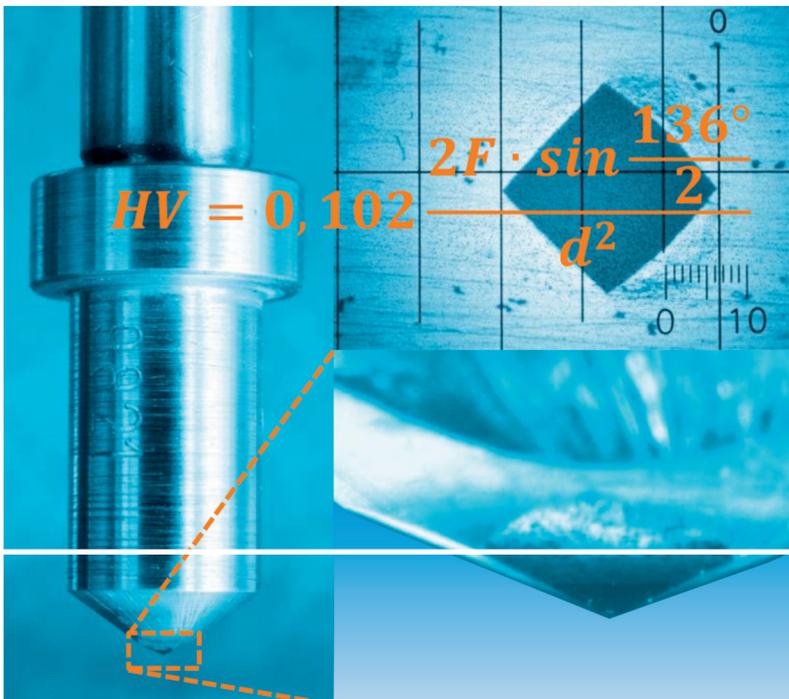


Frank Hahn

# Werkstofftechnik- Praktikum

Werkstoffe prüfen und verstehen



HANSER

Frank Hahn  
Werkstofftechnik-Praktikum



Frank Hahn

# Werkstofftechnik-Praktikum

Werkstoffe prüfen und verstehen

mit 192 Bildern und zahlreichen Tabellen



**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

**Autor:**

Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn  
Hochschule Mittweida  
Fakultät Maschinenbau  
<http://www.hs-mittweida.de>  
E-Mail: hahn1@hs-mittweida.de



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-43258-1  
E-Book-ISBN 978-3-446-44494-2

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag  
© 2015 Carl Hanser Verlag München  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Lektorat: Christine Fritzsch  
Herstellung: Katrin Wulst  
Einbandrealisierung: Stephan Rönigk  
Satz: Dr.-Ing. Steffen Naake, Brand-Erbisdorf  
Druck und Bindung: Friedrich Pustet, Regensburg  
Printed in Germany

# Vorwort

Das Fach „Werkstofftechnik“ ist Bestandteil vieler technischer Studienrichtungen, wie z. B. Maschinen- und Fahrzeugbau, Mechatronik, Wirtschaftsingenieurwesen. Darüber hinaus werden Auszubildende in zahlreichen Lehrberufen mit den Grundlagen der Werkstofftechnik vertraut gemacht. Ziel der Ausbildung ist es, fundamentale Zusammenhänge über Zusammensetzung, Struktur, Gefüge und Eigenschaften zu vermitteln, um im späteren Berufsleben eine zielgerichtete Bearbeitung und einen verantwortlichen und Ressourcen schonenden Einsatz der Werkstoffe zu gewährleisten.

An den Universitäten, Fachhochschulen und Berufsakademien werden die theoretischen Grundlagen in Vorlesungen und Seminaren vermittelt. Ein integriertes Praktikum soll die Studierenden/Auszubildenden mit den Methoden der Werkstoffprüfung vertraut machen. Dabei werden Werkstoffkennwerte bestimmt und die Ursachen für die Eigenschaften ermittelt und besprochen. Die oft komplexen Zusammenhänge lassen sich mit den durchgeführten Experimenten leichter verstehen und erlauben einen fachübergreifenden Überblick, erfordern aber eine ausreichende Vorbereitung von den Praktikumssteilnehmern.

An dieser Stelle setzt das vorliegende Buch an. Neben einer detaillierten Beschreibung des experimentellen Vorgehens sollen insbesondere die physikalischen, chemischen, mathematischen und die werkstofftechnischen Grundlagen gefestigt werden. Die Fragen zur Versuchsvorbereitung dienen der Überprüfung des Wissensstandes und können mit den Antworten im Anhang verglichen werden. Die Versuche werden in dieser Form seit einigen Jahren an der Hochschule Mittweida von den Studierenden der technischen Fachrichtungen durchgeführt und sind für eine Praktikumsdauer von je drei Stunden ausgelegt. Die Werkstoffe und Aufgaben können an anderen Ausbildungsorten variieren, aber die Vorbereitung und der Weg zur Lösung sind in der Regel identisch. Modelllösungen, vorbereitete Tabellen für die Messwerterfassung und Auswerteroutinen sollen nicht nur die Auswertung vereinfachen, sie sollen auch aufzeigen, dass bei der Werkstoffprüfung alle relevanten Daten und Fakten zur Probe, zum Werkstoff und Versuchsablauf erfasst werden müssen, um eine spätere Beurteilung der Versuchsergebnisse zu erlauben.

Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Seidel, der mich zum Schreiben des Buches ermuntert und den Text kritisch durchgesehen hat. Ich danke Herrn Andreas Eysert von der Hochschule Mittweida für die zahlreichen metallographischen Aufnahmen und für den fachlichen Rat beim Kapitel „Metallographie“, Frau Angela Bergner für die Unterstützung bei der Erstellung der Grafiken und Herrn Enrico Gehrke für die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Frau Christine Fritsch vom Hanser Verlag möchte ich für die redaktionelle Durchsicht, die Förderung des Buches und die stetige Ermutigung danken.

Mittweida, im Januar 2015

Frank Hahn



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Thermische Analyse – Zustandssysteme</b>	<b>11</b>
1.1	Einleitung	11
1.2	Ziel des Praktikums	12
1.3	Theoretische Voraussetzungen	12
1.4	Grundlagen	13
1.4.1	Phasenumwandlungen	13
1.4.2	Keimbildung und -wachstum	14
1.4.3	Legierungsstrukturen	18
1.4.4	Grundtypen der Zweistoffsysteme	21
1.4.4.1	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen und im festen Zustand	24
1.4.4.2	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und Unlöslichkeit im festen Zustand	29
1.4.4.3	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – eutektisches System	33
1.4.4.4	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – peritektisches System	36
1.4.4.5	Zweistoffsystem mit intermetallischer Phase	38
1.4.4.6	Phasenumwandlungen im festen Zustand	39
1.4.5	Das Gesetz der abgewandten Hebelarme	40
1.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	42
1.6	Geräte und Hilfsmittel	43
1.7	Versuchsdurchführung	44
1.8	Praktikumsauswertung	45
<b>2</b>	<b>Zugversuch an metallischen Werkstoffen</b>	<b>46</b>
2.1	Einleitung	46
2.2	Ziel des Praktikums	46
2.3	Theoretische Voraussetzungen	47
2.4	Grundlagen	47
2.4.1	Kraft und Spannung	47
2.4.2	Verlängerung und Dehnung	49
2.4.3	Zugproben	50
2.4.4	Verfahrensprinzip	52
2.4.5	Zugversuch – Verformungsbereiche und Auswertung	56
2.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	62

2.6	Geräte und Hilfsmittel .....	63
2.7	Versuchsdurchführung .....	63
2.8	Praktikumsauswertung .....	65
2.9	Modellösungen .....	65

### **3 Metallographische Probenpräparation und lichtmikroskopische Gefügeuntersuchung gleichgewichtsnah umgewandelter**

<b>Stähle .....</b>	<b>70</b>	
3.1	Einleitung .....	70
3.2	Ziel des Praktikums .....	71
3.3	Theoretische Voraussetzungen .....	71
3.4	Grundlagen .....	72
3.4.1	Die metallographische Probenpräparation .....	72
3.4.1.1	Trennen .....	73
3.4.1.2	Einfassen .....	75
3.4.1.3	Schleifen und Polieren .....	76
3.4.1.4	Reinigen und Trocknen der Probe .....	78
3.4.1.5	Aufbau und Einstellung des Auflichtmikroskops .....	78
3.4.1.6	Vergrößerung .....	84
3.4.1.7	Auflösungsgrenzen der Lichtmikroskopie .....	86
3.4.1.8	Gesamte förderliche Vergrößerung .....	91
3.4.1.9	Kontrastierungsverfahren .....	91
3.4.2	Das metastabile Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff .....	94
3.4.2.1	Reineisen .....	95
3.4.2.2	Phasen im metastabilen Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	96
3.4.2.3	Gefüge im metastabilen Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	99
3.4.2.4	Die Stahlecke im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm – Gefüge- umwandlung des Austenits bei der Abkühlung im thermo- dynamischen Gleichgewicht .....	101
3.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	107
3.6	Geräte und Hilfsmittel .....	107
3.7	Versuchsdurchführung .....	108
3.8	Praktikumsauswertung .....	109

### **4 Härteprüfung .....**

4.1	Einleitung .....	111
4.2	Ziel des Praktikums .....	111
4.3	Theoretische Voraussetzungen .....	112
4.4	Grundlagen .....	112
4.4.1	Überblick .....	112
4.4.2	Härteprüfung nach Brinell HBW .....	113
4.4.3	Härteprüfung nach Vickers HV .....	118
4.4.4	Härteprüfung nach Rockwell Skala C HRC .....	122
4.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	125
4.6	Geräte und Hilfsmittel .....	126

4.7	Versuchsdurchführung .....	126
4.8	Praktikumsauswertung .....	129
4.9	Modelllösungen .....	130

## **5 Grundlagen der Wärmebehandlung von Stählen** ..... 134

5.1	Einleitung .....	134
5.2	Ziel des Praktikums .....	134
5.3	Theoretische Voraussetzungen .....	135
5.4	Grundlagen .....	136
5.4.1	Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gefüge von Stählen .....	136
5.4.1.1	Das Dilatometerverfahren .....	136
5.4.1.2	Diffusionsgesteuerte Umwandlung des Austenits bei leicht erhöhter Abkühlgeschwindigkeit .....	137
5.4.1.3	Die Martensitbildung .....	140
5.4.1.4	Die Bainitbildung .....	144
5.4.1.5	Das Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm .....	145
5.4.1.6	Einfluss von Legierungselementen auf die Umwandlung des Austenits bei der Abkühlung .....	151
5.4.2	Wärmebehandlung von Stahl .....	153
5.4.2.1	Begriffserklärung .....	153
5.4.2.2	Das Normalglühen .....	154
5.4.2.3	Das Härten .....	157
5.4.2.4	Charakterisierung der Härbarkeit .....	164
5.4.2.5	Anlassverhalten von Stählen .....	167
5.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	170
5.6	Geräte und Hilfsmittel .....	172
5.7	Versuchsdurchführung .....	172
5.8	Praktikumsauswertung .....	173
5.9	Modelllösungen .....	175

## **6 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy** ..... 178

6.1	Einleitung .....	178
6.2	Ziel des Praktikums .....	178
6.3	Theoretische Voraussetzungen .....	179
6.4	Grundlagen .....	180
6.4.1	Zähigkeit und Sprödigkeit .....	180
6.4.2	Der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy .....	183
6.4.3	Sprödes Werkstoffverhalten beim KBV .....	186
6.4.4	Duktiles Werkstoffverhalten beim KBV .....	188
6.4.5	Der Bruch beim KBV .....	190
6.4.5.1	Sprödbbruch (Spaltbruch) .....	190
6.4.5.2	Verformungsbruch .....	193
6.4.5.3	Mischbruch .....	195
6.4.6	Einflüsse auf die Zähigkeit .....	196
6.4.7	Das Temperaturkonzept .....	198
6.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	200

6.6	Geräte und Hilfsmittel .....	201
6.7	Versuchsdurchführung.....	201
6.8	Praktikumsauswertung .....	204
6.9	Modelllösungen .....	205
<b>7</b>	<b>Ermüdung und Schwingfestigkeit .....</b>	<b>207</b>
7.1	Einleitung .....	207
7.2	Ziel des Praktikums .....	208
7.3	Theoretische Voraussetzungen .....	208
7.4	Grundlagen .....	208
7.4.1	Ermüdung .....	208
7.4.2	Rissbildung und -wachstum unter schwingender Beanspruchung – Merkmale des Dauerbruchs .....	211
7.4.3	Mechanische Schwingungen .....	214
7.4.4	Einstufige Schwingfestigkeitsuntersuchungen – Wöhlerversuch .....	215
7.4.4.1	Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeit im Bereich der Zeitfestigkeit .....	218
7.4.4.2	Bestimmung der Dauerfestigkeit unter Berücksichtigung des Streubandes im Übergangsbereich .....	222
7.4.5	Angabe der Dauerfestigkeit .....	229
7.4.6	Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith .....	229
7.4.7	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit .....	231
7.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	233
7.6	Geräte und Hilfsmittel .....	234
7.7	Versuchsdurchführung.....	234
7.8	Praktikumsauswertung .....	239
7.9	Modelllösungen .....	239
	<b>Anhang – Lösungsteil .....</b>	<b>248</b>
	<b>Index .....</b>	<b>257</b>

# 1

## Thermische Analyse – Zustandssysteme

### ■ 1.1 Einleitung

Wie Ihnen aus der Physik und aus der Chemie bekannt ist, können Stoffe im Allgemeinen und Metalle im Besonderen in verschiedenen Aggregatzuständen (fest, flüssig, gasförmig) auftreten. Insbesondere im festen Zustand reicht der Aggregatzustand zur Beschreibung der Struktur des Werkstoffs nicht aus, da unterschiedliche Zustandsformen parallel vorliegen können. Deshalb ist es notwendig, den Begriff der Phase einzuführen. Eine Phase ist eine Zustandsform eines Stoffes, in der Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften eines Stoffes unter Gleichgewichtsbedingungen konstant sind. Sie ist ein in sich homogener Bestandteil eines Systems. Sollten im festen Zustand in einem Stoff mehrere feste Phasen nebeneinander auftreten, dann liegen also Kristallite mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und kristalliner Struktur nebeneinander vor. Die unterschiedlichen Phasen werden durch Phasengrenzflächen voneinander getrennt. Je nachdem, welche Phasen in einem Stoffsystem auftreten, wie groß die Phasenbestandteile (Kristallite) sind und wie diese verteilt sind, werden die Eigenschaften des Stoffes beeinflusst.

Eine Phasenumwandlung ist nur möglich, wenn sich die Zustandsgrößen Druck, Temperatur und/oder Zusammensetzung der Legierung verändern. Aufgabe der thermischen Analyse ist es, Phasenumwandlungen zu untersuchen und Zustandsdiagramme aufzustellen. Die Ursache für eine Phasenumwandlung liegt im Bestreben des Stoffes, ein Minimum der freien Enthalpie zu erreichen. Wird beispielsweise eine metallische Schmelze abgekühlt und die Kristallisation beginnt, wird dadurch ein Zustand niedrigerer freier Enthalpie erreicht. Es wird Kristallisationswärme frei. Bei der thermischen Analyse werden während der Abkühlung die Temperatur und die Zeit gemessen. Die frei werdende Kristallisationswärme führt zu einer Unstetigkeitsstelle im Temperatur-Zeit-Verlauf. Bei reinen Stoffen wird ein Haltepunkt und bei vielen Legierungen ein Knickpunkt registriert. Solche Halte- und Knickpunkte im Temperatur-Zeit-Verlauf können eindeutig einer beginnenden oder abgeschlossenen Phasenumwandlung zugeordnet werden.

Legierungen sind Stoffsysteme, die aus mindestens zwei Komponenten bestehen und überwiegend metallischen Charakter haben. Eine Komponente kann dabei ein reines chemisches Element (z. B. ein Metall) oder aber eine chemische Verbindung bzw. intermetallische Phase (z. B. Carbide, Nitride) sein. Wird einer geschmolzenen Legierung aus Blei und Zinn von außen mehr Blei zugegeben, ändert sich die Konzentration der Legierung. Das hat eine Änderung der Phasenumwandlung zur Folge, sodass die Kristallisation der Legierung bei höheren oder tieferen Temperaturen beginnt. Die bei der Kristallisation gebildeten festen Phasen können veränderte Eigenschaften (Gitterparameter, mechanische Eigenschaften) zeigen oder es können in Abhängigkeit vom Stoffsystem andere Phasen gebildet werden. Zustandsdia-

gramme geben Auskunft, welche Phasen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung (= Konzentration) und der Temperatur im Stoffsystem auftreten. Der Druck als weitere Zustandsgröße hat ebenfalls Einfluss auf die Phasenbildung, wird aber häufig konstant gehalten (Normaldruck = 101,3 kPa). Im Praktikum wird gezeigt, wie mit der thermischen Analyse Zustandsdiagramme aufgestellt werden und wie Temperatur-Zeit-Verläufe bei der Abkühlung zu interpretieren sind.

Aus den Zustandsdiagrammen können Gießer ablesen, welche Temperaturen zum Schmelzen einer Legierung notwendig sind. Da die Eigenschaften einer Legierung von den Phasen und der Zusammenfügung der Phasen und Phasengemische abhängen, lassen sich aus den Zustandsdiagrammen auch Rückschlüsse auf die Stoffeigenschaften ziehen. Nicht zuletzt muss berücksichtigt werden, dass Wärmebehandlungsverfahren gezielt Phasenumwandlungen ausnutzen. Das Verständnis der Zustandsdiagramme ist deshalb entscheidende Grundlage für die Festlegung des Temperatur-Zeit-Regimes bei den meisten Wärmebehandlungsverfahren (z. B. Ausscheidungshärten von aushärtbaren Aluminiumlegierungen; Härten und Normalglühen bei Stählen).

## ■ 1.2 Ziel des Praktikums

Unter thermischer Analyse versteht man ein Messverfahren, das aufgrund von Temperatur-Zeit-Verläufen bei der Abkühlung oder Erwärmung Rückschlüsse auf Zustandsänderungen von Metallen/Legierungen erlaubt. Die thermische Analyse ermöglicht das Aufstellen von Zustandsdiagrammen. Am Beispiel des Legierungssystems Pb – Sn, soll gezeigt werden, wie ein Zustandsdiagramm entsteht.

Ziel des Praktikums ist es, die Kenntnisse über Zustandsdiagramme und Phasenumwandlungen zu festigen. Durch Anwendung der Hebelbeziehung sollen die Phasenanteile in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Legierung und der Temperatur ermittelt werden. Metallographische Untersuchungen an den einzelnen Legierungen sollen den komplexen Zusammenhang von Erstarrungsvorgängen und dem entstehenden Gefüge unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung der Legierung verdeutlichen.

## ■ 1.3 Theoretische Voraussetzungen

Für das Praktikum sind Vorkenntnisse erforderlich, die mithilfe von Lehrunterlagen oder von Fachliteratur überprüft werden können. Um Ihnen die Vorbereitung zu erleichtern, wird in Klammern das betreffende Kapitel aus

Seidel, W. W.; Hahn, F.: Werkstofftechnik. – 10. Auflage (2014) – Carl Hanser Verlag München angegeben.

Überprüfen Sie Ihr Wissen zu folgenden Punkten:

- Kristallgitter von Metallen, Gittermerkmale (1.1.2)
- Gitterbaufehler (1.1.2.3)

- Zusammenhang von Gitter und Eigenschaften (1.1.2.4)
- Diffusion (1.4.2)
- Kristallisation (1.3.3)

## ■ 1.4 Grundlagen

### 1.4.1 Phasenumwandlungen

Wie bereits im Abschnitt 1.1 ausgeführt, liegt die Ursache für eine Phasenumwandlung im Bestreben eines Stoffes einen Zustand niedriger freier Enthalpie zu erreichen. Gibt es bei einer bestimmten Temperatur  $T$ , einem Druck  $p$  und der vorgegebenen Konzentration  $c$  einen Zustand, der eine geringere freie Enthalpie aufweist, ist eine Phasenumwandlung möglich.

Die freie Enthalpie  $G$  ist eine thermodynamische Größe und ist wie folgt definiert:

$$G = H - T \cdot S \quad (1-1)$$

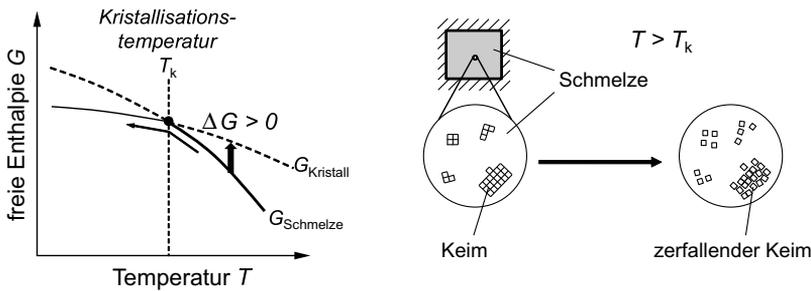
$G$  freie Enthalpie  
 $H$  Enthalpie  
 $T$  Temperatur  
 $S$  Entropie

In diese Gleichung geht zunächst die Enthalpie  $H$  als Summe der inneren Energie  $U$  (Gesamtheit von thermischer und chemischer Energie, also Bindungsenergie der Teilchen und Bewegungs-, Rotations- und Schwingungsenergie einschließlich der Energie der Elektronen) und der Volumenarbeit ein:

$$H = U + p \cdot V \quad (1-2)$$

$U$  innere Energie  
 $p$  Druck  
 $V$  Volumen  
 $p \cdot V$  Volumenarbeit

Die Enthalpie  $H$  ist eine energetische Größe, die vereinfacht als Wärmeinhalt des Systems aufgefasst werden kann, die mit zunehmender Temperatur ansteigt. Die Entropie  $S$ , die ebenfalls in die freie Enthalpie  $G$  eingeht, ist ein Maß für den Ordnungszustand im System. Ein stoffliches System strebt nicht nur einen energiearmen Zustand an, sondern auch einen Zustand mit möglichst geringem Ordnungsgrad. Ein geordneter Zustand, wie er im Kristall vorliegt, ist unwahrscheinlicher als ein Zustand mit geringer Ordnung (Schmelze). Mit zunehmender Temperatur bewegen sich die Teilchen/Moleküle stärker und schneller, der Ordnungsgrad nimmt ab, wodurch die Entropie ansteigt. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass die freie Enthalpie  $G$  einer Phase nicht konstant ist. Allein weil sich durch eine höhere oder niedrigere Temperatur die Bewegungsenergie der Teilchen und auch der Ordnungsgrad im Stoffsystem ändert, muss sich auch die freie Enthalpie mit der Temperatur ändern (Bild 1-1). Der Anstieg der freien Enthalpie über der Temperatur verläuft für jede Phase charakteristisch.



**Bild 1-1** Die freie Enthalpie ist temperaturabhängig und verläuft für jede Phase charakteristisch. Ist die Temperatur in einem Stoffsystem größer als die Kristallisationstemperatur  $T_k$ , dann ist die Differenz der freien Enthalpie  $\Delta G$  zwischen der vorliegenden Schmelze und der kristallinen Phase positiv. Die Schmelze ist unter dieser Voraussetzung thermodynamisch stabil. Kristallisationskeime sind dennoch in der Schmelze vorhanden, zerfallen aber wieder und bilden sich an anderer Stelle neu.

Bei einer Betrachtung des Phasenübergangs von flüssig nach fest genügt es, bei einer konkreten Temperatur die Differenz der freien Enthalpie  $\Delta G$  zwischen den Phasen zu untersuchen. Als Ausgangspunkt liegt ein reines Metall im geschmolzenen Zustand vor (Bild 1-1). Die Temperatur im System liegt deutlich über der Kristallisationstemperatur  $T_k$ . Im Vergleich zur geschmolzenen Phase weist die kristalline Phase eine deutlich größere freie Enthalpie auf bzw. die Differenz der freien Enthalpie der Phasen ist größer Null. Eine Phasenumwandlung in den kristallinen Zustand ist bei dieser Temperatur nicht möglich, da die freie Enthalpie ansteigen müsste. Das würde dem Bestreben eines Stoffes ein Enthalpieminimum zu erreichen, widersprechen.

Wird dem Stoffsystem Wärme entzogen, sinkt die Temperatur. Hat die freie Enthalpie der Schmelze und der kristallinen Phase den gleichen Wert, liegen beide Phasen im thermodynamischen Gleichgewicht vor. Bei der Gleichgewichtstemperatur findet dennoch keine Phasenumwandlung statt, denn mit der Kristallisation wäre nach wie vor keine niedrigere freie Enthalpie verbunden. Das Gleiche gilt im Übrigen auch für den umgekehrten Fall. Wird der kristalline Festkörper bis auf diese Temperatur erwärmt, schmilzt er auch nicht. Vermischt man Schmelze und Kristalle des gleichen Stoffes bei dieser Gleichgewichtstemperatur, können beide Phasen nebeneinander stabil existieren, solange sich die Zustandsgrößen ( $p$ ,  $T$ ,  $c$ ) nicht ändern.

Erst bei einer Abkühlung der Schmelze unter die Gleichgewichtstemperatur ist die Differenz der freien Enthalpie kleiner null. Eine Phasenumwandlung ist prinzipiell möglich.

### 1.4.2 Keimbildung und -wachstum

Wird eine Schmelze unter  $T_k$  abgekühlt, müsste aus thermodynamischer Sicht die Kristallisation einsetzen. Tatsächlich passiert das erst, wenn die Unterkühlung groß genug ist.

Die Ursache für diesen scheinbaren Widerspruch liegt im Prozess der Kristallisation, die über Kristallkeimbildung und -wachstum abläuft. Ein Kristallkeim ist eine sehr kleine, regelmäßige, kristallartige Anordnung von Teilchen (Atome, Ionen) in der Schmelze. Im geschmolzenen Zustand liegt im Vergleich zum Gas bereits eine sehr hohe Teilchendichte vor, sodass