

Eisen

Eisen ist in vielerlei Hinsicht ein außergewöhnliches Metall. Es ist das vierthäufigste Element in der Erdkruste nach Sauerstoff, Silizium und Aluminium (Merkpruch: "Oh, Sie Altes Ferkel"). Eisen läßt sich mit relativ geringem Aufwand aus seinen Erzen gewinnen. Außerdem ist es eines der wenigen ferromagnetischen Metalle. Aber die größte Besonderheit des Eisens liegt in der großen Bandbreite an Eigenschaften, die man nur durch gezielte Bearbeitungsschritte erreichen kann. In dieser Hinsicht zeigt nur Titan ein vergleichbares Verhalten und Titan ist im Gegensatz zu Eisen ungleich schwerer aus seinen Erzen zu gewinnen und damit deutlich teurer. So ist Eisen auch heute noch das mit Abstand bedeutendste Material auf der Erde.

Eisen, Stahl, Gußeisen

Von (Rein)eisen spricht man, wenn praktisch kein Kohlenstoff enthalten wird. Reineisen hat eine sehr geringe Festigkeit. Es hat kaum praktische Bedeutung und wird nur aufgrund seiner magnetischen und elektrischen Eigenschaften manchmal eingesetzt.

Eisen kommt bis 906°C als alpha-Eisen in [kubisch-raumzentrierter](#) Struktur vor. Dann wandelt es sich in gamma-Eisen mit [kubisch-flächenzentrierter](#) Struktur um. Diese Umwandlung ist für die Stähle von enormer Bedeutung. Kurz bevor Eisen bei 1535°C schmilzt, wandelt es sich nochmals in die kubisch-raumzentrierte Struktur um (delta-Eisen), doch spielt dies keine technische Rolle. Unterhalb von 768°C ist alpha-Eisen [ferromagnetisch](#), darüber [paramagnetisch](#). Gamma-Eisen ist immer [paramagnetisch](#) (in bestimmten Legieren gibt es auch bei Raumtemperatur gamma-Eisen).

Stahl enthält zwischen 0 und 1,8 Gewichtsprozent Kohlenstoff. Zu Stahl gibt es noch eine Menge mehr zu sagen, deswegen wird er später gesondert besprochen.

Gußeisen enthält zwischen 1,8 und 4,5 Gewichtsprozent Kohlenstoff. Es schmilzt bei etwa 1200°C. Da Gußeisen nicht geschmiedet werden kann, wird es zur Verarbeitung aufgeschmolzen und in die endgültige Form gegossen. Danach kann es nur noch spanabhebend, also durch sägen, schleifen, fräsen oder ähnliches bearbeitet werden. Gußeisen ist relativ spröde und ziemlich hart.

Eisenverhüttung, Stahlgewinnung

Der im folgenden beschriebene Prozess gilt für Stahl und Gußeisen gleichermaßen. Nur Reineisen muß anders hergestellt werden.

Um Eisen aus seinen Erzen zu reduzieren braucht man eigentlich nur Kohlenstoff und genügend hohe Temperaturen (ca. 1600°C). Heutzutage wird Stahl ausschließlich in Hochöfen produziert, doch mit einem guten Gebläse geht das auch in kleineren Öfen. Auf den genauen Ablauf der Stahlgewinnung im Hochofen gehe ich hier nicht ein. Wer sich dafür interessiert, wird im Internet unter dem Stichwort "Hochofenprozess" schnell fündig werden.

Vereinfacht gesprochen, reagiert der Kohlenstoff bei genügend hohen Temperaturen mit dem Sauerstoff in den Eisenerzen. Dadurch wird metallisches Eisen frei, das sich sofort mit Kohlenstoff vollsaugt (der ist ja im Überfluß vorhanden). Dadurch sinkt die Schmelztemperatur des Eisens und das flüssige Eisen sammelt sich am Boden des Ofens. Auch einige andere Bestandteile der Erze (besonders das Silizium) werden auf ähnliche Weise reduziert. Da flüssiges Silizium eine geringere Dichte als die Eisenschmelze hat, schwimmt es als Schlacke obenauf und kann so relativ leicht entfernt werden.

Das Eisen, das auf diese Weise gewonnen wird, ist aber noch nicht wirklich brauchbar. Es enthält immer noch große Anteile von Silizium, Phosphor und Mangan, die für die mechanischen Auswirkungen teilweise [verheerende Folgen](#) haben können (besonders Phosphor). Außerdem

enthält das Roheisen noch zuviel Kohlenstoff für Stahl (aber nicht unbedingt für Gußeisen). Um dem abzuhelpfen, wird das Eisen "gefrischt". Dabei wird Luft oder Sauerstoff in das flüssige Eisen eingeblasen. Die Verunreinigungen, aber auch der Kohlenstoff, oxidieren und schwimmen als Schlacke an der Oberfläche, von wo sie abgegossen werden können. Als letzter Schritt wird sogenanntes „Spiegeleisen“ zugegeben. Damit wird dem Eisen wieder Kohlenstoff und Mangan zugeführt bis die gewünschte Zusammensetzung erreicht ist. Danach ist der Stahl (bzw. das Gußeisen) fertig zur weiteren Verarbeitung.

Stahl

Das Besondere am Stahl sind die Umwandlungen des Kristallgitters, die je nach Kohlenstoffgehalt bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen 723°C und 1147°C stattfinden.

Gamma-Eisen, das bei höheren Temperaturen vorliegt, kann eine große Menge Kohlenstoff lösen (bis zu 2%). Alpha-Eisen kann aber nur weniger als 0,1% Kohlenstoff aufnehmen. Wenn man jetzt Eisen mit mehr Kohlenstoff aus dem gamma-Zustand abkühlt, muß der Kohlenstoff irgendwo hin. Bei langsamen Abkühlgeschwindigkeiten, ist die [Diffusion](#) schnell genug. Dann bilden sich im Eisen kleine Plättchen aus Zementit (Fe_3C). Je schneller die Abkühlung, desto feiner werden die Plättchen und desto feiner auch die Eisenstege, die dazwischen stehen bleiben. So etwas passiert z.B. wenn man das Eisen einfach an Luft abkühlen läßt.



Abbildung 1 – Perlit

Die Mischung aus alpha-Eisen und Zementit nennt man auch Perlit. Unter dem Mikroskop sieht das dann so aus. Das alpha-Eisen ist hell, die feinen Zementitplatten dunkel. Je schneller der Stahl abgekühlt wird, desto feiner werden die Zementitplatten.

Kühlt man schneller ab (z.B. indem man das Eisen in Öl abschreckt), dann bilden sich keine regelmäßigen Plättchen mehr aus. Es entsteht aber immer noch Zementit. Das nennt man dann Bainit.

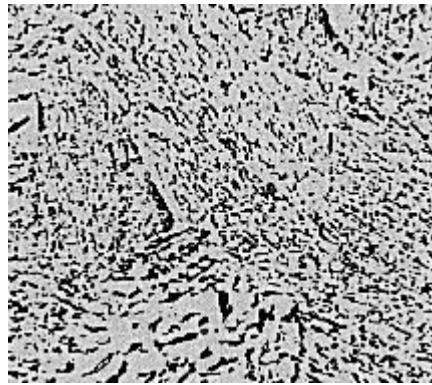


Abbildung 2 – Bainit

So sieht dann der Bainit aus. Noch immer ist der Zementit dunkel im helleren alpha-Eisen, aber es sind jetzt keine geordneten Platten mehr. Dafür ging die Abkühlung einfach zu schnell.

Wenn man jetzt noch schneller abkühlt (Abschrecken in Wasser), dann kommt der Kohlenstoff gar nicht mehr weg. Aber im alpha-Eisen ist auch kein Platz. Das Problem wird gelöst, indem sich das ganze Kristallgitter des alpha-Eisens verzerrt, es ist jetzt nicht mehr kubisch, sondern tetragonal (also ein Quader). Diese Form des Eisens nennt man Martensit.

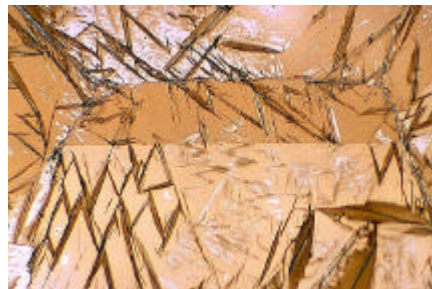


Abbildung 3 – Martensit

Beim Abschrecken bildet sich der Martensit in spitzen Nadeln, die hier auf dem Bild gut zu sehen sind. Diese Nadeln machen den abgeschreckten Stahl so hart.

Je nachdem, wieviel Kohlenstoff der Stahl enthält, und wie lange man den Stahl bei welcher Temperatur hält, kann man genau bestimmen, wieviel Martensit, wieviel Zementit und wieviel alpha-Eisen die Probe enthält und auch in welcher Form. Und genau darin liegt die große Vielseitigkeit des Stahls.

Wie man genau welche Eigenschaften erhält, ist eine Wissenschaft für sich. Vereinfacht gesagt ist ein Stahl umso härter, aber auch umso spröder, je schneller er abgekühlt wird. Die langsam abgekühlten Stähle erreichen nicht so hohe Festigkeiten, brechen dafür aber auch nicht so leicht. Aber man kann da noch etwas tricksen, wenn man den Stahl zuerst schnell abkühlt und ihn dann noch einmal etwas erwärmt.

Man sollte jedoch nicht vergessen, daß es gerade bei großen Werkstücken sehr schwer ist, diese gleichmäßig schnell abzukühlen. Das Innere des Werkstücks wird sich immer langsamer abkühlen, da es nicht im direkten Kontakt mit dem Kühlmittel steht. Das hat zur Folge, daß die Probe außen härter sein wird als innen. Glücklicherweise ist das aber gar nicht so dumm. Wenn man diesen Härteabfall nämlich genau richtig erwischt, erhält man ein Werkstück, das außen hart ist und also widerstandsfähig gegen Kratzer, Abrieb und ähnliches ist, das aber innen gleichzeitig zäh genug ist, um auch einen größeren Schlag zu verkraften, ohne zu zerspringen.

Neben den reinen Wärmebehandlungen gibt aber noch mehr Dinge, die man tun kann, um Stahl zu härten. Man kann Stahl nämlich auch kaltverfestigen oder feinkornhärten. Manche Stähle kann man

auch ausscheidungs- oder mischkristallhärten, doch da das beim Aluminium eine größere Rolle spielt, werde ich das dort erklären.

Exkurs Kaltverfestigung:

Wenn man ein Metall verformt wird es fester. Das kann jeder ganz einfach daheim beobachten, indem er ein Stück Draht nimmt und einen Knick hineinmacht. Wenn man jetzt versucht, den Draht wieder gerade zu biegen, wird sich immer das Stück direkt neben dem Knick verformen, nicht der Knick selbst. Das liegt daran, daß der Knick durch das Verbiegen härter wurde, als die Umgebung. Durch die Kaltverfestigung wird das Metall aber nicht nur härter, sondern auch spröder. Deswegen kann man einen Draht abbrechen, wenn man in mehrfach hin und her biegt.

Ein Schmied wird sein Werkstück nun nicht biegen. Stattdessen werden Metalle entweder gewalzt (also zwischen zwei großen Walzen dünn ausgerollt) oder gehämmert. Im Prinzip funktioniert die Kaltverfestigung aber mit jeder Verformung.

Wenn die Kaltverfestigung das Material zu spröde gemacht hat, kann man sie durch Erwärmen der Probe ganz oder teilweise wieder rückgängig machen. Umgekehrt sollte man die Probe natürlich nicht mehr erhitzen, wenn man die härtende Wirkung der Kaltverfestigung ausnützen will.

Exkurs Feinkornhärtung:

Metalle sind kristallin. Im Gegensatz zu den bekannten Kristallen (z.B. Salz) bestehen sie aber nicht aus einem großen, sondern aus vielen kleinen Kristallen, den sogenannten Körnern.

Ein Material ist jetzt umso härter, je kleiner die Körner sind. Solche kleine Körner erhält man, wenn man das Material stark verformt und dann wieder einige Zeit bei hohen Temperaturen glüht. Diesen Vorgang kann man auch wiederholen.

Feinkornhärtung ist die einzige Härtungsmethode, bei der das Material NICHT spröde wird. Im Gegenteil, es wird sogar zäher. Der einzige Nachteil ist, daß Feinkorngehärtete Werkstoffe bei hohen Temperaturen schlechtere Eigenschaften, als nicht-feinkorngehärtete.

Legierungselemente

Bis jetzt waren wir bei den reinen Kohlenstoffstählen, die außer Eisen und Kohlenstoff keine weiteren Elemente enthalten. Es gibt aber eine Unzahl von Legierungselementen für Stahl, die im folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Zuerst einmal kann man die Legierungselemente in zwei Gruppen einteilen.

Manche Elemente fördern das alpha-Eisen-Gitter, so dass das auch bei höheren Temperaturen beständig bleibt. Dazu gehören:

Cr, Al, Si, P, Ti, V, Mo, W, Nb, Ta, Zr, Hf, Ce

Die anderen fördern das gamma-Eisen-Gitter, das dann auch bei niedrigeren Temperaturen oder sogar Raumtemperatur beständig ist. Dazu gehören:

C, N, Ni, Mn, Co, Cu, Zn, Au, Pt-Metalle

Element	Wirkungsweisen	Gehalt bis
Ni	+ wirkt sigma-Versprödung entgegen ± Ausscheidungshärtung mit Al: macht den Stahl sehr fest aber auch ziemlich spröde	35%
Cr	+ Ausscheidungshärtung in Verbindung mit C + verbessert Zähigkeit in CrMo-Stählen + erniedrigt nötige Abkühlgeschwindigkeit für Martensit + bildet ab 9% Cr eine dichte Oxidschicht an der Oberfläche → Edelstahl - erleichtert sigma-Versprödung	30%

Co	(nur in gamma-Eisen-Stählen) + erhöht die Kriechfestigkeit	20%
Mo	+ Mischkristallhärtung + erniedrigt nötige Abkühlgeschwindigkeit für Bainit und Martensit + Ausscheidungshärtung + vermindert Anlassversprödung - erleichtert sigma-Versprödung	3,5%
W	ähnlich wie Mo ± starke Dichteerhöhung	3%
V	(nur in alpha-Eisen-Stählen) + Ausscheidungshärtung auch bei langem Einsatz bei erhöhten Temperaturen! - verschlechtert Korrosionsverhalten bei hohen Temperaturen	0,8%
Nb	+ Ausscheidungshärtung auch bei langem Einsatz bei erhöhten Temperaturen!	4%
Al	+ stabile Oxidschicht (auch bei hohen Temperaturen!) bei >4% Al und >10% Cr + Mischkristallhärtung + Ausscheidungshärtung in Verbindung mit N oder Ni	5,5%
Ti	+ Ausscheidungshärtung (auch bei hohen Temperaturen) in Verbindung mit C, N oder Ni	2%
Mn	+ wichtig für Frischen + Mischkristallhärtung	1,5%
Si	+ verbessert Oxidationsbeständigkeit in hitzebeständigen Stählen - fördert sigma-Versprödung	3%
C	+ Ausscheidungshärtung (Carbide) mit Cr, Mo, W, V, Nb, Ti, Mn, Hf + wichtigstes Legierungselement für Stahl (siehe Text oben)	0,5%
N	+ Ausscheidungshärtung (Nitride) mit V, Nb, Al, Ti	0,15%

Edelstahl

Unter Edelstahl versteht man Stähle, die besonders resistent gegen die „normalen“ Formen der Korrosion sind. Ganz besonders rosten sie nicht, wenn sie nass werden. (In einer Chlor-Umgebung rosten sie allerdings schneller als normale Stähle). Edelstähle enthalten normalerweise größere Mengen Chrom und Nickel. Der bekannteste dürfte der 18/8erStahl sein, der eben 18% Chrom und 8% Nickel enthält. Aus solchen Stählen werden zum Beispiel Messerklingen gemacht.

Edelstähle haben im Normalfall auch bei Raumtemperatur die gamma-Eisen-Struktur. Das bedeutet, dass sie die oben beschriebenen Umwandlungen nicht mitmachen (Perlit, Martensit, etc). Außerdem sind sie damit [paramagnetisch](#).

Stahl bei tiefen Temperaturen

Wie alle [kubisch-raumzentrierten](#) Metalle wird alpha-Eisen unterhalb einer bestimmten Temperatur auf einmal sehr spröde. Das soll zu ersten Behinderungen beim Bau der Transsibirischen Eisenbahn geführt haben. Im Winter sind die Spaten nämlich beim kleinsten Schlag zersprungen wie Glas.

Diese Probleme können schon bei Temperaturen von ca. -50°C oder sogar noch darüber auftreten. Nickel-legierte Stähle sind bei tiefen Temperaturen deutlich besser geeignet. Ein Stahl mit 0,1% C, 18% Cr, 10% Ni und etwas Ti kann noch bei -250°C eingesetzt werden. Zur Erinnerung: die

theoretisch tiefst-mögliche Temperatur die es im Universum überhaupt geben kann, liegt bei -273°C! Solche Stähle sind auch bei dieser Temperatur noch [kubisch-flächenzentriert](#). Nur deswegen verspröden sie nicht.

Oberflächenhärten von Stählen

Oft möchte man ein Werkstück, das zwar insgesamt zäh ist, dessen Oberfläche aber sehr hart ist. Dem kommt schon die [unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeit](#) von Probenoberfläche und -kern entgegen. Manchmal möchte man aber einen stärkeren Härteunterschied, als auf diesem Weg erreicht werden kann. Dann bieten sich Oberflächenbehandlungen an. Diese finden erst dann statt, wenn das Werkstück die endgültige Form erreicht hat.

Beim Kugelstrahlen wird die Oberfläche mit kleinen Stahlkugeln beschossen. Dabei verformt sie sich etwas und wird härter. → [Kaltverfestigung](#).

Beim Nitridieren wird Stickstoff in die Oberfläche eingebracht. Das geschieht am besten durch Stickstoff-haltige Gase wie z.B. Ammoniak. Im Prinzip findet dann in der Oberfläche eine Ausscheidungshärtung statt.

Ähnlich funktioniert das Einsatzhärten, hier allerdings mit Kohlenstoff statt Stickstoff. Als Gas bietet sich hier z.B. Kohlenmonoxid an.

Stahl für Weltenbastler

Eigentlich ist keiner der Schritte bei der Stahlgewinnung und Verarbeitung besonders schwierig. Allerdings ist es ohne geeignete Messmethoden und chemische Analysen sehr schwierig, genau den Stahl hinzukriegen, den man will. Schon ein kleiner Unterschied im Kohlenstoffgehalt kann alles verändern, genauso wie eine leicht abweichende Temperatur.

Wer also ohne die ganze Analytik, die uns heute zur Verfügung steht (Temperaturmessung, chemische Analyse, Mikroskopie, und und und), guten Stahl von gleichbleibender Qualität machen will, braucht eine ungeheure Erfahrung. Nicht ohne Grund hat man in vielen Kulturen den Schmieden magische Kräfte nachgesagt.

Es gibt aber einige Kniffe, an denen man zumindest einige Dinge über einen Stahl erkennen kann. Die Temperatur bei der Wärmebehandlung kann man zum Beispiel an den sogenannten "Anlassfarben" erkennen. Der Stahl verfärbt sich nämlich unterschiedlich, je nach der erreichten Maximaltemperatur. Auch während dem Glühen kann man die Temperatur anhand der Farbe des Werkstücks abschätzen.

Anlassfarben	in °C	Glühfarben	in °C
hellgelb	225	Beginndunkelrot	650
dunkelgelb	240	dunkelrot	700
gelbbraun	255	kirschrot	800
rotbraun	265	hellrot	900
purpurrot	275	lachsrot	1000
violett	285	orange	1100
dunkelblau	295	zitronengelb	1200
hellblau	310	weiss	1300
grau	325		

Ein anderes Kriterium, das relativ einfach zu messen ist, ist die Härte des Stahls. Auch heute noch wird die Härte denkbar einfach gemessen: man nimmt eine Diamantspitze und drückt sie mit einer

bekannten Kraft (z.B. durch ein Gewichtsstück) in die Oberfläche. Danach mißt man den zurückgebliebenen Eindruck aus. Je kleiner er ist, desto härter ist der Stahl.

Aber darüber hinaus wird den Schmieden einer Welt mit niedrigem Technologie-Level wohl nichts anderes übrig bleiben, als durch viele Versuche herauszufinden, welche Behandlung für welches Eisenerz die richtige ist. Dieses Wissen läßt sich wohl kaum in einer Generation erwerben.

Glossar

Diffusion

In einem metallischen Kristall sind nie alle für die Atome möglichen Gitterplätze besetzt. Da die Atome außerdem bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt (-273°C) nie völlig still stehen, kann es vorkommen, daß ein benachbartes Atom in die Lücke hineinspringt und damit eine Position weiterwandert. Dieses Phänomen bezeichnet man als Volumendiffusion.

Daneben gibt es noch andere Formen der Diffusion (Grenzflächend. oder Oberflächend.), aber diese sind nicht so wichtig.

Kristallgitter

Ein Kristallgitter beschreibt die regelmäßige Anordnung der Atome in einem Kristall. Kristallgitter von Metallen sind in der Regel sehr einfach. Die am häufigsten vorkommenden sind das kubisch-flächenzentrierte Gitter, das kubisch-raumzentrierte Gitter und das hexagonal-dichtgepackte Gitter.

- kubisch-raumzentriert (krz):

Auf jedem Eck eines Würfels sitzt ein Atom und ein weiteres in der Mitte des Würfels. Das kubisch-raumzentrierte Gitter hat eine geringfügig niedrigere Dichte als die beiden anderen.

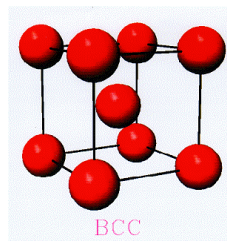


Abbildung 4 - kubisch-raumzentriertes Gitter

- kubisch-flächenzentriert (kfz):

Auf jedem Eck eines Würfels sitzt ein Atom und außerdem noch eines in der Mitte jeder Seitenfläche.

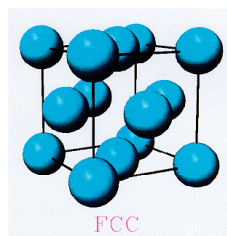
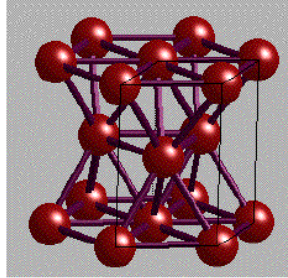


Abbildung 5 - kubisch-flächenzentriertes Gitter

- hexagonal-dichtgepackt (hdp):

Wie wohl jeder weiß, kann man um eine Kugel sechs andere Kugel der gleichen Größe herumlegen. Eine Ebene, in der alle Kugeln so dichtgepackt sind, wie nur möglich, hat also eine hexagonale Symmetrie. In der Oberfläche eines solchen Sechserings gibt es sechs Vertiefungen, nämlich immer da, wo drei Kugel zusammenstoßen. Aber nur drei dieser Vertiefungen können besetzt werden, wenn man eine zweite Ebene oben drauf legt. Wenn man jetzt die dritte Ebene wieder genau über die erste legt, dann erhält man das hexagonal-dichtgepackte Gitter. Der Fachmann sagt auch, man habe die Stapelfolge ABAB, wobei alle Ebenen A genau übereinander liegen und alle Ebenen B auch.



HCP Hexagonal Close-Packing

Abbildung 6 - hexagonal dichte Packung

Man kann die dritte Ebene aber auch in die noch verbliebenen Löcher legen (Stapelfolge ABCABC), dann bekommt man genau das kubisch-flächenzentrierte Gitter. Es braucht etwas Übung, bis man das erkennen kann, aber eigentlich ist es nicht sehr schwer.

Damit ist auch klar, warum das kfz-Gitter und das hdp-Gitter genau die gleiche Dichte haben.

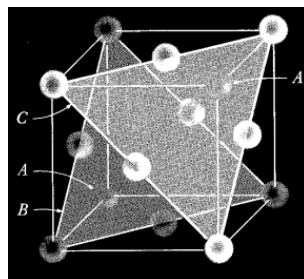


Abbildung 7 - kubisch-flächenzentriertes Gitter

An diesem Bild kann man sehen, wo die drei dichtgepackten Ebenen liegen. Das hintere untere Eck gehört zur Ebene A. Die dunkle Ebene, die schräg davor liegt ist B, die helle die davor „auf dem Kopf steht“ ist C und das vordere obere Eckatom wieder A.

Korn

Ein Kristall in einer metallischen Probe, die aus vielen kleinen Kristallen besteht. Wenn ihr so etwas mal in Natura und ganz ohne Mikroskop sehen wollt, dann sucht euch irgendetwas, was verzinkt ist, z.B. ein Geländer, einen Laternenmasten oder ähnliches. Wenn ihr genau hinschaut, werdet ihr sehen, daß der Zinkfilm aus verschiedenen "Flecken" besteht, die mal heller, mal dunkler sind. Das sind genau diese Körner. Diese Zinkbeschichtung ist aber insofern eine Ausnahme, als die Körner hier ungewöhnlich groß werden. Im Normalfall (d.h. in anderen Metallen) sind sie so klein, daß man ein Mikroskop und auch eine bestimmte Form der Probenherstellung braucht, um die Körner sehen zu können.

Magnetismus

Was den Magnetismus eines Stoffes angeht, so unterscheidet man vor allem zwischen diamagnetisch, paramagnetisch und ferromagnetisch. Die übrigen Spielarten wie Ferrimagnetismus oder Antiferromagnetismus spielen eigentlich nur für Quantenmechaniker eine Rolle.

- Diamagnetismus:

Ein Stoff ist diamagnetisch, wenn er selbst nicht magnetisch ist, und von einem Magneten abgestoßen wird.

- Paramagnetismus:

Ein Stoff ist paramagnetisch, wenn er zwar selbst nicht magnetisch ist, von Magneten aber angezogen wird.

- Ferromagnetismus:

Ferromagnetische Stoffe sind das, was man für gewöhnlich unter einem "Magneten" versteht. Sie ziehen von sich aus paramagnetische und andere ferromagnetische Stoffe an.

sigma-Versprödung

Ein Problem besonders von Chrom-haltigen Stählen. Wenn man bei der Wärmebehandlung nicht sehr vorsichtig ist, bilden sich kleine Teilchen der sogenannten sigma-Phase. Diese sind extrem spröde und können das ganze Bauteil kaputt machen. Um die sigma-Versprödung zu vermeiden, muß man sich schon sehr gut auskennen – oder man verwendet kein Chrom.

Anlassversprödung

Bei langem Verweilen der Probe im Bereich zwischen 450°C und 550°C bilden sich spröde Teilchen aus P, Sn, Sb, As im Metall. Diese können das ganze Bauteil kaputt machen. Bei Anwesenheit von Cr, Mn, Ni, Cu oder Si wird dieser Effekt noch verstärkt. Da aber zu dieser zweiten Gruppe einige der wichtigsten Legierungselemente des Eisens gehören, ist es so wichtig, dass aus der ersten Gruppe so wenig wie möglich im Stahl sind → Frischen.

Die Elemente Nb und Mo verbessern die Widerstandskraft des Stahls gegen Anlassversprödung.

Kriechen

Unter Kriechen versteht man, wenn sich ein Material unter langanhaltender Belastung verformt, obwohl die eigentliche Festigkeit noch nicht erreicht ist. Oder anders gesagt: wenn ich ein Gewicht lange Zeit an einem Stab aufhänge, kann es sein, daß er sich verformt, auch wenn er das Gewicht für kurze Zeit ohne Probleme verkraftet. Kriechen ist besonders bei hohen Temperaturen ein Problem.

Anhang A – die chemischen Elemente

jeweils nebeneinander: Ordnungszahl – Symbol – Name

89	Ac	Actinium	64	Gd	Gadolinium	61	Pm	Promethium
47	Ag	Silber	32	Ge	Germanium	84	Po	Polonium
13	Al	Aluminium	1	H	Wasserstoff	59	Pr	Praseodym
95	Am	Americium	2	He	Helium	78	Pt	Platin
18	Ar	Argon	72	Hf	Hafnium	94	Pu	Plutonium
33	As	Arsen	80	Hg	Quecksilber	88	Ra	Radium
85	At	Astat	67	Ho	Holmium	37	Rb	Rubidium
79	Au	Gold	108	Hs	Hassium	75	Re	Rhenium
5	B	Bor	53	I	Iod	104	Rf	Rutherfordium
56	Ba	Barium	49	In	Indium	45	Rh	Rhodium
4	Be	Beryllium	77	Ir	Iridium	86	Rn	Radon
107	Bh	Bohrium	19	K	Kalium	44	Ru	Ruthenium
83	Bi	Bismut	36	Kr	Krypton	16	S	Schwefel
97	Bk	Berkelium	57	La	Lanthan	51	Sb	Antimon
35	Br	Brom	3	Li	Lithium	21	Sc	Scandium
6	C	Kohlenstoff	103	Lr	Lawrencium	34	Se	Selen
20	Ca	Calcium	71	Lu	Lutetium	106	Sg	Seaborgium
48	Cd	Cadmium	101	Md	Mendelevium	14	Si	Silicium
58	Ce	Cer	12	Mg	Magnesium	62	Sm	Samarium
98	Cf	Californium	25	Mn	Mangan	50	Sn	Zinn
17	Cl	Chlor	42	Mo	Molybdän	38	Sr	Strontium
96	Cm	Curium	109	Mt	Meitnerium	73	Ta	Tantal
27	Co	Cobalt	7	N	Stickstoff	65	Tb	Terbium
24	Cr	Chrom	11	Na	Natrium	43	Tc	Technetium
55	Cs	Cäsium	41	Nb	Niob	90	Th	Thorium
29	Cu	Kupfer	60	Nd	Neodym	22	Ti	Titan
105	Db	Dubnium	10	Ne	Neon	81	Tl	Thallium
66	Dy	Dysprosium	28	Ni	Nickel	69	Tm	Thulium
68	Er	Erbium	102	No	Nobelium	92	U	Uran
99	Es	Einsteinium	93	Np	Neptunium	23	V	Vanadium
63	Eu	Europium	8	O	Sauerstoff	74	W	Wolfram
9	F	Fluor	76	Os	Osmium	54	Xe	Xenon
26	Fe	Eisen	15	P	Phosphor	39	Y	Yttrium
100	Fm	Fermium	91	Pa	Protactinium	70	Yb	Ytterbium
87	Fr	Francium	82	Pb	Blei	30	Zn	Zink
31	Ga	Gallium	46	Pd	Palladium	40	Zr	Zirkonium