

Stahlherstellung

Technische Dokumentation

Autor: DR. MANFRED FEURER

*Herstellung von Roheisen & Hochofen
Konvertverfahren
Elektrostahlerzeugung
Sekundärmetallurgie*



TD0020

Institut für Werkstoffberatung

fips fach-informations-portal-stahl

DR. MANFRED FEURER

Institut für Werkstoffberatung



Chemnitzer Straße 6

D-64720 Michelstadt

T +49(0)60 61-70 30 12

F +49(0)60 61-70 63 144

kontakt@fips-werkstoff.com

www.fips-werkstoff.com

*Herstellung von Roheisen & Hochofen
Konvertverfahren
Elektrostahlerzeugung
Sekundärmetallurgie*

Autor:

Dr. Dipl.-Ing. MANFRED FEURER

Auflage 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und die Verbreitung im Internet.

**Bitte Schutzvermerk nach
DIN ISO 16016 beachten!**

Technische Produktdokumentation –
Schutzvermerke zur Beschränkung der Nutzung
von Dokumenten und Produkten

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	7
1. Der Werkstoff Stahl	9
1.1 Erzaufbereitung, Reduktion von Eisenerz	9
1.2 Die Herstellung von Roheisen	11
2. Stahlerzeugung	14
2.1 Konverterverfahren	15
2.2 Elektrostahlerzeugung	19
3. Wertsteigerung des Stahles (Sekundärmetallurgie	21
3.1 Nachbehandlung des Stahles	21
3.2 Sekundärmetallurgie	26
3.3 Begleitelemente im Stahl	30
Erklärungen/Glossar	31
Literaturverzeichnis	39

Vorwort

Immer komplexer werden die Produkte, die moderne Industrieunternehmen herstellen. Immer größer wird für sie der Druck, auf Nachfrageveränderungen flexibel zu reagieren. Unternehmen, die unter diesen Rahmenbedingungen erfolgreich sind, haben sich i. d. R. vom einstigen Leitbild der integrierten Produktion befreit und für das Modell Outsourcing entschieden. Der Eigenfertigungsanteil sinkt, externe Zulieferer werden in die Produktion eingebunden. Heute stehen viele Industrieunternehmen nur noch mit einer kleinen Spitzengruppe hochqualifizierter Systemlieferanten in direktem Kontakt. Eine moderne Stahlhandlung ist über das Netzwerk von Zulieferern in solche Systeme eingebunden.

Die Vermittlung materialkundlicher Kenntnisse mit Bezug auf die praktischen Erfordernisse des Handels mit Stahl steht nach wie vor im Mittelpunkt der technisch orientierten Dokumentationen. Allerdings wird die Beratungskompetenz des Stahlhändlers noch deutlicher hervorgehoben, als dies bisher der Fall war. Der Stahlhandel ist nämlich längst nicht mehr nur Verteiler seiner Produkte. Lag der Schwerpunkt in der Vergangenheit in der Verbindungskette Stahlbeschaffung – Stahlnormen – Stahleigenschaften – Verarbeitung – Verwendung, so ist heute unbestreitbar, dass zunehmend mehr die umgekehrte Reihenfolge dominiert. So setzt zum Beispiel die Beratungskompetenz des Stahlhändlers dort an, wo es um die Vermarktung seines Werkstoffes Stahl hinsichtlich der Verwendungseigenschaften geht.

Spätestens bei der ersten Reklamation wird nämlich oft deutlich, dass dem Stahlhändler häufig das Werkstoffverständnis fehlt.

Sicherlich liegt ein Grund darin, dass die mehr und mehr ins Mikroskopische und durchaus ins Atomare gehende Betrachtungsweise dem Stahlhändler nicht von vornherein behagt. Oft entsteht bei der näheren Betrachtung von Werkstoffen der falsche Eindruck, beispielsweise die „Stahlkunde“ fange mit dem

EKD (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm) an und höre auch damit auf.

Wenn der Stahlhändler auch nicht direkt mit der Herstellung von metallischen Werkstoffen zu tun hat, so gehört es doch zu seiner Kompetenz, dass er darüber informiert, wie Stahl produziert wird, und er muss wissen, welche Eigenschaften die Werkstoffe haben, wie sie bearbeitet werden und wie man sie normgerecht bezeichnet. Auch Praktikern wird dieses Wissen eine Hilfe sein, um Probleme des Werkstoffverhaltens, der Werkstoffwahl und der Werkstoffprüfung zu erklären. Dies gilt umso mehr, wenn es dabei um die Bearbeitung von Reklamationen geht. Kannte das Lehrkonzept früher – herstellorientiert – nur den Weg „vom Erz zum Stahl“, so orientiert es sich heute abnehmerorientiert, also an den Anforderungen, welche die Kunden an den Stahlhandel stellen. Daraus haben sich im Laufe der Zeit ganz andere Blickwinkel ergeben und vor allem eine neue Motivation für den Kaufmann im Stahlhandel, sich auch mit schwierigen technischen Themen zu beschäftigen.

Ein Beispiel für diesen Paradigmawechsel ist das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD). Mit dem EKD wird der Stahlhändler nicht mehr im Zusammenhang mit der Herstellung von Stahl konfrontiert, sondern vielmehr, weil der Kunde Stahl mit bestimmten Eigenschaften benötigt. Ohne Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Gefüge, Temperatur und Legierungsaufbau können aber die Eigenschaftsprofile der Stahlwerkstoffe nicht bestimmt werden.

Die Zielrichtung dieser „Technischen Dokumentationen“ geht deshalb klar dahin, die Seminarteilnehmer vertrauter zu machen mit den Vorgängen im Werkstoff, die zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens – einschließlich z. B. ihres mechanischen Versagens im Einsatz – heranzuziehen sind, also einfacher ausgedrückt: „Stahl zu verstehen“.

Da heute in den Stahlhandel zunehmend mehr die Fertigung eingezogen ist, gewinnt die tiefer gehende Betrachtung des Werkstoffes Stahl – vor diesem Hintergrund und den damit verbundenen höheren Anforderungen an z. B. Oberfläche oder Maßtreue – immer mehr an Bedeutung.

Die Eigenschaften der Werkstoffe entscheiden darüber, für welche Beanspruchung der jeweilige Werkstoff eingesetzt werden kann. Die Kenntnisse über das Werkstoffverhalten ermöglichen in vielen Fällen einen modernen Veredelungsprozess, der die mechanische, technische oder chemische Beanspruchbarkeit erhöht.

Die Strecke aller von uns herausgegebenen „Technischen Informationen“ hat das Anliegen, anhand aufeinander abgestimmter Sequenzen die vielfältigen Zusammenhänge zwischen der Herstellung und Verarbeitung der Werkstoffe und ihren Eigenschaften und ihren Anwendungen darzustellen. Dabei haben die Herstellungsverfahren von Roheisen und Stahl zunächst Vorrang. Entscheidendes Ziel dabei ist, dass ein – wenn auch nur qualitatives – Grundverständnis vom Zusammenhang zwischen Werkstoffstruktur und Werkstoffeigenschaften entwickelt wird.

I. Der Werkstoff Stahl

I.1 Erzaufbereitung, Reduktion von Eisenerz

Produziert wurde Eisen schon vor mehr als 1.200 Jahren vor Christus. Des Eisens technische Bedeutung kristallisierte sich etwa im Mittelalter heraus, von dort trat es auch seinen Siegeszug als begehrte Handelsware an.

Der weitere Verlauf der Stahlherstellung bis zur heutigen Zeit ging einher mit einem ständigen Fortschritt im Bergbau, der Erschmelzungsart des Erzes – bis hin zu den heutigen Frischverfahren des Roheisens zu Stahl.

Die Eisenerze

Ausgangsstoffe zur Stahlgewinnung sind die Eisenerze. Eisenerze sind in der Hauptsache Verbindungen des Eisens (Fe = Ferrum) mit Sauerstoff zu Eisenoxiden, vermischt mit Verunreinigungen, der sogenannten Gangart. Sie sind als Minerale gebunden.

Eisen kommt also in der Natur nicht rein vor, sondern immer als eine chemische Verbindung mit Sauerstoff. Entsprechend der unterschiedlichen Ausbildungsformen der Eisenverbindungen gibt es eine große Anzahl verschiedener Erzsorten, die durch ihre Begleitelemente, Gangart und weitere Nichtmetall- und Metalloxide differenziert werden. Je nach der Gangart wird das Erz als basisch (wenn Kalk überwiegt) oder als sauer (wenn Kieselsäure dominiert) eingestuft. Diese Informationen über die Erzart sind wichtig bei der Verhüttung, d. h. Verschmelzung der Erze. Das Erzgewicht wird im Wesentlichen durch den Eisengehalt bestimmt. Je höher der Eisengehalt, umso wertvoller ist auch das Erz. Die vier wichtigsten Erze sind:

- ▶ **Magnetit** (Magneteisenerz), Fe_3O_4
ca. 60 bis 70 Prozent Fe-Gehalt, meist sauer, bei kieseliger Gangart, schwer reduzierbar
- ▶ **Hämatit** (Roteisenerz) Fe_2O_3
hoher Fe-Gehalt, sauer, leicht reduzierbar
- ▶ **Limonit** (Brauneisenerz) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
meist geringer Fe-Gehalt, weit verbreitet, wirtschaftlicher Abbau erst bei großen Lagerstätten
- ▶ **Siderit** (Spateisenerz) FeCO_3
ca. 30 bis 40 Prozent Fe-Gehalt, leicht reduzierbar, meist kalk- und manganhaltig, untergeordnete wirtschaftliche Bedeutung

Darüber hinaus gibt eine ganze Reihe weiterer Erze bzw. Eisenminerale, wobei an dieser Stelle nur auf das Manganerz hingewiesen werden soll. Aus Manganerzen wird das für Legierungszwecke verwendete Ferro-Mangan erschmolzen.

Erzaufbereitung

Roheisen ist ein Vorprodukt zur Erzeugung von Stahl. Zunächst einmal müssen die Erze aufbereitet werden. Dies geschieht auf unterschiedlichen Wegen.

- ▶ Ziel ist dabei immer die Erhöhung des Eisenanteils durch die Verringerung der Gangart

Dazu werden die Roherze zerkleinert (Brechen) und danach gesiebt. Nach der Größenordnung der Körnung unterteilt man das Siebgut in Fein- und Stückerze (*Abbildung 1*) ein.

Feinerze und Feinsterze, sogenannte Konzentrate, fallen bei dieser Art der Aufbereitung ebenfalls an. Sie müssen jedoch für die Verwendung im Hochofen stückig gemacht werden. Dies geschieht durch Sintern (*Abbildung 1*) oder Pelletieren (*Abbildung 1*).

Letztlich erfolgt durch diesen Prozess eine sogenannte Homogenisierung der Erze, d. h. der unterschiedliche Eisengehalt verschiedener Erze und sonstige Ungleichmäßigkeiten werden ausgeglichen. Durch diesen Vorgang der Erzaufbereitung wird eine kontinuierliche Roheisenqualität erreicht.

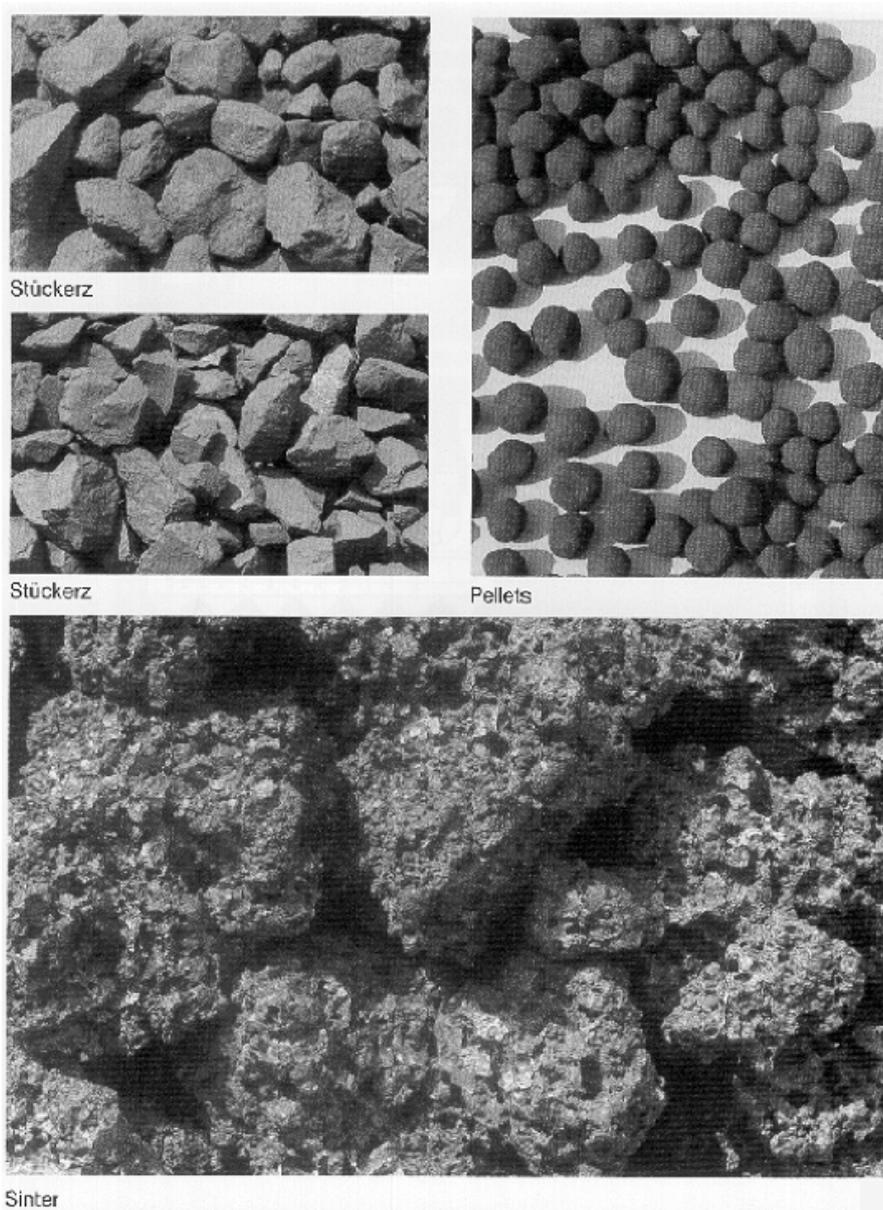


Abbildung 1: Vormaterial für die Stahlproduktion

1.2 Die Herstellung von Roheisen

Roheisen aus dem Hochofen

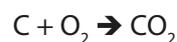
Das vorbereitete Erz muss nun im nächsten Schritt im Hochofen verhüttet werden, d. h. Eisenbestandteile werden vom Sauerstoff und der Gangart getrennt. Als Reduktionsmittel und Brennstoffe werden Koks, Kohle, Öl oder Gas in den Hochofen eingebracht.



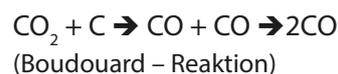
Abbildung 2: Sicht auf einen Hochofen (Foto: ThyssenKrupp)

Im Hochofen *Abbildung 2* werden die in den Erzen, Sintern und Pellets enthaltenen Eisenoxide reduziert und zu flüssigem Roheisen geschmolzen. Der Hochofen ist ein kontinuierlich arbeitender Schachtofen *Abbildung 3* mit rundem, kegelförmigen Profil. Die genauen Vorgänge im Hochofen – der Reduktionsvorgang – sind sehr umfangreich und kompliziert.

Die Temperatur im Hochofen nimmt von oben nach unten zu, weil der unten eingeblasene Luftsauerstoff mit Koks in einer stark wärmeabgebenden (exothermen) Reaktion zu Kohlenstoffdioxid reagiert.



Das entstandene Kohlenstoffdioxid reagiert sofort in einer wärmeverbrauchenden Reaktion mit weiterem Kohlenstoff aus dem Koks zu Kohlenmonoxid (unvollkommene Verbrennung).



Kohlenmonoxid ist das wesentliche Reduktionsmittel. Es reduziert die Eisenoxide, wobei Roheisen entsteht.



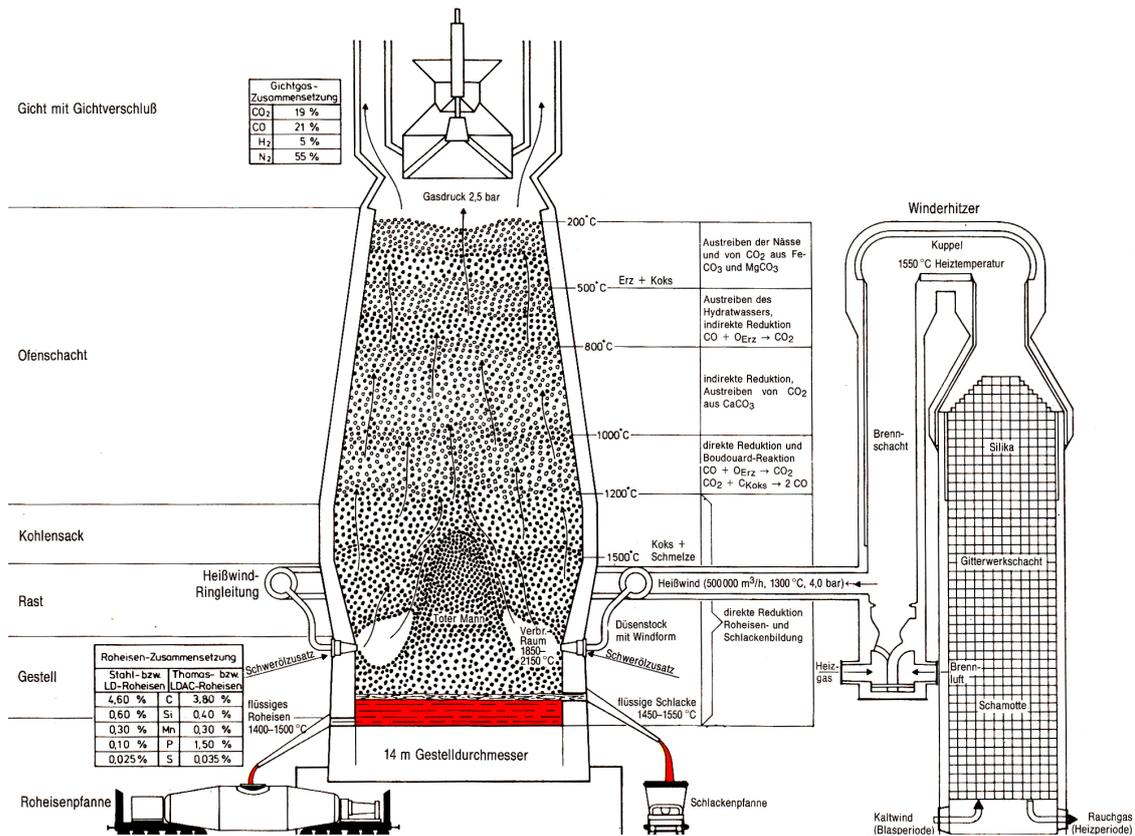


Abbildung 3: Querschnitt durch einen Hochofen (Stahl-Fibel)

Erzeugnisse des Hochofens

Der Hauptzweck ist die Erzeugung des flüssigen Roheisens. Verfahrensbedingt fallen aber auch Schlacke, Gichtgas und Gichtstaub an. Da alle anfallenden Stoffe verwertet werden können, ist die Produktion von Roheisen im Hochofen äußerst wirtschaftlich.

Roheisen

Das Roheisen ist ein Zwischenprodukt auf dem Weg zum Stahl. Es enthält im Mittel etwa 4 % Kohlenstoff, 0,05 % Schwefel und kann gemäß DIN EN 10001; Begriffsbestimmung und Einteilung von Roheisen, zudem andere Elemente in gewissen Grenzen enthalten, wie z. Beispiel:

- ▶ Mangan ≤ 2,0 %
- ▶ Silizium ≤ 1,0 %
- ▶ Phosphor ≤ 0,5 %
- ▶ Chrom ≤ 10,0 %

Wird einer dieser Grenzwerte überschritten, so gelangt man in den Bereich der Ferrolegierungen. Das für die Stahlherstellung bestimmte Stahlroheisen hat einen hohen Mangangehalt, der eine helle, strahlige Bruchfläche bewirkt. Dieses Roh-eisen bezeichnet man deshalb sinngemäß als **weißes Roheisen**, oder weil es überwiegend zu Stahl verarbeitet wird, als **Stahlroheisen**. Das Gießereiroheisen sowie verschiedene Sonderroheisen dienen zur Herstellung von Eisen-Gusswerkstoffen. Die Anordnung von Eisen- und Gra-

fitteilchen ergibt eine graue Farbe, deshalb die Bezeichnung **graues Roheisen**. Dieses wird an die Gießereien geliefert und dort zu Gusseisen [Grauguss (EN-GJL), Kugelgraphitguss (EN-GJS)] umgeschmolzen. Das graue Roheisen bezeichnet man auch als **Gießereiroheisen**.

Schlacke

Sie fällt in erheblichen Mengen an. Verwendet wird sie zu 50 Prozent im Straßenbau, und etwa 30 Prozent dienen der Zementherstellung. Den Rest verwendet die Hütte selbst als sogenannten Hüttenbims, Hüttenkalk usw.

Gichtgas

Es enthält etwa 25 Prozent brennbares Kohlenmonoxid (45 – 60 %) und etwas Wasserstoff. Es wird vor allem zur Aufheizung der Winderhitzer eingesetzt.

Stoffbilanz des Hochofens

Nachdem ein Hochofen angeblasen wurde, bleibt dieser etwa 10 bis 15 Jahre ununterbrochen in Betrieb. Erzeugt werden, je nach Größe des Hochofens, durchschnittlich 11.000 t Roheisen pro Tag. Dazu werden ca. 18.000 t Erz und Zuschläge, 5.000 t Koks und ca. 15.000 bis 20.000 t Heizwind benötigt. Neben dem Roheisen fallen etwa 3.000 t Schlacke und etwa 20.000 bis 30.000 t Gichtgas und Staub an.

2. Stahlerzeugung

Die außergewöhnliche Bedeutung des Eisens spiegelt sich in seiner Verwendung als Basismetall für eine Fülle unterschiedlicher Gusseisen- und Stahlsorten wieder. Hinsichtlich Preiswürdigkeit, Verfügbarkeit und Vielfalt wichtiger Eigenschaften übertrifft es andere Metalle bei Weitem.

Rohstahl wird heute auf der Basis von flüssigem Roheisen im Oxygenstahlverfahren (LD-Konverter) und auf der Basis des Rohstoffes Schrott im Elektrostahlverfahren (Lichtbogenofen) erzeugt. Das Thomas-Verfahren und das Siemens-Martin (SM)-Verfahren zur Stahlerzeugung waren leistungsmäßig und in den zu erzielenden Stahleigenschaften nicht mehr konkurrenzfähig und für eine umweltfreundliche Entstaubung nicht

geeignet. Diese Verfahren werden heute nicht mehr angewendet. Bereits Anfang der 60er Jahre begann daher die Entwicklung der Oxygenstahlerzeugung. Der Anteil des Elektrostahlverfahrens wurde Mitte der 80er Jahre sukzessive ausgeweitet. Die Abbildung 4 zeigt die Rohstahlerzeugung in Deutschland in den Jahren von 1950 bis 2005.

Das im Hochofen erschmolzene Roheisen ist nur für wenige technische Zwecke direkt verwendbar. Wegen des hohen Kohlenstoffgehaltes von 3,5 bis ca. 4,5 Prozent (im Mittel 4 %) und der noch vorhandenen Verunreinigungen ist erkaltetes Roheisen sehr spröde und weder für eine Warmformgebung wie z. B. Walzen, Schmieden und Pressen noch für eine Kaltformgebung geeignet.

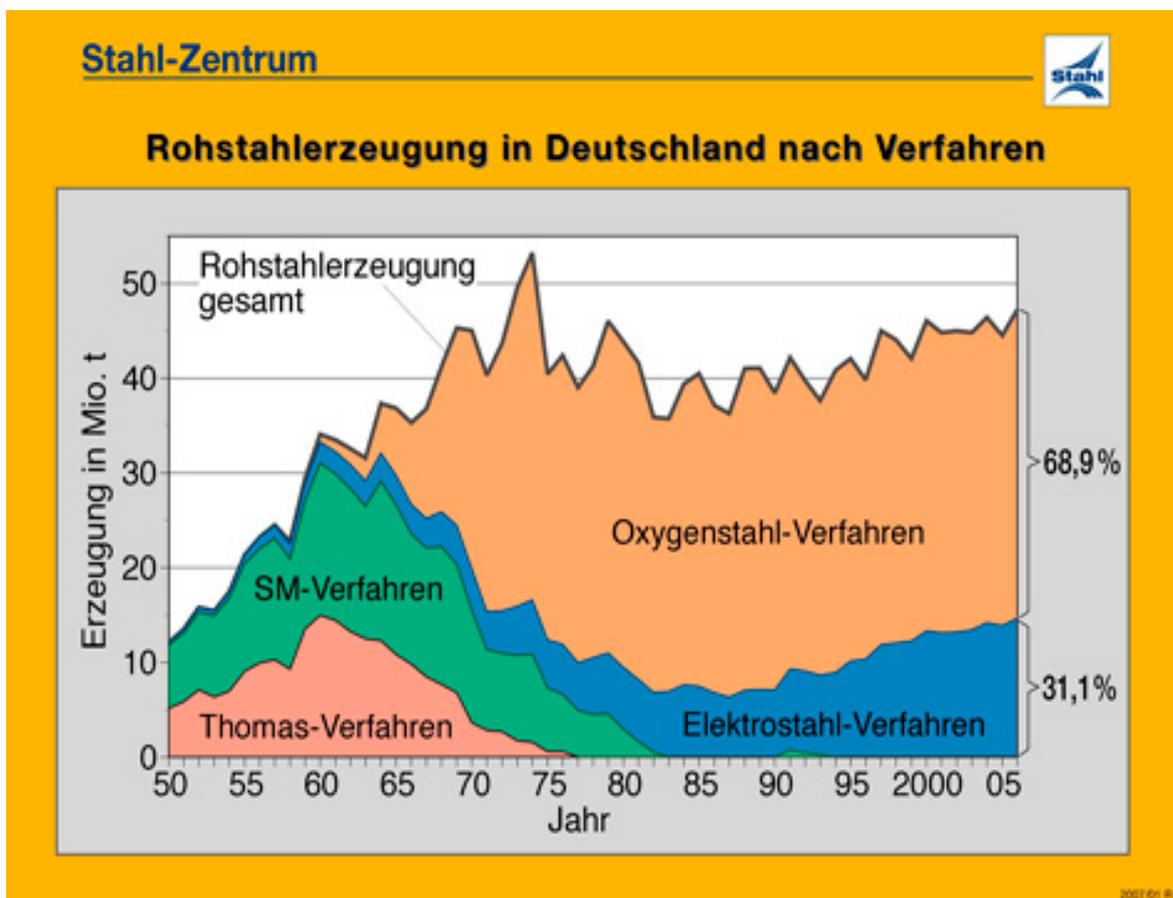


Abbildung 4: Rohstahlerzeugung in Deutschland

Die Stahlherstellung beruht im Wesentlichen auf der Entfernung der im Roheisen enthaltenen Verunreinigungen und der Absenkung des Kohlenstoffgehaltes. Die Entfernung der Verunreinigungen (Schwefel, Phosphor, Schlackeneinschlüsse usw.) und die Verminderung des Kohlenstoffgehaltes geschieht durch Verbrennen, der Hüttenfachmann sagt „Frischen“. Es gibt verschiedene Frischverfahren. Heute werden zur Stahlherstellung überwiegend die Sauerstoff-Blasverfahren zum Einsatz gelangen. Wenn nur Schrott und z. T. Eisenschwamm Ausgangsmaterial für die Stahlherstellung ist, kommt der Elektrolichtbogenofen zur Anwendung.

Zur Durchführung der Stahlerzeugungsverfahren müssen Wärme und Sauerstoff bereitgestellt werden. Weitere Einsatzstoffe für die Stahlerzeugung sind.

- ▶ Schrott (als Eisenträger und Kühlmittel)
- ▶ Zuschläge (wie Kalk, Kalkstein, Bauxit; sie dienen der Erzeugung einer reaktionsfähigen dünnflüssigen Schlacke, die unerwünschte Elemente aufnimmt).
- ▶ Legierungszusätze (Ferrolegerungen, Desoxidationsmittel)

Die durch den Frischprozess angestrebten Ziele lassen sich auf vier Punkte konzentrieren:

- ▶ Senkung des Kohlenstoffgehaltes auf vorgegebene Werte
- ▶ Einstellung der Gehalte erwünschter Beimengungen auf vorgegebene Werte
- ▶ Weitestgehende Entfernung unerwünschter Beimengungen
- ▶ Einstellung der vorgegebenen Legierungszusammensetzung (Zugabe von Legierungselementen)

Je nach Rohstofflage und den zur Verfügung stehenden Energieträgern haben sich heute hauptsächlich zwei Verfahrensgruppen zur Anwendung herausgebildet:

- ▶ **Sauerstoffblas-Verfahren (Sauerstoffmetallurgie) und**
- ▶ **Elektrolichtbogenofen-Verfahren**

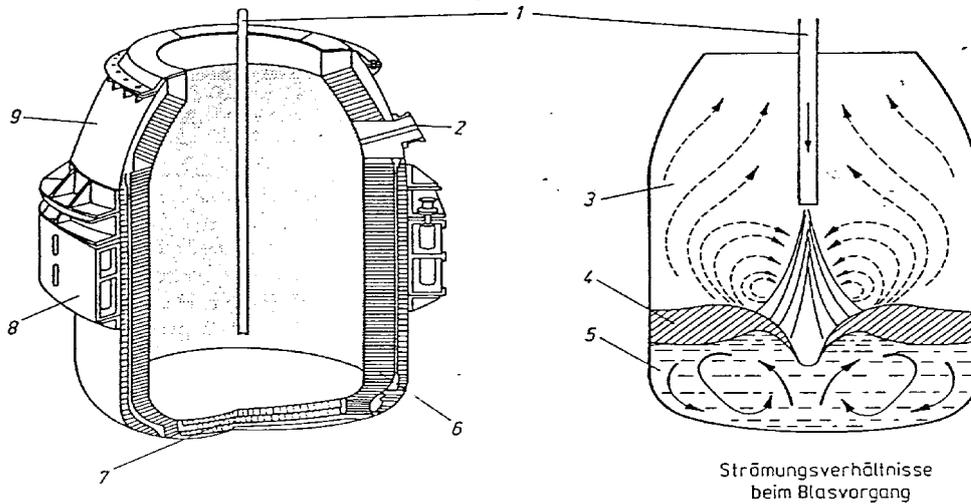
2.1 Konverterverfahren

Die wichtigsten Verfahrensgruppen zur Stahlerzeugung sind die nachfolgend aufgeführten Sauerstoffblas-Verfahren.

- ▶ Sauerstoff-Aufblasverfahren (LD- bzw. LD/AC-Verfahren)
- ▶ Sauerstoff-Bodenblasverfahren (OBM-Verfahren)
- ▶ kombinierte Blasverfahren

Das Sauerstoff-Aufblasverfahren

Vom Hochofen kommt das flüssige Stahleisen (Roheisen) in Kannenwagen (Torpedowagen) zu einer Umfüllgruppe in das Stahlwerk. Hier wird das Roheisen in Pfannen abgegossen. Die Pfannen werden mit einer Krananlage zum Frischgefäß, dem Konverter, gefahren und entleert. Diese Konverter sind Stahlgefäße (*Abbildung 5*) mit feuerfester Ausmauerung, ihr Fassungsvermögen reicht bis zu 400 t Roheisen.



1 = Sauerstofflanze; 2 = Abstichloch; 3 = Gasraum; 4 = Schlackenschicht; 5 = Metallbad;
6 = feuerfeste Ausmauerung; 7 = Konverterboden; 8 = Tragrings; 9 = Konverterhut

Abbildung 5: LD-Konverter



Vor dem Befüllen mit flüssigem Roheisen werden einige Tonnen Schrott in den Konverter gekippt. Dieser Schrott muss während des Frischvorgangs, bei dem ja Wärme entsteht, die Schmelze kühlen (Abbildung 6).

Abbildung 6: Das Foto zeigt den Konverter in Füllstellung, beim Befüllen mit dem flüssigen Roheisen.

Nach dem Befüllen des Konverters wird der Schmelze Kalk zugefügt. Der Kalk sorgt für die Schlackenbildung während des Blasvorgangs. Nun wird reiner Sauerstoff mit hohem Druck durch eine wassergekühlte Lanze auf die Schmelze geblasen, die dabei heftig durchwirbelt wird. Ein Teil des Sauerstoffs verbindet sich mit dem Kohlenstoff des Roheisens zu Kohlenmonoxid (CO) oder Kohlendioxid (CO₂) und entweicht als Gas. Der andere Teil des Sauerstoffs verbrennt (oxidiert) die anderen Eisenbegleiter. Die festen Oxide (P₂O₅, MnO₂, SiO₂) werden in die Schlacke aufgenommen. Nach ca. 20 Minuten Blaszeit sind die Verunreinigungen verbrannt und der Kohlenstoffgehalt reduziert. Danach werden gegebenenfalls Legierungselemente zugegeben. Aus dem Roheisen ist nunmehr der Werkstoff Stahl entstanden. Zum Abstich (so sagt der Stahlwerker zum Entleeren) wird der Konverter gekippt. Dabei fließt der Stahl durch das Abstichloch in die Gießpfanne. Während des Abstiches bleibt die flüssige Schlacke auf dem Stahl und deckt ihn ab. Die Schlacke wird zum Schluss abgestochen, dazu wird der Konverter auf die andere Seite gekippt. Der Stahl kommt nun in die Strang- oder Kokillengießanlage zur Weiterverarbeitung.

Dieses Sauerstoff-Aufblasverfahren wird auch als LD-Verfahren bezeichnet. Die Bezeichnung kommt von den Städten Linz und Donawitz (beide Österreich); in den dort liegenden Hüttenwerken wurde dieses Verfahren erstmals großtechnisch angewandt. Das LD-Verfahren eignet sich vor allem zur Verarbeitung von phosphorarmen Roheisen, dem sog. Stahl- bzw. LD-Roheisen.

LD-AC-Verfahren

Liefert der Hochofen ein phosphorreiches Roheisen, das sog. Thomas-Roheisen, so wird es nach dem LD-AC-Verfahren in Stahl umgewandelt. Der Konverter ist im Prinzip genau der gleiche wie

beim LD-Verfahren, jedoch unterscheidet sich das LD-AC-Verfahren im Prozessablauf. Hier wird beim Frisch-Prozess **zweimal** geblasen. Nach dem ersten Blasvorgang, bei dem der Phosphorgehalt des Roheisens auf etwa 0,2 % und der Kohlenstoff auf 0,7 % reduziert wird, wird auch die Schlacke mit hohem P₂O₅-Gehalt abgezogen. Vor dem zweiten Blasvorgang wird nochmals Schrott zur Kühlung beigegeben. Während des zweiten Blasvorgangs erfolgt dann die eigentliche Entkohlung, d. h. die weitere Herabsetzung von Phosphor und Schwefel auf das gewünschte Maß. Da der Phosphor erst nach dem Kohlenstoff verbrennt, ist ein Abfangen der Charge bei einem Kohlenstoffgehalt oberhalb von 0,1 % nicht möglich. Die Chargen werden daher zum sicheren Abbrand des Phosphors auf C-Gehalte unter 0,1 % gefrischt. Höhere C-Gehalte müssen dann außerhalb des Konverters mittels Rückkohlung eingestellt werden. Die Zusatzbezeichnung AC kommt von Arbed und CNRM, einem luxemburgischen und einem französischen Unternehmen.

Vorteile der LD-Verfahren

1. Weniger Stickstoff im Stahl, d. h. Alterungsbeständigkeit,
1. höhere Wärmeentwicklung, d. h., es kann zusätzlich Schrott mit aufgeschmolzen werden,
2. weniger Abgase, d. h., die Entstaubung ist preiswerter,
3. gute Schlackenbildung

Andererseits ist die Durchmischung der Schmelze nicht so gut. Eine starke Über-Oxidation, schlechtere Metall-Schlacken-Reaktion sowie schlechte Baddurchmischung kennzeichnen das LD-Verfahren gegenüber dem Sauerstoffblasverfahren. Außerdem stellen sich durch das Aufblasen in der Schlacke hohe Eisengehalte (in Form von FeO) mit drei **Nachteilen** ein:

1. Die Stahlausbringung ist verringert.
2. Im Stahl sind etwas erhöhte Gehalte an oxidischen Einschlüssen, besonders bei niedrig gekohlten Stahlgüten.
3. Es tritt manchmal eine Art von Siedeverzug mit plötzlichem Auswurf von Schlacke und Stahl aus dem Tiegel auf.

Bodenblasverfahren

Bei den Boden Blasverfahren werden Sauerstoff und Spülgase durch den Converterboden in die Schmelze geblasen (Abbildung 7).

Nachteilig erweist sich bei diesem Verfahren eine schlechte Schlackenbildung und es können nur geringe Mengen Schrott eingesetzt werden.

Der Vorteil hingegen liegt bei einer geringeren über Oxidation und einer guten Rat Durchmischung sowie einer guten Metall-Schlacken-Reaktion.

Sauerstoff-Metallurgie



Abgas: Kühlen – Entstauben – Sammeln

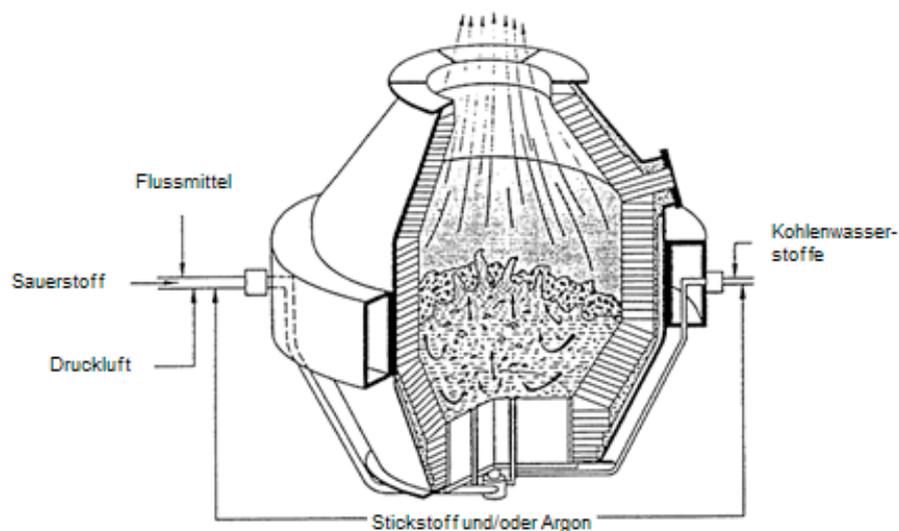


Abbildung 7: Boden Blasverfahren

Kombinierte Blasverfahren

Bei den kombinierten Blasverfahren wird sowohl von oben, als auch durch den Konverterboden mit Sauerstoff und Spülgasen geblasen.

Als Vorteile ergeben sich eine geringere über Oxidation, eine gute Banddurchmischung und eine gute Metall-Schlacken-Reaktion. Hinzu kommen hohe Flexibilität des Verfahrens bei guter Schlackenbildung (Abbildung 8).

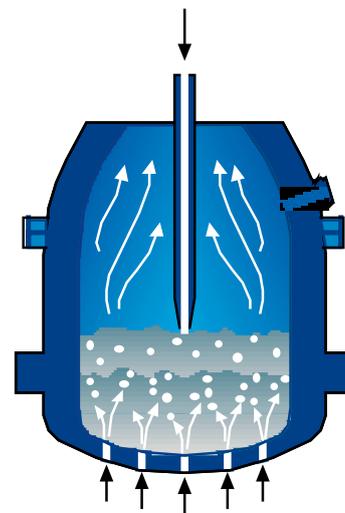


Abbildung 8: Kombiniertes Blasverfahren

2.2 Elektrostahlerzeugung

Bei den Elektrostahlverfahren wird die notwendige Schmelzwärme durch elektrischen Strom erzeugt, die zum Aufschmelzen des Einsatzgutes führt. Bei der Elektrostahlerzeugung werden zwei technische Verfahren unterschieden:

1. das Induktionsofen-Prinzip und
2. der Elektrolichtbogenofen

In der weiteren Abhandlung wird lediglich auf den Elektrolichtbogenofen eingegangen.

- Der Elektrolichtbogenofen, der auch nur als Elektroofen oder Lichtbogenofen bezeichnet wird, dient in erster Linie der Erzeugung von Stahl aus Stahlschrott und auch Roheisen.

Lange Zeit war der Lichtbogenofen wegen seines hohen Energieverbrauches und seiner begrenzten Wirtschaftlichkeit der Erschmelzung von Edelstahl vorbehalten. Mit der Erhöhung der Abstichgewichte (von wenigen Tonnen bis in Ausnahmefällen zu 300 Tonnen) und der entscheidenden Verringerung der Kosten für Energie, Elektroden und Investitionen dient er heute in Verbindung mit der Schrottmetallurgie der Erzeugung sehr unterschiedlicher Stahlgüten.

Der Ofen besteht aus dem Ofengefäß mit Ausgusschnauze (Absticherker) und der gegenüberliegenden Arbeitstür (Abbildung 9). Der gewölbte Deckel ist abnehmbar. Im Deckel befinden sich die Kohlelektroden. Der gesamte Ofen ist kippbar.

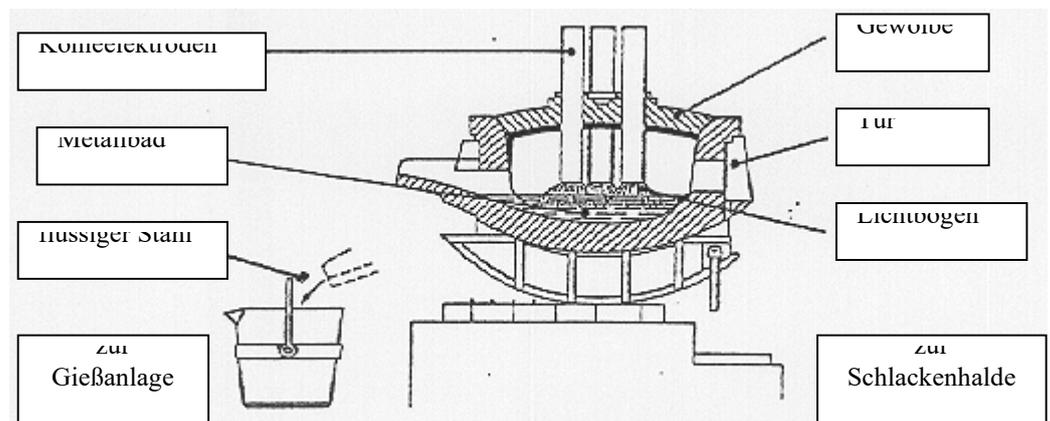


Abbildung 9: Elektroofen

Zur Beschickung des Ofens wird der Deckel abgenommen. Krananlagen fahren die Chargierkörbe direkt über den Ofen und lassen den Schrott durch Öffnen des Chargierkorbbodens direkt in den Elektroofen fallen. Außer dem Schrott werden auch hier wieder Zuschlagstoffe, wie Kalk, dazugegeben. Nach dem Schließen des Deckels werden die Kohleelektroden dicht über das Einsatzgut gefahren und gezündet. Der zwischen dem Stahlschrott und den Elektroden entstehende Lichtbogen, der eine Temperatur bis zu 3.500 °C hat, schmilzt das Einsatzgut nieder. Diese hohen Temperaturen ermöglichen auch die Auflösung schwer schmelzender Legierungselemente. Der Lichtbogenofen ist deshalb besonders gut geeignet für die Erschmelzung legierter und hochlegierter Stahlsorten. Die Elektroden müssen laufend nachgestellt werden, da sie ebenfalls mit abbrennen. Die Zuschlagstoffe reagieren während des Schmelzprozesses mit den unerwünschten Bestandteilen des Einsatzgutes und werden in der Schlacke gebunden.

Nach dem Frischprozess, der zwischen 60 Minuten und bis zu 1,5 Stunden dauern kann, wird der erschmolzene Stahl in Gießpfannen abgefüllt. Die im Lichtofen erschmolzenen Stähle besitzen in der Regel einen hohen Reinheitsgrad, da das Einsatzgut bereits einmal gereinigt worden ist (Schrott). Das Ergebnis des Schmelzprozesses sind sehr reine Stähle bzw. Edelstähle, die heute durch den hohen Wirkungsgrad der Elektroöfen wirtschaftlich hergestellt werden können.

Hochmoderne Öfen, sogenannte **UHP-Öfen** (Ultra-High-Power) ermöglichen Schmelzfolgezeiten von ca. 40 bis 70 Minuten bei einem Abstichgewicht von ca. 300 t. Diese Öfen sind durchaus auch als **Ministahlwerke** geeignet. Die *Abbildung 10* zeigt das Prinzip eines Elektrolichtbogenofens dieser Bauart. Typisch ist ein exzentrischer Bodenabstich für Stahl.

Zu den unbestreitbaren Vorteilen der Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen gehören:

- ▶ **Erschmelzung jeder möglichen Stahlsorte bei völliger Unabhängigkeit vom Einsatz, d. h. vor allem auch legierte Stähle jeder Art**
- ▶ **jede beliebige Mischung des Einsatzes ist möglich (Schrott, Eisenschwamm und Roheisen).**
- ▶ **niedriger Investitionsbedarf**
- ▶ **vorteilhafte Prozesssteuerung des Schmelzablaufes**
- ▶ **genaue Einstellung der Schmelze**
- ▶ **hoher Wirkungsgrad**

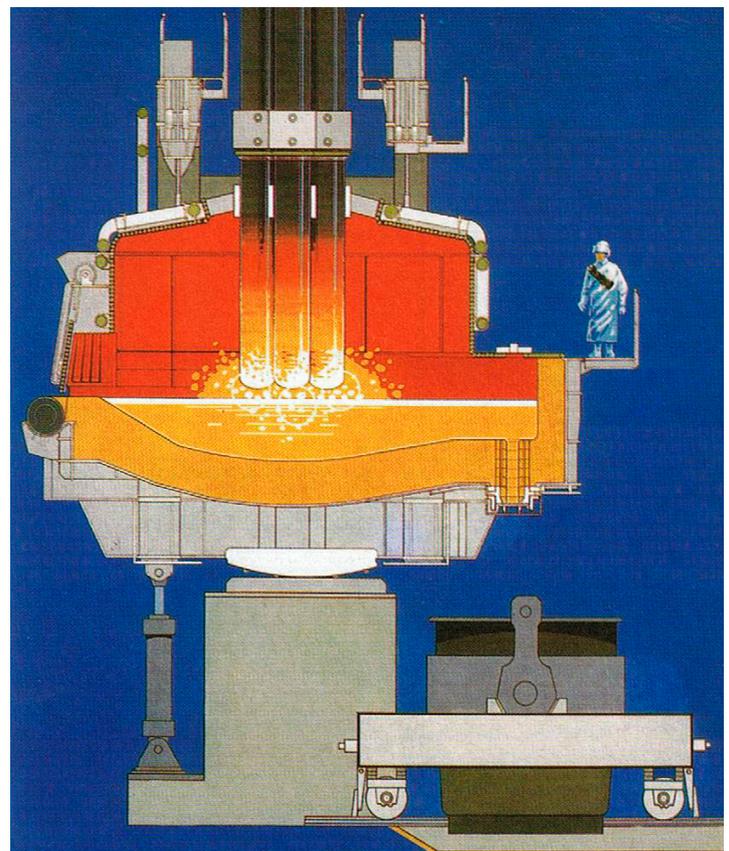


Abbildung 10: Prinzip eines Gleichstrom-Elektrolichtbogenofens, der mit drei Grafitelektroden arbeitet. Der Ofen hat ein Abstichgewicht von ca. 125 Tonnen und einen exzentrischen Bodenabstich für Stahl.

3 Wertsteigerung des Stahles (Sekundärmetallurgie)

3.1 Nachbehandlung des Stahles

Der Stahl, der mit den beschriebenen Verfahren hergestellt wird, genügt in vielen Fällen den gestellten Anforderungen nicht mehr. Für Anforderungen, wie z.B.

- hohe Korrosionsbeständigkeit oder
- gleichmäßiges Gefüge
- Verbesserung des Reinheitsgrades und
- der Desoxidation sowie der
- Verbesserung bestimmter mechanischer oder chemischer Eigenschaften
- Stähle für eine Wärmebehandlung
- Verbesserte Anforderungen hinsichtlich, Korngröße, Spröbruchempfindlichkeit, Verformbarkeit usw.

muss der Stahl zusätzlich behandelt werden. Somit schließt sich heute an den Frischprozess in aller Regel eine Nachbehandlung an, da die Qualitätsanforderungen immer höher gestellt werden und die Weiterentwicklung der verschiedenen Stahlgüten das Erschmelzen im Frischgefäß nicht mehr zulassen. Alle Maßnahmen, mit denen dem Stahl besondere Eigenschaften verliehen werden, fallen unter den Sammelbegriff Stahlveredelung. Eingestellt werden die angestrebten Stahlqualitäten in der metallurgisch arbeitenden Pfanne, also außerhalb des eigentlichen Stahlherstellungsprozesses. Daher findet auch der Begriff „Pflanzenmetallurgie“ Verwendung. Im Prinzip müssen dabei zwei Prozesse unterschieden werden:

- Nachbehandlung von Stahl, die sogenannte Sekundärmetallurgie und
- die Legierungseinstellung des Stahles, um die Eigenschaften des Grundwerkstoffes in einer bestimmten Weise zu beeinflussen.

Vor dem Hintergrund der gestiegenen Qualitätsansprüche an den Stahl kommen die Anstöße zur Pfannenmetallurgie im Wesentlichen von zwei Seiten.

Der Stahlbau verlangt zunehmend mehr Walzprodukte (Feinkornbaustähle, höherfeste Güten, höhere Duktilität), bei denen die mechanischen Eigenschaften in allen Richtungen gleich sind, also quer und längs der Walzrichtung.

Der zweite wesentliche Einfluss auf die Pfannenmetallurgie (Abbildung 11) kam durch die Weiterentwicklung des Stranggießens.

Diese setzt generell beruhigte und reinere, d. h. zu einschlussärmeren Gefügen führenden Schmelzen voraus, weil stranggegossener Stahl bei seiner Weiterverarbeitung im Walzwerk zu Flach- und Langprodukten heute eine wesentlich geringere Verformung erfährt, als dies früher der Fall war. Die nichtmetallischen Einschlüsse müssen daher bereits in der Schmelze homogen verteilt werden. Nicht zuletzt verlangt das Stranggießen auch genauer temperierte Schmelzen, wobei die Temperatur ebenfalls über Heizelektroden in der Pfanne eingestellt wird.

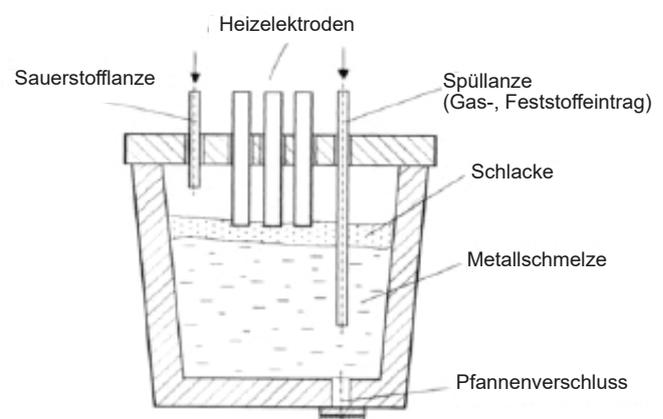


Abbildung 11: Metallurgisch arbeitende Pfanne.¹

¹ Winnaker, K; Küchler, L./Chemische Technologie - München; Carl Hauser Verlag, Band 4: Metaller

Somit hat die Pfannenmetallurgie eine weitgehende Desoxidation, Entschwefelung und Entgasung sowie die thermische und chemische Homogenisierung der Schmelze zum Ziel.

Desoxidation

Eine der bei der Stahlerzeugung erforderlichen Teilschritte ist die Desoxidation, d. h. die Entfernung des Restsauerstoffes aus der Schmelze, da der Stahl bei seiner Herstellung (Frischen) Sauerstoff und Stickstoff aufgenommen hat.

Die Entfernung des Sauerstoffs aus der Schmelze bezeichnet man als Desoxidieren.

Desoxidation:
Entfernung des Restsauerstoffes aus der Schmelze

Sie ist auch deshalb notwendig, da die sonst entstehenden Eisen- und Eisenoxidsulfide die Warmumformbarkeit des Stahls erheblich verschlechtern.

Als Desoxidationsmittel eignen sich sauerstoffaffine Elemente (von links nach rechts zunehmend: (Mn) – V – C – Si – B – Zr – Al) die in der Schmelze selbst löslich sind, jedoch in der Schmelze selbst unlösliche Oxide bilden. Üblicherweise werden als Desoxidationsmittel Si und Al, außerdem Mangan oder Kombinationen wie z. Beispiel Si/Al, Mn/Al oder Mn/Si eingesetzt.

Die sich bildenden Oxide (Oxidationsprodukte) sind unlöslich, steigen in der Schmelze auf und binden sich an die Schlacke. Durch die Schmelzbadbewegung durch Rühren mit Spülgasen oder durch elektromagnetisches Rühren wird dieser Prozess unterstützt.

Die Menge dieses gelösten Sauerstoffs hängt davon ab, wie viel andere Elemente bereits im Stahl

gelöst sind. Je höher der Kohlenstoffgehalt eines Stahles, desto geringer der Rest an gelöstem Sauerstoff. Demzufolge enthält ein Stahl mit niedrigem C-Gehalt (< 0,1 %) nach dem Frischen eine unzulässige Menge an Sauerstoff. Daher muss vor allem diesen Stählen der Sauerstoff entzogen werden.

Daher setzt man der Stahlschmelze z. B. Ferro-Mangan zu, eine Eisen-Mangan-Legierung mit 10, 50 oder 80 Prozent Mangan (je nach Bedarf) und 5 bis 7 Prozent Kohlenstoff (zur gleichzeitigen Rückkohlung). Das Mangan verbindet sich mit dem Sauerstoff zu MnO, welches zum großen Teil in die Schlacke geht. Bei dieser Gelegenheit findet auch eine Verringerung des Schwefelgehaltes durch Bildung von Mangan-Sulfid statt. Zu den Maßnahmen der Desoxidation gehören auch eine Kalziumbehandlung der Schmelze und die Gießstrahlabschirmung beim Stranggießen.

Desoxidation:
Desoxidation ist heute nicht nur Entfernung des Restsauerstoffes aus der Schmelze, sondern wird zunehmend mehr zusammen mit anderen Verfahren der Nachbehandlung kombiniert. Dadurch entstehen gleich mehrere Effekte, die den Stahl veredeln.

Die Wichtigkeit einer Desoxidation kann bei der Erstarrung von Stahl beobachtet werden. Der desoxidierte Stahl steht zwar nach beendeter Desoxidation ruhig in der Gießpfanne, scheidet aber, sobald er in die Kokille gegossen wird (siehe *Abbildung 13*), Gase aus und gerät in eine wallende Bewegung, er kocht. Der beim Erstarren frei werdende Sauerstoff verbindet sich mit dem Kohlenstoff. Dieses Gas entweicht durch den noch flüssigen Stahl. Der Stahl erstarrt somit unberuhigt. Beim Vergießen des Stahles in einer Kokille entstehen somit im Inneren des gegossenen Stahl-

blockes hinter einer glatten und dichten Außenhaut Gasbläschen, die nicht mehr entweichen können und im Stahlblock eingeschlossen werden. Es bilden sich kleine Hohlräume. Durch Zugabe von Desoxidationsmitteln (Aluminium, Silizium, Titan, Vanadium) kann man dieses Kochen von Stahl mehr oder weniger stark beruhigen. Man unterscheidet drei Stufen der Beruhigung (Abbildung 12):

DESOXIDATIONSART	DESOXIDATIONSMITTEL	GENORMTES ZEICHEN NACH EN 10025
Nach Wahl des Herstellers		„Freigestellt“
Unberuhigter Stahl	Hat heute keine Bedeutung mehr	"FU" wird heute nicht mehr verwendet
Unberuhigter Stahl nicht zulässig (halbberuhigt-beruhigt)	Al- oder Si-Zugabe	„FN“
Vollberuhigter Stahl (besonders beruhigt) mit einem ausreichenden Gehalt an stickstoffabbindenden Elementen (z. B. min. 0,02 %Al). Wenn andere Elemente verwendet werden, ist dies in den Bescheinigungen über Materialprüfungen anzugeben	Al-, Si-, Ti-, V-Zugabe	„FF“

Abbildung 12: Stufen der Beruhigung von Stahl

Die EN 10025 lässt zu, dass für die Gütegruppen JR, J0, J2 und K2 ein bestimmtes Erschmelzungsverfahren bei der Bestellung vereinbart werden kann.

Nach dem Grad der Desoxidation unterscheidet man also zwischen unberuhigtem, halbberuhigtem und besonders beruhigtem Stahl. Die Wahl richtet sich nach dem Verwendungszweck.

Stahl, der im Strang vergossen werden soll, wird i. d. R. **immer** einer Desoxidation unterzogen. Da dies heute fast ausschließlich der Fall ist, hat unberuhigter Stahl keine Bedeutung mehr.

Einfluss von Ca auf die Bildung nichtmetallischer Einschlüsse

Die Form der Einschlüsse und ihr Verhalten bei der Warmumformung werden durch ihre Zusammensetzung stark beeinflusst. So ist es möglich, durch gezielten Einsatz von Desoxidationsmittel wie Calcium, Mangan usw. Einschlüsse mit gewünschten Eigenschaften zu erzeugen. Dies ist z. B. der Fall bei Stählen mit schwefelhaltigen Einschlüssen die bei den spanabhebenden Verfahren (Automatenstahl) Verwendung finden.

Werden Stähle mit Aluminium beruhigt, kann sich beim Stranggießen die Vergießbarkeit des Stahls durch die Ablagerung fester Einschlüsse (Al_2O_3) er-

schweren. Durch zulegen von Calcium werden die Einschlüsse „modifiziert“ und zusammen mit anderen unerwünschten Begleitelementen aus der Stahlschmelze entfernt.

Gelöstes Calcium greift jedoch die Tonerdeinschlüsse des Aluminiums an, sodass sich eine Vielzahl von Calcium-Aluminaten ergeben. Diese verschiedenen Typen nichtmetallischer Einschlüsse verändern die Eigenschaften der Stähle, insbesondere bei der Warmumformung.

Schon bei geringer Zugabe von Ca wird z. B. die Vergießbarkeit beeinträchtigt, da sich unterschiedliche Einschlusstypen mit Schmelzpunkten von z. B. 1850 °C und 1750 °C ergeben, die in der Schmelze in fester Form vorliegen (zu beachten ist: Die Gießtemperatur des Stahls ist niedriger; ca. 1600 °C).

Wird die Ca-Zugabe erhöht, so bilden sich neue Typen von Einschlussformen, bei denen der Schmelzpunkt unter 1600 °C liegt. Diese Einschlusstypen sind flüssig und verursachen somit beim Stahlabguss keine Probleme.

Wird aber darüber hinaus die Zugabe von Ca gesteigert, bilden sich Ca-Sulfid-Einschlüsse. Auch diese Einschlusstypen behindern den Gießprozess, da sie als feste Bestandteile in der Schmelze vorliegen.

Seigerungen

Es ist ersichtlich, dass bei unberuhigt vergossenem Stahl die aufsteigenden Gasblasen die Restschmelze im Inneren des Blockes umwälzen. Dabei werden die Bestandteile mit niedrigem Schmelzpunkt, vor allem die Schwefel- und Phosphorverbindungen, immer mehr in die Kernzone gespült, wo sie dann nach der vollständigen Erstarrung stark konzentriert vorliegen.

- Bei einer Seigerung (Entmischung) werden die Gefügebestandteile ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt

Die *Abbildung 13* zeigt einen Querschnitt durch unberuhigt und beruhigt vergossene Stahlblöcke.

Die sogenannte Blockseigerung führt zu einer besonders reinen Oberflächenschicht und einer Kernzone mit Anhäufungen von Eisensulfiden und Eisenphosphaten. Die Festigkeit, Zähigkeit und Schweißbarkeit dieses Stahles sind stark herabgesetzt. Andererseits kann man die weichere reine Randzone sehr gut kalt verformen und so bei Drähten und Feinblechen eine besonders glatte Oberfläche erzielen.

Bei beruhigt vergossenem Stahl werden die Verunreinigungen vom Beginn der Erstarrung an mit eingelagert. Die schädlichen Stoffe sind gleichmäßig und fein verteilt und verschlechtern die Eigenschaften kaum.

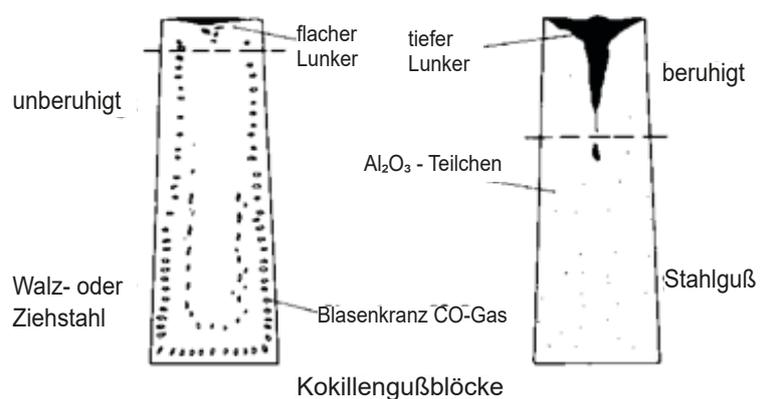


Abbildung 13: Querschnitt durch einen unberuhigt und beruhigt vergossenen Stahlblock

UNBERUHIGTER STAHL

Vorteile	Nachteile	Anwendung
Bei dem unberuhigten Stahl nur kleine Blocklunker, daher erhöhtes Ausbringen, infolge starker Seigerung reine Außenhaut	Starke Blockseigerung, Neigung zum Altern ² , Neigung zur Bildung von sogenannten Fließfiguren	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Beim Auswalzen des Blockes, beim Ausschmieden bei hohen Temperaturen werden in kohlenstoffarmen Stählen die Blasen zusammengedrückt, verschweißt und damit unschädlich gemacht. ▶ Teile, an deren Oberfläche bei Verarbeitung und Verbrauch hohe Anforderungen gestellt werden, und deren Kerneigenschaften von geringer Bedeutung sind. ▶ Feibleche, Bandstahl, Draht, einfache Baustähle, galvanisch zu behandelnde Teile.

BERUHIGTER STAHL

Vorteile	Nachteile	Anwendung
Unbedeutende Blockseigerung, keine nennenswerte Alterung, bessere Zieheigenschaften	Durch großen Blocklunker verringertes Ausbringen, manchmal vereinzelte Randblasen.	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Legierte Stähle und solche mit mehr als 0,3 % Kohlenstoff werden mit geringerem Druck ausgewalzt, weil sich sonst Risse bilden würden. Dabei verschweißen die zusammengedrückten Blasen jedoch nicht, und es entstehen Dopplungen, durch die das Material in den meisten Fällen unbrauchbar wird. ▶ Teile, die stark tief gezogen oder zerspannt werden sollen, höher und besonders und dynamisch beanspruchte Teile, die meisten Stähle im Maschinenbau. ▶ Qualitätsstähle sind stets beruhigt. Legierte Stähle müssen schon deshalb beruhigt werden, damit der Sauerstoff nicht einen Teil der Legierungselemente oxidiert.

² Mit Alterung bezeichnet man die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit nicht umkehrbar ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge im Werkstoff. Durch Alterung werden die Metalle meist spröder, härter und fester.

3.2 Sekundärmetallurgie

Unter Sekundärmetallurgie werden alle Verfahrensschritte zusammengefasst, die im Hüttenwerk außerhalb von Hochofen, Konverter und Elektro-Lichtbogenofen ablaufen. Hierzu gehören

- Pfannenmetallurgie ohne Vakuum
- Vakuummetallurgie
- Sonderverfahren zur Herstellung hochlehgiertes Stähle
- Umschmelzverfahren

Mit den Zielen einer Homogenisierung von Temperatur und Zusammensetzung vor dem Abguss, einer exakten Einstellung der Legierung, Entkohlung, Desoxidation, Einschlusseinformung, Verbesserung des Reinheitsgrades und Beeinflussung des Erstarrungsgefüges wird die Sekundärmetallurgie für die Herstellung von solchen Stählen genutzt, an die höchste Qualitätsansprüche gestellt werden. Insbesondere lassen sich mit ihrer Hilfe niedrigste Gehalte an Kohlenstoff, Schwefel, Sauerstoff, Wasserstoff, Phosphor und einigen Spurenelementen einstellen.

Die Einstellung der gewünschten Analyse, die sogenannte **Feinung**, wurde früher im Schmelzaggregat selbst durchgeführt. Dabei störten Schlacke und die Ofenatmosphäre durch den ungehinderten Luftzutritt erheblich. Damit wurden Nebenreaktionen verursacht, wodurch:

- ▶ Schadstoffe aus der Schlacke in den Stahl zurückwanderten,
- ▶ wertvolle Legierungselemente in die Schlacke oxidierten,
- ▶ Gasgehalte, hauptsächlich Wasserstoff, nicht reduziert werden konnten.

Die Durchführung der Verfahren der Sekundärmetallurgie (Pfannenmetallurgie) erfolgt heute in der

Regel in der Pfanne, im Pfannenofen oder im Konverter selbst. Die Anlagen sind nach dem Baukastenprinzip konzipiert und mehrfach verwendbar sowie erweiterungsfähig für zusätzliche Behandlungen. Die Einzelmaßnahmen der Verfahren sind:

- ▶ die Schmelze liegt unter Schutzgas, meist Argon, oder im Vakuum,
- ▶ die Legierungselemente, Desoxidationsmittel oder Schlackenbildner werden durch Vakuumschleusen in die Schmelze eingeführt,
- ▶ Spülgase (Ar, O₂ und N₂) werden durch poröse Bodensteine eingeblasen und
- ▶ Reaktionsmetalle werden mit Tauchlanzen tief eingeblasen oder als Draht eingesputt.

Bei allen Verfahren der Sekundärmetallurgie werden also bestimmte zweckgerichtete Teilschritte der Stahlerzeugung in geeignete nachgeschaltete Gefäße (Pfannen) verlegt.

Die *Abbildung 14* gibt eine Übersicht über den Verfahrensstand der Sekundärmetallurgie.

Die verschiedenen Maßnahmen und Verfahren der Sekundärmetallurgie sind vielfach kombinierbar, sodass sich exakt angepasste Abläufe zur Herstellung bestimmter Stahlgüten und zur Einhaltung bestimmter Toleranzen von Legierungselementen oder Beimengungen ergeben. Zur Sekundärmetallurgie zählen folgende Verfahren:

- ▶ Entschwefelung
- ▶ Entkohlung
- ▶ Entphosphorung
- ▶ Entfernung des Stickstoffes
- ▶ Entfernung von Wasserstoff
- ▶ Eventuell Entfernung von weiteren Begleitelementen wie z. B. Kupfer, Zinn, Arsen und Antimon

MERKMALE DES ROHSTAHLS	METALLURGIE	VERFAHRENSTECHNIK (KURZNAMEN)
Sauerstoff-, Schwefel- und Phosphorgehalte zu hoch	Desoxidation Entschwefelung Entphosphorung Entstickung	Einblasen von reaktionsfähigen Metallen (Ca, Mg, Al, Ti und Legierungen) mit Tauchlanze, auch kombiniert mit Bodenspülen
Nichtmetallische Teilchen in Schwebelage	Spülverfahren mit Ar, O ₂ und N ₂	Einblasen durch poröse Bodensteine fördert das Aufsteigen von Oxiden, Sulfiden usw.; homogenisiert Temperatur und Zusammensetzung der Schmelze
Gasgehalte zu hoch (Wasserstoff, Stickstoff) C-Gehalte zu hoch	Entgasung im Vakuum (Degassing) Frischen mit Sauerstoff, evtl. zusätzlich Spülen	Vakuum-Umlaufverfahren (RH) Vakuum-Heber-Verfahren (DH) Pfannenstand-Entgasung (VD) Vakuum-Frischen in Pfannen (VOD) Vakuum-Frischen im Konverter (VODC) Argon-Frisch-Verfahren (AOD)
Legierungshalte ungenau	Legieren und homogenisieren	Zugabe bei fast allen Verfahren möglich, meist kombiniert mit Einblasen von Spülgasen zur Badbewegung
Zu niedrige Temperatur	chemisch heizen elektrisch heizen (Lichtbogen)	Al-Verbrennung mit Sauerstoff unter Schutzgas Pfannofen (LF) mit Schutzgas (VOH) Pfannofen (LF) mit Vakuum (VAD)

Schlüssel:

A: Argon

V: Vakuum

D: Degassing, Decarburization

LF: Ladle furnace

C: Converter statt Pfanne

H: Heizen

O: Oxidation

Abbildung 14: Übersicht über den Verfahrensstand der Sekundärmetallurgie³

Vakuumentgasung/-behandlung

Wegen ihrer Vielseitigkeit und ihrer besonderen Vorteile nimmt die Vakuumbehandlung eine Vorrangstellung ein. Heute wird auch sehr oft von der Vakuummetallurgie (siehe Abbildung 15) gesprochen. Wie vorher schon erwähnt, nimmt der flüssige Stahl aus der Umgebungsluft Gase auf und löst sie. Bei der Erstarrung können diese gelösten Gase aber nur teilweise entweichen. Stahl, für höchste Ansprüche, muss aber nicht nur von gelöstem Sauerstoff (Desoxidation), sondern von **allen** gelösten Gasen befreit werden. Zusätzlich zur Entgasung werden weitere metallurgische Reaktionen durchgeführt.

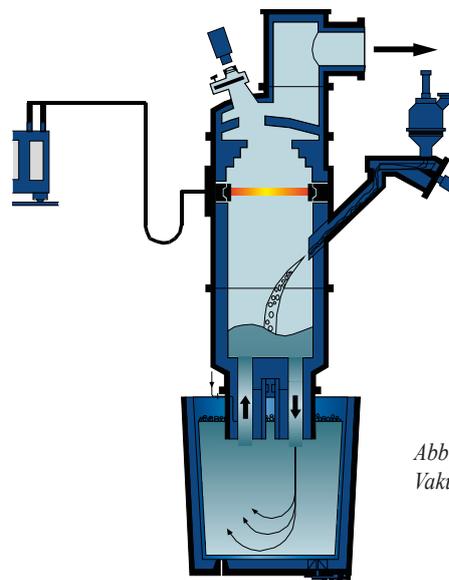


Abbildung 15: Vakuummetallurgie

³ Nach: Weißenbach, W.; Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung; Braunschweig/Wiesbaden

Insbesondere das Legieren und die Feinentkohlung sowie die Verbesserung des Reinheitsgrades werden durch die Vakuummetallurgie erreicht. Die Druckabsenkung (somit kann nicht ganz korrekt von einem Vakuum gesprochen werden) fördert die Entgasung, man erhält Stähle mit großer Reinheit, niedrigen Gasgehalten und erreicht enge Legierungstoleranzen. Je nach dem Ort, wo der Stahl unter Vakuum (vermindertem Druck) gesetzt wird, unterscheidet man Pfannenentgasung, Teilmengenentgasung oder Gießstrahlbehandlung. Die verschiedenen Möglichkeiten sind in der *Abbildung 16* schematisch dargestellt. Auf technologische Einzelheiten wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

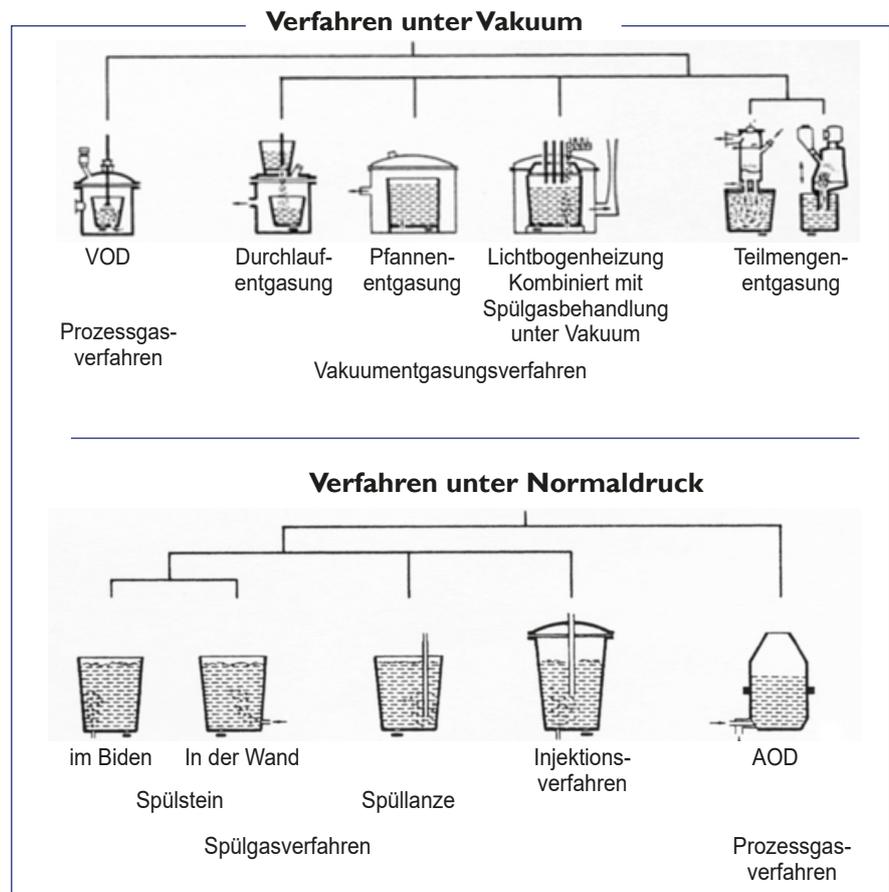


Abbildung 16: Überblick über die gebräuchlichsten Vakuumbehandlungsverfahren⁴

⁴ Siehe Weissenbach, aaO

Aus dem bisher Gelesenen ist ersichtlich, dass die Nachbehandlung (Sekundärmetallurgie) von Rohstahlschmelzen zur Einstellung der Stahleigenschaften grundsätzlich zwei Verfahren unterschieden werden können:

Nachbehandlung unter Normaldruck

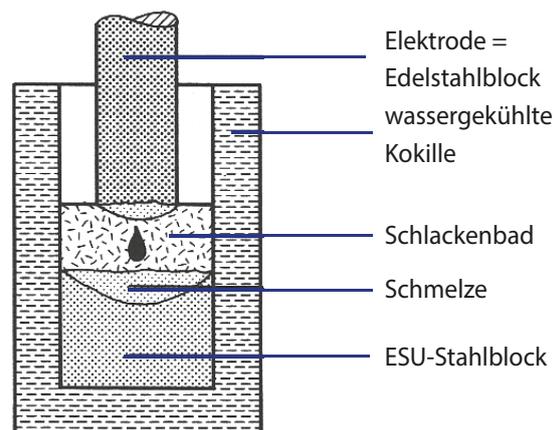
Anwendung: Bleche, Profile, Drähte, also in der Regel alle walzfertigen Erzeugnisse aus allgemeinen Baustählen, Stähle für untere und mittlere Festigkeitsbereiche, Einsatz- und Vergütungsstähle, Automatenstähle.

Nachbehandlung unter Vakuum

Anwendung: Wälzlagerstähle, legierte Einsatz- und Vergütungsstähle, Stähle für hohe Festigkeitsbereiche, höherfeste Baustähle, Feinkornbaustähle, Werkzeugstähle, hochchromhaltiger rost-, säure- und hitzebeständige Stähle.

Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren (ESU)

Bei den Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren wird ein bereits vergossener und erstarrter Stahlblock als selbstverzehende Elektrode in eine flüssige Schlacke von besonderer Art getaucht. Die *Abbildung 17* zeigt das Prinzip des Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahrens.



Elektroschlacke-Umschmelzverfahren

Abbildung 17: Elektroschlacke – Umschmelzverfahren

Beim Durchgang des elektrischen Stromes durch das Schlackenband und den eingetauchten Block wird die Schmelzwärme erzeugt. Beim Abschmelzen des Stahlblockes tropft nunmehr der flüssige Stahl durch die Schlacke, die dann wiederum mit den unerwünschten Beimengungen des Stahles und den im Stahl gelösten Gasen chemisch reagiert. Der nunmehr gereinigte Stahl erstarrt auf der anderen Seite der Schlacke kontinuierlich. Durch besondere Maßnahmen bei diesem Umschmelzverfahren erreicht man eine gerichtete Erstarrung von oben nach unten und der Gasgehalt des Stahls bleibt gering. Der so erschmolzene Stahlblock hat ein feines homogenes und dichtes Gefüge sowie einen besonders hohen Reinheitsgrad.

Die nach diesem Verfahren erschmolzenen Stähle werden auch als Elektro-Schlacke-Umschmelz-Stähle bezeichnet.

3.3 Begleitelemente im Stahl

Von einigen Fällen abgesehen sind die Eigenschaften „reiner“ Metalle vom Herstellungsverfahren unabhängig. Der Aufwand für ihre Erzeugung ist jedoch so groß, dass sie als Konstruktionswerkstoff nicht in Betracht kommen. Weiterhin ist ihre Festigkeit generell sehr niedrig, weswegen ihre Verwendung in vielen Fällen auch technisch unangebracht oder gar unmöglich wäre.

Die technisch „reinen“ Metalle sind jedoch im physikalischen Sinne fast immer Legierungen. „Unlegierter“ Stahl und natürlich legierter Stahl enthalten Begleitelemente die herstellungsbedingt nicht oder nur unzureichend entfernt werden können. Oft werden diese Begleitelemente zur Durchführung metallurgischer Reaktionen benötigt und werden absichtlich der Schmelze zugesetzt.

Daraus folgt, dass bei der **Stahlherstellung** in der Regel ein Einfluss des Herstellungsprozesses – wie zuvor beschrieben – verbunden ist. Das bedeutet aber nicht, dass der Stahleinkäufer das Herstellungsverfahren vorschreibt.

Die durch das Erzeugungsverfahren eingebrachten spezifischen Eigenschaften des Werkstoffes finden sich nämlich bereits in den entsprechenden Normen wieder, d. h. dass mit der Auswahl eines Werkstoffes in vielen Fällen auch das Herstellungsverfahren festgelegt ist, insbesondere dann, wenn es die Eigenschaften maßgeblich bestimmt.

Die Höhe der zulässigen Gehalte an Begleitelementen wird durch ihre Auswirkungen auf die Eigenschaften oder, anders ausgedrückt, durch den vorgesehenen Verwendungszweck des Werkstoffes bestimmt. Je größer der Reinheitsgrad ist, desto höher ist der Preis.

Erklärungen/Glossar

Abschreckdauer

Zeitspanne beim Härten vom Einbringen des Werkstückes in das Abschreckmittel bis zur Entnahme.

Abschrecken

Das rasche Abkühlen eines Werkstückes aus bestimmten Temperaturbereichen durch geeignete Kühlmittel.

Anisotropie

Richtungsabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften. Durch Walzen oder Ziehen erhält das Grundgefüge eine bestimmte Ausrichtung (Textur), oder nichtmetallische Einschlüsse werden zu Zeilen lang gestreckt (Zeiligkeit), sodass sich bei der Werkstoffprüfung längs oder quer zur Walzrichtung unterschiedliche Werte ergeben. Besondere Bedeutung bei kaltgewalzten Blechen.

Anlassen

Jedes Erwärmen nach dem Härten. Je nach der Temperatur unterscheidet man zwei Arten:

1. Das Entspannen bei ca. 150 °C, um die beim Härten entstandenen Spannungen auszugleichen, ohne die Härte zu vermindern.
2. Die letzte Stufe des Vergütens bei 650 °C. Dadurch wird die Härte vermindert, wodurch sich die Zähigkeit des Stahles erhöht.

Auf welche Temperaturen angelassen wird, hängt von der Zusammensetzung des Stahles und den geforderten Festigkeitseigenschaften ab. Immer liegt die Anlasstemperatur aber unter dem unteren Umwandlungspunkt des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms.

Anlassgefüge

Das beim Abschrecken entstandene Härtegefüge (Martensit) verändert sich mit zunehmender Erwärmung: Aus den Martensitnadeln scheidet sich allmählich Zementit aus, wobei Härte und Sprö-

digkeit absinken. Das entstandene Perlitgefüge ist umso feinkörniger, je niedriger die Anlasstemperatur liegt. Weil man hier neue, vom Perlit abweichende Gefügeformen erhält, bezeichnet man die Gefüge, die beim Anlassen aus dem Martensit aufeinanderfolgen, als Troostit und Sorbit.

Aufbereiten

Behandlung von Rohstoffen (Erz, Kokskohle, Schlacke, Schrott, Formsand) zur Erleichterung der Weiterverarbeitung. Das mechanische Aufbereiten erfolgt durch Brechen, Sieben, Entstauben und Waschen. Das thermisch-chemische Aufbereiten wird durch Trocknen, Brikettieren, Sintern und Rösten vorgenommen.

Aufkohlen

Anreichern der Randschicht eines Werkstückes mit Kohlenstoff.

Austenit

Gefüge von Mischkristallen (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm). Unter Normalbedingungen nur oberhalb 721° beständig; durch Legierungszusätze (Ni, Mn) und Abschrecken auch bei Raumtemperatur beständig (Austenitische Stähle). Das Austenitgefüge ist nicht magnetisierbar, zäh und durch Kaltverfestigung härtbar.

Austenitisieren

Erwärmen und Halten auf einer Temperatur oberhalb A_{c3} im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, um das Gefüge vollständig oder teilweise in Austenit umzuwandeln.

Bainit

Zwischenstufengefüge, das dem Vergütungsgefüge ähnlich ist und durch beschleunigte Abkühlung in einer Zwischenstufe zwischen Perlit und Martensit entsteht. Es ergibt sich ein Ferrit mit eingelagertem feinen Karbiden, das im Schlißbild nadelförmig aussieht.

Beruhigter Stahl

Mit Desoxidationsmitteln (Al, Mn, Si,) oder nach einer Vakuum-Behandlung vergossener Stahl.

Blockwalzwerk

Anlage zum Auswalzen der Rohblöcke zum Halbzeug. Beim Duo-Umkehrwalzgerüst ändern die beiden Walzen nach jedem Durchgang (Stich) ihre Drehrichtung. Das Walzgut wird vorwiegend gestreckt. Die Blockschere entfernt den mehr oder weniger lunkerigen Blockkopf und teilt den Walzstrang in Halbzeuglängen auf.

Bramme

Rohstahlblock mit flachrechteckigem Querschnitt. Halbzeug für Blech und Warmbreitband. Man unterscheidet: Rohbramme und Vorbramme.

Charge

(französisch = Bürde, Last): Ofen- oder Konverterfüllung, die einem metallurgischen Prozess unterzogen wird. Chargieren ist das Einbringen des Gutes, Chargendauer nennt man die Behandlungszeit.

Coil

Zur Rolle gewickeltes Breitband, Stahlrohr oder Draht.

Desoxidation

Flüssiger Stahl enthält nach dem Frischen immer eine gewisse Menge gelösten Sauerstoffs. Solche Stähle erstarren unruhig und unter Blasenbildung. Um den gelösten Sauerstoff zu Oxiden zu binden, setzt man der Schmelze vor dem Abgießen einige Stoffe (Desoxidationsmittel) mit großer Verbindungsneigung (Affinität) zum Sauerstoff zu, wie Al, Mn und Si. Auch im Vakuum kann Stahl desoxidiert (beruhigt) werden.

Diffusion

Begriff aus der Physik: selbstständige Durchdringung zweier oder mehrerer Stoffe. Im Stahl ist eine Diffusion nur bei höheren Temperaturen möglich. Stahltechnisch wichtige Diffusionsverfahren sind z.B.

- Aufkohlen
- Alitieren
- Nitrieren
- Sherardisieren
- Inchromieren

Diffusionsglühen

Langzeitiges Glühen bei Temperaturen oberhalb des oberen Umwandlungspunkts zum Ausgleich örtlicher Unterschiede in der Stahlzusammensetzung (Seigerungen).

Direktreduktion

Alle Verfahren, die hochreduzierten Eisenschwamm in fester Form erzeugen. Dabei werden reine Erze feinkörnig oder stückig eingesetzt; die Reduktion geschieht mit Reduktionsgasen (Wasserstoff, Kohlenoxid, Gasmische) oder festen Brennstoffen (Kohle) bei relativ niedriger Temperatur von 600 bis 1.000° C. (Im Unterschied hierzu gibt es die indirekte Reduktion, die über den Hochofen zu flüssigem Roheisen führt.)

Durchhärten

Umwandlungshärten, bei dem die Härtewirkung den ganzen Werkstückquerschnitt erfasst. Bei dickeren Teilen ist ein Durchhärten nur mit legierten Stählen zu erreichen. Im betrieblichen Sprachgebrauch wird unter Durchhärten meist eine annähernd gleiche Härte über den ganzen Querschnitt verstanden.

Durchvergüten

Vergüten, bei dem bis zum Kern des Werkstückes annähernd gleiche Festigkeitseigenschaften erreicht werden. Voraussetzung ist ein Durchhärten.

Einsatzhärten

Das Verfahren umfasst das Aufkohlen (Einsetzen) und das nachfolgende Härten. Das Härten nach dem Aufkohlen kann erfolgen:

1. unmittelbar aus dem Einsatz (Direkthärten)
2. nach Abkühlen und Wiedererwärmen (Einfachhärten)
3. Zweimalige Härtung (Doppelhärten):
Das erste Abschrecken erfolgt unmittelbar aus dem Einsatz und mit Kern-Härtetemperatur, das zweite nach Wiedererwärmen auf Rand-Härtetemperatur

Eisenerz

In der Natur vorkommende Eisenverbindung, die sich zur Verhüttung eignet. Im Eisenerz ist das Metall Eisen in der Hauptsache an Sauerstoff gebunden.

Eisenkarbid

Chemische Verbindung von drei Teilen Fe und ein Teil C (Formel Fe_3C) mit 6,67 % C. Als Gefügebestandteil Zementit genannt.

Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Gibt Auskunft über das Verhalten der unlegierten Eisenwerkstoffe beim Erwärmen und Abkühlen. Es umfasst alle Stahl- und Eisensorten vom Reineisen (linke Grenze 0 % C) bis zum Eisenkarbid (rechte Grenze 6,67 %C).

Eisenschwamm

Produkt, das bei der Direktreduktion anfällt. Die Reduktion des glühenden Erzes ergibt ein porig-schwammiges Eisen, das noch geringe Anteile von Sauerstoff und Schlacke enthält.

Elektrostahl

Im Lichtbogenofen oder (bei kleinen Mengen) im Induktionsofen erschmolzener Stahl. Die Arbeitsweise der Elektrostahlöfen erlaubt die Herstellung hochwertiger Sorten wie rost-, säure- und hitzebe-

ständige Stähle, Schnellarbeitsstähle, Spezialstähle für Maschinenbau, Flugtechnik, Kernenergie und Magnetwerkstoffe.

Eutektikum

Werkstoffgefüge, das beim Erstarren unmittelbar und vollständig aus dem flüssigen in den festen Zustand übergeht und sich durch ein Gemisch aus zwei gleichmäßigen und feinen Kornarten auszeichnet.

Ferrit

Mischkristalle des Alpha-Eisens (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm). Ferrit kann nur sehr wenig C aufnehmen, wohl aber größere Mengen bestimmter Legierungsmetalle wie Cr, Mn, Ni, die seine Eigenart verändern (legierter Stahl). Im unlegierten Stahl kann man Ferrit dem Reineisen gleichsetzen. Ferrit kristallisiert im krz-System (Kristall), ist bis 770 °C ferromagnetisch und gut verformbar. Im Stahlgefüge bildet Ferrit den weichen, dehnbaren Bestandteil.

Ferritische Stähle

Stähle, die bei der Erstarrung ein ferritisches Gefüge erhalten, das durch eine Wärmebehandlung nicht zu beeinflussen ist. Diese Eigenschaften werden insbesondere durch Cr und Si bewirkt.

Flammhärten

Gleichbedeutend mit Brennhärten (Randschicht-härten).

Gamma (Y)-Eisen

Kristallform, die das Eisen bei Temperaturen oberhalb 910 °C annimmt (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm). Gamma-Eisen ist unmagnetisch und löst den Kohlenstoff aus dem Zementit des Stahlgefüges in sich auf. Dadurch entsteht ein einheitlicher Kristallverband (Austenit), Austenit ist zäh. Höhere Ni- und Mn-Gehalte sichern seine Beständigkeit auch bei Normaltemperatur (austenitische Stähle).

Gefüge

Anordnung und Aussehen der Kristallbausteine eines metallischen Werkstoffs. Die Lehre vom Gefügebau heißt Metallografie. Sie hat für typische Gefügebestandteile und Gefügeausbildungen besondere Namen geprägt, z. B. Ferrit, Perlit, Martensit, Austenit usw. (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm).

Gitterfehler

In einem idealen, d. h. fehlerlosen Kristallgitter befinden sich die Atome auf festgelegten Plätzen. Die Raumgitter der technischen Metalle dagegen weisen in ihrem Aufbau verschiedene Unregelmäßigkeiten auf. Diese Gitterstörungen (Versetzungen, Leerstellen, eingelagerte Fremdatome), die schon beim Erstarren der Schmelze entstehen, in stärkerem Maße aber nach Kaltverformung und Ausscheidungsvorgängen im Gitter (Alterung), beeinflussen die Umformbarkeit und verursachen die Kaltverfestigung.

Glühen

Erwärmung des Stahles auf bestimmte Temperaturen mit längerem Anhalten und meist langsamem Abkühlen. Die Behandlung soll das Stahlgefüge in bestimmter Weise beeinflussen. Die Temperaturen für die verschiedenen Glüharten richten sich nach dem C-Gehalt und den Legierungsbestandteilen.

Graphit

Eine der kristallinen Erscheinungsformen des Kohlenstoffs.

Härtbarkeit

Fähigkeit der Stähle, beim Abschrecken aus dem Austenitgebiet Härte anzunehmen.

Härte

Widerstand einer Werkstückoberfläche gegen das Eindringen eines anderen Körpers. Man ermittelt

sie nach verschiedenen Härtemessverfahren (z. B. Brinell-, Rockwell-, Vickers-, Shore-Verfahren).

Härten

Verfahren zur Steigerung der Härte von Eisenwerkstoffen.

Härtesspannungen

Entstehen dadurch, dass die rasche Abkühlung beim Härten die Rand- und Kernzonen des Werkstückes nicht gleichzeitig und gleichmäßig erfasst.

Härtetemperatur

Temperatur, auf die das Werkstück vor dem Abschrecken erwärmt wird.

Hochofen

Schachtofen zum Verhütten von aufbereitetem Eisenerz zu Roheisen. Als Brennstoff und Reduktionsmittel dient Koks.

Kaltverfestigung

Erhöhung der Festigkeit durch Verzerrung des Kristallgefüges. Sie tritt ein, wenn warmgeformte Stahlerzeugnisse kalt nachgezogen, kalt nachgewalzt, kalt gereckt oder kalt verwunden werden. Vor einer weiteren Kaltverformung müssen solche Erzeugnisse gegläht werden.

Karbide

Chemische Verbindungen des Kohlenstoffes (lat. Carboneum) mit Metallen. Sie sind durchweg sehr hart und spröde.

Karbonitrieren

Gleichzeitiges Aufkohlen und Nitrieren des Stahls mit anschließender Umwandlungshärtung durch mehrstündiges Glühen in einem Gemisch aus kohlenwasserstoffhaltigem Gas und Ammoniak, wobei die Oberfläche sowohl C als auch N aufnimmt.

Kastenglühen

Behandlung von Stahlteilen in aus Bodenplatte und Prismenhaube gebildeten Glühkisten. Ein Luftzutritt während des Glühens wird durch Abdichtung der Deckelaufgabe verhindert.

Kokille

Gusseiserne Form zum Abgießen der Rohstahlblöcke und Brammen.

Konverter

Feuerfest ausgekleidetes, zylindrisches Gefäß; an einer Stirnseite zum Konverterhut eingezogen und geöffnet. Im Stahlwerks-Konverter wird Roheisen zu Stahl gefrischt (konvertieren = umwandeln).

Korngrenze

Flächen (im Schliff als Linien sichtbar), mit denen zwei Körner im Kristallgefüge, aneinanderstoßen.

Korngrenzenzementit

Im Gefüge von Stahl mit einem C-Gehalt zwischen 0,8 und 2% zusammen mit der perlitischen Grundmasse enthaltener überschüssiger Zementit.

Korngröße

Größe der Kristallite oder Körner im Stahlgefüge.

Kristall

Alle Metalle sind im festen Zustand kristallin aufgebaut. Ihre Atome bilden ein Raumgitter, d. h., sie ordnen sich nach den geometrischen Gesetzen eines Kristallsystems. Die meisten Metalle erstarren im kubischen oder im hexagonalen System.

Kristallbildung

Entstehung und Wachstum der Kristalle. Sie geht von Kristallisationskeimen (Keimwirkung) aus, die als Feststoffe in der Schmelze vorhanden sind oder sich bei ihrer Erstarrung bilden.

Kristallgitter

Regelmäßige Anordnung der Atome im kristallinen Zustand eines Stoffes. Das Metall Eisen (Fe), das im Stahl das Grundgefüge bildet, kann – je nach dem Temperaturgebiet – zwei verschiedene Gitterformen annehmen: das kubisch-raumzentrierte (krz) Gitter oder das kubisch-flächenzentrierte (kfz) Gitter.

Legierung

Vereinigung eines (Grund-) Metalls mit einem oder mehreren metallischen oder nichtmetallischen Elementen zur Verbesserung oder Erzielung bestimmter Eigenschaften.

Legierungselemente

Chemische Elemente, die dem Stahl zugegeben werden, um seine Eigenschaften in ganz bestimmter Weise zu beeinflussen.

Lichtbogenofen

Flachzylindrisches, kippbares Gefäß. Man füllt ihn von oben bei ausgeschwenktem Deckel mit Schrott und schmilzt diesen mit den Lichtbögen der Kohleelektroden, die durch den Deckel in den Ofen ragen.

Martensit (Härtegefüge)

Feinnadeliges, strukturloses, sehr hartes und sprödes Gefüge. Es entsteht beim Abschrecken von Austenit, wenn so schnell gekühlt wird, dass der Kohlenstoff nicht Zeit findet, das Eisengitter nach der Umwandlung zu verlassen.

Martensitaushärtbare Stähle

Hochlegierte, kohlenstoffarme Stähle (0,03 % C, 18 % Ni, 15 % Co+Mo+Ti). Beim Abkühlen aus dem Austenitgebiet bildet sich ein zäher, verformbarer Martensit, aus dem sich bei nachfolgendem Anlassen die Legierungselemente in fein verteilten Verbindungen ausscheiden und das Gefüge verspannen und härten (Ausscheidungshärtung).

Martensitische Stähle

Infolge ihrer Legierungsgehalte schon durch Abkühlung an der Luft härtende Stähle.

Mechanische Eigenschaften

Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen sind die Festigkeitseigenschaften wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung, Brucheinschnürung, Kerbschlagarbeit in den verschiedenen Zuständen (z. B. vergütet oder normalgeglüht) und unter den unterschiedlichen Beanspruchungen (z. B. hohe oder tiefe Temperaturen, Dauerbelastungen usw.). Im Unterschied dazu: technologische Eigenschaften.

Metallurgie

1. Wissenschaft von der Gewinnung der Metalle und der Erschmelzung und Legierung metallischer Werkstoffe.
2. Erzeugung metallischer Stoffe im großtechnischen Maßstab. Abgeleitete Begriffe: Pulvermetallurgie, Pfannenmetallurgie, Sekundärmetallurgie.

Mikrolegierte Stähle

Stähle, welche die karbid- und nitridbildenden Elemente Niob, Titan und Vanadium einzeln oder auch kombiniert enthalten, die schon bei Zusätzen von wenigen hundertstel Prozent bedeutende Qualitätssteigerungen bewirken.

Nitrieren

Oberflächen- (Randschicht-) Härten durch Stickstoffaufnahme (Aufsticken). Man unterscheidet das Gasnitrieren und das Salzbadnitrieren.

Nitrierstähle

Legierte Edelstähle für das Oberflächenhärten durch Gasnitrieren (Nitrieren). Nitrierstähle sind Al-haltige Chromstähle mit weiteren Legierungszusätzen.

OBM-Verfahren

(Oxygen-Bodenblasverfahren-Maxhütte).

Sauerstoff-Frischverfahren (Sauerstoff-Blasverfahren) im bodenblasenden Konverter mit gekühlten Düsen.

Ölhärten

Härten, bei dem in Öl abgeschreckt wird.

Pelletieren, Pellets

Neben dem Sintern das bedeutendste Verfahren zum Stückigmachen feinkörniger Rohstoffe.

Pfannenmetallurgie

Die Stahlwerksöfen – Konverter oder Herdöfen – können den Qualitätsansprüchen, wie sie an hochbeanspruchte Stähle gestellt werden, nicht immer entsprechen. Man verlegt die metallurgischen Maßnahmen, die hier nötig sind, in die Gießpfanne, die den Stahl nach dem Abstich aufnimmt. Diese Pfannenmetallurgie umfasst neben dem weitgehenden Entschwefeln und Desoxidieren auch das Entgasen, das Abscheiden nichtmetallischer Teilchen, das Legieren und die Einstellung der gewünschten Schmelztemperatur für das Vergießen.

Randschichthärten

Besonderes Härten von Werkstücken, die an der Oberfläche einem hohen Verschleiß oder großen Flächenpressungen ausgesetzt sind. Durch Randschichthärten wird auch die Haltbarkeit bei dauernder, wechselnder Beanspruchung verbessert. Das Verfahren richtet sich nach der Stahlsorte.

Rekristallisation

Milderung der bei einer Kaltverformung entstandenen Gefügeverzerrungen durch eine nachfolgende Erwärmung. Beim Überschreiten einer bestimmten Temperatur (Rekristallisations-Temperatur) beginnt die Neubildung des Feingefüges (Erholung).

Rückfeinen

Durch die hohe Aufkohlungstemperatur bei der Einsatzhärtung wird der überhitzte Kernwerkstoff grobkörnig. Um das Gefüge wieder zu verfeinern, wird das Werkstück von einer Temperatur oberhalb des oberen Umwandlungspunktes des Kernwerkstoffes abgeschreckt. Der Randwerkstoff bleibt durch dieses Rückfeinen unbeeinflusst.

Salzbad

Salzschmelze für das gleichmäßige und zunderfreie Anwärmen von Stahlteilen zum Härten und Vergüten. Durch eine geeignete chemische Zusammensetzung des Bades, z. B. mit Cyansalzen (Cyan ist eine C-N-Verbindung), kann man zusätzlich noch ein Aufkohlen erreichen.

Sauerstoffblasverfahren

Alle Blasstahlverfahren, die mit reinem Sauerstoff frischen. Nach der Art der Sauerstoffzuführung unterscheidet man

1. das Aufblasen,
2. das Bodenblasen und
3. das kombinierte Auf- und Einblasen.

Stich

Durchgang des Walzgutes durch das Walzenpaar.

Strangguss

(Halb)kontinuierliches Verfahren, bei dem der Stahl ein Kühlsystem durchläuft, in das er flüssig eintritt, um es als erstarrter Strang zu verlassen. Sein Profil erhält er in einer gekühlten Durchgangskokille aus Kupfer am Kopf der Anlage. Noch mit flüssigem Kern übernimmt ihn die Sekundär-Kühlstufe, wo er – zwischen Rollen geführt – völlig erstarrt. Dort wird er bei den am meisten verwendeten Bogenanlagen aus der Lotrechten in die Waagerechte umgelenkt.

Thermomechanisches Walzen

Warmwalzen, das die Umformung auf die Vorgänge im Gefüge abstimmt. Dabei spielen Mikrolegierungselemente eine wichtige Rolle, denn sie beeinflussen (verzögern) Rekristallisation und Umwandlung, fördern die Feinkornbildung und härten das Ferritgefüge. Die besten Ergebnisse liefert das thermomechanische Walzen von Warmband oder Stabstahl, bei dem die tiefe Endwalztemperatur, die hohe Endverformung, die Kühlgeschwindigkeit und die Haspeltemperatur genau einzustellen sind. Durch thermomechanisches Walzen behandelte Stähle zeichnen sich durch ein feines Korn und eine hohe Streckgrenze aus.

Vakuum-Metallurgie

Im Vakuum durchgeführte metallurgische Behandlungsverfahren für Metalle im schmelzflüssigen Zustand wie Entgasen, Desoxidieren, Feinentkohlen und Legieren. Beim Stahl zählen hierzu besonders die Nachbehandlungsverfahren zur Entfernung der im flüssigen Stahl gelösten Gase.

Vergüten

Aus Härten und Anlassen bestehende Wärmebehandlung. Durch die Umwandlungshärtung wird die Festigkeit gesteigert, zugleich aber auch das Gefüge neu gebildet und gefeint. Beim Anlassen wird die Festigkeitszunahme durch das Härten zum geringen Teil wieder abgebaut, die Zähigkeit aber über den ursprünglichen Wert hinaus erhöht.

Walzen

Druckumformen durch ein Werkzeug (Walzen), das auf dem Walzgut abrollt. Dabei wird das Walzgut zwischen 2 (beim Planetenwalzwerk auch 3 und mehr) Walzen durchgezogen, bei Sonderverfahren auch eingeschoben. In der Regel wird warm – d. h. am glühenden Teil – gewalzt. Das Kaltwalzen wird dort angewendet, wo die Abstrahlverluste des dünnen Walzgutes zu groß

wären, wo durch das Warmwalzen erreichbare geringe Dicken unterschritten werden sollen und wo höhere Maßgenauigkeit oder höchste Oberflächengüte gefordert werden.

Warmbadhärten

Härten durch Abkühlen in einem Warmbad, dessen Temperatur über oder wenig unter dem Martensitpunkt (Martensit) liegt, ein Halten in diesem Warmbad bis zum Temperatenausgleich und ein nachfolgendes, beliebiges weiteres Abkühlen auf Raumtemperatur, wobei die Härtesteigerung durch Martensitbildung im Wesentlichen bei der Schlussabkühlung entsteht.

Zementit

Metallographische Bezeichnung für die chemische Verbindung des Eisens mit dem Kohlenstoff (Eisenkarbid: Fe_3C mit 6,7 % C). Er bildet silberhelle Kristalle großer Härte und Sprödigkeit. Je nach seinem Anteil am Werkstoffgefüge (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm) erhöht er dessen Festigkeit und Sprödigkeit über die Grenze der Bearbeitbarkeit hinaus.

ZTU-Schaubild

Das Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild zeigt die Abhängigkeit der Gefügeveränderungen von Zeit und Temperatur und ermöglicht dadurch eine Darstellung der zeitabhängigen Härtevorgänge. ZTU-Schaubilder gelten immer nur für eine Legierung einer umwandlungsfähigen Stahlsorte. Jedes Schaubild kann in zwei verschiedenen Ausführungen – für isothermische Umwandlung oder für kontinuierliche Abkühlung – gestaltet sein.

Literaturverzeichnis

Catterjee-Fischer, Ruth	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, 1995; Expert-Verlag
Bargel / Schulz;	Werkstoffkunde, Düsseldorf, 1994; VDI-Verlag
Bundesverband Deutscher Stahlhandel (Hg.)	Stahl, Düsseldorf, 1990; BDS-Fachbuchreihe Band 9
Bundesverband Deutscher Stahlhandel (Hg.)	Stahl-Lexikon, Düsseldorf, 2009; BDS-Fachbuchreihe Band 1
Riehle, Manfred/ Simmchen, Elke	Grundlagen der Werkstofftechnik, 2000; DVG
Ruge, Jürgen/ Wohlfahrt, Helmut	Technologie der Werkstoffe
Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hg.)	Stahlfibel, Düsseldorf, 2009; Verlag Stahleisen
Greven, Magin	Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Hamburg, 2000; Verlag Handwerk und Technik
Deutsches Institut für Normung (DIN)	Stahl. Tabellenbuch für Auswahl und Anwendung, Berlin Düsseldorf, 1995; Verlag Stahleisen
DIN EN 10001	Begriffsbestimmung und Einteilung von Roheisen