

## Verfahren zur Stahlerzeugung

Als Stähle und Eisenwerkstoffe faßt man alle Metall-Legierungen zusammen, bei denen der Gewichtsanteil des Eisens höher ist als der jedes anderen Elements. Eine weitere Unterscheidung ist die von Gußwerkstoffen und Stählen - mit Ausnahme - einiger chromreicher Varianten enthalten letztere höchstens zwei Prozent Kohlenstoff.

Der klassische Rohstoff der Stahlerzeugung ist das Erz mit Eisengehalten von mindestens 30, häufig sogar mehr als 60 Prozent. Dessen bekannte Ressourcen sind weltweit verteilt; man schätzt ihre Menge auf mehr als 100 Milliarden Tonnen, so daß auch in abschätzbarer Zukunft kein Mangel daran auftreten wird. Allerdings stammt der überwiegende Teil der Erzimporte von Industriestaaten derzeit aus lediglich zwei Ländern: Brasilien und Australien.

Deshalb hat Schrott eine so große Bedeutung gewonnen; insbesondere kann man ihn zu den wenigen heimischen Rohstoffen zählen. Weltweit wird gegenwärtig etwa die Hälfte der gesamten erzeugten Stahlmenge daraus erschmolzen. Dieser Anteil wird künftig noch zunehmen und den verschiedenen Stahlherstellungsverfahren neue Bedeutung geben.

Weitere Ausgangsstoffe sind Brennstoffe und Reduktionsmittel - etwa Koks, Kohle, Öl und Gas - sowie Zuschlagstoffe, beispielsweise Kalk und Legierungsmittel.

### *Der Hochofen*

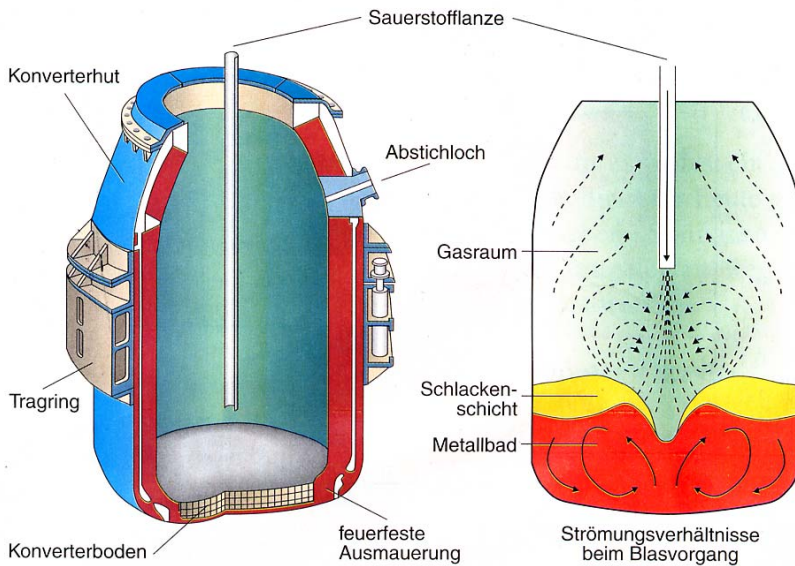
Eisen gehört zu den unedlen Metallen und kommt deshalb mit Ausnahme des Meteoriteisens in der Natur nicht in reiner Form, sondern meist in Verbindung mit Sauerstoff vor. Um es zu reduzieren, verbrennt man das Erz meist mit einem der genannten Kohlenstoffträger; dabei wird nicht nur der Sauerstoff entfernt, sondern es entsteht gleichzeitig die für diese Reaktion benötigte Wärme.

Das weltweit wichtigste Schmelzaggregat ist nach wie vor der Hochofen, ein kontinuierlich arbeitender, bis zu 45 Meter hoher Schachtofen, der ein Innenvolumen von mehr als 5000 Kubikmetern aufweisen und pro Tag bis zu 11000 Tonnen flüssiges Roheisen erzeugen kann. Das enthält noch etwa vier Prozent Kohlenstoff und zum Teil unerwünschte Begleitelemente wie Phosphor, Schwefel, Silicium und Mangan. Die Wärme läßt sich auch für gezielte chemische Reaktionen in der Schmelze nutzen, wobei man häufig Reaktionsgase im Gegenstrom zum zugeführten und absinkenden Erz hindurchleitet.

Trotz des hohen Entwicklungsstandes der Hochofenmetallurgie wird weltweit an alternativen Verfahren gearbeitet. Darunter ist insbesondere die Gasreduktion mittels Kohlenmonoxid-Wasserstoff-Mischungen - meist aus Erdgas gewonnen - zu nennen; das Produkt ist fester Eisenschwamm, wie der flüssige Rohstahl Ausgangsmaterial der Stahlherstellung.

Die Weichen für die Qualität des künftigen Werkstoffs werden aber vor allem im Stahlwerk gestellt. Hier reduziert man die hohen Anteile an Begleitelementen und Kohlenstoff auf das gewünschte Maß und stellt die exakte chemische Zusammensetzung ein.

Beim sogenannten Frischen bläst man Sauerstoff meist mit hohem Druck von rund 12 bar als Strahl auf die flüssige Schmelze auf (Bild 1). In einer heftigen Reaktion oxidiert der Sauerstoff unerwünschte Stoffe, vor allem Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid, Silicium zu Siliciumdioxid und Phosphor zu Calciumphosphat (es entsteht auch Eisenoxid, das aber mit Mangan sofort wieder Manganoxid und Eisen bildet). Im Reaktionsraum, dem Brennfleck, wird es dabei 2500 bis 3000 Grad Celsius heiß; eine lebhaft umlaufende Strömung führt noch nicht gefrischte Bereiche des Metallbads fortwährend heran. Flüssige und feste Oxidationsprodukte formen eine Schlacke, die aufgrund ihres geringeren spezifischen Gewichts auf der Schmelze aufschwimmt und sich gesondert abziehen läßt. Entstandenes Kohlenmonoxid entweicht gasförmig.

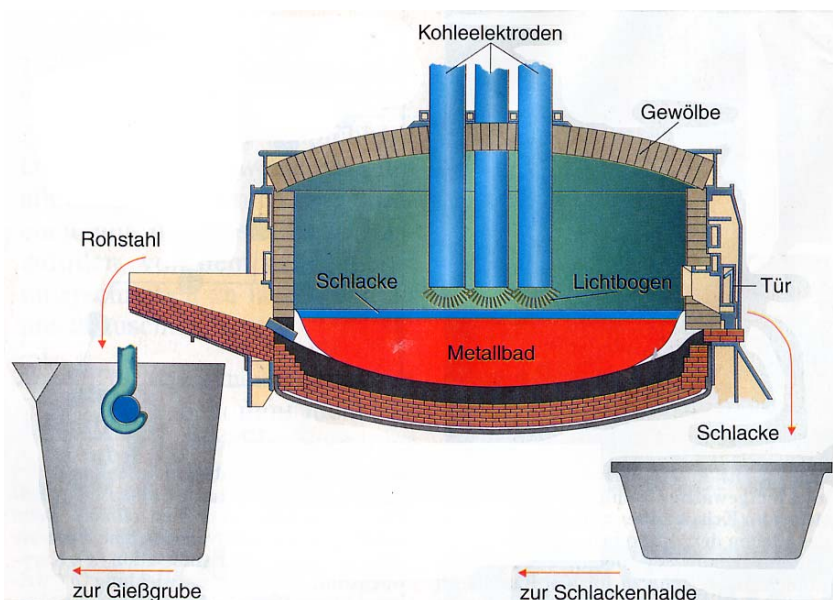


**Bild 1:** Um den Gehalt an Kohlenstoff und anderen Beimengungen im Roheisen durch Oxidation zu verringern, wird in einen Konverter (links) Sauerstoff eingeblasen. Zwar oxidiert dieser zunächst auch das Eisen, doch wird er schnell an die Begleittstoffe abgegeben. Es entsteht Kohlenmonoxid, das beim Aufsteigen flüssige wie feste Oxide der Begleitelemente mitreißt. In der bis zu 3000 Grad Celsius heißen Reaktionszone, der eine heftige Strömung immer wie der neues Material zuführt, entsteht zudem eine Schlacke, in der flüssige und feste Oxide gebunden sind. Weil die Schlacke

leichter als die Schmelze ist, schwimmt sie oben auf und läßt sich somit abziehen.

Die Sauerstoff-Aufblasverfahren wurden in den letzten Jahren durch das Einleiten von Rührgasen wie Argon und Stickstoff vom Boden her weiterentwickelt - die zu entfernenden nicht metallischen Verunreinigungen sind leichter als die Schmelze und werden daher nach oben gespült. Hinzu kam eine aufwendige Prozeßkontrolle, so daß man beispielsweise einen niedrigen Kohlenstoffgehalt bei hohem Reinheitsgrad sehr sicher erzielen kann.

### Die Schrottverarbeitung



**Bild 2:** Schrott wird bevorzugt im Elektrolichtbogenofen aufgeschmolzen, wobei genug Wärme entsteht, daß ohne Sauerstoff Verunreinigungen reduziert werden. Allerdings läßt sich die Reaktion auch durch Einblasen von Brenngasen beschleunigen.

Der zweite wichtige Rohstoff ist, wie gesagt, Schrott, den man meist in Elektrolichtbogenöfen direkt in Stahl umwandelt. Hier beginnt der Frischprozeß bereits mit dem Zünden des Plasmas zwischen dem eingefüllten Schrott und den Kohlelektroden (Bild 2). Die erforderliche Wärme wird somit zunächst nicht durch eine exotherme Reaktion mit Sauerstoff, sondern durch den elektrischen Stromfluß erzeugt; ist erst einmal Schmelze vorhanden, läßt sich weiterer Schrott zugeben. Zusätzliches Einblasen von Sauerstoff oder auch anderen Brennstoffgasen beschleunigt zudem das Einschmelzen.

Während des Frischens reagieren Eisenoxide in der Schlacke mit dem Kohlenstoff des Bades. Dabei wird Kohlenmonoxid als Gas frei, bringt die Schmelze zum Brodeln und spült Verunreinigungen wie Phosphor, Wasserstoff, Stickstoff und nichtmetallische Verbindungen heraus; sie entweichen als Gas oder werden in der Schlacke gebunden.

### *Sekundärmetallurgie*

Die moderne Stahlerzeugung wird heute wesentlich durch die Nachbehandlung der Schmelze außerhalb des Frischaggregats mittels Legieren, Spülen und Entgasen geprägt, um

- die Stahlqualität zu verbessern und zu stabilisieren,
- neuartige Stähle mit besseren Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften zu erzeugen sowie
- die Effektivität der Stahlerzeugung aufgrund wissenschaftlicher Erkenntnisse zur Thermodynamik und Kinetik zu steigern.

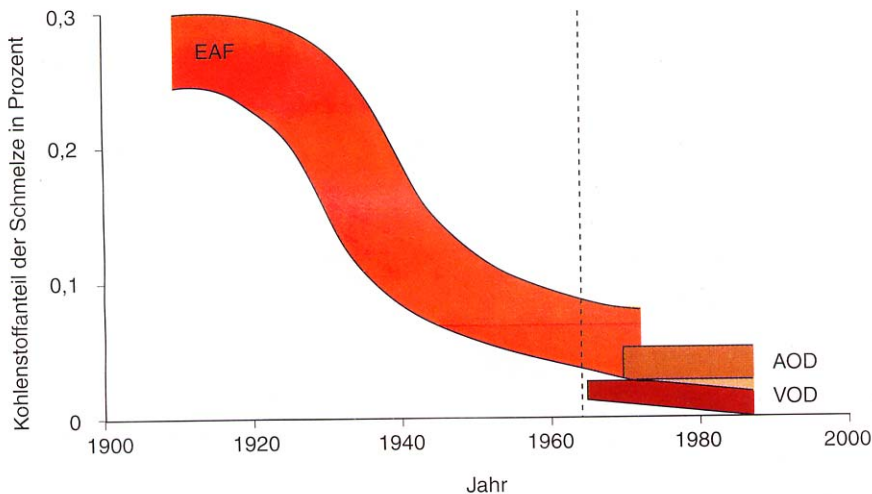
Damit verlieren reine Schmelzöfen an Bedeutung. Durch Kombination sekundärmetallurgischer Verfahren läßt sich heutzutage Stahl nahezu jeder gewünschten Qualität herstellen. Weil im Stahl gelöste Gase durch Absenken des Außendrucks leichter entweichen können, vermag man beispielsweise mit Vakuumbehandlungsanlagen mittlerweile großtechnisch Stähle mit äußerst geringen Kohlenstoff- und Stickstoff-Gehalten zu erzeugen. Außerdem kann man durch erneutes Umschmelzen - der Fachmann spricht von Sonderumschmelzverfahren - auch extrem hohe Anforderungen hinsichtlich Reinheit und Gleichmäßigkeit erfüllen; ein Beispiel dafür ist die gerichtete Erstarrung, bei der sich Verunreinigungen an einem Ende des Stahlblocks anreichern und damit abtrennen lassen.

### *Rostfreie Stähle*

Bereits in den zwanziger Jahren waren nichtrostende Stähle auf Chrom-Nickel-Basis entwickelt worden. Seither fand man für diese Werkstoffgruppe dank ihrer Anpassungsfähigkeit immer weitere Anwendungen und neue Anforderungen.

Eine wichtige Voraussetzung für Korrosionsbeständigkeit ist ein niedriger Kohlenstoffgehalt. Es bildet sich nämlich eine dünne Chromoxidschicht an der Oberfläche, die ab einem Chrom-Anteil von etwa 12 Prozent das weitere Eindringen von Sauerstoff in das Kristallgitter recht gut behindert. In kohlenstoffhaltigen Stählen können sich nun aber Carbide des Chroms ausscheiden, so daß es lokal zur Bildung der Passivierungsschicht fehlt.

Erschmolz man diese Stähle ursprünglich in Siemens-Martin-Öfen und später in Elektrolichtbogenöfen in einem einzigen Schritt, so nutzt man gegenwärtig zweistufige Verfahren: Schrott wird im Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen und der flüssige Stahl, der zu hohe Anteile an Beimengungen aufweist, in einem VOD- (*vacuum-oxygen decarburization*) oder AO-Konverter (*argon-oxygen-decarburation*) weiterverarbeitet (Bild 3). In beiden sucht man den Partialdruck des Kohlenmonoxids zu verringern, um dessen Reaktion mit Chrom zu verhindern. Dazu wird der VOD-Konverter teilweise evakuiert; beim zweiten Verfahren treiben Rührgase das gelöste Kohlenmonoxid aus.



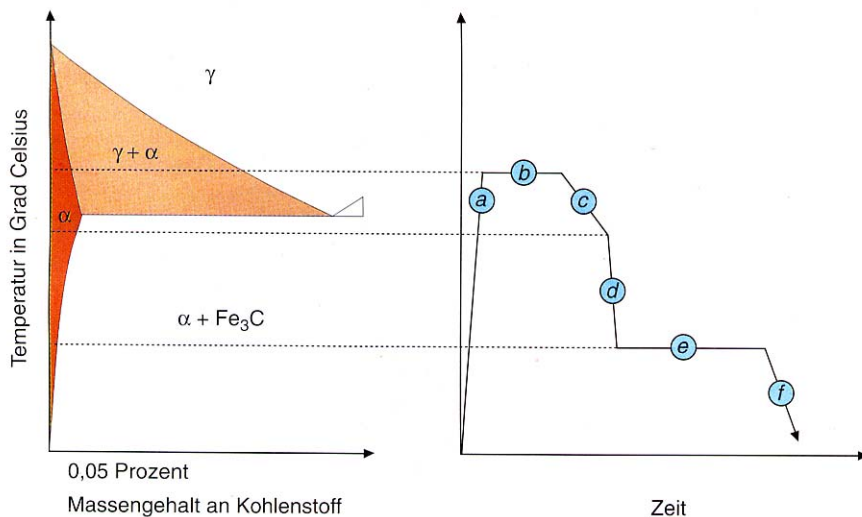
**Bild 3:** Um den Kohlenstoffgehalt rostfreier Stähle weiter zu senken, verarbeitet man sie nach dem Aufschmelzen im Elektrolichtbogenofen (*electric arc furnace*, EAF) in Konvertern weiter, in denen der Partialdruck von Kohlenmonoxid verringert wird: entweder durch ein Vakuum (*vacuu-oxygen decarburization*, VOD) oder durch Austreiben gelöster Gase mittels Argon (*argon-oxygen decarburization*, AOD).

### Gießen und Weiterverarbeiten

Der flüssige Stahl wird heute überwiegend kontinuierlich im Strang vergossen, wobei man dessen Querschnitt an die Maße des daraus zu fertigenden Produkts anzunähern sucht. Das endabmessungsnahе Gießen ergibt Brammen (200 bis 250 Millimeter dick), Dünnbrammen (50 bis 100 Millimeter dick), Vorbänder (15 bis 50 Millimeter dick), Bänder (weniger als 15 Millimeter dick), Folien für Flachprodukte und Vorprofile für Langprodukte. Die entsprechenden Gießverfahren verkürzen den weiteren Produktionsablauf, ermöglichen aber auch wieder neue Werkstoffeigenschaften, etwa wenn man durch sehr schnelle Erstarrung ein äußerst feinkörniges, chemisch sehr homogenes Gefüge erzielt.

Der erstarrte Stahl wird dann hauptsächlich auf Walzstraßen zu Halbzeug- oder Fertigprodukten weiterverarbeitet. Zur Herstellung von Flachprodukten walzt man ihn meist warm zu dünnen Bändern und häufig anschließend noch einmal kalt; dann muß allerdings das Material nochmals gegläht werden, um die im letzten Schritt entstandenen Versetzungen im Kristallgitter abzubauen sie würden den Werkstoff verfestigen, weil ein Gleiten von Gitterebenen dort gestoppt wird - und somit die weitere Umformbarkeit zu verringern.

Je nach Stahlsorte und gewünschten Eigenschaften gibt es dazu eine Vielzahl von Glühprozessen. So lassen sich mittels kontinuierlicher Glühung im Endmaß vorliegender Bänder hochfeste, kaltumformbare Stähle herstellen und deren mechanische Eigenschaften in einem weiten Bereich beeinflussen. Das Verfahren besteht aus den Phasen Aufheizen, Halten einer hohen Temperatur, erst langsames, dann rasches Abkühlen zur Kontrolle der Umwandlungsprozesse sowie Überaltern; in der letzten Phase scheidet sich übersättigt gelöster Kohlenstoff als Eisencarbid aus (Bild 4).



**Bild 4:** Die kontinuierliche Glühbehandlung kaltgewalzter Stähle soll Versetzungsstellen im Kristallgitter abbauen, weil diese das Gleiten der Gitterebenen und somit ein weiteres Umformen behindern. Gelöster Kohlenstoff vermag zu solchen Baufehlern zu diffundieren und das Gitter weiter zu verzerren; er sollte deshalb in Form von Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ausfallen. Im thermodynamischen Zustandsdiagramm lässt sich von Fe und

$\text{Fe}_3\text{C}$  ablesen, wie Ferrit (x) und Austenit (y) je nach Kohlenstoffgehalt und Temperatur entstehen (links). Beim Glühen lassen sich verschiedene Prozesse unterscheiden: Rekristallisation (a), Kornwachstum und Texturentwicklung (b), weiteres Lösen von Kohlenstoff (c), Kohlenstoff-Übersättigung (d), Zementit-Keimbildung (e) und schließlich wieder Abnahme des Anteils von gelöstem Kohlenstoff (f).

Durch Abstimmung von chemischer Zusammensetzung und Glüh- sowie Abkühlparametern lassen sich sehr unterschiedliche Werkstoffe herstellen. Für Automobilkarosserien wurden so beispielsweise Bake-Hardening-Stähle mit nur etwa 0,1 bis 0,01 Massenprozent gelöstem Kohlenstoff entwickelt. Diese sind weich und lassen sich gut zu komplizierteren Karosserieteilen umformen. Danach reicht bereits die Wärme beim Lackeinbrennen aus, um Diffusion von Kohlenstoffatomen an bereits vorhandene Versetzungsstellen zu ermöglichen. Dadurch wird das Kristallgitter weiter verzerrt und der Stahl wiederum fester. Das Ergebnis sind rationell gefertigte beulfeste Karosserieteile aus dünnen und somit leichten Blechen.