

WERKSTOFFTECHNIK-GRUNDPRAKTIKUM

Versuch G3: Erstellung eines Zustandsdiagramms

Inhalt

1. Ziel des Versuchs
2. Grundlagen
 - 2.1 Phasen
 - 2.2 Die Gibbs'sche Phasenregel
 - 2.3 Der Begriff des thermodynamischen Gleichgewichts
 - 2.4 Temperaturkurven von reinen Metallen und Legierungen
 - 2.5 Grundtypen binärer Zustandsdiagramme
 - 2.6 Interpretation von Zustandsdiagrammen
 - 2.6.1 Das Hebelgesetz
 - 2.7 Thermoelektrischer Effekt
3. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung
4. Literatur
5. Kontrollfragen
6. Versuchsauswertung
 - 6.1 Ermittelte Versuchsdaten
 - 6.2 Erstelltes Zustandsdiagramm für Pb-Sn
7. Anhang

Name:

Vorname:

Matrikel-Nr.:

Testat:

Erstellung eines binären Zustandsdiagramms am Beispiel des Legierungssystems Blei-Zinn (Pb-Sn)

1. Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll anhand des Verfahrens der thermischen Analyse ein Zustandsdiagramm für das Legierungssystem Blei-Zinn erstellt werden. Dazu werden die Komponenten Blei und Zinn in zueinander unterschiedlichen Konzentrationsverhältnissen aufgeschmolzen und anschließend abgekühlt, wobei in Abhängigkeit von der Zeit Temperaturkurven aufgezeichnet werden sollen. Dieses Meßverfahren ermöglicht die Erstellung eines Zustandsschaubildes, das in Abhängigkeit von der Temperatur T und dem Mischungsverhältnis der Komponenten eine lückenlose und vollständige Übersicht über alle möglichen Zustandsänderungen des Legierungsgefüges wiedergibt.

Um die einzelnen Umwandlungsvorgänge verstehen zu können, ist die Kenntnis einiger Grundbegriffe unabdingbare Voraussetzung.

2. Grundlagen

Zustandsdiagramme oder Phasendiagramme sind graphische Darstellungen der Temperatur bzw. des Drucks über die Zusammensetzung. Sie zeigen die unter den jeweiligen Bedingungen im thermodynamischen Gleichgewicht stabilen Phasen oder Phasengemische. Aus ihnen sind daher Informationen über die Zusammensetzung von Verbindungen, die Bildung und den Stabilitätsbereich von Mischkristallen, Phasenübergänge, Art und Menge der Phasen, sowie Schmelz- und Umwandlungstemperaturen ersichtlich.

2.1 Phasen

Als Phase bezeichnet man einen Bereich mit konstanter Struktur und/oder chemischer Zusammensetzung. Die Zahl der Phasen, die sich in einem Werkstoff im Gleichgewicht befinden, ist die Zahl der physikalisch eindeutigen und mechanisch im Prinzip trennbaren Anteile. So unterscheidet man beispielsweise Phasen anhand unterschiedlicher Kristallstruktur, obwohl sie wiederum die gleiche chemische Zusammensetzung besitzen können. Andererseits können sie aus den gleichen Komponenten aufgebaut sein, aber unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen.

Einen Sonderstatus nehmen hierbei die sogenannten Mischkristalle ein, die immer als einzige Phase mit variabler Zusammensetzung in Erscheinung treten. Dabei werden die Atome des Legierungselementes entweder in reguläre Gitterplätze (Substitutionsmischkristall) eingebaut oder sie werden interstitiell gelöst (Einlagerungsmischkristall). Viele Mischkristalle bilden vollständige Mischkristallreihen.

Desweiteren werden die Aggregatzustände wie fest, flüssig, gasförmig und Plasma ebenfalls allgemein als Phasen bezeichnet.

2.2 Die Gibbs'sche Phasenregel

Die Phasendiagramme basieren alle auf der Phasenregel nach W. J. Gibbs, die durch die einfache Gleichung

$$F = K - P + 2 \quad (1)$$

beschrieben wird. Hierbei ist F die Zahl der Freiheitsgrade oder unabhängigen Variablen, die sich aus den Zustandsgrößen Temperatur T , Druck p und der Konzentration c der anwesenden Phasen ergibt. K ist die Anzahl der Komponenten, die zur Beschreibung des Systems notwendig ist und P stellt die Zahl der Phasen dar, die im Gleichgewicht vorliegen.

Bei einem Einstoffsystem, bei dem beispielsweise ein reines Metall vorliegt, ist $K=1$ und damit wird die Gleichung (1) zu $F=1+2-P$. In den meisten Festkörpersystemen mit hohen Schmelztemperaturen bleibt der Dampfdruck über einen großen Temperaturbereich vernachlässigbar klein, so daß er als Variable für Arbeiten unter einem Druck von einer Atmosphäre nicht berücksichtigt werden muß. Man spricht dann von *kondensierten Systemen*. Damit wird die Gleichung zu $F=2-P$. Für den einphasigen Zustand (z.B. fester Zustand) erhält man also schließlich $F=1$, was bedeutet, daß die Temperatur geändert werden kann, ohne daß sich die Anzahl der Phasen ändert. Für den zweiphasigen Zustand (z.B. fester und flüssiger Zustand liegen gleichzeitig vor) erhält man $F=0$. Hierbei ist die Zahl der Freiheitsgrade also gleich null und somit darf die Temperatur nicht verändert werden ohne daß sich die Zahl der Phasen ändert. D.h. die Schmelztemperatur ist genau festgelegt.

Im Falle eines Zweistoffsystems liegt eine Legierung aus den Komponenten A und B vor ($K=2$), womit sich bei einem Druck von einer Atmosphäre der Ausdruck $F=3-P$ ergibt. Daraus resultiert für einen einphasigen Zustand (Mischkristall) $F=2$. Das bedeutet, daß die Temperatur T und die Konzentration c sich ändern können, ohne daß die Zahl der Phasen beeinflußt wird. Liegen zwei Phasen vor (z.B. eine feste und eine flüssige oder zwei feste Phasen gleichzeitig), dann ist $F=1$ und die Temperatur darf sich ändern, ohne daß sich die Zahl der Phasen ändert. Somit schmilzt bzw. erstarrt die Legierung in einem Erstarrungsintervall. Hierbei darf die Zusammensetzung nicht gleichzeitig und unabhängig von T variiert werden. Bei Vorliegen eines dreiphasigen Zustandes (z.B. zwei feste und ein flüssiger Zustand bzw. drei feste Phasen gleichzeitig) ist $F=0$. Somit reduziert sich bei Änderung der Temperatur die Zahl der Phasen.

2.3 Der Begriff des thermodynamischen Gleichgewichts

Für Phasendiagramme ist die Definition des Begriffs *Gleichgewicht* sehr wichtig. Es gibt verschiedene Zustände, die sich hinsichtlich ihres Energieinhaltes unterscheiden (s. *Abb. 1*). Ein System ist immer bestrebt, den Zustand mit einem Minimum an freier Energie einzunehmen. Dieses liegt beispielsweise bei einem *stabilen Gleichgewicht* vor, da jede Bewegung aus dieser Position eine Energieerhöhung erfordert. Bei einem *metastabilen Gleichgewicht* ist zwar ebenfalls ein Minimum vorhanden, dieses ist aber lokal begrenzt, so daß es nur eines geringen Energiebetrages (Aktivierungsenergie) bedarf, um von dem metastabilen Zustand in den stabilen Zustand mit geringerer Energie zu gelangen. Ein *instabiles/labiles Gleichgewicht* hingegen ist dadurch gekennzeichnet, daß bereits eine geringste Schwankung genügt, um eine Energieerniedrigung in den metastabilen oder stabilen

Zustand zu erzielen. Der *eingefrorene Zustand*, der sich aufgrund einer behinderten Kinetik einstellt, ist bei vielen Reaktionen im festen Zustand vorzufinden. Hierbei kann ein Vorgang nicht oder nur noch sehr langsam ablaufen, wobei der stabilste Zustand, also ein Energieminimum, nicht erreicht wird.

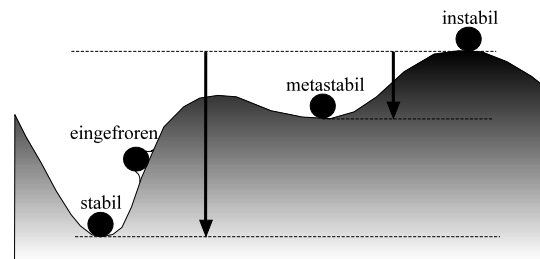


Abb. 1: Die Gleichgewichtszustände eines Systems mit den unterschiedlichen Energieinhalten

2.4 Temperaturkurven von reinen Metallen und Legierungen

Werden reine Metalle erwärmt, verläuft der Temperaturanstieg nicht durchgehend stetig mit der Zeit. Trägt man den Anstieg der Temperatur über die Zeit auf, zeigt sich, daß der normale, leicht exponentielle Temperaturverlauf von Haltepunkten unterbrochen wird, an denen trotz kontinuierlicher Wärmezufuhr die Temperatur des erwärmten Metalls nicht weiter ansteigt. Die meisten reinen Metalle haben nur je einen Haltepunkt bei der Erwärmung und bei der Abkühlung, also bei der Temperatur, bei der das Metall vom festen in den flüssigen Zustand bzw. umgekehrt übergeht. Im Falle einer kontinuierlichen Erwärmung wird die zugeführte Energie so lange für die Überwindung der Gitterbindungskräfte der Atome verzehrt, bis alle Kristallkörner des Gefüges aufgelöst sind. Anschließend steigt im schmelzflüssigen Zustand die Temperatur wieder kontinuierlich an.

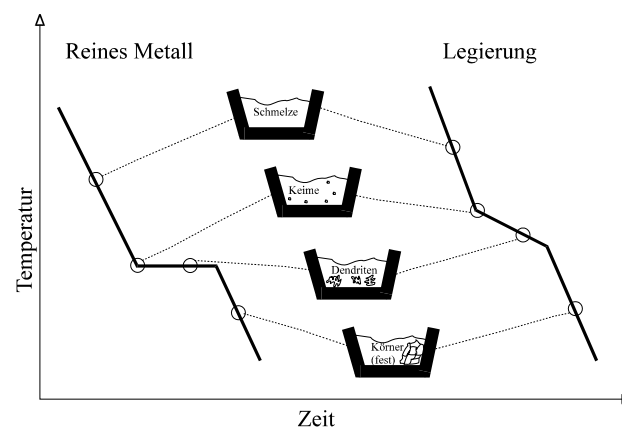


Abb. 2: Abkühlungskurven eines reinen Metalls mit Haltepunkten und einer Legierung mit Knickpunkten

Bei der normalen, langsamen Abkühlung ergibt sich im Prinzip die spiegelsymmetrische Kurve (s. Abb. 2). Am Haltepunkt bilden sich zunächst Keime, die zu Kristallen weiterwachsen bis ihre Grenzen zusammenstoßen (Korngrenzen). Das Ergebnis ist ein

Gefüge mit einer bestimmten Kristallstruktur. Erst wenn die gesamte Schmelze erstarrt ist, beginnt die Temperatur weiter abzusinken.

Bei einer erzwungenen, schnellen Abkühlung stimmen die Haltepunkte der Abkühlung nicht mehr mit denen der Erwärmung überein, da bestimmte Umwandlungen unterdrückt und sie in ihrer Kinetik stark behindert werden. Dadurch lassen sich bestimmte Gefüge und Eigenschaften einstellen. Ein Haltepunkt ist also immer ein Anzeichen für einen Umwandlungsprozeß, sei es z. B. bezüglich der Kristallstruktur oder anderen Eigenschaften.

Bei der Abkühlung von nicht-eutektischen Legierungen laufen mehrere Kristallbildungsprozesse parallel oder besser gesagt, iterativ ab, weswegen es keine Haltepunkte sondern Knickpunkte gibt. Hier existieren Bereiche, in denen die Temperatur infolge wechselnder Mischkristallbildung langsamer abkühlt (siehe *Abb. 2*). Es bilden sich z. B. α -Mischkristalle so lange, bis die Konzentration der Restschmelze an B-Atomen übersättigt ist und sich β -Mischkristalle bilden. Das führt wiederum zu einer Übersättigung an A-Atomen in der Schmelze und einer erneuten Bildung von α -Mischkristallen usw., bis die ganze Schmelze völlig aufgebraucht ist. Nicht-eutektische Legierungen zeigen für jede Mischkristallart einen Knickpunkt, während eutektische Legierungen sich bei der Abkühlung dagegen wie reine Metalle verhalten.

Die thermische Analyse dient also dazu, die Abkühlungskurve eines Metalls oder einer Legierung zu bestimmen. An den Halte- und Knickpunkten im sonst glatten Verlauf kann man auf Zustandsänderungen schließen. Welche Zustandsänderungen stattfinden, kann allerdings anhand der thermischen Analyse nicht festgestellt werden, sondern muß durch Gefügeuntersuchungen unterstützt werden. Dazu werden metallurgische Schlitze von Proben erstellt, deren natürliche Gefügeumwandlung durch Abschrecken unterdrückt wurden. Aus den Abkühlungskurven kann dann das Zustandsdiagramm konstruiert werden.

2.5 Grundtypen binärer Zustandsdiagramme

Ein binäres Zustandsdiagramm (Zweistoffsystem) soll Aufschluß über das Gefüge jedes möglichen Mischungsverhältnisses der beiden Legierungskomponenten geben, um daraus auf die Eigenschaften der entsprechenden Zusammensetzung rückschließen zu können. Neben den sehr häufig vorkommenden Zustandsschaubildern für Zweistoffsysteme gibt es desweiteren Zustandsdiagramme für Mehrstoffsysteme. Diese nennt man entsprechend ternäre, quaternäre usw. Zustandsdiagramme, auf die an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen werden soll.

Im flüssigen Zustand sind alle Komponenten eines Legierungssystems vollständig gelöst. Liegt dieser Fall nicht vor, wird das Produkt normalerweise nicht als Legierung bezeichnet und es handelt sich um ein System mit vollkommener Unlöslichkeit im festen als auch im flüssigen Zustand (Beispiel: System Fe-Pb). Unter dieser Voraussetzung bleiben als mögliche Grundtypen folgende Möglichkeiten binärer Zustandsdiagramme:

- I) Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand (*Abb. 3*).
- II) Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand (*Abb. 4*).
- III) Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, beschränkte Löslichkeit im festen Zustand (*Abb. 5, 6*).

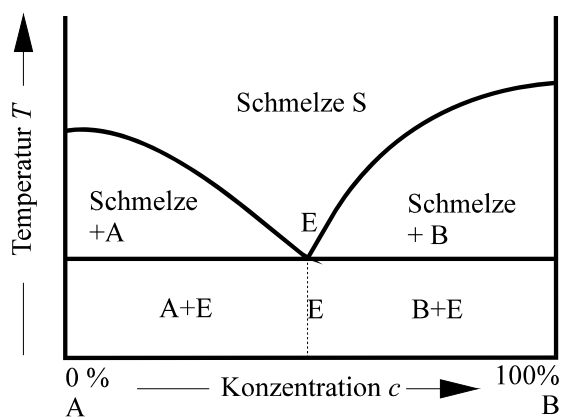


Abb. 3: Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand und vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand eines Binärsystems (I)

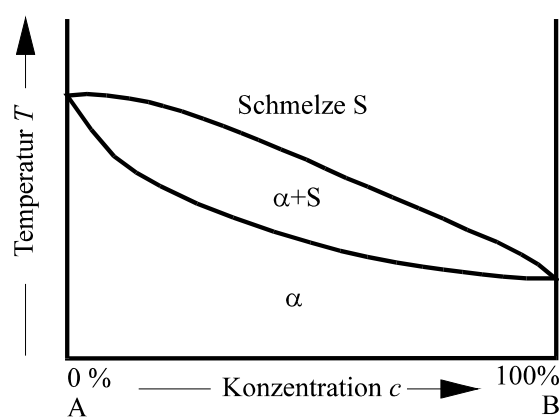


Abb. 4: Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand und vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand eines Binärsystems (II)

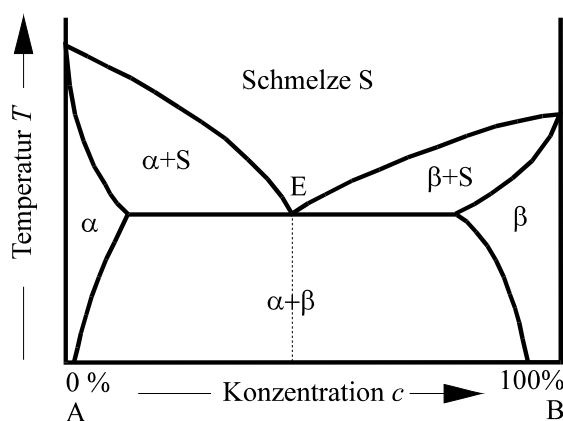


Abb. 5: Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand und beschränkte Löslichkeit im festen Zustand: Eutektisches System(III)

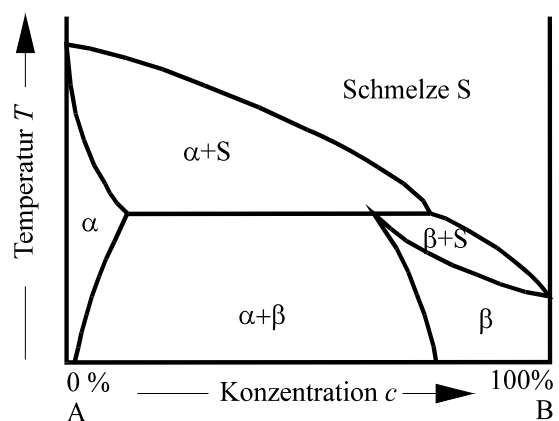


Abb. 6: Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand und beschränkte Löslichkeit im festen Zustand: Peritektisches System(III)

Vollkommene Löslichkeit bedeutet die Bildung von Mischkristallen, bei der die verschiedenen Komponenten bzw. Atomsorten in ein Gitter eingebaut werden, die Legierung also homogen ist. Bei *vollkommener Unlöslichkeit* ergibt sich ein Kristallgemisch, d.h., nur Kristalle (Körner) einzelner Atomsorten liegen vor. Es gibt kein Mischungsverhältnis der beiden Legierungskomponenten, bei dem Mischkristalle entstehen. Es entsteht stets ein mehrphasiges, heterogenes Gefüge mit Körnern aus den reinen Legierungskomponenten. Bei beschränkter Löslichkeit dagegen entstehen, abhängig vom Mischungsverhältnis, entweder ein- oder mehrphasige Legierungen.

In Abb. 3 ist ein Binärsystem mit einem Eutektikum dargestellt. Oberhalb der *Liquiduslinie* (also im Bereich der Schmelze) sind beide Komponenten A und B vollständig ineinander gelöst. Fällt die Temperatur im Bereich übereutektischer Zusammensetzung unter die betreffende Schmelztemperatur, liegen dort zwei Phasen vor: die Komponente B und Schmelze. Für untereutektische Zusammensetzungen unterhalb der Liquiduslinie ist der ähnliche Fall vorliegend: dort existieren Komponente A und Schmelze gleichzeitig. Wird die

Temperatur in beiden Bereichen nun noch weiter erniedrigt, erreicht man die *Soliduslinie*, (horizontale Linie) unterhalb welcher nur noch zwei feste Phasen vorliegen: ein heterogenes Gefüge bestehend aus den Komponenten A und B, die im festen Aggregatzustand vollständig unlöslich sind. Bei eutektischer Zusammensetzung (E) liegt der niedrigste Schmelzpunkt der Legierung vor. An diesem Punkt gehen bei steigender Temperatur die beiden festen Gefügebestandteile direkt in den schmelzflüssigen Zustand über.

Abb. 4 zeigt ein Binärsystem mit vollständiger Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand. Oberhalb der Liquiduslinie liegt eine homogene Schmelze vor. Fällt die Temperatur unterhalb die Liquiduslinie, so bilden sich im gesamten Konzentrationsbereich α -Mischkristalle (α -Mk) bestehend aus den Komponenten A und B aus, die neben der schmelzflüssigen Phase existieren. Bei Unterschreiten der Soliduslinie erhält man eine homogene Phase, die aus α -Mischkristallen besteht. Hier liegt eine vollständige Mischkristallbildung vor.

Abb. 5 und Abb. 6 zeigen Zustandsschaubilder mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen und beschränkter Löslichkeit im festen Zustand (auch Randlöslichkeit genannt). Hier bilden sich im Randbereich unterhalb der Soliduslinie bei hoher A- oder B-Konzentration homogene α - bzw. β -Mischkristalle aus, während im mittleren Konzentrationsbereich α - und β -Mischkristalle gleichzeitig vorliegen. Das Diagramm in Abb. 5 weist ein ausgeprägtes Eutektikum auf, während das Diagramm in Abb. 6 ein sogenanntes *Peritektikum* besitzt. Letzteres kommt durch einen großen Unterschied in den Schmelztemperaturen der reinen Komponenten A und B zustande.

2.6 Interpretation von Zustandsdiagrammen

Als Beispiel für die Interpretation dient ein Zustandsschaubild vom schon angesprochenen Grundtyp II (s. Abb. 7):

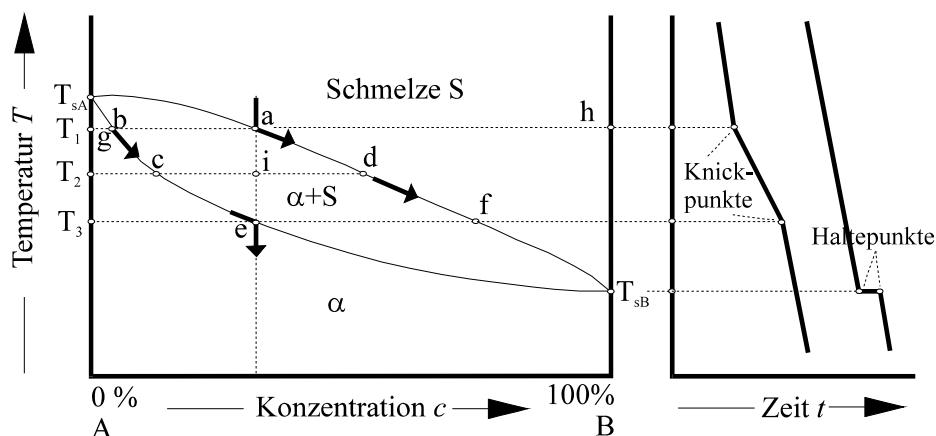


Abb. 7: Interpretation eines Zustandsschaubildes am Beispiel einer Legierung mit vollkommener Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand

In der Schmelze sind die Komponenten A und B vollkommen ineinander gelöst, unterhalb der Liquiduslinie kristallisieren aus der Schmelze α -Mischkristalle mit beliebigem B-Gehalt aus. T_{sA} und T_{sB} bezeichnen die Schmelzpunkte der reinen Komponenten A und B. Kühlt die Schmelze beispielsweise am Punkt a ab, werden folgende Temperaturpunkte durch die nachfolgenden Vorgänge charakterisiert:

- Temperatur T_1 : Die Liquiduslinie wird unterschritten, dadurch Einsetzen der Kristallisation (Legierung befindet sich im 2-Phasenfeld) und Wachstum der α -Mischkristalle mit der Zusammensetzung von Punkt b.
- Temperatur T_2 : Mit sinkender Temperatur bilden sich fortwährend B-reichere Mischkristalle (entlang der Linie b-e) über Diffusion, dadurch ändert sich die Restschmelze längs a-f. Das Verhältnis der Phasen entspricht $c-d=100\%$, wobei i-d den Anteil der Mischkristalle und c-i den Anteil der Restschmelze wiedergibt.
- Temperatur T_3 : Bei Erreichen und Unterschreiten der Soliduslinie befindet sich die Legierung im 1-Phasenfeld. Die Kristallisation ist abgeschlossen und es liegt 100% Mischkristall mit der Konzentration e vor.

2.6.1 Das Hebelgesetz

Liegt für eine Legierung ein Zustandsdiagramm vor, kann man bei bekannter Legierungszusammensetzung Art und Menge der Phasen bei beliebiger Temperatur ablesen. Um z.B. den Anteil der verschiedenen Phasen in einem Mehrphasen-Feld abzulesen, bedient man sich des Hebelgesetzes: ausgehend von dem Punkt, an dem man das Massenverhältnis der vorkommenden Phasen bestimmen möchte, zieht man eine waagerechte Linie. Die Linie betrachtet man als einen zweiseitigen Hebel mit dem Drehpunkt im interessierenden Zustandspunkt. Betrachtet man das Beispiel in *Abb. 8*, so entspricht der Hebelarm rechts dem Massenanteil der α -Mischkristalle, der Hebelarm links dem Massenanteil der anderen Phase (hier Schmelze). Da die Gesamtmasse auf der Abszisse ablesbar ist, lassen sich die Massenanteile der Phasen errechnen.

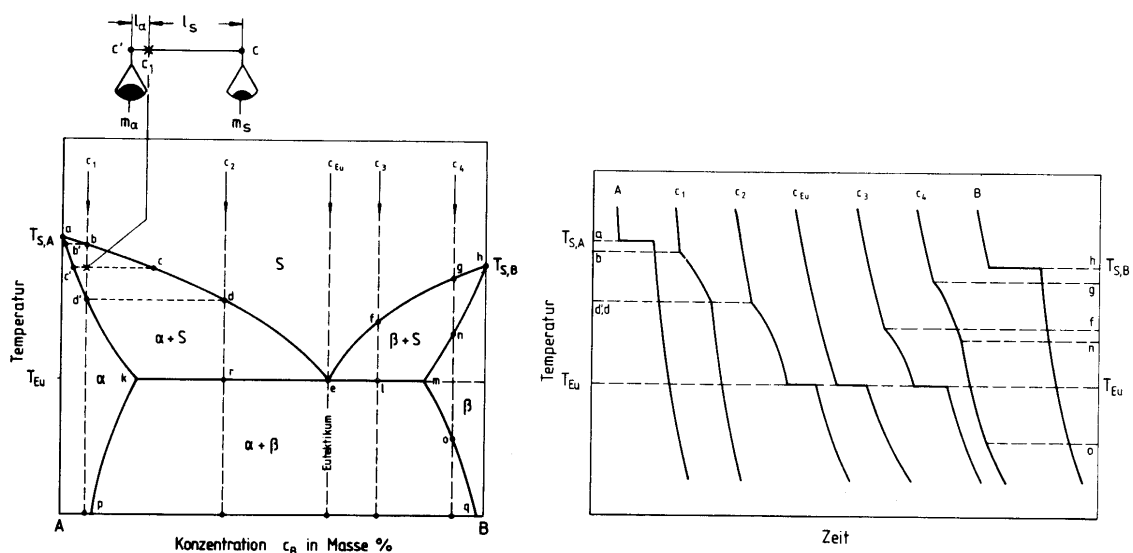


Abb. 8: Zustandsdiagramme zur Erläuterung des Hebelgesetzes

Nach Umformung gelangt man dann zu den Ausdrücken

$$m_\alpha = \frac{l_s}{l} m \quad \text{und} \quad m_s = \frac{l_\alpha}{l} m \quad (2)$$

mit der Gesamtlänge des Hebels l und der Gesamtmasse m . Der Massenanteil einer Phase ist also dem jeweils abgewandten Hebelarm proportional, weshalb man das Prinzip auch das *Gesetz der abgewandten Hebelarme* nennt. Das Hebelgesetz läßt sich sinngemäß auf jedes mehrphasige Gebiet anwenden.

2.7 Thermoelektrischer Effekt

Auch wenn heute digitale Thermometer zur Laborgrundausrüstung gehören, soll hier die Temperatur der Schmelzen auf klassische Art gemessen werden. Es gibt viele Möglichkeiten, Temperaturen zu messen, z.B. durch Messung der Änderung des elektrischen Widerstands eines Materials. Solche Meßfühler bedienen sich eines NTC oder PTC-Widerstands (**n**egativer/**p**ositiver Temperatur-Coeffizient) mit bekannter Temperatur/Widerstands-Abhängigkeit. Ein Problem dabei ist der Referenzwert. Die Messung der Widerstandsänderung eines NTC-Widerstands z.B. benötigt meistens andere Widerstände, die ebenfalls temperaturabhängig sind. Außerdem lassen sich Widerstände meist nur bei geringen Temperaturen einsetzen.

In unserem Versuch wird der ebenso einfache wie genaue thermoelektrische Seebeck-Effekt zur Temperaturmessung eingesetzt. Zwei Drähte aus verschiedenen elektrisch leitenden Materialien, die Komponenten des Thermoelements, werden an den Enden innig verbunden, z.B. geschweißt oder gelötet. Welche Thermoelemente eingesetzt werden, hängt vom Meßbereich, der Genauigkeit und der Meßfrequenz ab. Im Versuch wird ein sogenanntes k-Typ-Thermoelement eingesetzt, das aus zwei verschweißten Ni/CrNi-Drähten besteht und maximal 1200°C messen kann.

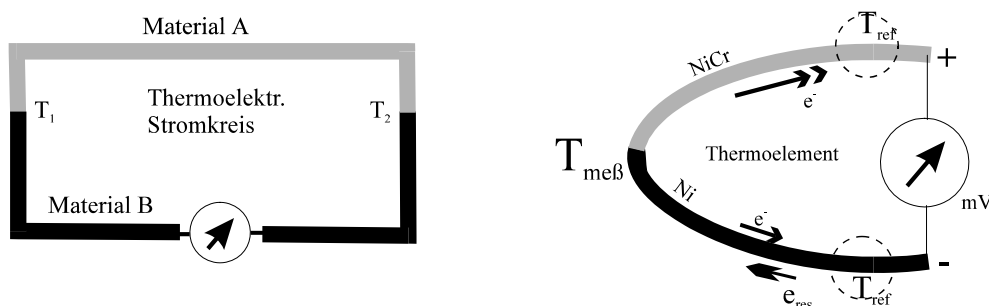


Abb. 9: Funktionsprinzip eines Thermoelements

Das Grundprinzip eines Thermoelements lautet: Hat ein Draht an beiden Enden unterschiedliche Temperaturen und wird ein Stromfluß ermöglicht, bewegen sich die Elektronen infolge der höheren Bewegungsenergie vom warmen zum kalten Ende. Eine meßbare Potentialdifferenz entsteht dann, wenn die Enden mit einem anderen Material verbunden werden, welches den Elektronen einen anderen Fließwiderstand entgegensetzt. Der Fließwiderstand wird durch den Seebeck-Koeffizienten bzw. durch die Position des Materials in der thermoelektrischen Spannungsreihe ausgedrückt. Im Fall des Ni/CrNi-Elements ergibt sich im Ni eine viermal leichtere Bewegung als im CrNi. Die Thermospannung zwischen den

Enden kann gemessen werden und liegt bei Ni/CrNi bei einem Wert von $0,04\text{mV}/^\circ\text{C}$. Für genaue Messungen ist es sinnvoll, als kaltes Ende eine exakte Referenztemperatur zu erzeugen, z.B. durch Eiswasser.

Prinzipiell würde allerdings auch die Feststellung der Raumtemperatur ausreichen. Die Abhängigkeit der gemessenen Spannung von der Temperaturdifferenz, bezogen auf eine Referenztemperatur von meistens 0°C , ist bei gängigen Thermoelementen relativ linear. Für genaue Messungen kann sie auch durch Formeln oder Tabellen (s. Anhang) bestimmt werden.

3. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung:

Es wird das Verfahren der thermischen Analyse auf 7 verschiedene Blei-Zinn-Legierungen sowie reinem Blei und reinem Zinn angewendet. Dazu wird die Temperatur der abkühlenden Schmelze in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Dabei zeigen sich in den Temperaturkurven bei den verschiedenen Phasenänderungen die erwähnten charakteristischen Knick- und Haltepunkte. Ein Knickpunkt zeigt eine Zustandsänderung innerhalb der Schmelze an, d.h., bestimmte Teile der Schmelze kristallisieren. Ein Haltepunkt kommt nur bei reinen Metallen und eutektischen Legierungen vor. In *Abb. 10* ist der Versuchsaufbau skizziert:

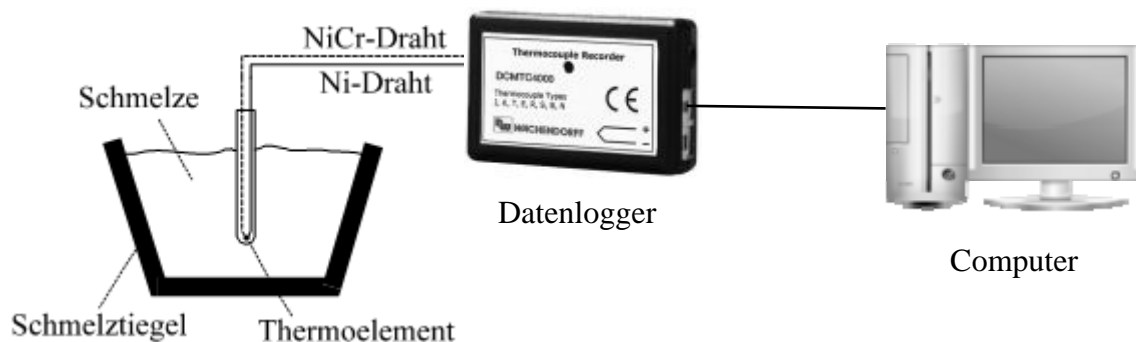


Abb. 10: Versuchsaufbau zur Erstellung eines Zustandsdiagramms

Die einzelnen Pb-Sn-Legierungen werden in Tiegelöfen so lange erhitzt, bis alle Bestandteile aufgeschmolzen sind (Temperatur $>327,5^\circ\text{C}$). Die Temperatur der abkühlenden Legierungen wird mit Thermoelementen gemessen, die sich in Glasröhrchen befinden. Für die Temperaturmessung werden Ni/NiCr-Thermoelemente benutzt. Die gemessene Thermospannung wird mit einem Computer in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet. Anhand der Tabelle im Anhang sollen aus den Thermospannungen die Temperaturen bestimmt werden. Diese sollen anschließend in das Zustandsdiagramm gezeichnet werden, indem die Knick- und Haltepunkte in ein Diagramm Temperatur (Ordinate) über Gewichtsprozent (Abszisse) eingetragen werden. Die Punkte werden durch Linien stetig verbunden. Da die Verbindung der Punkte nicht eindeutig ist, setzt man voraus, daß der Grundtyp des Diagramms bekannt bzw. direkt erkennbar ist. Genauere Untersuchungen setzen andere Verfahren und Gefügeuntersuchungen voraus.

4. Literatur

1. H.-J. Christ, "Werkstofftechnik I", Vorlesungsskript, Universität-GH Siegen
2. Bargel/Schulze, "Werkstoffkunde"
3. Macherauch, "Praktikum in Werkstoffkunde"
4. E. Riedel, "Anorganische Chemie", Walter de Gruyter, New York 1990
5. A.R. West: "Grundlagen der Festkörperchemie", VCH-Verlag, Weinheim 1992

5. Kontrollfragen

- Was ist eine Phase?
- Erklären Sie die Phasenregel!
- Was ist ein Mischkristall? Wie ist er aufgebaut?
- Wie kann man sich einen Gleichgewichtszustand vorstellen? Welche Zustände gibt es?

- Was sind Zustandsdiagramme?
- Was bedeutet *binär* bei Zustandsdiagrammen?
- Welche Grundtypen binärer Zustandsdiagramme gibt es? Wie unterscheiden sie sich?
- Was ist eine *Liquidus-* bzw. *Soliduslinie*?
- Was ist ein *Eutektikum*? Was ist ein *Peritektikum*?
- Was heißt unter- bzw. übereutektisch?
- Wann und bei welchen Legierungen treten *Knickpunkte* auf?
- Wann treten keine Knickpunkte auf?
- Was sagt das *Hebelgesetz* im Zusammenhang mit Zustandsdiagrammen aus?
- Erklären Sie das Hebelgesetz.
- Wie konstruiert man das Zustandsdiagramm aus den Abkühlungskurven?
- Wie sieht das Phasendiagramm von Pb-Sn aus?
- Abkühlungs- und Aufheizungsverläufe sollte man können.

- Was ist ein *Thermoelement*?
- Wie funktioniert ein Thermoelement? Erklären Sie den thermoelektrischen Effekt!
- Welche Materialien werden für Standard-Thermoelemente verwendet?
- Wie ist die Umformung der abgebildeten Thermo-Stromkreise zu erklären?
- Was ist das Referenzelement, warum wird es benötigt?
- Wie sieht unser Versuchsaufbau aus? Skizzieren Sie ihn schematisch.
- Wie erhält man die Werte aus den Meßschrieben und wie werden sie verwendet?

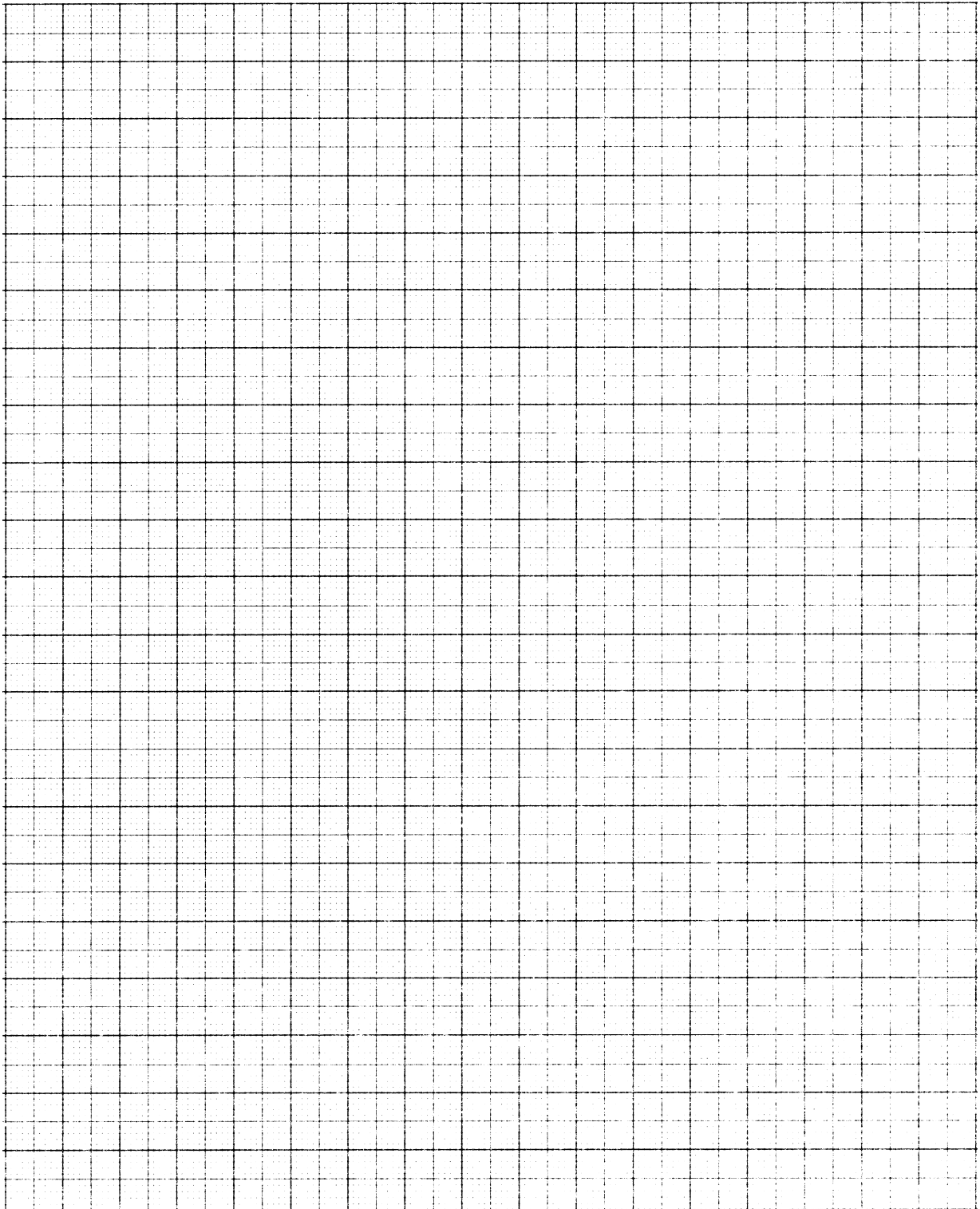
- Wo liegen die Schmelzpunkte von reinem Blei, Zinn und der eutektischen Legierung?
- Welche Zusammensetzung hat die eutektische Pb-Sn-Legierung?

6. Versuchsauswertung

6.1 Ermittelte Versuchsdaten

Bitte die Werte während des Versuches eintragen. Die Spannungswerte sollen aus den Meßschrieben abgelesen werden. Die zugehörigen Temperaturwerte sind der Tabelle im Anhang zu entnehmen.

Pb-Anteil [Gew.%]	Haltepunkte [mV]	Temperaturen [°C]	Knickpunkte [mV]	Temperaturen [°C]
0				
10				
20				
40				
60				
70				
80				
90				
100				

6.2 Erstelltes Zustandsdiagramm von Pb-Sn

7. Anhang

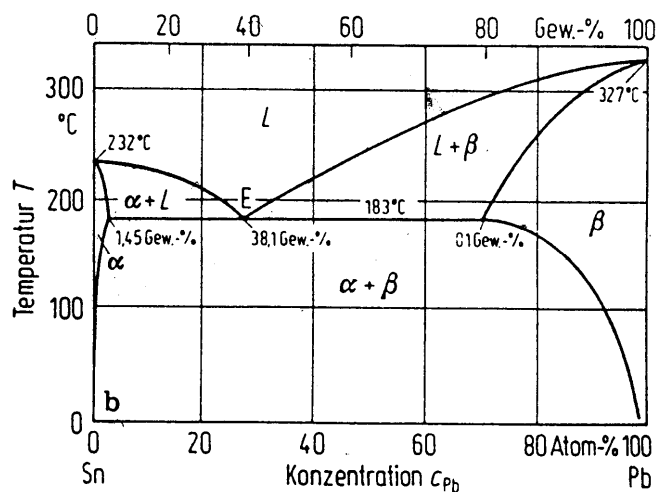


Abb. 11: Phasendiagramm von Pb-Sn

**CALIBRATION TABLES
FOR THERMOCOUPLES (Continued)
CHROMEL-ALUMEL THERMOCOUPLES**

(Electromotive Force in Absolute Millivolts. Temperatures in Degrees C
(Int. 1948) Reference Junctions at 0° C.)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(+)0	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36
10	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76
20	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16
30	1.20	1.24	1.28	1.32	1.36	1.40	1.44	1.49	1.53	1.57
40	1.61	1.65	1.69	1.73	1.77	1.81	1.85	1.90	1.94	1.98
50	2.02	2.06	2.10	2.14	2.18	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39
60	2.43	2.47	2.51	2.56	2.60	2.64	2.68	2.72	2.76	2.80
70	2.85	2.89	2.93	2.97	3.01	3.05	3.10	3.14	3.18	3.22
80	3.26	3.30	3.35	3.39	3.43	3.47	3.51	3.56	3.60	3.64
90	3.68	3.72	3.76	3.81	3.85	3.89	3.93	3.97	4.01	4.06
100	4.10	4.14	4.18	4.22	4.26	4.31	4.35	4.39	4.43	4.47
110	4.51	4.55	4.60	4.64	4.68	4.72	4.76	4.80	4.84	4.88
120	4.92	4.96	5.01	5.05	5.09	5.13	5.17	5.21	5.25	5.29
130	5.33	5.37	5.41	5.45	5.49	5.53	5.57	5.61	5.65	5.69
140	5.73	5.77	5.81	5.85	5.89	5.93	5.97	6.01	6.05	6.09
150	6.13	6.17	6.21	6.25	6.29	6.33	6.37	6.41	6.45	6.49
160	6.53	6.57	6.61	6.65	6.69	6.73	6.77	6.81	6.85	6.89
170	6.93	6.97	7.01	7.05	7.09	7.13	7.17	7.21	7.25	7.29
180	7.33	7.37	7.41	7.45	7.49	7.53	7.57	7.61	7.65	7.69
190	7.73	7.77	7.81	7.85	7.89	7.93	7.97	8.01	8.05	8.09
200	8.13	8.17	8.21	8.25	8.29	8.33	8.37	8.41	8.46	8.50
210	8.54	8.58	8.62	8.66	8.70	8.74	8.78	8.82	8.86	8.90
220	8.94	8.98	9.02	9.06	9.10	9.14	9.18	9.22	9.26	9.30
230	9.34	9.38	9.42	9.46	9.50	9.54	9.59	9.63	9.67	9.71
240	9.75	9.79	9.83	9.87	9.91	9.95	9.99	10.03	10.07	10.11
250	10.16	10.20	10.24	10.28	10.32	10.36	10.40	10.44	10.48	10.52
260	10.57	10.61	10.65	10.69	10.73	10.77	10.81	10.85	10.89	10.93
270	10.98	11.02	11.06	11.10	11.14	11.18	11.22	11.26	11.30	11.34
280	11.39	11.43	11.47	11.51	11.55	11.59	11.63	11.67	11.72	11.76
290	11.80	11.84	11.88	11.92	11.96	12.01	12.05	12.09	12.13	12.17
300	12.21	12.25	12.29	12.34	12.38	12.42	12.46	12.50	12.54	12.58
310	12.63	12.67	12.71	12.75	12.79	12.83	12.88	12.92	12.96	13.00
320	13.04	13.08	13.12	13.17	13.21	13.25	13.29	13.33	13.37	13.42
330	13.46	13.50	13.54	13.58	13.62	13.67	13.71	13.75	13.79	13.83
340	13.88	13.92	13.96	14.00	14.04	14.09	14.13	14.17	14.21	14.25
350	14.29	14.34	14.38	14.42	14.46	14.50	14.55	14.59	14.63	14.67

Tabelle 1: Thermospannung (in mV) in Abhängigkeit von der Temperatur (in °C) für Ni/NiCr-Thermoelemente (Referenzelement auf 0°C)