2 Grundlagen

2.1 Die α-γ-α Phasenumwandlung in Stahl

Eine Phasenumwandlung in Stahl führt je nach chemischer Zusammensetzung und Prozessführung zu verschiedenen Produktphasen. Dies geschieht durch unterschiedliche Mechanismen der Phasenumwandlung die diffusiv, grenzflächenkontrolliert, über Scherung oder als kombinierter Prozess ablaufen können. Bei der diffusions- und grenzflächenkontrollierten Phasenumwandlung entsteht aus dem Austenit meistens ein ferritisches bzw. perlitisches Gefüge. Über den Schermechanismus entwickelt sich ein martensitisches Gefüge oder über einen kombinierten Prozess ein bainitisches Gefüge. Welche Phase sich dabei bildet, ist abhängig vom Unterschied im chemischen Potential und den eingestellten Zustandsparametern (Temperatur, Druck, Zusammensetzung). Die ferritische bzw. perlitische Phasenumwandlung ist dabei über einen Keimbildungs- und Wachstumsprozess definiert.

Die entscheidende Phasenumwandlung in Stahl tritt während des Warmwalzens (Abb. 2.1) des Flachproduktes auf. Da das Kaltwalzen in vielen Fällen nicht mehr durchgeführt wird, hat die Phasenumwandlung als materialkundlicher Vorgang extrem an Bedeutung gewonnen.

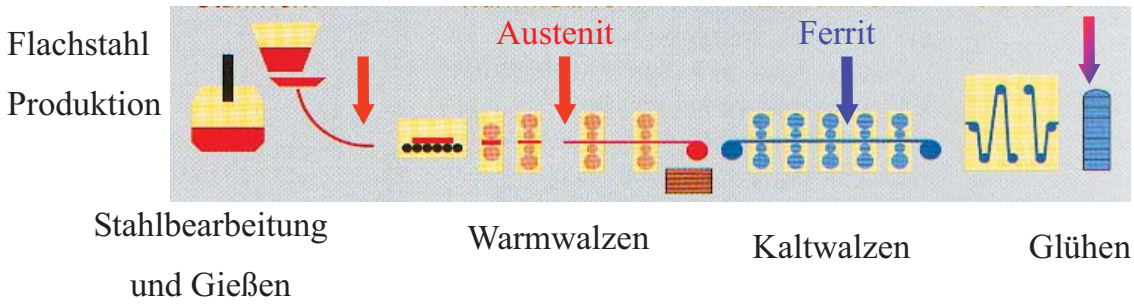

Abb. 2.1: Schema der Prozesskette im Bereich der Flachstahlproduktion.

Die α-γ-α Phasenumwandlung in mikrolegierten niedriggekohlten Stählen ist reversibel, das bedeutet, dass nach Abkühlung des Stahls die kubisch flächenzentrierte Hochtemperaturphase Austenit wieder in die kubisch raumzentrierte Niedrigtemperaturphase Ferrit rückumwandelt. Die α-γ-α Phasenumwandlung findet für den gleichgewichtsnahen Zustand im Temperaturbereich zwischen 723°C bis 911°C statt (Abb. 2.2). Zur Untersuchung des Ferrit-Austenit-Ferrit Umwandlungszyklus muss die entsprechende chemische Zusammensetzung vorliegen.

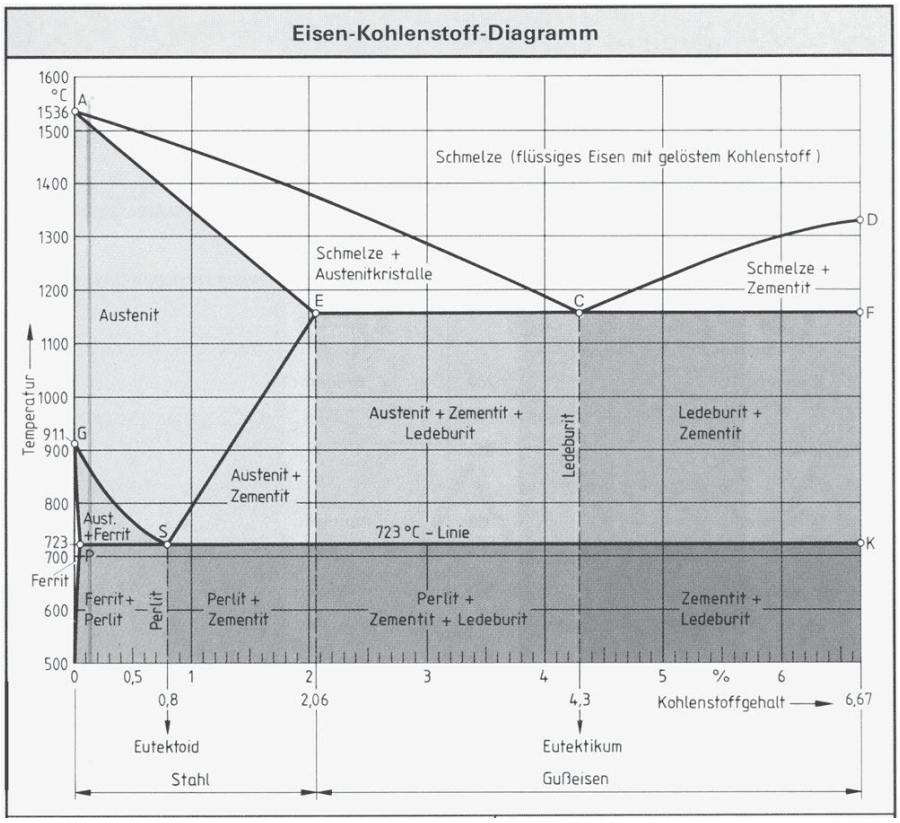

Abb. 2.2: Zustandsdiagramm Stahl [Schranz 2008].

2.2 Keimbildung und Wachstum

Die untersuchte α-γ-α Phasenumwandlung in Stahl ist durch einen Keimbildungs- und Wachstumsprozess gekennzeichnet. Zum besseren Verständnis dieses Prozesses werden die theoretischen Grundlagen im Folgenden kurz erläutert.

2.2.1 Homogene Keimbildung

Im einfachsten Fall wird angenommen, dass sich kugelförmige Keime ohne Beteiligung von Gitterdefekten bilden. Bei der Entstehung eines solchen Keimes wird die dem Keimvolumen proportionale Umwandlungsenergie frei, die aus dem Unterschied der spezifischen freien Enthalpien der beiden Phasen resultiert und der treibenden Kraft der Umwandlung entspricht. Zur Bildung der neuen Grenzfläche hingegen wird eine der Keimoberfläche proportionale Grenzflächenenergie und bei Auftreten von Kohärenzspannungen eine dem Keimvolumen proportionale Verzerrungsenergie benötigt. Für die Keimbildungsarbeit A ergibt sich also:

$$A = -\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \frac{\Delta G}{Vp} + 4\pi r^2 \cdot \sigma + \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \varepsilon \qquad (2.1)$$

r= Keimradius, ΔG= molare freie Umwandlungsenthalpie, V_p= Molvolumen des Keims, σ= spezifische Grenzflächenenergie, ε= spezifische Verzerrungsenergie.

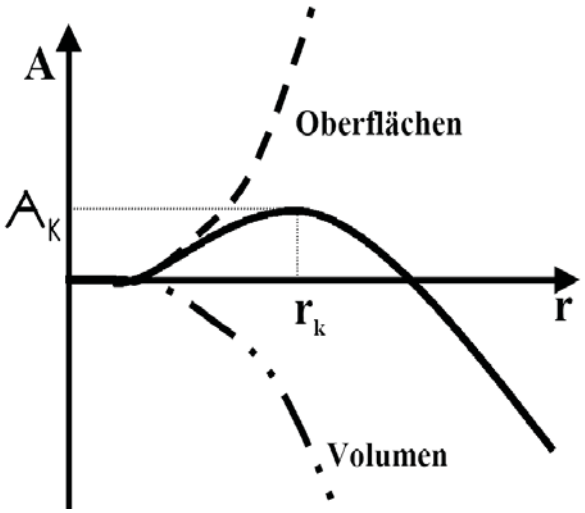

Abb. 2.3: Keimbildungsarbeit A in Abhängigkeit vom Radius r.

Die in Abbildung 2.3 gezeigte Abhängigkeit der Keimbildungsarbeit vom Keimradius besagt, dass zur Keimbildung eine Energieschwelle überwunden werden muss, deren Höhe der kritischen Keimbildungsarbeit A_k entspricht:

$$A_k = \frac{16}{3}\pi \frac{\sigma^3}{\left(\frac{\Delta G}{V_p} - \varepsilon\right)^2} \tag{2.2}$$

Die kritische Keimbildungsarbeit A_k hängt von der spezifischen Grenzflächen- und Verzerrungsenergie und über ΔG von Temperatur und Übersättigung ab. Der entsprechende kritische Keimradius r_k ergibt sich durch:

$$r_k = \frac{2\sigma}{\left(\frac{\Delta G}{V_p} - \varepsilon\right)} \tag{2.3}$$

Nur Keime mit $r > r_k$ können unter Energieabnahme wachsen, wobei der kritische Keim sich im labilen Gleichgewicht mit dem übersättigten Mischkristall befindet. Ein Keim mit $r < r_k$ ist dabei instabil und zerfällt.

2.2.2 Heterogene Keimbildung

An vielen planaren Defekten wie beispielsweise Ausscheidungen/Matrixschnittstellen, Stapelfehler, Korngrenzen (Tripelpunkte) und freie Oberflächen kann es zu einer heterogenen Keimbildung kommen, wenn sie die freie Enthalpie verringern. Stapelfehler sind jedoch eher selten potentielle Keimbildungsstellen, wegen ihrer niedrigen Energie im Vergleich zur Großwinkelkorngrenze. Im Folgenden soll näher auf die heterogene Keimbildung an Korngrenzen eingegangen werden.

Die Korngrenzen erleichtern besonders die Keimbildung neuer inkohärenter Phasen, da die Keimoberfläche nur teilweise neu gebildet werden muss. Hierzu muss weniger Grenzflächenenergie aufgebracht werden, was zu einer geringeren Keimbildungsarbeit führt. Es wird angenommen, dass sich die Keimform so einstellt, dass die Grenzflächenenergie (bei festgehaltenem Keimvolumen) minimal wird und die Grenzflächenspannungen im mechanischen Gleichgewicht stehen.

$$\cos\theta = \frac{\sigma_k}{2\sigma_i} \tag{2.4}$$

Daraus resultiert eine linsenförmige Keimgestalt (Abb.2.4). Analog zu Gleichung 2.2 kann die Keimbildungsarbeit über die Umwandlungsenergie, die eingesparte Korngrenzenenergie und die Grenzflächenenergie beschrieben werden, wohingegen wegen der Abwesenheit von Kohärenzspannungen ein elastischer Term fehlt.

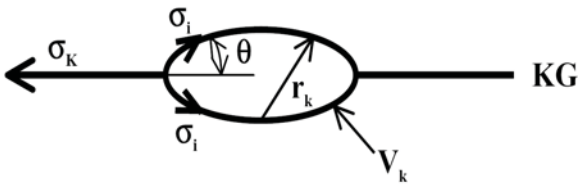

Abb. 2.4: Linsenförmiger Keim an einer Korngrenze.

$$A^{KG} = -\frac{\Delta G}{V_p} \cdot \frac{2}{3}\pi \cdot r^3 \left[2 - 3\cos\theta + (\cos\theta)^3\right] - \sigma_k \pi \cdot r^2 (\sin\theta)^2 + \sigma_i \cdot 4\pi \cdot r^2 (1 - \cos\theta) \qquad (2.5)$$

Die kritische Keimbildungsarbeit ergibt sich zu:

$$A_K^{KG} = \frac{8\pi}{3}\left[2 - 3\cos\theta + (\cos\theta)^3\right] \cdot \frac{\sigma_i^3 V_p^2}{\Delta G^2} \qquad (2.6)$$

Wegen $\sigma_i = \sigma_k$ ist hier $\theta = 60°$ und das Linsenvolumen:

$$V = \frac{2}{3}\pi \cdot r^2 \left[2 - 3\cos\theta + (\cos\theta)^3\right]$$
$$V = \frac{5}{12}\pi \cdot r^3 \qquad (2.7)$$

Der effektive Teilchenradius kann mit $V = \frac{4}{3}\pi \cdot r_{eff}^3$ angegeben werden:

$$r_{eff} = \left(\frac{5}{16}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot r \qquad (2.8)$$

Die kritische Keimbildungsarbeit an Korngrenzen ergibt sich somit als:

$$A_K = \frac{5}{3}\pi \frac{\sigma_i^3 V_p^2}{\Delta G^2} \tag{2.9}$$

Durch die Korngrenze wird die kritische Keimbildungsarbeit um den Faktor 3 im Vergleich zur homogenen Keimbildung reduziert. Für den kritischen Radius erhält man:

$$r_{eff/K} = 1.36 \frac{\sigma_i}{\Delta G} V_p \tag{2.10}$$

Die Reduzierung der kritischen Keimbildungsarbeit ist direkt abhängig von cosθ $\left(= \sigma_K / 2\sigma_i\right)$, d.h. in extremen Fällen, wenn nämlich θ gleich 0° ist, wird das Keimbildungshindernis entfernt.

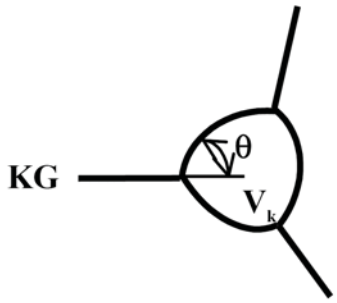

Abb. 2.5: Kritische Keimform zur Keimbildung am Tripelpunkt von Korngrenzen.

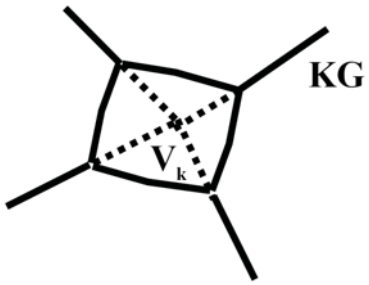

Abb. 2.6: Kritische Keimform zur Keimbildung an der Kornkante.

Die kritische Keimbildungsarbeit und Keimgröße kann durch die Ausbildung der Keime an Tripelpunkten oder Kornkanten (Abb. 2.5 und 2.6) weiter reduziert werden. Dieser Zusammenhang lässt sich in Abbildung 2.7 gut erkennen.

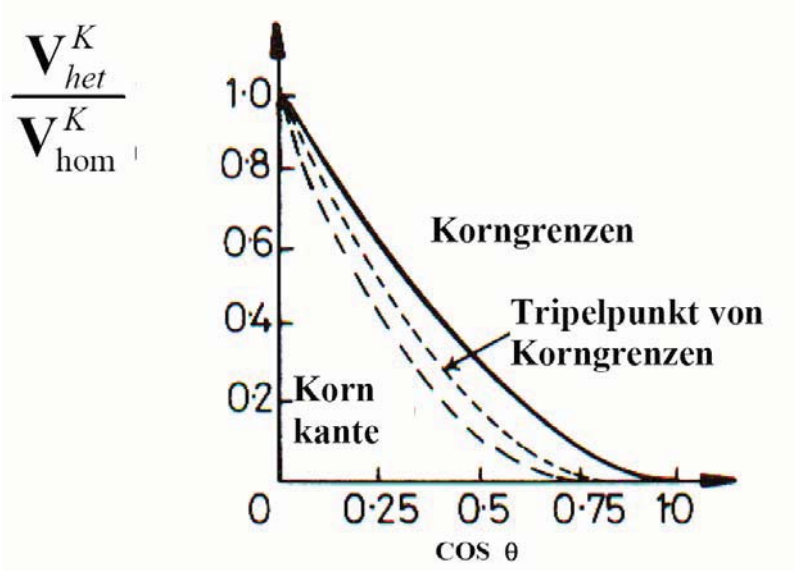

Abb. 2.7: Einfluss von θ auf die Aktivierungsenergie der Korngrenzenkeimbildung im Verhältnis zur homogenen Keimbildung [Chan 1956].

Großwinkelkorngrenzen sind eine der effektivsten Keimbildungsstellen für den Fall von neu ausgebildeten inkohärenten Phasen mit großem σ_i. Eine bezüglich der Korngrenze unsymmetrische Keimform (Abb. 2.8) ist zu erwarten, wenn der Keim mit teilweise kohärenten Grenzflächen ausgebildet wird. Es ergibt sich hierdurch eine niedrige Grenzenergie zwischen der Matrix- und der Neuphase, welche die Bildung der neuen Phase begünstigt. So ausgebildete Keime sollten eine spezielle Orientierungsbeziehung zu einem der Nachbarkörner aufweisen und ein geringes Keimbildungshindernis besitzen. Daher sollte diese Art der Keimbildung bevorzugt stattfinden.

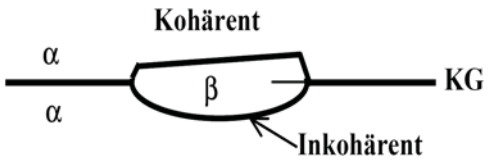

Abb. 2.8: Die kritische Keimgröße wird noch weiter durch die Bildung von niedrig energetischen kohärenten Phasengrenzen reduziert.