

### 14.2.4 Rekristallisation in Legierungen

In Legierungen haben die Fremdatome einen geringen Einfluß auf die Keimbildung, aber mitunter haben sie einen großen Einfluß auf die Korngrenzengeschwindigkeit, da die Fremdatome sich eben dort bevorzugt anlagern. Damit müssen die Fremdatome bei der Bewegung der Korngrenze mit diffundieren, es sei denn, die Kraft auf die Korngrenze ist so groß, daß diese von den Fremdatomen losgerissen werden kann. In diesem Fall kann sie sich frei bewegen. Ist dies jedoch nicht der Fall, so üben die Fremdatome eine Haltekraft auf die Korngrenze aus, die von der Konzentration  $x$  der Fremdatome und der Geschwindigkeit der Korngrenze  $v$  abhängt.

$$v = m(p - p_R(v, x))$$

Hierin sind  $p$  - treibende Kraft und  $p_R$  - Haltekraft. In mehrphasigen Legierungen kann die Rekristallisation beschleunigt, aber auch vollständig unterdrückt werden, je nach Zusammensetzung der Legierung. Generell wird die Rekristallisation durch grobe Partikel gefördert und durch feine, gleichmäßig verteilte Teilchen stark behindert. Dieser Einfluß der Teilchen erklärt sich durch ihren Einfluß auf die Versetzungen, als auch auf die Erholung, Keimbildung und Korngrenzenbewegung. Grobe Teilchen fördern die Keimbildung, feine behindern Erholung (Versetzungsbewegung) und die Korngrenzenbewegung durch eine rücktreibende Kraft. Diese Zener-Kraft ist gegeben durch:

$$p_R = -\frac{3}{2}\gamma\frac{f}{r} \quad (14.9)$$

Hierin ist  $p_R$  - die Haltekraft,  $r$  - Radius der Teilchen,  $f$  - Volumenanteil der Teilchen,  $f/r$  - Dispersionsgrad und  $\gamma$  - Korngrenzenenergie. Zum Beispiel bei  $f = 1\%$ ,  $r = 0,1 \mu\text{m}$  und  $\gamma = 0,6 \text{ Jm}^2$  folgt für die Haltekraft:  $p_R \simeq 0,1 \text{ MPa}$ . Dies entspricht der Größenordnung bei Kornvergrößerung. Damit wird vor allem diese stark beeinflusst.

## 14.3 Kornvergrößerungserscheinungen

Nachdem die primäre Rekristallisation abgeschlossen ist, sind die wachsenden rekristallisierten Körner aneinandergestoßen und haben das verformte Gefüge aufgezehrt. Dieser Zustand weist im Vergleich zum verformten Zustand eine spannungsfreie polykristalline Struktur auf und besitzt demzufolge eine deutlich verringerte freie Enthalpie. Und dennoch befindet sich dieser Zustand noch nicht im Gleichgewicht, da die freie Enthalpie weiter verringert werden kann, indem die große Oberfläche der noch verhältnismäßig kleinen Körner durch Kornwachstum verringert werden kann. Darüberhinaus führen unebene Oberflächen zu Spannungen, die ebenfalls im Zuge der Minimierung der freien Enthalpie abgebaut werden sollen. Den jeweiligen Kornvergrößerungserscheinungen liegen jedoch verschiedene energetische Ursachen als primär wirkendem Mechanismus zu Grunde. Aus diesem Grund werden die Ursachen nicht an dieser Stelle diskutiert, sondern in den einzelnen Abschnitten behandelt.

Die für alle Kornvergrößerungserscheinungen allgemeingültige Beziehung zwischen Körnern, die vergrößert werden und solchen, die von diesen aufgezehrt werden, soll im nun Folgenden anhand eines zweidimensionalen Modells dargelegt werden. An den Verbindungsstellen von drei Körnern müssen die auf den Oberflächenspannungen basierenden Kräfte auf die Korngrenzen im Gleichgewicht sein, damit die Konfiguration stabil ist. Andernfalls kommt es zu Verschiebungen einer Korngrenze, wie es im Folgenden beschrieben wird. Zunächst einmal kann in sehr guter Näherung angenommen werden, daß die Oberflächenspannung in einem Metall oder in einer einphasigen Legierung für alle Großwinkelkorngrenzen etwa gleich groß ist. Die Oberflächenspannungen  $\gamma$ , die entlang der Korngrenzen angelegt sind, werden an den Eckpunkten im Gleichgewicht stehen, vorausgesetzt es gilt:

$$\gamma = 2\gamma \cdot \cos(\Theta/2)$$

und damit gilt  $\cos(\Theta/2) = 1/2$ , woraus folgt  $(\Theta/2) = 60^\circ$  und  $\Theta = 120^\circ$ . Die Gleichgewichtskonfiguration enthält drei Korngrenzen, die sich jeweils unter einem Winkel von  $120^\circ$  treffen. Die Abbildung 14.11 veranschaulicht die geometrischen Begebenheiten.

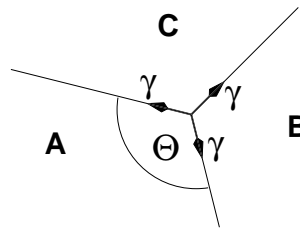


Abbildung 14.11: Gleichgewichtskonfiguration von drei aneinanderstoßenden Korngrenzen.

In einem zweidimensionalen Modell ist der Gleichgewichtszustand vieler Körner durch gerade Korngrenzen gekennzeichnet, die sich unter einem Winkel von  $120^\circ$  schneiden. Die Oberflächenspannungen stehen alle im Gleichgewicht und das Netzwerk aus Korngrenzen ist mechanisch stabil.

In einem primär rekristallisierten Material treffen sich die Korngrenzen natürlich nicht unter einem Winkel von  $120^\circ$ . Dies ist sofort ersichtlich, wenn man ihre Entstehungsgeschichte betrachtet, die nicht für alle Körner gleichzeitig/simultan abläuft. Damit werden einige Körner schon wachsen, während andere noch über das Stadium der Keimbildung hinaus müssen. Die Körner berühren sich damit zu verschiedenen Zeiten und haben dabei aufgrund ihres unterschiedlichen Lebensalters verschiedene Größen - wenn man von einer mittleren Kornwachstumsgeschwindigkeit ausgeht. Das rekristallisierte Gefüge besteht aus verschiedenen großen Körnern mit einer irregulären Form und mit einer unterschiedlichen Anzahl von Facetten (Nachbarkörnern).

### ZUM NACHDENKEN:

- Wie werden Rekristallisationskeime gebildet?
- Unter welchen Voraussetzungen kann ein solcher Keim wachsen?
- Kann es ein System geben, bei dem die Gleichgewichtswinkel nicht alle gleich  $120^\circ$  sind?

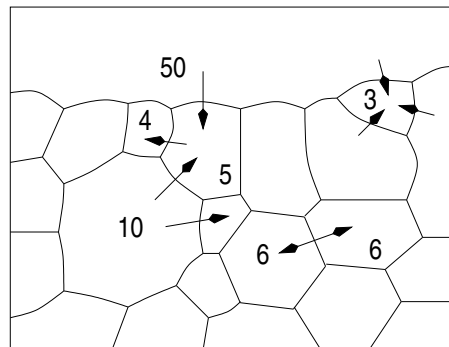


Abbildung 14.12: Zweidimensionales Korngefüge. Die Zahlen geben die Zahl der angrenzenden Nachbarkörner wieder und die Pfeile die Bewegungsrichtungen der Korngrenzen.

In einem zweidimensionalen Modell werden die Körner durch Polygonzüge beschrieben, wobei die Anzahl der Seiten (Nachbarkörner) jede Zahl größer als drei annehmen kann. Die Abbildung 14.12 zeigt beispielhaft ein zweidimensionales Korngefüge, wobei die Zahlen angeben, wieviele Nachbarkörner das jeweilige Korn besitzt (3,4,6,10,50) und die Pfeile zeigen die Richtung der Bewegung der Korngrenze an (in Richtung des Krümmungsmittelpunktes). Aus der Gleichgewichtsbedingung für die Oberflächenspannungen in den Punkten, wo sich drei Körner treffen, kann gefolgert werden, daß Körner mit mehr als sechs Facetten (auch Ecken) durch Korngrenzen begrenzt werden, deren Teilstücke zwischen zwei Treffpunkten mit mehreren Körnern (Ecken) nach innen gekrümmt sind. Körner mit weniger als sechs Nachbarn zeigen Korngrenzen, deren Teilstücke nach außen gekrümmt sind.

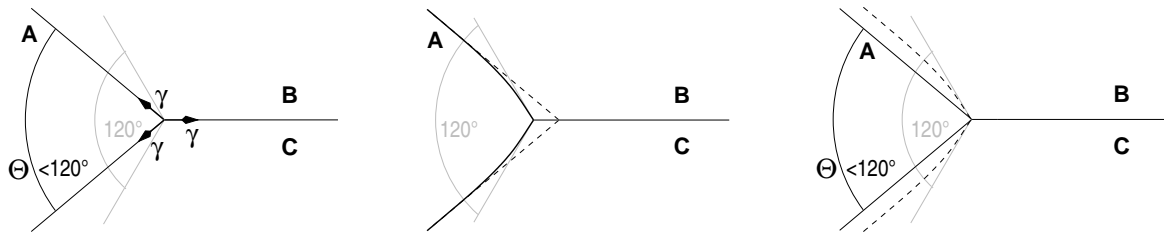


Abbildung 14.13: Stadien der Migration einer Korngrenze an einem Berührungspunkt von drei Korngrenzen.

Die Krümmung nach außen kommt wie folgt zustande: Die Abbildung 14.13 zeigt in zweidimensionaler Darstellung drei Schemata von jeweils drei Körnern, die sich in einem Punkt berühren. Die Körner A, B und C treffen sich in einem Punkt, der Innenwinkel im Korn A ist kleiner als  $120^\circ$ . Dies führt zur Migration der Korngrenze, um an diesem Punkt einen Gleichgewichtswinkel von  $120^\circ$  einzustellen. Da dies im Wesentlichen in der Nähe des Berührungspunktes geschieht, bedeutet diese Migration der Korngrenze eine Krümmung der selben in der Nähe des Berührungspunktes. Da aber eine Krümmung einer Korngrenze eine Kraft auf diese verursacht, die diese Krümmung versucht auszugleichen und in Richtung des Krümmungsmittelpunktes wirkt, kommt es zu einer Begradigung der Korngrenze, wodurch der Innenwinkel des Kornes A noch kleiner wird, als er ursprünglich schon war. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis das Korn A aufgezehrt ist.

Das Bestreben der Korngrenzen, ihre Korngrenzfläche zu verringern, um hierdurch die freie Enthalpie des Materials zu verringern, führt dazu, daß die Korngrenzen in Richtung ihres Krümmungsmittelpunktes wandern und letzten Endes dazu, daß Körner mit weniger als sechs Ecken zugunsten derer mit mehr als sechs Ecken aufgezehrt werden. Körner mit mehr als sechs Ecken wachsen.

Im dreidimensionalen Fall kann man die Korngrenzen im Gleichgewicht haben, wenn die Körner sich an einer Kante treffen, wobei die Winkel  $120^\circ$  sein müssen. Ein Gleichgewichtszustand ist auch in einem Punkt möglich, dann sind vier Körner erforderlich und der Innenwinkel an einer solchen Kornecke beträgt  $109^\circ$ . Es sei an dieser Stelle noch einmal angemerkt, daß diese Betrachtungen davon ausgehen, daß die Oberflächenspannungen an den Korngrenzen in etwa gleich groß sind. Dies ist bei einphasigen Legierungen und Metallen der Fall, bei mehr-komponentigen Legierungen sicherlich nicht. Dann stehen verschiedene Körner verschiedener Phasen unter anderen Innenwinkeln miteinander im Gleichgewicht, da die Phasen unterschiedliche Oberflächenspannungen haben.

### 14.3.1 Stetige Kornvergrößerung

Die Zunahme des mittleren Korndurchmessers bei isothermen Wärmebehandlungen kann durch ein einfaches Zeitgesetz beschrieben werden, das empirisch aufgestellt wurde. Unter der Annahme, daß der mittlere Krümmungsradius der Korngrenze  $R$  proportional zum Durchmesser des Kornes  $D$  ist, sowie daß die mittlere Korngrenzengeschwindigkeit  $v$  proportional zur zeitlichen Änderung des Korndurchmessers  $dD/dt$  ist, kann das Gesetz wie folgt formuliert werden:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 \frac{\gamma}{D}; \quad K_1 \sim \exp \left[ -\frac{Q}{kT} \right] \quad (14.10)$$

Daraus folgt durch Integration:

$$D^2 - D_0^2 = K_2 \gamma t$$

$D_0$  ist die Korngröße der ursprünglichen rekristallisierten Körner und  $t$  ist die Zeit der Wärmebehandlung. Unter der Voraussetzung, daß die Korngröße schon stark zugenommen hat ( $D_0 \ll D$ ), gilt:

$$D = K \cdot \sqrt{t} \quad (14.11)$$

Die mittlere Korngröße wächst also mit der Wurzel der Dauer der Wärmebehandlung. Experimentell wurde diese Abhängigkeit jedoch selten beobachtet, nämlich nur für reine Elemente und für Glühertemperaturen dicht am Schmelzpunkt. Es konnte experimentell gezeigt werden, daß dieses Gesetz eigentlich

folgende Form hat:

$$D = k^n; \quad n = 0, 1 \dots 5 \quad (14.12)$$

Der Exponent  $n$  wird in Abhängigkeit von der Reinheit und der Temperatur beobachtet.

### 14.3.2 Energetische Ursachen der Kornvergrößerungserscheinungen

Die treibende Kraft für die Kornvergrößerungserscheinungen stammt wie gesagt aus den Korngrenzen selbst und hat ihre Ursache in dem Drang des Systems die freie Enthalpie zu verringern, was möglich ist, wenn die Oberfläche der Körner verkleinert wird. Dies ist am einfachsten einzusehen, wenn der Fall der **unstetigen Kornvergrößerung** betrachtet wird. In diesem Fall kann angenommen werden, daß ein sehr großes Korn in eine Umgebung aus kleinen Körnern hineinwächst. Nimmt man das Korn der Einfachheit halber als Würfel an, kann sein Durchmesser  $d$  durch die Kantenlänge des Würfels gut angenähert werden. Die Korngrenzenenergie pro Volumeneinheit stellt die treibende Kraft auf die Korngrenze dar, wobei die spezifische Korngrenzenenergie  $\gamma$  [ $\text{Jm}^{-2}$ ] zu berücksichtigen ist.

$$p = \frac{3d^2\gamma}{d^3} = \frac{3\gamma}{d} \quad (14.13)$$

Der Faktor 3 ergibt sich, da jede der sechs Würfelflächen zu zwei Körnern gehört. Ein üblicher Wert für einen Korndurchmesser ist  $d = 10^{-4}$  m und  $\gamma = 1 \text{ Jm}^{-2}$ , so erhält man  $p = 0,03 \text{ MPa}$  ( $= 3 \cdot 10^4 \text{ Jm}^{-2}$ ). Bei der **stetigen Kornvergrößerung** wäre dieser Wert viel kleiner, wodurch klar wird, daß die Kornvergrößerungserscheinungen viel langsamer und bei höheren Temperaturen ablaufen als die primäre Rekristallisation, die mit  $p = 10 \text{ MPa}$  eine wesentlich größere treibende Kraft besitzt.

Die treibende Kraft ist durch den Druck auf die Oberfläche der Korngrenze gegeben. Betrachtet man zur Berechnung der Kraft die Änderung der Oberfläche und des Volumens bei der Schrumpfung eines Kugelsegments mit dem Kugelradius  $R$ , so ergibt sich:

$$p = \frac{8\pi R\gamma dR}{4\pi R^2 dR} = \frac{2\gamma}{R} \quad (14.14)$$

Ist  $R$  so groß wie der Korndurchmesser, stimmen die beiden nach den Gleichungen 14.13 und 14.14 bestimmten Werte für  $p$  gut überein. Im Allgemeinen ist die Krümmung der Korngrenze jedoch viel geringer und folglich der Krümmungsradius viel größer. Daher ist die treibende Kraft bei der stetigen Kornvergrößerung (Gl. 14.14) um diesen Faktor kleiner als die treibende Kraft für die unstetige Kornvergrößerung (Gl. 14.13), sodaß die stetige Kornvergrößerung viel langsamer abläuft als die unstetige. Der Faktor, um den die unstetige Kornvergrößerung schneller ist als die stetige, liegt in der Größenordnung von 5...10.

Die tertiäre Rekristallisation wird von der Energie der freien Oberfläche getrieben. Wenn ein Korn die kleinste Dimension der Probe (z. B. die Blechdicke) erreicht hat, so verläuft die Korngrenze senkrecht zur Oberfläche durch den gesamten Querschnitt. Das Korn wird dann trotzdem noch wachsen, wenn es einen hinreichend großen Orientierungsunterschied zum Nachbarkorn und eine geringere Oberflächenenergie als dieses aufweist ( $\gamma_1 < \gamma_2$ ). Die treibende Kraft ist gegeben durch:

$$p = \frac{2(\gamma_2 - \gamma_1)B dx}{Bh dx} = \frac{2\Delta\gamma}{h} \quad (14.15)$$

Hierin sind:  $h$  - Blechhöhe,  $B$  - Blechbreite,  $\gamma_1, \gamma_2$  - Oberflächenenergien der Nachbarkörner und  $dx$  - Korngrenzendicke. Die treibende Kraft wird von der Oberfläche auf die im Volumen verlaufende Korngrenze übertragen, weil die Bewegung der Korngrenze an der Oberfläche eine Krümmung verursacht. Setzt man  $\Delta\gamma_0 = 0,1 \text{ Jm}^{-2}$  und  $h = 10^{-4}$  m, so gilt  $p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$  ( $= 2 \cdot 10^3 \text{ Jm}^{-2}$ ). Da die Oberflächenenergie von der umgebenden Atmosphäre abhängt, kann durch geeignete Wahl der Glühatmosphäre  $\Delta\gamma$  vergrößert oder verkleinert werden. In einigen Fällen ist es sogar möglich, das Vorzeichen zu ändern und damit die tertiäre Rekristallisation zu beeinflussen.

### 14.3.3 Stetige Kornvergrößerung in Legierungen

Enthält eine Probe Ausscheidungen und wird die Probe bei einer Temperatur geglüht, bei der sich die Ausscheidungen nicht auflösen, so findet die stetige Kornvergrößerung nur solange statt, bis sich eine

maximale Korngröße eingestellt hat. Diese hängt von der Teilchengröße und von der Menge der Ausscheidungen (oder Dispersoide) ab. Die Korngröße ist kleiner als in einem einphasigen oder vergleichbaren Werkstoff. Die Hemmung der stetigen Kornvergrößerung durch Ausscheidungen beruht auf der Wirkung der Zener Kraft. Zum Losreißen der Korngrenze muß eine Kraft überwunden werden.

$$p_R = -\frac{3}{2}\gamma\frac{f}{r}$$

Die treibende Kraft für die stetige Kornvergrößerung wird mit fortschreitender Kornvergrößerung immer kleiner, da die Krümmung der Korngrenzen immer geringer wird.

Die stetige Kornvergrößerung kommt zum Stillstand, wenn die treibende Kraft und die rückhaltende Kraft gleich groß sind.

$$\begin{aligned} p &= p_R \\ \frac{2\gamma}{\alpha d} &= 3\gamma\frac{f}{d_P} \end{aligned} \quad (14.16)$$

Hierin sind:  $d_P$  - Durchmesser und  $f$  - Volumenanteil der Dispersoide,  $\gamma$  - Korngrenzenenergie,  $d$  - Korndurchmesser,  $\alpha$  - Proportionalitätskonstante zwischen  $d$  und  $r$ . Daraus ergibt sich für die (maximale) Korngröße:

$$d = \frac{2}{3}\frac{1}{\alpha}\frac{d_P}{f} \quad (14.17)$$

Da es oft zu einer Vergrößerung der Ausscheidungen kommt, steigt mit  $d_P$  auch der zu erwartende maximale Korndurchmesser an. Dieser bleibt experimentell jedoch oft hinter den hier berechneten zurück, da für diese Berechnungen einige Vereinfachungen vorgenommen wurden.

## 14.4 Korngrenzenbewegungen

Bewegt sich eine Korngrenze unter dem Einfluß einer äußeren Kraft  $p$  [ $\text{Jm}^{-2}$ ], so gewinnt jedes Atom, das dem wachsenden Korn angelagert wird, eine freie Enthalpie, die auf das Atomvolumen bezogen ist. Nähert man das Atomvolumen mit  $b^3$ , so beträgt die gewonnene freie Enthalpie pro Atom  $pb^3$ . Die Geschwindigkeit einer Korngrenze ergibt sich aus der Differenz der thermisch aktivierten Diffusions sprünge von schrumpfenden zum wachsenden Korn (und umgekehrt)

$$v = b\nu_0 x_L \left( \exp\left[-\frac{G_W}{kT}\right] - \exp\left[-\frac{G_W + pb^3}{kT}\right] \right) \quad (14.18)$$

Hierin sind:  $\nu_0$  - atomare Schwingungsfrequenz,  $G_W$  - freie Aktivierungsenthalpie für einen Diffusionsprung durch die Korngrenze  $x_L$  - Leerstellenkonzentration an der Korngrenze. Die Gleichung 14.18 läßt sich vereinfachen, da bei der Rekristallisation stets  $pb^3 \ll kT$  gilt:

$$\begin{aligned} v &\simeq b\nu_0 x_L \left( 1 - 1 + \frac{pb^3}{kT} \right) \exp\left[-\frac{G_W}{kT}\right] \\ &\simeq \frac{pb^4\nu_0 x_L}{kT} \exp\left[-\frac{G_W}{kT}\right] = mp \end{aligned} \quad (14.19)$$

Der Zusammenhang zwischen der Beweglichkeit  $m$  und dem Diffusionskoeffizienten  $D_m$  für Sprünge in die Korngrenze wird durch die Nernst-Einstein-Beziehung beschrieben

$$\begin{aligned} m = \frac{b^2 D_m}{kT} &= \frac{b^2 D_0}{kT} \exp\left[-\frac{Q_m}{kT}\right] \\ &= m_0 \exp\left[-\frac{Q_m}{kT}\right] \end{aligned} \quad (14.20)$$

Die Sprünge durch die Korngrenze sind thermisch mit  $Q_m$  aktiviert.

Die Wachstumsgeschwindigkeit eines Kornes in einem verformten Gefüge kann als Funktion des Orientierungsunterschiedes, der Lage der Korngrenze, des Verformungsgrades und der Temperatur prinzipiell gemessen werden. Diese Messungen zeigen vor allem, daß die Korngrenzengeschwindigkeit von dem Orientierungsunterschied beiderseits der Korngrenze abhängt. Die besonders leicht beweglichen Korngrenzen sind solche, die eine große Anzahl von Koinzidenzgitterpunkten in sich vereinigen. Kleinwinkelkorngrenzen sind nur schwer beweglich. Daß die Beweglichkeit mit zunehmendem Orientierungsunterschied zunimmt klingt plausibel, wenn man bedenkt, wie offen die Struktur von Großwinkelkorngrenzen ist. Bei Kleinwinkelkorngrenzen wird hingegen der umgekehrte Trend beobachtet. Dies wird durch die Abnahme der Beweglichkeit der Korngrenze mit zunehmender Versetzungsdichte erklärt.

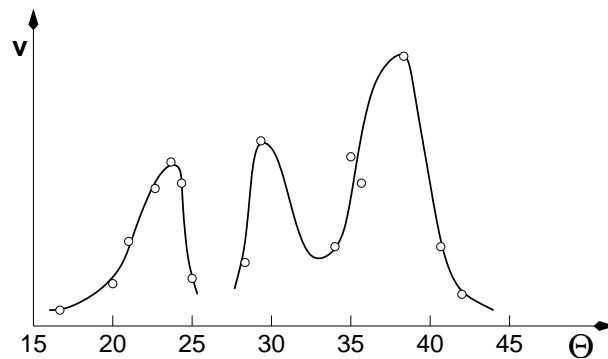


Abbildung 14.14: Geschwindigkeit von Großwinkelkorngrenzen in Abhängigkeit von der Orientierungsdifferenz (Winkel).

Die Abbildung 14.14 zeigt die Korngrenzengeschwindigkeit als Funktion des Orientierungsunterschiedes  $\Theta$  bei Drehung um die  $[1\ 0\ 0]$  Achse eines kubisch-flächenzentrierten Systems. Die Maxima korrespondieren zu den Koinzidenzgitterlagen mit einem Orientierungsunterschied von  $\Theta = 23^\circ$ ,  $28^\circ$  und  $37^\circ$ .

Die Aktivierungsenergie und die Beweglichkeit verhalten sich umgekehrt proportional zur Korngrenzengeschwindigkeit. Daß die Koinzidenzgitterlagen so beweglich sind, liegt daran, daß diese geschlossene, beziehungsweise kompakte Struktur, besonders wenig Fremdatome aufnehmen kann. Im Vergleich zu anderen Orientierungen wird damit die Korngrenzenbeweglichkeit deutlich weniger herabgesetzt. Damit ist die Orientierungsabhängigkeit an die Reinheit der Probe gekoppelt. In besonders reinen Proben wird diese Abhängigkeit der Beweglichkeit der Korngrenzen von der Orientierung nicht erwartet.

#### ZUM NACHDENKEN:

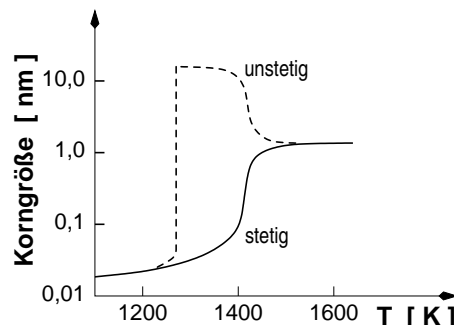
- Warum kommt es zu Kornvergrößerungen?
- Wodurch und wie bewegt sich eine Korngrenze?
- Wie sieht die Korngrenzenenergie als Funktion des Orientierungsunterschiedes der benachbarten Körner aus?

## 14.5 Unstetige Kornvergrößerung

Unter bestimmten Voraussetzungen kann durch eine Wärmebehandlung ein sehr inhomogenes Gefüge entstehen, das aus vielen kleinen und wenigen extrem großen Körnern besteht. Unter den gegebenen Voraussetzungen wachsen die meisten Körner praktisch nicht, oder extrem langsam. Die anderen Körner wachsen und entwickeln sich zu extrem großen Körnern. Die Wachstumskinetik dabei ist sehr ähnlich zu der, die bei der stetigen Kornvergrößerung beobachtet wird. Die unstetige Kornvergrößerung, die auch als **sekundäre Rekristallisation** bezeichnet wird, beginnt bei einer bestimmten Temperatur  $t_{sr}$ . Mit steigender Temperatur nimmt die Intensität des Wachstums der einzelnen Körner ab, da mehr Keime für die unstetige Kornvergrößerung gebildet werden. Gleichzeitig nimmt mit wachsender Temperatur auch das normale Kornwachstum zu, sodaß bei sehr hohen Temperaturen keine unstetige Kornvergrößerung mehr beobachtet wird.

Demzufolge entwickelt sich die unstetige Kornvergrößerung nur in einem bestimmten Temperaturintervall. Die Abbildung 14.15 zeigt im Vergleich die Korngröße von stetig und unstetig wachsenden Körnern in

Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmebehandlung.



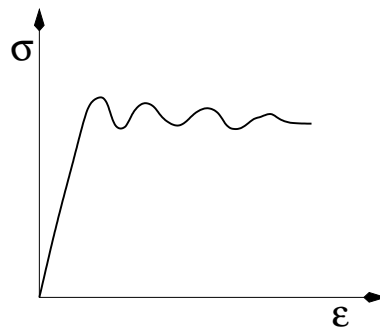
**Abbildung 14.15:** Variation der Korngröße für unstetiges und stetiges Kornwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die prinzipielle Frage lautet nun, warum einige Körner gut und die anderen schlecht wachsen können, das heißt, warum also die Matrix stabilisiert sein kann. Die Matrix kann zum Beispiel durch Dispersoide stabilisiert sein. Wenn diese nicht homogen verteilt sind, ergeben sich zwangsläufig Bereiche mit geringerer Dichte der Dispersoide, in denen verhältnismäßig große Körner entstehen können. Eine andere Ursache kann auf einer bei der stetigen Kornvergrößerung möglicherweise entstandenen Rekristallisationstextur beruhen. Diese Textur kann zum Beispiel auf einer Vorzugsorientierung der Rekristallisationskeime beruhen oder durch eine Auslese der günstig orientierten Körner über eine orientierungsabhängige Wachstumsgeschwindigkeit verursacht sein. Wenn die Matrix eine Textur aufweist, dann werden zwischen den Körnern im wesentlichen schwer bewegliche Kleinwinkelkorngrenzen sein. Hat nun doch ein Korn einen großen Orientierungsunterschied zu seinen Nachbarkörnern und damit zur Matrix, so kann dieses Korn leichter wachsen. Je perfekter die Textur ist, desto deutlicher stellt sich die unstetige Kornvergrößerung in ihrem Erscheinungsbild dar. Es sei noch angemerkt, daß es neben diesen auch andere Ursachen für ein inhomogenes und stabilisiertes Korngefüge gibt, das die Grundvoraussetzung für die unstetige Kornvergrößerung ist.

Nach der unstetigen Kornvergrößerung werden bevorzugt Korngrenzen mit niedriger Energie beobachtet. Dies sind insbesondere die Koinzidenzkorngrenzen (z. B.  $\Sigma = 3$ ).

## 14.6 Dynamische Rekristallisation

Bei der Warmumformung kann die Rekristallisation auch während der Verformung auftreten, wenn die Temperatur größer als die Hälfte der Schmelztemperatur ist und damit auch oberhalb der Rekristallisationstemperatur liegt. Diese während der Verformung auftretende Rekristallisation wird als dynamische Rekristallisation bezeichnet.



**Abbildung 14.16:** Typische Spannungs-Dehnungs-Kurve mit mehreren Maxima der Fließspannung.

In einer Verfestigungskurve können ein oder mehrere Maxima der Fließspannung beobachtet werden.

Dieser Vorgang ist technologisch wichtig, da während der Umformung die Fliessspannung klein gehalten werden soll, damit hierdurch die bei der Umformung wirkenden Kräfte auf einem niedrigen Niveau gehalten werden können. Da mit steigender Fliessspannung die Korngröße abnimmt, kann durch geeignete Wahl der Parameter das Gefüge gezielt eingestellt werden.