

Grundlagen der Metallkunde - Eisen und Stahl

von Werner Schötschel

Inhaltsverzeichnis

		<u>Seite</u>
1	Legierungen	1
2	Zustandsschaubilder	1
3	Das Zustandsschaubild Fe/Fe ₃ C	5
4	Eisenwerkstoffe	10
5	Gewinnung des Roheisens (Erzverhüttung)	11
5.1	Eisenerze	11
5.2	Erzaufbereitung	12
5.3	Vorgänge im Hochofen	13
6	Gewinnung des Stahls	16
6.1	Bessemer- und Thomasverfahren, Siemens-Martin-Verfahren, DSN-Verfahren	16
6.2	LD-Verfahren, LD-AC-Verfahren und OBM-Verfahren	17
6.3	Elektrostahl-Verfahren	21
6.4	Direktreduktion von Eisenerz	22
6.5	Sekundärmetallurgie	22
7	Vergießen und Walzen von Stahl	22
8	Statistische Angaben zum Strukturwandel der Eisen- und Stahlindustrie in den letzten Jahrzehnten	24
Anhang 1	Verbesserung des LD-Verfahrens	27
Anhang 2	Anmerkungen zur Geschichte der Eisenindustrie in Neunkirchen	28
Anhang 3	Hinweise zur Literatur	30
Arbeitsblatt	Übersicht über die Vorgänge im Hochofen	

Grundlagen der Metallkunde - Eisen und Stahl

von Werner Schötschel

1 Legierungen

Eine Legierung ist die erstarrte Lösung (erstarrte Schmelze) zweier oder mehrerer Metalle ineinander.

Legierungen haben meist eine größere Härte als ihre Bestandteile. Die Schmelztemperatur einer Legierung ist nicht der Mittelwert der Schmelztemperaturen ihrer Bestandteile, sondern sie liegt tiefer, manchmal sogar tiefer als die Schmelztemperatur des bei niedrigster Temperatur schmelzenden Bestandteils.

(Es gibt auch Kombinationen von Metallen, aus denen keine Legierung hergestellt werden kann, z.B. Al + Pb!)

Über das Gefüge von Legierungen gibt die Betrachtung angeschliffener und geeignet geätzter Flächen mit dem Auflichtmikroskop Auskunft.

Den Aufbau von Legierungen kann man durch eine thermische Analyse (d.h. durch die Aufzeichnung von Erwärmungs- oder Abkühlungskurven) untersuchen und durch Phasendiagramme (auch Zustandsschaubilder genannt) beschreiben.

(Unter einer Phase versteht man eine homogene - d.h. einheitlich beschaffene - gasförmige oder flüssige oder feste Stoffportion.)

2 Zustandsschaubilder

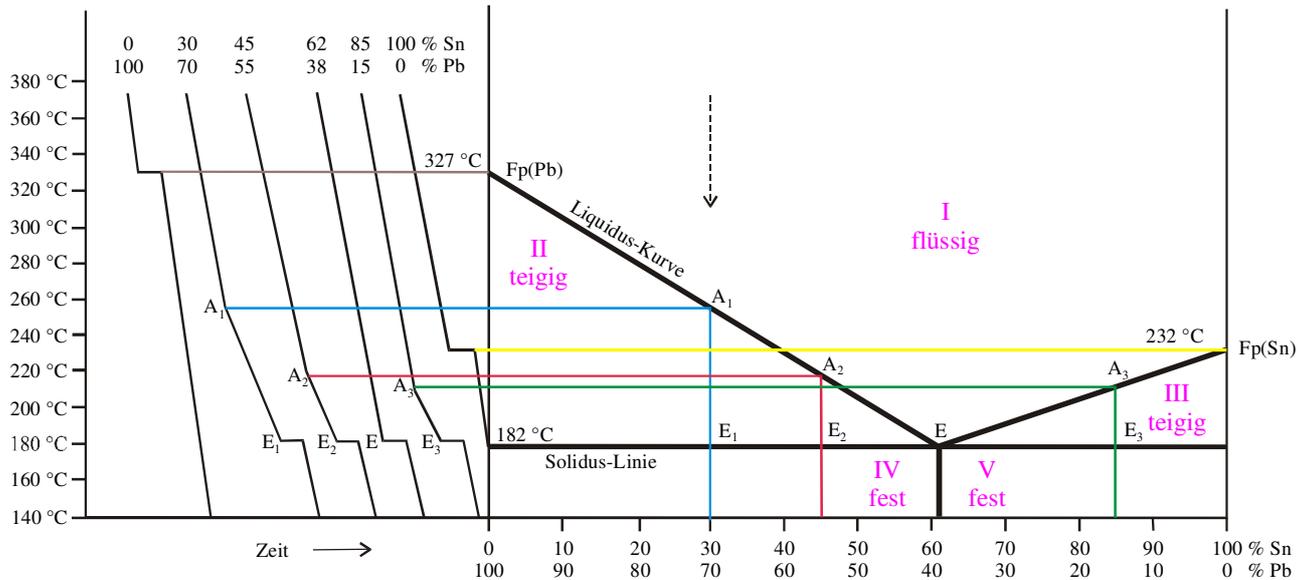
Es gibt 3 Grundtypen von Zwei-Metall-Legierungen:

a) Die beiden Metalle sind im flüssigen Zustand völlig miteinander mischbar (bilden dann also eine einzige Phase), im festen Zustand sind sie nicht mischbar (bilden nach dem Erstarren also 2 Phasen).

Beispiele: Ag/Pb; Bi/Cd; Pb/Sb

Anmerkung: Im Allgemeinen sind die Komponenten im festen Zustand nicht völlig unlöslich ineinander, sondern bilden in mehr oder weniger begrenztem Umfang Mischkristalle. Dies führt zu einer etwas abweichenden Gestalt der Zustandsschaubilder.

Abkühlungskurven und Zustandsschaubild der Legierung Blei/Zinn: siehe Seite 2!



Legierung Blei/Zinn
(Angaben als Massengehalte)

Abkühlungskurven

A₁, A₂, A₃ = Knickpunkte
E₁, E₂, E, E₃ = Haltepunkte

An den Knick- und Haltepunkten wird durch Freiwerden von Erstarrungswärme die Abkühlung verlangsamt. (Ab A₁ und A₂ kristallisiert reines Blei aus, d.h. die noch flüssige Legierung wird allmählich ärmer an Blei; ab A₃ kristallisiert reines Zinn aus, d.h. die noch flüssige Legierung verarmt an Zinn. In E₁, E₂, E und E₃ scheiden sich Blei- und Zinnkristalle gleichzeitig in einem stets gleichbleibenden Massenverhältnis aus, d.h. die Zusammensetzung der Restschmelze bleibt unverändert.)

Zustandsschaubild

I = Schmelze
II = Schmelze + Bleikristalle
III = Schmelze + Zinnkristalle
IV = Eutektikum Blei/Zinn + Bleikristalle
V = Eutektikum Blei/Zinn + Zinnkristalle

Der Punkt E ist die niedrigste Schmelztemperatur aller Legierungen der beiden Metalle. Er heißt eutektischer Punkt. Die Legierung der entsprechenden Zusammensetzung heißt eutektische Legierung oder kurz Eutektikum. [eutektos, gr. = schön gefügt]

Eutektische Legierungen haben gute Gießeigenschaften.

(Die Liquidus-Linien sind meist keine Geraden, sondern leicht gekrümmt.)

Wird z.B. eine Schmelze mit 30 % Sn abgekühlt, dann ändert sich so lange nichts an ihrer Zusammensetzung, bis A₁ erreicht ist. Von da an scheiden sich Bleikristalle aus, d.h. die Restschmelze wird zinnreicher. Ihre Zusammensetzung ändert sich längs der Linie A₁A₂E. Am Punkt E erstarrt die Restschmelze als ein feines Gemenge von Blei- und Zinnkriställchen in der eutektischen Zusammensetzung. Nach der Erstarrung enthält die Legierung relativ große Bleikristalle, die im Eutektikum, d.h. in einem Gemenge kleiner Blei- und Zinnkristalle, eingebettet sind.

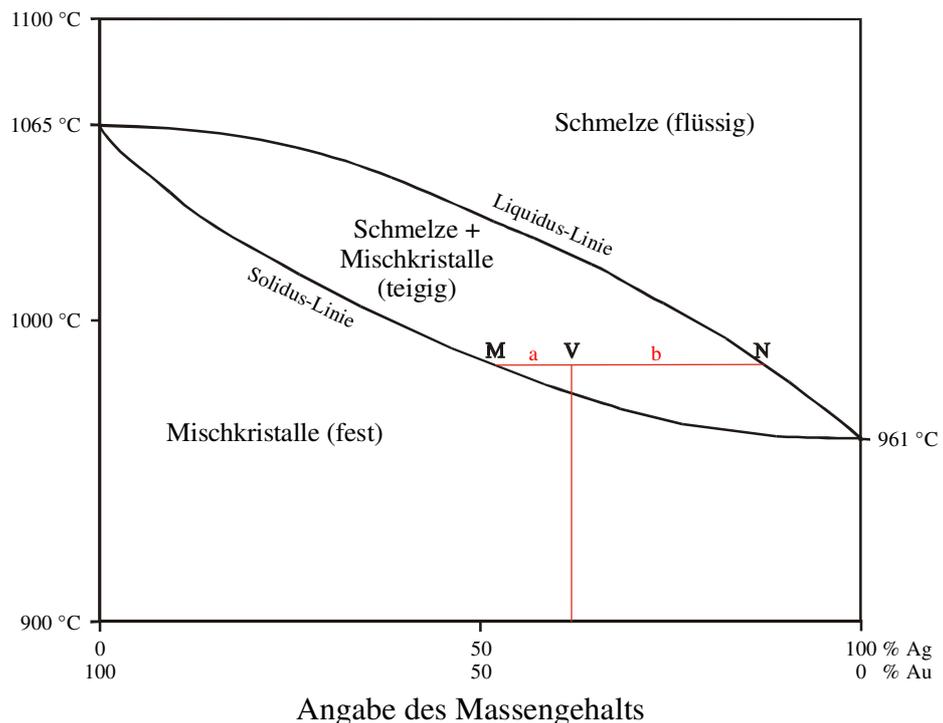
b) Die beiden Metalle sind nicht nur im flüssigen Zustand, sondern auch im festen Zustand völlig miteinander mischbar, sie bilden eine lückenlose Mischkristallreihe.

Voraussetzungen:

- Beide Metalle müssen im gleichen Gittertyp kristallisieren.
- Beide Metalle müssen annähernd gleiche Ionenradien haben (Differenz kleiner als 12 bis 15 %).

In dem Metallgitter kann dann jeder Gitterplatz beliebig von dem einen oder dem anderen Metall besetzt werden.

Beispiele: Ag/Au; Cu/Ni



Den Isothermenabschnitt MN nennt man eine Konode. [con, lat. = gemeinsam; hodos, gr. = Weg; also: Verbindungsweg]

Kühlt man die Schmelze bis unter die Liquidus-Linie ab (z.B. bis V), so kristallisieren Mischkristalle aus. Die Zusammensetzung der Mischkristalle wird durch die zu dem Punkt M gehörende Abszisse, die Zusammensetzung der Schmelze durch die zu dem Punkt N gehörende Abszisse angegeben. Die Massenanteile von Mischkristallen (k) und von Schmelze (s) lassen sich nach dem „Hebelgesetz“ aus dem Diagramm ablesen.

[„Gesetz der abgewandten Hebelarme“:

$$\text{Massenanteil einer Phase (in \%)} = \frac{\text{abgewandter Hebelarm}}{\text{Gesamthebel}} \cdot 100 \%$$

$$k = \frac{b}{a + b} \cdot 100 \% \quad s = \frac{a}{a + b} \cdot 100 \%$$

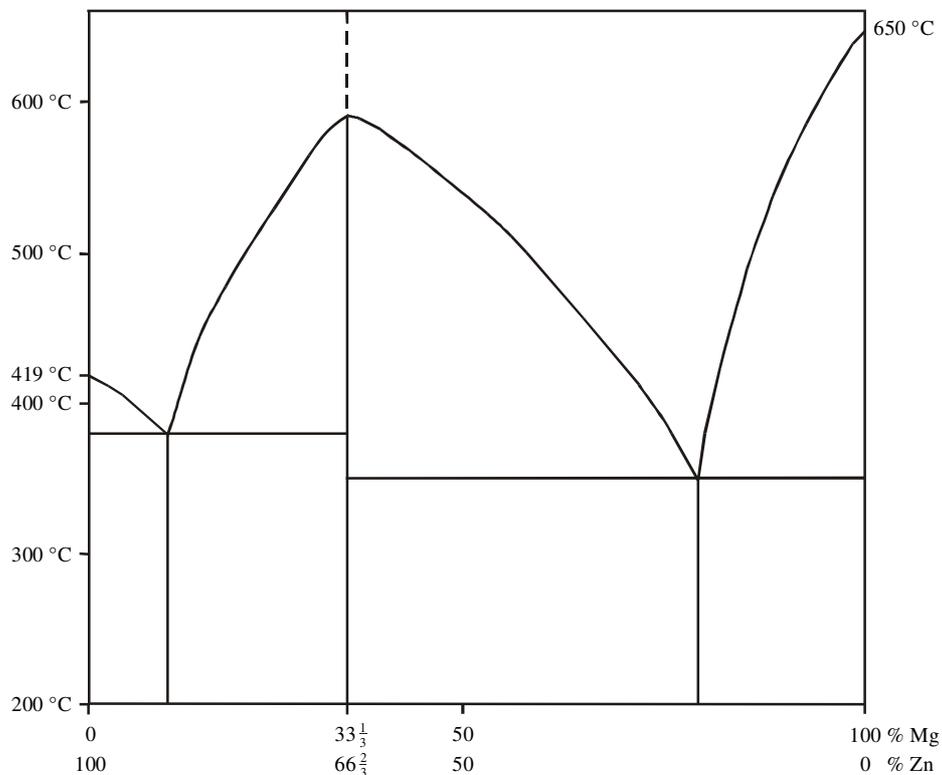
Man stellt sich eine Waage vor, mit dem Drehpunkt in V. An dem Hebelarm a greift die Masse der Mischkristalle an (k), an dem Hebelarm b die Masse der Schmelze (s). Das Hebelgesetz ist die Gleichgewichtsbedingung für die Waage: $k \cdot a = s \cdot b$]

Bei weiterem Abkühlen verarmt die Schmelze immer mehr an Gold, d.h. man muss die Zusammensetzung der Schmelze immer weiter rechts auf der Liquidus-Linie suchen und zugleich die Zusammensetzung der Mischkristalle immer weiter rechts auf der Solidus-Linie.

Zu beachten ist, dass Zustandsschaubilder grundsätzlich die Zustände im Gleichgewicht wiedergeben, was ein extrem langsames Erwärmen oder Abkühlen voraussetzt. In unserem Beispiel (Abkühlen einer Schmelze von 60 Massenanteilen Ag und 40 Massenanteilen Au) könnten sich nur bei äußerst langsamem Abkühlen die Mischkristalle stets der Zusammensetzung der Schmelze annähern (durch Diffusion von Goldatomen aus den Kristallen in die Schmelze bzw. von Silberatomen in die bereits erstarrten Kristalle), sodass die Mischkristalle schließlich bei der Temperatur, bei der alles erstarrt ist, aus genauso viel Silber und Gold bestünden wie die ursprüngliche Schmelze. Bei schnellem Abkühlen entstehen dagegen Mischkristalle, die in ihrem Innern mehr Gold enthalten als außen („Schichtkristalle“).

c) Die beiden Metalle sind im flüssigen Zustand völlig miteinander mischbar, im festen Zustand bilden sie eine „intermetallische Verbindung“ definierter Zusammensetzung (auch „intermetallische Phase“ genannt).

So gibt es z.B. im System Mg/Zn die intermetallische Verbindung $MgZn_2$. Kommen in einer Mg-Zn-Schmelze auf 1 Atom Mg genau 2 Atome Zn, so entstehen beim Erstarren Kristalle der intermetallischen Verbindung $MgZn_2$, die also sofort dieselbe Zusammensetzung haben wie die Schmelze. Mit jeder der beiden reinen Komponenten (Mg oder Zn) bildet die Phase $MgZn_2$ ein normales eutektisches System. Um das gesamte Zustandsschaubild Mg/Zn zu erhalten, braucht man nur die beiden eutektischen Diagramme, deren Liquidus-Linien sich ja bei der Schmelztemperatur der intermetallischen Phase treffen, zusammenzusetzen.



Angabe des Stoffmengengehalts (= Teilchengehalts)!

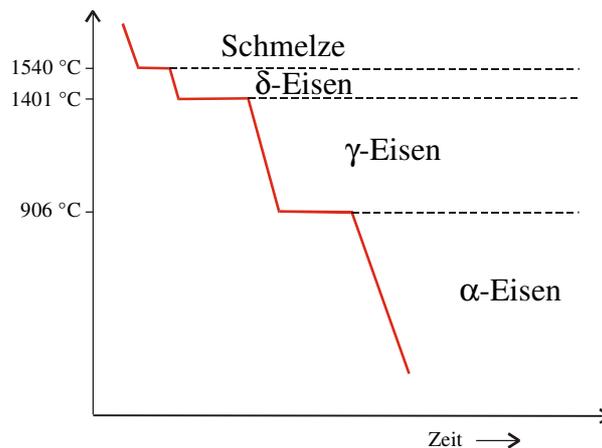
Hinweis: Ein Eutektikum ist im Zustandsschaubild durch ein Minimum der Liquidus-Kurve gekennzeichnet, eine intermetallische Verbindung durch ein Maximum.

3 Das Zustandsschaubild Fe/Fe₃C

Das in der Metallkunde wichtigste Phasendiagramm ist das Zustandsschaubild des Systems Eisen/Kohlenstoff. Eisen bildet mit Kohlenstoff eine mit den intermetallischen Verbindungen vergleichbare Verbindung der Zusammensetzung Fe₃C (ein Eisencarbid), die als Zementit bezeichnet wird (Massengehalt an Kohlenstoff rund 7 %). Zementit hat ungefähr die zehnfache Härte des Eisens.

Das Zustandsschaubild Fe/Fe₃C ist eine Kombination mehrerer Phasendiagramme.

Abkühlungskurve von reinem Eisen (3 Haltepunkte):



reines Eisen bis 906 °C: α-Eisen

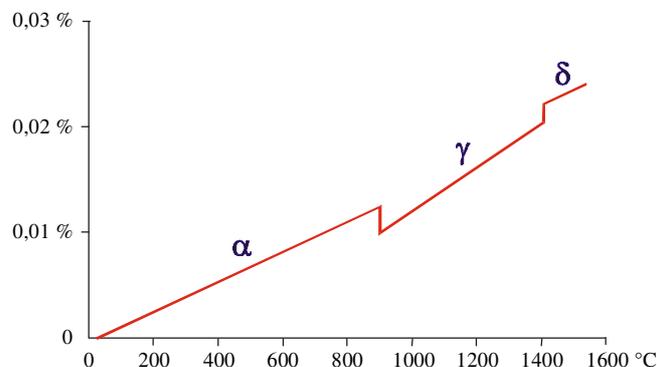
reines Eisen ab 906 °C: γ-Eisen

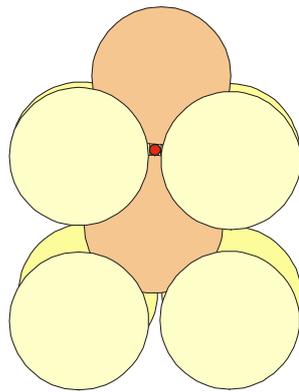
reines Eisen ab 1401 °C: δ-Eisen (eigentlich auch α-Eisen!)

Schmelztemperatur des reinen Eisens: 1540 °C

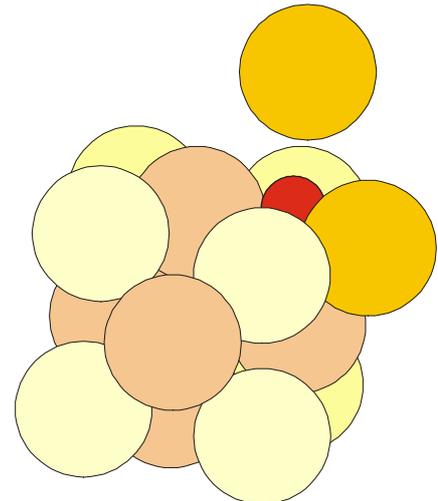
Früher bezeichnete man das α-Eisen oberhalb von 768 °C als β-Eisen, weil bei dieser „Curie-Temperatur“ das Eisen seine magnetischen Eigenschaften verliert. Mit dieser Eigenschaftsänderung ist aber keine Veränderung des Gitters verbunden.

Längenänderung beim Erwärmen von reinem Eisen (Dilatationskurve)





α -Eisen



γ -Eisen

(um die rechte Vorderkante im Uhrzeigersinn leicht gedreht)

In jeder Elementarzelle ist die größte Kugel dargestellt, die in die Lücken zwischen den Eisenatomen hineinpasst. Sie ist für γ -Eisen erheblich größer als für α -Eisen!

Ein Kohlenstoffatom benötigt jedoch noch mehr Platz, als es der eingelagerten Kugel in der rechten Abbildung entspricht. Aus diesem Grund werden die Zelle, in die es sich einlagert, sowie die umliegenden Zellen verformt. In dieser verformten Umgebung eines Kohlenstoffatoms kann kein anderes Atom mehr in das Gitter eingebaut werden. Damit ist verständlich, dass im γ -Eisen, dessen Gitter durch die Einlagerung des Kohlenstoffs nur wenig verformt wird, mehr Kohlenstoff löslich ist als im α -Eisen.

α-Eisen	γ-Eisen
kubisch raumzentriertes Gitter (krz)	kubisch flächenzentriertes Gitter (kfz)
2 Atome je Elementarzelle (Jedes der 8 Eckatome hat an 8 Zellen Anteil, zählt also nur zu $\frac{1}{8}$.)	4 Atome je Elementarzelle (dichteste Kugelpackung) (Jedes der 8 Eckatome zählt zu $\frac{1}{8}$, jedes der auf den Flächen sitzenden Atome zu $\frac{1}{2}$.)
Kantenlänge der Elementarzelle: bei 20 °C: 0,287 nm bei 906 °C: 0,290 nm	Kantenlänge der Elementarzelle: bei 906 °C: 0,365 nm
vermag kaum C-Atome einzulagern (Massenanteil des Kohlenstoffs bei 723 °C bis zu 0,02 %)	vermag reichlich C-Atome einzulagern (Massenanteil des Kohlenstoffs bei 723 °C bis zu 0,83 %, bei 1147 °C bis zu 2,06 %) Die entstehenden Einlagerungskristalle nennt man <u>Austenit</u> .

Hinweise zum Zustandsschaubild Fe/Fe₃C auf Seite 8:

Das metastabile System Fe/Fe₃C hat große Bedeutung, da durch die meist in den Stählen enthaltenen Begleitelemente (z.B. Mn) das Fe₃C stabil wird.

Bei extrem langsamer Abkühlung oder langen Glühzeiten zerfällt der metastabile Zementit in Eisen und Graphit. Das Zustandsschaubild Eisen/Graphit (stabiles System) weicht nur geringfügig von dem Zustandsschaubild des Systems Fe/Fe₃C ab.

- (a) Ein Massenanteil an Kohlenstoff von 6,68 % entspricht 100 % Fe₃C. Man kann also das Fe/Fe₃C-Zustandsschaubild als vollständiges Zweistoffsystem auffassen. Höhere Kohlenstoffgehalte haben technisch keine Bedeutung.
- (b) Durch Weglassen des δ -Eisens und seiner Mischkristalle ist das Zustandsschaubild an dieser Stelle vereinfacht.
- (c) Der Mischkristall Austenit ist chemisch und mechanisch sehr widerstandsfähig. Durch Zulegieren von anderen Metallen kann man den Existenzbereich der austenitischen Phase in Richtung tieferer Temperaturen vergrößern und so auch bei den Gebrauchstemperaturen „austenitische Stähle“ erhalten.
- (d) Als eutektoid bezeichnet man Systeme, bei denen die Hochtemperaturphase eine feste Lösung, also ein Mischkristall ist. Eutektische Systeme haben dagegen eine flüssige Lösung als Hochtemperaturphase.
- (e) Eisen-Kohlenstoff-„Legierungen“ mit über 2,06 % C erstarren eutektisch. Dies ist von großer Bedeutung für den Hochofenprozess.

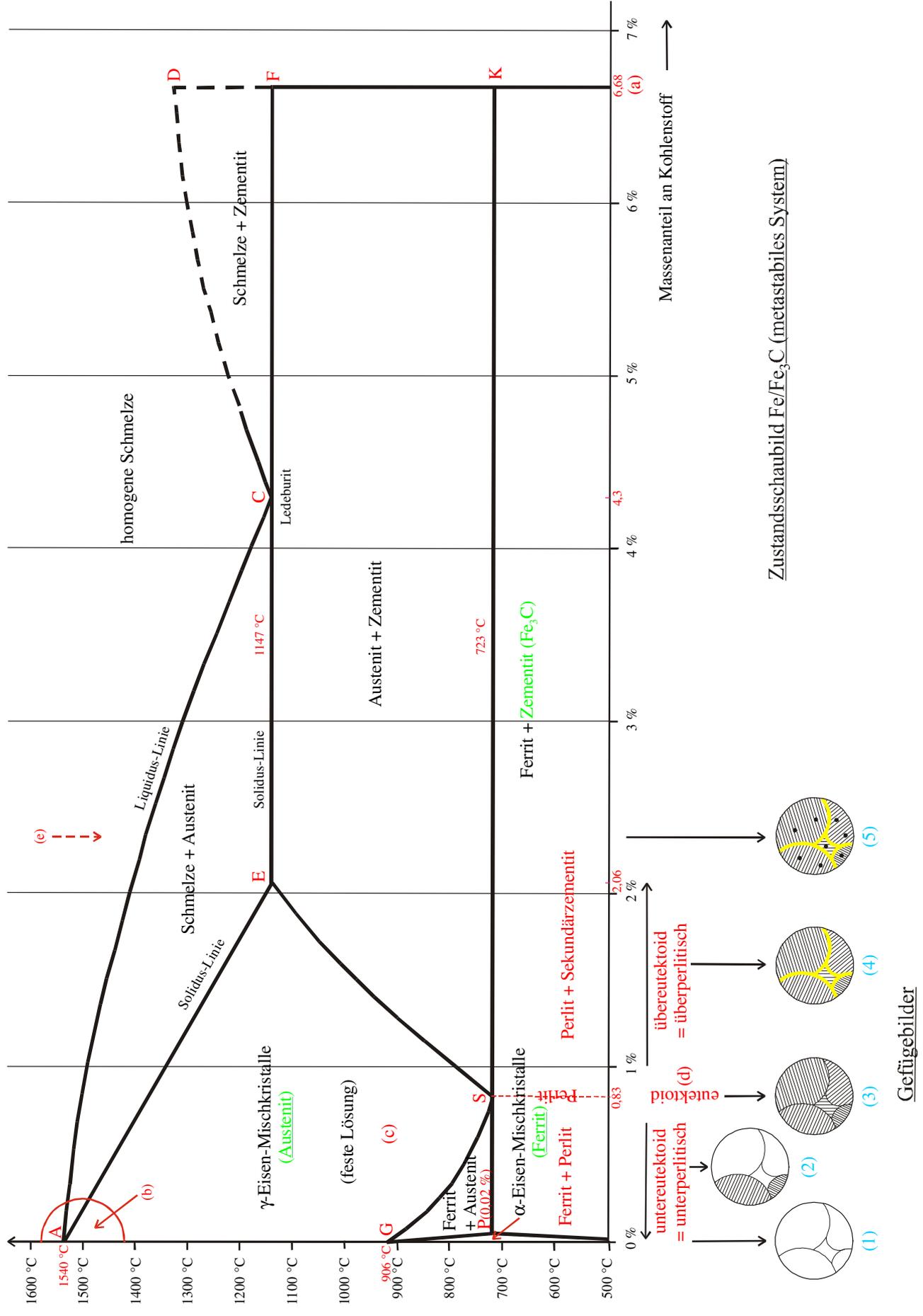
Gefügebilder:

- (1) Ferritkörner (Ferrit ist das Gefüge der α -Eisen-Mischkristalle, deren Massenanteil an Kohlenstoff bei 723 °C maximal nur 0,02 % betragen kann und bei Zimmertemperatur sogar nur rund 10⁻⁵ %!)
- (2) Mischgefüge (Ferrit- und Perlitkörner)
- (3) Perlit (in die Kristallkörner sind Zementitlamellen eingelagert)
- (4) Perlitkörner mit schalenförmig abgelagertem „Sekundärzementit“ (bei 2,06 % C größte Dicke der Schalen)
[Der Sekundärzementit entsteht vor dem Auskristallisieren des Perlits!]
- (5) unregelmäßig in das unter (4) beschriebene Gefüge eingelagerte Zementitkörner

[Ferritkörner erscheinen im Schliffbild hell, Perlitkörner dunkel. Im Innern eines Perlitkorns bestehen die hellen Lamellen aus Zementit und die dunklen aus Ferrit (Beleuchtungseffekt!).]

Ferrit ist zäh und gut verformbar, Zementit sehr hart, spröde und nicht verformbar. Hieraus ergibt sich für die Härte, die Zugfestigkeit und die Verformbarkeit von Stählen:

- Mit steigendem Kohlenstoffgehalt nimmt die Härte des Stahles zu.
- Bis zu einem Kohlenstoffanteil von etwa 0,8 % nimmt auch die Zugfestigkeit zu. Bei höheren Kohlenstoffgehalten wird der Zusammenhalt durch den Korngrenzementit im Gefüge geschwächt, und die Zugfestigkeit nimmt ab.
- Bedingt durch den spröden Zementit nimmt die Warmverformbarkeit mit steigendem Kohlenstoffgehalt ab. Bei einem Massenanteil an Kohlenstoff oberhalb 2 % ist keine Warmumformung mehr möglich. Bei der Kaltverformbarkeit liegt die Grenze sogar bei einem Massenanteil des Kohlenstoffs von etwa 0,8 %.

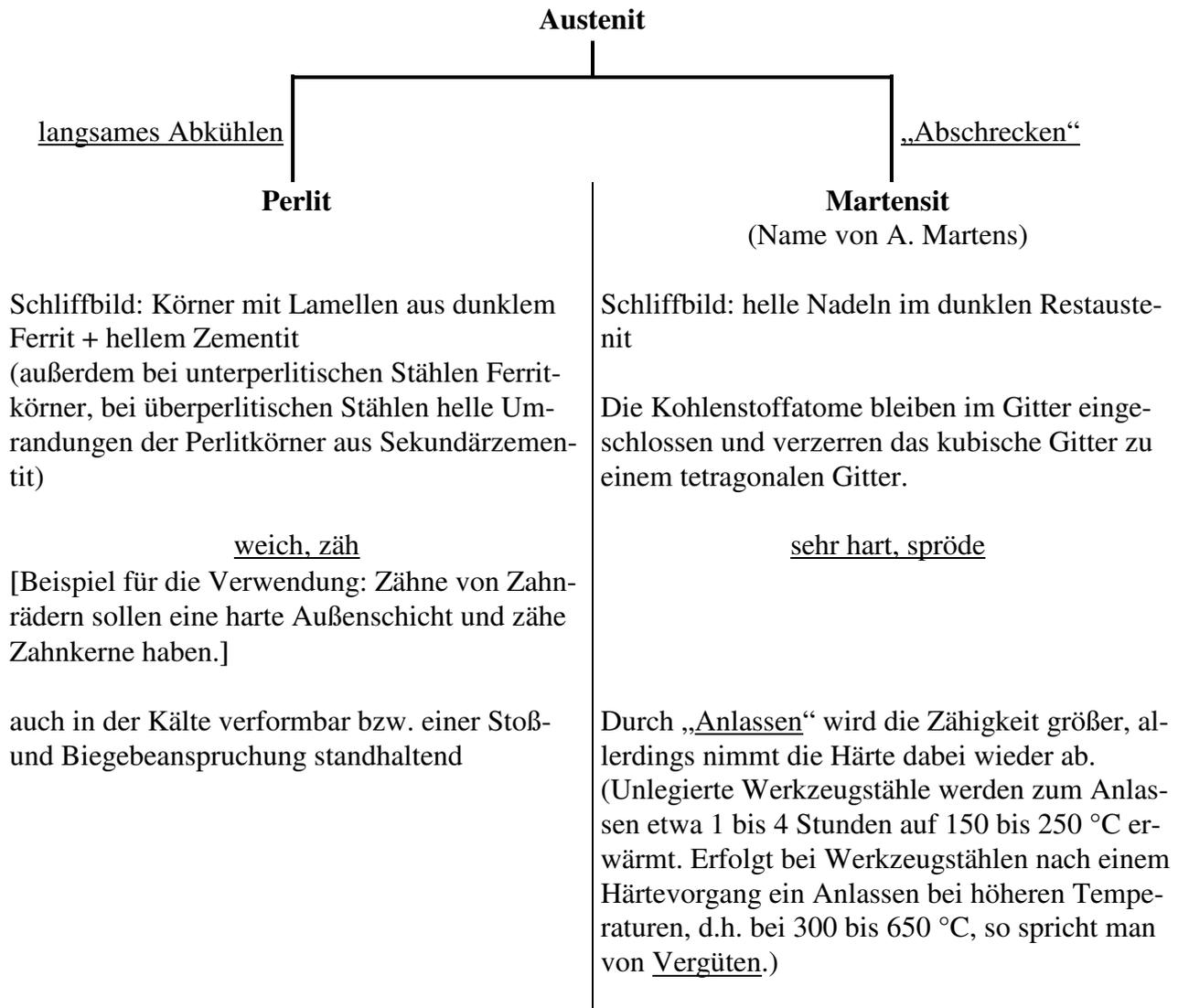


Zustandsschaubild Fe/Fe₃C (metastabiles System)

Gefügebilder

Versuche:

- 1.) Eine Rasierklinge wird 1 bis 2 Minuten mit dem Bunsenbrenner bis zur Rotglut erhitzt und dann langsam aus der Flamme genommen. Nach dem Erkalten ist die Klinge nicht mehr elastisch, sondern weich und durch Biegen verformbar.
- 2.) Dieselbe Klinge wird nochmals erhitzt und dann schnell in kaltem Wasser „abgeschreckt“. Sie bricht nun beim Versuch, sie zu biegen, und ist so hart, dass man mit ihr Glas ritzen kann.
- 3.) Eine durch Abschrecken gehärtete Klinge wird sauber geschmirlgelt und dann in der Nähe der Bunsenflamme schwach erwärmt, ohne dass sie zu glühen beginnt („Anlassen“). Nach dem Abkühlen ist die Klinge wieder elastisch.
- 4.) Ein Stück biegsamer Blumendraht ändert seine Eigenschaften durch Erhitzen und Abschrecken nicht.



Stähle mit einem sehr niedrigen Massengehalt an Kohlenstoff von etwa 0,1 bis 0,2 % (in der Umgangssprache auch als „Eisen“ bezeichnet) können durch Abschrecken nicht gehärtet werden. Eine oberflächliche Härtung (0,5 bis 2 mm tief) ist möglich, indem man den weichen Stahl z.B. in Körnern aus Holzkohle oder Koks, in einer Cyanidschmelze oder auch in einer Propan- bzw. Butanatmosphäre glüht: Zementieren (auch Aufkohlen oder Einsetzen genannt).

Bei einem Stahl mit 0,4 % C besteht nach langsamer Abkühlung ausgehend von einer Temperatur oberhalb der Linie GS das Gefüge zu gleichen Teilen aus Ferrit und Perlit. Mit steigender Abkühlungsgeschwindigkeit nimmt der Anteil des Perlits (der dann aber nicht mehr den eutektischen Gehalt von 0,8 % C aufweist) immer mehr zu, bis schließlich überhaupt kein Ferrit mehr ausgeschieden wird und das ganze Gefüge aus einem Perlit mit 0,4 % C besteht. Wird die Abkühlungsgeschwindigkeit noch weiter gesteigert, so erscheint das nadelige Gefüge (Härtungsgefüge) des Martensits.

4 Eisenwerkstoffe

Als Eisenwerkstoff wird heute jede Legierung bezeichnet, bei der der Massenanteil des Eisens höher ist als der jedes anderen Elementes. Die Eisenwerkstoffe werden unterteilt in Gusseisen und Stahl.

Als Gusseisen bezeichnet man in Formen gegossene Eisenwerkstoffe mit einem Massenanteil an Kohlenstoff von rund 2 bis 4 %. Gusseisen zeigt einen durch Graphit grau gefärbten „Bruch“ und dient zur Herstellung von Graugusswaren, z.B. Öfen, Maschinenteilen und Röhren (Halberger Hütte!). Die Halberger Hütte stellt durch Zusatz kleiner Mengen Magnesium in das flüssige Eisen ein „duktiles Gusseisen“ (Gusseisen mit Kugelgraphit) her, das sich durch hohe Zugfestigkeit und große Verformungsfähigkeit auszeichnet. [Bei zu niedrigem Kohlenstoffgehalt wird die Schmelze zu zähflüssig und das Formfüllungsvermögen ungenügend, ein zu hoher Kohlenstoffgehalt würde infolge der Ausscheidung von zu viel Graphit die Festigkeit herabsetzen.]

Als Stahl bezeichnet man heute alle Eisenwerkstoffe, die zur Warmverformung geeignet sind. Mit Ausnahme einiger chromreicher Stähle enthalten sie weniger als rund 2 % Kohlenstoff. Von praktischer Bedeutung sind bei Stählen aber nur Massenanteile an Kohlenstoff bis zu 1,3 %.

„Legierte“ Stähle enthalten außer Eisen und Kohlenstoff noch bestimmte Mindestgehalte an anderen Elementen, z.B. Mn, Cr, Ni, Si oder Mo. Solche Drei- und Mehrstoffsysteme können nicht mehr in einer Zeichenebene dargestellt werden. Nur für die „unlegierten“ Stähle, die allerdings auch geringe Zusätze an Legierungselementen haben, gilt der grundsätzliche Ablauf der durch das Zustandschaubild Fe/Fe₃C beschriebenen Umwandlungen.

Von niedriglegierten Stählen spricht man dann, wenn der Massengehalt aller Legierungsbestandteile (außer Fe) zusammen $\leq 5\%$ ist. Ein Beispiel für niedriglegierte Stähle ist der Vergütungsstahl 42CrMo4: 0,38 bis 0,45 % C; 0,50 bis 0,80 % Mn; 0,90 bis 1,20 % Cr; 0,15 bis 0,30 % Mo; ferner Si, P, S, N.

Zusammensetzung einiger hochlegierter Stähle

Name	Legierungsbestandteile (außer Fe)	Eigenschaften	Verwendung
Invarstahl	35-37 % Ni; 0,2 % C	geringe Ausdehnung beim Erwärmen	Präzisionsmessinstr., Lochmasken von Farbfernsehgeräten
V2A-Stahl (Nirosta) (x)	15-20 % Cr; 5-9 % Ni; je 0,2 % Mn, Si, C	rostbeständig; beständig geg. HNO ₃ und H ₂ SO ₄ , nicht aber gegen Halogene	Gebrauchsgegenstände, chirurgische Instrumente
Schnelldrehstahl	15-20 % W; 2-5 % Cr; 0,6 % V; 0,8 % C	sehr hart, auch in der Hitze	hoch beanspruchte Bohr- und Schneidwerkzeuge
Chromstahl	zum Beispiel: 6,2 % Cr; 0,65 % C; 0,17 % Mn; 0,07 % Si	sehr hart	Werkzeuge und Kugellager; ein klassischer Kugellager-Stahl ist z.B. der 100Cr6 mit 1,5 % Cr

(x) Der Name „Krupp-V2A-Stahl“ bezieht sich auf „Versuchsschmelze 2 Austenit“.

Hinweis:

Das Neunkircher Eisenwerk (NE) war der größte Produzent Europas für Automatenstähle, z.B. Tellurit, ein mit S, Pb und Te legierter Hochleistungs-Automatenstahl, hergestellt durch Zugabe von metallischem Blei und von „Mangantellur“ in die mit flüssigem Stahl gefüllten Kokillen. Schrauben aus diesem Stahl können mit hoher Schnittgeschwindigkeit hergestellt werden, da die Späne kurz und bröcklig abfallen und daher den Automaten nicht verstopfen.

5 Gewinnung des Roheisens (Erzverhüttung)

5.1 Eisenerze

Eisen ist nach Sauerstoff, Silicium und Aluminium das vierthäufigste Element der Erdkruste (Massenanteil an der Erdkruste: rund 5,6 %).

Name des Erzes	Formel und mittlerer Eisengehalt	Abarten	Vorkommen
Magneteisenstein (Magnetit)	$\text{Fe}_3\text{O}_4 = \text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 55 bis 70 %	(Hammerschlag)	Nordschweden (Kiruna) Norwegen Russland Mexiko
Roteisenstein (Hämatit)	Fe_2O_3 50 bis 60 %	roter Glaskopf Rötel	Lahn-Dill-Sieg-Gebiet Oberer See im Norden der USA Ukraine Brasilien Liberia Australien
Brauneisenstein (Limonit)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ca. 25 bis 35 % [kalkige Minette: 27 bis 35 % Fe kieselige Minette: 30 bis 36 % Fe]	Rasenerz Sumpferz Bohnerz	Salzgitter-Peine- Gebiet Amberg-Sulzbach in der Oberpfalz Lothringen und Lu- xemburg („Minette“) (x)
Spateisenstein (Siderit)	FeCO_3 ca. 30 bis 40 %		Siegerland Steiermark (Erzberg bei Eisenerz: 700 m hoch; 200 Mill. t Erz)
Eisenkies (Pyrit)	FeS_2 ca. 40 %		Siegerland (Meggen) Südwestspanien (Rio Tinto)

(x) Die Minette war früher die wichtigste Erzbasis der lothringischen, luxemburgischen und saarländischen Stahlindustrie (Fläche von 1000 km²; 20 bis 60 m mächtig; Förderung 1962: 69 Millionen t). Bei der Verhüttung von Minette wurde kalkige Minette („basische Minette“) mit kieseliger Minette („saure Minette“) gemischt und dadurch die Schmelztemperatur der Schlacke erniedrigt.

Deutschland ist arm an reichen, aber reich an armen Eisenerzen.

Der Eisenbedarf der westdeutschen Stahlindustrie wurde 1975 nur zu 3,7 % durch den einheimischen Eisenerzbergbau (aus 8 Tiefbaugruben) gedeckt. Zum letzten Mal wurde im Jahre 1994 eine geringe Menge von Inlanderzen verhüttet.

Im Jahre 2000 betrug die Einfuhr von Eisenerzen in die Bundesrepublik Deutschland 47,5 Millionen Tonnen. Davon stammten aus Brasilien 24,3 Millionen Tonnen, aus Kanada 7,7 Millionen Tonnen, aus Australien 6,9 Millionen Tonnen, aus Schweden 5,2 Millionen Tonnen [Schwedenerze sind phosphorreich durch ihren Gehalt an Apatit = $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl},\text{F},\text{OH})$.] und aus Südafrika 1,6 Millionen Tonnen.

Erzeinsatz der Saalhütten für die Roheisenerzeugung (in Millionen t)
(für Sintererzeugung und Direkteinsatz im Hochofen)

Jahr	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Gesamteinsatz	8,8	7,5	7,6	7,2	7,1	6,2	5,7	5,5	6,0
davon Minette	8,6	6,1	4,8	2,6	1,8	0,0	---	---	---
davon „Reicherze“	0,2	1,4	2,6	4,5	4,8	5,1	4,8	4,8	5,1
davon ausländ. Pellets	---	---	0,1	0,1	0,5	1,1	0,9	0,7	0,9

5.2 Erzaufbereitung

- Zerkleinern grobstückiger Erze („Brechen“)
- Anreichern des Erzes durch Ausnutzen von Unterschieden zwischen Erz und Gangart:
 - a) Unterschiede in den magnetischen Eigenschaften
 - b) Unterschiede in der Dichte (In einer „Schwertrübe“ aus Wasser und Ferrosilicium schwimmt die leichtere Gangart auf; z.B. in Spiralscheidern wird das Schwergut an der Innenkante einer spiralenförmig geneigten Rinne angereichert, während das leichte Gut nach außen schwimmt.)
 - c) Unterschiede in der Benetzbarkeit (Flotation: Durch Zugabe von Chemikalien werden entweder die Erzteilchen oder die Gangart wasserabstoßend gemacht. Wird in die aus Wasser und Erz bestehende „Trübe“ Luft eingerührt, so lagern sich die wasserabstoßend gemachten Teilchen an den Luftbläschen an, schwimmen als Schaum auf und können ausgelesen werden.)
- Pelletieren (pellet, engl. = Kügelchen, Pille): Gemahlene Erz wird zusammen mit einem Bindemittel in einer Trommel oder auf einem schräg gestellten rotierenden Teller zu Kugeln geformt („Grünpellets“) und durch Erhitzen auf 1250 bis 1300 °C verfestigt.
- Sintern: Gemahlene Erz (aber auch Gichtstaub, Walzzunder usw.) wird mit ca. 5 % Koks zusammengebacken. [letzte im Neunkircher Eisenwerk betriebene Sinteranlage: Wanderrost aus 145 Rostwagen von je 3 m Breite; Schicht 35 bis 40 cm hoch; 4,5 m langer Zündofen; Wagengeschwindigkeit etwa 4 m in der Minute; fertiger Sinter mit rund 48 Massenanteilen Eisen und 0 Massenanteilen Kohlenstoff]
- (Pyrit muss vor der Verhüttung geröstet werden.)

Der Einsatz von stückig gemachten Erzen, d.h. von Sinter und Pellets, liegt heute in modernen Hochofenwerken bei 80 bis 100 %. Hierdurch wird der Brennstoffverbrauch gesenkt, die Prozessführung verbessert und eine höhere und gleichmäßige Qualität des Roheisens erreicht.

5.3 Vorgänge im Hochofen

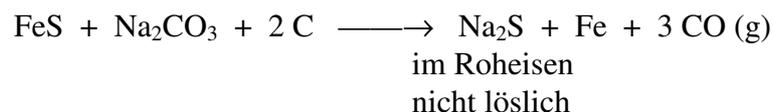
Der Hochofen ist ein aus feuerfesten Steinen gemauerter Schachtofen, der von einem Traggerüst gestützt wird. Von oben wird der Hochofen mit Koks und „Möller“ (einem Gemisch von Eisenerz und Zuschlägen) „beschickt“, im unteren Teil des Hochofens (dem „Gestell“) wird in Winderhitzern = Cowpern aufgeheizte Luft („Wind“) eingeblasen. Zur Verringerung des notwendigen Koksanteils können zusätzliche Kohlenstoffträger in den Hochofen eingeblasen werden, wie z.B. Erdgas, Schweröl oder feinkörnige Kohle.

Übersicht über die Vorgänge im Hochofen: siehe Seite 14!

Da in den Winderhitzern für das Aufheizen des Gitterwerks aus feuerfesten Steinen die doppelte Zeit der Blasperiode benötigt wird, sind im normalen Arbeitsrhythmus 2 Cowper auf „Heizen“ und 1 Cowper auf „Blasen“ geschaltet.

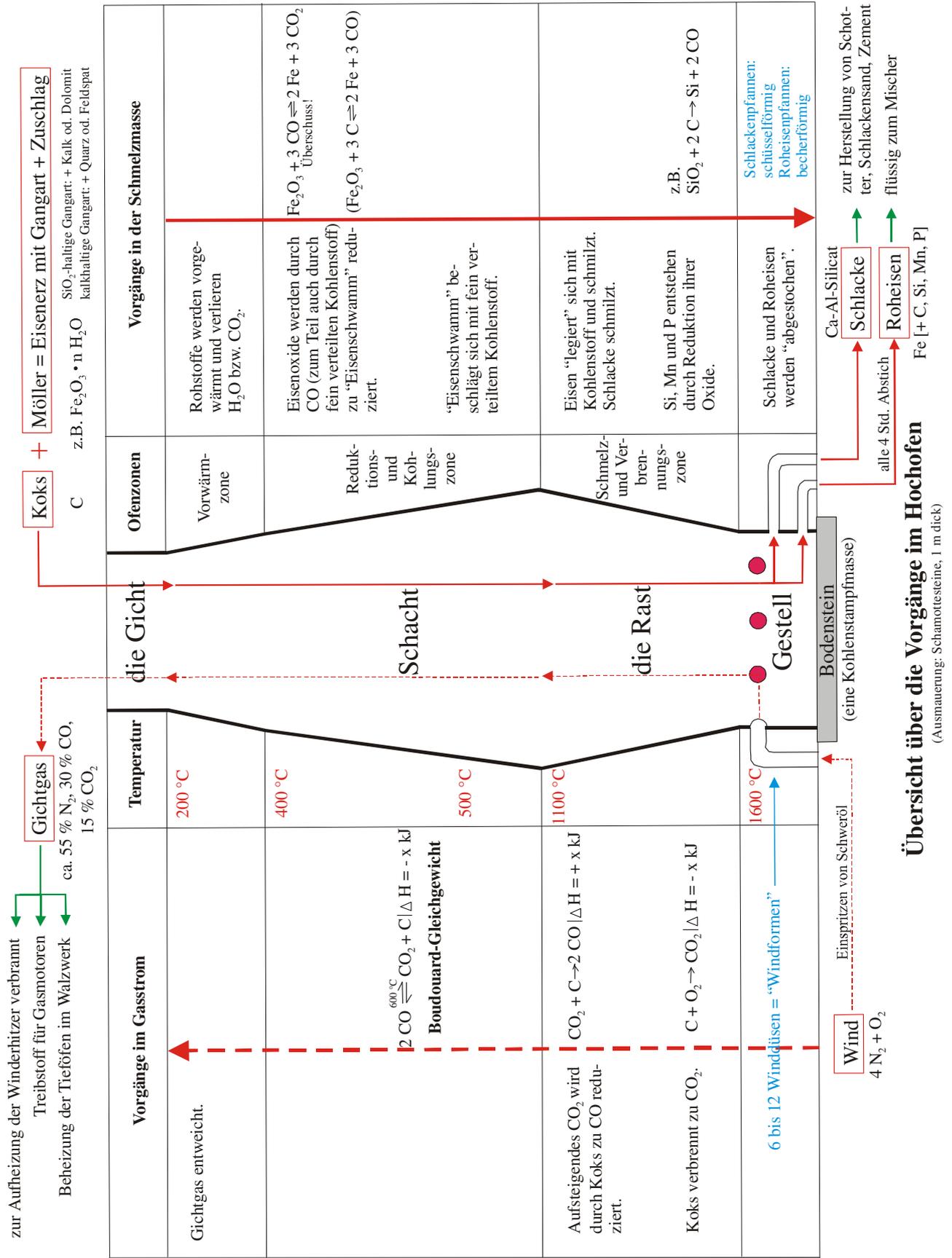
Beim Hochofen benutzte man früher unterschiedliche Abstichlöcher für Schlacke und Roheisen. Da beim Hochofenprozess heute nicht mehr so viel Schlacke anfällt wie früher, erfolgt heute der Abstich von Schlacke und Roheisen gemeinsam durch 2 bis 4 „Stichlöcher“, die mit Hilfe eines Pressluftbohrers aufgebohrt werden. Nach dem Abstich verschließt eine Stopfmaschine die Stichlöcher mit einer in der Hitze schnell aushärtenden plastischen Masse aus Kaolin, Feinkohle und Teer. Die Trennung von Roheisen und Schlacke erfolgt in der Rinne mit Hilfe eines so genannten „Fuchses“, einem eingebauten Balken. Zu Beginn des Abstiches fließt praktisch nur Roheisen aus, gegen Ende kommt dann Schlacke hinzu. Die auf dem Roheisen schwimmende Schlacke staut sich vor dem Fuchs und wird auf höherem Niveau seitlich abgeleitet, während das Roheisen den Fuchs passiert und in einer etwas tiefer liegenden Rinne abfließt.

Beim Abstich des Roheisens wird durch Zugabe von Soda der Schwefelgehalt stark herabgesetzt:



Die „Soda-Schlacke“ schwimmt auf dem Roheisen und wird abgezogen, bevor die Roheisenpfanne in den Mischer entleert wird. [Die Halberger Hütte hat früher das Roheisen der inzwischen stillgelegten Hochofen durch Zugabe von pulverförmigem Calciumcarbid entschwefelt (Schüttelpfannenverfahren).]

Zur Aufnahme des Roheisens stehen entweder offene Pfannen - Stahlblechgefäße mit einer feuerfesten Ausmauerung und einem Fassungsvermögen von 30 bis 100 t - oder geschlossene „Torpedopfannen“ (so genannt wegen ihrer Form) mit Fassungsvermögen bis zu 600 t zur Verfügung. Diese Gefäße sind innen mit einer starken feuerfesten Ausmauerung versehen. In ihnen kann das Roheisen über weite Strecken transportiert werden und längere Zeit stehen, ohne dass ein nennenswerter Temperaturabfall erfolgt.



Früher wurde das Roheisen im Stahlwerk zunächst in so genannten Roheisenmischern gesammelt. Sie hatten ein Fassungsvermögen von 500 bis 3000 t. In ihnen wurde das Roheisen gespeichert (Ausgleich des Arbeitstempos zwischen Roheisen- und Stahlwerk) sowie eine einheitliche Zusammensetzung und einheitliche Temperatur für das aus verschiedenen Hochöfen und von verschiedenen Abstichen („Chargen“) stammende Roheisen eingestellt (Homogenisierung des Roheisens).

Massengehalt des Mischereisens an wichtigen Fremdelementen (Durchschnitt von 3 Hochöfen des NE im Oktober 1978): 3,66 % C; 0,39 % Si; 0,26 % Mn; 1,77 % P; 0,034 % S

Heute werden Mischer nur noch selten verwendet, da zum Transport die größeren Torpedopfannen zur Verfügung stehen und durch den Verfahrensfortschritt das Roheisen der einzelnen Öfen bzw. Abstiche nur noch geringe Unterschiede in den Analysen aufweist. Bei Bedarf kann auch in den Torpedopfannen ein Mischen erfolgen.

Im Jahre 1960 waren in der Bundesrepublik Deutschland 129 Hochöfen in Betrieb, im Jahre 2000 nur noch 16. Der größte deutsche Hochofen („Schwelgern 2“) wurde 1993 von der Thyssen Stahl AG in Duisburg in Betrieb genommen. Er ist rund 46 m hoch, hat einen Gestelldurchmesser von 14,9 m, ein nutzbares Volumen von 4.800 m³ und produziert täglich rund 11.000 t Roheisen. Damit gehört er zu den 3 größten Hochöfen der Welt, die alle etwa gleiche Maße haben. (Die beiden anderen stehen in Japan und in Russland.)

Im Saarland waren im Jahre 1960 in Brebach, Burbach, Dillingen, Neunkirchen und Völklingen insgesamt 25 Hochöfen in Betrieb. Im Neunkircher Eisenwerk arbeiteten 4 Hochöfen mit 12 Winderhitzern. Seit Mitte 1986 wird im Saarland Roheisen nur noch in Dillingen von der Roheisengesellschaft Saar (Rogesa), einer gemeinsamen Tochter der Dillinger Hüttenwerke und der Saarstahl AG, produziert. In 2 Hochöfen werden pro Jahr ca. 4,7 Millionen t Roheisen erzeugt. (Ein dritter Hochofen mit einem Gestelldurchmesser von 8,5 m und einer möglichen Tagesleistung von 2.200 t steht in Reserve, ein vierter ist stillgelegt, aber zurzeit nicht zum Abbruch vorgesehen.)

Hochofen	4	5
Gestelldurchmesser	11,2 m	12 m
Höhe	rund 40,5 m	rund 43 m
Nutzinhalt	2.358 m ³	2.581 m ³
Anzahl der Winderhitzer	3	3
mögliche Tagesleistung	6.400 t	6.800 t
Inbetriebnahme	1974	1985
„Neuzustellung“	2003 (y)	1997 (x)
Jahreskapazität	2,20 Mill. t	2,53 Mill. t

(Als Nutzinhalt bezeichnet man den Raum zwischen Beschickungsoberfläche und Blasformebene.)

(x) Bei der Neuzustellung des Ofens 5 im Jahre 1997 wurde der Gestelldurchmesser von 11 m auf 12 m vergrößert.

(y) Bei der Neuzustellung des Ofens 4 im Jahre 2003 wurde der Gestelldurchmesser von 10 m auf 11,2 m vergrößert.

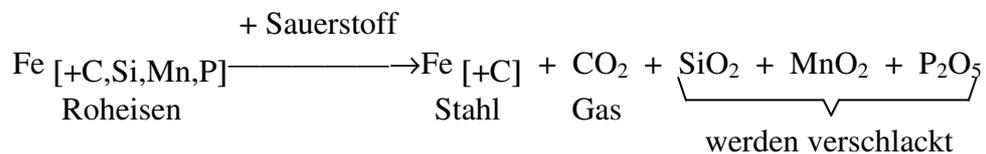
Die Beschickung erfolgt über Transportbänder mit glockenlosem Gichtverschluss. Zur Produktion von 1 t Roheisen werden 1200 kg Sinter (erzeugt in 2 Sinteranlagen), 200 kg Stückerz, 180 kg Pel-

lets, 350 kg Koks und 130 kg Einblaskohle benötigt; der Schlackenanteil beträgt 260 kg pro Tonne Roheisen. Das Roheisen wird in Torpedopfannen zum benachbarten Blasstahlwerk der Dillinger Hüttenwerke (Pfannenvolumen 290 t) bzw. zum Blasstahlwerk in Völklingen (Pfannenvolumen 160 t) transportiert. Das mit 1450 °C eingefüllte Roheisen kühlt sich beim Transport nur um 10 °C pro Stunde ab. Eine Zwischenlagerung in Mischern findet nicht mehr statt.

6 Gewinnung des Stahls

Roheisen ist sehr spröde und schmilzt beim Erhitzen unvermittelt, d.h. ohne vorher weich zu werden; es kann daher weder geschmiedet noch geschweißt werden. Stahl dagegen wird vor dem Schmelzen langsam weich und kann daher in der Hitze verformt werden.

Stahl enthält weniger als rund 2 % C und ist nahezu frei von Si, Mn und P. Um aus Roheisen Stahl zu erhalten, müssen die Fremdelemente mit einer eben ausreichenden Menge Sauerstoff verbrannt und die Oxide - soweit sie nicht als Gase entweichen - durch geeignete Zuschläge verschlackt werden:



Eventuell erfolgt eine „Rückkohlung“, um den gewünschten Kohlenstoffgehalt zu erzielen.

6.1 Bessemer- und Thomasverfahren, Siemens-Martin-Verfahren, DSN-Verfahren

Beim Thomas- und beim Bessemerverfahren wird das flüssige Roheisen in einen birnenförmigen Konverter gefüllt. Durch 100 bis 150 Bohrungen im Boden des Converters wird kalte Luft durch die Roheisenfüllung gedrückt. Der Blasvorgang dauert etwa 20 Minuten. Beim Bessemerverfahren ist der Konverter mit saurem Futter ausgekleidet. Roheisen mit hohem Phosphorgehalt kann allerdings nicht verarbeitet werden, da P₂O₅ nur von basischer Schlacke (CaO) gebunden werden kann, die ein saures Futter angreifen würde. Beim Thomasverfahren ist der Konverter mit Steinen aus gebranntem Dolomit (CaO·MgO) ausgefüttert, sodass auch phosphorreiches Roheisen (z.B. aus Minette) unter Zugabe von gebranntem Kalk bzw. bei Einsatz kalkhaltiger Erze in Stahl verwandelt werden kann. In Deutschland wurde Thomasstahl erstmals 1879 in Dortmund-Hoerde erzeugt. Der erste Thomasstahl an der Saar wurde 1880 in Neunkirchen erblasen.

Beim Siemens-Martin-Verfahren erfolgt die Stahlerzeugung in einer Schmelzwanne, in die Roheisen und Schrott eingebracht werden. Über diesen Einsatz ziehen oxidierende Flammengase. Die Oxidation des Kohlenstoffs und der übrigen Fremdelemente im Roheisen erfolgt über den Sauerstoffgehalt des Metallbades, der sich in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt der Schlacke einstellt. Das Siemens-Martin-Verfahren hat gegenüber dem Thomasverfahren bzw. dem Bessemerverfahren zwar den Nachteil der längeren Dauer (je nach der Ofengröße und der Art des Einsatzes 4 bis 12 Stunden), jedoch die Vorteile, dass große Mengen Schrott eingesetzt werden können und dass eine höhere Stahlqualität erreicht werden kann. Durch die längere Dauer des Vorganges besteht nämlich eine bessere Überwachungsmöglichkeit; ferner hat der SM-Stahl nur einen geringen Stickstoffgehalt, da Luft nur über und nicht durch den Einsatz geblasen wird.

Nach dem Zweiten Weltkrieg ist es gelungen, die Qualität der in Convertern erblasenen Stähle zu verbessern. So wurde z.B. in Neunkirchen das DSN-Verfahren („Dampf-Sauerstoff-Neunkirchen“) entwickelt, mit dem in den Thomaskonvertern SM-ähnliche Stähle hergestellt werden konnten. Hierbei wurde durch Bohrungen in dem etwa 1 Meter dicken Boden des Converters jeweils in ei-

nem Innenrohr Luft mit 35 % Sauerstoff und in einem Mantelrohr überhitzter Wasserdampf eingeblasen. Der Zusatz von Wasserdampf sollte eine zu hohe „Brennflecktemperatur“ vermeiden und so die Haltbarkeit des Konverterbodens steigern. Das Verfahren hatte allerdings den großen Nachteil, dass viel brauner Rauch entstand, was zu einer erheblichen Belastung der Umwelt führte.

All diese Verfahren haben heute nur noch historische Bedeutung. Der letzte Thomaskonverter in der Bundesrepublik Deutschland wurde 1977 in Neunkirchen stillgelegt.

6.2 LD-Verfahren, LD-AC-Verfahren und OBM-Verfahren

Übereinstimmend erfolgt bei all diesen Verfahren das Frischen des Roheisens mit reinem Sauerstoff, sodass man den nach diesen Methoden erzeugten Stahl zusammenfassend als Oxygenstahl bezeichnet.

LD-Verfahren:

L: Linz; D: Donawitz (Vereinigte Österreichische Eisen- und Stahlwerke in Linz und Österreichisch-Alpine Montangesellschaft in Donawitz)

In einem Konverter wird Sauerstoff durch eine ca. 25 Meter lange Lanze von 50 cm Durchmesser mit 22 atü durch eine wassergekühlte Kupferdüse etwa 1,7 m über die Schmelze geblasen (1500 m³ in der Minute). Das LD-Verfahren ist nur für phosphorarmes Roheisen geeignet.

im Saarland:

Dillingen: 2 Konverter mit je 185 t Rohstahlerzeugung pro Schmelze; davon stets einer in Betrieb, der andere „in Zustellung“. Seit Mai 1981 wird nicht mehr das LD-Verfahren angewendet, sondern das so genannte LBE-Verfahren (L = lance; B = bubbling, Spülen; E = equilibrium, Gleichgewicht): der Sauerstoff wird durch eine Lanze aufgeblasen und außerdem kann durch 12 Bodendüsen Argon zur Spülung eingeblasen werden.

Das in Torpedowagen angelieferte flüssige Roheisen wird in eine Chargierpfanne entleert und bei etwa 60 % der Schmelzen eine Entschwefelung durchgeführt, indem mit einer Lanze ein Entschwefelungsmittel eingeblasen und anschließend die schwefelhaltige Schlacke entfernt wird. Das Roheisen wird dann zusammen mit Schrott (je Charge ca. 160 t Roheisen + ca. 40 t Kühlterschrott und weitere Zuschlagstoffe) in den Konverter eingefüllt und dort durch reinen Sauerstoff, der mit einer Lanze aufgeblasen wird, zu Rohstahl verarbeitet. Dabei werden mit Ausnahme von Schwefel die im Roheisen enthaltenen unerwünschten Begleitelemente oxidiert. Es bildet sich eine Schlacke, die die Oxidationsprodukte - sofern sie nicht als Gase entweichen - aufnimmt. Während des Blasprozesses steigt die Temperatur von etwa 1300 °C auf etwa 1700 °C. Beim „Abstich“ (Umfüllen des Rohstahls vom Konverter in die Pfanne) werden Legierungstoffe zugegeben. Etwa 85 % der Produktion werden anschließend einer Vakuumbehandlung unterzogen. Hierbei wird die Pfanne in einem geschlossenen Gefäß bei vermindertem Druck durch den Boden mit Argon gespült. Durch diese Behandlung werden Wasserstoff und Stickstoff entfernt und außerdem durch die sehr heftige Badbewegung der Schwefel aus der Schmelze in einer kalkgesättigten Schlacke abgeschieden. Außerdem können je nach Kundenwunsch Legierungselemente (z.B. Nickel, Kupfer, Mangan, Chrom, Silicium, Vanadium, Niob oder Molybdän) in genauer Dosierung zugesetzt werden. Die Temperatur zum Vergießen der Schmelze kann auf wenige Grad genau eingestellt werden. Zum Schluss wird noch CaSi-Draht eingespült, wodurch die Vergießbarkeit verbessert wird und bestimmte mechanische Eigenschaften im fertigen Produkt erreicht werden können. Die Pfanne wird dann mit einem Kran in den Gießbetrieb gebracht.

Völklingen: Roheisenentschwefelungsanlage mit 3 Einblasständen zur „Coinjektion“ von CaC_2 und Mg; 3 Konverter mit je 165 t Rohstahlerzeugung pro Schmelze; davon jeweils 1 Konverter „in Zu-stellung“

LD-AC-Verfahren:

A: ARBED (Aciéries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange); C: Centre National de Recherches Mé-tallurgiques in Lüttich

Durch die Lanze wird Sauerstoff mit einem Zusatz von Kalkpulver auf die Schmelze geblasen. Das LD-AC-Verfahren ist für phosphorreiches Roheisen geeignet.

Die Vorteile des LD- bzw. LD-AC-Verfahrens gegenüber dem Bessemer- bzw. Thomasverfahren ergeben sich aus folgender Zusammenstellung:

LD-Verfahren	← phosphorarmes Roheisen →	Bessemerverfahren
LD-AC-Verfahren	← phosphorreiches Roheisen →	Thomasverfahren
Vorteil: keine prinzipielle Obergrenze der Konvertergröße (bisher bereits Konverter mit 400 t Rohstahlerzeugung pro Schmelze gebaut)		Nachteil: begrenzte Tragfähigkeit des Siebbodens; obere Grenze des Fassungsvermögens: ca. 90 t
Vorteil: sehr geringer Stickstoffgehalt im Stahl		Nachteil: hoher Stickstoffgehalt im Stahl; Energieverlust, da der mit eingeblasene Stickstoff ebenfalls erhitzt werden muss
Vorteil: Zusatz großer Mengen Schrott (oder auch Erz) möglich (bis zu 30 %)		Nachteil: Schrotteinsatz auf relativ geringe Mengen beschränkt (ca. 10 bis 12 %)
Vorteil: Entstaubung und Abwärmegewinnung möglich		Nachteil: Entstaubung und Abwärmegewinnung nicht möglich

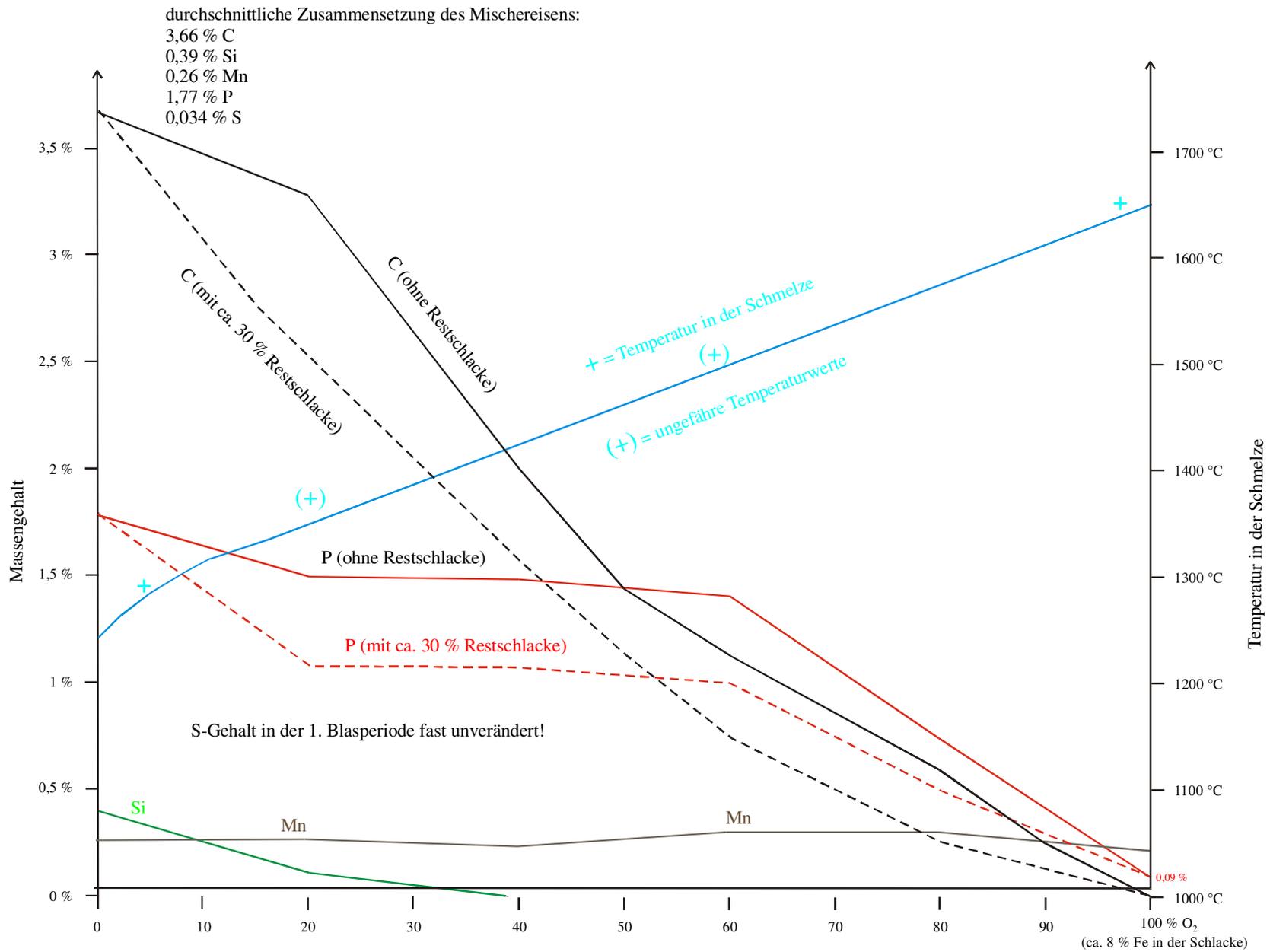
Da sich beim LD/AC-Verfahren der Phosphorgehalt im Stahl nicht so weit absenken lässt wie bei dem von vornherein mit phosphorarmem Roheisen arbeitenden LD-Verfahren, wird das LD/AC-Verfahren aus Qualitätsgründen heute kaum noch angewendet. In Deutschland gibt es keine Stahlwerke mehr, die dieses Verfahren benutzen.

OBM-Verfahren:

OBM: Oxygen - Bodenblas - Maxhütte (Eisenwerk-Gesellschaft Maximilianshütte mbH Sulzbach-Rosenberg in Bayern)

Sauerstoff und Butan (oder Propan) werden durch ca. 10 Ringspaldüsen im Boden des Konverters in die Schmelze geblasen (in jeder Düse Sauerstoff im Innenrohr, das Kühlgas im Mantelrohr). Das OBM-Verfahren ist für phosphorarmes und für phosphorreiches Roheisen geeignet, da in den Sauerstoffstrom aufgewirbelter Kalkstaub eingeblasen werden kann.

Abbrandkurven beim Frischen von phosphorreichem Roheisen im OBM-Konverter: siehe Seite 20!



Abbrandkurven beim Frischen von phosphorreichem Roheisen im OBM-Konverter (1. Blasperiode; ca. 14 min)

Bei Verarbeitung von phosphorreichem Roheisen arbeitet man nach dem Zweischlacken-Verfahren:
Erste Schlacke: 17 bis 20 % P_2O_5 ; 8 bis 10 % Fe; ca. 170 kg/t; wird durch Kippen des Konverters abgegossen; findet als Phosphatdünger Verwendung

Zweite Schlacke: 10 bis 14 % P_2O_5 ; 18 bis 20 % Fe; ca. 60 kg/t; bleibt im Konverter und wird zur Entphosphorung der nächsten Schmelze mitverwendet

Beim Abstich der Schmelze erfolgt eine Zugabe von Kohlenstoff zur Rückkohlung, von geschmolzenem Spiegeleisen bzw. Ferromangan zur Desoxidation und Legierung, ferner von anderen Legierungsbestandteilen, z.B. von Chrom in Form von geschmolzenem Ferrochrom. Bei manchen Stählen hoher Qualität erfolgt vor dem Vergießen ein Homogenisieren, indem die Schmelze in der Gießpfanne mit Argon als „Spülgas“ durchwirbelt wird.

Vorteile des OBM-Verfahrens gegenüber dem LD- bzw. LD-AC-Verfahren:

- relativ geringe Investitionskosten (kein hoher Lanthenturm erforderlich, daher gut geeignet für den Umbau alter Stahlwerke)
- auswurffreies Blasen
- geringerer Eisenoxidgehalt in der Schlacke (bei gleichem Phosphorgehalt)
- unempfindlicher gegen wechselnde Roheisensorten (durch Einblasen von Kalkstaub kann auch Roheisen mit höherem Siliciumgehalt gefrischt werden)
- Nachbehandlung der Schmelze im Konverter möglich (zur Erniedrigung des Phosphorgehaltes kann ein nachträgliches Durchwirbeln von Schlacke und Metallbad mit einem inerten Gas, z.B. Stickstoff, erfolgen)

Nachteil des OBM-Verfahrens gegenüber dem LD- bzw. LD-AC-Verfahren:

- höherer Mess- und Regelaufwand

Hinsichtlich der erreichbaren Stahlqualitäten besteht zwischen dem OBM-Verfahren und dem LD- bzw. LD-AC-Verfahren kein wesentlicher Unterschied. Auch die Konvertergrößen sind vergleichbar (beim OBM-Verfahren Konverter bis zu 250 t Chargengewicht!).

6.3 Elektrostahl-Verfahren

Der erforderliche Sauerstoff wird der über dem Bad befindlichen Luft sowie geeigneten, Sauerstoff abgebenden Zuschlägen entnommen. Man kann festes oder flüssiges Roheisen oder Schrott sowie Mischungen von Roheisen und Schrott verarbeiten. Die Beheizung erfolgt durch elektrischen Strom in Lichtbogenöfen (das geschmolzene Metall bildet die eine Elektrode; darüber befinden sich die Kohleelektroden) oder Induktionsöfen (das Schmelzgefäß ist von einer wassergekühlten Kupferspule umgeben, durch die Strom fließt, der den metallischen Einsatz unter Bildung von Induktionsströmen erhitzt). Die Vorteile des Elektrostahl-Verfahrens liegen darin, dass keine Verunreinigung durch Feuerungsgase erfolgen kann und eine genaue Regulierung des Frischvorgangs möglich ist. Da allerdings der elektrische Strom teuer ist, dient das Elektrostahl-Verfahren nicht dazu, die eigentliche Stahlerzeugung - also die Entkohlung des Roheisens - von Anfang an durchzuführen, sondern es findet Verwendung zur Herstellung von Edelstählen aus ausgewähltem Schrott oder bereits gefrischtem Roheisen.

6.4 Direktreduktion von Eisenerz

z.B. Hamburger Stahlwerke GmbH

Gasspaltanlage: Erdgas wird in die Reduktionsgase CO und H₂ gespalten.

Reduktionsschachtofen: Bei etwa 800 °C wird das Erz dem Reduktionsgasgemisch im Gegenstrom ausgesetzt. Nach einigen Stunden tritt das inzwischen zu annähernd reinem Eisen umgewandelte Erz kontinuierlich aus dem Ofen heraus, ohne dass es seine äußere Gestalt verändert hat („Eisenschwamm“).

Lichtbogenofen: Eisenschwamm und Schrott werden zu flüssigem Stahl eingeschmolzen.

Vorteile:

- auch kleinere Produktionseinheiten wirtschaftlich
- kein Koks erforderlich
- umweltfreundliche Technologie

6.5 Sekundärmetallurgie

Unter dem Begriff Sekundärmetallurgie versteht man die Behandlung der Stahlschmelze vor dem Vergießen zur Erzeugung von Stählen mit höchster Reinheit, z.B. mit einem besonders niedrigen Gehalt an Schwefel oder an den gelösten Gasen Wasserstoff und Stickstoff.

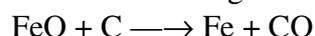
Die im Mai 1999 in Betrieb genommene sekundärmetallurgische Anlage der Dillinger Hütte besteht aus 2 Vakuumgefäßen, in denen durch eine gemeinsame Vakuumpumpe der Druck auf 1 mbar abgesenkt wird. Zu jedem der beiden Vakuumgefäße gehört ein Deckelwagen mit einer vierspürigen Drahteinspulmaschine, einer Sauerstoffaufblaslanze, einer Einrichtung zur automatischen Probenahme und Temperaturmessung sowie einer Vakuumschleuse zur Zugabe von Legierungsmitteln.

7 Vergießen und Walzen von Stahl

Für das Vergießen von Stahl sind zwei verschiedene Verfahren gebräuchlich: das Standguss- und das Stranggießverfahren.

Beim Standgussverfahren (auch Blockgussverfahren genannt) wird der flüssige Rohstahl in Gießformen (Kokillen) abgegossen. Beim Oberguss fällt der flüssige Rohstahl aus der Pfanne unmittelbar in die auf einer Bodenplatte stehende Kokille. Beim Unter- oder Gespannguss fließt der flüssige Rohstahl durch einen Trichter, verteilt sich durch Kanäle in der Gespannplatte auf mehrere Kokillen und füllt diese steigend von unten.

Man unterscheidet unberuhigte, halbberuhigte und beruhigte Stähle. Ein unberuhigt vergossener Stahl „kocht“ in der Kokille: Mit fortschreitender Erstarrung „seigert“ Kohlenstoff aus den Randzonen des Blockes bzw. der Bramme nach der noch flüssigen Mitte:



CO-Blasen steigen auf. Ein unberuhigt vergossener Stahl hat über den ganzen Querschnitt verteilt Blasen.

Zur Beruhigung des Stahles werden Elemente mit einer höheren Sauerstoffaffinität als Eisen in das Stahlbad gegeben (Mn als Spiegeleisen, Si als Ferrosilicium, Hüttenaluminium; Kokillenstandzeiten bis über 2 Stunden). Die Blöcke oder Brammen weisen nach dem Erstarren in Schnittflächen kaum

Blasen auf, dafür besitzen sie aber im Kopf einen „Lunker“, d.h. einen Schwindungshohlraum, der bei der Weiterverarbeitung abgetrennt („geschopft“) werden muss.

Wenn der Stahl erstarrt ist, werden die Kokillen abgezogen („gestrippt“), und die Blöcke bzw. Brammen werden in Tiefofen gebracht, in denen ein Temperatenausgleich zwischen den Randschichten und dem Kern erfolgt. Im Walzwerk werden dann die Vorprodukte in zahlreichen Walzschritten verformt, z.B. zu Schienen, Trägern, Stabstahl, Blechen, nahtlosen Rohren oder Walzdraht als Vormaterial für die Drahterzeugung.

Unterscheide:

Blöcke: feste Rohstahlprodukte in Form von Quadern oder Zylindern. Bei rechteckigem Querschnitt muss die Breite geringer als die doppelte Dicke sein. Im Gusszustand spricht man von Rohblöcken, nach der ersten Formgebung von Vorblöcken.

Brammen: feste Rohstahlprodukte mit rechteckigem Querschnitt, wobei die Breite mindestens doppelt so groß ist wie die Dicke. Im Gusszustand spricht man von Rohbrammen, nach der ersten Formgebung von Vorbrammen.

Stähle von höchster Reinheit und verbesserten mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Zähigkeit) können durch Umschmelzverfahren erzeugt werden. Unter diesen hat das Elektro-Schlack-Umschmelzverfahren (ESU) heute die größte Bedeutung. Als Einsatzmaterial werden Elektroden benutzt, die durch Abguss in Kokillen oder durch Auswalzen bzw. Ausschmieden hergestellt worden sind. Zwischen der Abschmelzelektrode und einer mit Wasser gekühlten Bodenplatte aus Kupfer wird eine elektrische Spannung angelegt, welche die erforderliche Schmelzwärme liefert. Auf der Bodenplatte befindet sich eine elektrisch leitende Schlacke, die hauptsächlich aus CaF_2 , CaO und Al_2O_3 besteht. Die abschmelzenden Stahltröpfchen fallen durch die flüssige Schlacke und geben Verunreinigungen ab. Der flüssige Stahl erstarrt dann in einer Kupferkokille mit innerer Wasserkühlung. Die gerichtete Erstarrung bewirkt ein weitgehend fehlerfreies Gefüge und dadurch eine Verbesserung der technologischen Eigenschaften.

Vielfach wird der Stahl heute nicht mehr in Kokillen vergossen, sondern kontinuierlich in Stranggießanlagen zu langen Strängen. Bei diesem Strangguss gelangt der flüssige Stahl aus der Gießpfanne über ein Zwischengefäß mit regelbarer Austrittsöffnung in eine wassergekühlte Kokille aus Kupfer. Vor Gießbeginn wird der Boden der Kokille mit dem „Kaltstrang“ verschlossen. Sobald die vorgeschriebene Badspiegelhöhe in der Kokille erreicht ist, wird diese in senkrechte Schwingungen versetzt, damit der Strang nicht an der Kokillenwand anhaftet. Der im äußeren Bereich erstarrte Stahl wird nun mit Hilfe des Kaltstrangs und dann weiter durch Treibrollen aus der Kokille herausgezogen, umgelenkt, durch Besprühen mit Wasser gekühlt und durch eine mitlaufende Trennmaschine in die gewünschten Längen zerteilt.

In Dillingen wurde 1961 die erste Stranggießanlage der Welt für Brammen in Betrieb genommen. Heute produzieren in Dillingen 3 jeweils doppeladrige Brammenstranggießanlagen (Stranggießanlagen 3 bis 5). Auf der modernsten Anlage, die seit 1998 in Betrieb ist, können die dicksten Brammen der Welt vergossen werden (Gießgeschwindigkeit 0,15 bis 1,5 m in der Minute). Weiterhin wird aber ein Teil des Stahls zu Blöcken mit einem Maximalgewicht von 60 Tonnen vergossen. Sie sind für besonders dicke Bleche bestimmt, die wegen der geforderten hohen Mindestumformung beim Walzen einen größeren Ausgangsquerschnitt benötigen.

In Völklingen sind 4 jeweils sechsadrige Stranggießanlagen in Betrieb.

8 Statistische Angaben zum Strukturwandel der Eisen- und Stahlindustrie in den letzten Jahrzehnten

Die wirtschaftliche Entwicklung und die neuen Methoden der Stahlerzeugung haben in den letzten Jahrzehnten einen tiefgehenden Strukturwandel in der Eisen- und Stahlindustrie herbeigeführt. Dies zeigt ein Vergleich der Anzahl der Hochöfen, der Roheisen- und Rohstahlproduktion und der Verfahrensweisen in den Stahlwerksanlagen der BRD (von 1991 an unter Einbezug der neuen Bundesländer) und im Saarland:

Jahr	Anzahl der Hochöfen				Roheisenproduktion (in 1000 t)		Rohstahlproduktion (in 1000 t)	
	BRD		Saarland		BRD	Saarland	BRD	Saarland
	vorh.	in Betr.	vorh.	in Betr.				
1960	156	129	30	25	25.739	3.309	34.100	3.753
1965	145	104	29	20	26.990	3.669	36.821	4.062
1970	104	80	25	16	33.627	4.589	45.041	5.206
1975	85	53	19	11	30.074	4.081	40.415	4.488
1980	80	47	15	12	33.873	4.374	43.838	4.859
1985	55	41	13	10	31.531	4.252	40.497	4.666
1990	42	29	7	6 (2)	30.097	3.815	38.434	4.410
1995	29	22	4	4 (1)	30.012	3.678	42.051	4.421
2000	22	16	4	2	30.845	4.051	46.376	4.961

Aufgeführt ist die Anzahl der Hochöfen, die jeweils am Jahresende in Betrieb waren. Für das Saarland gibt eine hinter der Anzahl der Hochöfen in Klammern stehende Zahl an, wie viele davon „gedämpft“ waren, d.h. in gedrosselter Fahrweise betrieben wurden.

vorhandene Stahlwerksanlagen in der Bundesrepublik

Jahr	Thomas-konverter	Bessemer-konverter	Oxygenstahl-konverter	SM-Öfen	Elektroöfen
1960	88	11	---	224	169
1965	58	---	18	182	185
1970	18	---	43	114	176
1975	6	---	49	68	156
1980	---	---	47	29	125
1985	---	---	39	---	100
1990	---	---	35	---	71
1995	---	---	30	---	68
2000	---	---	26	---	59

Stahlwerksanlagen im Saarland: vorhanden / in Betrieb

Jahr	Thomas-konverter	Oxygenstahl-konverter	SM-Öfen	Elektroöfen
1960	20 / 17	1 / 0	15 / 13	5 / 5
1965	20 / 16	2 / 1	15 / 13	5 / 3
1970	14 / 14	4 / 3	15 / 11	6 / 4
1975	5 / 5	10 / 9	9 / 9	4 / 4
1980	---	11 / 10	2 / 0	4 / 4
1985	---	5 / 4	---	3 / 3
1990	---	5 / 4	---	2 / 2
1995	---	5 / 4	---	2 / 2
2000	---	5 / 4	---	2 / 2

Produktionszahlen für die einzelnen Verfahren zur Stahlerzeugung im Vergleich der Jahre 1970 und 2000:

	Welt		BRD		Saarland	
	1970 (1)	2000	1970	2000	1970	2000
Thomasstahl	23.035	---	3.640	---	2.934	---
SM-Stahl	228.661	38.976	11.820	---	791	---
Elektrostahl	85.187	283.520	4.436	13.324	245	216
Oxygenstahl	237.214	493.343	25.136	33.051	1.236	4.745
Sonst. Stahl (2)	3.903	25.314	9	---	---	---
Summe	578.000	841.153	45.041	46.376	5.206	4.961

(1) ohne VR China

(2) und nicht aufgeteilte Mengen

Anteile der einzelnen Verfahren zur Stahlerzeugung im Vergleich der Jahre 1970 und 2000

	Welt		BRD		Saarland	
	1970 (1)	2000	1970	2000	1970	2000
Thomasstahl	4,0 %	---	8,1 %	---	56,4 %	---
SM-Stahl	39,6 %	4,6 %	26,2 %	---	15,2 %	---
Elektrostahl	14,7 %	33,7 %	9,8 %	28,7 %	4,7 %	4,4 %
Oxygenstahl	41,0 %	58,7 %	55,8 %	71,3 %	23,7 %	95,6 %
Sonst. Stahl (2)	0,7 %	3,0 %	0,0 %	---	---	---

(1) ohne VR China

(2) und nicht aufgeteilte Mengen

Die Zahlen für die Erzeugung von Elektrostahl in Deutschland vermitteln ein schiefes Bild von der Bedeutung dieses Verfahrens. Die Kapazität der deutschen Stahlwerke (für Elektrostahl und Oxygenstahl, denn im Konverter werden 15 bis 30 % Schrott zugesetzt) reicht nämlich nicht aus, um den in Deutschland anfallenden Schrott zu verwerten. Wir exportieren daher viel Schrott, vor allem nach Italien, wo die Herstellung von Elektrostahl aus Schrott wegen der niedrigen Strompreise besonders wirtschaftlich ist. Der Elektrostahl hat also europaweit bzw. weltweit betrachtet eine viel größere Bedeutung, als sich aus den Zahlen für die Bundesrepublik Deutschland ergibt.

Anhang 1

Verbesserung des LD-Verfahrens

Eine Verbesserung des LD-Verfahrens kann erfolgen, indem ein inertes Gas durch den Konverterboden eingeblasen und gleichzeitig der Frischvorgang mit der Blaslanze von oben durchgeführt wird.

Das Einblasen erfolgt durch poröse Bodensteine bzw. durch feine Düsen. Als Rührgas verwendet man N_2 oder - wenn eine N_2 -Aufnahme unerwünscht ist - Argon.

Es gibt zurzeit zwei Verfahrensweisen:

1.) Rühren mit schwacher Intensität

Verbrauch an Rührgas ca. 0,5 bis 1 Nm^3/t RE

Wirkung:

- bessere Blasbedingungen auch bei schwer verblasbaren Roheisensorten (Si-Gehalt über 1 %)
- bessere Schrottauflösung durch Rührwirkung
- verbesserte Bad-Schlacken-Reaktionen durch höheren Badumlauf

Die LD-Metallurgie bleibt aber voll erhalten (frühzeitiger hoher FeO-Gehalt in der Schlackenphase zur Beschleunigung der Entphosphorung).

2.) LBE-Verfahren (Lance-Bubbling-Equilibrium)

stärkeres Bodenspülen in Verbindung mit Zweikreislanze

Bodenspülen: Verbrauch ca. 1 bis 2,5 Nm^3/t RE

Zweikreislanze: gleichzeitig harter Primärstrom (etwa zwei Drittel des O_2) und weicher Sekundärstrom (etwa ein Drittel des O_2)

Die Lanze steht in höherer Stellung und braucht weniger verändert zu werden.

Die LD-Metallurgie ändert sich etwas in Richtung auf die OBM-Metallurgie, das heißt auf Gleichgewichtsbedingungen, die allerdings während des O_2 -Blasens nicht erreicht werden.

Vorteile:

- Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten auf schwer verblasbare Roheisensorten
- Erhöhung des Schrottsatzes um ca. 5 % (bezogen auf die Masse des Stahls)
- vereinfachte Blasprozesssteuerung durch besser reproduzierbaren Ablauf und automatische Überwachung (Geräuschmessung!)
- Erhöhung der Produktivität durch Verkürzung der Blasezeiten wegen des ruhigen Blasverhaltens und der schnelleren Schrottauflösung
- Durch Spülgasbehandlung nach Beendigung des O_2 -Blasens können nahezu Gleichgewichtsbedingungen hergestellt werden. Hierdurch sind geringere FeO-Gehalte in der Schlackenphase und O_2 -Gehalte in der metallischen Phase möglich, was einen geringeren Verbrauch an Desoxidationsmitteln zur Folge hat.
- Durch geringeren O_2 -Gehalt in der metallischen Phase wird der oxidische Reinheitsgrad verbessert, d. h. es können Stähle mit höheren Anforderungen an den oxidischen Reinheitsgrad hergestellt werden.

Anhang 2

Anmerkungen zur Geschichte der Eisenindustrie in Neunkirchen

Über 1000 Jahren wurde Eisen im Bereich der heutigen Stadt Neunkirchen gewonnen und verarbeitet (Schmelzöfen im Kasbruch aus der frühfränkischen Zeit, 6./7. Jahrhundert: Fund von „Heidenschlacken“).

1431: urkundliche Erwähnung einer Eisenschmiede in Sinnerthal

1593 errichteten die Grafen von Saarbrücken eine Eisenschmelze genau dort, wo später die Hochöfen des Neunkircher Eisenwerks standen:

- Eisenerzvorkommen in der Nähe (Brauneisenerz im Buntsandstein und Toneisensteine im Karbon)
- Waldreichtum (Erzeugung von Holzkohle!)
- Wasserkräfte zur Bedienung der Blasebälge für die Hochöfen sowie zur Bedienung der Hammerwerke)

1770: Goethe in Neunkirchen (Erwähnung der Neunkircher Eisenschmelze im 10. Buch von „Dichtung und Wahrheit“)

1806: Erwerb des Eisenwerks durch 3 Brüder Stumm

Der Waldbestand nahm immer mehr ab. Erstmals wurde 1840 ein Hochofen ganz mit Koks beschickt. 1833 errichteten die Gebrüder Stumm als erste im Saarland ein Puddlingswerk zur Entkohlung des Roheisens, das die unmittelbare Verwendung von Steinkohle statt Holzkohle erlaubte. Auch das erste Walzwerk im Saarland wurde in Neunkirchen errichtet.

Nach Erschöpfung der Eisenerzvorkommen im Buntsandstein und im Karbon wurden Eisenerze aus dem Rotliegenden (Lebacher Bezirk) verarbeitet. 1839 erwarben die Gebrüder Stumm Erzfelder im Lahngbiet (Transportweg: Lahn - Rhein - Mosel - Saar - mit Fuhrwerken von Saarbrücken nach Neunkirchen). Seit 1868 wurden nur noch Fremderze verhüttet. Nach und nach erfolgte eine Umstellung auf Minette aus Lothringen (1852: Eröffnung der Bahnlinie Neunkirchen - Saarbrücken - Forbach). 1865 kaufte das Neunkircher Eisenwerk Minettefelder in Luxemburg, nach dem Kriege 1870/71 auch in Lothringen. 1890 gründete das Neunkircher Eisenwerk ein Tochterwerk in Ückingen in Lothringen, das zur Roheisenbasis von Neunkirchen wurde (Transportfrage: für 1 t Roheisen sind 3 t Erz und 1 t Koks erforderlich; Koks für Lothringen von der Ruhr).

1880 wurde in Neunkirchen erstmals an der Saar Thomasstahl erblasen. Die letzte Charge Thomasstahl wurde im Sommer 1977 erzeugt, der letzte Siemens-Martin-Stahl im Dezember 1977. Im August 1976 wurde die erste OBM-Charge produziert. Seit Ende Dezember 1977 erfolgte die Stahlerzeugung nur noch im OBM-Werk.

Im Juli 1982 wurde das Neunkircher Eisenwerk mit den Stahlwerken Röchling-Burbach zur Arbed-Saarstahl vereinigt. Kokerei, Hochöfen und Stahlwerk wurden in Neunkirchen stillgelegt. Der letzte Hochofenabstich war am 29. Juli 1982. 1986 erhielt Arbed-Saarstahl die Firmenbezeichnung Saarstahl Völklingen, und 1989 wurde der Name in Saarstahl AG geändert.

Heute sind in Neunkirchen noch 2 Walzstraßen zur Erzeugung von Draht und Stabstahl (Rund-, Sechskant-, Vierkant- und Flachstahl) in Betrieb, die beide mit Stranggussvormaterial aus Völklingen beliefert werden: die Feinstahlstraße und die Morgan-Drahtstraße. Die Vorblöcke haben meist einen Querschnitt von 150 mm x 150 mm und eine Länge von etwa 13 m.

Feinstahlstraße

1972 wurde von dem damaligen Neunkircher Eisenwerk eine neue, vollkontinuierliche Feinstahlstraße in Betrieb genommen. Diese wurde 1992 für mehr als 100 Millionen DM umgebaut und modernisiert. Die Vorblöcke werden nach einer Eingangskontrolle in einem Hochregallager in 3 Gassen auf 60 Etagen in über 3.500 Fächern gespeichert (Fassungsvermögen ca. 23.500 t) und dann über einen Rollgang in einen Hubbalkenofen transportiert. Von dort gelangen die Vorblöcke in eine Vorstraße mit freiem Auslauf und dann in die alte, umgebaute Straße. Thermomechanisches Walzen („Niedrigtemperaturwalzen“): Durch niedrigere Anstichtemperaturen und durch mehrere über den Verlauf der Straße verteilte Zwischenkühlphasen liegt die Temperatur am Ende des Walzvorgangs bei etwa 800 °C (statt normal bei etwa 1000 °C). Durch diese Walzstrategie erhält man Gefügeausbildungen im Stahl, die eine nachfolgende Wärmebehandlung verkürzen oder ganz überflüssig machen. Durch Einsatz eines so genannten Kocks-Blockes (drei um jeweils 120° versetzte Walzscheiben statt der klassischen Duo-Anordnung von Ober- und Unterwalze) erreicht man bessere Toleranzen bei Rundquerschnitten. Mit 3 Haspeln werden die Produkte in Ringe gewickelt. Stabstahl dagegen gelangt auf das 130 m lange Kühlbett.

Neben Massenstahl werden auch Edelstähle verarbeitet, z.B. der weiterhin von Saarstahl in Völklingen erschmolzene „Neunkircher Automatenstahl“ (mit S, Pb, Bi und Te).

Morgan-Drahtstraße

Sie wurde 1963 als dreiadrige Straße erbaut und 1982 umgebaut auf 1 Ader für große, von Stranggussanlagen erzeugte Vorprodukte. Das Vormaterial wird in 2 parallel zur Walzwerkshalle angeordneten Dispositionslagern, die größtenteils als Hürdenlager ausgelegt sind, gespeichert. Die Vorblöcke wurden früher in einem Stoßofen vorgeheizt, der im Jahre 2005 durch einen Hubbalkenofen ersetzt worden ist. Um die für das thermomechanische Walzen erforderliche Zwischenkühlstrecke in der vorhandenen Halle unterbringen zu können, wird der Stab nach dem Verlassen des Zwischenblocks durch einen 104 m langen ellipsenförmigen, sich selbst überquerenden „Loop“ zum Fertigblock geführt und beim Durchlaufen dieser Bahn in drei Stufen gekühlt. Der glühende Draht wird nicht mehr sofort in Haspelschüsseln aufgewickelt, sondern zunächst auf einer langen Rollentransporteinrichtung spiralförmig abgelegt, wobei eine isolierende Abdeckung für langsame Abkühlung sorgt. Hierdurch erreicht man höhere Walzgeschwindigkeiten und gleichmäßigere Werkstoffeigenschaften des Stahls.

Als Verformungswerkzeuge finden Walzblöcke mit Walzringen aus Hartmetall statt der konventionellen Gerüste mit Gusswalzen Verwendung.

Die Walz-Endgeschwindigkeit beträgt bis über 100 m/s, d.h. bis über 360 km/h!!

Literatur: Dillinger Hütte Saarstahl AG (Hrsg.): 400 Jahre Eisen und Stahl aus Neunkirchen. Dillingen: 1993

Anhang 3

Hinweise zur Literatur

- (1) Brinkmeyer, Wolfgang u.a.: Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
Verlag W. Girardet, Essen 1974
- (2) Hougardy, Hans: Die Umwandlung der Stähle, Teil 1
Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1975
- (3) Rudolph, Joachim: Knaurs Buch der modernen Chemie
Droemersch Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf., München und Zürich 1971

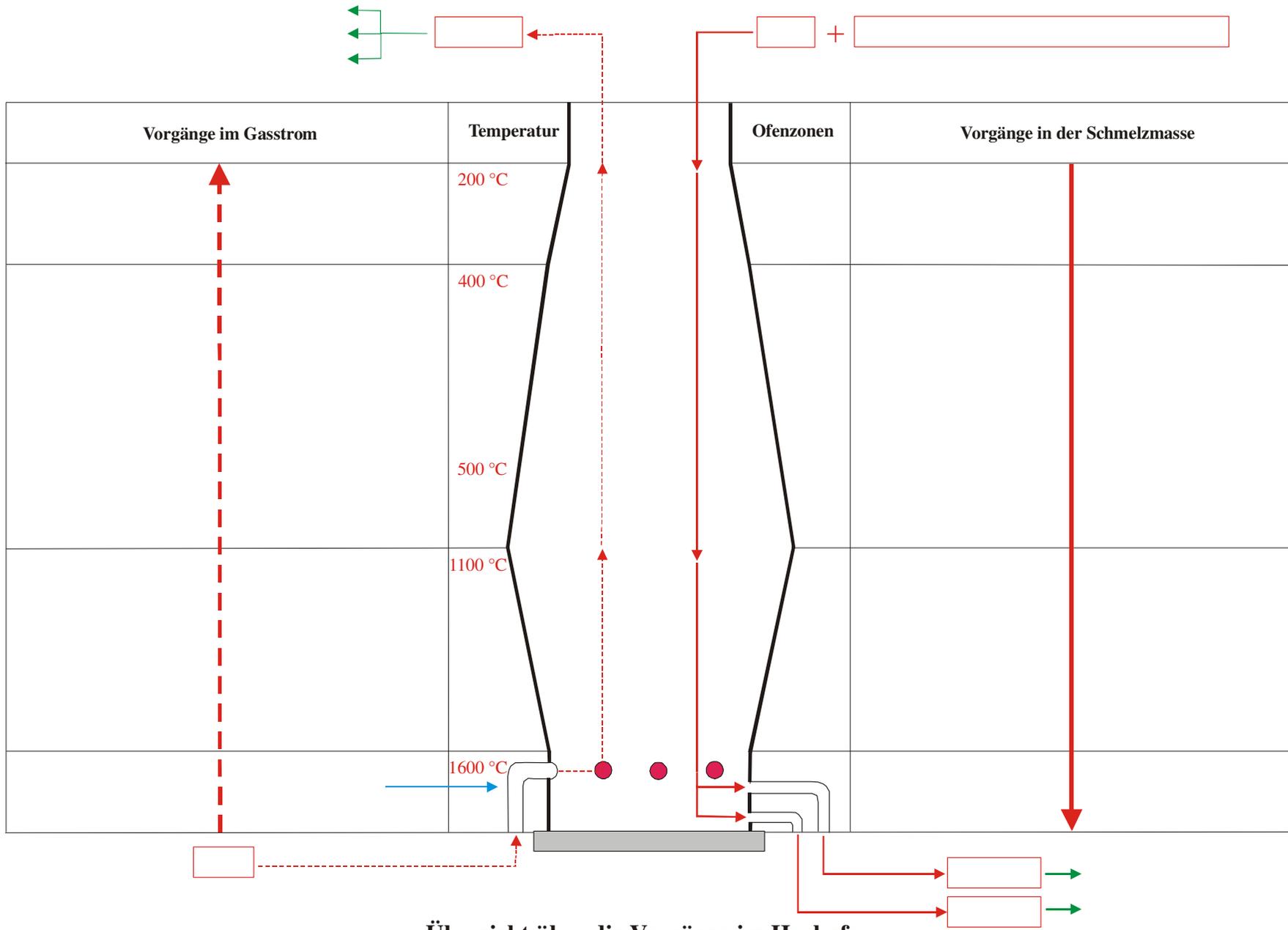
(1) bis (3) sind zwar schon vor längerer Zeit erschienen, sind aber auch heute noch hervorragende Einführungen in die Interpretation von Zustandsdiagrammen. (1) ist als programmiertes Lehrbuch geschrieben, das in vielen kleinen Schritten das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm erläutert und in die Grundlagen der Wärmebehandlung des Stahls einführt. (3) geht im Kapitel „Legierungen“ ausführlich auf Zustandsdiagramme ein. Leider ist gerade dieses Kapitel in der Taschenbuchausgabe nicht enthalten.

- (4) Schmackpfeffer, Claudia: Eisen und Stahl, unter Berücksichtigung des Eisen-Kohlenstoff-Diagrammes
Pädagogische Arbeit zur zweiten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen, Neunkirchen 1997
- (5) Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Stahlfibel
Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1989
- (6) Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie

(4) stellt den neusten Stand der Stahltechnologie dar.

(5) bringt ausführliche Informationen zum Themengebiet „Eisen und Stahl“. Jeweils im Abstand von einigen Jahren erscheinen Neuauflagen. Die Broschüre kann bezogen werden vom Verlag Stahleisen GmbH, Postfach 105164, 40042 Düsseldorf, Telefon: 0211-6707-0, Fax: 0211-6707-517; E-Mail: stahleisen@stahleisen.de.

(6) ist eine jährlich erscheinende Zusammenstellung von Statistiken rund um den Stahl.



Übersicht über die Vorgänge im Hochofen