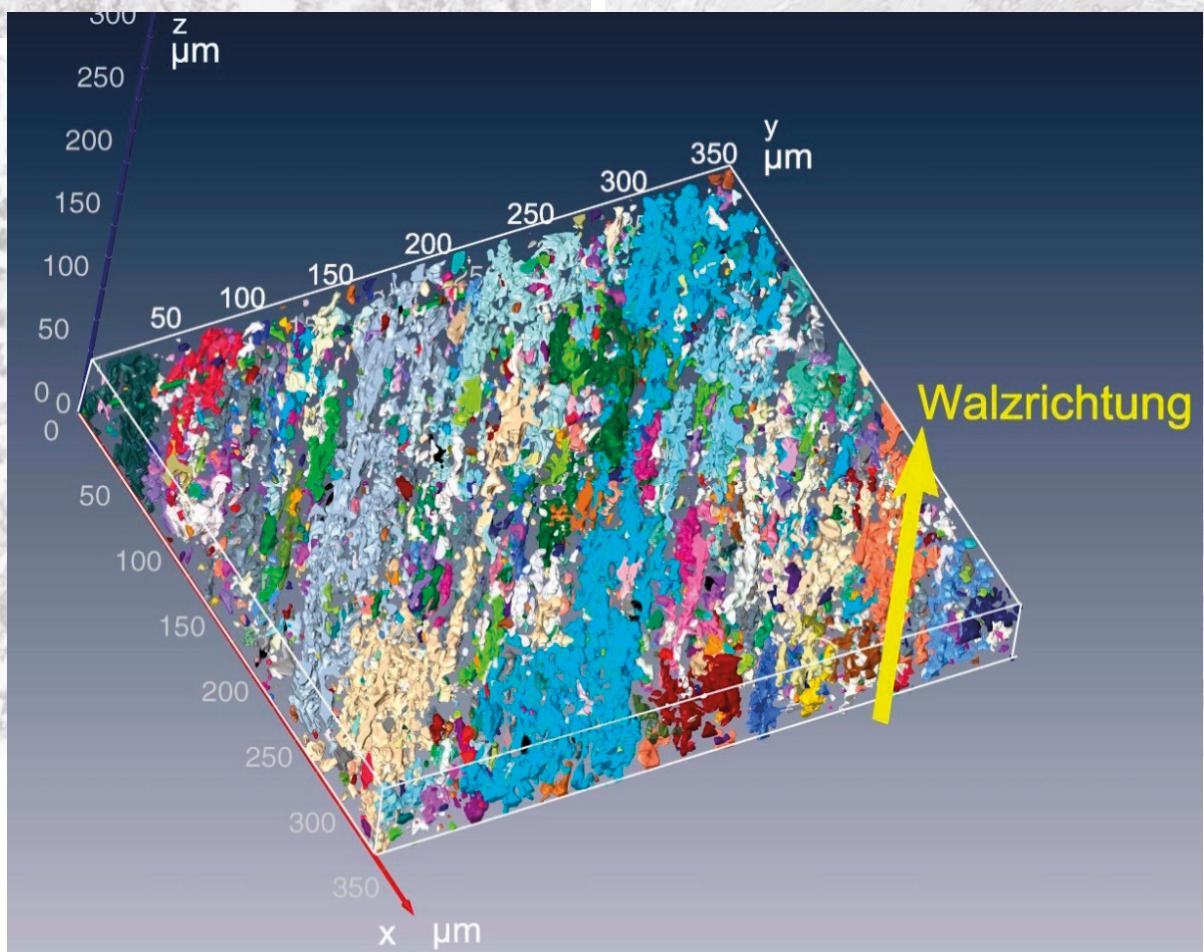


Grundlagen der Metall- und Legierungskunde – Stahl



TD0040

Institut für Werkstoffberatung

fips fach-informationen-portal-stahl

DR. MANFRED FEURER

Institut für Werkstoffberatung



Chemnitzer Straße 6
D-64720 Michelstadt
T +49(0)60 61-70 30 12
F +49(0)60 61-70 63 144
kontakt@fips-werkstoff.com
www.fips-werkstoff.com

Titelbild:
Quelle: Universität des Saarlandes

Grundlagen der Metall- und Legierungskunde – Stahl

Autor:
Dr. Dipl.-Ing. MANFRED FEURER

Auflage 2018

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

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

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

INHALTSVERZEICHNIS

| | Seite |
|---|-------|
| 1. Gefügeaufbau von Stahl | 7 |
| 1.1 Aufbau der Metalle | 8 |
| 1.1.1 Kriatallisationsvorgang reiner Metalle 1 | 8 |
| 1.1.2 Metallbindung | 9 |
| 1.1.3 Kristallgitter – Stahl | 10 |
| 1.1.4 Kristallisationsvorgang – Wachsen der Körner | 13 |
| 1.1.5 Stranggusverfahren | 16 |
| 2. Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm | 17 |
| 2.1 Gefügeausbildung – Begriffe | 20 |
| 2.2 Zusammenfassung | 23 |
| 3 Gefüge und Eigenschaften von Stahl | 24 |
| Abgrenzung nach DIN EN 10020 | 24 |
| 3.1 Einfluss der Eisenbegleiter | 25 |
| 3.2 Legierungsbildung – Einfluss und Bedeutung der wichtigsten Legierungselemente im Stahl | 31 |
| 3.3 Wirkung der NE-Metall-Legierungselemente | 35 |
| 3.3.1 Aluminium (Al) | 36 |
| 3.3.2 Arsen (AS), Antimon (Sb) | 37 |
| 3.3.3 Bor (B) | 37 |
| 3.3.4 Blei (Pb) | 38 |
| 3.3.5 Calcium (Ca) | 38 |
| 3.3.6 Chrom (Cr) | 38 |

| | |
|---|----|
| 3.3.7 Cobalt (Co) _____ | 39 |
| 3.3.8 Kupfer (Cu) _____ | 39 |
| 3.3.9 Mangan (Mn) _____ | 40 |
| 3.3.10 Molybdän (Mo) _____ | 41 |
| 3.3.11 Nickel (Ni) _____ | 41 |
| 3.3.12 Niob (Nb) _____ | 41 |
| 3.3.13 Silizium (Si) _____ | 42 |
| 3.3.14 Tantal (Ta) _____ | 43 |
| 3.3.15 Tellur (Te) _____ | 43 |
| 3.3.16 Titan (Ti) _____ | 43 |
| 3.3.17 Vanadin (V) _____ | 44 |
| 3.3.18 Wofram (W) _____ | 44 |
| 3.3.19 Zink (Zn) und Zinn (Sn) _____ | 44 |
| 3.3.20 Zirkon (Zr) _____ | 45 |
| 4. Eigenschaften der Metalle – insbesondere der Stahlwerkstoffe _____ | 46 |
| 5. Zusammenfassung _____ | 52 |
| Erklärungen/Glossar _____ | 53 |
| Literaturverzeichnis _____ | 59 |

Grundlagen der Metall- und Legierungskunde -Stahl

I. Gefügeaufbau von Stahl

„Was hält Stahl im innersten zusammen?“ Soll diese Frage beantwortet werden, so stößt man auf den Begriff – Gefüge. Doch was ist ein Gefüge und wie setzt sich dieses zusammen?

Ein Gefüge verleiht dem Stahl bestimmte Eigenschaften. So gibt es zum Beispiel Gefüge mit besonderen magnetischen Eigenschaften oder es gibt Gefüge, die besonders gut umformbar sind. Andere wiederum sind besonders fest oder besitzen eine hohe Korrosionsfestigkeit. Wenn man also Stahl verstehen will, muss man sein Gefüge kennen. Am besten dokumentiert dies ein Zeugnis (Abbildung 1), dass wir uns näher betrachten wollen. Dabei handelt es sich um einen Vergütungsstahl 42CrMo4 (Zeugnisinterpretation und die Erklärungen über Werkstoffsorten und Güten erfahren Sie in der technischen Dokumentation „Werkstoffprüfung“)

Dieser Stahl enthält Chrom und Molybdän, der dem Werkstoff bestimmte Eigenschaften verleiht. Was Chrom und Molybdän im Stahl bewirkt erfahren Sie im Abschnitt 3.3.6 in dieser technischen Dokumentation. Mit Chrom und anderen Legierungsinhalten lässt sich der Stahl „einstellen“, sodass er zum Beispiel ein austenitisches Gefüge erhält, wie aus dem Zeugnis ersichtlich ist. Auch die Größe der Körner wird im vorliegenden Zeugnis angegeben (Korngröße 7), denn sie haben Einfluss auf die Zähigkeit des vorliegenden Stahles. Um sich „Stahl zu erschließen“ ist es also von großer Bedeutung das „Innere des Stahles“ zu kennen.

|  HENNIGSDORFER ELEKTROSTAHLWERKE GMBH  | | PRÜFZEICHENBLATT INSPECTION DOCUMENT CERTIFICAT DE CONTRÔLE nach/by/conforme a | | N. 3.1 EN 10204 | DATUM 21/11/16 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|--|---|-------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | | ERGÖDZUNG MELTING PROCESS FUSION ELEKTROMAGNETISCH GERUEHRT | | | | | | | | | | | | | | |
| KUNDE CUSTOMER COMMETTANT Wolfgang-Kuntzsch-Straße 18 D-16761 HENNIGSDORF Tel. 03302/806-0 Fax 03302/806 211 E-Mail: Direktion.HES@rivagroup.com Internet: www.rivastahl.de | | STAHLART / STEEL / ACIER 42CrMo4-00 | | CHARGE / HEAT / COULEE 78140 | | | | | | | | | | | | |
| | | DURCHMESSER DIAMETER DIAMÈTRE RUND 30,00 | LIEFERZUSTAND DELIVERY COND. ÉTAT DE LIVRAISON EN 10277 +QT+SH+PL, RISSPRUEFUNG | | | | | | | | | | | | | |
| LIEFERSCHEIN DELIVERY NOTE BULLETIN D'EXPÉDITION 27176/16 VOM 18/11/16 | | TOLERANZ / TOLERANCE / TOLÉRANCE h9 | | AUFRAGSBESTÄTIGUNG CONFIRMATION CONF. DE COMM. | | | | | | | | | | | | |
| STRANG FORMAT CASTING DIMENSION DIAMÈTRE BILLETTE 140 | | BESTELLUNG / ORDER / COMMANDE 11619174007 | | 07 BA182/001 | | | | | | | | | | | | |
| PRÜFUNG TEST ESSAI | CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG % - CHEMICAL ANALYSIS % - COMPOSITION CHIMIQUE % <input checked="" type="checkbox"/> SCHMELZE / CAST / COULEE <input type="checkbox"/> STÜCK / CHECKANALYSIS / ANALYSE PAR PIÈCES | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRÜFUNG TEST ESSAI | PRÜFTEMPERATUR TESTING TEMP. TEMP. D'ESSAI RT °C | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRÜFUNG TEST ESSAI | STIRNABSCHRECKVERSUCH HARDENABILITY TEST BY END QUENCHING ESSAI DE TREMPABILITÉ PAR TREMPÉ EN BOUT nach/by/conforme a EN ISO 642 | | | | | AUSTENITISIERUNGSTEMPERATUR AUSTENIZING TEMP. TEMP. D'AUSTENITISATION ^{°C} | | | | | | | | | | |
| | mm | 1,5 | 3 | 5 | 7 | | 9 | 11 | 13 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| HRC | 5 7 | 5 6 | 5 5 | 5 4 | 5 2 | 5 1 | 5 1 | 4 9 | 4 7 | 4 5 | 4 2 | 4 1 | 3 9 | 3 8 | 3 7 | |
| KORNGRÖSSE - GRAIN SIZE - GROSSEUR DE GRAIN 7 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRÜFUNG TEST ESSAI | AUSTENIT <input checked="" type="checkbox"/> FERRIT / PERLIT <input type="checkbox"/> | | | | | nach / by / conforme a EN ISO 643 | | | | | | | | | | |
| PRÜFUNG TEST ESSAI | NICHTMETALLISCHE MIKROEINSCHLÜSSE - MICRO INCLUSION RATING - TAUX DE MICROINCLUSION | | | | | ASTM E 45 DIN 54107 | | | | | | | | | | |

Abbildung 1: Abschnitte eines 3.1 Zeugnisses

1.1 Aufbau der Melatte

Will man sich die besonderen Eigenschaften der Metalle erklären, so muss man ihren Aufbau, ihre innere Struktur, betrachten. Hier liegt auch der Schlüssel für das Verständnis der Metalltechnologie, die ja ebenfalls letztlich durch die Art der chemischen Bindung (Metallbindung) und der daraus resultierenden Kristallgitterstruktur bestimmt wird. Betrachten wir zunächst die chemische Bindung, d.h. die Metallbindung der kleinsten Bausteine der Metalle, respektive der Stahlwerkstoffe.

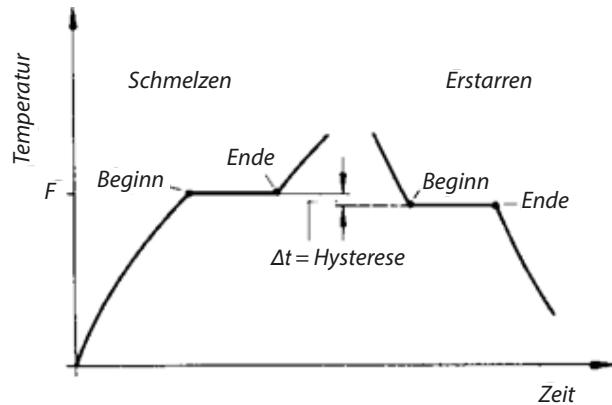


Abbildung 2: Erwärmungs- und Abkühlungskurve eines reinen Metalles.

1.1.1 Kristallisierungsvorgang reiner Metalle I

Beim absoluten Nullpunkt (0° K) liegen alle Atome ruhig an ihren Raumgitterplätzen. Wird Wärme zugeführt, so schwingen die Atome um ihre Gitterplätze. Erreicht man die Schmelztemperatur, verlassen die Atome die geordneten Gitterplätze, da die Schwingung sehr stark geworden ist. Sie gehen in einen ungeordneten Zustand der Schmelze über. Beim Abkühlen verläuft der Vorgang in umgekehrter Richtung. Mit Erreichen der Erstarrungstemperatur gehen die Atome wieder in den geordneten Gitterzustand zurück.

Die Abbildung 2 zeigt die Erwärmungs- und Abkühlungskurve eines reinen Metalles.

Beim Schmelzen erfolgt eine Temperaturerhöhung bis zum Erreichen der Schmelztemperatur (Beginn). Obwohl jetzt weiterhin der Schmelze Wärmeenergie zugeführt wird, erfolgt keine Temperaturerhöhung.

Diese Schmelzwärme dient allein zur Zustandsänderung (von fest nach flüssig) und nicht der Erwärmung.

Nach einer gewissen Zeit (Ende) erfolgt eine weitere Temperaturerhöhung. An dieser Stelle ist das Metall vollständig flüssig. Beim Erstarren verläuft die Abkühlkurve in umgekehrter Richtung. Beim Beginn der Erstarrung (also von flüssig nach fest) wird Wärmeenergie frei. Diese Energie wird als Kristallisationswärme bezeichnet.

Die Kristallisationswärme dient nur zur Zustandsänderung (von flüssig nach fest) und nicht zur Abkühlung.

Aus der Abbildung 2 geht auch hervor, dass bei einer Temperaturänderung der Schmelz- und Erstarrungspunkt nicht bei der gleichen Temperatur liegt.

Warum ist dies wichtig zu wissen?

Wie Sie bereits erfahren haben, ist Stahl eine Legierung aus Eisen und Eisenkarbid (Kohlenstoff). Haben reine Metalle nur einen Schmelz- bzw. Erstarrungspunkt, so haben Legierungen jeweils zwei Erstarrungs- bzw. Schmelzpunkte. Um nun das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm aufzubauen (siehe Abschnitt 2) benötigen wir diese Haltepunkte.

Auch bei der Wärmebehandlung ist es wichtig, diese Haltepunkte zu kennen. Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt den Einfluss der Abkühlungsart auf die Lage des Haltepunktes für einen Stahl C60 mit 0,6 % Kohlenstoff.

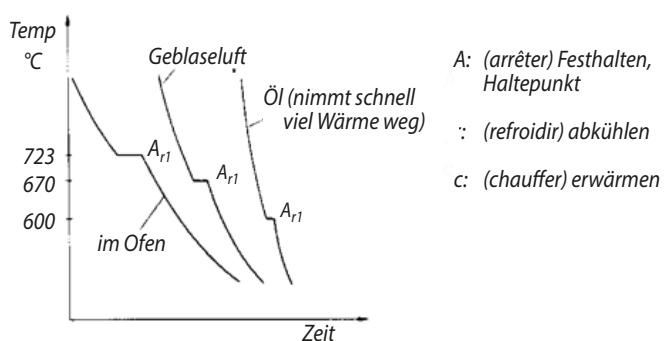


Abbildung 3: Einfluss der Abkühlungsart auf die Lage des Haltepunktes für den Stahl C60 mit 0,6 % Kohlenstoff.

I.1.2 Metallbindung

Metalle bestehen, wie alle anderen Stoffe auch, aus einzelnen Atomen. Wie Sie noch aus Ihrem Chemieunterricht wissen, streben alle Atome eine stabile Außenschale mit acht Elektronen an. Die Metallatome geben aber ihre Elektronen grundsätzlich ab und bilden Kationen, d.h., ihr Kern ist positiv geladen. Es entstehen also positiv geladene Kationen und negativ geladene, aber freie Elektronen. Bei der **metallischen Bindung** lagern sich die Teilchen (Atomrumpfe) so eng wie möglich aneinander. Da jedoch die Elektronen gegenüber den Metall-Kationen verschwindend klein sind, bilden nur die Kationen das Kristallgitter, während sich die Elektronen in den Lücken aufhalten. Diese losgelösten, tiefgeladenen Elektronen (auch Valenzelektronen genannt) bewegen sich als Elektronenwolke oder Elektronengas zwischen den positiven Atomrumpfen. Da sich unterschiedliche Ladungen anziehen, halten sie – gewissermaßen als eine Art Elektronenkitt – die positiven

Atomrumpfe zusammen. Wären wir in der Lage, mit einem Mikroskop diese metallischen Bausteine sichtbar zu machen, so würde uns deren regelmäßige Anordnung (**Metallgitter**) auffallen (Abbildung 4).

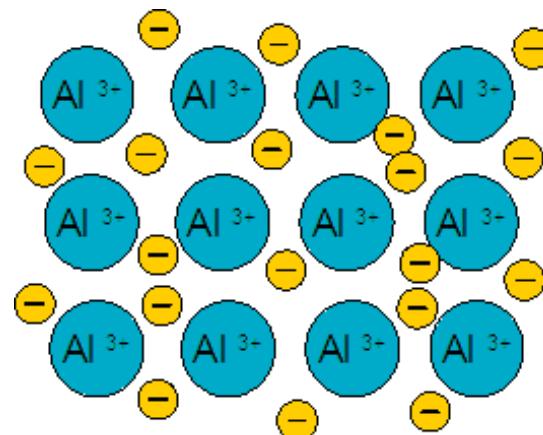


Abbildung 4: Metallbindung mit ortsfesten, regelmäßig angeordneten Atomrumpfen und freien Elektronen (im Beispiel: Aluminiumbindung).

Durch die Wechselwirkung, d.h. die elektrostatischen Anziehungskräfte, von positiven Metallionen (blau in der Abbildung) und dem negativ geladenen Elektronengas (gelb in der Abbildung) ergibt sich eine Bindung zwischen den Atomen – die **Metallbindung**.

Die Metallatome ordnen sich auf diese Weise sehr regelmäßig an, man spricht von einem „Gitter“ (auch Metallgitter, Kristallgitter). Auch ein Metallgitter lässt sich theoretisch unendlich regelmäßig fortbauen.

Zwischen diesen fixierten Teilchen könnten wir andere, kleinere erkennen, die sich mit hoher Geschwindigkeit scheinbar regellos fortbewegen. Natürlich haben wir bei dieser Modellvorstellung eine ganze Reihe von Vereinfachungen getroffen. So betrachten wir z.B. die kleinsten Teilchen als kugelförmige Materie, obwohl dies eine stark vereinfachte Modellvorstellung ist – für unsere Zwecke allerdings durchaus ausreichend.

Wichtig für die metallischen Eigenschaften ist besonders, dass alle Atomrümpe im Metallgitter die gleiche Ladung besitzen und die freien Elektronen keinem bestimmten Atomrumpf zugeordnet und somit im Gitter verschiebbar sind (Valenzelektronen).

Nun lassen sich die **typischen Eigenschaften von Metallen** verstehen.

Verformbarkeit

Die metallische Bindung ist nicht sehr stark, daher ergibt sich bei Metallen die bekannte gute Verformbarkeit. Die einzelnen Metallionen „gleiten“ problemlos auf dem Elektronengas aneinander vorbei (Abbildung 5).

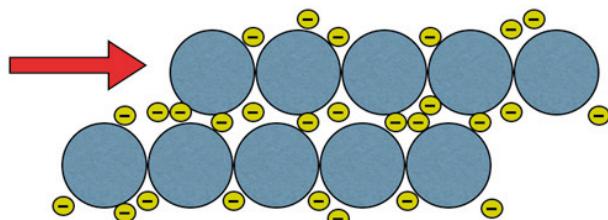


Abbildung 5: Verformung von Metallen – Atome „gleiten“ auf dem Elektronengas (roter Pfeil: Kraft von außen)

Könnte man in den Werkstoff hinein sehen – vergrößern – vergrößern – und nochmals vergrößern – zeigt sich auch die Anordnung der Atome. Atome in Werkstoffen können entweder völlig regellos angeordnet sein oder schön regelmäßig.

Alle Werkstoffe, in denen die Atome völlig regellos vorliegen, also total durcheinander, ohne jede Ordnung, werden in der Wissenschaft grundsätzlich Gläser genannt. Man spricht häufig auch von amorphen Werkstoffen; amorph bedeutet ohne Form, ohne Struktur. Glas bedeutet also nicht, dass man da immer hindurch sehen kann, sondern Werkstoff mit regellose Anordnung.

Die Wissenschaft unterscheidet:

- ▶ **anorganische Gläser**
(Fensterglas, optische Gläser)
- ▶ **metallische Gläser** (die sind eine Besonderheit unter den Metallen, übrigens genauso glänzend und undurchsichtig wie die normalen kristallinen Metalle)
- ▶ **amorphe Kunststoffe** (bei denen sind die Moleküle Regellos verteilt).

Mehr darüber erfahren Sie in den nachfolgenden Studienmodulen.

Bei den meisten Werkstoffen ordnen sich die Atome regelmäßig an, wie normalerweise bei den Metallen und Legierungen. Man spricht dann von Kristallen, Kristallstrukturen und Kristallgittern. Man unterscheidet drei Kristallgitter bei den metallischen Werkstoffen:

- ▶ das kubisch-flächenzentrierte Gitter
- ▶ das kubisch-raumzentrierte Gitter
- ▶ das hexagonal dichtest gepackte Gitter

1.1.3 Kristallgitter – Stahl

Die zusammenhaltenden Kräfte der Elektronenwolke drängen die Metallatome auf möglichst kleinem Raum zusammen. Dadurch entsteht eine regelmäßige Anordnung der Metallatome (Abbildung 6). Dies ist das Typische des kristallinen Aufbaus. Verbindet man die Mittelpunkte der Metallatome, so ergeben die Verbindungslien ein räumliches Gitter, dass als **Raumgitter** oder **Kristallgitter** bezeichnet wird. Die kleinste Einheit dieses Kristallgitters nennt man **Elementarzelle**.

Die Atome der verschiedenen Metalle können sich in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen zusammenfügen. Diese sind von der Metallart und der Temperatur abhängig.

Am häufigsten sind die kubisch-raumzentrierte, kubisch-flächenzentrierte und die hexagonale Anordnung. Die grafische Darstellung der Metallatomanordnung erfolgt anhand einer Elementarzelle des Kristalls. Man zeichnet die Elementarzelle entweder mit den Atomen als Kugeln oder mit einem schematischen Modell.

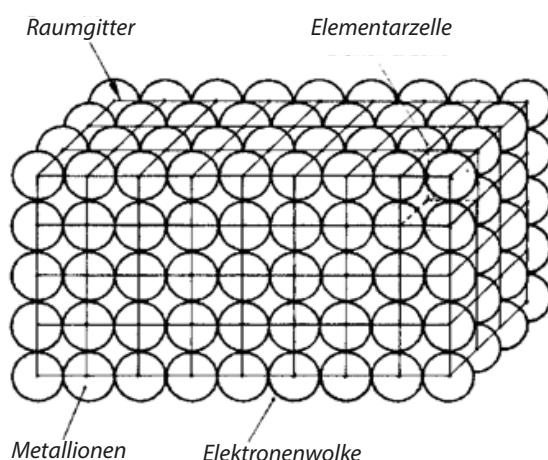


Abbildung 6: Kristalliner Aufbau der Metalle

Kristallgittertypen des Eisens

Das Element Eisen tritt je nach Temperatur in zwei Kristallgittern auf; diese Erscheinung wird als Allotropie bezeichnet. Die Kristallgitterformen des Eisens sind:

- ▶ Kubisch-raumzentriert (krz) (α -Eisen = Ferrit)
- ▶ Kubisch-flächenzentriert (kfz) (γ -Eisen = Austenit)

Das kubisch-raumzentrierte Eisengitter

Bei diesem Kristallgitter ordnen sich die Atome so, dass die Verbindungslinien von Atommittelpunkt zu Atommittelpunkt einen Würfel (Kubus) bilden (Abbildung 7a und 7b). Zusätzlich befindet sich noch ein Atom in der Würfelmitte. Ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter haben z.B. Eisen bei Temperaturen unter 911 °C und über 1.392 °C sowie Chrom, Wolfram und Vanadium.

det sich noch ein Atom in der Würfelmitte. Ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter haben z.B. Eisen bei Temperaturen unter 911 °C und über 1.392 °C sowie Chrom, Wolfram und Vanadium.

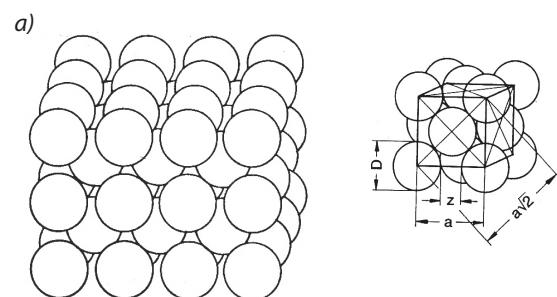


Abbildung 7a:
Regelmäßige Anordnung von Eisenatomen im
kubisch-raumzentrierten α -Eisen;
Elementarzelle des α -Eisens;
 D = Durchmesser des Eisenatoms,
 a = Länge der Elementarzelle (Gitterparameter),
 z = Zwischengitterplatz

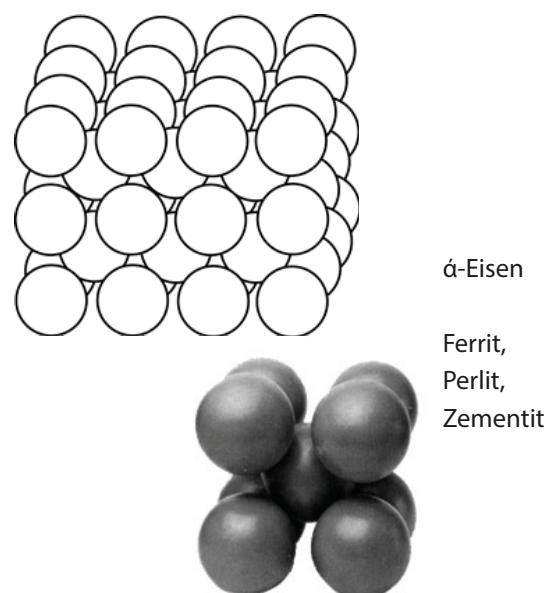


Abbildung 7b: Gitteraufbau des kubisch raumzentrierten α -Eisen

Das kubisch-flächenzentrierte Eisengitter

Das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter hat ebenfalls einen Würfel als Grundkörper und zusätzlich je ein Atom in der Mitte der Seitenflächen (*Abbildung 7c und 7d*). Diese Kristallform haben Eisen über 911 °C bis 1.392 °C sowie Aluminium, Kupfer und Nickel.

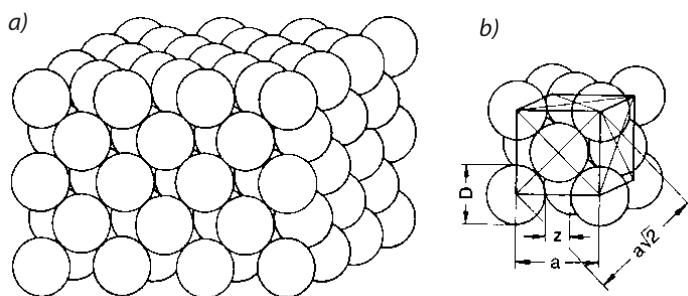


Abbildung 7c:

- a) Regelmäßige Anordnung von Eisenatomen im kubisch-flächenzentrierten γ -Eisen;
- b) Elementarzelle des γ -Eisens
(Bezeichnungen wie in Abbildung 7a)

die Verformung haben sie bereits kennengelernt, zwei besondere sollen nunmehr herausgestellt werden.

Die kfz aufgebauten Werkstoffe sind auch bei tiefen Temperaturen noch sehr zäh, lassen sich also gut plastische Verformung. Demgegenüber werden die kubisch-raumzentrierten und hexagonal dichtest gepackt aufgebauten Werkstoffe bei tiefen Temperaturen spröde.

Die Fähigkeit, Legierungen zu bilden, unterscheidet sich beim kfz- und krz-Gitter sehr.

Normalerweise hat jedes Metall eine bestimmte Kristallart, und zwar im gesamten Temperaturbereich vom absoluten Nullpunkt bis zum Schmelzpunkt. So ist Aluminium im gesamten Temperaturbereich kubisch-flächenzentriert und Chrom kubisch-raumzentriert aufgebaut.

Polymorphie des Eisens

Manch Metalle aber weisen in Abhängigkeit von der Temperatur (und auch vom Druck) mehrere Kristallarten auf. Dieses Phänomen nennt man Polymorphie, was man ungefähr mit Vielstruktur übersetzen kann.

Das bekannteste und wichtigste Beispiel hierfür ist das Element Eisen, an dem die Polymorphie erklärt werden soll (*Abbildung 8*):

Kühlt man reines Eisen bis in die Nähe des absoluten Nullpunkts, also - 237 °C ab und untersucht es auf seine Kristallstruktur, so stellt man fest, dass es kubisch-raumzentriert aufgebaut ist. Erwärmst man das Eisen nun langsam nach und nach und untersucht es laufend, so findet man heraus, dass es die kubisch-raumzentrierte Struktur zunächst beibehält.

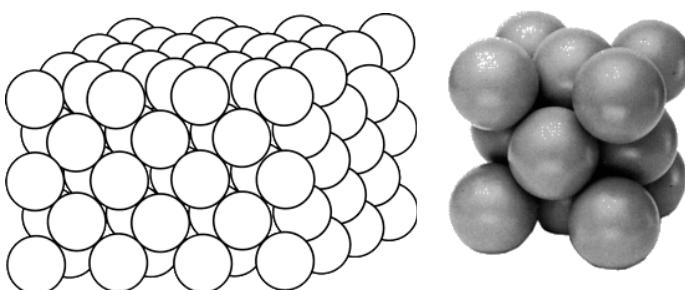


Abbildung 7d: Gitteraufbau des kubisch-flächenzentrierten γ -Eisens – Austenit

Eigentlich könnte man argumentieren: was interessiert mich das, wie die Atome im Metall angeordnet sind?

Sie glauben aber gar nicht, wie sehr sich die Atomanordnung bemerkbar macht. Im Grunde wirken sie sich auf alle Eigenschaften aus. Eine,

Bei 911 °C aber wandelt sich das Eisen abrupt in die kubisch-flächenzentrierte Struktur um, die dann bei höheren Temperaturen vorliegt.

Das Eisen wandelt sich bei 1392 °C wieder in die kubisch-raumzentrierte Struktur um, die dann bis zum Schmelzpunkt von 1536 °C bleibt.

Das kubisch-raumzentriert aufgebaute Eisen bei hohen Temperaturen heißt δ -Eisen (Delta-) oder δ -Ferrit. Es ist genau gleich wie das α -Eisen.

Und so ganz beiläufig:

Die Artikel sind männlich, es heißt **der** Ferrit und **der** Austenit.

Die Polymorphie tritt auch bei anderen Stoffen und unter anderen Bedingungen auf, so bei Titan, Zinn, manchen anderen Metallen und anderen Elementen, auch bei besonderen Legierungen und chemischen Verbindungen.

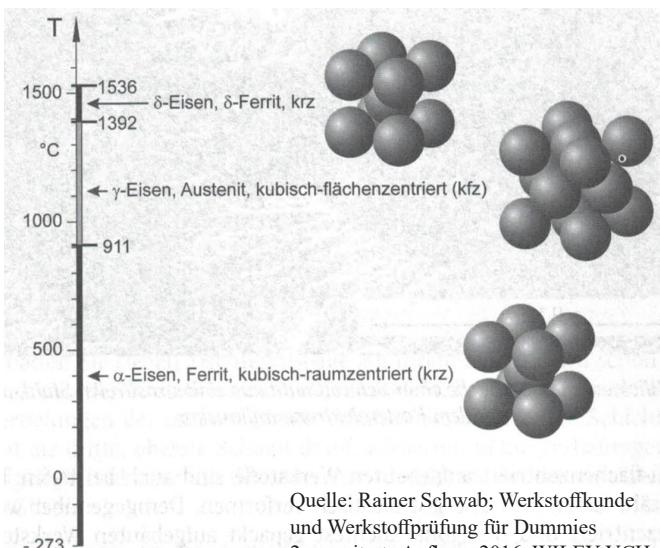


Abbildung 8: Polymorphie des Eisens

Bei abnehmenden Temperaturen verläuft übrigens alles wieder in umgekehrter Reihenfolge.

Die bei Eisen auftretenden Kristallgitter werden mit griechischen Buchstaben und zusätzlich auch mit Namen benannt:

Das kubisch-raumzentriert aufgebaute Eisen bei tiefen Temperaturen heißt α -Eisen (Alpha-) oder auch Ferrit, benannt nach dem lateinischen Namen für Eisen, Ferrum.

Das Kubisch-flächenzentriert aufgebaute Eisen heißt γ -Eisen (Gamma-) oder Austenit, benannt zu Ehren von Sir William Chandler Roberts-Austen, einem britischen Metallurgen.

1.1.4 Kristallisationsvorgang – Wachsen der Körner

Die Eigenschaften eines bestimmten Stahls werden nicht nur durch die Gitterstruktur bestimmt sowie durch Einlagerungen und Baufehler (siehe weiter unten), sondern darüber hinaus ganz wesentlich durch die Tatsache, dass ein Metallkörper nicht etwa nur aus einem großen Kristall besteht, sondern aus vielen kleinen Metallköpfen (Kristalliten). Das Wachsen der Kristalle oder Körner nimmt von Kristallisationskernen oder -keimen aus der Schmelze seinen Ausgang. Wird nun der Schmelze Wärme entzogen, so kommt es an vielen Stellen in der Schmelze zu einer regelmäßigen Anordnung (Keimbildung ist gleich beginnende Gitterbildung). Als Keime können Fremdatome oder Fremdmoleküle wirken. Da nun aber die Kristallbildung an vielen Orten in der Schmelze gleichzeitig beginnt, wächst die große Zahl von Kristallen solange, bis sie aneinanderstoßen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen räumlichen Orientierung passen in der Regel die Gitter an den Berührungsflächen nicht zusammen (Abbildung 9), und so entstehen Korngrenzen zwischen den einzelnen Kristalliten. Vergleichen

Sie hierzu nochmals den Abschnitt 1.1.1 Kristallisationsvorgang. Das soeben Gelesene erklärt auch das Vorhandensein der jeweiligen Haltepunkte beim Erwärmen bzw. beim Abkühlen der Schmelze.

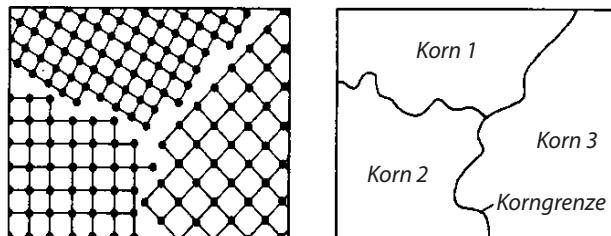


Abbildung 9: Drei aneinanderstoßende Kristallite

Die Vielzahl der Kristallite, die den Stahlkörper letztlich bilden, bezeichnet man als **Gefüge**. Es kann sehr unterschiedlich ausgeprägt sein, denn durch die Erstarrungsbedingungen, die **Kristallisationsgeschwindigkeit** und durch Impfen mit Fremdkeimen können Größe und Form der Kristallite beeinflusst werden. Dies bedeutet gleichzeitig eine Beeinflussung der Eigenschaften des entsprechenden Stahls.

Im Allgemeinen strebt man ein feines Korn (kleine Kristallite) an, um möglichst gute mechanische Eigenschaften (z.B. größere Festigkeit) zu erzielen (siehe Abbildung 10). Der Werkstoff wird feinkörnig (vgl. Feinkorn-Baustähle).

Beim Wachsen der Kristalle werden die in technischen Schmelzen stets enthaltenen **Verunreinigungen**, soweit sie nicht in das Gitter eingebaut werden können, vor der Erstarrungsfront hergeschoben und bilden später die Korngrenzenmasse. So wachsen die Kristalle, die Schmelze aufzehrend, bis sie zusammenstoßen und dabei unregelmäßig ausgebildete Grenzflächen enthalten.

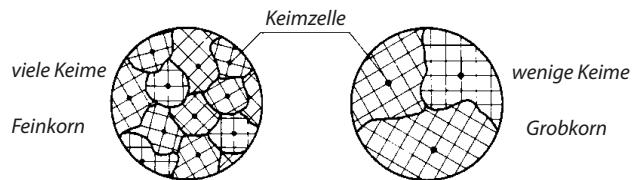


Abbildung 10: Vergleich eines feinen und groben Kornes

Wie der beschriebene Aufbau der Metalle nun deren Eigenschaften bestimmt, soll im Abschnitt 2 „Gefüge und Eigenschaften von Stahl“ betrachtet werden.

Kristallbaufehler

Reale Kristalle sind nicht perfekt aufgebaut, sondern haben Baufehler. Die Geometrie, Häufigkeit und Verteilung haben jedoch eine Gesetzmäßigkeit, man sagt Fehlerordnung. Je nach der Dimension unterscheidet man:

- ▶ **Punktfehler; das sind Leerstellen oder Zwischengitteratome (siehe Abbildung 11).**
- ▶ **Linienfehler; das sind Versetzungen (Abbildung 12)**
- ▶ **Flächendefekte; das sind Fehler in den Korngrenzen (Abbildung 13)**

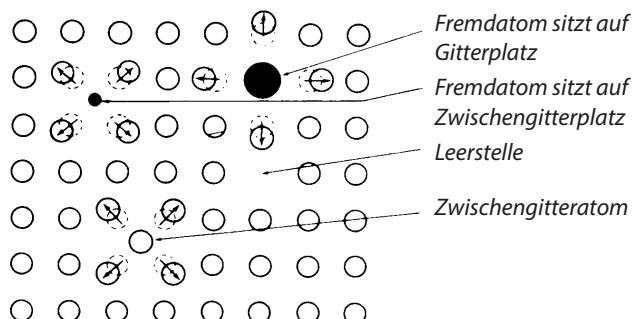


Abbildung 11: Punktfehler
(siehe hierzu auch die Abbildung 15)

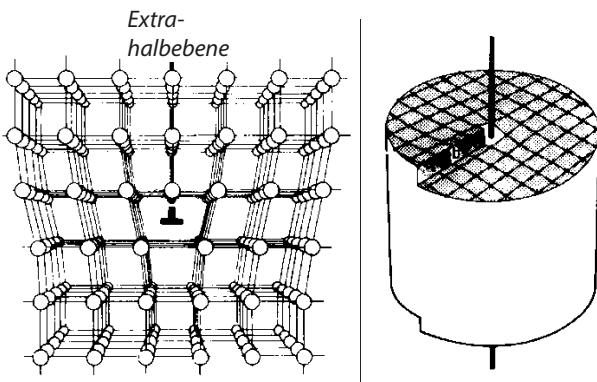


Abbildung 12: Linienfehler

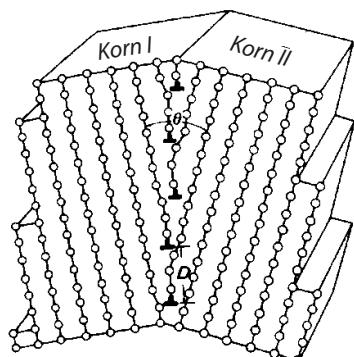


Abbildung 13: Flächendefekte

Gitterbaufehler sind jedoch auch die Voraussetzungen für wichtige Veränderungen des inneren Baus der Gefüge:

- ▶ Sie ermöglichen die Diffusion, d.h. die Wanderung von Fremdatomen in einem Raumgitter durch Platzwechsel mit Leerstellen.
- ▶ Sie erleichtern die plastische Verformung, d.h. sie lassen eine Verschiebung der Teilchen mit kleineren Kräften zu als bei einem ungestörten Gitter.

Die Verschiebung von Atomen setzt zuerst an den Versetzungen ein, weil dort schwächere Bindungskräfte wirken.

Sehen wir uns zunächst die möglichen Baufehler, in diesem Fall die Gitterstörungen, etwas genauer an: Da sind Abweichungen von der gleichmäßigen, periodischen Anordnung der Ionen. Man spricht hier von **Versetzung**en (Abbildung 14).

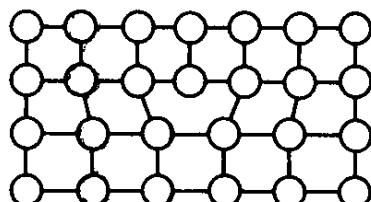


Abbildung 14: Versetzungen in der Metallgitterebenen

Ein Ion hat im dargestellten Gitterausschnitt nicht die sonst übliche Anzahl Nachbarn in gleichem Abstand. Tatsächlich sind solche Versetzungen im Realkristall relativ häufig und erleichtern das Verschieben von Ionenschichten entlang einer Gleitebene erheblich, denn sie können unter Einwirkung einer Kraft wandern, und zwar mit wesentlich weniger Aufwand, als es beim Verschieben ganzer Ionenflächen notwendig ist.

Weitere Gitterbaufehler sind **Leerstellen** im Gitter, ein Gitterplatz ist unbesetzt (Abbildung 15 a);

Zwischengitteratome (gleichartige oder fremdartige Atome zwischen den eigentlichen Gitterplätzen, (Abbildung 15 b) und substituierte **Fremdatome** (Abbildung 15 c) auf regulären Gitterplätzen.

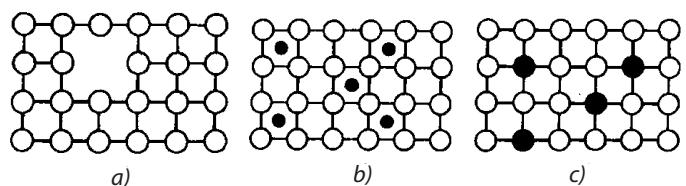


Abbildung 15: Gitteraufbau

- a) Leerstelle
- b) Zwischengitteratome
- c) Eingelagertes Fremdatom

Alle diese Fehler (oder besser Abweichungen, denn sie sind in vielen Fällen erwünscht) beeinflussen natürlich die mechanischen Eigenschaften (Elastizität, Plastizität, Festigkeit, Härte, Zähigkeit und Sprödigkeit). Wie, das soll im nächsten Abschnitt 2.3 erläutert werden.

Mischkristall

Ein Mischkristall ist ein chemisch homogener, gleichartiger Kristall, der aus mehreren Atomsorten aufgebaut ist. Zu unterscheiden sind:

- ▶ Substitutionsmischkristalle oder (*Abbildung 16a*)
- ▶ Einlagerungsmischkristalle (*Abbildung 16b*)

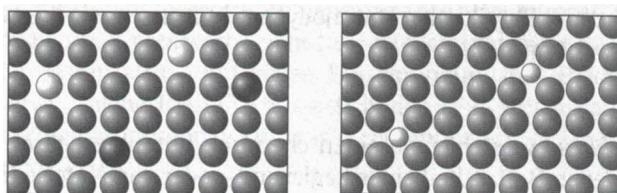


Abbildung 16: a) Substitutionsmischkristall (links) und b) Einlagerungsmischkristall (rechts)

1.1.5 Legierung – Begriffsbestimmung

Das Wort „legieren“ kommt vom lateinischen „ligare“, und bedeutet zusammenbinden, verbinden oder auch vereinigen eine Legierung verbindet also Metalle, vereinigt sie.

Die *chemische Zusammensetzung* oder *Konzentration* können auf 2 Arten zum Ausdruck gebracht werden:

- ▶ mit Massenanteil/Masseprozent/ Gewichtsprozent (ist alles dasselbe) oder
- ▶ mit Atomanteil/Atomprozent.

Beispiel: Massenanteil

25 Masseprozent Nickel, Rest Kupfer heißt: in 100 g der Legierung sind 25 g Nickel und 75 g Kupfer enthalten.

Diese Art wird gerne in der Praxis angewandt, da sie sehr anschaulich sind.

Beispiel: Atomprozent

25 Atom Prozent Nickel, Rest Kupfer bedeutet: 25 % der Atome in der Legierung sind Nickelatome und der Rest, 75 %, sind Kupferatome. Man bezieht sich also auf die Zahl der Atome.

Phase

Phase bedeutet Aggregatzustand.

Man versteht darunter einen chemisch und physikalisch *gleichartigen* und *homogenen* Bestandteil einer Legierung.

Einphasig:

Substanzen oder Stoffe aus dem Alltag wie Luft, Wasser, Eis, Zucker, Eisen oder Aluminium und auch gesüßter Tee sind ein phasige Stoffe, ein Tropfen Wasser ist an jeder Stelle gleichartig und identisch ebenso auch der gesüßte Tee.

Zweiphasig:

Wenn im Tee so viel Zucker ist, dass der sich nicht mehr löst, haben Sie 2 Phasen vorliegen. Eine gesättigte Lösung von Zucker in Tee und die übrig gebliebenen Zuckerkristalle auch Nebel besteht aus 2 Phasen, den Wassertröpfchen und der Luft.

Bei den Legierungen wird's komplizierter.

Zustandsdiagramm

Ein Zustandsdiagramm zeigt den Zustand von Legierungen oder ganz allgemein von Stoffen und Stoffgemischen an und zwar in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung und der Temperatur (manchmal auch Druck).

Mit *Zustand* meint man die auftretenden Phasen, also alle festen flüssigen oder sogar gasförmigen Phasen. Deswegen nennt man dieses Diagramm auch *Phasendiagramm*.

2 Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

In den bisher gemachten Ausführungen wurden der Aufbau der Metalle und auch der Kristallisationsvorgang beschrieben, wir kennen auch den prinzipiellen Gitteraufbau sowie Fehler im Kristallgefüge, wir kennen jedoch noch nicht das Gefüge selbst. So wie der Gitteraufbau uns etwas über die mechanischen Eigenschaften eines Stahls sagt, so verrät uns der Gefügeaufbau des Stahls etwas über seine technologischen Eigenschaften. Eine Übersicht, welche Gefügeart ein Eisenwerkstoff mit einem bestimmten Kohlenstoffgehalt bei einer bestimmten Temperatur hat, gibt das **Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm**. Da das Gefüge sich mit steigendem Kohlenstoffgehalt ständig ändert, beginnen wir zunächst beim reinen Eisen ohne Kohlenstoff.

Bei Raumtemperatur und beim Erwärmen bis 911 °C liegt das Eisen als α -Eisen (krz) vor (Abbildung 17). Man nennt dieses Gefüge Ferrit. Bei 911 °C klappt das Gitter um, die Atome springen schnell in die Kristallform des γ -Eisens. Dieses Gefüge nennt man Austenit. Damit werden die Kristalle größer, und sie enthalten, wie wir bereits wissen, zusätzlich Atome an der Würfeloberfläche (kzf). Die Würfelmitte des Kristallgitters wird wieder frei. Erhöht man die Temperatur weiter bis etwa 1.400°C, dann klappt das Gitter plötzlich wieder in ein kubisch-raumzentriertes α -Eisen um.

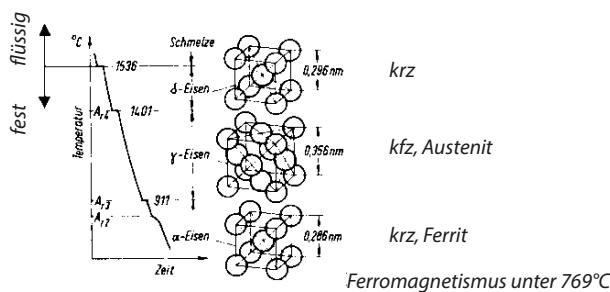


Abbildung 17: Kristallarten von Reinem Eisen beim Abkühlen

Zur Unterscheidung spricht man nun mehr von δ -Eisen. Würde man Eisen über 1.536°C erwärmen, schmilzt es, und das Raumgitter zerfällt.

Beim Abkühlen verläuft die in Abbildung 15 angegebene Kurve in umgekehrter Richtung. Die in diesem Bild bezeichneten Punkte A_{r2} , A_{r3} und A_{r4} sind Haltepunkte. Beim Erreichen des jeweiligen Haltepunktes wird die erforderliche Wärme benötigt, um alle Kristalle restlos von einem Zustand in den anderen Zustand zu überführen. Die Schmelzwärme die ebenso wie die Verdampfungswärme keine Temperaturerhöhung hervorruft, nennt man verborgene Wärme. Beim Abkühlen wird die frei werdende Energie an den Haltepunkt Kristallisationswärme genannt.

Beim Stahl haben wir es nicht mit reinem Eisen zu tun, sondern mit einer Legierung von Eisen und anderen Elementen, insbesondere mit Kohlenstoff. Neben dem Kohlenstoff, der in bestimmten Formen auskristallisiert, enthält Stahl, wie wir bereits wissen, weitere Legierungselemente. Stark vereinfacht können der Eisenbegleiter Kohlenstoff und die Legierungselemente in folgender Form im Raumgitter angeordnet sein:

- ▶ Bei etwa gleich großem Atomdurchmesser werden die Eisenatome durch Legierungselemente ersetzt (Substitutionsmischkristall, Abbildung 18), z.B. Nickel, Chrom als Eiseneratz.

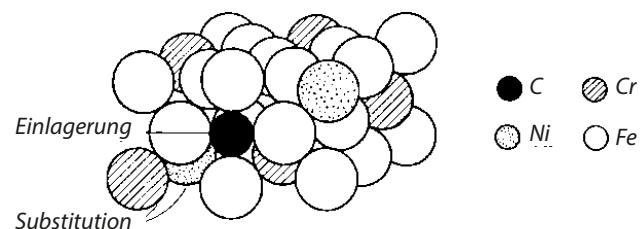


Abbildung 18: Beispiel eines Substitutionsmischkristalls

- ▶ Legierungselemente mit kleineren Atomdurchmessern werden in das Gitter eingelagert (Einlagerungsmischkristall).
- ▶ Zwischen oder in den Kristallkörnern des Eisens formen Eisen und Legierungselemente ein eigenes Raumgitter (Kristallite = Verbindungsbildung, Abbildung 19).

Kohlenstoffkristalle C (Graphit). Dies ist überwiegend bei der Roheisenerzeugung (graues Roheisen) der Fall.

Das stabile System ist das Schaubild von Eisen und Kohlenstoff.

Kühlt die Legierung hingegen **schnell** ab, so findet der Kohlenstoff keine Zeit, eigene Kristalle (Graphit) zu bilden. Es entsteht somit eine Eisen-Kohlenstoff-Verbindung, das sog. Eisen-Carbid Fe_3C mit kompliziertem Kristallgitterpunkt. Dieses Eisen-Carbid wird in der Metallkunde auch Zementit genannt, und es kann schneller kristallisieren als Kohlenstoff alleine. Bei schnellem Abkühlen ergibt sich das **metastabile System: α -Eisen-Kristalle F_e (Ferrit) plus Eisen-Carbid-Kristalle (Zementit)**. Dies ist überwiegend bei weißem Roheisen für die Stahlerzeugung der Fall.

Das metastabile System ist das Schaubild von Eisen und Eisen-Carbid.

Metastabil:

Durch Verzögerungerscheinungen noch in einem Zustand befindlich, der den äußeren Bedingungen nicht mehr entspricht. Die Legierung Eisen-Kohlenstoff besitzt deswegen zwei Zustandsschaubilder mit unterschiedlichen Linienzügen für das stabile und das metastabile System.

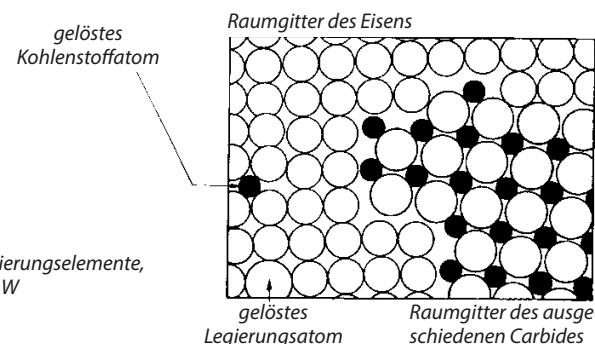


Abbildung 19: Verbindungsbildung

Somit kann festgestellt werden, dass bei einer Legierung zwischen dem reinen Eisen, dem Kohlenstoff und anderen Legierungselementen die gleichen Gitterumwandlungen auftreten, nur finden sie bei anderen Temperaturen statt. Für das wichtigste Legierungselement des Eisens, den Kohlenstoff, sollen folgende Gefügearten der Eisenwerkstoffe präzisiert werden. Der Kohlenstoff wirkt bereits in geringen Mengen stark auf die Eigenschaften des Eisens ein. Das flüssige Eisen kann eine bestimmte Menge Kohlenstoff in sich lösen. Das feste Eisen jedoch hat nur ein geringes Lösungsvermögen für den Kohlenstoff. Beim α -Eisen ist es fast gleich Null. Das Lösungsvermögen ist ebenfalls sehr stark von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig.

Beim **langsamen** Abkühlen ergibt sich das **stabile System: α -Eisen-Kristalle F_e (Ferrit) plus**

Für die Stahlseite betrachten wir im Folgenden nur das **metastabile System (Abbildung 20 und 21)**.

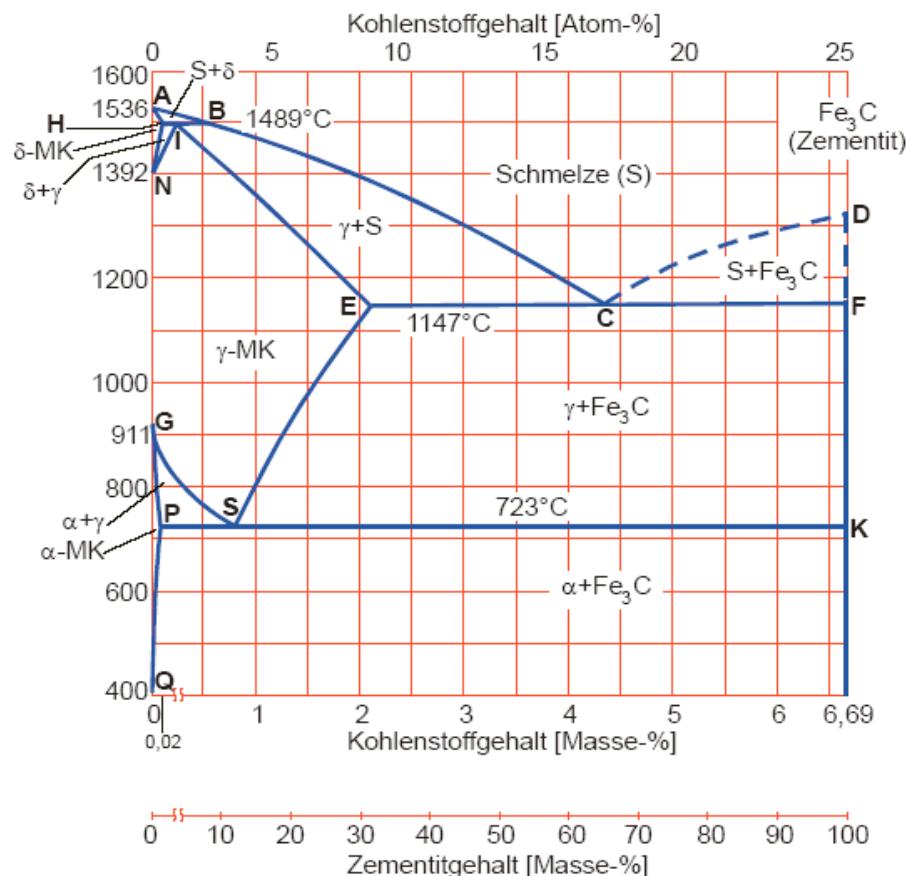


Abbildung 20: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD) und Gefügebereiche kohlenstoffhaltiger Stähle

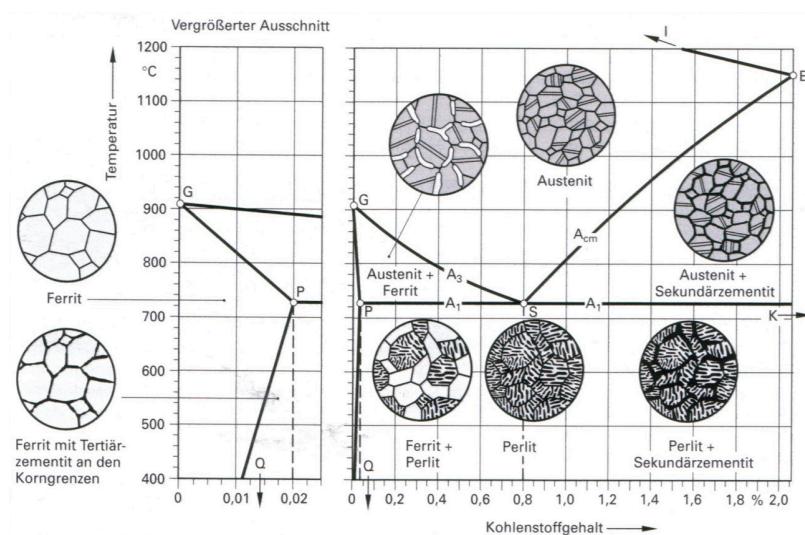


Abbildung 21: Schaubildausschnitt (Stahlecke) mit Gefügeumwandlungslinien

2.1 Gefügeausbildung – Begriffe

Wenn wir nun die Aussagefähigkeit des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms kennenlernen wollen, müssen zunächst einige Begriffe geklärt werden:

Oberhalb der G-S-E-Linie liegt das kfz-Gefüge mit der Bezeichnung Austenit (*Abbildung 22*). In diesem Gefüge ist der Kohlenstoff vollständig in Form von Einlagerungsmischkristallen im Eisen gelöst.

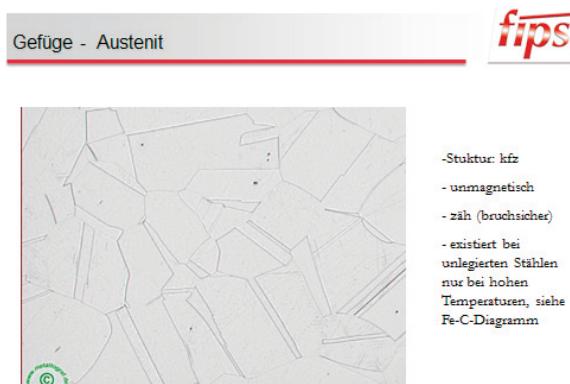


Abbildung 22: Austenitgefuge

Im Bereich der G-S-P-G-Linien findet bei der Abkühlung die Ferritausscheidung statt. Der restliche Austenitanteil zerfällt zu einem Gemisch aus Ferrit und Eisenkarbid. Die neuen Gefügeanteile werden Perlit genannt. Insgesamt gibt es unterhalb der Linie P-S die Gefügebezeichnung Ferrit und Perlit (*Abbildung 23*).

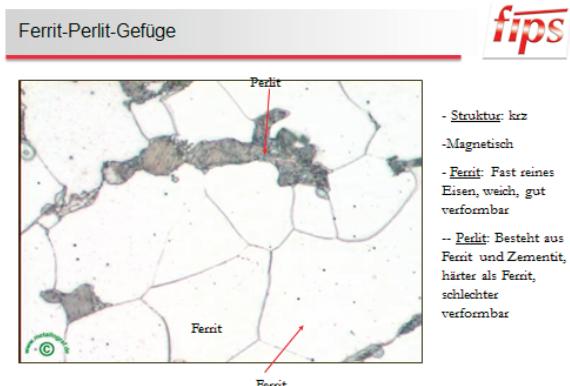


Abbildung 23: Ferrit – Perlit - Gefüge

Im Punkt S zerfällt der Austenit bei der Temperatur von 723°C und 0,8% Kohlenstoff vollständig zu Perlit. Diese Reaktion wird in Anlehnung an die Vorgänge beim Eutektikum eutektoid genannt.

Bei mehr als 0,8% Kohlenstoff entsteht aus dem Austenit zusätzlich zum Perlit noch ein sogenannter Sekundärzementit. Dieser Zementit entsteht ausschließlich an den Korngrenzen und wird daher auch meist Korngrenzenzementit genannt.

Je nach Kohlenstoffgehalt bezeichnet man die Stähle auch als unttereutektoid, eutektoid oder übereutektoid. Auf diese Einzelheiten werden wir im Folgenden an drei Beispielen näher eingehen.

Stahl C45

In *Abbildung 24 b* ist die Abkühlkurve eines unlegierten Stahls mit 0,45% Kohlenstoff dargestellt. Die Schmelze erstarzt zwischen 1.485°C und 1.440°C zu γ -Mischkristallen oder **Austenit** (*Abbildung 24 a*).

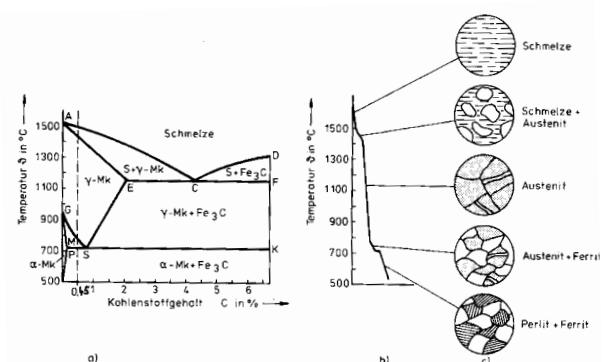


Abbildung 24: Stahl mit 0,45 % C

- Legierung im Eisen – Kohlenstoff – Zustandsschaubild
- Abkühlungskurve
- Gefügebildung (schematische Schliffbilder)

Bei weiterer Abkühlung können ab ca. 775°C diese γ -Mischkristalle nicht mehr bestehen. Da die Legierung relativ wenig Kohlenstoff enthält, scheiden sich in einem Übergangsbereich (zwischen 775°C und 723°C) zunächst kohlenstoffarme α -Mischkristalle (Ferrit) aus den γ -Mischkristallen ab. Die noch verbliebenen γ -Mischkristalle reichern sich mit freigewordenen Kohlenstoffatomen bis zu einem Gehalt von 0,8% an. In diesem Temperaturbereich liegen also **Ferrit** und **Austenit** nebeneinander vor. Mit dem Passieren der 723°C-Linie zerfallen auch die restlichen Austenitkristalle, welche die eutektoiden Zusammensetzung erreicht haben, zu **Perlit**. Damit sind die Umwandlungen im festen Zustand beendet. Unlegierte Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von bis zu 0,85% werden bei Raumtemperatur von einem Gefüge aus kohlenstoffarmem Ferrit und Perlit gebildet. In den Schliffbildern (Abbildung 25 a bis e) sieht man deutlich die sich dunkel abzeichnende perlitische Grundmasse. Der hellere Ferrit (Abbildung 25 a) ist arm an Kohlenstoff (0,04%), dagegen ist der dunklere Ferrit (Abbildung 25 e) mehr mit Kohlenstoff (0,6%) angereichert. Auf das vorliegende Gesamtgefüge bezogen beträgt der Kohlenstoffgehalt 0,45% (Abbildung 25 d und Abbildung 26).

Dieses Gefüge hat durch den Perlit eine ausreichende Festigkeit und ist durch das weiche Ferrit gut verformbar. Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,02% bis 0,8% heißen untereutektoidische Stähle und werden hauptsächlich als Baustähle verwendet.

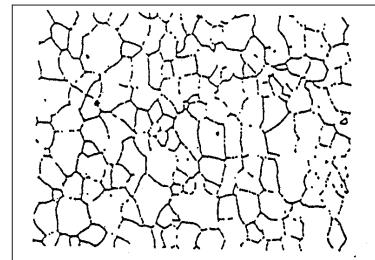


Abbildung 25 a: (Maßstab 200:1)
Ferrit, Fe + 0,04 % C

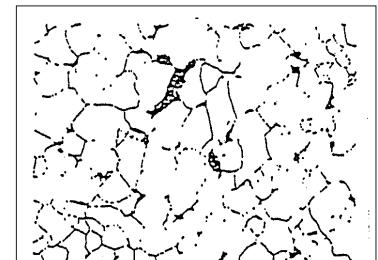


Abbildung 25 b: (Maßstab 200:1)
Ferrit (hell) und Perlit (dunkel),
Fe + 0,15 % C

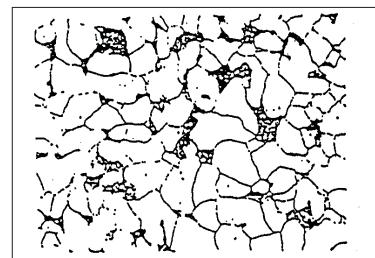


Abbildung 25 c:
Ferrit und Perlit, Fe + 0,25 % C

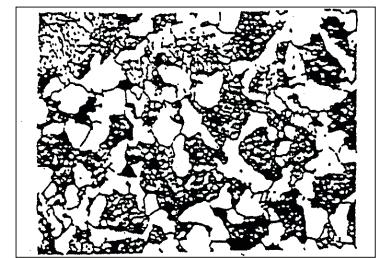
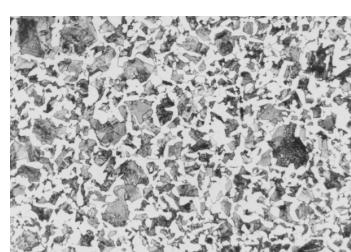


Abbildung 25 d: (Maßstab 200:1)
Ferrit und Perlit, Fe + 0,45 % C



Abbildung 25 e: (Maßstab 200:1)
Ferrit und Perlit, Fe + 0,60 % C



V = 200:1



V = 500:1

Abbildung 26: Gefüge nach langsamer Abkühlung: Stahl
mit 0,45 % C

Stahl C80

In der Abbildung 27 b ist die Abkühlungskurve eines unlegierten Stahls mit 0,8% Kohlenstoff¹⁾ dargestellt.

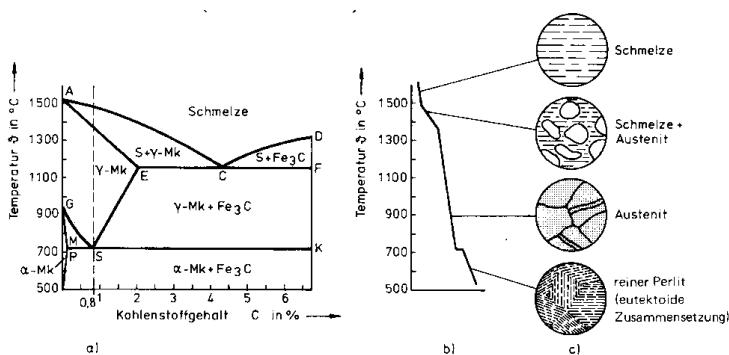


Abbildung 27: Eutektoider Stahl mit 0,8 % C

- a. Legierung im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild
- b. Abkühlungskurve
- c. Gefügebildung (schematische Schliffbilder)

Zwischen 1.470°C und 1.380°C erstarrt die Schmelze zu γ -Mischkristallen oder **Austenit**. Unterhalb der 723° C-Grenze können die γ -Mischkristalle aus Eisen- und Kohlenstoffatomen nicht mehr bestehen. Dabei klappt das kubisch-flächenzentrierte Gitter in das kubisch-raumzentrierte Gitter um. Da das Gitter des α -Eisens jedoch kleiner als das des γ -Eisens ist, müssen die zuvor eingelagerten Kohlenstoffatome das Gitter verlassen. Dabei reißen sie jeweils drei Eisenatome mit sich und bilden damit den **Zementit**, ein Gefüge aus Eisen- und Kohlenstoffatomen. Zementit besitzt eine komplizierte Struktur, die sehr hart und spröde ist. Der Zementit bildet mit dem übrigen nun kohlenstoffarmen α -Eisen das neue Gefüge des Stahls. Eine weitere Umwandlung findet nicht mehr statt. Das neu entstandene Gefüge nennt man **Perlit**, auch als Eutektoid oder eutektoider Stahl bezeichnet. Es handelt sich dabei um ein feines Gemisch aus 88% α -Eisenkristallen und 12% Zementitkristallen. Da beim Schleifen dieses

Gefüges eine wellige Oberfläche entsteht, die wie Perlmutt schimmert, erhält dieses Gefüge den Namen Perlit. Das Schliffbild (Abbildung 28) zeigt Perlit in 200-facher (*links*) und 500-facher (*rechts*) Vergrößerung. Der helle Untergrund ist Ferrit, die dunklen streifenförmigen Einlagerungen sind Zementit. Diese harten Einlagerungen des Zementits in das weiche Ferrit ergeben große Festigkeit bei ausreichender Dehnbarkeit.

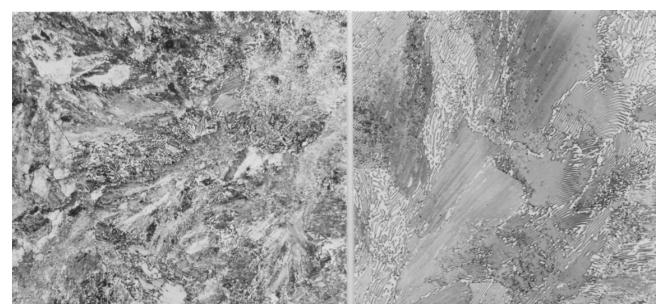


Abbildung 28: Stahl mit 0,80 % C
(Maßstab 200:1 links und 500:1 rechts)
Perlitz, Fe + 0,8 % C, Gefüge nach langsamer Abkühlung

Stahl C120

Übereutektoider Stahl mit 1,2% Kohlenstoffgehalt erstarrt zwischen 1.445°C und 1.270 °C zu γ -Mischkristallen oder Austenit. Die Abbildung 29b zeigt die entsprechende Abkühlungskurve eines C 120.

Mit absinkender Temperatur lässt die Aufnahmefähigkeit des Austenits für den reichlich vorhandenen Kohlenstoff nach. Ab etwa 880°C scheiden sich zunehmend Kohlenstoffatome ab, die mit den mitgerissenen Eisenatomen wiederum Zementitkristalle bilden. In diesem Temperaturbereich liegt unterhalb der Linie S-E neben Austenit auch Zementit vor. Mit dem Passieren der 723°C-Linie (P-S-K) haben die verbliebenen γ -Mischkristalle einen Kohlenstoffgehalt von nur noch 0,8%. Sie werden jetzt im eutektoiden Zerfall zu Perlit umgewandelt. Damit sind die Umwandlungen im festen Bereich abgeschlossen.

¹⁾Ein Kohlenstoffstahl C80 ist praktisch nicht im Handel. Es sei an den warmharteten Wälzgerüststahl 80MoCrV42-16 erinnert, der nach seiner chemischen Zusammensetzung 0,77 bis 0,85 % Kohlenstoff enthalten kann.

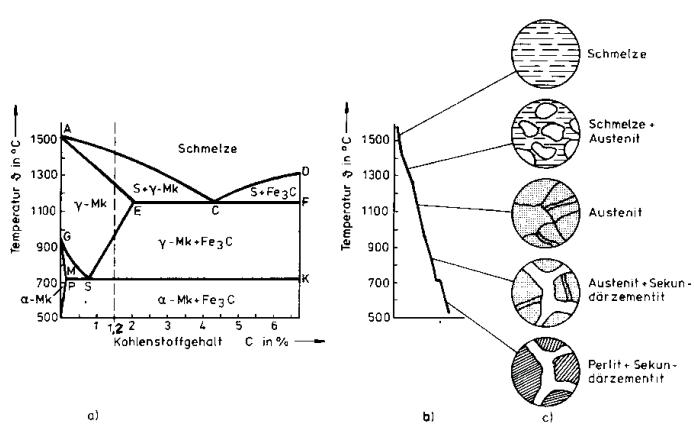


Abbildung 29: Stahl mit 1,2 % C

- a) Legierung im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild
- b) Abkühlungskurve
- c) Gefügebildung (schematische Schliffbilder)

Übereutektoidale Stähle mit mehr als 0,8% Kohlenstoffgehalt bestehen im abgekühlten Zustand aus einem Gefüge aus **Sekundärzementit** und **Perlit**. Betrachten wir das Gefüge einer perlitischen Grundmasse mit Sekundärzementit-Kristallen unter dem Mikroskop. (Abbildung 30).

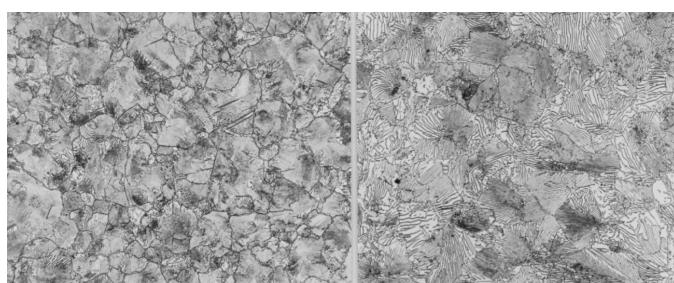


Abbildung 30: Stahl mit 1,20 % C (Maßstab 200:1 links und 500:1 rechts) Perlit (dunkel) und Sekundärzementit (hell), Fe + 1,2 % C, bei langsamer Abkühlung

Die dunkel hervortretenden Zementitkristalle verleihen dem Stahl eine große Verschleißfestigkeit. Sie vermindern jedoch seine Zähigkeit und Verformbarkeit. Übereutektoidale Stähle werden hauptsächlich als Werkzeugstähle eingesetzt.

2.2 Zusammenfassung

Fassen wir die bisherigen Inhalte dieser zwei Abschnitte des zweiten Kapitels noch einmal zusammen:

Nach der vollständigen Erstarrung der Schmelze ändert sich das Gefüge je nach Konzentration und Temperatur. Aus dem im Bereich der festen Lösung vorhandenen Austenit scheidet sich unterhalb der Umwandlungslinie G-S-E beim unterreutektoiden Stahl zunächst kohlenstoffarme Ferritkristalle aus. Es liegt Ferrit neben Austenit vor. Beim übereutektoiden Stahl dagegen bildet sich wegen des hohen Kohlenstoffanteils unterhalb der Linie S-E Sekundärzementit, der neben dem restlichen Austenit vorliegt. Unterhalb von 723°C kann der restliche Austenit nicht mehr bestehen. Er zerfällt zu Perlit. Bei Raumtemperatur besteht der unterreutektoiden Stahl aus einem Gefüge aus Ferrit und Perlit mit jeweils kubisch-raumzentrierten Gittern. **Sie werden vorwiegend als Bau- stähle und Vergütungsstäbe eingesetzt.** Beim eutektoiden Stahl mit 0,8% Kohlenstoffgehalt bildet sich bei 723°C direkt aus dem Austenit der Perlit. Beim übereutektoiden Stahl entsteht ein Gefüge aus Zementit und Perlit. **Diese kohlenstoffreichen Stähle werden aufgrund ihrer Härte als Werkzeugstähle verwendet.** Unterschiedlicher Kohlenstoffgehalt und die damit zusammenhängenden Gefügeänderungen bei den unlegierten Stählen haben großen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine langsame Abkühlgeschwindigkeit und ein geringer Anteil an Begleitelementen. Durch Weiterverarbeitung, wie verschiedene Wärmebehandlungen (siehe Modul Wärmebehandlung des Stahls) oder Legierungs-techniken, lassen sich die Werkstoffeigenschaften der einzelnen unlegierten Stähle weiter verändern und verbessern.

| Stahlsorte | C-Gehalt | Gefügezusammensetzung in abgekühltem Zustand | Werkstoff- eigenschaften |
|------------------------|------------------|---|--|
| eutektoider Stahl | (0,8 %) | (Perlit = α -Eisen und Zementit) | große Festigkeit bei ausreichender Dehnbarkeit |
| untereutektoider Stahl | 0,05 % bis 0,8 % | (Perlit und α -Eisen) | gute Dehnbarkeit bei geringer Festigkeit |
| übereutektoider Stahl | 0,8 % bis 2,06 % | (Zementit und Perlit) | hohe Verschleißfestigkeit bei geringer Dehnbarkeit |

Abgrenzung nach DIN EN 10020

In dieser Norm werden für die in Abbildung 31 ausgewiesenen chemischen Elemente Grenzgehalte angegeben, die die unlegierten von den legierten Stählen unterscheiden:

| Element | | Grenzwert Massenanteil in % | |
|--|-------------------------------|-----------------------------|--|
| Zeichen | Name | DIN EN 10020 | Schweißbare legierte Feinkornbaustähle ²⁾ |
| Al | Aluminium | 0,30 | |
| B | Bor | 0,0008 | |
| Bi | Bismuth (Wismuth) | 0,10 | |
| Co | Kobalt | 0,30 | |
| Cr | Crom | 0,30 | 0,50 |
| Cu | Kupfer | 0,40 | 0,50 |
| La | Lanthanide (einzeln gewertet) | 0,10 | |
| Mn | Mangan | 1,65 ²⁾ | 1,80 |
| Mo | Molybdän | 0,08 | 0,10 |
| Nb | Niob | 0,06 | 0,08 |
| Ni | Nickel | 0,30 | 0,50 |
| Pb | Blei | 0,40 | |
| Se | Selen | 0,10 | |
| Si | Silizium | 0,60 | |
| Te | Tellur | 0,10 | |
| Ti | Titan | 0,05 | 0,12 |
| V | Vanadium | 0,10 | 0,12 |
| W | Wolfram | 0,30 | |
| Zr | Zirkon | 0,05 | 0,12 |
| Sonstige (mit Ausnahme von C, P, S, N) jeweils | | 0,10 | |

Abbildung 31: Grenzen zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzenanalyse) nach DIN EN 10020 von 2000-07

3 Gefüge und Eigenschaften von Stahl

Eisen enthält – von Natur aus und bedingt durch den Gewinnungs- und Verarbeitungsprozess – eine Reihe von Zusatzelementen, die sehr unterschiedliche Wirkung bezüglich der Eigenschaften des Werkstoffes haben können. Außerdem ermöglicht es den Gefügeaufbau des Eisens, dass bestimmte Eigenschaften gezielt durch weitere Zusätze gefördert werden.

Begleitelemente

Dabei handelt es sich um Elemente, die sich im Eisenerz befinden können oder die bei der Verarbeitung von Eisenerz zum Stahl entstehen. Neben den nichtmetallischen Elementen wie S, P, N, O und H können Halbmetalle wie B, Sb und As in den Stahl gelangen sowie die NE-Metalle Cu, Sn, Pb, Cl, Ni und Mo.

Legierungselemente

Legierungselemente werden absichtlich dem Stahl hinzugefügt, um besonderen Eigenschaften zu erzielen. Stahl zeichnet sich gegenüber anderen Werkstoffen u. a. dadurch aus, dass seine Eigenschaften durch die gezielte Zugabe an Legierungselementen in weiten Bereichen veränderbar sind.

²⁾zum Beispiel Stähle nach EN 10025 Teil 3, 4 und 6
Falls für Mn nur ein Höchstwert festgelegt ist, ist der Grenzwert 1,80 %

3.1 Einfluss der Eisenbegleiter

Wie wir bereits erfahren konnten, nimmt das Eisen (Stahl) bei seiner Erschmelzung aufgrund seiner im flüssigen Zustand erhöhten Löslichkeit Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff auf. Diese Elemente können selbst bei sehr geringem Gehalt zu schwerwiegenden Versprödungserscheinungen führen, sie sind ebenso wie Phosphor und Schwefel für die meisten (aber nicht alle) Stähle als schädliche Begleitelemente anzusehen.

Unter dem Namen Eisenbegleiter fasst man all jene Stoffe zusammen, die bei der Herstellung des Werkstoffes Stahl meist unerwünscht sind und vom Eisen aufgenommen werden oder von Natur aus bereits im Eisen vorliegen. Es sind dies vor allem die Elemente:

- | | | |
|-------------------|----------------|-------------------|
| ► Kohlenstoff (C) | ► Phosphor (P) | ► Stickstoff (N) |
| ► Silizium (Si) | ► Schwefel (S) | ► Sauerstoff (O) |
| ► Mangan (Mn) | | ► Wasserstoff (H) |

Nichtmetallische Einschlüsse

Auffallend und von besonderer Bedeutung ist, dass neben Schwefel und Phosphor sich auch einige gasförmige Stoffe in der Schmelze befinden.

Sie bewirken z.T. markante Eigenschaftsveränderungen und werden oft auch als Verunreinigungen bezeichnet, wenngleich dieser Name mit seiner negativen Belegung nicht immer zutreffend ist. Manche Veränderungen sind erwünscht, sodass einige der Elemente absichtlich zugesetzt werden. Allerdings bezeichnet man sie dann als Legierungselemente, wie dies z.B. bei Silizium und Mangan der Fall ist.

Natürlich wird der Stahlhersteller versuchen, die unerwünschten Auswirkungen zu verhindern bzw. zu mindern, indem die verursachenden Eisenbegleiter auf bestimmte Höchstwerte begrenzt werden. Der Fachmann sagt dazu, den Stahl einstellen.

Im Folgenden sehen wir uns die Wirkung der einzelnen Eisenbegleiter einmal an.

Kohlenstoff

Dem Kohlenstoff soll an dieser Stelle ein nicht so großes Feld eingeräumt werden, da er bereits an anderer Stelle bzw. in allen TD's hinreichend besprochen wurde bzw. noch wird. Es wird an dieser Stelle daher nur ein kurzer Abriss gegeben.

Kohlenstoff ist in allen Stählen immer vorhanden und gilt als wichtigstes Begleitelement. Im Nichtrostenden Stahl ist er bei niedrigen Anteilen ein wichtiger Austenitbildner. C erhöht die Festigkeit im Stahl, muss jedoch bei austenitischen und ferritischen Stählen in geringen Bereichen gehalten werden, um die Korrosionsbeständigkeit nicht zu vermindern. In martensitischen Stählen erhöht er die Härtbarkeit sowie die maximale erreichbare Härte. Die Schweißbarkeit wird durch C negativ beeinflusst.

- C erniedrigt die Schmelztemperatur und die $\alpha\text{-}\gamma$ -Umwandlungstemperatur (G-S-Linie im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm).
- C erhöht die Zugfestigkeit und Streckgrenze, erniedrigt die Bruchdehnung und die Bruchhinschnürung.
- C ermöglicht das Abschrecken von Stahl.
- C erniedrigt Wärmeleitfähigkeit und spezifisches Gewicht.
- C verringert die Schweißbarkeit des Stahles durch Bildung von Härterissen.

Silizium

Silizium wirkt als Desoxidationsmittel und wird als solches z.T. absichtlich zugesetzt. Allerdings verbindet es sich auch mit anderen Oxiden zu harten und spröden Silikaten, die beim Auswalzen zerbrechen und in Zeilen zu einem Fasergefüge auseinandergesogen werden. Silizium mindert die Kaltformbarkeit, Schmiedbarkeit und Schweißbarkeit. Härte und Festigkeit werden durch Silizium erhöht, die Zähigkeit bleibt weitgehend unbeeinflusst (siehe auch *Silizium als „Legierungselement“ und „nichtmetallische Einschlüsse“*).

Mangan

Mangan wirkt ebenfalls als Desoxidationsmittel, bewirkt aber auch wieder eine Faserstruktur mit unterschiedlichen Festigkeitswerten in Längs- und Querrichtung. Es ist ein starker Abfall der Zähigkeit quer zur Walzrichtung feststellbar, denn die sich bildenden Oxide werden nicht zerbrochen, sondern gestreckt.

Besonders interessant ist Mangan durch seine Eigenschaft, Eisensulfide (FeS) in Mangansulfide (MnS) umzuwandeln und so die Ursache für den Rotbruch zu beseitigen. Damit wird die Warmverformung des Stahlwerkstoffes begünstigt. Allerdings bewirkt auch Mangansulfid wieder das angesprochene Fasergefüge und eine Zähigkeitsänderung. Bei Baustählen z.B. S355J2 bewirkt Mangan eine höhere Festigkeit und gute Schweißbarkeit. (siehe auch *Mangan als „Legierungselement“ und „nichtmetallische Einschlüsse“*) (siehe auch Abschnitt 3.3.9).

Phosphor

Phosphor gelangt im Wesentlichen über das Erz in das Roheisen. Er löst sich in der festen Eisenmatrix und verursacht eine Abnahme der Kerbschlagzähigkeit und eine Erhöhung der Übergangstemperatur in einem solchen Maße, dass generell, insbesondere aber im Hinblick auf rissfreies

Schweißen oder Härteten, möglichst niedrige Phosphorgehalte angestrebt werden. Außerdem trägt Phosphor zur Versprödung beim Anlassen bei. Die Zähigkeit wird allgemein herabgesetzt, und es können, besonders bei kleinen Kohlenstoffanteilen, Korngrenzbrüche auftreten. Positive Wirkungen sind eine geringe Erhöhung der Rostbeständigkeit und der Verschleißfestigkeit.

Der Höchstgehalt an Phosphor beträgt in Baustählen nach DIN EN 10025 0,05%, sowie in Qualitäts- und Edelstählen nach DIN EN 10083 nur 0,035% (Schmelzanalyse). Nur in wenigen Fällen sind höhere Phosphorgehalte erwünscht, wie z.B. bei Automatenstählen. Bei diesen mittleren Gehalten ist zu beachten, dass Phosphor stark zum Seigern neigt und örtliche Konzentrationen, vor allem an Korngrenzen, deutlich über den genannten Werten liegen können. Nur durch sehr teure Glühzeiten (Diffusionsglühen) können diese Konzentrationsunterschiede beseitigt werden.

Dass der chemische Reinheitsgrad auch für den Gefügereinheitsgrad (z.B. durch Seigerungen) verantwortlich ist, sei am Rande erwähnt.

Schwefel

Bei hohen Temperaturen ist Schwefel chemisch an das Eisen gebunden. Es liegt in Form von FeS als Sulfidschlacke vor und lagert sich beim Abkühlen an den Korngrenzen ab. Durch Seigerung kann sich Schwefel auch bei geringem Gesamtgehalt sammeln. Beim Schmieden kann es zu Heißbruch führen und bei einer Temperatur von 900° C zu Rotbruch. Folglich muss der Schwefelgehalt auf unkritische Werte abgesenkt werden. Automatenstähle benötigen aber Schwefel wegen des kurzbrüchigen Spans. Man gibt Mangan in die Schmelze, das nunmehr Mangansulfid (MnS) bildet. Dieses Mangansulfid hat den entscheidenden Vorteil, bei etwa 1500°C zu ersticken, sich

also schon in der Schmelze zu bilden. Das Mangansulfid verteilt sich gleichmäßig in der Schmelze. Es kommt dadurch nicht zum Rotbruch. Andererseits lassen sich die MnS-Einschlüsse beim Walzen (Warmumformung) so gut strecken, dass der Stahl dadurch querempfindlich wird: Die Kerbschlag- und Bruchdehnungswerte quer zur Verformungsrichtung liegen wesentlich unter den Längswerten. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig. In Verformungsrichtung bleiben sie praktisch unverändert, in Quer- und Normalrichtung zur Verformung können jedoch die Festigkeits- und Zähigkeitswerte stark abnehmen. Gegen die durch MnS-Zeilen hervorgerufene Anisotropie hilft entweder eine weitergehende Entschwefelung oder die Verwendung anderer S-affiner Elemente, die im Unterschied zu Mangan harte, nichtplastische Sulfide ausbilden. Hierfür kommen Zirkonium oder Cer in Betracht.

Bei den allgemeinen Baustählen nach DIN EN 10025 werden Schwefelgehalte bis 0,05%, bei Edelstählen bis 0,035% zugelassen. Da Schwefel in Stahl von allen Begleit- und Legierungselementen am stärksten seigert, ist für eine im ganzen Querschnitt sichere Schwefelabbindung ein beträchtlicher Mn-Überschuss erforderlich. Abschließend soll aber auch der günstige Einfluss eines gewissen Anteils an Mn-Sulfid im Gefüge von Stählen auf deren Zerspanungseigenschaften hervorgehoben werden.

Auswirkungen vom Gasen auf die Stahleigenschaften

Die gasförmigen Begleitelemente

- ▶ Sauerstoff
- ▶ Stickstoff und
- ▶ Wasserstoff

gelangen aus der Luft und aus feuchten bzw. oxidierten Einsatzstoffen in die Stahlschmelze

und werden in dieser gelöst. Bei der Kristallisation nimmt ihre Löslichkeit beträchtlich ab. Die dadurch frei werdenden Gase entweichen oder reagieren mit anderen Elementen, wobei gasförmige, flüssige oder feste Reaktionsprodukte entstehen. Diese entweichen ebenfalls oder gehen in die Schlacke, geringe Reste werden jedoch von der erstarrenden Schmelze eingeschlossen. Während der Abkühlung des festen Metalls nimmt dessen Löslichkeit für Gase in der Regel weiter ab, so dass weitere Gasatome aus dem Metallgitter austreten und über die Oberfläche entweichen oder weitere Verbindungen bilden oder sich an Korngrenzen, Einschlüssen oder Mikrolunkern zu Gasmolekülen vereinigen. Im Folgenden werden einige wesentliche Erscheinungen, die durch Gase verursacht werden, betrachtet.

Sauerstoff

Durch das Frischen kommt Sauerstoff in den Stahl; es bildet sich FeO (Eisenoxid). Je niedriger der Kohlenstoffanteil gefrischt wird, umso höher liegt der Sauerstoffanteil. Er wirkt schon bei niedrigen Gehalten stark versprödend und muss daher entfernt werden.

Die Löslichkeit von Sauerstoff in geschmolzenem reinem Eisen beträgt etwa 0,2%, sie nimmt während der Erstarrung auf etwa 0,005% ab. Der somit freiwerdende Sauerstoff reagiert jetzt, wenn andere Elemente mit einer größeren Sauerstoffaffinität nicht da sind mit Eisen zu FeO (Eisenoxid).

Eisen, Eisenoxid (FeO) und insbesondere das in geringen Mengen immer vorhandene Eisensulfid (FeS) schwächt den Zusammenhalt der Körner, so dass der Stahl bei einer Warmverformung, besonders im Temperaturbereich zwischen 800°C und 1000°C (heller Rotglut) in seinen Korngrenzen aufreißt und bricht (Rotbruch).

Oberhalb 1.000°C ist ein vorsichtiges Schmieden und Walzen möglich, aber oberhalb 1.200 °C

kommt erneut Brüchigkeit beim Verformen vor (Heißbruch). Rot- und Heißbruch tritt bei einigen sehr kohlenstoffarmen Stählen mit sehr niedrigen Gehalten an Begleitelementen auf, was bei der Weiterverarbeitung (Warmumformung) zu berücksichtigen ist. Auch beim Schweißen können die Korngrenzen in den Bereichen, die den oben genannten Temperaturen ausgesetzt sind, so geschwächt sein, dass sie unter dem Einwirken von Schrumpfspannungen beiderseits der Schweißnaht aufreißen (Schweißrissigkeit).

Man gibt deshalb hochschmelzende Metalle (Al, Si, Mn) mit hoher Sauerstoff-Affinität in die Schmelze. Diese Elemente nennen wir, wie bereits erwähnt, Desoxidationsmittel. Der Sauerstoff soll durch diese Mittel gebunden und als Schlacke abgeführt werden.

Je nach Art der Oxide und der Abscheidebedingungen wird ein gewisser Anteil der Desoxidationsprodukte als nichtmetallische Einschlüsse zurückbleiben. Eine Entgasung mittels Vakuumbehandlung, bei der ja keine festen Reaktionsprodukte entstehen, führt demnach zu einflussärmeren, reineren Gefügen.

Stickstoff

Stickstoff ist ein sehr unangenehmer Eisenbegleiter. Stickstoff verursacht bei C-Gehalten $\leq 0,01\%$, die als Alterung bezeichnete Versprödung von Stahl. Da im Fall eines Sprödbruchs die frische Bruchfläche bei dieser Temperatur blau anläuft, wird die Versprödung bei 300°C auch als Blausprödigkeit bezeichnet.

Die durch Stickstoff verursachte Sprödbruchanfälligkeit von Stahl kann durch Abbinden des Stickstoffes mit einem entsprechend affinen Zussatz unterbunden werden. Es eignen sich hierfür insbesondere Aluminium, Titan und Niob. Diese Maßnahme führt nicht nur zu einem Verschwin-

den der Alterungsanfälligkeit, sondern erzeugt auch sehr feine Ausscheidung, beispielsweise von Aluminiumnitrid AlN, die das Wachstum von Austenitkörnern hemmen und so eine feinkörnige Gefügeausbildung bewirken. Dies zieht eine niedrigere Übergangstemperatur, also eine verbesserte Zähigkeit nach sich.

Im Vakuum tritt eine Absenkung des Stickstoffgehaltes nur geringfügig ein, da die Stickstoffatome zu träge diffundieren. Er kann schon bei einem Gehalt von wenigen hundertstel Prozent den Stahl verspröden. Nach einer Kaltumformung stickstoffhaltigen Stahls tritt die gefährliche Reckalterung auf, d.h. die im α -Gitter gelösten Stickstoffatome scheiden sich aus (Diffusion) und lagern sich an den Störstellen und Korngrenzen des Gitters ab. Die Gleitebenen werden blockiert, der Stahl versprödet und altert. Eine höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit (*siehe das spätere Modul: Werkstoffprüfung*) sowie eine Verringerung der Bruchdehnung und der Kerbschlagzähigkeit sind die Folgen (*Abbildung 32*). Die Auswirkungen des Stickstoffs auf die Eigenschaften kohlenstoffreicher Stähle werden vor allem bei niedrigen Temperaturen sichtbar. Er verursacht im Verein mit dem Kohlenstoff die Abschreckalterung und die Reckalterung die nach Kaltverformung zu beobachten ist.

Die Reckalterung (Verformungsalterung) erfolgt bei Temperaturen zwischen 200°C und 300°C sofort, bei Raumtemperatur eventuell erst nach Wochen, Monaten oder gar Jahren. Sie lässt sich z.T. durch Desoxidieren mit Aluminium, Titan oder Niob unterdrücken (alterungsbeständiger Stahl) oder durch Rekristallisationsglühen. Grundsätzlich kann die Alterung nicht vollständig verhindert werden, da die Beseitigung des Stickstoffs aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht vertretbar ist (*siehe auch Abschnitt: Alterung*). Elektro- und LD-Stähle altern (fast) nicht, da produktionsbedingt weniger Stickstoff im Stahl

enthalten ist. Der Stickstoffgehalt ist daher ein guter Beurteilungsmaßstab für die Stahlqualität. In den Baustählen nach DIN EN 10025 beträgt der maximale Stickstoffgehalt nur 0,012% (Schmelzanalyse). Die Verformungsalterung bewirkt einen außerordentlichen Zähigkeitsverlust und entsteht nur an kaltverformten Stählen.

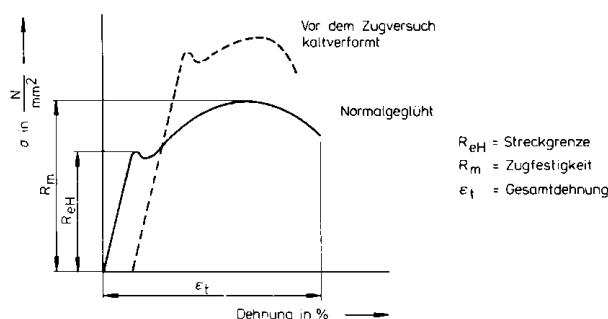


Abbildung 32: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Stahles vor und nach der Kaltverformung

In den vorliegenden Ausführungen in diesem Modul über den Einfluss von Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff auf die Stahleigenschaften wurde hauptsächlich von den durch den Schmelzprozess eingebrachten Gasmengen ausgegangen. Bei den Betrachtungen über die Auswirkungen des Wasserstoffes im Modul „Korrosion – Oberfläche“ werden auch die Fälle berücksichtigt, in denen Wasserstoffe über die Oberfläche in den Werkstoff gelangt, z.B. beim Glühen, beim Beizen oder beim galvanischen Abscheiden von Metallüberzügen. Die Vorgänge, die sich im Stahl abspielen, sind in allen Fällen im Prinzip ähnlich, unabhängig davon, wie der Wasserstoff in den Stahl gelangt ist. Die Erscheinungsformen können sich allerdings erheblich unterscheiden.

Überschüssiger Wasserstoff kann in Stahl zu spezifischen Rissbildungen und damit zu schwerwiegenden Schädigungen führen. Der schädliche Einfluss kann in zwei sehr unterschiedlichen Erscheinungen zutage treten.

Wasserstoff

Wasserstoff kommt durch feuchtes Beschicken und durch Verbrennungsgase in den Stahl. Wasserstoff besitzt eine sehr große Löslichkeit im Eisen. Wegen seiner geringen Größe bilden sich Einlagerungsmischkristalle, die den Werkstoff ebenfalls verspröden (ohne wesentliche Abnahme der Festigkeit). Gasmoleküle – wie der Wasserstoff – müssen vor ihrer Lösung sowohl in einer Metallschmelze als auch im Metallgitter zu Atomen dissoziieren. Eine derartige Dissoziation von H₂-Molekülen findet an Eisen unterhalb von 300°C praktisch nicht mehr statt. Hingegen ist eine Wasserstoffsaufnahme auch bei niedrigeren Temperaturen noch möglich, wenn sich der Wasserstoff an der Eisenoberfläche in Folge einer chemischen oder elektrochemischen Reaktion, also atomar entwickelt. Dies ist der Fall beim *Säurebeizen*, bei *Wasserstoffkorrosion*, bei *kathodischem Reinigen* oder *galvanischem Beschichten*.

Zum Einen in Form so genannter Flockenrisse in meist großen Schmiedeteilen vor allem aus niedriglegierten CrNi- oder CrMn-haltigen Stählen, zum Anderen in hochfesten Stählen als so genannte *Wasserstoffversprödung* oder besser *H-induzierte Rissbildung*.

Unter Flocken versteht man runde innere Mikrorissbildung von schneeflockenähnlichem Aussehen, die sich in einem H-haltigen warmverformten Teil beim Abkühlen im Temperaturbereich um 200°C abspielen.

Beim Abkühlen bilden sich Risse (Flockenrisse), welche die Kerbschlagarbeit verringern. Dabei sind kohlenstoffarme Stähle viel unempfindlicher als harte Stähle (Grenze bei ca. 0,2% Kohlenstoff). Beide Ursachen haben eine Senkung der Bruchdehnung und Zähigkeit und damit vorzeitigen

Bruch des Materials zur Folge (Wasserstoffversprödung). Der tritt verstärkt bei großen Formaten auf, z.B. bei Schmiedeblöcken. Abhilfe ist außer durch ein langwieriges Glühen nur durch eine Vakuumbehandlung möglich.

Anfällig für Flockenrisse sind Chrom-, Nickel- und Manganstähle. Sie müssen langsam abkühlen, damit der Wasserstoff ausdiffundieren kann. Aufgrund des kleinen Teilchendurchmessers des Wasserstoffs ist bereits bei Raumtemperatur eine sehr hohe Diffusionsgeschwindigkeit möglich. Der Wasserstoff kann deshalb atomar auch von außen in das Gefüge eindringen (z.B. beim Beizen, d.h. bei der Rostentfernung mit Säuren). Gegenmaßnahmen sind Vakumentgasen oder mäßiges Erwärmen auf 200°C bis 300°C (Ausdiffundieren des Wasserstoffs).

Nichtmetallische Einschlüsse

Bei den in einem Stahlgefüge vorhandenen nichtmetallischen Einschlüssen oder Schlacken handelt es sich in erster Linie um die nicht mehr zur Abscheidung aus der Schmelze gelangten Desoxidations- und Entschwefelungsprodukte des Siliciums, Mangans und Aluminiums. Es sind also oxidische (SiO_2 , MnO , Al_2O_3), sulfidische (MnS) und silicatische ($\text{MO}\cdot\text{SiO}_2$, MO = Metalloxid) Verbindungen. Außerdem können solche Einschlüsse auch aus der metallurgischen Schlacke stammen und beim Röhren oder Abgießen in die Schmelze gelangt sein.

Alle technischen Stähle enthalten somit nichtmetallische Verunreinigungen. Sie bilden Einschlüsse, die sich auf die Werkstoffeigenschaften meist ungünstig auswirken.

Nur bei den Automatenstählen ist ein erhöhter Einschließgehalt zur Verbesserung der Zerspanbarkeit erwünscht.

Der Einfluss solcher in der Schmelze unlöslicher Einschlüsse auf die Stahleigenschaften hängt von deren Art und Menge, insbesondere aber auch von ihrer Teilchengröße, -form und -anordnung ab. So kann das harte Al_2O_3 (Tonerde) in größerer Menge einen erheblichen Werkzeugverschleiß bei der zerspanenden Weiterverarbeitung nach sich ziehen. Im Fall stark gerichteter Warmverformung ordnen sich die Einschlüsse, allen voran das plastische Mn-Sulfid, zeilig an. Dieses Zeilengefüge wird häufig auch als Faser (Walz- und Schmiedefaser) bezeichnet. Die zeilige Anordnung wirkt sich hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit in Zeilen- bzw. Verformungsrichtung kaum, quer und vor allem senkrecht dazu jedoch je nach Ausprägung mindernd bis katastrophal aus. Gröbere Einschlüsse können bei dynamischer Beanspruchung besonders in hochfesten Gefügen zur Rissbildung führen. Schließlich wird die Polierbarkeit eines Stahls, die beispielsweise bei der Herstellung bestimmter Formwerkzeuge wichtig ist, entscheidend von seinem Gehalt an Einschlüssen bestimmt. Es ist einsichtig, dass solche Einschlüsse je nach Menge und Größe die Qualität einer polierten Oberfläche beeinträchtigen würden.

Die für Nichtmetallische Einschlüsse getroffenen Aussagen gelten weitgehend auch für „echte Gefügeeinschlüsse“, also z.B. carbidische Partikel. Dennoch besteht ein entscheidender Unterschied. Die Carbidteilchen sind in der Regel im austenitischen Matrixgefüge und dann auch bei der Warmverformung gelöst, werden folglich auch nicht zu Zeilen gestreckt. Vielmehr werden sie meist durch Wärmebehandlungen in eine für die angestrebten Eigenschaften günstige Form und Verteilung gebracht.

3.2 Legierungsbildung – Einfluss und Bedeutung der wichtigsten Legierungselemente im Stahl

Die mit Abstand bedeutendste metallische Werkstoffgruppe ist Stahl. Mit über 2000 Stahlsorten bietet diese Werkstoffgruppe ein sehr vielschichtiges Einsatzgebiet mit einer Vielzahl von Eigenschaftskombinationen an.

Die Werkstoffeigenschaften können mit Hilfe Thermomechanischer Verfahren, Umformvorgänge oder über das Legieren in den Werkstoff eingebracht werden.

Die verschiedenen Stahlsorten sind also Produkte, deren Eigenschaften durch eine ganze Palette von Legierungselementen bestimmt werden.

Metalle, wie Eisen oder Aluminium werden nur selten in reiner Form als Werkstoffe verwendet. Vielmehr werden die Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit oder die Spanbarkeit durch die Zugabe eines oder mehrere metallische oder nichtmetallische Elemente gezielt verändert.

Je nach Anwendungsfall wird der Stahl also in die wünschenswerte Richtung verändert.

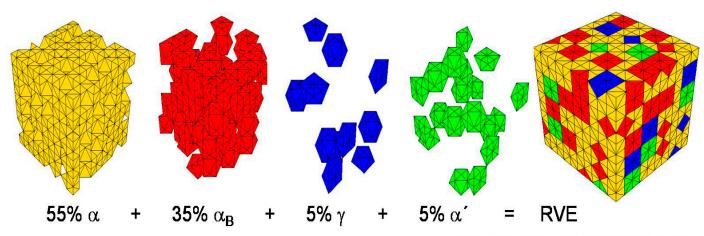
Eigenschaftsänderungen bei Eisenwerkstoffen werden beim Legieren u.a. mit Fremdatomen erreicht, indem man die vorgesehenen Legierungselemente in geeigneter Menge der Stahlschmelze zusetzt. Notwendig wird dies, wenn der Stahl im Einsatz erhöhten Beanspruchungen ausgesetzt werden soll (Korrosion; Hitze; Kälte; besonderen mechanischen, elektrischen Beanspruchungen usw.). Allerdings müssen bestimmte Eigenschaften in vielen Fällen auf Kosten anderer verbessert

werden, weshalb oft erst die Kombination verschiedener Legierungselemente zum gewünschten Werkstoff führt.

Legierung

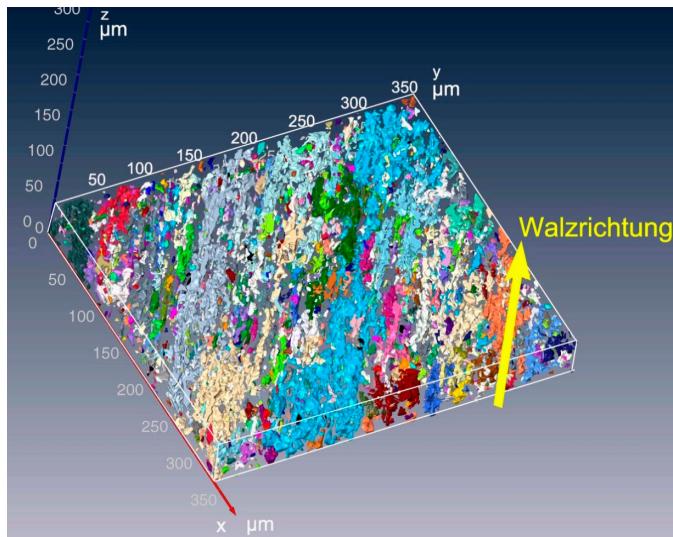
ist ein durch Zusammenschmelzen von zwei oder mehreren Elementen (auch Nichtmetallen wie Kohlenstoff, Silizium u.a.) gewonnenes Gemisch. Das Hinzulegieren soll die Eigenschaften des Grundwerkstoffes, wie in unserem Fall Stahl, in einer bestimmten und gewünschten Weise beeinflussen. Bei der Stahlherstellung werden Legierungselemente in Form von Ferrolegierungen, Legierungsmetallen oder auch legiertem Schrott zugefügt, um die verlangte chemische Zusammensetzung des Stahls und damit bestimmte Eigenschaften zu erreichen.

Die Abbildungen 33 und 34 sollen dies verdeutlichen. So zeigt die Abbildung 33 einen grundsätzlichen Gefügeaufbau aus Ferrit, Perlit und Austenit sowie noch andere Anteile, die nach dem Walzen sich räumlich vernetzen (Abbildung 34).



Prahl et al.: Comp. Mat. Sci. 39 (2007) 1, 7-22.

Abbildung 33 zeigt einen grundsätzlichen Gefügeaufbau



Quelle: Universität des Saarlandes

Abbildung 34: Die 3-D-Grafik zeigt, wie die 2. Phase des Dualphasenstahls eine eigene, plattenähnliche Struktur gebildet hat. Deren räumliche Vernetzung kann man in Walzrichtung durch den Stahl genau verfolgen.

Bei rost-, säure- und hitzebeständigen Stählen z.B. beträgt der Anteil an hochwertigen Legierungszusätzen bis zu 30% und darüber. Die Legierungsanteile müssen oft auf ein hundertstel Prozent – selbst bei Schmelzen bis zu mehreren Tonnen – eingehalten werden, um die gewünschte Qualität zu erreichen.

Allgemeine Wirkung der Legierungselemente in den Stählen

Die gezielte Zugabe von Elementen wird als Legieren bezeichnet. Die Herstellung von Stahllegierungen erfolgt immer im Schmelzzustand. Die an der Legierungsbildung beteiligten und gezielt eingesetzten Elemente werden als Komponenten bezeichnet. Ungewollt an der Legierung beteiligte Elemente, die z. B. durch den Herstellungsprozess in den Werkstoff gelangt sind, werden Begleitelemente genannt. So kön-

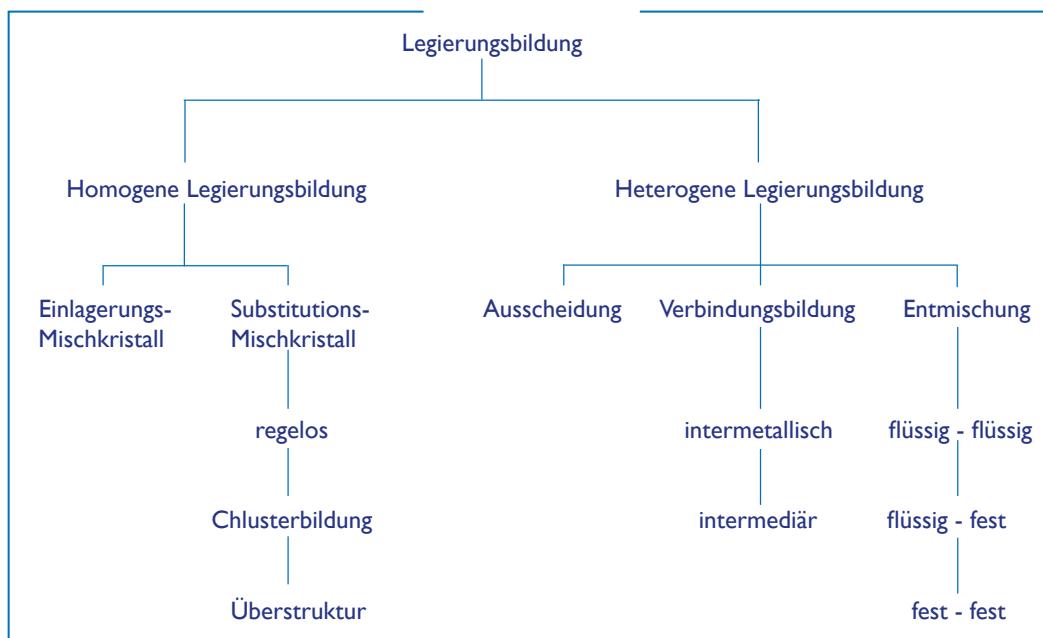
nen beispielsweise Kupfer oder Schwefel Begleit- oder auch Legierungselement sein.

Wirtschaftlichkeit, Oxidationsempfindlichkeit, Herstellbarkeit oder die Höhe des Schmelzpunktes sind Gründe dafür, dass keine reinen Metallzusätze als Legierungskomponenten verwendet werden, sondern vielmehr sogenannte Vorlegierungen, bei denen der Legierungszusatz an das Basismetall gebunden ist. Man spricht dann von Ferrolegierungen, wie zum Beispiel Ferromangan, Ferrochrom oder Ferrotitan, die aus eisenreichen Erzen gewonnen werden. Bei der Gewinnung erspart man sich die aufwändige metallurgische Abtrennung der Eisenkomponenten.

Um eine Legierung zu bilden, seien nachfolgend einige Parameter erwähnt:

- ▶ **Gittertyp des Basismetalls und des Legierungselements**
- ▶ **Größe des Legierungsatoms im Verhältnis zum „Wirtsatom“**
- ▶ **Sauerstoffaffinität des Legierungsmetalls**
- ▶ **Valenzelektronen**
- ▶ **Temperatur und**
- ▶ **Druck**

Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt einen Modus zur Einteilung von Legierungen, die an dieser Stelle nur der Übersicht dient. Im weiteren Verlauf dieser Dokumentation wird bis auf nachfolgenden Abschnitt nicht weiter auf die Legierungssysteme eingegangen.

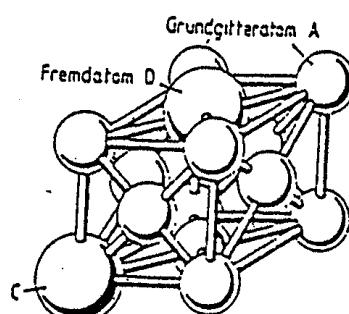


Einteilung der Legierungen³

Ursache der Eigenschaftsveränderungen ist also oft das Lösen der Fremdatome im Ferritgitter (Mischkristallbildung). Dabei wird das Gitter verspannt. Legierungselemente erzeugen deshalb in den meisten Fällen einen größeren Widerstand gegen eine Formänderung, was sich in einer Erhöhung der Festigkeit, der Streckgrenze und der Härte äußert.

In einigen Stählen bilden die Legierungselemente sogenannte Substitutionsmischkristalle. Dies heißt, dass sich das Fremdatom (Legierungselement) auf den Gitterplatz setzt (substituiert), der dem Atom des Grundgefüges vorbehalten ist (Abbildung 36).

Abbildung 36: Substitution Mischkristall, die Fremdatome C, D ersetzen (substituieren) Atome des Grundgitters A



Charakteristisch für die Legierungselemente ist ferner das Verschieben der Umwandlungslinien sowohl im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild als auch in den Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern (siehe auch TD Wärmebehandlung der Stähle). So verschieben z.B. die Elemente

- ▶ Mangan
- ▶ Silizium
- ▶ Chrom
- ▶ Wolfram
- ▶ Nickel
- ▶ Molybdän

die Punkte S und E im Eisen-Kohlenstoff-Zustands-schaubild nach links (zu kleineren C-Gehalten hin (Abbildung 37)).

Aber auch die Punkte S und E und damit die verbundenen Umwandlungslinien werden bei bestimmten Legierungselementen verschoben,

³Bleck Wolfgang (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis;
Inst. für Eisenhüttenkunde, RWTH, Aachen

so dass sich nun auch die Austenit- und Ferrit-Gebiete verschieben. Dies bedeutet, dass sich durch geeignete Legierungselemente bei **Raumtemperatur** ferritisches und austenitisches Stahl herstellen lassen (siehe das spätere Modul „Nichtrostende Stähle“).

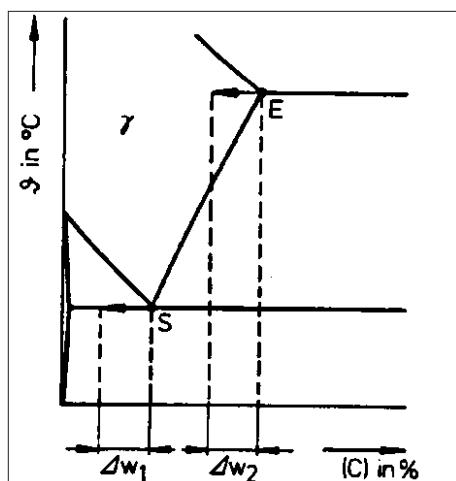


Abbildung 37: Verschiebung der Punkte S und E im EKD durch Legierungselemente im Stahl

Besondere Eigenschaften der **austenitischen Stähle** (bei Raumtemperatur) sind:

- ▶ sehr gute Verformbarkeit und Zähigkeit, auch bei tiefen Temperaturen,
- ▶ niedrige Streckgrenze bei höherer Zugfestigkeit,
- ▶ starke Kaltverfestigung,
- ▶ gute Korrosionsbeständigkeit,
- ▶ unmagnetisches Verhalten.

Härten und Magnetisieren ist nicht möglich, da die austenitischen Stähle umwandlungsfrei sind. Sie finden ihren Einsatz besonders dort, wo Schlagbeanspruchungen und starke örtliche Druckbeanspruchungen aufgenommen werden müssen und gute Umformbarkeit (Schmiedbarkeit) gewünscht wird.

Besondere Eigenschaften der **ferritischen Stähle** (bei Raumtemperatur) sind:

- ▶ etwas geringere Verformbarkeit,
- ▶ Warmfestigkeit und Hitzebeständigkeit (Zunderfestigkeit),
- ▶ geringe Kaltverformbarkeit (Kaltsprödigkeit),
- ▶ gute Korrosionsbeständigkeit,
- ▶ gute magnetische Eigenschaften.

Härten und Normalisieren ist nicht möglich, da diese Stähle ebenfalls umwandlungsfrei sind. Ihren Einsatz finden sie besonders in der Elektrotechnik (Transformatorenwerkstoffe), aber wegen ihrer Zunderbeständigkeit auch im Kessel- und Ofenbau.

Legierungselemente können den Austenitbereich im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ausweiten oder einschnüren und ermöglichen so die Erzeugung von Stählen, deren austenitisches oder ferritisches Gefüge bei Raumtemperatur beständig ist.

Der Einfluss einzelner Begleit- und Legierungselemente auf die Eigenschaften der Stähle ist äußerst vielschichtig und diffizil; daher ist keine einfache Zuordnung möglich. Dennoch wird in Abbildung 38 die generelle Wirkung einzelner Elemente auf die wichtigsten Stahleigenschaften dargestellt.

| Element | Al | C | Co | Cr | Cu | Mn | Mo | Ni | S | Si | Ti | V | W |
|-------------------------|----|---|----|----|----|----|----|----|---|----|----|---|---|
| Eigenschaft | | | | | | | | | | | | | |
| Festigkeit | | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Härte | | + | + | + | + | + | + | | | + | | + | + |
| Streckgrenze | | | | | + | + | | + | | + | | + | |
| Zähigkeit | + | | - | | | + | | + | - | | + | | |
| Verschleißfestigkeit | | | + | | | + | | | | + | | | + |
| Warmfestigkeit | | + | + | + | - | | + | + | - | | | + | + |
| Warmformbarkeit | - | | | | | | | | | | | - | |
| Schweißbarkeit | - | | - | | + | + | | | - | - | | | |
| Zerspanbarkeit | - | | - | | - | | - | + | | | | - | |
| Schmiedbarkeit | - | | | | + | - | | | - | - | | | |
| Kaltformbarkeit | - | | | | - | | | | | | | - | |
| Schneidfähigkeit | - | | + | + | | | + | | | | | + | + |
| Einhärttiefe | | | - | + | | + | + | + | | + | | - | + |
| Korrosionsbeständigkeit | | | | + | + | + | + | + | | + | + | + | |
| Nitridbildung | + | | | + | | | | | | | + | + | |
| Karbidbildung | | | | + | + | | + | | | | + | + | + |

Abbildung 38: Mögliche Wirkungen von Legierungselementen in Eisen auf einige ausgewählte Eigenschaften
(+ = Verbesserung, - = Beeinträchtigung)

3.3 Wirkung der NE-Metall-Legierungselemente

Im Folgenden geht es um eine steckbriefliche Betrachtung der wichtigsten Legierungselemente und deren Wirkung auf die Stahleigenschaften.

Abbildung 39 stellt, etwas detaillierter, den Zusammenhang zwischen chemischen Elementen, im oder am Werkstoff wirkende Mechanismen und den resultierenden Stahleigenschaften her: So hängt die Martensitbildung im Stahl vorwiegend vom C-Gehalt ab, das Passivierungsvermögen nichtrostender Stähle vom Cr- und Mo-Gehalt ab usw.

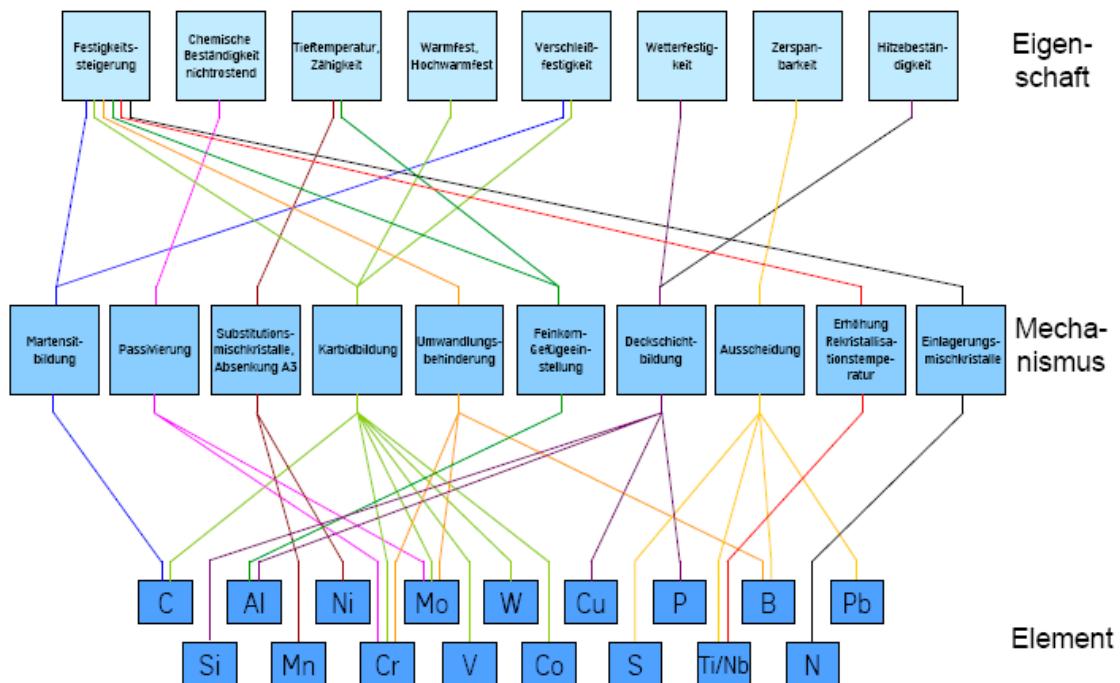


Abbildung 39: Abhängigkeit der Stahleigenschaften von Mechanismen und Elementen

3.3.1 Aluminium (Al)

Das erstmalig 1827 von dem deutschen Chemiker Friedrich Wöhler hergestellte Leichtmetall (Schmelzpunkt ca. 660°C) mit guter elektrischer und Wärmeleitfähigkeit kommt zu etwa 7,6% in der Erdrinde vor. Hauptausgangsstoff ist Bauxit und das Hauptförderland ist Australien.

Aluminium hat eine Dichte von 2,7 g/cm³ und fällt damit in die Gruppe der Leichtmetalle. Aufgrund der sehr hohen **Affinität** zu den Elementen Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) ist Aluminium bei der Stahlherstellung unabdingbar.

Desoxidation

Flüssiger Stahl kann bei seiner Herstellung aufgrund der hohen Temperatur große Mengen an Sauerstoff aufnehmen. Verbleibt dieses Ele-

ment im Stahl, können Gasblasen und erhebliche Mengen an nichtmetallischen Einschlüssen im festen Zustand entstehen, die den Stahl spröde und rissanfällig werden lassen. Zudem weisen derart vergossene Stähle (**Unberuhigter Stahl**) eine ausgeprägte Blockseigerung auf, die das Stahlprodukt sehr inhomogen werden lässt.

Aus diesem Grund wird dem flüssigen Stahl Sauerstoff durch die Zugabe von Aluminium entzogen (**Beruhigter Stahl**). Das Desoxidationsprodukt, Aluminiumoxid Al_2O_3 , schwimmt auf dem flüssigen Stahl und wird in der Schlacke gebunden.

Alterung

Alterung ist die Bezeichnung für eine zeitabhängige Eigenschaftsänderung unlegierter Stähle mit erhöhten Stickstoffgehalten (N > 0,009%). Die Festigkeit nimmt zu, die Zähigkeit ab, was zur

Versprödung und Rissbildung führen kann. Aluminium bindet Stickstoff im flüssigen Stahl zu AlN und unterbindet somit diese Alterungsanfälligkeit. Die Bildung von AlN fördert zudem die Feinkörnigkeit des Stahlgefüges.

Nitrieren

Die Bildung von AlN als harte Phase an der Oberfläche zum Verschleißschutz von Stahlbauteilen wird beim Nitrieren angestrebt. Dazu bedarf es spezieller Nitrierstähle, die Al enthalten, zum Beispiel die Stahlsorte 34CrAlMo5 (1.8507).

Zunderschutz

Unlegierte Stähle bilden ab einer Temperatur von ca. 550°C als Reaktionsprodukt mit dem Luftsauerstoff Zunder. Durch Wachstum und Abplatzen der Zunderschicht ergeben sich immer neue Reaktionsflächen. Durch die Zugabe von Al und Si zu chromreichen Stählen wird die Zunderschicht dichter und deren Wachstum deutlich verlangsamt. Anwendungsbeispiel ist der hitze- und zunderbeständige Stahl X10CrAlSi18 (1.4742).

Einen besseren Oberflächenschutz gegen Hochtemperaturkorrosion erzielt man durch das Aluminiumieren; dabei verbindet sich **Aluminium** mit den Stahl durch Diffusionsprozesse; an der Oberfläche bildet sich eine harte, spröde Al_2O_3 -Schicht, die zunderbeständig ist.

3.3.2 Arsen (As), Antimon (Sb)

Arsen und Antimon gehören zu den Halbmetallen mit einer Dichte von 5,72 bzw. 6,70 g/cm³.

Diese seltenen Elemente im Stahl sind in geringer Konzentration vorhanden und stellen für die meisten Stahlsorten kein Problem dar. In warmfesten NiCrMoV-Stählen, die zur Herstellung von

Dampfturbinenwellen verwendet werden, führen schon geringe Mengen dieser Elemente zu einer Langzeitversprödung. Aus diesem Grund werden derartige Stahlsorten mit reduzierten Gehalten an As und Sb unter der Bezeichnung „super clean steel“ hergestellt.

3.3.3 Bor (B)

Bor ist ein Halbmetall und hat eine Dichte von 2,46 g/cm³.

Härtbarkeit und Kornfeinung

In Vergütungsstählen bewirkt die Zugabe von Bor eine Kornfeinung, die wiederum zu einer Festigkeits- und Zähigkeitssteigerung führt. Ebenfalls verbessert wird die Härtbarkeit durch Bor, beispielsweise im Stahl 22MnB5 (1.5528).

Korrosionswiderstand und Schweißeignung

Beide Stahleigenschaften werden durch Bor verschlechtert, beispielsweise in nichtrostenden CrNi-Stählen.

Kernenergie

Steuerstäbe in Kernreaktoren werden aus borlegierten Stählen hergestellt mit einem B-Gehalt von bis zu 4%, da Bor ein hohes Absorptionsvermögen für Neutronen besitzt.

Borieren

Zur Erzeugung harter Oberflächenschichten mit hohem Verschleißwiderstand können Stahloberflächen boriert werden. Bei Temperaturen zwischen 850 und 950°C kann Bor bis in eine Tiefe von ca. 0,25 mm eindiffundieren und mit Eisen oder anderen Metallen harte Boride bilden.

3.3.4 Blei(Pb)

Blei ist ein Schwermetall mit einer Dichte von 11,3 g/cm³.

Da Blei im Eisen völlig unlösbar ist, verteilt es sich bei Zugabe dispersionsförmig im Stahl und liegt als einzelne Phase dort vor. Diese feinverteilten Bleieinschlüsse verbessern die Spanbarkeit in **Automatenstahl**, z.B. in der Stahlsorte 11SMnPb37 (1.0737). An den Bleieinschlüssen bricht der Span, so dass vollautomatisierte Zerspanungsmaschinen diese Stähle problemlos verarbeiten können.

Blei als Legierungselement fördert zudem die Wärme- und elektrische Leitfähigkeit sowie den Korrosionswiderstand und absorbiert Röntgen- und radioaktive Strahlung.

Chrom wird dem Stahl vor allem in Form von Ferro-Chrom zulegiert.

Seine Wirkung in Stählen ist vielfältig:

Korrosionsschutz

Ab einem Gehalt von 10,5% in reinem Eisen wird dieses nichtrostend; in Stählen mit geringem C-Gehalt setzt diese Wirkung ab einem Gehalt von ca. 12% ein. Eine Eigenschaft, die durch Erhöhung des Chromgehaltes zusammen mit anderen Legierungselementen (z.B. Nickel) noch verbessert wird.

Ferritbildner

Cr ist ein Ferritbildner, der im Schaeffler-Diagramm Bestandteil des Chrom-Äquivalents ist und hochlegierten Stählen eine ferritische Gitterstruktur (krz) verleiht.

Härtbarkeit

Chrom ist unverzichtbarer Bestandteil von Vergütungsstählen; es verschiebt die Phasengebiete des Ferrits, Perlits und Bainits im **ZTU-Schaubild** zu längeren Zeiten und ermöglicht damit das härten dickwandiger Bauteile; allgemein verbessert sich die Härtbarkeit eines Stahles mit zunehmendem Cr-Gehalt.

Chromkarbide

Chrom ist ein starker Karbidbildner. Chromkarbide können einerseits positive Wirkung bei Anlassen in Form der Sekundärharte zeigen (Anwendung z.B. in Werkzeugstählen), andererseits können sich ausgeschiedene Chromkarbide negativ in nichtrostenden Stählen auswirken (**Interkristalline Korrosion**).

3.3.5 Calcium (Ca)

Calcium gehört zu den Erdalkalimetallen und besitzt eine Dichte von 1,55 g/cm³.

Es wird bei der Stahlherstellung als Desoxidationsmittel zusammen mit den Elementen Si und Al in Form von CaSi oder CaAl verwendet. In Verbindung mit Sauerstoff (CaO) wird es bei der Stahlherstellung auch zur Entschwefelung oder zur Entphosphorung eingesetzt.

3.3.6 Chrom (Cr)

Chrom (Schmelzpunkt ca. 1.900°C) ist ein silberweißes, sehr hartes, sprödes Schwermetall mit einer Dichte von 7,14 g/cm³ und gilt als das wichtigste Legierungselement im Stahl. Von erheblicher Bedeutung ist es, dass bei Chrom keine Austauschmöglichkeit gegeben ist.

Physikalische Eigenschaften

Chrom verbessert die magnetischen Eigenschaften; daher besitzen Dauermagnetworkerstoffe bis zu 9% Cr. Chrom vermindert die Wärmeleitfähigkeit der Stähle; aus diesem Grund sind hochchromhaltige Stähle schwierig bei der Warmumformung und der Wärmebehandlung

Oberflächenschutz

Als Beschichtungswerkstoff auf Stahlprodukten kann Chrom den Korrosion- und/oder den Verschleißangriff auf den Stahl mindern (Chromieren).

3.3.7 Cobalt (Co)

Cobalt gehört zu den Schwermetallen mit einer Dichte von 8,9 g/cm³.

Austenitbildner

Co ist ein Austenitbildner, der im Schaeffler-Diagramm Bestandteil des NickelÄquivalents ist und hochlegierten Stählen eine austenitische Gitterstruktur (kfz) verleiht.

Warmfestigkeit

Cobalt erhöht stark die Warmfestigkeit durch verbesserte Anlassbeständigkeit und wird daher Hochtemperaturstählen wie z.B. X40CrNiCoNb13-13 (1.4960) oder Schnellarbeitsstählen wie HS10-4-3-1-10 (1.3207) zulegiert.

Verschleißschutz

In Verbindung mit den karbidbildenden Elementen W, V und Cr wird Cobalt häufig in Legierungen verwendet, die als Verschleißschutz dienen (Auftragschweißen).

Radioaktives Isotop

In der Kernenergie wird Cobalt als Legierungselement nicht eingesetzt, da es unter Neutronenbeschuss das radioaktive Isotop Cobalt60 schafft.

3.3.8 Kupfer (Cu)

Mit einer Dichte von 8,93 g/cm³ gehört Kupfer zu den Schwermetallen. Als reines Metall besitzt es die höchste elektrische Leitfähigkeit, einen ausgezeichneten Korrosionswiderstand und zeichnet sich durch ein hohes Umformvermögen aus.

Wetterfeste Baustähle

Geringe Anteile an Cu (0,2 – 0,3%) führen zu einer Stabilisierung der Rostschicht, genauer gesagt zu einer chemischen Passivierung der in der Rostschicht enthaltenen Mikrorisse, sofern diese nicht dauerhaft mit Feuchtigkeit benetzt sind. Die Abrostungsrate wetterfester Baustähle, gekennzeichnet durch ein angehängtes W (z.B. S3235J2W), ist geringer als die eines normalen Baustahls.

Aushärtung

Nichtrostende, kupferlegierte Stähle können martensitisch aushärten (Martensitaus-härtbare Stähle). Nach einem Lösungsglühen und Auslagern bewirken die Cu-haltigen Ausscheidungen einen Festigkeitsanstieg bei geringer Verzugsneigung. Beispielstahl: X5CrNiCuNb17-4-4 (1.4548)

Warmumformung

Die Warmumformung kupferhaltiger Stähle ist erschwert, da sich Cu unter der Zunderschicht anreichert, in die Korngrenzen eindringen und dort zu Warmrissen führen kann (Lötbrüchigkeit).

Schweißeignung

Kupfergehalte oberhalb von 0,5% reduzieren deutlich die Schweißeignung der Stähle.

3.3.9 Mangan (Mn)

Mangan ist ein Schwermetall mit einer Dichte von 7,25 g/cm³. Als preiswertes und vielfältig verwendbares Legierungselement ist Mangan in nahezu jedem Stahl vertreten.

Gehalte über 4% führen auch bei langsamer Abkühlung zur Ausbildung von sprödem martensitischem Gefüge, so dass der Legierungsbereich kaum genutzt wird.

Stähle mit Mn-Gehalten über 12% sind bei gleichzeitigem hohen C-Anteil austenitisch, weil Mn den γ-Bereich erheblich ausweitet.

Stähle mit über 18% Mn bleiben auch nach verhältnismäßig starker Kaltverformung nicht magnetisierbar. Sie werden daher für Sonderzwecke und als Kaltzähle bei Tieftemperaturbeanspruchung verwendet.

Austenitbildner

Mn ist ein starker Austenitbildner, der im Schaeffler-Diagramm Bestandteil des Nickel-Äquivalents ist und hochlegierten Stählen eine austenitische Gitterstruktur (kfz-Metallgitter) verleiht.

Desoxidation

Mangan ist ein wirksames Desoxidationsmittel bei der Stahlherstellung und bindet Sauerstoff durch die Bildung von MnO und in Verbindung mit Si das Oxid 2MnO-SiO₂.

Sulfidbildung

Eine der wichtigsten Aufgaben von Mangan ist die Bindung an Schwefel zum Mangansulfid MnS.

Im Gegensatz zu FeS hat dieses Sulfid einen hohen Schmelzpunkt von über 1600°C, so dass bei einem Mn/S-Verhältnis von über 1,7 die Gefahr von Rotbruch, d.h. Rissbildung durch niedrigschmelzende Eisensulfide, gebannt ist.

Härtbarkeit, Vergütbarkeit

Bezüglich Härtbarkeit und Durchhärtung ist Mn eines der preiswertesten und wirkungsvollsten Legierungselemente. Mit der Herabsetzung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit bei zunehmendem Mangangehalt ist eine Erhöhung der Einhärtung verbunden. Manganstähle haben besonders im vergüteten Zustand eine bessere Zugfestigkeit, Streckgrenze und Kerbschlagzähigkeit als Kohlenstoffstähle. Sie sind allerdings überhitzungsempfindlich und neigen zur Anlasssprödigkeit. Beispielstahl: 28Mn6 (1.1170).

Einhärtungstiefe beim Einsatzhärten

In Einsatzstählen erhöht Mn die Einhärtungstiefe ohne Karbidbildung bei Mn-Gehalten zwischen 0,9 und 1,4%. Beispielstahl: 16MnCr5 (1.7131).

Festigkeitserhöhung in Baustählen

In Baustählen führt die Zugabe von Mn bis zu 1,7% zu einer Erhöhung der Streckgrenze und der Zugfestigkeit. Beispielstahl: S355J2 (1.0577).

Manganhartstahl

Manganhartstahl mit 12 bis 14% Mangan und 1,2 bis 1,4% Kohlenstoff (Mn/C ~ 10/1) ist ein austenitischer Stahl, der einen hohen Verschleißwiderstand aufweist und zum Beispiel für Backen- oder Kegelbrecher verwendet wird. Er zeichnet sich im Ausgangszustand zunächst durch eine geringe Härte und Festigkeit aus, wandelt jedoch unter Belastung (Schubspannungen) um von Austenit zu Martensit, wodurch die Oberfläche hart und fest wird und darüber den Verschleißwiderstand erhöht: Beispielstahl: X210Mn12 (1.3401).

3.3.10 Molybdän (Mo)

1778 fand der schwedische Chemiker K. W. Scheele das silberweiße, spröde, relativ schwere Metall mit hohem Schmelzpunkt (etwa 2.620°C).

Mit einer Dichte von 10,2 g/cm³ gehört Molybdän zu den Schwermetallen. Auch Mo übernimmt vielfältige Aufgaben in Stählen.

Härtbarkeit

Eine Zugabe von 1% Molybdän hat auf das Durchhärteten von Bauteilen aus Vergütungsstahl etwa den gleichen Einfluss wie eine Zulegierung von 2% Chrom. Zudem verringert Mo die Gefahr einer Anlasssprödigkeit. Beispielstahl: 42CrMo4 (1.7225).

Warmfestigkeit

Durch eine Mischkristallhärtung und das Ausscheiden von Mo-haltigen Karbiden wird in warmfesten Stählen, aber auch in Warmarbeits- und Schnellarbeitsstählen die Anlassbeständigkeit verbessert, was zu einer Erhöhung der Warm- und Zeitstandfestigkeit führt (Zeitstandversuch). Ebenfalls führt Mo über die Karbidbildung zu einer geringeren Zunderbildung und erhöht die Druckwasserstoffbeständigkeit. Daher werden Mo-haltige, warmfeste Stähle in Dampfkraftwerken häufig eingesetzt. Beispielstahl: X20CrMoV12-1 (1.4922).

Wolframersatz

Molybdän und Wolfram sind sogenannte "homologe" Elemente, die gegeneinander ausgetauscht werden können. W wird gegen Mo teilweise ausgetauscht in Warm- und Schnellarbeitsstählen.

Einsatzhärten

In Einsatzstählen bewirkt Molybdän eine geringe Erhöhung der Eindringtiefe des Kohlenstoffs und führt zu einer Steigerung des Randkohlenstoffgehaltes.

Nitrieren

Molybdän erhöht über die Nitridbildung die Härte der Nitrierschicht. Beispielstahl: 31CrMo12 (1.8515)

Nichtrostende Stähle

Nichtrostenden austenitischen Stählen wird Molybdän zur Verbesserung des Korrosionswiderstandes gegen Lochfraß zulegiert. Ähnlich wie Chrom und Nickel neigt auch Molybdän zur Passivierung. Ein Zusatz von 2 bis 5% Molybdän verbessert den Korrosionswiderstand gegen chloridhaltige wässrige Medien, z.B. Meerwasser. Eingang findet der Mo-Gehalt in die Wirksumme gegen Lochfraß PRE (Pitting Resistance Equivalent). Beispielstahl: X5CrNiMo17-12-2 (1.4401).

3.3.11 Nickel (Ni)

1754 entdeckte der schwedische Bergrat Axel v. Cronstedt in sächsischen Erzen erstmals ein neues silberweißes, zähes Metall (Schmelzpunkt um 1.450°C), das er Nickel nannte.

Nickel zählt mit einer Dichte von 8,9 g/cm³ zu den Schwermetallen. In vielen Stählen ist Nickel als Legierungselement unverzichtbar.

Austenitbildner

Ni ist ein starker Austenitbildner, der im Schaeffler-Diagramm Hauptbestandteil des Nickel-Äquivalents ist und hochlegierten Stählen eine austenitische Gitterstruktur (kfz-Metallgitter) verleiht.

Nichtrostende Stähle

Der austenitische Chrom-Nickel-Stahl X5CrNi18-10 (1.4301) zählt zu den Hauptvertretern der nichtrostenden Stähle. Hierin gewährleistet der Ni-Anteil eine austenitische Struktur und erhöht über die Mischkristallbildung mit Cr und Fe die Festigkeit.

Martensitaushärtbare Stähle

Über die Bildung nichtmetallischer Phasen wie Ni_3Mo können nickelmartensitische Stähle verzugsarm ausgehärtet werden. Beispielstahl: X2NiCoMoV18-9-5 (1.6358).

Durchvergüten

Das Legieren von Vergütungsstählen mit Ni verbessert das Durchhärten und damit das Durchvergüten schwerer Schmiedestücke durch das Absenken der kritischen Abkühlgeschwindigkeit ([ZTU-Schaubild](#)). Beispielstahl: 34CrNiMo6 (1.6582)

Zähigkeit

Nickel fördert die Zähigkeit, insbesondere im Tieftemperaturbereich. So werden beispielsweise Warmarbeitsstähle mit Ni legiert, wenn die Werkzeuge hohen schlagartigen Belastungen ausgesetzt sind wie in Gegenschlaghämmern. Beispielstahl: X45NiCrMo4 (1.2767).

Ist Ni das einzige Legierungselement im Stahl, ergeben sich daraus kaltzähe Stähle, die auch bei extremen Niedrigtemperaturen ausreichende Sicherheit bieten z.B. für Flüssiggastransporte. Beispielstahl: X8Ni9 (1.5662).

Wärmeausdehnung

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Stählen erreicht bei Zugabe von 36% Nickel ein Minimum. Bekannt sind derartige Stähle als "Invarlegierungen".

3.3.12 Niob (Nb)

Niob ist ein Schwermetall mit einer Dichte von 8,56 g/cm³.

Niob wird in Stähle vorzugsweise als Mikrolegierungselement verwendet.

Zusammen mit den Elementen Ti und V bildet Nb aufgrund ihrer hohen Affinität zu C und N thermisch stabile Karbide, Nitride oder Karbonitride.

Feinkornbaustahl

Diese Nb-haltigen Ausscheidungen entstehen bei der thermomechanische Behandlung und Bewirken eine Feinkornhärtung durch Rekrystallisationsbehinderung und Behinderung des Austenitkornwachstums. Ein Feinkorn führt zu einer hohen Festigkeit bei guter Zähigkeit. Dafür reichen Nb-Gehalte unter 0,1%. Beispielstahl: S420M (1.8825).

Stabilisierte Stähle

Nichtrostende Stähle können beim Schweißen chromreiche Karbide ausscheiden, die den Schweißbereich anfällig gegen interkristalline Korrosion machen lassen. Durch Zugabe von Nb im Verhältnis Nb>8 C werden Nb-Karbide erzeugt, die diese Gefahr bannen. Beispielstahl: X6CrNiMoNb17-12-2 (1.4580).

3.3.13 Silizium (Si)

Das dunkelgrau bis schwarz glänzende leichte Halbmetall Silizium (lat. Kiesel), mit dem jeder bereits als Kind spätestens in der Sandkiste Bekanntschaft gemacht hat, wurde 1823 erstmals als reines Element dargestellt. Heute ist das mit 26% in der Erdrinde – nach Sauerstoff – am häufigsten vorkommende Element in seiner reinen Form auch Grundstoff bzw. Träger bei der Herstel-

lung von Transistoren, Dioden und elektronischen Subminiatur-Bauelementen.

Silizium gehört zu den Halbmetallen mit einer Dichte von $2,33 \text{ g/cm}^3$. Es ist ein wichtiger Stahlbegleiter und vielseitiges Legierungselement.

Desoxidation

Aufgrund seiner hohen Sauerstoffaffinität ist Silizium neben Mangan und Aluminium eines der wichtigsten Desoxidationsmittel. Alle Si-beruhigten Stähle weisen Silizium Massenanteile von etwa 0,2% auf.

Festigkeitssteigerung

Silizium erhöht die Streckgrenze und die Zugfestigkeit, ohne die Dehnung wesentlich zu verringern. Weiter vermindert Silizium die kritische Abkühlgeschwindigkeit und vergrößert damit die Einhärtung. Durch ein hohes Steckgrenzenverhältnis sind Si-legierte Stähle als Federwerkstoffe geeignet. Beispielstahl: 38Si7 (1.5023).

Umformen

Höhere Si-Gehalte erschweren die Umformung der Stähle: Ab 3% Silizium sind Stähle nicht mehr kalt- und ab 7% Silizium nur noch schwer warmverformbar.

Elektrischer Widerstand

Si-legierte Stähle mit 4% Silizium finden als Transformatorenwerkstoffe Verwendung, da Silizium den elektrischen Widerstand von Eisen erhöht und damit die Wirbelstromverluste herabsetzt (Elektroblech).

Zunderbeständigkeit

Auch die Zunderbeständigkeit wird durch das Entstehen von siliziumreichen Oxidschichten mit der Zugabe von Si erhöht. Dieses ist wich-

tig für Ventilstähle oder allgemein für hitze- und zunderbeständige Stahlsorten. Beispielstahl: X15CrNiSi20-12 (1.4882).

3.3.14 Tantal (Ta)

Tantal ist ein Übergangsmetall mit einer Dichte von $16,6 \text{ g/cm}^3$. Es ist ein, duktiles Metall mit hoher chemischer Beständigkeit bei Raumtemperatur. In Verbindung mit Niob (Nb) stellt Ta einen Stabilisierungsfaktor für chemisch beständige Stähle dar.

3.3.15 Tellur (Te)

Tellur ist ein Halbmetall mit einer Dichte von $6,24 \text{ g/cm}^3$. Es besitzt eine mäßige chemische Beständigkeit und kann die Entgasung und Bearbeitbarkeit nichtrostender Stähle verbessern, insbesondere die Spanbarkeit bei Automatenstählen.

3.3.16 Titan (Ti)

Titan ist ein Leichtmetall mit einer Dichte von $4,5 \text{ g/cm}^3$, welches eine vielseitige Wirkung als Legierungselement im Stahl hat.

Feinkornbaustahl

Ti-haltige Karbide, Nitride oder Karbonitride bewirken eine Feinkornhärtung durch Rekristallisationsbehinderung und Behinderung des Austenitkornwachstums. Ein Feinkorn führt zu einer hohen Festigkeit bei guter Zähigkeit.

Stabilisierte Stähle

Nichtrostende Stähle können beim Schweißen chromreiche Karbide ausscheiden, die den

Schweißbereich anfällig gegen interkristalline Korrosion werden lassen. Durch Zugabe von Ti im Verhältnis $Ti/C > 5$ werden Ti-Karbide erzeugt, die diese Gefahr bannen; allerdings lässt sich die Oberfläche derartiger Stähle schlecht polieren. Beispielstahl: X6CrNiTi18-10 (1.4541).

Nitride, die eine verschleißhemmende Wirkung gerade bei Abrasivverschleiß haben. Dieser Umstand wird sowohl im Stahlgefüge genutzt, beispielsweise im Messerstahl X45CrMoV15-1 (1.4116) als auch an der Oberfläche zur Erhöhung der Randhärte beim Nitrieren (Beispielstahl: 31CrMoV9 (1.8519)).

3.3.17 Vanadin (V)

Vanadin ist ein Schwermetall mit einer Dichte von $6,07 \text{ g/cm}^3$. Es hat ähnliche Wirkung wie die Legierungselemente Nb und Ti und wird entsprechend eingesetzt.

Feinkornbaustahl

V-haltige Carbide, Nitride oder Karbonitriden bewirken eine Feinkornhärtung durch Rekristallisationsbehinderung und Behinderung des Austenitkornwachstums. Ein Feinkorn führt zu einer hohen Festigkeit bei guter Zähigkeit. Allerdings ist die Wirkung von Vanadinausscheidungen geringer als die von Nb- oder Ti-Aus-scheidungen, die gegenüber V-Teilchen auch thermisch stabiler sind.

Warmfestigkeit

Zusätze von Vanadin erhöhen die Anlassbeständigkeit der Stähle und führen durch die Ausscheidung von Sonderkarbiden in Verbindung mit den Elementen Cr und Mo zur Bildung einer Sekundärhärte. Damit wird die Warm- und Zeitstandfestigkeit verbessert. Genutzt wird dieser Effekt in warmfesten Stählen (z.B. X20CrMoV12-1 (1.4922)), in Warmarbeitsstählen (X38CrMoV5-1 (1.2343)) und auch in Schnellarbeitsstählen.

Verschleißwiderstand

Durch seine hohe Affinität zu den Elementen C und N bildet Vanadin harte Carbide und/oder

3.3.18 Wolfram (W)

Wolfram ist ein Schwermetall mit einer Dichte von $19,3 \text{ g/cm}^3$. Es ist ein sehr starker Karbidbildner, dessen Carbide sich durch eine sehr hohe Härte und Temperaturbeständigkeit auszeichnen. Daher wird W üblicherweise als Legierungselement verwendet, um den Verschleißwiderstand zu erhöhen bzw. um die Schneidhaptigkeit von Zerspanungswerkzeugen zu verbessern. Dementsprechend findet man W vorwiegend in Werkzeugstählen.

Beispielstähle: Kaltarbeitsstahl X210CrW12 (1.2436), Schnellarbeitsstahl HS6-5-2 (1.3343)

3.3.19 Zink (Zn) und Zinn(Sn)

Zink und Zinn sind Schwermetalle mit einer Dichte von $7,20$ bzw. $7,28 \text{ g/cm}^3$. Als Korrosionsschutzschichten auf Stahloberflächen spielen sie eine herausragende Rolle; als Legierungselement im Stahl sind sie unerwünscht, da sie negative Erscheinungen wie Seigerungen, Lötbrüchigkeit etc. verursachen.

3.3.20 Zirkon (Zr)

Zirkon ist ein Schwermetall mit einer Dichte von $6,52 \text{ g/cm}^3$. Als Legierungselement im Stahl kann

Zr bei der Entschwefelung, Denitrierung und Desoxidation bei der Stahlherstellung verwendet werden, spielt aber eher eine untergeordnete Rolle. In der Oberflächentechnik schützen Zirkonoxide in Wärmeschutzschichten zum Beispiel Gasturbinschaufeln vor zu hohen Temperaturen.

4 Eigenschaften der Metalle – insbesondere der Stahlwerkstoffe

Wer mit Metallen sinnvoll umgehen will, wer insbesondere Stahl verkaufen will, muss genau abschätzen können, wie sich der angebotene bzw. verkaufte Werkstoff im vorgesehenen Einsatz verhalten wird. Dieses Wissen gehört unabdingbar zur technischen Beratungskompetenz eines Stahlhändlers. Ob sich ein Werkstoff für den vorgesehenden Verwendungszweck eignet, wird durch seine Eigenschaften bestimmt. Insbesondere interessieren in der Technik jene Eigenschaften, die eine Aussage über die Verwendbarkeit und Verarbeitbarkeit eines Werkstoffs erlauben. Dies sind vor allem Eigenschaften, die das Verhalten des Werkstoffes unter mechanischen Belastungen oder bei einem Fertigungsverfahren beschreiben.

Für einen Stahlhändler wären dies vor allem die Eigenschaften der Umformbarkeit, der Schweißbarkeit, der Festigkeit und Härte sowie der Korrosionsbeständigkeit. Erst die Summe aller Eigenschaften ergibt das Eigenschaftsbild des Werkstoffes. Dieses Bild entscheidet, ob ein Werkstoff für eine gestellte Aufgabe geeignet ist. In der Regel unterscheidet man physikalische, mechanisch-technologische, fertigungstechnische und chemisch-technische Eigenschaften. Für den Stahlhändler ist es weniger wichtig, eine Werkstoffeigenschaft der zuvor genannten Kategorie zuzuordnen, aber für seine Beratungskompetenz von wesentlicher Bedeutung, einige Eigenschaften zu kennen und zu beschreiben. Im Folgenden werden daher die wichtigsten Eigenschaften der Stahlwerkstoffe vorgestellt.

Die mechanischen Eigenschaften der Stähle, also ihre Härte, Festigkeit und Zähigkeit, sind nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, d.h. insbesondere vom Kohlenstoffgehalt, abhängig, sondern werden auch durch die mechanische Bearbeitung im kalten und warmen Zustand (Walzen, Schmieden, Ziehen usw.) oder durch eine Wärmebehandlung, also durch Erwärmen auf höhe-

re Temperaturen mit anschließender Abkühlung, weitgehend beeinflusst.

Stahlwerkstoffe für besondere Beanspruchungen

Stahlwerkstoffe unterliegen in ihrer Anwendung einer Vielzahl von Beanspruchungen. Die grundlegenden (Zug, Dehnung usw.) und auch die dafür notwendigen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze usw.) werden im Modul Werkstoffprüfung nochmals ausführlich behandelt.

Bei vielen Konstruktionsstählen treten jedoch darüber hinaus besondere Beanspruchungen auf, die wiederum besondere Werkstoffeigenschaften erfordern. Solche besonderen Beanspruchungen sind:

- ▶ Einwirkung höherer Temperaturen bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung (gefordert: Warmfestigkeit)
- ▶ Einwirkung von Temperaturen, die bei unlegierten Stählen das Gefüge verändern (gefordert: Hitzebeständigkeit)
- ▶ Reibbeanspruchungen (gefordert: Verschleißfestigkeit)
- ▶ chemische und elektrochemische Einwirkungen (gefordert: Korrosions- und Zunderbeständigkeit)
- ▶ Wechselbeanspruchungen und starke elastische Dehnungen (gefordert: hohe Elastizität)

Die Eigenschaften unlegierter Stähle werden fast ausschließlich über den Kohlenstoffanteil und durch entsprechende Wärmebehandlungen geregelt. Lassen sich die geforderten Eigenschaften so jedoch nicht erzeugen, beginnt der Einsatz und die Aufgabe der Legierungselemente.

Warmfestigkeit

erfordert vom entsprechenden Werkstoff auch bei 550 °C noch gute Streckgrenzen (z.B. für den Einsatz im konventionellen Kraftwerksbau, warmfeste ferritische Stähle für Temperaturen bis 550°C). Unlegierte Stähle können bis ca. 300 °C ausreichende Festigkeit aufweisen. Für höhere Temperaturen wird bei ferritisch-perlitischem Grundgefüge mit Mo, Cr, V und Mn einzeln oder kombiniert legiert.

Hochwarmfeste Stähle erreichen eine Warmfestigkeit bis 650 °C. Sie besitzen entweder ein ferritisch-perlitisches Gefüge und dann als Hauptlegierungselement Cr, zusätzlich Mo, V, z.T. N oder (meistens) ein austenitisches Gefüge mit zulegiertem Cr und Ni, daneben z.T. Mo, V, W, Nb, Ti und B zur Festigkeitssteigerung (siehe Exkurs).

Anwendungsbereiche der warmfesten Stähle sind z.B. Kesselbleche, nahtlose Rohre und Verbindungselemente (Schrauben usw.).

Warmfeste und hochwarmfeste Stähle besitzen gute Festigkeitseigenschaften bis max. 650 °C. Hauptlegierungselemente sind Cr und Ni.

Hitzebeständigkeit

ist gegeben, wenn bei Arbeitstemperaturen über 550 °C Zunderbildung (Oxidation der Oberfläche, z.B. Bildung von Fe₂O₃) und Heißgaskorrosion vermieden werden. Dazu setzt man dem Stahl Cr, Si und Al zu, die dichte, gut haftende und damit schützende Oxide bilden. Daneben wird zur Steigerung der Warmfestigkeit so viel Ni zugesetzt, dass ein austenitisches Gefüge entsteht. Die Zugabe von Ti, Ta, Co, W und V kann die Warmfestigkeit weiter steigern.

Hitzebeständige Stähle sind bei Temperaturen über 550 °C weitgehend unempfindlich gegen Heißgaskorrosion und Zunderbildung. Hauptlegierungselemente sind Cr, Si, Al und z.T. Ni.

Exkurs:

„Beschäftigt man sich mit Hochtemperaturwerkstoffen, zu denen auch die warmfesten Stähle gehören, stellt man sehr schnell fest, dass die einschlägigen Normen in sich nicht nur nicht schlüssig sind sondern sich häufig sogar widersprechen.“

So sagt die DIN EN 10269 (alt: DIN 17240): „... Im Sinne dieser Norm gelten als warmfest solche Werkstoffe, die gute mechanische Eigenschaften unter langzeitiger Beanspruchung, unter anderem hohe Zeitdehngrenzen und Zeitstandfestigkeiten sowie einen guten Relaxationswiderstand bis Temperaturen von ca. 540°C aufweisen; als hochwarmfest gelten solche Stähle und Legierungen, für die das gleiche bis ca. 800°C zutrifft ...“

In der DIN EN 10028-7 und DIN EN 10222-5 (alt: DIN 17460) ist dann der Chromgehalt von Bedeutung: „... Als hochwarmfeste austenitische Stähle gelten austenitische Stähle mit einem Massengehalt an Chrom von mindestens 13%, die bei Temperaturen oberhalb ca. 550°C unter langzeitiger mechanischer Belastung gute Festigkeitseigenschaften haben ...“

Nach DIN EN 10302, Ausgabe 2005-10 gilt: „... Stähle, Nickel- und Cobaldlegierungen mit einem Mindestchromgehalt von 8%, die sich durch ein gutes mechanisches Verhalten unter Langzeitanwendungsbedingungen bei Temperaturen über 500°C auszeichnen, und zwar in erster Linie durch hohe Werte der Zeitdehngrenze und Zeitstandsfestigkeit bei Beanspruchungen langer Dauer ...“

Auch verschiedene Autoren haben sich an der Definition versucht, wie z.B. Schatt (Werkstoffe des Maschinen- und Anlagebaus, Leipzig): „... Warmfeste Stähle sind unlegierte und legierte Stähle, die in der Regel oberhalb 400°C zum Einsatz gelangen ...“

Am zutreffendsten und umfassensten ist noch die Definition von R. Bürgel (Handbuch-Hochtemperatur-Werkstofftechnik; Braunschweig/Wiesbaden): „... Zu den Hochtemperaturwerkstoffen werden alle Materialien gezählt, die oberhalb von rund 500°C dauerhaft für Bauteile eingesetzt werden können und damit langzeitig ausreichende mechanische Eigenschaften und Hochtemperatur-Korrosionsbeständigkeit aufweisen müssen ...“

Alle Definitionen versuchen über unterschiedliche Parameter, wie z.B. den Chromgehalt der Werkstoffe die Hochtemperatur-Korrosionsbeständigkeit zu sichern oder über die Nennung einer kritischen Temperatur, in der Regel zwischen 500 und 550°C, sicherzustellen, dass hohe Festigkeitswerte gerade im zeitabhängigen Entfestigungsbereich der Stähle vorliegen.“ (zitiert nach: Bleck, W.; Spezielle Werkstoffe der Stähle, Aachen, RWTH).

Verschleißfestigkeit

bedeutet Widerstand gegen die verschiedenartigsten Verschleißbeanspruchungen. Bei bestimmten, nicht zu hohen Anforderungen gegenüber unlegierten Stählen mit geringen Anteilen Mn. Sie besitzen perlitisches Gefüge und finden als Schienen, Gleitbahnen und Rutschen Verwendung.

Andere Verschleißmechanismen verlangen auch andere Stähle. So muss z.B. zwischen reibender und schlagender Beanspruchung unterscheiden werden. Der klassische als Manganhartstahl bezeichnete verschleißfeste Stahl X120Mn12 (WNr: 1.3401) ist von Natur aus weder besonders hart, sondern eher weich und zäh. Er ist austenitisch und hoch widerstandsfähig bei schlagender Beanspruchung, durch die er kaltverfestigt wird. Bei reibendem (schmiergelndem) Verschleiß ist er

weniger beständig. Er ist besonders für Baggerzähne, Brecherwerkzeuge in der Steinindustrie, Schlag- und Schleudermühlen geeignet.

Manche Einsatz-, Vergütungs- oder Nitrierröhre Stähle sind durch ihre besonderen Eigenschaften bei geeigneter Wärmebehandlung auch für viele Verschleißprobleme anzuwenden.

Eine hohe Verschleißfestigkeit ist neben großer Härte unter anderem besonders bei Werkzeugstählen gefordert (hohe Schneidfähigkeit und Schneidhaltigkeit, da sie zerspanend arbeiten sollen). Sie werden nach ihrer hauptsächlichen Verwendung eingeteilt in:

► **Kaltarbeitsstähle**
sind für einen Einsatz bei Temperaturen unter 200 °C vorgesehen. Es sind unlegierte, härtbare Stähle oder legierte, die Cr, Wo, Mo, V, Mn und Ni in verschiedenen Kombinationen enthalten.

► **Warmarbeitsstähle**
werden bei Arbeitstemperaturen über 200°C verwendet. Sie müssen anlassbeständig und warmfest sein und einen guten Warmverschleißwiderstand besitzen. Es werden die gleichen Legierungselemente wie bei den Kaltarbeitsstählen – jedoch in anderer Kombination – eingesetzt.

► **Schnellarbeitsstähle**
finden bei hohen Schnittleistungen mit Arbeitstemperaturen bis 600 °C Anwendung. Sie müssen deshalb anlassbeständig und verschleißfest sein und eine hohe Warmhärte besitzen. Legierungselemente sind W, Mo, Cr, V und Co.

Von Werkzeugstählen wird große Härte, Verschleißfestigkeit und Schneidfähigkeit gefordert.

Diese Eigenschaften müssen – je nach Einsatzbereich – auch bei höheren Temperaturen gewährleistet sein.

Korrosionsbeständigkeit

wird durch nichtrostende und säurebeständige Stähle garantiert. Sie erreichen die gewünschten Eigenschaften besonders durch einen hohen Cr- oder Cr-Ni-Gehalt. Der Massenanteil Cr liegt im Allgemeinen über 12 %.

Am bekanntesten sind Chrom-Nickel-Stähle mit 18 % Cr und 8 % Ni (austenitisches Gefüge). Die

Beständigkeit kann aber auch mit ferritischen oder martensitischen Stählen erreicht werden (Legierungselemente: Cr, Mo, V, Ti und S).

An dieser Stelle verweisen wir auf das spätere Modul „Nichtrostende Stähle“, das sich dieser Thematik sehr ausführlich annimmt.

Weitere fertigungstechnische Eigenschaften (siehe Abbildung 40), die Auskunft über die Eignung eines Werkstoffes für ein Anarbeitsverfahren und über die Bedingungen bei der Verarbeitung der Werkstoffe geben, sind in nachfolgender Tabelle festgehalten.

| Anforderung | Beispiel: Stahl |
|--------------------------|---|
| Warmformbarkeit | sinkt mit steigendem C-Gehalt, Grenze bei 2 % C. |
| Kaltumformbarkeit | sinkt mit steigendem C-Gehalt, am besten bei reinem Ferrit. |
| Schweißbarkeit | Im Allgemeinen bis 0,20 % C schweißbar, bei größerem C-Gehalten sind in d. R. besondere Maßnahmen erforderlich. Wesentlich sind die Angaben zum Kohlenstoffäquivalent (CEV). Als kritischer Wert gilt allgemein 0,45%. Neben der Stahlsorte ist zur Bestimmung des CEV auch die Materialdicke maßgebend. |
| Zerspanbarkeit | Hängt eng mit der Härte und Zugfestigkeit zusammen. Zunehmender C-Gehalt verschlechtert die Zerspanbarkeit. Legierungszusammensetzung, Härte, Wärmebehandlung und Gefüge beeinflussen die Zerspanbarkeit. Schwefel (min. 0,14%), verbunden mit einem ausreichenden Mangangehalt (min. 0,5%) sind die wesentlichen Legierungselemente der Automatenstähle (Verweis auf das spätere Modul 170.000-I „Qualitäts- und Edelstähle“). |
| Härtbarkeit | erfordert einen mind. C-Gehalt von 0,2 %. Ab ca. 0,7 % C sinkt dann die Härte wieder. Art und Menge der Legierungselemente (i.d.R. Cr, Mn, Mo und Ni) beeinflussen das Umwandlungsverhalten des Stahles. |

Abbildung 40: Stahl in der Be- und Verarbeitung

Eigenschaften aufgrund der Anforderungen an den Werkstoff

Die bisher genannten Werkstoffeigenschaften und die nunmehr folgenden und kurz beschriebenen Eigenschaften der Werkstoffe werden an gegebener Stelle in den relevanten Modulen noch einmal ausführlich beschrieben.

Die **Dichte** gibt an, welche Masse ein Werkstoff pro Volumeneinheit besitzt. Die Einheit der Dichte ist g/cm^3 oder kg/dm^3 . Die Dichte ς eines Werkstoffes errechnet sich mit der Formel:

$$\varsigma = \frac{m}{V}$$

wobei m die Masse des Bauteils und V sein Volumen darstellt. Stahl hat eine Dichte von $7,86 \text{ kg/dm}^3$.

In der Praxis des Stahlhändlers wird in aller Regel die **Masse** angegeben, wobei bei Stabstählen sich die Masse auf einen Meter bezieht ($m = \text{kg/m}$) und bei Flachprodukten die Masse pro qm angegeben wird ($m = \text{kg/m}^2$).

Als **Festigkeit** bezeichnet man allgemein die größtmögliche mechanische Spannung, die ein Werkstoff aushalten kann, ohne zu Bruch zu gehen. Dabei muss man unterscheiden zwischen Zug-, Druck- oder Scherfestigkeit.

Die **Zugfestigkeit** R_m errechnet sich aus der Zugkraft F und der Querschnittsfläche S nach der Formel $R_m = F/S$. Sie ist nur ein Anhaltswert, denn bei der Belastung führt sie bereits zum Bruch! In vielen Fällen wird jedoch die **Streckgrenze** R_e angegeben. Es ist jener Wert, bis zu dem sich der Werkstoff tatsächlich belasten lässt. Nach heutige gültigen Normen und in der Praxis des Stahl-

händlers werden die Baustähle nach diesem Wert benannt, z.B. Baustahl: S355 (früher St 52), das heißt Streckgrenze $R_e = \text{mind. } 355 \text{ N/mm}^2$ bei der kleinsten Erzeugnisdicke, dabei beträgt die maximale Zugfestigkeit $R_m = \text{mind. } 470 \text{ N/mm}^2$

Mit **Härte** bezeichnet man den Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen entgegensetzt. Durch eine Härtemessung wird nahezu zerstörungsfrei ein Werkstoffkennwert ermittelt, mit dem Festigkeit und Brucheinschnürung abgeschätzt und weitere Eigenschaften wie beispielsweise Zerspanbarkeit, Verschleißverhalten usw. beurteilt werden können (siehe Modul „Werkstoffprüfung“).

Als **Sprödigkeit** bezeichnet man die Eigenschaft eines Werkstoffes, unter Belastung zu brechen, ohne sich vorher merklich zu verformen. Bei schlagartiger Beanspruchung zerspringen spröde Werkstoffe in viele Bruchstücke. Da unsachgemäß gehärteter Stahl sehr spröde sein kann, ist es möglich, dass er bei Schlagbeanspruchung bricht.

Elektrische, akustische und thermische Leitfähigkeit

Bei der Wärmeleitung wird Wärmeenergie innerhalb eines Körpers weitergeleitet. Die Moleküle an den Stellen höherer Temperatur besitzen mehr Energie und übertragen diese auf die Nachbarmoleküle geringerer Energie. Das führt zu einem Abbau der bestehenden Temperaturdifferenz. Bei Metallen werden Wärme und elektrischer Strom durch freie Leitungselektronen transportiert. Elektrischer Strom wird durch bewegte, freie Elektronen erzeugt, Wärme wird durch schwingende Elektronen übertragen. Deswegen sind Wärmeleitung und elektrische Leitung (ungefähr) proportional. Metalle übertragen akustische Schwingungen sehr gut.

Das Atom-Gitter des Bleis leitet Schallschwingungen viermal schneller und das des Stahls fünfzehnmal schneller als Luft.

Alterung

Im Laufe der Zeit ändern sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Stahls. Die Bauteile verspröden und verändern sich dabei auch maßlich. Dies ist einmal zurückzuführen auf den Abbau von Eigenspannungen (*siehe Spannungsarmglühen, Modul Wärmebehandlung*) und eine mit der Zeit eintretenden Versprödung, als Folge von Stickstoff- bzw. Kohlenstoffausscheidungen im Kristallgefüge. Infolge der Alterung erhöht sich auch die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der Bauteile, und damit geht einher eine Verminderung der Dehnung und der Kerbschlagzähigkeit. Laufen die Vorgänge der Alterung bei Raumtemperatur ab, so spricht man von natürlicher Alterung. Demgegenüber geschieht die künstliche Alterung bei Temperaturen zwischen 200°C und 300°C, da sich hierbei der maßgebliche Stickstoff als nadelförmige Eisennitride ausscheidet. Daher sollte Stahl zwischen 200°C und 350°C wegen seiner dann geringeren Zähigkeit nicht verformt werden, sonst besteht die Gefahr des sog. Blaubruchs (Blausprödigkeit).

Bei kalt verformten Stählen tritt die wesentlich gefährlichere Verformungsalterung (Reckalterung) auf. Sie bewirkt einen deutlichen Zähigkeitsverlust, da der Stahl beim Verformen sehr stark versprödet. Daher sollte Stahl zwischen 200°C und 350°C wegen seiner dann geringen Zähigkeit nicht verformt werden. Die Alterungsneigung des Stahls lässt sich zwar nicht völlig beseitigen, sie kann aber wesentlich verringert werden.

Da Stickstoff nicht vollständig aus der Schmelze beseitigt werden kann, erfolgt die Zugabe von Legierungselementen, die zu Stickstoff eine

höhere Affinität haben als Eisen. Dies ist zum Beispiel bei Aluminium, Titan und Niob der Fall. Die vorgenannten Elemente binden den Stickstoff zu festen und schwer löslichen Nitriden. Der Stahl ist somit alterungsbeständig. Durch Vergleich der Kerbschlagarbeit (*siehe Modul: Werkstoffprüfung*) ungealteter und künstlich gealteter Proben wird die Alterungsneigung bestimmt.

Wird ein nicht mit Aluminium beruhigter Stahl plastisch kalt verformt, wie dies beispielsweise bei der Blechumformung der Fall ist, so scheiden sich innerhalb der Gleitzonen Eisennitride aus. Beim Umformen entstehen dann die sogenannten „Fließfiguren“ oder Lüderssche Linien die eine Oberflächenbehandlung (polieren, galvanisieren oder lackieren) erheblich erschweren oder gar nicht zulassen. Daher werden Tiefziehbleche mit Aluminium desoxidiert oder durch Kaltwalzen dressiert (*siehe auch Technische Dokumentation: Flachprodukte*).

5 Zusammenfassung

Man unterscheidet zwei Arten von Fremdelementen im Eisengitter: Eisenbegleiter und Legierungselemente. Die Zuordnung geschieht danach, ob die Elemente ohne besondere Absicht bei der Eisenerzeugung und Verarbeitung in den Werkstoff gelangen oder ob sie gezielt zur Verstärkung bestimmter Eigenschaften zugesetzt werden.

Die Eisenbegleiter verursachen eine Reihe von negativen Auswirkungen wie Sprödigkeit, Schweißrissigkeit, Rotbruch- und Heißbruchgefahr sowie Alterung.

Die Legierungselemente bilden mit dem Eisen Mischkristalle, wobei sich das Fe-Gitter verspannt. Außerdem behindern sie die Diffusion des Kohlenstoffs und bilden Karbide und Nitride. Größere Härte und Festigkeit und eine höhere Streckgrenze sind meist die Folge.

Metalle sind elastisch (vorübergehend) und plastisch (bleibend) verformbar, sofern die Plastizität nicht durch Manipulation des Metallgitters (z.B. Einbau von Zwischengitteratomen) unterbunden wird. Ein solches Blockieren von Gleitebenen wird durchgeführt, um eine größere Härte und Festigkeit (Widerstand gegen Formänderung) beim Werkstoff zu erzeugen, gleichzeitig erschwert man so jedoch eine gute Verformbarkeit und damit allgemein die Verarbeitbarkeit. Es gilt hier deshalb immer, einen sinnvollen Kompromiss zu finden. Ursache all dieser, für die Technik so wertvollen Eigenschaften ist der Gitter- und Gefügeaufbau, der aus der speziellen chemischen Bindungsart resultiert.

Die in einem Stahl neben Eisen und Kohlenstoff enthaltenen Elemente müssen in Begleit- und Legierungselemente getrennt werden.

Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Wirkung von Legierungselementen liegen in ihrem atomaren Aufbau und ihrer Fähigkeit, sich im Eisen zu

lösen oder mit anderen Elementen Ausscheidungen zu bilden. Zur Beurteilung der Wirkungsweise von Legierungselementen ist es wichtig, die Mechanismen zu verstehen, die letztendlich bestimmte Eigenschaften der Stähle beeinflussen.

Die Aufgaben, die bestimmte NE-Metall-Legierungselemente in Stählen übernehmen, können sehr vielfältig sein und sind abhängig von der einzelnen Stahlsorte sowie der Zielsetzung, welche Eigenschaft erzielt oder verbessert werden soll; eine generelle Zuordnung von Legierungselementen zu Eigenschaften ist somit nicht möglich.

Erklärungen/Glossar

Abschreckdauer

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

Abschrecken

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

Affinität

Ein Begriff aus der Chemie, der das Bestreben von Atomen und Molekülen beschreibt, Wechselwirkungen einzugehen.

Aluminieren

Ziel ist die Erzeugung einer gegen Verzunderung des Stahls beständigen Schicht (bis ca. 800 °C). Das Werkstück wird dabei in einem Pulvergemisch aus Aluminium, Aluminiumoxid und Aluminiumchlorid bei Temperaturen um etwa 1000 °C geäugt. Aluminium diffundiert in die Stahloberfläche und bildet eine etwa 1,5 mm starke Schicht aus intermetallischen Eisen-Aluminium-Phasen.

Anisotropie

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

Anlassbeständigkeit

Eigenschaft legierter Vergütungsstähle, den beim Anlassen gehärteter Werkstücke eintretenden Festigkeitsabfall zu höheren Temperaturen und längeren Zeiten zu verschieben; zudem ergibt

sich eine zusätzliche Festigkeitssteigerung bei Anlass-temperaturen um 500 °C durch ausgeschiedene Sondercarbide.

Anlassgefüge

Das beim Abschrecken entstandene Härtegefüge (Martensit) verändert sich mit zunehmender Erwärmung: Aus den Martensitnadeln scheidet sich allmählich Zementit aus, wobei Härte und Sprödigkeit absinken. Das entstandene Perlitgefüge ist um so feinkörniger, je niedriger die Anlasstemperatur liegt. Weil man hier neue, vom Perlit abweichende Gefügeformen erhält, bezeichnet man die Gefüge, die beim Anlassen aus dem Martensit aufeinanderfolgen, als Troostit und Sorbit.

Austenit

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

Austenitisieren

Erwärmen und Halten auf einer Temperatur oberhalb Ac_3 im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, um das Gefüge vollständig oder teilweise in Austenit umzuwandeln.

Automatenstahl

Unlegierter Stahl mit relativ hohem Massenanteil an Schwefel (etwa 0,2 bis 0,4 % S) sowie äquivalentem Mangangehalt, bestimmt für die spanende Fertigung von Massenteilen auf schnelllaufenden automatisch gesteuerten Werkzeugmaschinen. S und Mn sorgen für gute Zerspanbarkeit. In der zeiligen Ausbildung von Mangansulfid (MnS) wirkt S erheblich weniger schädlich, sorgt aber für kurzbrüchigen Span, der leicht aus den Auto-

maten abzuführen ist. Ggf. Zusätze von insbesondere Blei (0,15 bis 0,35 % Pb [®]Bleilegierter Automatenstahl)

Bainit

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

Beruhigter Stahl

Kennzeichen „FN“ (alte Bezeichnung nach DIN 17006: „R“): Mit Silicium (Si) desoxidierter Stahl. Durch die Zugabe von Si wird der in der Stahlschmelze befindliche Sauerstoff als SiO_2 gebunden. Dadurch erstarrt der Stahl ohne Blasenbildung und Spritzer und mit nur schwach ausgeprägten Seigerungerscheinung.

Chromieren

Thermochemische Anreicherung der Randschicht eines Werkstücks mit Chrom.

Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

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

Elektroblech

Mit Silicium (Si) legierte kaltgewalzte Feinbleche in Dicken von etwa 0,20 bis 0,65 mm mit besonderen magnetischen Eigenschaften nach DIN 46400. Sie zeichnen sich durch hohe Magnetisierbarkeit im magnetischen Wechselfeld mit geringsten Wattverlusten aus, d.h., sie sind für Energieeinsparung mitverantwortlich. Verwendung in Transformatoren, elektrischen Maschinen und Geräten.

Eutektikum

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

Ferrit

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

Ferritische Stähle

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

Gamma (γ)-Eisen

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

Gefüge

Anordnung und Aussehen der Kristallbausteine eines metallischen Werkstoffs. Die Lehre vom Gefüeaufbau heißt Metallographie. Sie hat für typische Gefügebestandteile und Gefüeausbil-

dungen besondere Namen geprägt, z.B. Ferrit, Perlit, Martensit, Austenit usw. (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm).

Gitterfehler

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

Glühen

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

Graphit

Eine der kristallinen Erscheinungsformen des Kohlenstoffs.

Härtbarkeit

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

Härte

Widerstand einer Werkstückoberfläche gegen das Eindringen eines anderen Körpers. Man ermittelt sie nach verschiedenen Härtmessverfahren (z.B. Brinell-, Rockwell-, Vickers-, Shore-Verfahren).

Härteln

Verfahren zur Steigerung der Härte von Eisenwerkstoffen.

Härtetemperatur

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

Interkristalline Korrosion

Kornzerfall, der bei nichtrostenden Stählen in einem kritischen Temperaturbereich (400 bis 800 °C) eintreten kann. Infolge der Temperaturerhöhung (durch Schweißen, Wärmebehandlung) scheiden sich Chromcarbide oder -nitride auf den Korngrenzen aus. Die Matrix verarmt an Chrom – die Korrosionsbeständigkeit geht verloren. Schließlich wird der Kristallverband zerstört.

Karbide

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

kfz

(Abk. für kubisch flächenzentriert.) So bezeichnet man ein würfelförmiges Raumgitter, bei dem zusätzlich zu den acht Atomen auf den Ecken je ein weiteres Atom mitten auf den Würfelseiten – also auf jeder Flächendiagonalen – sitzt. y-Eisen weist ein kfz-Gitter auf.

krz

Abk. für kubisch-raumzentriert. So bezeichnet man ein würfelförmiges Raumgitter, bei dem zusätzlich zu den Atomen auf den acht Ecken ein weiteres Atom im Inneren – also auf der Raumdiagonalen – sitzt. a-Eisen weist ein krz-Gitter auf.

Korngrenze

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

Korngrenzenzementit

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

Korngröße

Größe der Kristallite oder Körner im Stahlgefüge.

Kristall

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

Kristallbildung

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

Kristallgitter

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

Legierung

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

Legierungselemente

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

Lötbrüchigkeit

Fehlererscheinung im Stahl, hervorgerufen durch niedrig schmelzende Metalle (z.B. Blei, Zinn, Kupfer), die sich an den Korngrenzen sammeln und bei erhöhter Temperatur sowie Zugbeanspruchung zum Bruch führen.

Lochfraß

ist eine Form der selektiven Korrosion. Der chemische Angriff erfolgt lokal infolge von Fehlstellen in der Passivschicht. L. wird durch Halogenionen (z. B. chloridhaltige Lösungen) verursacht.

Martensit (Härtegefüge)

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

Martensitaushärtbare Stähle

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

Martensitische Stähle

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

Mechanische Eigenschaften

Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen sind die Festigkeitseigenschaften wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung, Bruch einschnürung, Kerbschlagarbeit in den verschiedenen Zuständen (z.B. vergütet oder nor-

malgeglüht) und unter den unterschiedlichen Beanspruchungen (z.B. hohe oder tiefe Temperaturen, Dauerbelastungen usw.). Im Unterschied dazu: Technologische Eigenschaften.

Metallurgie

Wissenschaft von der Gewinnung der Metalle und der Erschmelzung und Legierung metallischer Werkstoffe.

Erzeugung metallischer Stoffe im großtechnischen Maßstab. Abgeleitete Begriffe: Pulvermetallurgie, Pfannenmetallurgie, Sekundärmetallurgie.

Mikrolegierte Stähle

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

Mischkristall

Kristall, der aus verschiedenen Elementen zusammengesetzt ist

Nitrieren

Oberflächen- (Randschicht-) Härtung durch Stickstoffaufnahme (Aufsticken). Man unterscheidet das Gasnitrieren und das Salzbadnitrieren. Anreichern der Randschicht eines Werkstücks mit Stickstoff. Je nachdem, welche Bedingungen man für diese thermochemische Behandlung auswählt, und je nach Werkstoff bildet sich entweder ein Diffusionsschicht oder eine Verbindungs- und Diffusionsschicht. Durch Nitrieren erreicht man eine höhere Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit des Werkstücks. Neben einer Härtesteigerung bringt das N. eine bessere Dauerschwingfestigkeit mit sich.

Nitrierstähle

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

Schaeffler-Diagramm

Auftragung des Nickel-Äquivalents über dem Chrom-Äquivalent. Dieses Schaubild für nichtrostenden Stahl gibt die jeweils auftretenden Gefügeanteile an Martensit, Austenit und Ferrit an. Das ist besonders für das Schweißen hochlegierter Stähle wichtig.

Schneidhaptigkeit

Widerstand, den ein Schneidwerkzeug der Abnutzung seiner Schneide entgegensezt. Die Sch. ist von der Schneidfähigkeit und der Beanspruchung abhängig.

Unberuhigter Stahl

Kurzzeichen U. Flüssiger Rohstahl, der nach dem Frischen noch reaktionsfähigen Sauerstoff enthält, welcher sich in der Kokille mit einem Teil des vorhandenen Kohlenstoffs zu Kohlenmonoxid (CO) verbindet. Das Gas steigt in der erstarrnden Schmelze hoch und verursacht Kochen. Die erzwungene Strömung - von der Erstarrungsfront ins Blockinnere gerichtet - sammelt dort die noch flüssigen Verbindungen von Phosphor, Schwefel und Kohlenstoff (Blockseigerung). Die Blockrandschichten dagegen erstarrn rein (sog. Speckschicht) und sind vom Kern durch blasenhaltige Gebiete (äußerer und innerer Blasenkranz) getrennt.

Vergüten

Aus Härtung und Anlassen bestehende Wärmebehandlung. Durch die Umwandlungshärtung wird die Festigkeit gesteigert, zugleich aber auch das Gefüge neu gebildet und gefeint. Beim Anlassen

wird die Festigkeitszunahme durch das Härteln zum geringen Teil wieder abgebaut, die Zähigkeit aber über den ursprünglichen Wert hinaus erhöht.

Zeitstandversuch

Werkstoffprüfverfahren zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens bei konstanter Prüftemperatur oberhalb Raumtemperatur und nach längerem Einwirken einer konstanten Zugkraft (DIN 50118).

Zementit

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

ZTU-Schaubild

Das Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild informiert über Beginn und Ende der Austenitumwandlung beim Abkühlen. Es stellt sozusagen eine Erweiterung des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms in die dritte Dimension, die Zeit, dar. Die Variante für isothermisches Umwandeln gibt für jede Isotherme Beginn und Ende der Umwandlung an. Zusätzlich erhält man Angaben über Umwandlungsgefüge und Härte.

Literaturverzeichnis

Bargel / Schulz;
Werkstoffkunde, Düsseldorf, 1994; VDI-Verlag

Berns, H.
Stahlkunde für Ingenieure; ISBN 3-540-54557-3 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1991

Catterjee-Fischer, Ruth
Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, 1995; Expert-Verlag

Feurer, M.: Lueg, J. & Schürmann, H. (2009). Stahl-Lexikon –
Ein material-, produkt- und arbeitskundliches Nachschlagewerk für den Stahlhandel.
27. Auflage. Hg.: Bundesverband Deutscher Stahlhandel; BDS – AG, Düsseldorf

Ilschner, B.: Singer, F. (2002):
Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik:
Eigenschaften, Vorgänge, Technologien.
3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag

Kiessler, H. (1991):
Kleine Stahlkunde für den Maschinenbau. 3. Auflage. Düsseldorf: Verlag Stahl Eisen mbH.

Läpple, V.: Drube, B.; Wittke, G. & Kammer, C. (2011).
Werkstofftechnik Maschinenbau –
Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen.
3. Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel.

Riehle, M. & Simmchen, E. (2000):
Grundlagen der Werkstofftechnik.
2. Auflage. Stuttgart:
Dt. Verlag für Grundstoffindustrie.

Ruge, Jürgen/Wohlfahrt, Helmut
Technologie der Werkstoffe

Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hg.)
Stahlfibel, Düsseldorf, 2009;
Verlag Stahleisen

Deutsches Institut für Normung (DIN)
Stahl. Tabellenbuch für Auswahl und Anwendung, Berlin Düsseldorf, 1995;
Verlag Stahleisen