- [50] Y. Kohgo, K. Ikuta, T. Ohtake, Y. Torimoto, J. Kato: *Body iron metabolism and pathophysiology of iron overload*. In: *International journal of hematology*. Band 88, Nummer 1, Juli 2008, S. 7–15, doi:10.1007/s12185-008-0120-5. PMID 18594779. PMC 2516548 (freier Volltext).
- [51] M. Auerbach, H. Ballard: *Clinical use of intravenous iron: administration, efficacy, and safety*. In: *Hematology / the Education Program of the American Society of Hematology. American Society of Hematology. Education Program*. Band 2010, 2010, S. 338–347, doi:10.1182/asheducation-2010.1.338. PMID 21239816.
- [52] J. M. McDermid, B. Lönnerdal: *Iron*. In: *Advances in nutrition (Bethesda, Md.)*. Band 3, Nummer 4, Juli 2012, S. 532–533, doi:10.3945/an.112.002261. PMID 22797989. PMC 3649722 (freier Volltext).
- [53] Schaible UE, Kaufmann SH: Iron and microbial infection. In: *Nat. Rev. Microbiol.* 2, Nr. 12, Dezember 2004, S. 946–953. doi:10.1038/nrmicro1046. PMID 15550940.
- [54] Medizin - Kommunikation: *DEGUM: Parkinson-Erkrankung vor dem Ausbruch erkennen*. Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften, Pressemitteilung vom 6. Juli 2006 beim Informationsdienst Wissenschaft (idw-online.de), abgerufen am 20. Dezember 2014.
- [55] Günter Fellenberg: *Chemie der Umweltbelastung*, 3. Auflage, Verlag B. G. Teubner, Stuttgart 1997, S. 158, ISBN 3-519-23510-2.
- [56] A. F. Holleman, E. Wiberg, N. Wiberg: *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. 101. Auflage. de Gruyter, Berlin 1995, ISBN 3-11-012641-9 (eingeschränkte Vorschau in der Google-Buchsuche).
- [57] Jander, Blasius: *Lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie*, 13. Auflage.
- [58] Ehlers: *Analytik I*, 8. Auflage.
- [59] E. Schweda: *Jander/Blasius: Anorganische Chemie I - Einführung & Qualitative Analyse*. 17. Auflage. Hirzel, 2012, ISBN 978-3-7776-2134-0. S. 337.
- [60] Chemie für Ingenieure, Pearson Deutschland GmbH, 2008, ISBN 3-8273-7267-4, S. 256, eingeschränkte Vorschau in der Google-Buchsuche

13 Literatur

- Wilhelm Baer: *Das Eisen : Seine Geschichte, Gewinnung und Verarbeitung. Handbuch für Eisen gießer, Maschinenbauern, Gewerbetreibende, Fabrikanten und Bauherren*. Leipzig 1862 (Digitalisat)
- Ludwig Beck: *Die Geschichte des Eisens in technischer und kulturgeschichtlicher Beziehung*. Band 1–5, Vieweg, Braunschweig 1884–1903.
 - Digitalisat: Teil 1 Teil 2 Teil 3 Teil 4
- Harry H. Binder: *Lexikon der chemischen Elemente - das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1999, ISBN 3-7776-0736-3.
- Vagn Fabritius Buchwald: *Iron and steel in ancient times*. Kong. Danske Videnskab. Selskab, Kopenhagen 2005, ISBN 87-7304-308-7.
- Otto Johannsen (im Auftrag des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute): *Geschichte des Eisens*. 3. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1953.
- Otto Johannsen: *Geschichte des Eisens*. Düsseldorf 1925 (Digitalisat)
- Hans Schoppa: *Was der Hochöfner von seiner Arbeit wissen muss*. Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1992, ISBN 3-514-00443-9.
- Verein Deutscher Eisenhüttenleute: *Gemeinfassliche Darstellung des Eisenhüttenwesens*. 17. Auflage, Stahleisen, Düsseldorf 1970/71.

14 Weblinks

 **Commons: Eisen** – Album mit Bildern, Videos und Audiodateien

 **Wiktionary: Eisen** – Bedeutungserklärungen, Wortherkunft, Synonyme, Übersetzungen

 **Wikiquote: Eisen** – Zitate

 **Wikibooks: Werkstoffkunde Metall/ Eisen und Stahl** – Lern- und Lehrmaterialien

 **Wikibooks: Biochemie und Pathobiochemie: Eisen** – Lern- und Lehrmaterialien

 **Wikibooks: Praktikum Anorganische Chemie/ Eisen** – Lern- und Lehrmaterialien

- Mineralienatlas:Eisen im Mineralienatlas
- Mineralienatlas:Mineralienportrait/Eisen im Mineralienatlas
- Eisenherstellung in der Römerzeit bei *die-roemer-online.de*
- Eisengewinnung in vorgeschichtlicher Zeit auf der Internetpräsenz vom Landschaftsmuseum Obermain

Periodensystem der Elemente

Normdaten (Sachbegriff): GND: 4014002-7 | LCCN: sh85068131 | NDL: 00572915

15 Text- und Bildquellen, Autoren und Lizenzen

15.1 Text

- **Eisen** *Quelle:* <https://de.wikipedia.org/wiki/Eisen?oldid=156116074> *Autoren:* Chd, Kurt Jansson, Maveric149, Schewek, Thomasium, Saibling, Kku, Nils, Jed, Gnu1742, Aka, MarianSz, Se7en-dewiki, Mikue, Storchi, Suisui, Marco Krohn, El, StephanKetz, Exil, Epo, Katharina, WolfgangRieger, Crux, Thomasgl, Seewolf, Odin, Sanscolutte, HenrikHolke, Raymond, Juergen Bode, Fedi, Radagast-dewiki, Andrvoss, Derfeu, Balü, Schusch, Aglarech, Waelder, Karl Bednarik, Ktesibios, Stahlkocher, Romanm, Paddy, Zwobot, Foxel, D, Ademant, HaeB, Nikai, Rjh, V Buchta, Hadhuey, Robbot, Karl-Henner, HaSee, Wiegels, Stefan64, Rdb, Naddy, G, Zinnmann, Cstinner, RokerHRO, Perrak, Reyholt, MD!, Jonathan Hornung, Nepomucki, Sinn, Peter200, Darkone, Minos, MFM, Zellreder, Booradley74, Lutz Terheyden, StYxXx, Hystrix, Archivar-dewiki, Hardenacke, Brudersohn, Jan G, Bertonymus, Martin-vogel, Schnargel, Mnh, Ot, Aloiswuest, Thiesi, Solid State, MAK, Johnny Yen, ImAlive, Elwe, Bdk, René Töpfer, Kubrick, Marcus.buchwald, Zoelomat, FEXX, Kühler Grill, Dr. M. Faller, Cepheiden, DasBee, Silberchen, Kam Solusar, Chef, JD, Talos, Carbenium, Pjacobi, NooN, Dundak, Ickle, Juesch, BWBot, Lustiger seth, Jonathan Groß, Leipnizkeks, BerndB, Botteler, Leithian, LoKiLeCh, Ixitixel, Keptniglu, BLueFiSH.as, Hob Gadling, Martin Bahmann, Udo T., Zaungast, AndreasPraefcke, Verwüstung, ToGo, Heinte, Diba, PDD, He3nry, Paelzeur, Jergen, Froggy, FlaBot, Saperaud, Ulfbastel, Emes, Hubertl, Fun4us, Tafkas, Nkler, Schmuckler, Flominator, FireBird, Pumuckl2, Leyo, HdE-ATH, Schnabeltier, RedBot, Atamari, AF666, B.gliwa, Blaue Orchidee, Snipsnapper, Jordi, Kolja21, Ellywa, Scooter, W-j-s, IgNoRaNt, Sgbeer, Kh80, JohannWalter, Daaavid, Mapilem, Tomihahndorf, Yurik, Jxr, Olei, Suit, Markus443, Deadhead, 0r14nd0, Uwe W., Evonymus, Purodha, Sechmet, Dnalar, Bsmuc64, Aph, Jka, Ra'ike, Nepenthes, Eschweiler, Diebu, STBR, Drahreg01, Jackalope, Helison, JFKCom, Bbswl, Henward, Ulm, Dachris, АнтиХрист, Gardini, RobotQuistnix, J. Schwerdtfeger, Bota47, Tscabot, Shshsh, YurikBot, TomR, Andante, Savin 2005, Abrev, Druffeler, RealZeratul, Eryakaas, Wkrautter, SamusAran, Wela49, DerHexer, Hardy42, Kreusch, Schnatz, Revolus, Leutloff, Rauwauwi, MelancholieBot, Augiasstallputzer, AHOR, Norbert Kaiser, KnightMove, Staro1, TBMD, Eskimobot, HerrSievers, Jocksa, Smoritz81, NEUROtiker, PortalBot, Ing. Schröder Walter, LKD, Oxymoron83, Firsthuman, Jü, Wächter, Snoerre, Tobnu, Chlewbob, Mons Maenalus, Centipede, Uweka, DHN-bot-dewiki, Logograph, Leichtbau, Mr T, Speifensender, Richardigel, The doctor, Diddimus, Cjesch, Wunderknaabe, Touch.and.go, Ayacop, The-Force, Btr, Nicolas17, Pendulin, Lamesinthe, K-m, Ljfa-ag, Dou-do, Mitternacht, Church of emacs, Tönjes, PassePorte, Tetris L, Hydra2, Armin P., Parpan05, Roland.chem, Semper, FK1954, Roo1812, BRotondi, Thijs!bot, Dr.cueppers, Hoffmeier, Lechhansl, Martin Stettler, Manuel Heinemann, El., Gleiberg, Escarbot, PhJ, Bernard Ladhenthin, Aufklärung, Muck31, Einsamer Schütze, Simon-Martin, Bücherhexe, JAnDbot, Nicolas G., Czecker, Paul.lohmann, DrDeath, YourEyesOnly, Sebbot, Jtf1976, .anacondabot, Supermartl, Blackbird13, Dispersion, Orci, BetBot-dewiki, Fahrtenleser, Bildungsbürger, Twiss, Kuebi, Alchemist-hp, Xqt, Blaufisch, Jagaloisl, Schwobator, Kat Mandu, Cvf-ps, Dreaven3, Complex, VolkovBot, Merlinor, Gravitophoton, AlnoktaBOT, Klaus M.K., TXiKiBoT, Moros, Rei-bot, Regi51, Eschenmoser, Darillian, Idioma-bot, Roland Kaufmann, Gandolf-dewiki, Synthebot, JWBE, Tobias1983, AlleborgoBot, Mmemotechnik, ChrisHamburg, Krawi, Grenzdebiler, Bugert, Vites, SieBot, Entlinkt, Loveless, Mailtosap, Kibert, Biggerj1, PaterMcFly, Olaffri, Zbisasimone, Gsälbär, OKBot, Nikkis, Rotkaeppchen68, Saltose, Chaperon, Aktionsbot, PipepBot, Christoph Leeb, Tj-lag, Kh555, StSwSo, Amygdala77, Frodogsohl, Pittimann, Björn Bornhöft, Re probst, ToePeu.bot, Alexander 1993, DragonBot, Matthias M., Ute Erb, Steak, Sabora, Viericks, Liuthalas, Guandalug, Kosmologie, U.Name.Me, SilvenenBot, Sprachpflger, ElMeBot, Geitost, LinkFA-Bot, Master Uegly, CarsracBot, Dorfmopp, Numbo3-bot, Vasil', Zorrobot, Soko-SBK, Lucas-bot, KamikazeBot, Jotterbot, Assistent, HeNNy96, Lee2702, FoxtrottBravo, Christian b219, MauritsBot, Xqbot, ArthurBot, GiftBot, Anubis85 KH, AHert, Astrobeamer, MastiBot, Horst Emscher, Almbot, CactusBot, RibotBOT, SassoBot, Rr2000, AStarBot, MorbZ-Bot, Luisamir, Nothere, Onkel Dittmeyer, Der Albraum, TobeBot, Antonsusi, Fredo 93, Mabschaaf, Rilegator, Dinamikbot, EmausBot, Kilon22, Pravidam, Insomnium, ZéroBot, JackieBot, Vergelter, Prüm, RonMeier, Ctebert, Sarras, Sschuerz, Mentibot, WikitanvirBot, ChuispastonBot, Monsieurbecker, Fiver, der Helleher, Mjbmrbot, Aendy, Sadorkan, Deepnightblue, Mischa004, Bodo Kubrak, EberBot, P. S. F. Freitas, MerlIwBot, Ghilt, Boshomi, Salutist, Danbotix, Bleistift2, Sorbas 48, Gretarsson, RainerKöthe, Torvalu4, Nordfeuer, Binse, Dexbot, Rii Subaru, Karin244, JLKiel, ChristianSchd, Buchbibliothek, Berossos, Emeldir, Medajancik, Schneecal4677, GelberBaron, Vincent Amadeus von Goethe, Georg Hügler, Frichte und Anonyme: 317

15.2 Bilder

- **Datei:Binding_energy_curve_-_common_isotopes_DE.svg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/Binding_energy_curve_-_common_isotopes_DE.svg *Lizenz:* Public domain *Autoren:*
- **Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg** *Ursprünglicher Schöpfer:* Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg *User:*Fastfission 20:48, 7. Jan. 2007
- **Datei:Commons-logo.svg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Commons-logo.svg> *Lizenz:* Public domain *Autoren:* This version created by Pumbaa, using a proper partial circle and SVG geometry features. (Former versions used to be slightly warped.) *Ursprünglicher Schöpfer:* SVG version was created by User:Grunt and cleaned up by 3247, based on the earlier PNG version, created by Reidab.
- **Datei:Cubic-body-centered.png** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Cubic-body-centered.png> *Lizenz:* CC-BY-SA-3.0 *Autoren:* own work (transferred from en.WP) *Ursprünglicher Schöpfer:* Daniel Mayer, DrBob
- **Datei:Disambig-dark.svg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Disambig-dark.svg> *Lizenz:* CC-BY-SA-3.0 *Autoren:* Original Commons upload as Logo Begriffsklärung.png by Baumst on 2005-02-15 *Ursprünglicher Schöpfer:* Stephan Baum
- **Datei:Eisen(II),(III).JPG** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Eisen%28II%29%2C%28III%29.JPG> *Lizenz:* Public domain *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* User:Siegert
- **Datei:Eisen(III)-Ionen_und_Thiocyanat.JPG** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b9/Eisen%28III%29-Ionen_und_Thiocyanat.JPG *Lizenz:* Public domain *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* Siegert
- **Datei:Eisen_gediegen_-_Bühl_bei_Kassel.jpg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d8/Eisen_gediegen_-_B%3C%BC%3Dl_bei_Kassel.jpg *Lizenz:* CC BY-SA 3.0 *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* Ra'ike (see also: de:Benutzer:Ra'ike)
- **Datei:Hazard_F.svg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Hazard_F.svg *Lizenz:* Public domain *Autoren:* Converted from EPS file at <http://forum.cptec.org/index.php?showtopic=368> *Ursprünglicher Schöpfer:* Phrood

- **Datei:Hochofenschema.jpg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Hochofenschema.jpg> *Lizenz:* CC-BY-SA-3.0 *Autoren:* ursprünglich von Fume selbst gezeichnet und von Ulrich.fuchs bearbeitet. Unter neuem Namen hochgeladen, da die ursprüngliche Datei durch ein Foto eines Hochofens überschrieben wurde. *Ursprünglicher Schöpfer:* Fume, de:Benutzer:Soebe, Ulrich.fuchs, de:Benutzer:Baikonur
- **Datei:Iron-alpha-pV.svg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Iron-alpha-pV.svg> *Lizenz:* CC BY-SA 4.0 *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* TomR
- **Datei:IronOxidePigmentUSGOV.jpg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/IronOxidePigmentUSGOV.jpg> *Lizenz:* Public domain *Autoren:* ? *Ursprünglicher Schöpfer:* ?
- **Datei:Iron_Bridge.JPG** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Iron_Bridge.JPG *Lizenz:* Public domain *Autoren:* Eigenes Werk (originally at en.wikipedia) *Ursprünglicher Schöpfer:* The Singing Badger
- **Datei:Iron_electrolytic_and_1cm3_cube.jpg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Iron_electrolytic_and_1cm3_cube.jpg *Lizenz:* FAL *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* Alchemist-hp (talk) (www.pse-mendelejew.de)
- **Datei:Krafla_-_Schwefelfeld_4.jpg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/Krafla_-_Schwefelfeld_4.jpg *Lizenz:* CC BY-SA 3.0 *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* Wolfgang Sauber
- **Datei:Limonite_bog_iron_cm01.jpg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Limonite_bog_iron_cm01.jpg *Lizenz:* CC-BY-SA-3.0 *Autoren:* ? *Ursprünglicher Schöpfer:* ?
- **Datei:Oct-1-en-3-on.svg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/Oct-1-en-3-on.svg> *Lizenz:* Public domain *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* Leyo
- **Datei:Philipp_Jakob_Loutherbourg_d._J._002.jpg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Philipp_Jakob_Loutherbourg_d._J._002.jpg *Lizenz:* Public domain *Autoren:* The Yorck Project: 10.000 Meisterwerke der Malerei. DVD-ROM, 2002. ISBN 3936122202. Distributed by DIRECTMEDIA Publishing GmbH. *Ursprünglicher Schöpfer:* Philipp Jakob Loutherbourg der Jüngere
- **Datei:Pig_Iron.jpg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Pig_Iron.jpg *Lizenz:* CC BY-SA 3.0 *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* ChristianSchd Christian Schröder
- **Datei:Weltkarte-Eisenförderung.png** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Weltkarte-Eisenf%C3%B6rderung.png> *Lizenz:* CC BY 3.0 *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* Ökologix
- **Datei:Wikibooks-logo.svg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Wikibooks-logo.svg> *Lizenz:* CC BY-SA 3.0 *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* User:Bastique, User:Ramac et al.
- **Datei:Wikiquote-logo.svg** *Quelle:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Wikiquote-logo.svg> *Lizenz:* Public domain *Autoren:* Eigenes Werk *Ursprünglicher Schöpfer:* Rei-artur
- **Datei:Wiktfavicon_en.svg** *Quelle:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/Wiktfavicon_en.svg *Lizenz:* CC BY-SA 3.0 *Autoren:* ? *Ursprünglicher Schöpfer:* ?

15.3 Inhaltslizenz

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0