

GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGEN THERMISCHER VERFAHREN:

In regelmäßiger Folge stellen wir Ihnen physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen sowie aktuelle Anwendungsbeispiele industrieller thermischer Verfahren vor.

Folge 1: Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm.

Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm

als Grundlage für die Wärmebehandlung von Stahl

Eisen ist das Basismaterial aller Stähle. Es ist polymorph, d. h. es ändert seine Kristallstruktur mit der Temperatur.

Bild 1 und **Bild 2** veranschaulichen den Aufbau der Gitterstrukturen des reinen Eisens sowie die Temperaturabhängigkeit bei der Abkühlung und der Erwärmung.

Betrachten wir die Änderungen des Kristallgitters einmal während der Abkühlung des reinen Eisens: Bei gleichgewichtsnaher Abkühlung bildet das reine Eisen unterhalb des Erstarrungspunktes von 1.536 °C zunächst die kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur, das δ -Eisen, aus. Im Temperaturbereich zwischen 1.392 °C bis 911 °C nimmt das Reineisen dann die kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur (kfz) an, das sogenannte γ -Eisen. Nach der Umwandlung bei 911 °C (A_3 -Temperatur) liegt dann wieder die kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur vor, die nun als α -Eisen bezeichnet wird. Die Kristallgitter bilden sich sowohl bei der Abkühlung als auch bei der Erwärmung entsprechend aus.

Die Umwandlungstemperaturen werden auch mit den Kürzeln A_4 , A_3 und A_2 bezeichnet. Bei der Temperatur A_2 findet jedoch keine Gitteränderung statt. Das Eisen verliert oberhalb der sogenannten Curie-Temperatur von 769 °C seine ferromagnetischen Eigenschaften und wird unmagnetisch. Zur Unterscheidung können die Temperaturen A_4 , A_3 , A_2 zusätzlich mit den Indices c und r versehen werden. So wird z. B. die A_3 -Temperatur bei der Erwärmung als Ac_3 und bei der Abkühlung als Ar_3 bezeichnet (chaffage franz. Erwärmung / refroidissement franz. Abkühlung).

Aufbau des Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms

Durch das Zulegieren von Kohlenstoff wird aus dem Eisen Stahl, der wohl industriell bedeutendste Konstruktionswerkstoff. Der Kohlenstoff ändert schon in geringen Gehalten die Eigenschaften des Materials, z. B. im Hinblick auf Festigkeit, Duktilität und Härtebarkeit. Die jeweiligen Eigenschaften können zudem durch eine angepasste Wärmebehandlung in weiten Grenzen beeinflusst werden. Im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ist der Kohlenstoffgehalt gegenüber der Temperatur aufgetragen (**Bild 3**).

Stahl ist definiert als eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit weniger als 2,06 %C. Liegt der C-Gehalt darüber, sprechen wir von Gusseisenwerkstoffen, welche im Gegensatz zu den Stählen weder kalt- noch warmumformbar sind. Im Hinblick auf die Wärmebehandlung von Stahl können wir uns somit auf den für Stahl relevanten Ausschnitt des

Eisenkohlenstoff-Diagramms konzentrieren, die sogenannte Stahlecke (**Bild 4**).

Das binäre Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff zeigt die einzelnen Phasengebiete in Abhängigkeit von der Temperatur und dem C-Gehalt bei sehr langsamer, gleichgewichtsnaher Erwärmung bzw. Abkühlung auf.

Das kubisch-raumzentrierte α -Eisen wird metallographisch auch als Ferrit (oder α -Mischkristall) und das kubisch-flächenzentrierte γ -Eisen als Austenit (oder γ -Mischkristall) bezeichnet. Neben den Einphasengebieten, die wir im Grundsatz schon von der Abkühl- und Erwärmungskurve des reinen Eisens kennen (Bild 2), existieren im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm nun neben Ferrit und Austenit auch Zweiphasengebiete. Die Umwandlungsvorgänge bei gleichgewichtsnaher Erwärmung oder Abkühlung finden bei den Stählen in einem Temperaturbereich statt, inner-

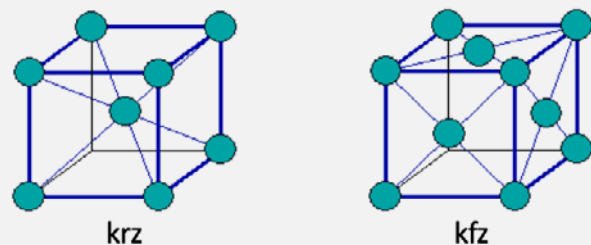


Bild 1: Kubisch-raumzentriertes (krz) und kubisch-flächenzentriertes (kfz) Kristallgitter des Eisens

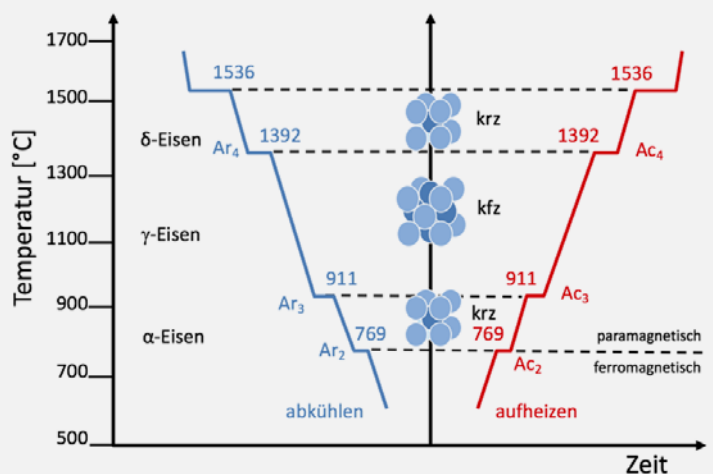


Bild 2: Umwandlungstemperaturen und Kristallgitter bei der Abkühlung und Erwärmung von Eisen

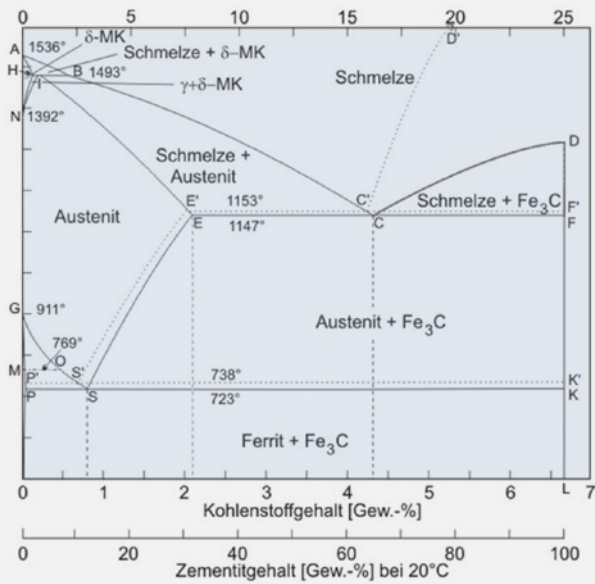


Bild 3: Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm

halb dessen zwei Phasen nebeneinander vorliegen und sich je nach Temperatur im Mengenverhältnis zueinander ändern. Auch der C-Gehalt der Phasen Ferrit und Austenit ändert sich temperaturabhängig durch Lösungs- und Ausscheidungsvorgänge.

Mit steigendem Kohlenstoffgehalt ändern sich im Vergleich zum reinen Eisen die Umwandlungstemperaturen. Z. B. fällt die A_3 -Temperatur kontinuierlich ab, bis sie bei 723 °C und 0,8 %C auf die A_1 -Temperatur trifft. Die Schnittpunkte der Umwandlungslinien mit den Achsen oder anderen Linien werden im Sinne einer eindeutigen Zuordnung

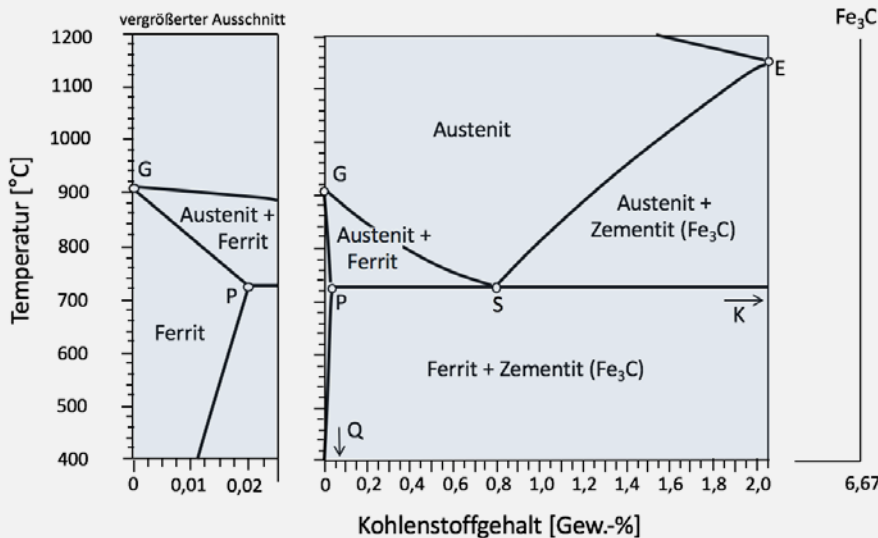


Bild 4: Ausschnitt des Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms (Stahlecke)

mit Buchstaben benannt (siehe Bild 3 und Bild 4). **Bild 5** zeigt die Lage und Benennung der Umwandlungstemperaturen im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm.

Einphasengebiete Ferrit und Austenit

In den beiden Einphasengebieten Ferrit und Austenit ist der Kohlenstoff vollständig in Lösung. Der Kohlenstoff findet Platz auf den Zwischengitterplätzen des krz- bzw. kfz-Kristallgitters – bevorzugt auf den Oktaederlücken.

Doch die Löslichkeit für Kohlenstoff im Ferrit und im Austenit ist sehr begrenzt. Da die Gitterlücken im krz-Ferrit deutlich kleiner sind als im kfz-Austenit, ist auch die Löslichkeit für Kohlenstoff hier deutlich geringer. So ist das Einphasengebiet des reinen Ferrits überhaupt nur bei sehr geringen C-Gehalten existent. Im Punkt P ist die max. Löslichkeit für Kohlenstoff im Ferrit bei 723 °C mit 0,02 %C bereits erreicht und nimmt mit der Temperatur entlang der Linie P-Q weiter ab. Bei Raumtemperatur ist praktisch keine Löslichkeit für den Kohlenstoff mehr gegeben.

Oberhalb der Linie G-S-E besteht das Gefüge des Stahls ausschließlich aus dem kfz-Austenit, der aufgrund der größeren Gitterlücken eine vergleichsweise höhere Kohlenstofflöslichkeit aufweist. Die max. Löslichkeit für Kohlenstoff ist im Punkt E bei 1.147 °C mit 2,06 %C geben.

Umwandlungsvorgänge im Zweiphasengebiet Austenit-Ferrit

Während die Umwandlung von der krz- zur kfz-Kristallstruktur im reinen Eisen bei einer Temperatur von 911 °C vollständig abläuft, findet die Gefügeumwandlung bei Stählen in Abhängigkeit vom C-Gehalt in einem Temperaturbereich statt.

Bei der Erwärmung im Zweiphasengebiet Austenit-Ferrit (P-S-G) wandelt bei Stählen mit weniger als 0,8 %C (untereutektoiden Stähle) immer mehr Ferrit in Austenit um, bis sich bei Erreichen der A_3 -Temperatur der gesamte Ferrit aufgelöst hat.

Bei der Abkühlung scheidet sich hingegen immer mehr Ferrit aus dem Austenit aus. Da der sich bildende Ferrit kaum Kohlenstoff lösen kann, reichert sich der verbleibende Austenit entlang der Linie G-S immer stärker mit Kohlenstoff an, bis bei 723 °C ein Gehalt von 0,8 %C erreicht ist. Bei der A_1 -Temperatur zerfällt der mit Kohlenstoff angereicherte Austenit in Ferrit und Zementit (Fe_3C), einer intermetallischen Verbindung aus Eisen und Kohlenstoff. Der Kohlenstoff liegt hier als Eisencarbid im Gefüge vor, das thermodynamisch gesehen nicht stabil ist. Aus diesem Grund werden in der Lehre auch das metastabile und das stabile Eisen-Koh-

lenstoff-Diagramm unterschieden. Wir konzentrieren uns ausschließlich auf das metastabile Diagramm, da in der Praxis der Wärmebehandlung bei üblichen Temperaturen und Haltezeiten das Eisencarbid nicht zerfällt.

Umwandlungsvorgänge im Zweiphasengebiet Austenit-Zementit

Bei C-Gehalten über 0,8 % (übereutektoide Stähle) existiert oberhalb der A_1 -Temperatur kein Ferrit mehr. Zwischen der A_1 - und A_{cm} -Temperatur liegt neben dem Austenit Zementit im Gefüge vor, der sich auf den Korngrenzen des Stahls anreichert (Sekundärzementit).

Bei der Erwärmung steigt die Löslichkeit für Kohlenstoff im Austenit, sodass mit der Temperatur immer mehr Fe_3C in Lösung gebracht werden kann. Bei Erreichen der A_{cm} -Temperatur (Linie E-S) ist der gesamte Zementit in Lösung.

Bei der Abkühlung scheidet sich hingegen zunehmend Zementit im Gefüge aus, wodurch der verbleibende Austenit entlang der Linie E-S mehr und mehr an Kohlenstoff verarmt, bis der Austenit bei 723 °C und einem Gehalt von 0,8 %C wiederum in Ferrit und Zementit zerfällt.

Gefügestrukturen im Zweiphasengebiet Ferrit-Zementit

Die Gefügeausbildung unlegierter Stähle hängt bei gleichgewichtsnaher Abkühlung vom C-Gehalt des Stahls ab. Je nach C-Gehalt liegt mehr oder weniger Zementit bei Raumtemperatur im Gefüge vor. Die Zementitphase kann in unterschiedlicher Ausprägung im Gefüge in Erscheinung treten. Bei untereutektoiden Stählen mit einem Gehalt kleiner als 0,8 %C liegt der Zementit in Form von Perlit vor. Je höher der C-Gehalt, desto größer sind die Anteile von Perlit im Gefüge. Perlit ist keine eigene Phase, sondern besteht aus den beiden Phasen Ferrit und Zementit in einer lamellaren Struktur vor, die auch als zeilig, streifig oder plattenförmig bezeichnet wird (**Bild 6**).

Der Perlit bildet sich aus dem Austenit bei Abkühlung auf die A_1 -Temperatur (perlitische Reaktion) Die Bildungsmechanismen der Perlitbildung sind Diffusions- und Ausscheidungsvorgänge des Kohlenstoffs aus dem Austenit. Das Streben des Kohlenstoffs nach kurzen Diffusionswegen bis zur Ausscheidung als Zementit führt zu der lamellaren Struktur des Perlits.

Bild 7 veranschaulicht die unterschiedlichen Gefügeausbildungen in Abhängigkeit vom C-Gehalt bei ausgewählten unlegierten Stählen.

Der Stahl mit etwa 0,1 %C weist nur sehr geringe Perlitanteile im Gefüge auf. Mit dem C-Gehalt steigt der Perlitgehalt an. Perlit selbst besteht aus 0,8 %C. Bei unlegierten Stählen mit einem C-Gehalt von 0,8 % bildet sich das Gefüge daher rein perlitisch aus. Bei übereutektischen Stählen größer 0,8 %C scheidet sich der Kohlenstoff mit ansteigendem C-Gehalt zunehmend auch auf den Korn-

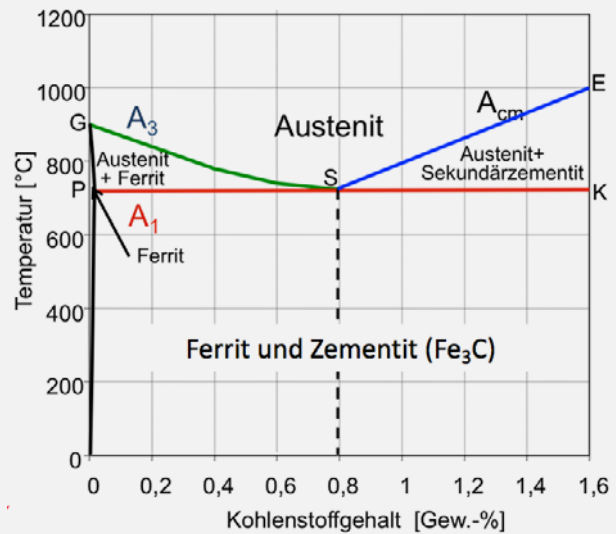


Bild 5: Lage und Benennung der Umwandlungstemperaturen im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm

grenzen aus. Typisch für Stähle mit hohen C-Gehalten (z. B. Werkzeugstähle) ist die netzartige Struktur der Zementitausscheidungen auf den Korngrenzen, wie sie auch in Bild 7 gut zu erkennen ist.

Grenzen des Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms

Aus dem Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm können viele Hinweise für die Wärmebehandlung von Stählen abgeleitet werden. In der Praxis werden auf Basis des Diagramms für eine Vielzahl von unlegierten und legierten Stählen die Wärmebehandlungsparameter wie die Glüh- und Härtetemperaturen abgeleitet. Allerdings ist die Aussagekraft des Diagramms begrenzt.

Zum einen besitzt ein binäres Zustandsdiagramm nur

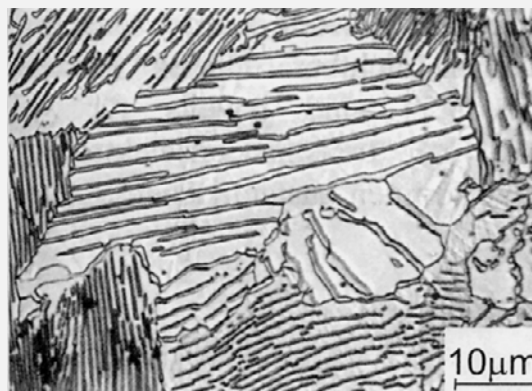


Bild 6: Lamellare Gefügestruktur des Perlits

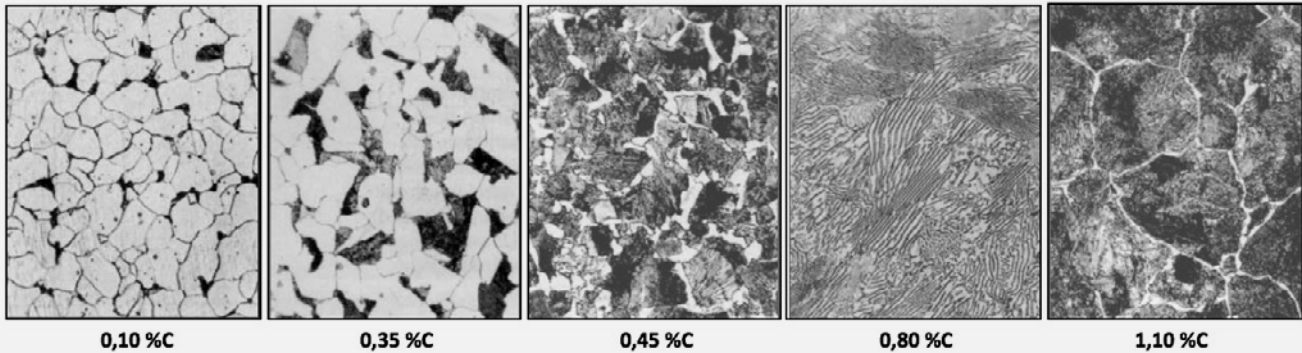


Bild 7: Gefügeausbildungen des Perlits in Abhängigkeit vom C-Gehalt

für das thermodynamische Gleichgewicht exakte Gültigkeit – spricht für eine „unendlich“ langsame Abkühlung und Erwärmung, wie sie schon aus wirtschaftlichen Gründen in der Praxis nicht erfolgen kann.

Zum anderen beeinflussen Legierungselemente die Umwandlungstemperaturen im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm und somit die Existenzbereiche der Ein- und Zweiphasengebiete. Ferritbildner, z.B. Cr, Al, V und Mo, stabilisieren den Ferrit, während Austenitbildner wie Ni, Co, Mn und N das Austenitgebiet erweitern.

Streng genommen ist das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm daher nur für Stähle, die ausschließlich aus Eisen und Kohlenstoff bestehen, anwendbar. In der Praxis enthalten auch unlegierte Stähle neben dem Kohlenstoff weitere Elemente, die bei der Stahlerzeugung der Schmelze bewusst zugegeben werden oder auch unerwünscht über das Erz oder den Schrott in den Stahl gelangen.

Das Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff kann daher für die Wärmebehandlung, insbesondere bei legierten Stählen, nur Anhaltspunkte für die inneren Vorgänge bei der Erwärmung, beim Halten auf Behandlungstemperatur und bei der Abkühlung liefern – dennoch ist es für den Wärmebehandler ein wesentliches und unverzichtbares Hilfsmittel.

AUTOR



Dipl.-Ing. **Marco Jost**
 IBW Dr. Irretier GmbH
 Düsseldorf
 Tel.: 0177 / 2359536
 marco.jost@ibw-irretier.de



PROZESSWÄRME-Tagung

Härtereipraxis 2018

Wärmebehandlung - Prozess- und Anlagentechnik - Qualitätssicherung

11.-13. Juni 2018, Mercure Hotel Messe & Kongress, Dortmund

Termin:

- Montag, **11. Juni 2018** (optional)
Firmenbesichtigung (16:00 – 17:30 Uhr)
Get-together ab 19:00 Uhr
- Dienstag, **12.06.2018**, Seminar (08:30 – 17:00 Uhr)
Abendveranstaltung ab 19:00 Uhr
- Mittwoch, **13.06.2018**, Seminar (08:30 – 13:30 Uhr)

Ort:

Mercure Hotel Messe & Kongress Dortmund

Zielgruppe:

Aus allen Bereichen der Wärmebehandlung, Maschinen-, Anlagen- und Vorrichtungsbau, Automobilindustrie sowie aus der Stahlerzeugung, der Gießerei- und Umformtechnik.

Mehr Informationen und Online-Anmeldung unter www.haertereipraxis.net

Veranstalter



Vulkan Verlag