

Abbildung 3.7: Temperaturverlauf an der Erstarungsfront eines Kristalls bei Wärmeabfuhr durch die Schmelze.

Wächst in diesem Regime der Kristall über die Front hinaus, so wächst er sehr schnell weiter, da an ihm die kalte Schmelze kristallisiert. Es bilden sich lange und dünne Kristalle, die sich häufig in andere Richtungen weiter verzweigen. Diese Gebilde heißen Dendriten. In diesem Fall bewegt sich die Erstarungsfront uneben und nicht stabil.

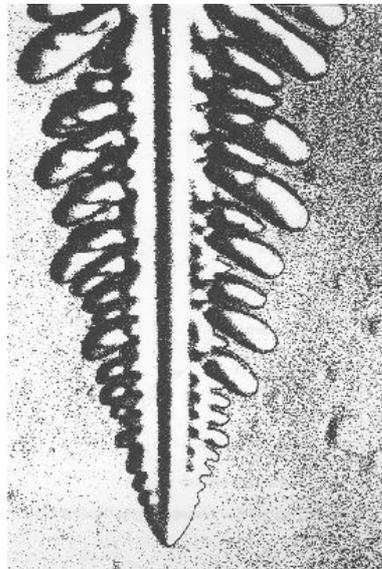


Abbildung 3.8: Strukturbildung eines wachsenden Dendriten (T. Wilke)

Einfluß von Fremdatomen

Fremdatome neigen bei der Erstarrung dazu, sich in der Schmelze anzureichern. Hierdurch wird die Erstarrungstemperatur weiter abgesenkt. In Legierungen besteht in der Regel ein endlicher Temperaturbereich, in dem Schmelze und Kristall nebeneinander im Gleichgewicht stehen. Auf diesen Sachverhalt wird im Zusammenhang mit den Phasendiagrammen im nächsten Kapitel eingegangen.

3.3 Erstarrung von Legierungen

Da es neben der Kenntnis über die Existenz und das Aussehen von Phasendiagrammen wichtig ist, diese auch lesen zu können, werden nun noch einige besondere Punkte bei der Erstarrung von mehrkomponentigen Schmelzen herausgestellt und danach im Detail auf die Phasendiagramme eingegangen. Da in Legierungen die Schmelze und eine feste Phase durch ein Homogenitätsgebiet, in dem beide Phasen nebeneinander vorliegen, getrennt sind ist es wichtig zu verstehen, wie die Kristallisation einer festen Phase von Statten geht.

Kristallisiert man aus einer Schmelze bei einer festen Temperatur eine feste Phase aus, so haben Schmelze und feste Phase eine nominell unterschiedliche Zusammensetzung, nämlich diejenige, an denen die Konode bei der Temperatur die Solidus- beziehungsweise Liquiduslinie durchstößt. Im Zusammenhang mit der Kristallisation wurde bereits die Problematik des Wärmeflusses besprochen. An dieser Stelle tritt noch das Problem der Diffusion hinzu, da es zwischen Schmelze und fester Phase einen Konzentrationsunterschied gibt. Auf Diffusionsprozesse wird später noch einmal genauer eingegangen; an dieser Stelle betrachten wir die isotherme Diffusion mit konstanten Diffusionskoeffizienten. Die Diffusion ist die Voraussetzung für die Beschreibung der Kinetik von Festkörperreaktionen, wobei eine inhomogene Konzentrationsverteilung Voraussetzung für die Diffusion ist. Diese ist zugleich die treibende Kraft.

$$j_D = -D \frac{dx}{dr} \quad (3.8)$$

j_D - Diffusionsstrom; D - Diffusionskonstante; $\frac{dx}{dr}$ - örtliche Änderung der Konzentration. Dies ist das sogenannte erste Ficksche Gesetz.

Wenn die Wärme durch den Kristall abgeleitet wird ergibt sich ein Temperaturverlauf, wie er in den rechten Teilbildern von Abbildung 3.9 für verschiedene Diffusionszustände gezeigt wird. Die gestrichelten Linien geben den Temperaturverlauf an der Erstarrungsfront beim Durchlaufen der Front wieder. Die gepunktete Kurve gibt die Liquiduslinie der Schmelze wieder, die sich gemäß des Zustandsdiagramms (oben) mit der Zusammensetzung ändert. In den linken Bildern ist der Konzentrationsverlauf in der festen Phase und der Schmelze bei der angegebenen Position der Erstarrungsfront als durchgezogene Linie gezeichnet. Die gestrichelten Linien geben die Zusammensetzung von Kristall und Schmelze an der Erstarrungsfront an. Von oben nach unten aufgetragen sind diese Bilder für (1) beliebig schnelle Diffusion in Schmelze und Kristall, (2) für schnelle Diffusion in der Schmelze, aber praktisch keiner Diffusion in der festen Phase und schließlich (3) der stationäre Zustand, der weder im Kristall noch in der Schmelze eine endliche Diffusion aufweist.

Verläuft die Diffusion in beiden Phasen sehr schnell, so haben beide Phasen zu jedem Zeitpunkt ihre Gleichgewichtszusammensetzung. Ist die Diffusion nur in der festen Phase gehemmt, so kommt es nur in der Schmelze zum Konzentrationsausgleich und die Schmelze reichert sich mit fortschreitender Erstarrung an Legierungsatomen bis weit über die Grenze x_2 hinaus an. Nach Abschluß der Erstarrung verbleibt ein Konzentrationsgradient im Kristall. Ist die Diffusion in beiden Phasen stark eingeschränkt, werden die Legierungsatome, die nicht in den Kristall eingebaut werden, zwar an die Schmelze abgegeben, verbleiben aber an der Erstarrungsfront, wo sie sich immer weiter anreichern, während die Schmelze in weiterer Entfernung zur Erstarrungsfront in ihrer ursprünglichen Zusammensetzung erhalten bleibt. An der Schmelze kann sich die Konzentration bis maximal x_2 anreichern, da dann der Kristall mit x_0 erstarrt und damit die Schmelze von x_0 auf x_2 angereichert wird.

Die Zusammensetzung der Schmelze ändert sich in dem dünnen Bereich, in dem die Fremdatome vorliegen, sehr stark und entsprechend stark steigt die Liquidustemperatur, wie es im Diagramm ersichtlich ist, von T_2 auf T_1 . Wenn dieser Anstieg größer als der tatsächliche Temperaturgradient in der Schmelze ist (ausgezogene Linie) dann ist die Temperatur kurz hinter der Erstarrungsfront niedriger, als die Liquiduslinie der Schmelze mit der vorliegenden Zusammensetzung. In diesem Fall spricht man von **konstitutioneller Unterkühlung**, weil sie durch den zusammensetzungsabhängigen Zustand einer Legierung verursacht wird.

Entsteht nun eine Unregelmäßigkeit an der Erstarrungsfront und ragt diese vor, so wird sie von einem Gebiet der Schmelze umgeben, das kälter ist, als die der Zusammensetzung entsprechenden Gleichgewichtstemperatur. In diesem Fall kommt es zu schnellem Wachstum in die konstitutionell unterkühlte Zone. Dies kann nur durch einen sehr steilen Temperaturgradienten verhindert werden. Konstitutionelle Unterkühlung ist gewöhnlich eine Ursache von Dendritenbildung in Legierungen.

ZUM NACHDENKEN:

- Wie verändert sich der Verlauf der Erstarrung in Legierungen im Vergleich zur Erstarrung von Elementen?
- Unter welchen Voraussetzungen kommt es zur konstitutionellen Unterkühlung?
- Warum kommt es bei der konstitutionellen Unterkühlung zur Bildung von Dendriten?

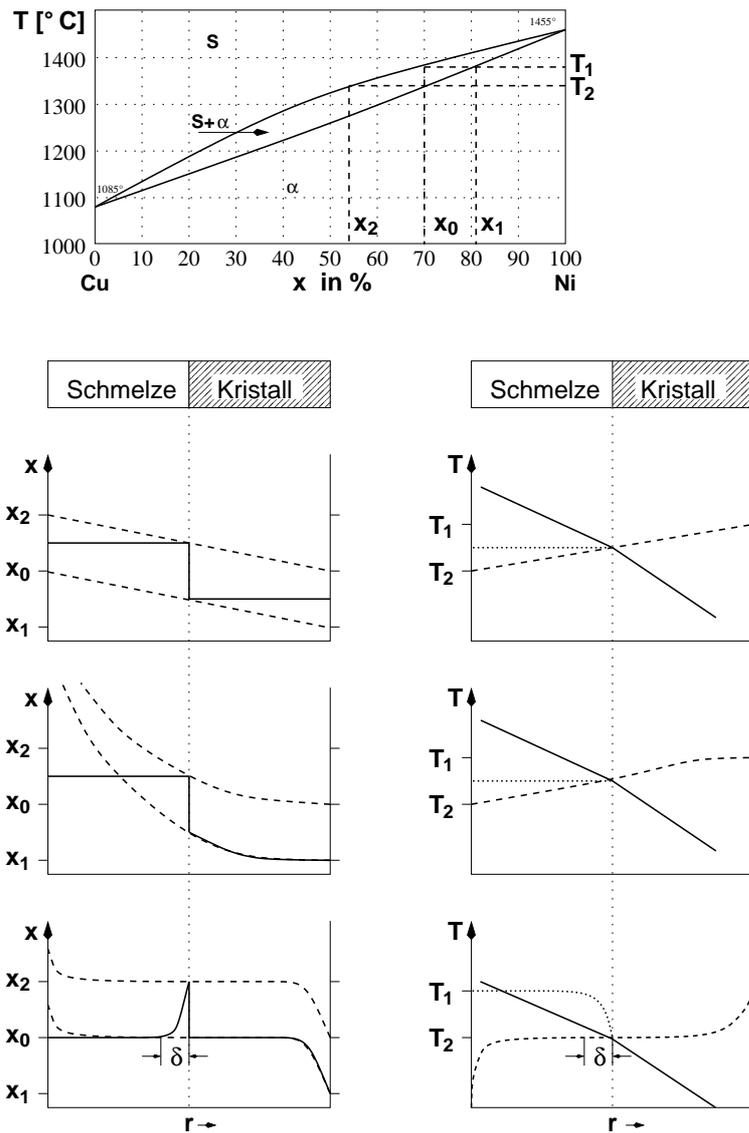


Abbildung 3.9: Konzentrations- (links) und Temperaturverlauf (rechte Teilbilder) für beliebig schnelle Diffusion in Schmelze und Kristall, schnelle Diffusion in Schmelze, aber langsamer im Kristall, sowie langsame Diffusion in Schmelze und Kristall (von oben nach unten). Durchgezogene Linien geben den Verlauf von Konzentration und Temperatur an der Front wieder, während die gestrichelten eine Funktion des Durchlaufens durch die Front sind.

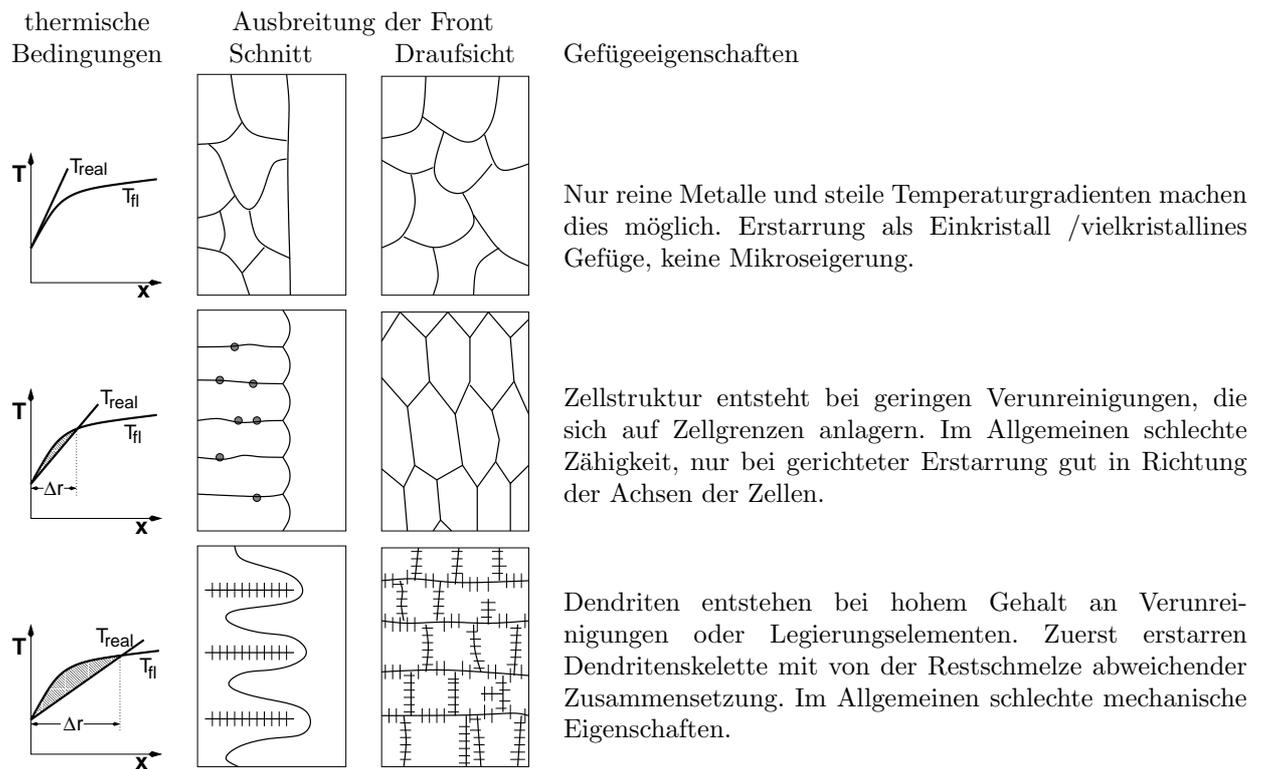


Tabelle 3.1: Ausbildung der Erstarrungsfront und der Gefügeart in Abhängigkeit von der Größe der konstitutionellen Unterkühlung