Das Gefüge der Stähle

BRÜTSCH
RÜEGGER

Brütsch/Rüegger AG
Stahlrohre
Althardstrasse 83
CH-8105 Regensdorf
Tel. 01/871 34 34
Fax 01/871 34 99
www.b-r.ch
ISO 9002-Zertifikat

Technische Schriftenreihe
03

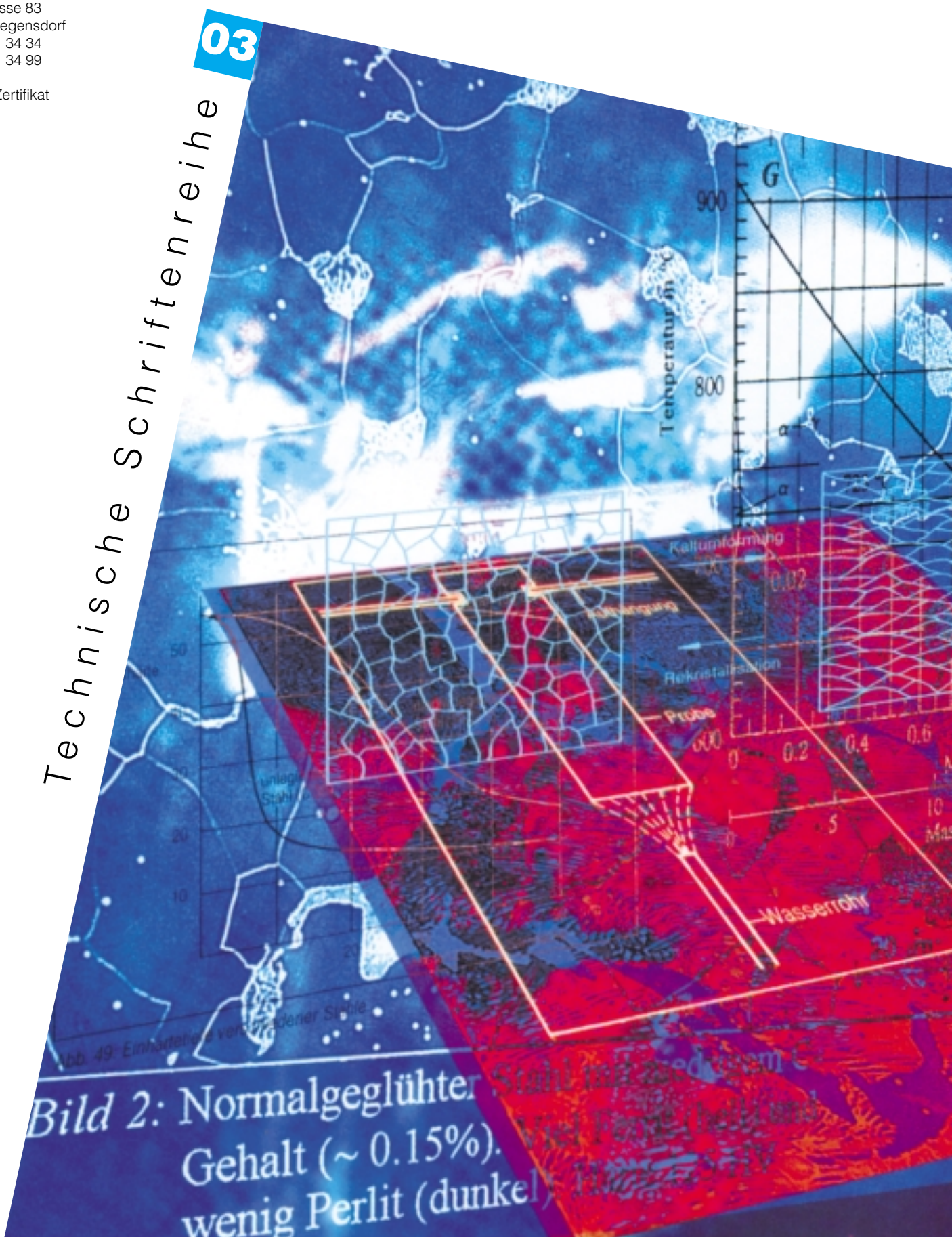


Bild 2: Normalgeglühter
Gehalt (~ 0.15%).
wenig Perlit (dunkel)

Das Gefüge der Stähle

Inhaltsverzeichnis

Atome und Körner 2

Zusatzelemente im Eisen 6

Einschlüsse im Stahl 7

Die Gefügearten der Stähle 8

Das Gefüge der Stähle

Atome und Körner

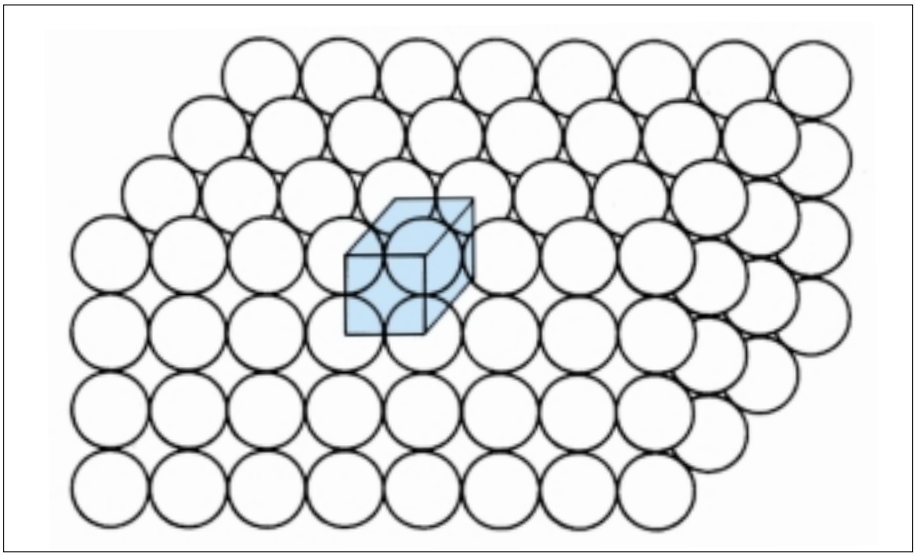
Alle Stähle sind, wie auch die anderen Metalle (z.B. Kupfer, Aluminium), kristallin aufgebaut; d.h. ob man Stahlbleche, Drähte, Rohre oder andere Profile betrachtet, ob diese aus den Grundqualitäten bestehen (z.B. St 37) oder aus den hoch legierten Sorten (z.B. X40 Cr Mo V51), die Atome in ihnen sind regelmässig nach bestimmten Gesetzmässigkeiten angeordnet. Das steht im Gegensatz zu Glas, vielen Kunststoffen und anderen Werkstoffen, in denen die Atome unregelmässig (= amorph) enthalten sind.

Das Bild 1 zeigt ein Beispiel, wobei vereinfacht die Atome als Kugeln angegeben sind. Je nach der Temperatur schwingen die Atome mehr oder weniger stark um ihre mittlere Lage hin und her. Man nennt eine solche kristalline Ordnung auch ein Raumgitter, und man sieht, dass es sich aus gleichen Einheiten (= Elementarzellen) aufbaut, die sich nebeneinander lagern, hier z.B. aus vielen kleinen Würfeln (s. Teil in Bild 1). Die Atome sind bekanntlich so klein, dass man sie auch mit den neuesten Mikroskopen nicht einzeln sehen kann, denn ihr Durchmesser liegt bei 10^{-8} cm = 0,00000001 cm. Ihre Anordnung aber kann man mit Röntgenstrahlen deutlich erkennen.

Nun ist jedoch ein Stück Stahlblech oder Profil nicht etwa insgesamt so gleichmässig aus Eisenatomen aufgebaut, sondern es besteht aus vielen einzelnen Körnern oder Kirstalliten, die durch Zusatzelemente unterschiedlich zusammengesetzt sein können, die sich an den Korngrenzen unterscheiden und in die kaum vermeidbare Fehler eingelagert sind. Da dieses Gefüge die Stahleigenschaften entscheidend beeinflusst, müssen wir uns seine Entstehung näher ansehen.

Durch Erwärmen steigen die Schwingungen der Atome so stark, dass beim Erreichen der Schmelztemperatur die Kristallordnung zusammenbricht und die Atome frei beweglich werden. In umgekehrter Richtung betrachtet: Wenn man Stahl aus dem flüssigen Zustand abkühlt, so bilden sich bei der Erstarrungstemperatur die Kristallite. An dieser Stelle hat der Metallurge erstmals die Möglichkeit, das Gefüge und damit die Stahlqualität zu beeinflussen. Diese Kristallisation muss man sich so vorstellen: An einzelnen Stellen legen sich die ungeordneten Atome aus der Schmelze zu kleinen Kristallen, z.B. Würfeln, zusammen, die als Keime sozusagen wachsende Inseln in der Flüssigkeit bilden, bis sich alle Atome eingeordnet haben. Dabei stossen die einzelnen Körner aneinander und be-

Bild 1: Atomanordnung in Kristallen, hier in Form von Würfeln.



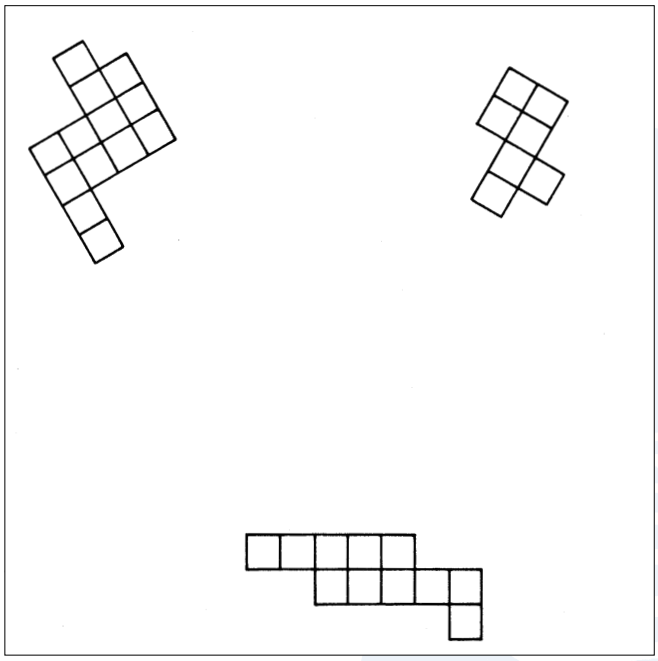


Bild 2: Beginnende Erstarrung der Schmelze mit den ersten würfelförmigen Kristallen.

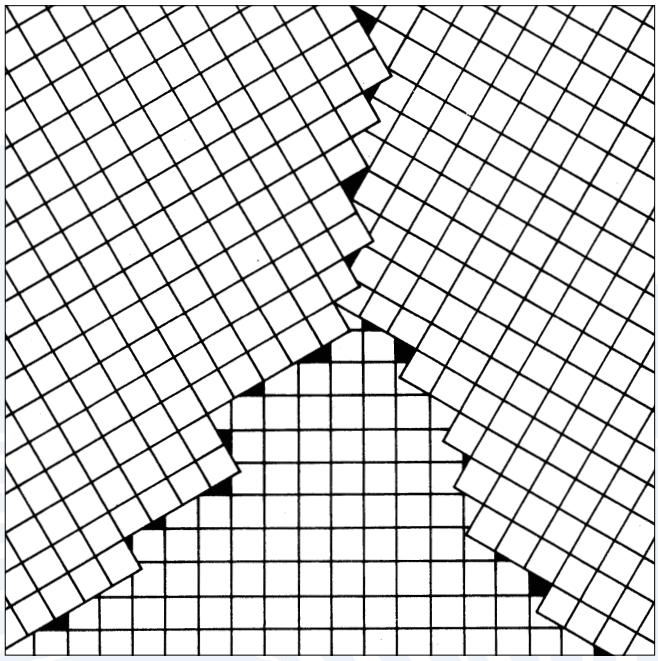
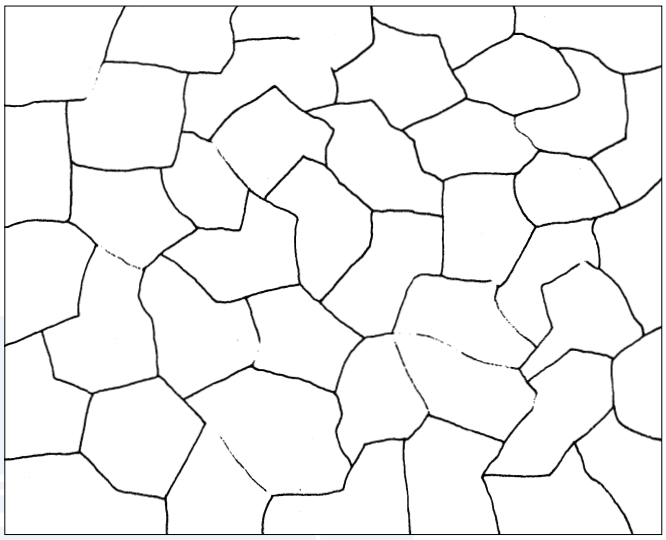


Bild 3: Abgeschlossene Erstarrung (vgl. Bild 2).

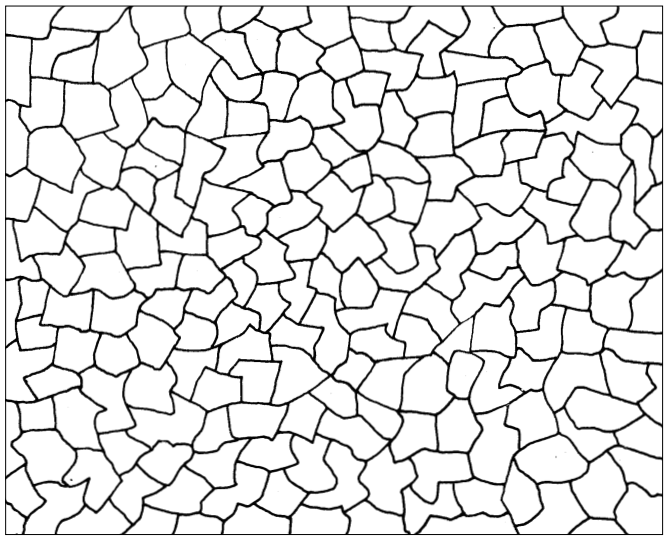
grenzen sich deshalb unregelmässig, so dass die Würfelform verloren geht: Man spricht von Kristalliten, nicht Kristallen (s. Bild 2 und 3). Hier entscheidet sich, ob die Körner gross oder klein werden. Je schneller die Abkühlung erfolgt, um so mehr Keime entstehen, und um so kleiner sind die Körner. Durch Zusatz von hoch schmelzenden Verbindungen, die also schon bei Beginn der Erstarrung im festen Zustand in der Schmelze schwimmen, lagern sich die Atome an dies an, und die Korngrösse verringert sich. Dieses ist besonders durch Aluminium Al zu erreichen, das im flüssigen Stahl mit Sauerstoff O und Stickstoff N Verbindungen blildet, aber auch durch Vanadin V, Niob Nb u.a.

Trotz dieser Massnahmen ist die Primärkorngrösse nach der Erstarrung ungünstig gross. Erst durch die Verformung und eventuelle Wärmebehandlung erhält man das für die Verwendung erforderliche feine Sekundärgefüge. Darin liegen die Korndurchmesser zwischen 0,001 und 0,3 mm, von wenigen Sondergüten mit Grobkorn abgesehen, z.B. Elektrobleche, ferritische Stähle.

Zur Ermittlung der Korngrösse gibt es eine Vielzahl von Verfahren. Alle gehen so vor, dass man zuerst von dem zu untersuchenden Material einen metallografischen Schliff anfertigt, um die Körner überhaupt sehen zu können. Dazu schneidet man eine kleine Probe aus dem Stahlstück heraus, schleift und poliert eine Oberfläche vollkommen glatt und ätzt diese dann durch kurzes Eintauchen in eine chemische Lösung. Ein gebräuchliches Ätzmittel für Stahl ist z.B. Äthylalkohol mit 2% Salpetersäure.



Korngrösse Nr. 4



Korngrösse Nr. 8

Bild 4: Zwei Beispiele aus der ASTM-Gefügerichtreihe zur Bestimmung der Korngrösse.

Zur Kennzeichnung der Korngrösse wird im allgemeinen nicht der Korndurchmesser angegeben sondern die Nummer eines Vergleichsschliffes nach der von McQuaid-Ehn entwickelten und nach ASTM genormten Gefügerichtreihe (ASTM = American Society for Testing Materials). Von dem zu untersuchenden Schliff stellt man dazu ein Foto in der Vergrösserung 100:1 her und vergleicht das Gefüge mit den Standardbildern (s. Bild 4).

Diese enthalten 19 Klassen von -3 bis +15, wobei die Nr. -3 ein einziges Korn je mm^2 der Probe bedeutet, also ein sehr grobes Korn, die Nr. -2 zwei Körner, Nr. -1 vier, Nr. 0 acht usw. Von Nr. 1 bis 5 spricht man von Grobkornstählen, von Nr. 6 bis 9 von Feinkornstählen und ab Nr. 10 von Feinstkornstählen.

Neben der Bestimmung der Korngrösse nach ASTM gibt es eine Reihe von Verfahren, die Korngrösse direkt auszumessen. Nach dem Kreisverfahren wird die Anzahl der Körner innerhalb eines bestimmten Kreises auf einem Foto des Schliffes gezählt und daraus die mittlere Kornfläche in μm^2 (1 Mikrometer = 1/1000 mm) oder der mittlere Korndurchmesser in µm berechnet. Nach dem Linienschnittverfahren wird eine Anzahl gerader Linien über das Schliffbild gezogen, die Anzahl der geschnittenen Körner gezählt und daraus die Korngrösse berechnet.

In der Tabelle 1 (auf Seite 5) sind die Zahlenwerte für die Korngrösse nach den drei Verfahren gegenübergestellt.

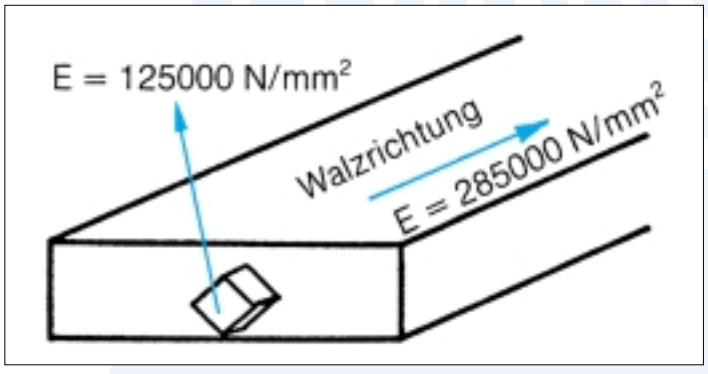
ASTM	Korndurchmesser in µm	Kornfläche in µm²	
– 3	1000	1.000.000	
– 2	800	640.000	
– 1	550	302.500	
0	350	122.500	
1	250	62.500	Grobkornstahl
2	180	32.400	
3	120	14.400	
4	90	8.100	
5	60	3.600	
6	45	2.025	Feinkornstahl
7	35	1.225	
8	22	484	
9	16	256	
10	12	144	Feinstkornstahl
11	8	64	
12	6	36	
13	4	16	
14	3,5	12	
15	3	9	

Tabelle 1: Zahlenwerte der Korngrösse

In der Praxis wird im allgemeinen ein möglichst feines Korn angestrebt, denn dadurch steigen die Festigkeit, Härte, das Formänderungsvermögen und insbesondere die Kerbschlagarbeit. Andererseits begünstigt ein grobes Korn die Zerspanbarkeit und Magnetisierbarkeit, hat jedoch bei der Blechumformung eine Aufrauhung der Oberfläche zur Folge.

Wie die Abb. 3 zeigt, sind die Raumgitter der einzelnen Körner gegeneinander verkantet.Das erklärt sich aus der zufälligen Anordung der Atome in den Keimen. Wenn ein Stahlteil nur aus einem einzigen Korn bestehen würde (= Einkristall), so wären viele Eigenschaften stark von der Richtung abhängig; z.B. die Zugfestigkeit, Dehnbarkeit, magnetische Eigenschaften oder der Elastizitätsmodul E wären längs in einem Blech anders als quer dazu (s. Bild 5). Ein solches richtungsabhängiges Verhalten wird Anisotropie genannt; es ist normalerweise unerwünscht. die weitaus meisten Stähle verhalten sich auch wegen der vielen kleinen Körner isotrop (Bild 6a), d.h. ihre Eigenschaften sind unabhängig von der Richtung. In Sonderfällen aber kann man durch spezielles Glühen und Verformen die Körner parallel ausrichten (s. Bild 6b), dann verhält sich der Stahl wie ein grosser Einkristall mit verbesserten Eigenschaften nach abestimmten Richtungen. Man spricht dann von Textur oder Kornorientierung und nutzt das z.B. bei Elektroblechen vorteilhaft aus. Unerwünscht dagegen ist eine beim Walzen entstehende teilweise Textur in Tiefziehblechen. Durch die unterschiedliche Verformbarkeit kann es, z.B. bei der Herstellung von zylindrischen Teilen aus Ronden, zur Zipfelbildung und damit zu Materialverlusten kommen.

Bild 5: Stahlblech als Einkristall (oder mit Kornorientierung) mit richtungsabhängigem Elastizitätmodul.



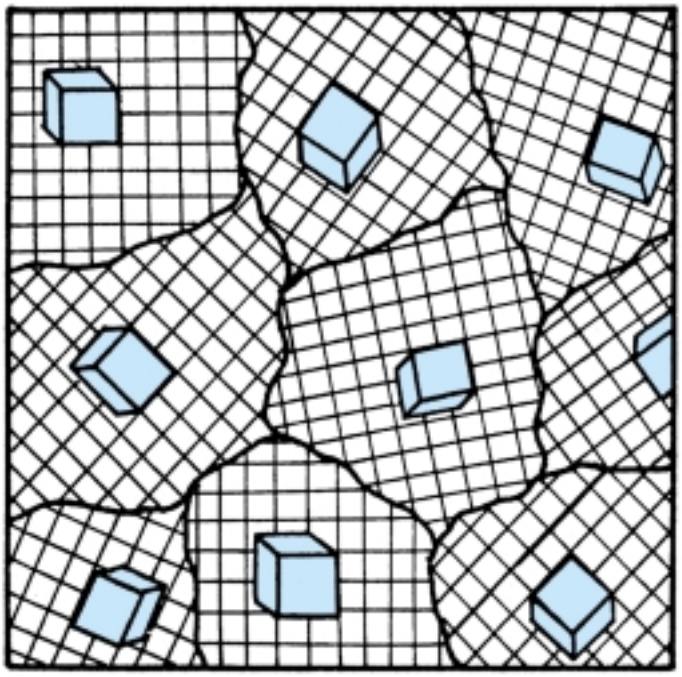


Bild 6a: Unterschiedliche Atomanordnung in den Körnern (isotropes Verhalten).

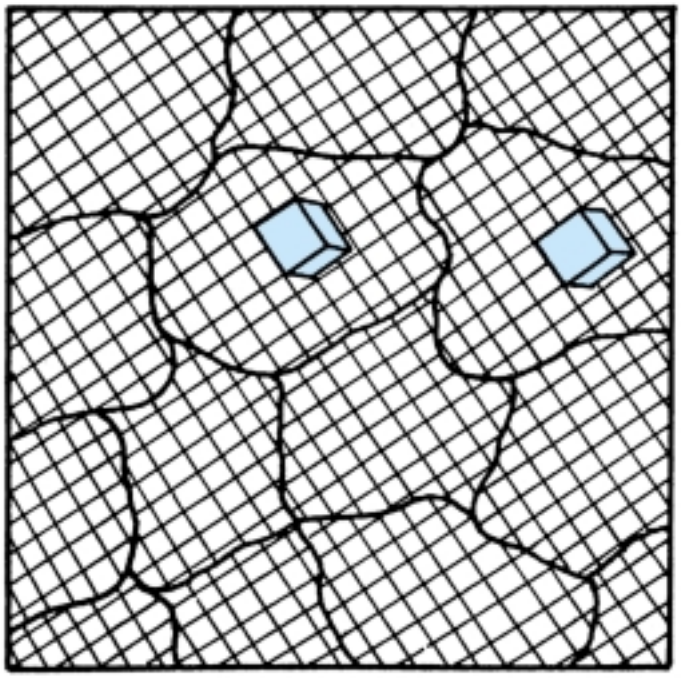


Bild 6b: Gleichgerichtete Atomanordnung in den Körnern (Kornorientierung).

Zusatzelmente im Eisen

Stahl besteht neben den Eisenatomen noch aus einer Vielzahl von Begleit- und eventuell Legierungselementen, und es erhebt sich die Frage, wo diese im Gitter enthalten sind. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten. Sind die Atomdurchmesser der Fremdelemente ungefähr so gross wie die Eisenatome, so können sie diese im Gitter ersetzen. Kleine Atome haben noch zwischen den Eisenatomen Platz. In beiden Fällen spricht man von Mischkristallen oder festen Lösungen, denn die Verteilung ist so gleichmässig wie in flüssigen Lösungen, z.B. Kochsalz in Wasser. Es leuchtet ein, dass die Menge der Fremdatome, die in das Eisengitter eingebaut werden kann, im allgemeinen begrenzt ist. Diese maximale Löslichkeit ist jedoch stark von der Temperatur abhängig, denn die Atome schwingen hin und her und verändern damit die Platzangebote. So kann Eisen bis zu 2,06% Kohlenstoff C in sich lösen, das aber nur bei 1147°C. Sowohl bei Erhöhung als auch bei Erniedrigung der Temperatur sinkt die Löslichkeit. Gerade solche unterschiedlichen Löslichkeiten werden neuerdings in manchen Stählen zur Steigerung der Festigkeit ausgenutzt (Ausscheidungshärtung).

Werden höhere Gehalte zugegeben oder andere Elemente, die gar keine Mischkristalle bilden können, so entsteht eine zweite Kornart, in der die überschüssigen Mengen enthalten sind. Diese kann man im Schliffbild gut von der ersten unterscheiden, wenn ein verschieden wirkendes Ätzmittel verwendet wird, während man die im Grundgitter «versteckten» Mischkristallatome unter dem Mikroskop nicht sehen kann.

Die Wirkung von Zusatzelementen im Stahl ist sehr differenziert. die Verformung wird durch alle erschwert, d.h. gegenüber dem weichen Reineisen steigt die Festigkeit an. Sonst aber leiten sich die vielfältigen Eigenschaften der Stähle in erster Linie aus den Zusätzen ab.

Einschlüsse im Stahl

Für die Qualität eines Stahles sind weitere Gefügebestandteile von grosser Bedeutung: die *Einschlüsse* oder Schlacken. Diese können von *aussen* in den flüssigen Stahl gelangen, z.B. durch Abrieb des feuerfesten Materials der Öfen und Pfannen oder durch Einspülen von Schlacke; sie können auch im *Inneren* des Stahles entstehen, z.B. beim Desoxidieren oder Legieren. Chemisch gesehen handelt es sich meistens um Oxide, besonders des Siliziums Si (= Silikate), das Aluminiums Al (= Tonerde) und des Mangans Mn, oder um Schwefelverbindungen (= Sulfide), besonders solche mit Mn. Im Stahlwerk muss dafür gesorgt werden, dass die relativ leichten Einschlüsse möglichst im Stahl aufsteigen und sich in der Schlackenschicht sammeln. Das geschieht z.B. durch eine nach bestimmten Vorschriften durchgeführte Desoxidation, durch Spülbehandlungen des Stahles in der Pfanne, in Vakuumanlagen oder durch Sonderbehandlungen. Trotzdem bleiben immer Reste zurück, und zwar bevorzugt auf den Korngrenzen. Das ist ein weiterer Grund dafür, dass im allgemeinen ein feines Korn angestrebt wird: die Verunreinigungen sind dann gleichmässig verteilt.

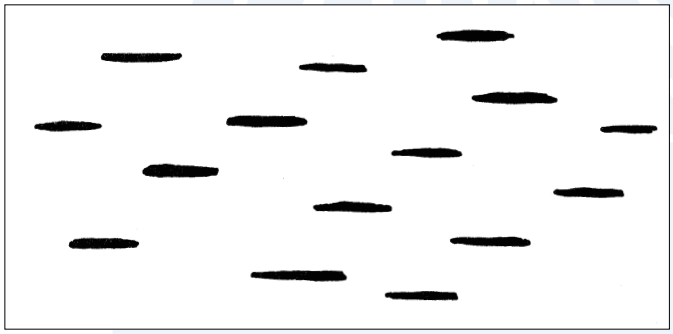
Bei der Verformung verhalten sich besonders die weichen Mn-Sulfide ziemlich problemlos; sie gleiten mit dem Grundmaterial und werden dabei lang gestreckt. Die spröde Tonerde dagegen, aber auch manche Silikate, zerbröckeln und bilden in Verformungsrichtung Zeilen. In beiden Fällen zeigt der Stahl eine ausgeprägte *Querempfindlichkeit* (= Anisotropie), d.h. die Festigkeit und besonders die Kerbschlagzähigkeit längs und quer zur Walzrichtung sind unterschiedlich, quer mit erhöhter Sprödigkeit und Härte. *Grössere* harte Einschlüsse können bei der Verformung zu Rissen im Stahl führen. Diese Gefahr ist natürlich bei einer *Kaltverformung* noch höher.

Bei der Verwendung des Stahls stellt jeder Einschluss eine mögliche Fehlerquelle dar, denn er unterbricht den metallischen Zusammenhalt und bildet einen «inneren Kerb». Als Folge steigen die Sprödigkeit und Bruchempfindlichkeit, besonders gegenüber einer Wechselbeanspruchung. Dabei verhalten sich gleichmässig verteilte kleine Einschlüsse weniger schädlich als einzelne grobe.

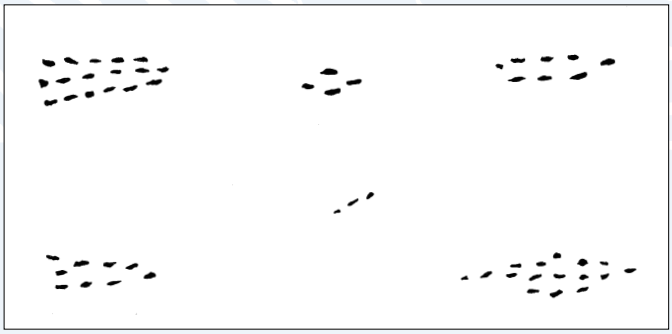
Deshalb ist die rein chemische Beurteilung eines Stahles nach Art und Gesamtmenge der Einschlüsse weniger aussagekräftig als eine metallografische. Ähnlich wie bei der Korngrösse gibt es auch hier *Schlackenrichtreihen,* nach denen man durch Vergleichen des Schliffes mit Standardbildern vorgeht. Das Bild 7 zeigt in 100-facher Vergrösserung zwei Beispiele für plastische (p) und spröde (s) Einschlüsse aus den Stahleisen-Richtreihen, die jeweils Nr. 1 bis 10 enthalten, wobei die Nr. 1 die wenigsten und Nr. 10 die meisten Verunreinigungen aufweisen. In wenigen Sonderfällen können Einschlüsse auch erwünscht sein, z.B. Mn-Sulfide in Automatenstahl wegen der verbesserten Zerspanbarkeit.

Bild 7: Zwei Beispiele aus der Schlackenrichtreihe zur Bestimmung der Einschlüsse.

3 p



2 s



Die Gefügearten der Stähle (Eisen-Kohlenstoff-Schaubild)

Eisen kristalliert kubisch (würfelig), aber in zwei verschiedenen Arten: kubisch-raumzentriertes α-Fe mit einem Fe-Atom im «Zentrum des Raumes» und kubisch-flächenzentriertes γ-Fe (s. Bild 8). In Wirklichkeit liegen die Atome so dicht aneinander, dass sie sich berühren; die hier gewählte Darstellungsart ist jedoch deutlicher. Beim Erhitzen liegt bis 911°C das α-Fe = Ferrit vor, dann ändert sich das Gitter im festen Zustand in γ-Fe = Austenit, das (etwas vereinfacht) bis zum Schmelzpunkt bei 1536°C Bestand hat.

Bei 911°C, «klappt das Gitter um», d.h. die Atome springen blitzschnell in die neue Anordnung. Wie die Abb. 8 zeigt, werden dabei die Austenitwürfel grösser, enthalten aber auch entsprechend mehr Atome. Die Würfel*mitte* wird nun frei, hier können sich Zusatzatome einlagern, z.B. das für die Stähle wichtigste Element, der Kohlenstoff. Bei 1147°C haben maximal 2,06% C Platz. Beim Bild 8 sieht man, dass Ferrit bei weitem nicht so viel C lösen kann, weil das Zentrum nicht frei ist. Solche Temperatur-Konzentrations-Gefüge-Verhältnisse kann man in grafischen Darstellungen am deutlichsten machen, in sogenannten Zweistoffdiagrammen. Bild 9 zeigt etwas vereinfacht das für die Stähle wichtigste Eisen-Kohlenstoff-Schaubild.

Auf der senkrechten Achse sind die Temperaturen bis in den flüssigen Zustand aufgetragen. Bei 1536°C liegt der Schmelzpunkt des reinen Eisens, bei 911°C die Umwandlung von Austenit in Ferrit. Auf der horizontalen Achse finden wir die im Eisen enthaltenen Kohlenstoffgehalte, und zwar bis 6,7%. Höhere Gehalte sind technisch uninteressant. Bei diesem C-Anteil legen sich jeweils drei Atome des Eisens und ein Atom Kohlenstoff zu der Verbindung Fe_3C zusammen, die Eisenkarbid oder Zementit genannt wird. Genau genommen ist also das Fe-C-Diagramm ein Fe-Zementit-Diagramm. Fe_3C ist ausserordentlich hart und spröde, so dass sich zwar die Festigkeit von Eisen mit steigendem C-Gehalt stark erhöht, andererseits aber die Verformbarkeit erniedrigt

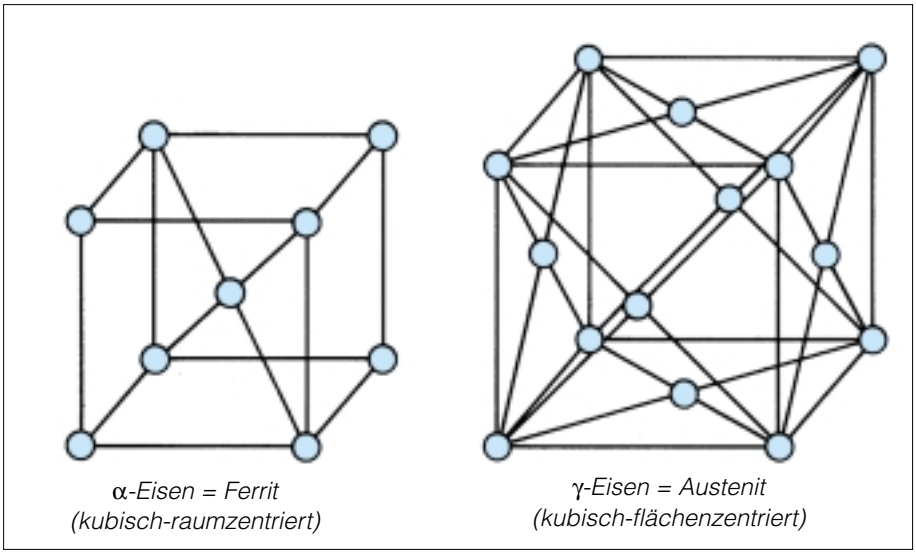
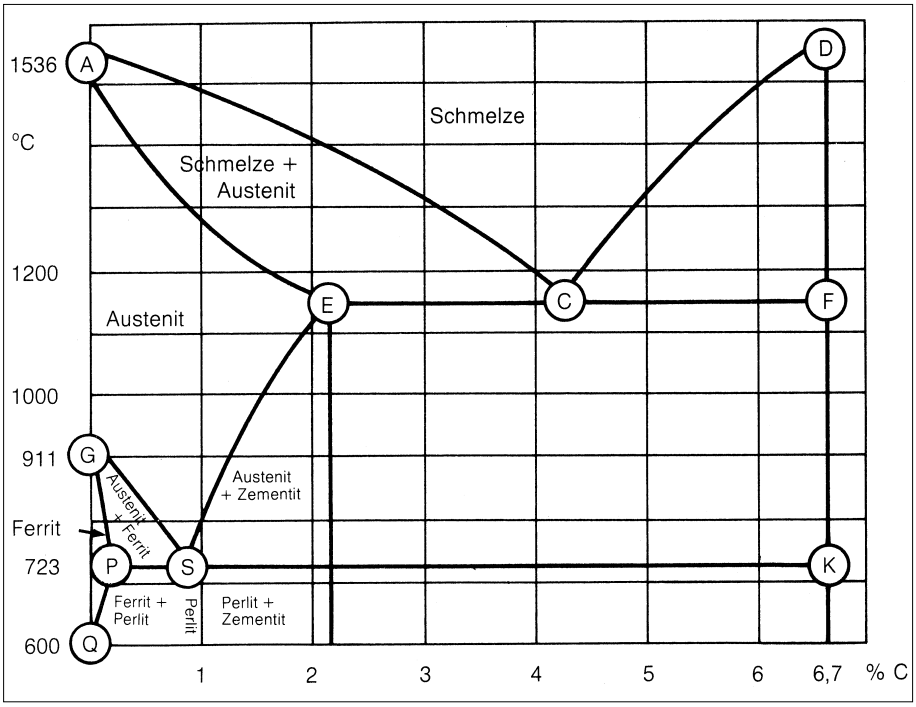


Bild 8: Die beiden Kristallformen des Eisens.

wird. Von 2,06% C ab ist die Ausbildungsform des Zementits so ungünstig für die Formgebung, dass das Material nur noch gegossen, jedoch nicht mehr gewalzt oder geschmiedet werden kann. Unterhalb von 2,06% C liegt Stahl vor, darüber Guss- oder Roheisen.

Jeder Stahl- und Eisensorte entspricht eine senkrechte Gerade in dem Schaubild. Von grosser praktischer Bedeutung ist es, solche Sorten von der Schmelze bis zur Raumtemperatur zu beobachten, weil das typische Gefüge durch Erstarrung der Schmelze entsteht und eventuell durch Wärmebehandlungen verändert wird. Dabei schneiden diese Senkrechten die Linien des Schaubildes; an solchen Schnittpunkten erfährt der Werkstoff Umwandlungen, z.B. vom flüssigen in den festen Zustand aber auch Änderungen der Atomanordnung im festen Zustand, etwa den Übergang von Austenit in Ferrit. Die Umwandlungslinien bilden im Diagramm Gebiete oder Felder, innerhalb derer gleiche Zustandsformen vorliegen. Diese sind für den Stahlbereich in das Schaubild eingetragen. Man erkennt, dass teilweise nur *eine* Zustandsform enthalten ist (Schmelze, Austenit oder Ferrit), teilweise auch zwei (z.B. Schmelze + Austenit, Austenit + Zementit). Um sich besser verständigen zu können, ist es üblich, die Schnittpunkte der Umwandlungslinien mit bestimmten grossen Buchstaben zu kennzeichnen (s. Bild 9).

Bild 9: Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild.



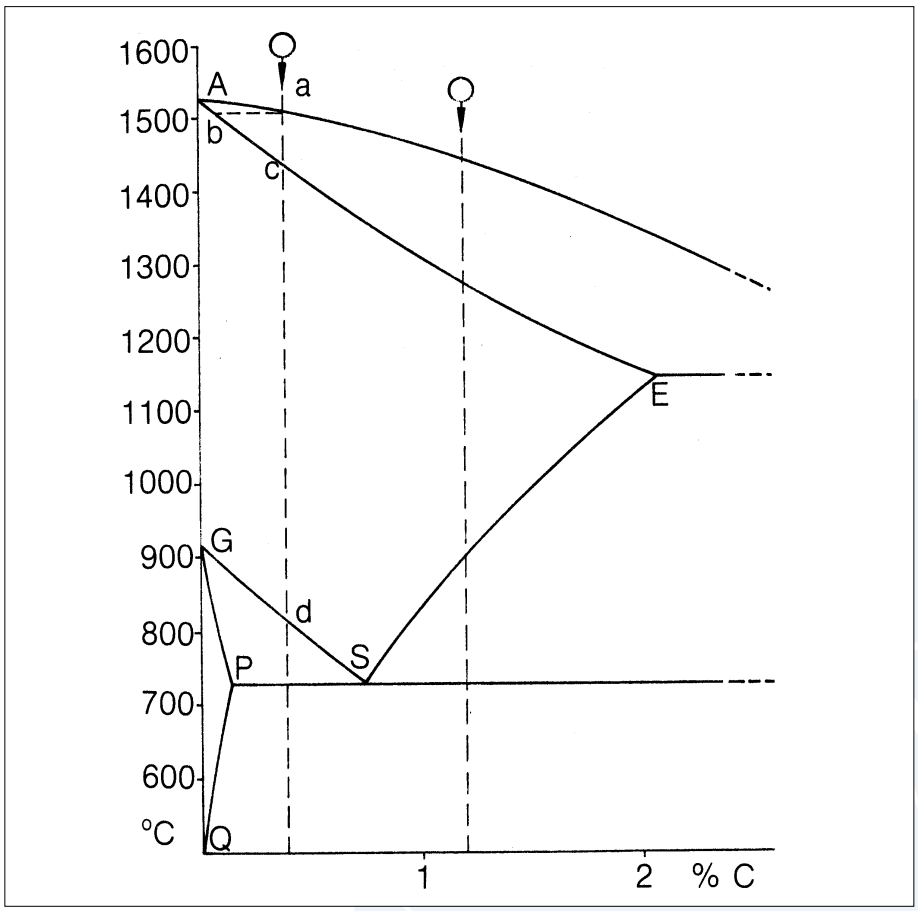


Bild 10: Zwei Abkühlungsverläufe im Eisen-Kohlenstoff-Schaubild.

Beobachten wir nun einen Stahl mit z.B. 0,4% C von der Schmelze bis zur Raumtemperatur, indem wir uns im Stahlwerk eine Kokille vorstellen, die gerade mit dieser Sorte voll gegossen worden ist. Die Temperatur soll 1600°C betragen: siehe oberer Endpunkt der linken gestrichelten Senkrechten in Bild 10.
Während der Stahl abkühlt, erreicht man die erste Umwandlungslinie bei a: die Erstarrung beginnt, indem sich die ersten kubischen Kristalle in der Schmelze bilden. Diese Linie A-C-D wird Liquiduslinie genannt, weil oberhalb von ihr das Gebiet der Schmelze liegt (liquidus, lat. = flüssig). Man erkennt, dass die zum Schmelzen erforderliche Temperatur mit steigendem C-Gehalt stark abnimmt. Ein Stahl mit 1,2% C ist bei ca. 1500°C flüssig, Gusseisen mit 4,3% C sogar schon bei 1200°C.

Praktisch von grosser Bedeutung ist, dass der Kohlenstoffgehalt der ersten erstarrten Kristalle unseres Stahles nicht etwa auch 0,4% C beträgt, sondern nur etwa 0,1% (s. horizontale, gestrichelte Linie mit Punkt b. Die Zusammensetzung kann man auf der unteren Achse ablesen). Da natürlich die Gesamtzusammensetzung in der Kokille mit 0,4% C konstant bleibt, muss sich die restliche Schmelze in dem Masse an Kohlenstoff anreichern, wie sich C-arme Körner bilden. Auf diese Art entstehen Konzentrationsunterschiede (= Seigerungen) im Stahl, und zwar sowohl innerhalb der einzelnen Körner (= Kristallseigerung) als auch über den gesamten Blockquerschnitt gesehen (= Blocksteigerung). Noch stärker ausgeprägt als bei Kohlenstoff sind solche Seigerungen bei Schwefel und Phosphor im Stahl.

Bei weiterer Abkühlung steigt der Anteil an erstarrtem Stahl in der Schmelze an, bis am Punkt c der gesamte Inhalt der Kokille fest geworden ist: ein Stahlblock ist entstanden. Die Umwandlungslinie A-E-C-F wird Soliduslinie genannt, weil unterhalb alles fest ist (solidus, lat. = fest). Zwischen der Liquidus- und der Soliduslinie liegt ein Gemisch aus Schmelze und festen Kristallen vor. Man spricht auch von einem Kristallbrei. Im Fe-C-Schaubild erkennt man, dass ein solcher temperaturabhängiger breiiger Zustand bei allen Eisensorten auftritt mit Ausnahme von reinem Eisen mit 0% C und Roh- bzw. Gusseisen mit 4,3% C. Diese beiden Sorten erstarren bei konstanter Temperatur, haben also einen Schmelz*punkt* und nicht einen Schmelz*bereich.* Bei 4,3% C liegt die niedrigste Erstarrungstemperatur im Fe-C-Schaubild überhaupt vor. Ein solcher Punkt wird eutektischer Punkt genannt, entsprechend spricht man von einer eutektischen Legierung oder einem Eutektikum (griechisch = gut schmelzend).

Unterhalb des Punktes c besteht der Stahl – auch bei anderen Kohlenstoff gehalten – einheitlich aus Austenitkörnern, ist also kubisch flächenzentriert mit den Kohlenstoffatomen in der Mitte der Würfel. Bei fortschreitender Abkühlung des Stahlblockes findet mit dem Erreichen der Linie G-S am Punkt d, also bei etwa 850°C, eine weitere Umwandlung statt, und zwar im festen Zustand. Solche Gefügeänderungen sind insbesondere für die Glüh- und Härteverfahren von grosser Bedeutung. Diese Änderungen beginnen an den Korngrenzen. Bei unserem Stahl entsteht Ferrit. In der Abb. 11 ist dieser Übergang als schematisches Schliffbild dargestellt. Er ist für das Verständnis vieler praktischer Vorgänge ausserodentlich wichtig. Im einzelnen geschieht an den Korngrenzen zweierlei: Zunächst klappt das Gitter um von kubisch flächenzentriert in kubisch raumzentriert. Und dann müssen die Kohlenstoffatome in die Mitte der Austenitkörner wandern (diffundieren), weil in diesen Würfeln nicht so viel Platz ist (s. Pfeile in Bild 11). Dadurch steigt hier der C-Gehalt an. Dieser Vorgang läuft mit sinkender Temperatur weiter ab bis zur Linie P-S bei 723°C. Im Austenit ist jetzt 0,8% C enthalten, entsprechend dem Punkt S. Unterhalb dieser Temperatur ist der Austenit nicht mehr beständig, er wandelt sich um in das Gefüge Perlit, ein feinstreifiges Gemenge aus Ferrit und Zementit. Der Name leitet sich von dem perlmuttartigen Glanz ab, den man im Mikroskop sieht. Unterhalb von 723°C finden keine weiteren Umwandlungen mehr statt.

Da die Diffusion des Kohlenstoffs eine gewisse Zeit benötigt, entsteht das angegebene Gefüge nur bei langsamer Abkühlung. Diesen Umstand nützt man beim Härten aus.

Alle Stähle bis zu 0,8% haben einen entsprechenden Abkühlungsverlauf und führen zu ähnlichem Gefüge. Diese Sorten werden untereutektoide Stähle genannt. Im Fe-C-Schaubild ist S der eutektoide Punkt (= «ähnlich wie eutektisch»). Der Name leitet sich von dem ähnlichen Aussehen dieses Punktes im Vergleich zum eutektischen Punkt C ab; beide stellen niedrigste Lagen dar, S jedoch im festen Zustand und deshalb

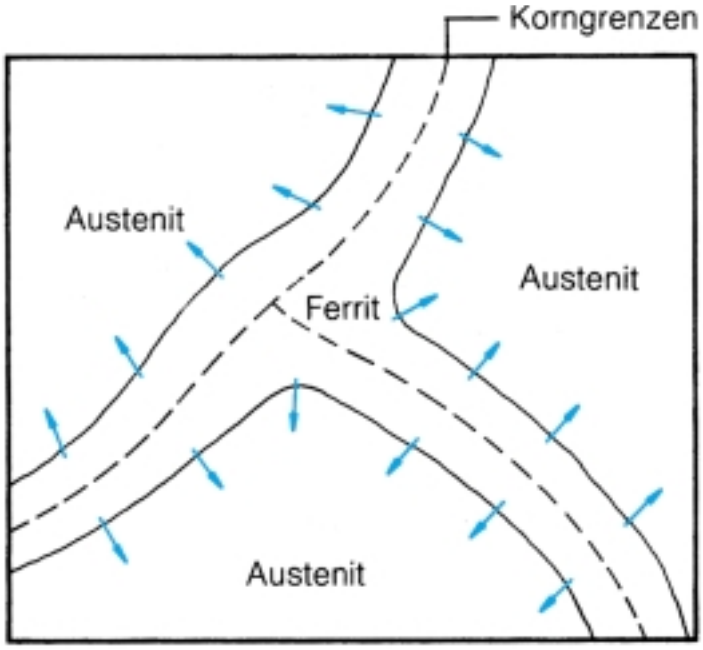


Bild 11: Ferrit-Bildung im Austenit an der oberen Umwandlungslinie, untereutektonider Stahl. (Die Pfeile geben die Richtung der Kohlenstoff-Diffusion an).

nicht «gut schmelzend». Die Gefüge dieser untereutektoiden Stähle enthalten Ferrit und Perlit in unterschiedlichen Anteilen. Bei Raumtemperatur und sehr geringem C-Gehalt von unter 0,02% liegt praktisch nur Ferrit vor; bis 0,8% steigt der Perlitanteil gleichmässig an, und entsprechend fällt der Ferritgehalt. Bei genau 0,8% C ist nur noch Perlit vorhanden (= eutektoider Stahl). Die Bild 12 und 13 (Seite 11) zeigen zwei Schliffbilder bei etwa 0,4% C, das erste davon schematisch (wie Bild 11, aber jetzt bei Raumtemperatur). Man spricht auch vom Schwarz-Weiss-Gefüge.

Aus solchen Bildern kann man mit etwas Übung den C-Gehalt des Stahles ziemlich genau bestimmen. Da Ferrit sehr weich ist und Perlit eine mittlere Festigkeit sowie gute Zähigkeit besitzt, wird der Stahl mit steigendem C-Gehalt immer härter.

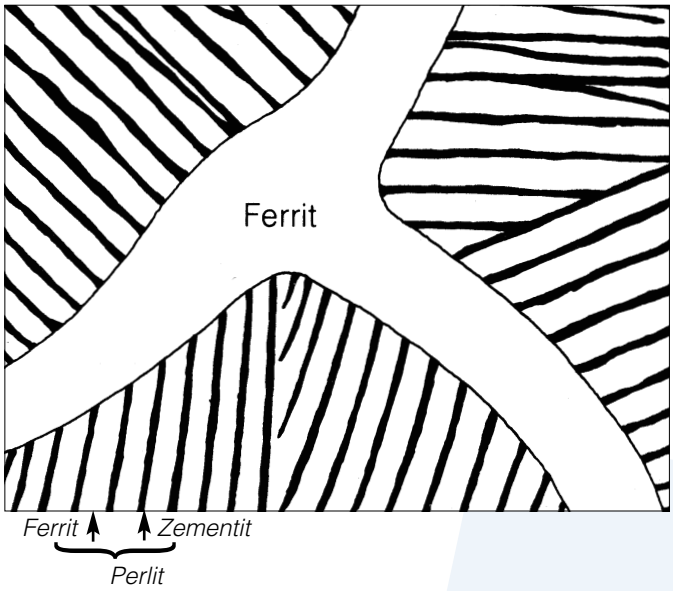


Bild 12: Untereutektoider Stahl (schematisches Gefüge).

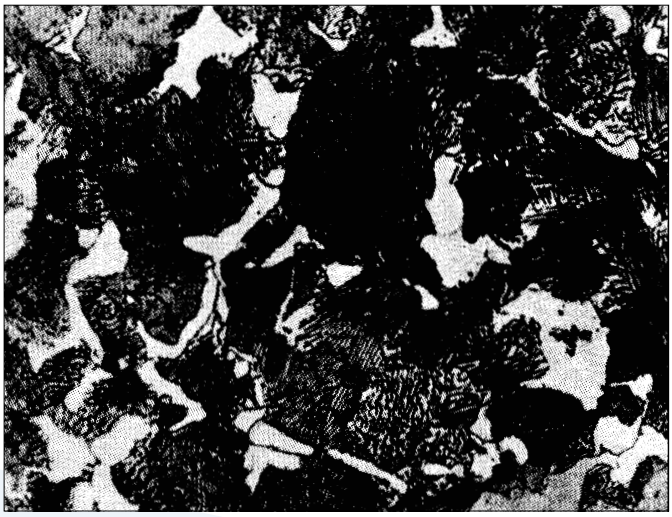


Bild 13: Untereutektoider Stahl mit ca. 0,7% C, «Schwarz-Weiss-Gefüge». Vergrösserung 500-fach.

Die obere Umwandlungslinie G-S im festen Zustand wird auch die A_3-Linie genannt. Das sich die Temperaturwerte der Umwandlungen beim Abkühlen etwas nach unten und beim Aufheizen nach oben verschieben, unterscheidet man manchmal noch zusätzlich zwischen Ac_3 (chauffage = Aufheizen) und Ar_3 (refroidissement = Abkühlen). Die untere Umwandlungslinie P-S bei 723°C wird entsprechend auch A_1 genannt, bzw. ganz korrekt Ac_1 und Ar_1.

Als Beispiel eines *übereutektoiden Stahles* (von 0,8 bis 2,06% C) sehen wir uns den Abkühlungsverlauf bei 1,2% C an. Die einheitlichen Austenitkörner, die ja bei der Erstarrung entstanden sind, wandeln sich jetzt beim Erreichen der Linie S-E um, also bei ca. 900°C (s. rechte gestrichelte Linie in Bild 10). Unterhalb dieser Temperatur ist γ-Fe nicht mehr in der Lage, so viel Kohlenstoff im Gitter gelöst zu halten. Deshalb diffundieren die C-Atome zu den Korngrenzen (s. Bild 14) und bilden dort Zementit. Mit sinkender Temperatur geht dieser Vorgang bis zur Linie P-S-K = 723°C; auch hier enthält der Austenit nun 0,8%C und wandelt sich in Perlit um. Man erkennt das Gegensätzliche zu den untereutekoiden Stählen (vgl. Bild 11): Die Umwandlungen gehen zwar immer an den Korngrenzen vor sich; einmal jedoch wandert der Kohlenstoff von dort weg, damit sich der weiche Ferrit bilden kann, das andere Mal wandert C dorthin, um den spröden Zementit zu bilden, bevor die restlichen Austenitkörner sich in beiden Fällen in Perlit umwandeln. Als typisches Gefüge übereutektoider Stähle sind die Perlitkörner mit einer, bei höherem C-Gehalt etwas breiteren, Schale von Korngrenzenzementit umgeben (s. Bild 15 und 16).

Bild 14: Bildung von Korngrenzenzementit im Austenit, übereutektoider Stahl. (Die Pfeile geben die Richtung der Kohlenstoff-Diffusion an.)

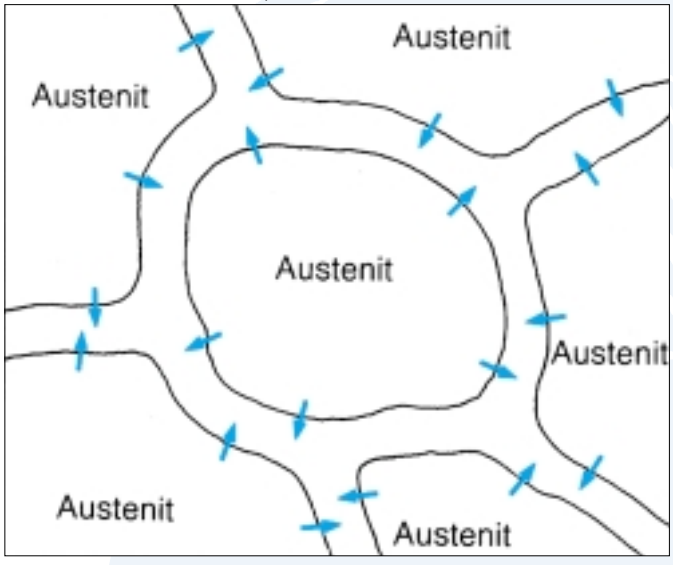
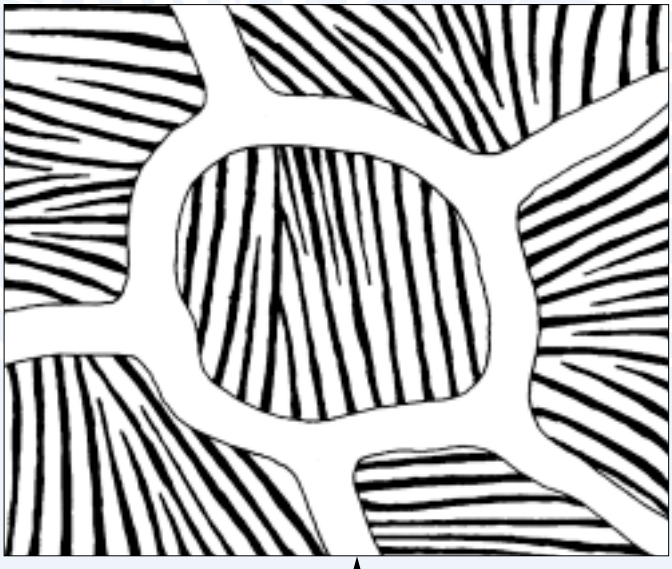


Bild 15: Übereutektoider Stahl (schematisches Gefüge).



Zu den untereutektoiden Stähle gehören in erster Linie die Baustähle. Die harten Werkzeugstähle ergeben einen solchen hier abgebildeten Schliff. Man kann sich leicht vorstellen, dass bei dieser Verteilung des spröden Zementits sowohl die Verformung als auch die Verwendung schwierig sind: Das Material ist insgesamt spöde, d.h. empfindlich gegen Stoss und Schlag, weil auch die zähen Perlitkörner nicht gleiten können. Deshalb muss die Zementitform durch Warmumformung und Glühen geändert werden.

Es stellt sich die Frage, warum es zwar α- und γ-, aber keine β-Mischkristalle gibt. Diese existierten früher dem Namen nach wirklich. Man bezeichnete damit das α-Fe. das oberhalb von 768°C unmagnetisch wird. Eine Gitterumwandlung ist jedoch damit nicht verbunden, deshalb hat man die Buchstaben geändert. γ-Mischkristalle sind immer unmagnetisch.

Eine weitere Frage ist sicherlich, wieso Austenit nach dem Fe-C-Diagramm nur oberhalb von 723°C beständig ist, da es doch austenitische Stähle gibt, z.B. die hauptsächlichen rostfreien Sorten. Diese sind jedoch hoch legiert. Dadurch dehnt sich das γ-Feld bis zur Raumtemperatur aus. Ebenso dehnt sich das Ferritgebiet durch Zusatz anderer Legierungselemente weit aus, so dass ferritische Stähle mit höheren Kohlenstoffgehalten möglich sind.

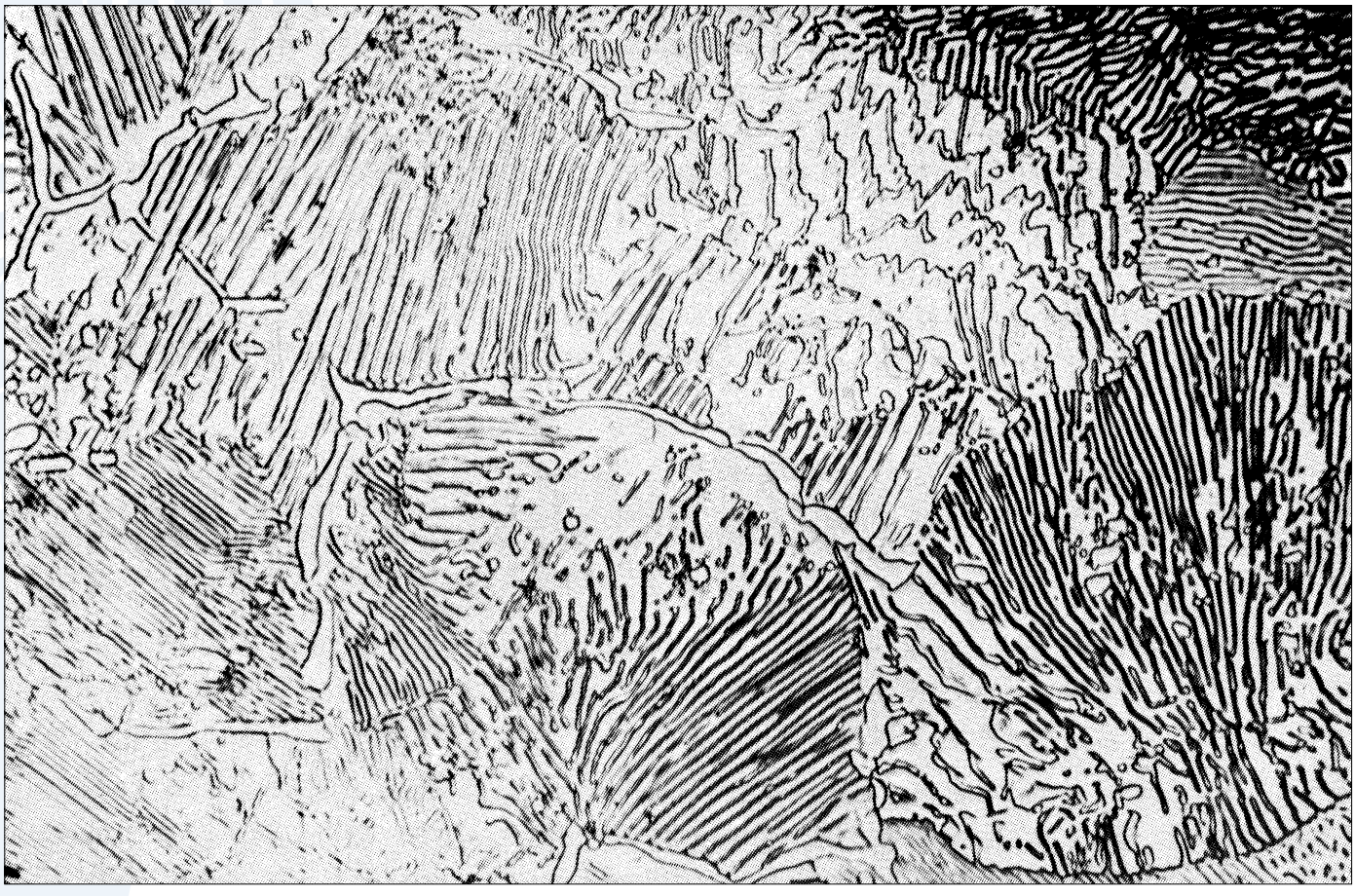



Bild 16: Übereutektoider Stahl mit ca. 1,0% C, Vergrösserung 500-fach.