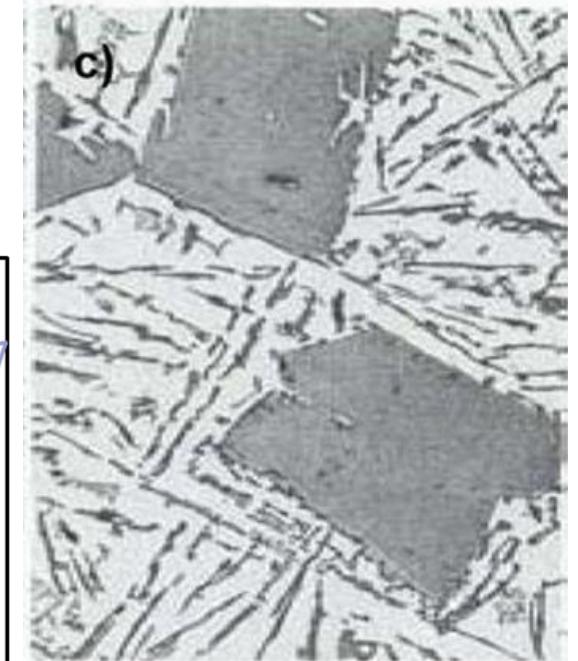
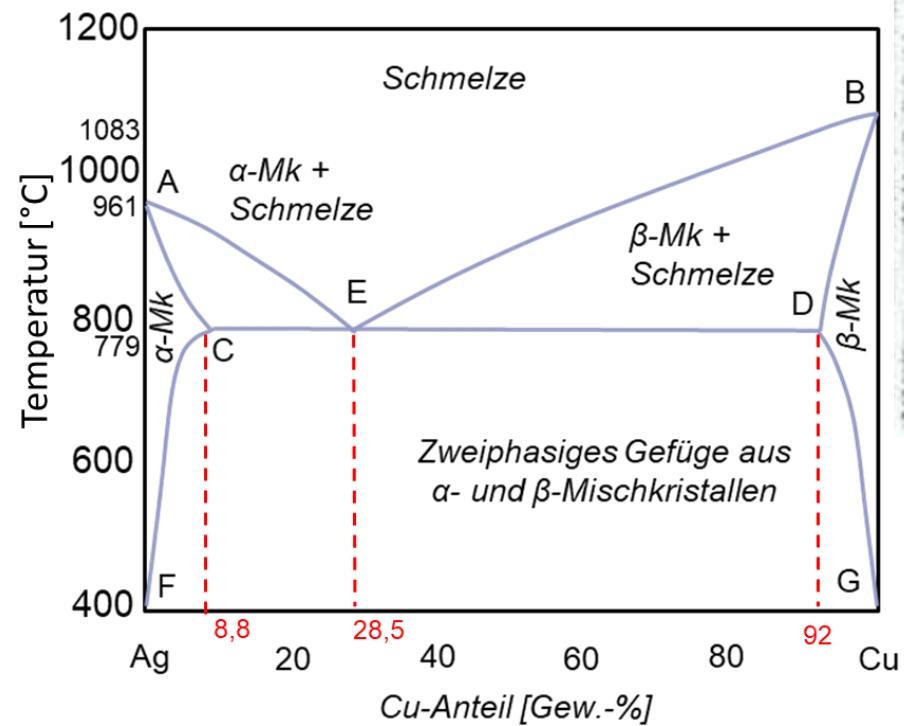


Werkstofftechnik

Zustandsdiagramme

Vorlesung



Zustandsdiagramme

Allgemeines

Bei der Erstarrung metallischer Schmelzen betrachteten wir bislang

- Reine Metalle
- Legierungen mit uneingeschränkter Löslichkeit der beiden Legierungselemente (Mischkristall)

Sehr häufig kommt es jedoch vor, dass sich in einem Werkstoff unterschiedliche Phasen ausbilden.

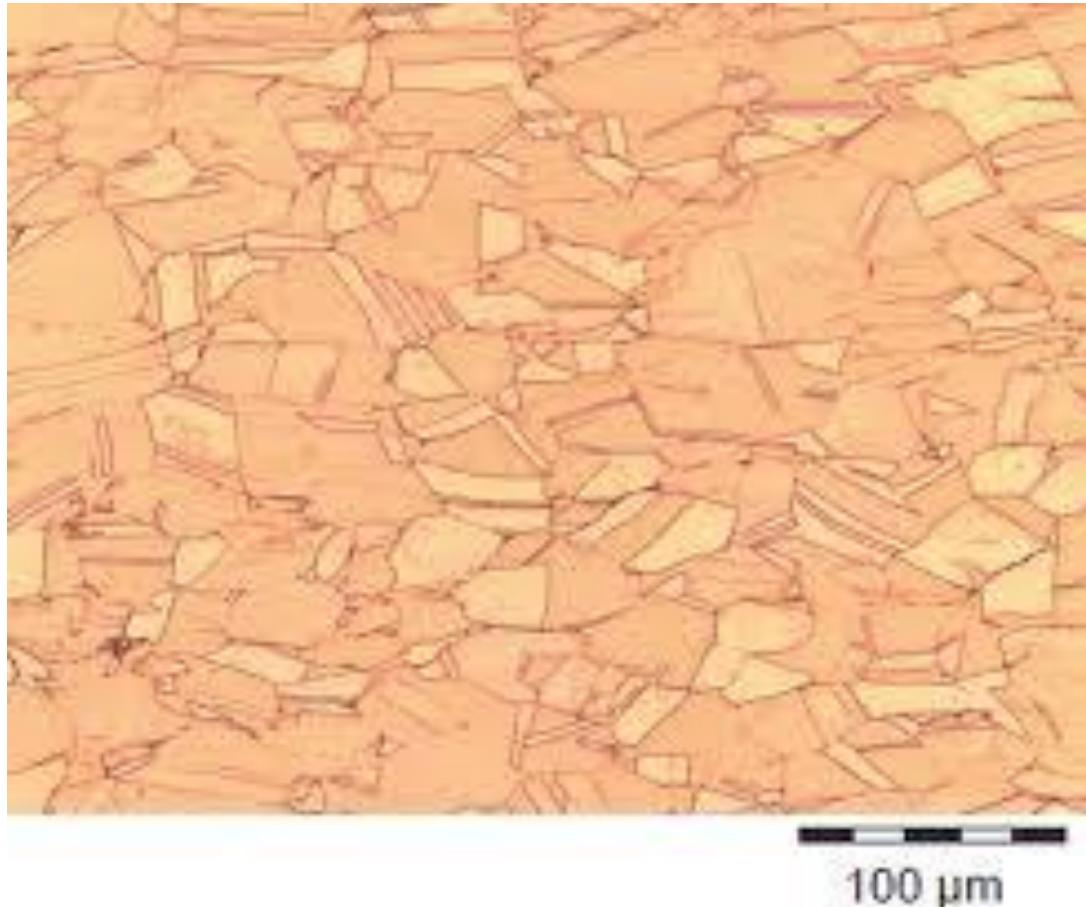
Diese unterscheiden sich in

- ihrer chemischen Zusammensetzung
- ihrem kristallinen Aufbau
- ihren mechanischen Eigenschaften

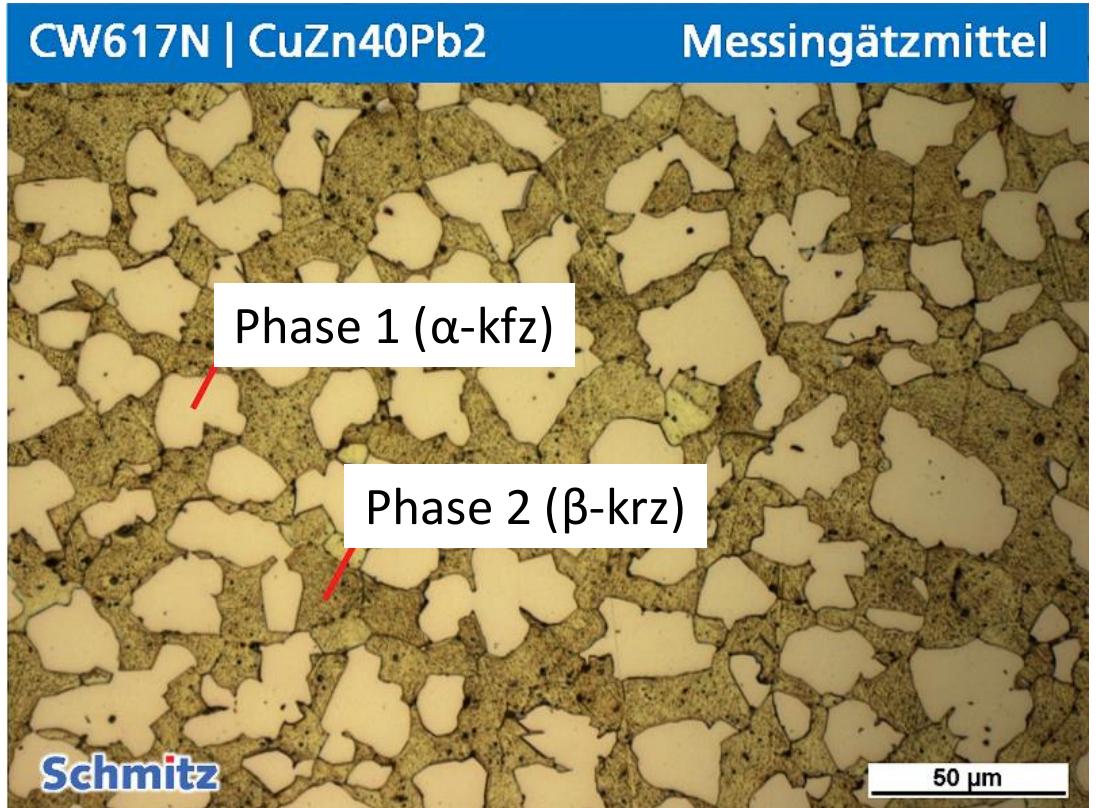
Zustandsdiagramme

Allgemeines

Gefüge von reinem Kupfer



Gefüge einer Messing-Legierung



Zustandsdiagramme

Allgemeines

Welche Phasen und Phasenanteile in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung der Legierung auftreten wird mit Hilfe von **Zustandsdiagrammen** ermittelt.

Zustandsdiagramme oder Zustandsschaubilder

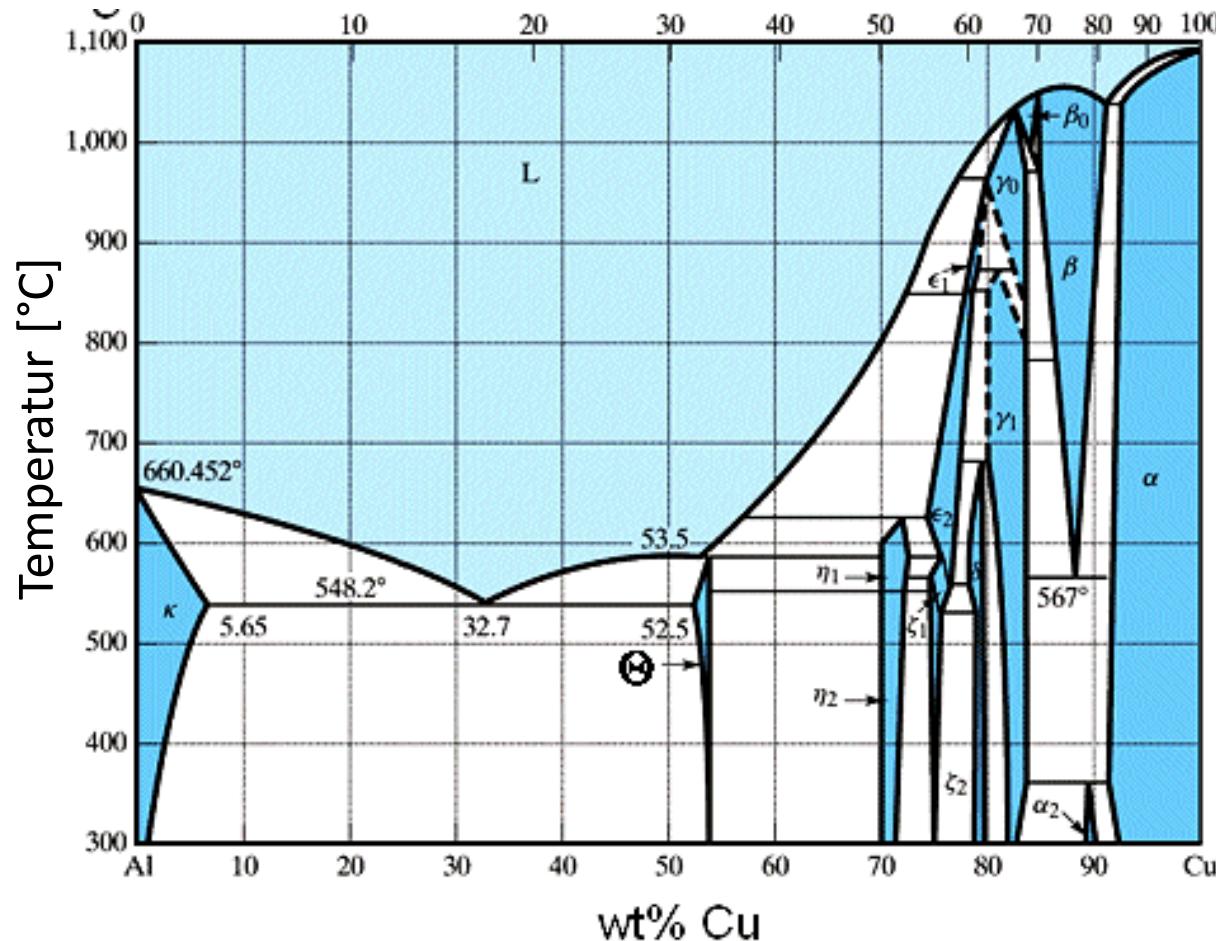
- Relevant für alle Legierungssysteme
- Ermöglichen Aussagen über Aggregatzustand, Phasen, Gefüge in Abhängigkeit der Zusammensetzung

Zustandsdiagramme sind bedeutend für folgende Fragestellungen

- Welche Gießtemperatur erfordert eine Legierung und wie groß ist der Erstarrungsbereich?
- Welche Phasen- und Gefügeumwandlungen treten auf?
- Welche Phasen und Gefüge liegen bei Gebrauchstemperatur vor?

Zustandsdiagramme

Beispiel eines Zustandsdiagramms – Das System Cu - Al

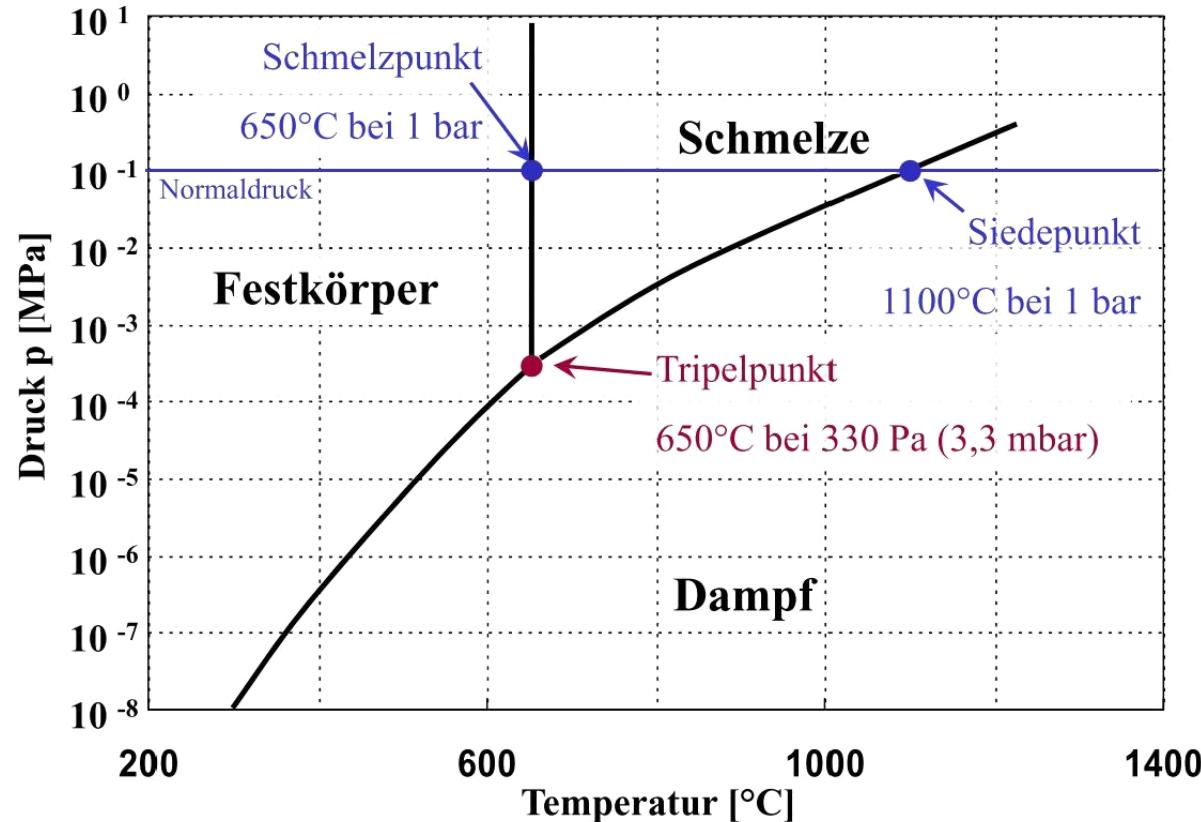


Zustandsdiagramme gelten
streng genommen nur für den
Gleichgewichtszustand, d.h. für
sehr langsame
Abkühlgeschwindigkeiten.

Diffusion !

Zustandsdiagramme

Wiederholung - Einstoffsysteme



Gibbsche Phasenregel:

$$F = K + 2 - P$$

F: Anzahl der Freiheitsgrade des Systems

K: Anzahl der Komponenten

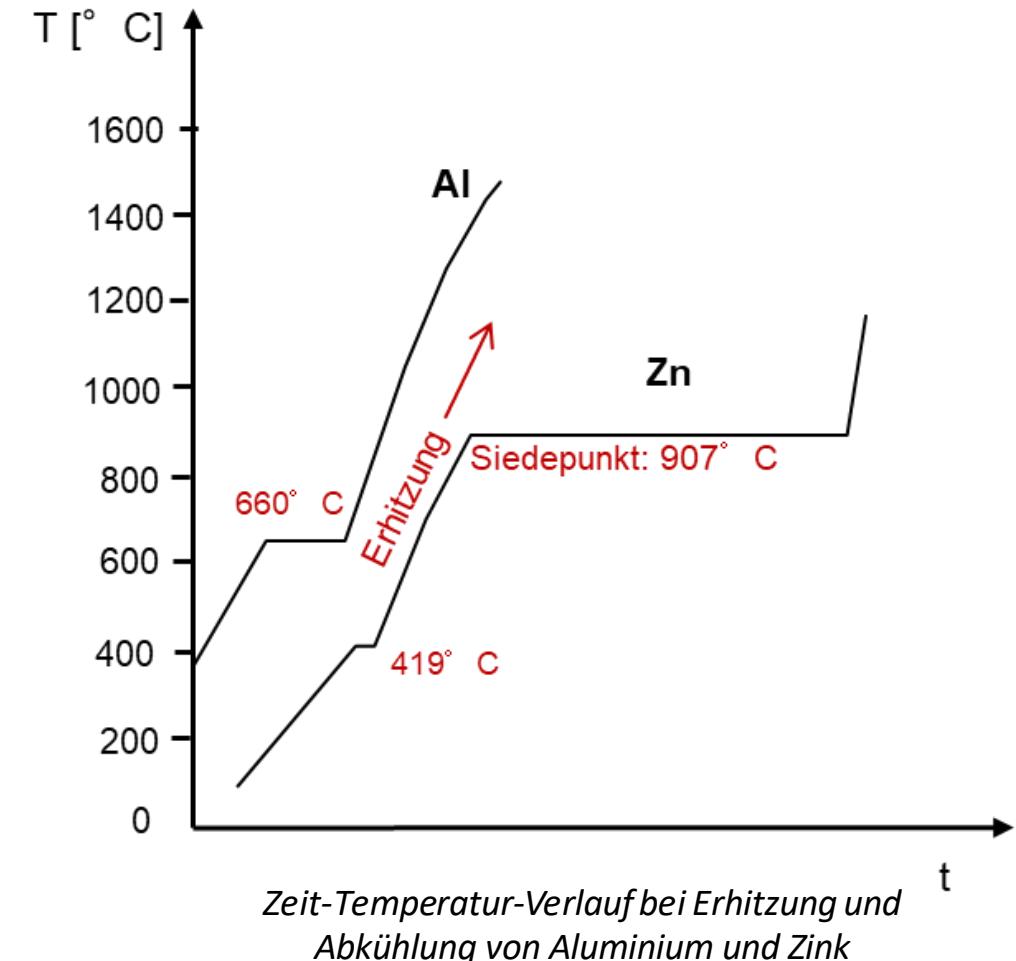
P: Anzahl der Phasen

In der Werkstofftechnik gilt: $F = K + 1 - P$, da der Druck konstant ist.

Zustandsdiagramme

Wiederholung - Einstoffsysteme

- Die Erstarrung von Schmelzen sowie Phasenumwandlungen sind bei reinen Metallen durch Haltepunkte im Temperatur-Zeit-Verlauf gekennzeichnet.
- Die Haltepunkte basieren auf
 - der freiwerdenden Kristallisationswärme (exotherm) während des Abkühlens
 - der aufzuwendenden Schmelzwärme (endotherm) während des Aufwärmes.

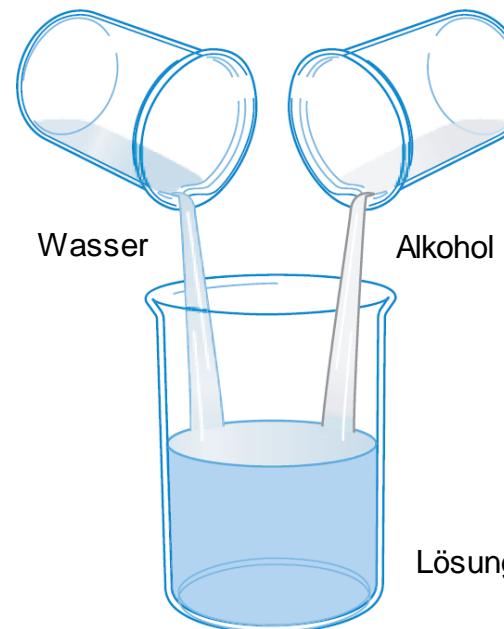


Zustandsdiagramme

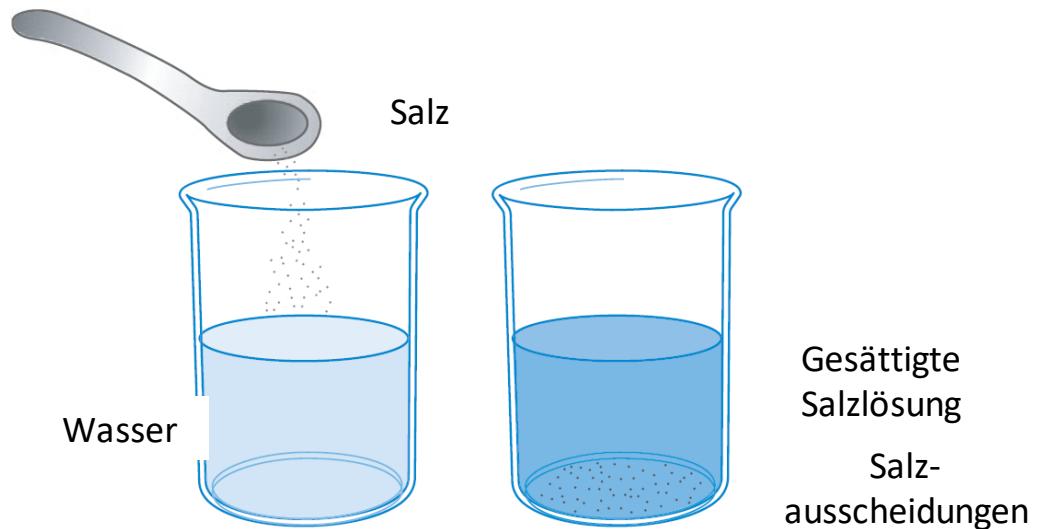
Zweistoffsysteme

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen:

Vollständige Mischbarkeit der Komponenten



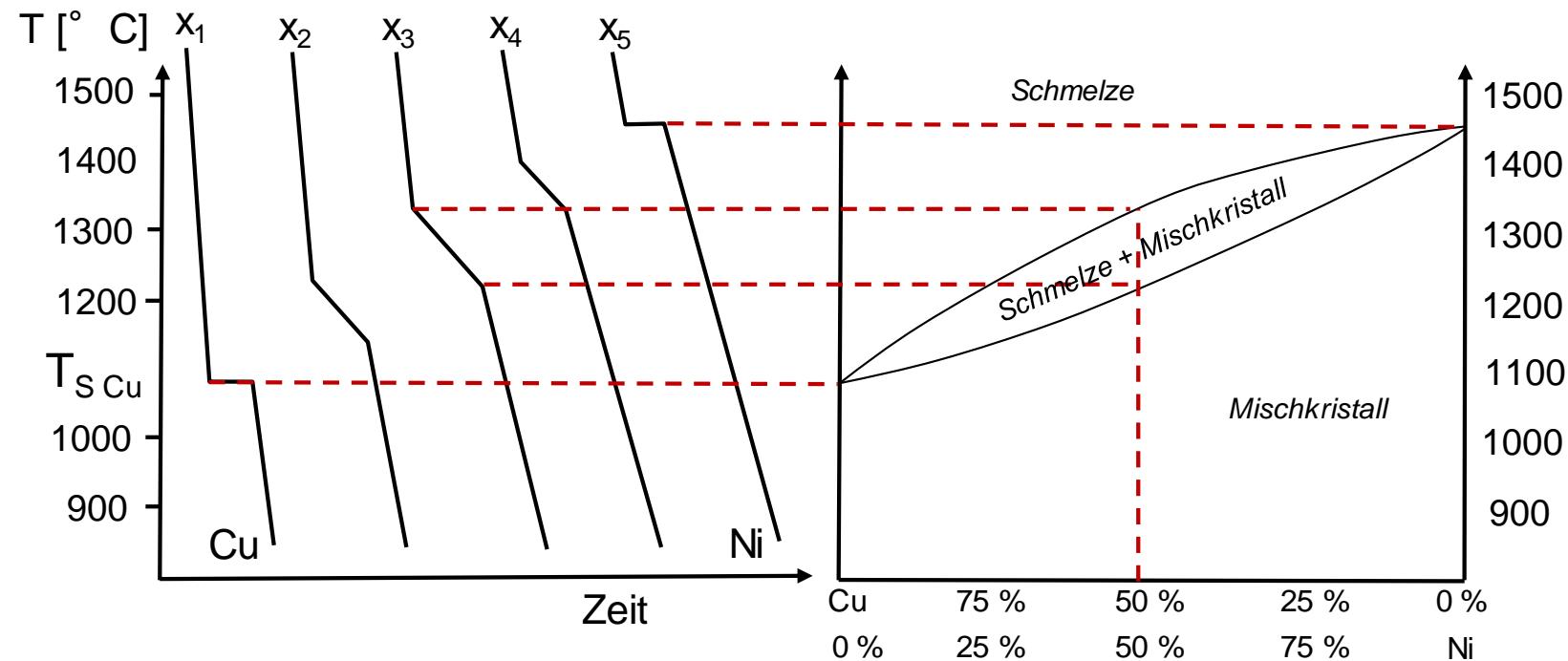
Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Vollständige Mischbarkeit der Komponenten

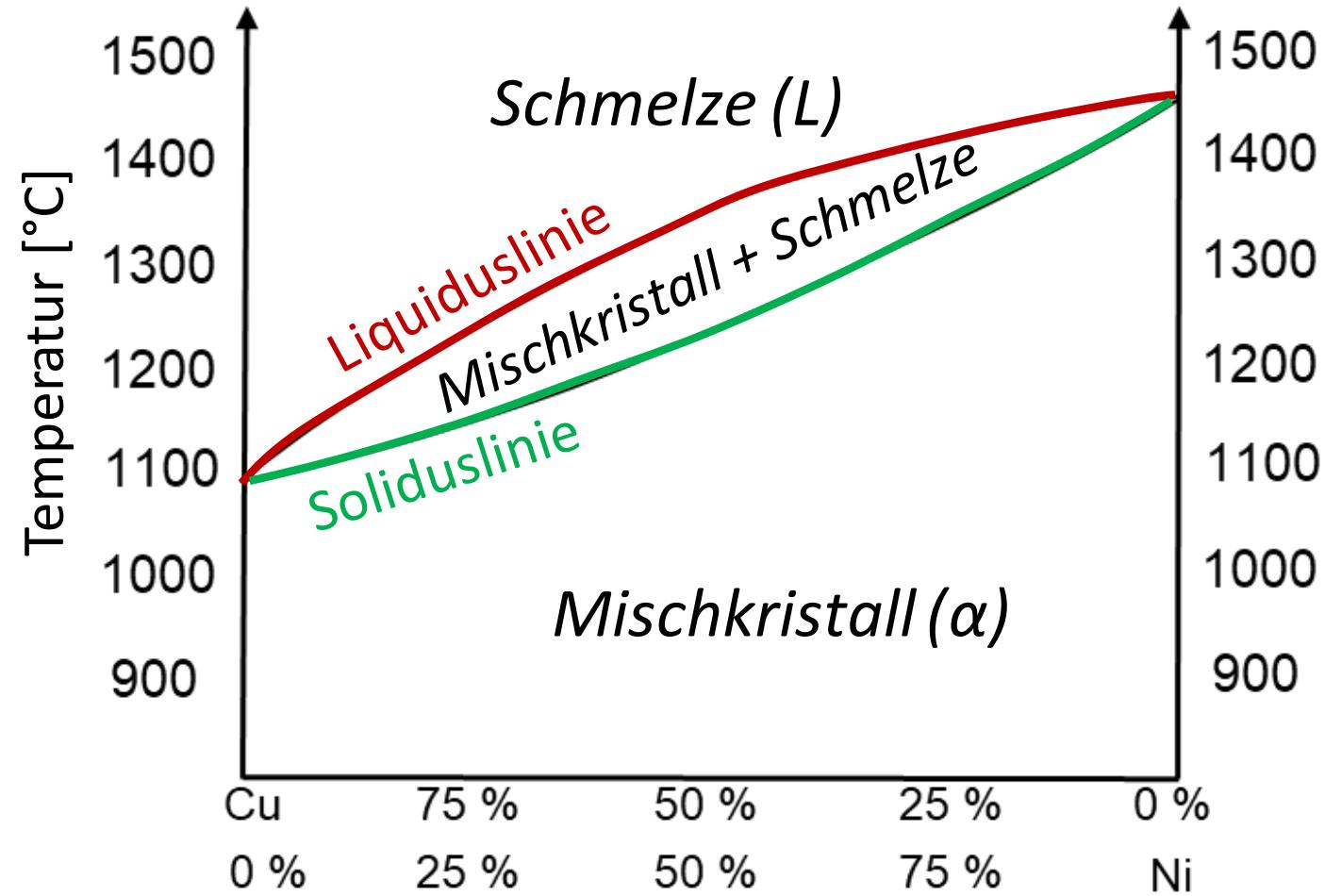
Typisches Zustandsdiagramm bei vollständiger Mischbarkeit der Komponenten (Beispiele: Cu-Ni, Bi-Sb, Cu-Au)



- Wachstum des Keimes erfordert Abtransport der latenten Erstarrungswärme (Knickpunkte).
- Reine Metalle besitzen einen Schmelzpunkt. Legierungen besitzen einen Schmelzbereich.

Zustandsdiagramme

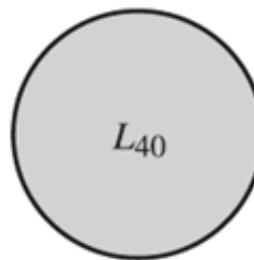
Zweistoffsysteme – Vollständige Mischbarkeit der Komponenten



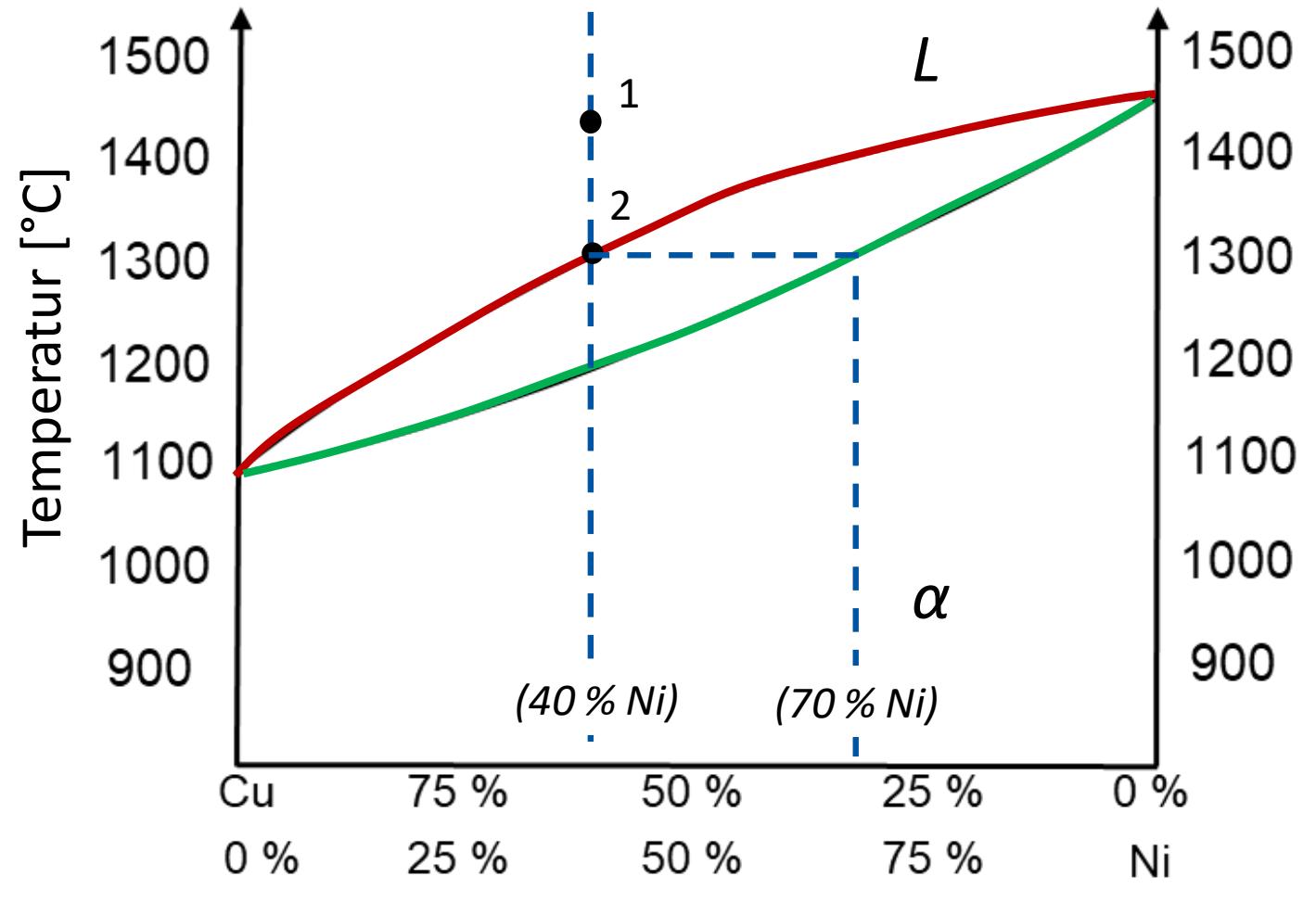
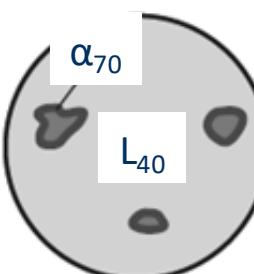
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Vollständige Mischbarkeit der Komponenten

- Im Punkt 1 liegt nur Schmelze mit einem prozentualen Ni-Anteil von 40 % vor.



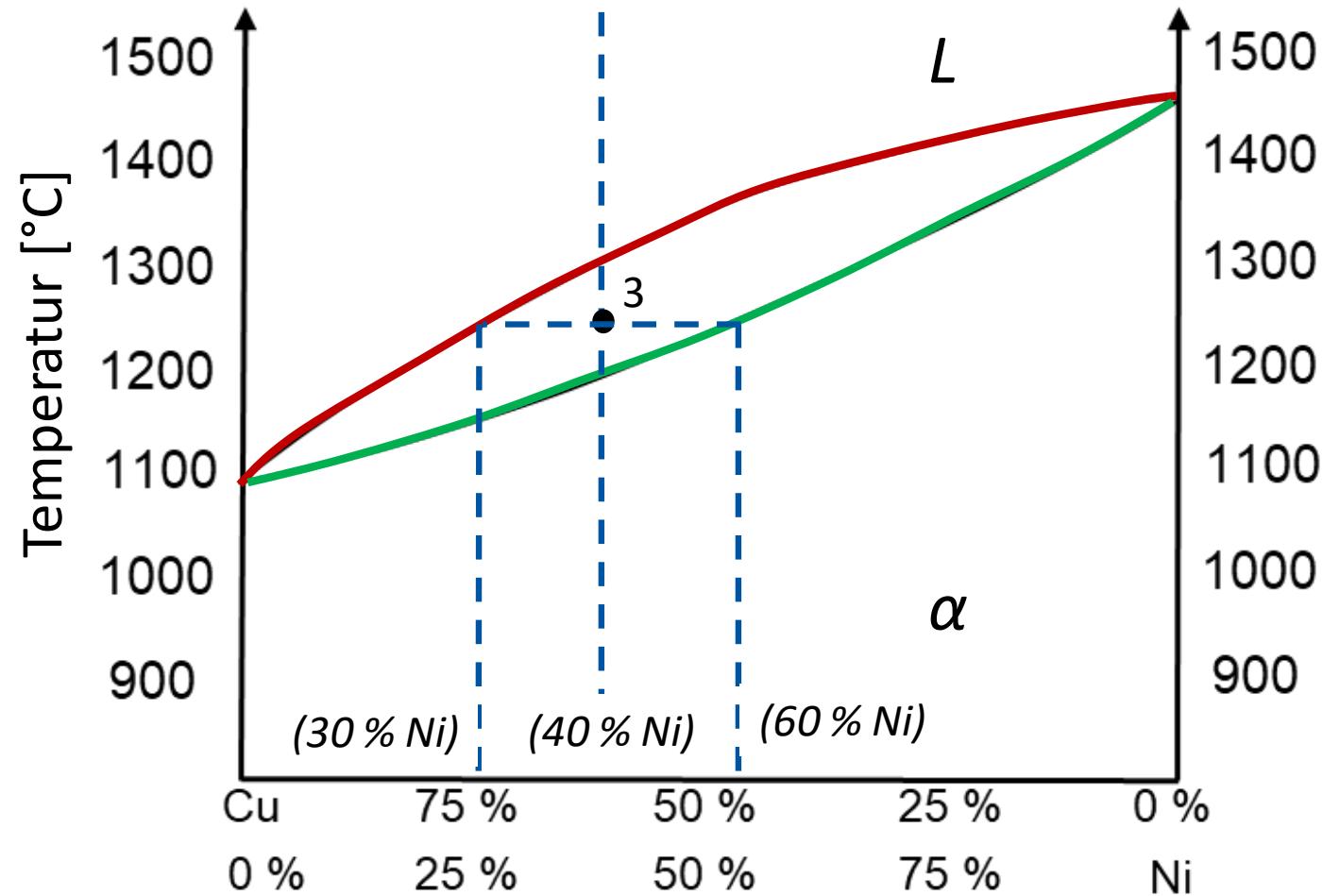
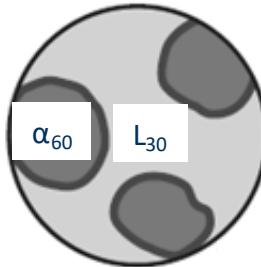
- Im Punkt 2 erreicht die Legierung die Liquiduslinie. Es beginnen sich erste Mischkristalle (70% Ni) aus der Schmelze auszuscheiden.



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Vollständige Mischbarkeit der Komponenten

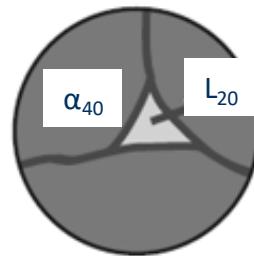
- Im Punkt 3 liegt eine Mischung aus Schmelze (30% Ni) und Mischkristall (60% Ni) vor.



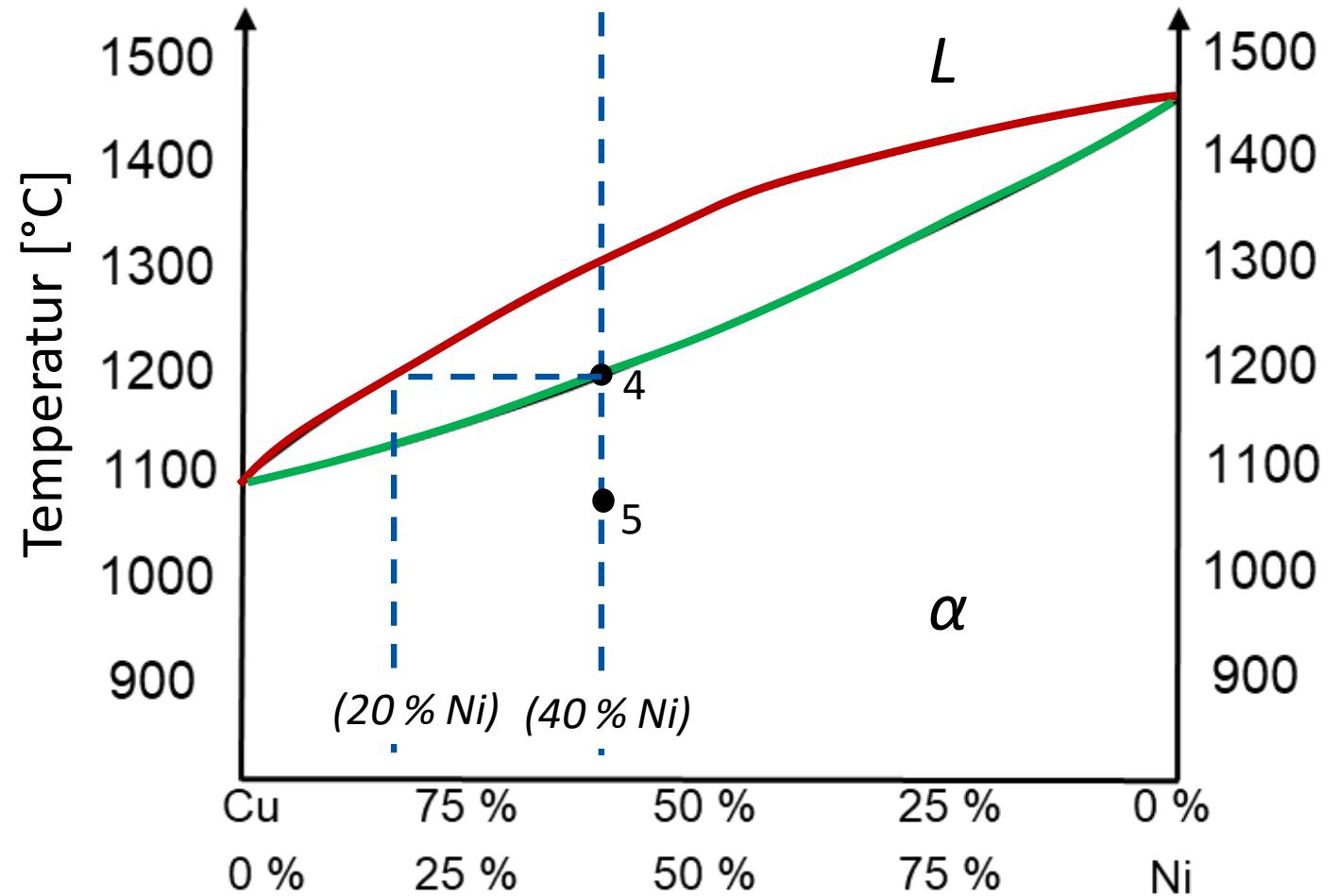
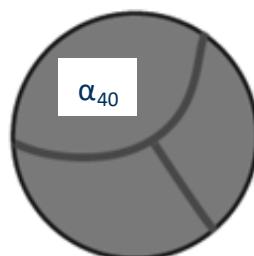
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Vollständige Mischbarkeit der Komponenten

- Im Punkt 4 erreicht die Legierung die Soliduslinie. Es verbleibt Restschmelze mit einem prozentualen Ni-Anteil von 20%.



- Im Punkt 5 liegt vollständig erstarrender Mischkristall (40% Ni) vor.



Zustandsdiagramme

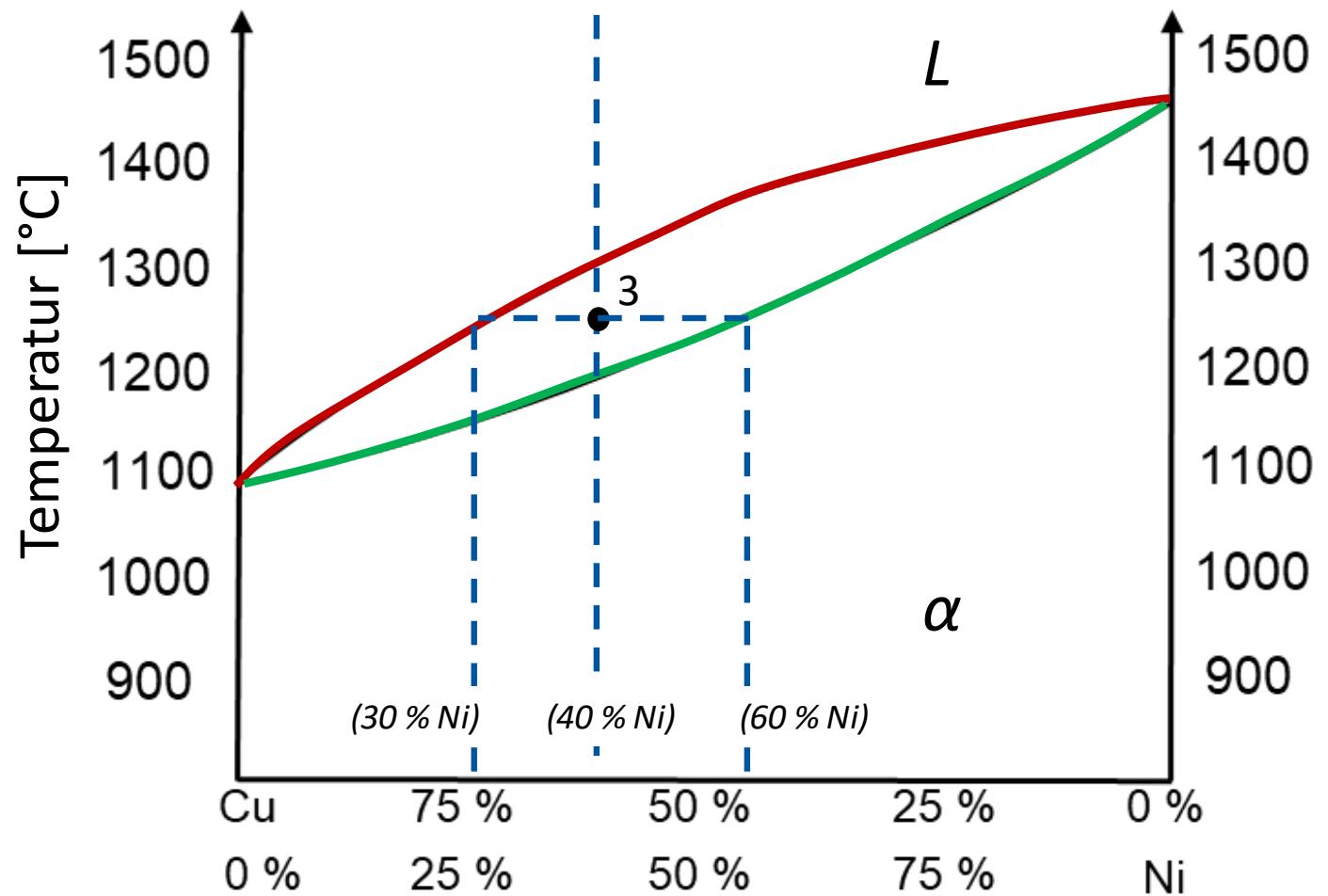
Zweistoffsysteme – Vollständige Mischbarkeit der Komponenten

- Bislang wurde nur die chemische Zusammensetzung der Schmelze und des Mischkristalls berücksichtigt.
- Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Bestimmung der Volumenanteile.
- Hierfür kommt das Hebelgesetz zur Anwendung.

Hebelgesetz

Volumenanteil der festen Phase

$$V_{\text{feste Phase}} = \frac{C_{Ni}^{\text{nom}} - C_{Ni}^L}{C_{Ni}^{\alpha} - C_{Ni}^L}$$

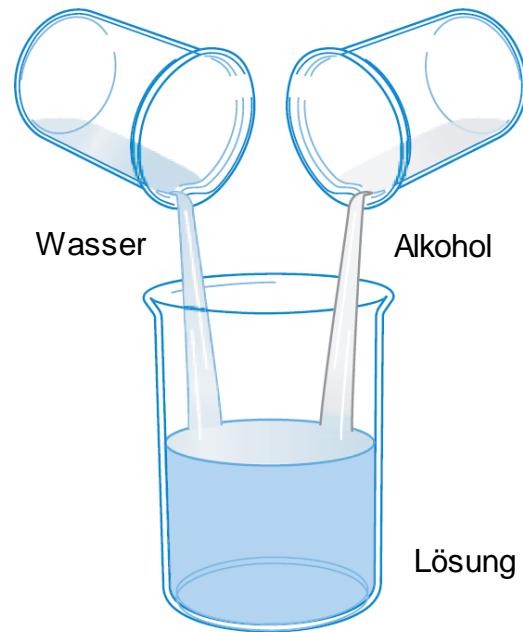


Zustandsdiagramme

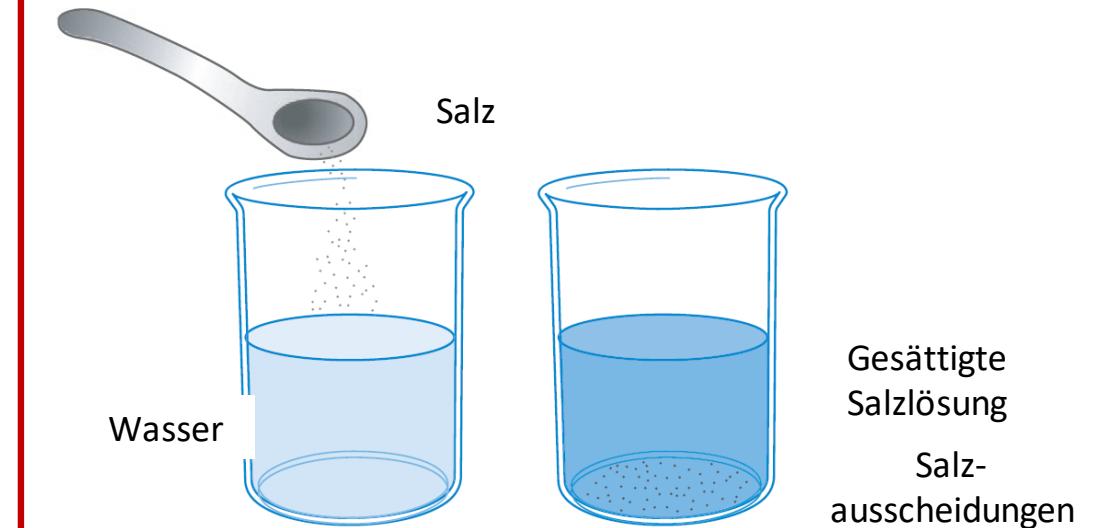
Zweistoffsysteme

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen:

Vollständige Mischbarkeit der Komponenten



Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand



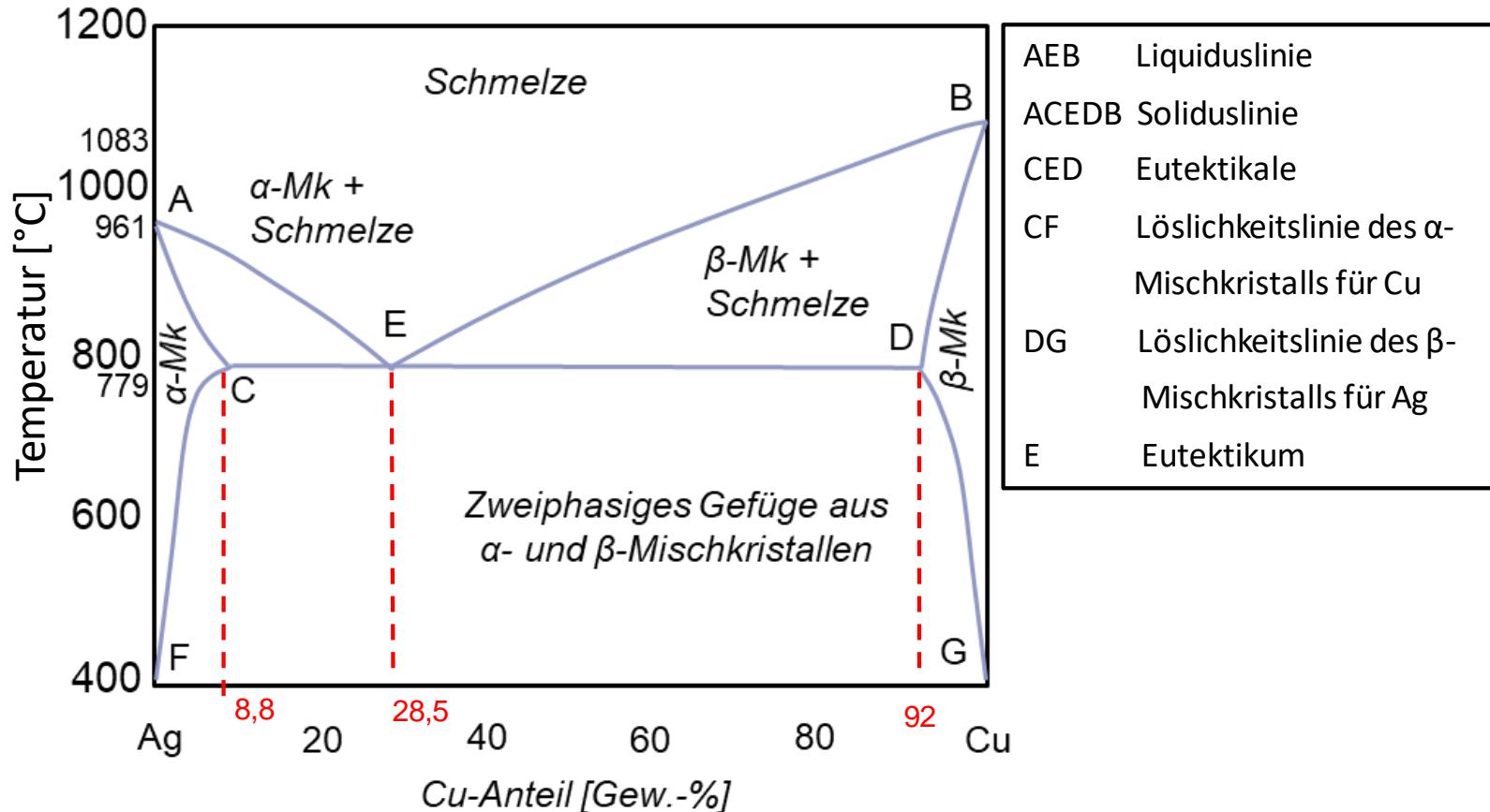
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Eutektische Zustandsdiagramme

Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand unter Bildung eines Eutektikums

Besonderheiten des Eutektikums

- Alle drei Phasen (Schmelze, Phase α und Phase β) sind im Gleichgewicht.
- Eine Legierung mit einer eutektischen Zusammensetzung besitzt einen Schmelzpunkt.
- Der Begriff „eutektische Erstarrung“ beschreibt eine besondere Gefügeausbildung, da die α - und β -Phase zeitgleich erstarrt.



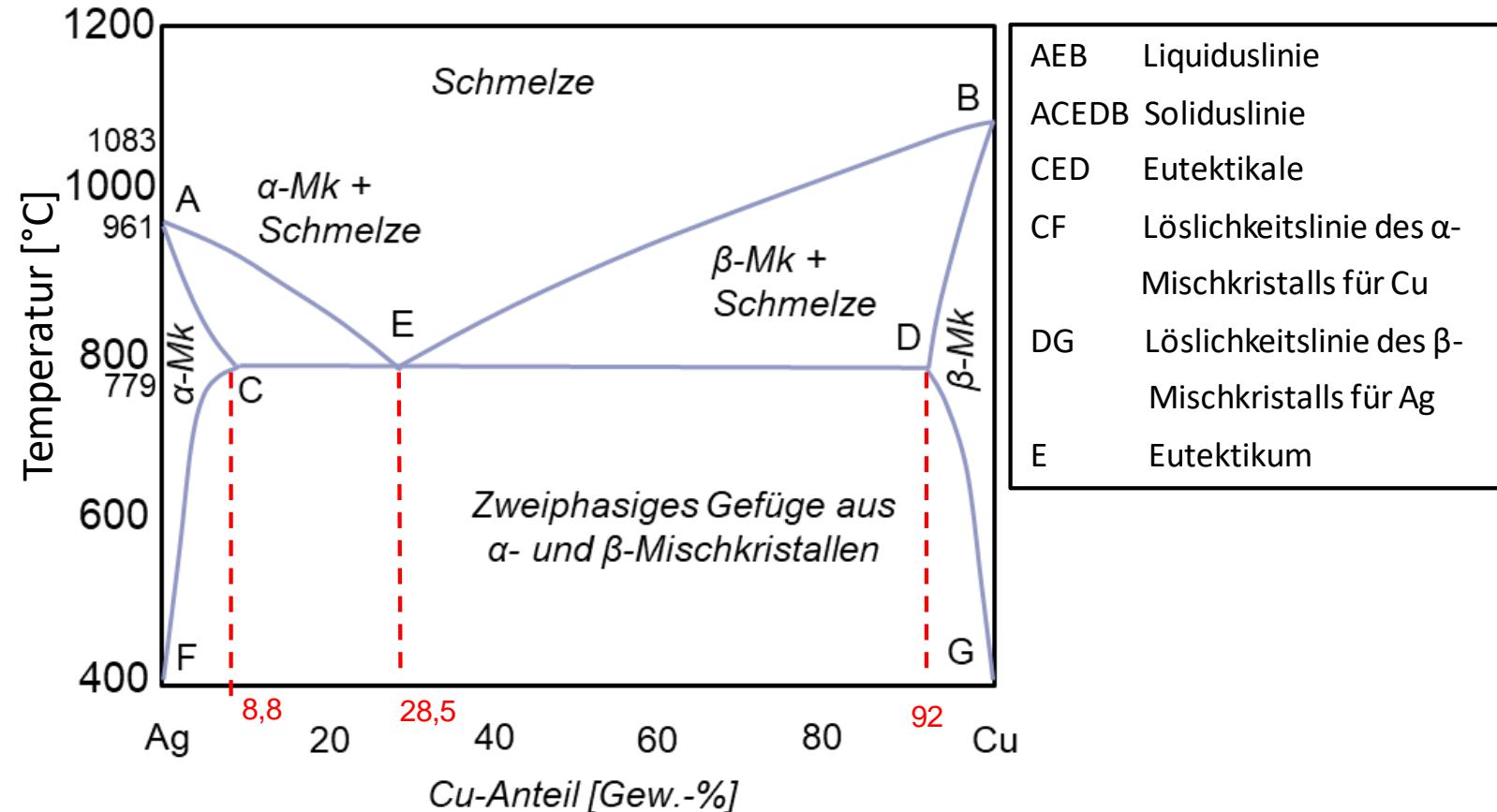
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Eutektische Zustandsdiagramme

Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand unter Bildung eines Eutektikums

Man unterscheidet vier Arten der Erstarrung:

- Fall 1: Legierungen aus reinem Mischkristall (fester Lösung)
- Fall 2: Legierungen, welche die Löslichkeitsgrenze überschreiten
- Fall 3: Eutektische Legierungen
- Fall 4: Unter- und übereutektische Legierungen



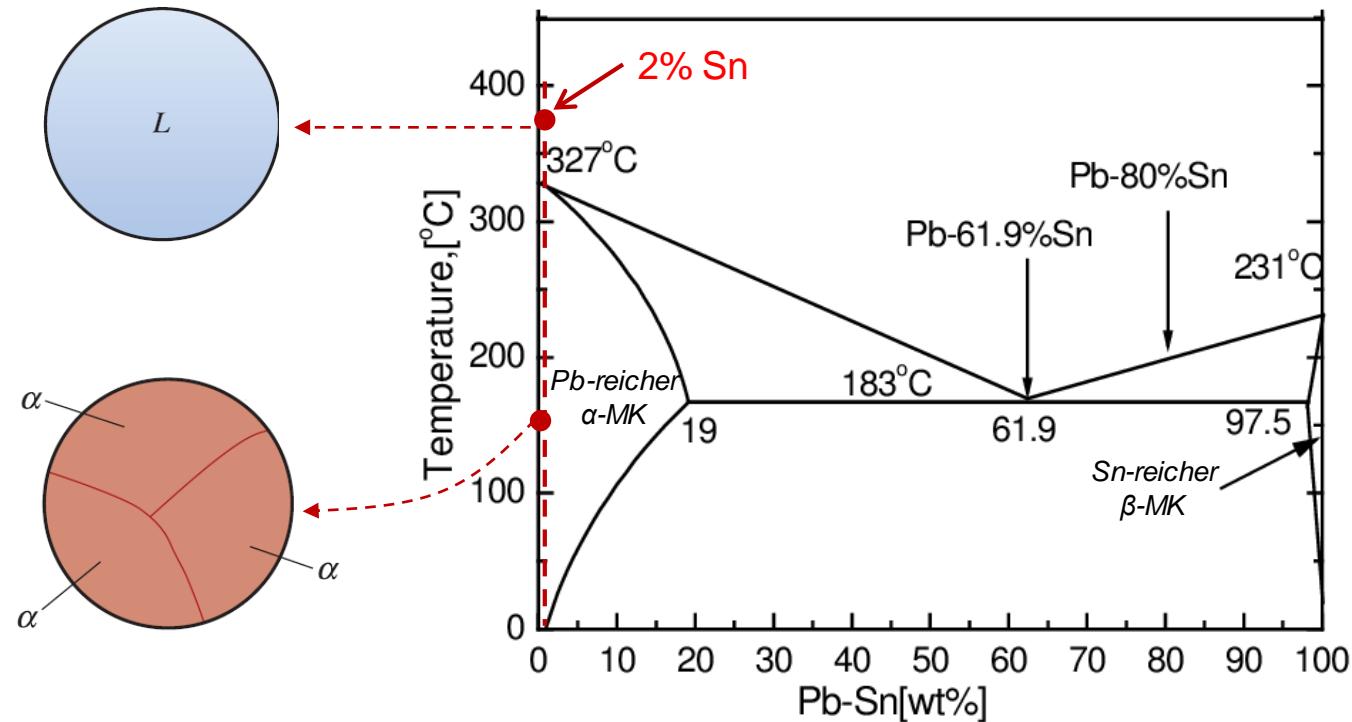
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Eutektische Zustandsdiagramme

Darstellung der vier Erstarrungsarten am System „Blei – Zinn“ (Pb – Sn)

Fall 1: Legierungen aus festen Lösungen (< 2% Sn):

- Bis zu einem Anteil von 2 % ist Sn vollständig in Pb löslich.
- Beim Erstarren bildet sich ein Mischkristall, d.h. eine einphasige feste Lösung α (kfz).



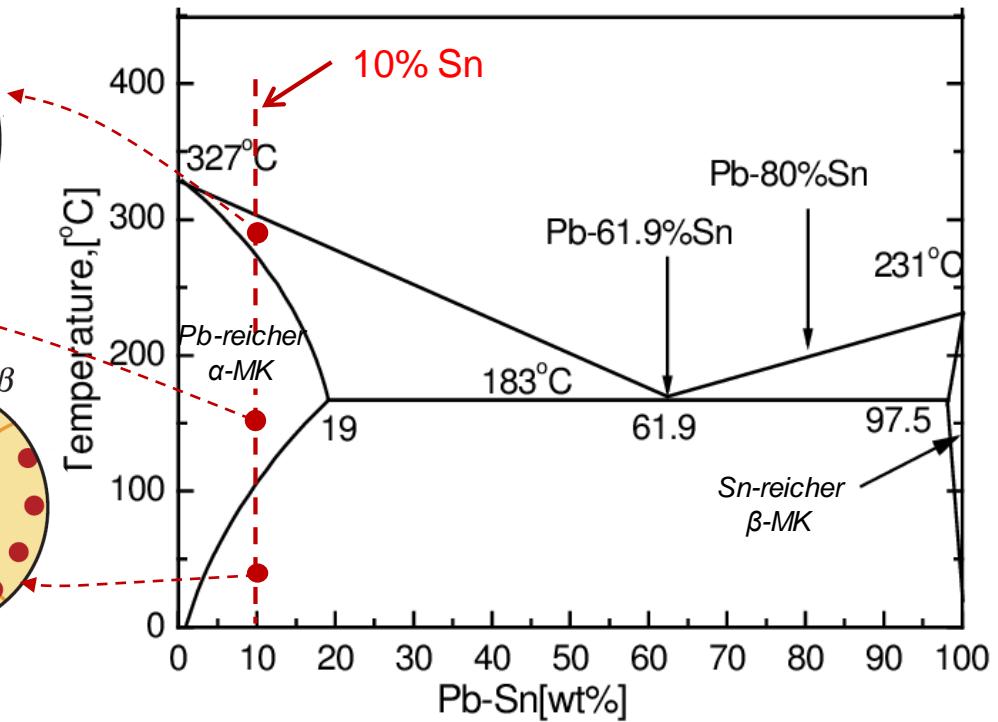
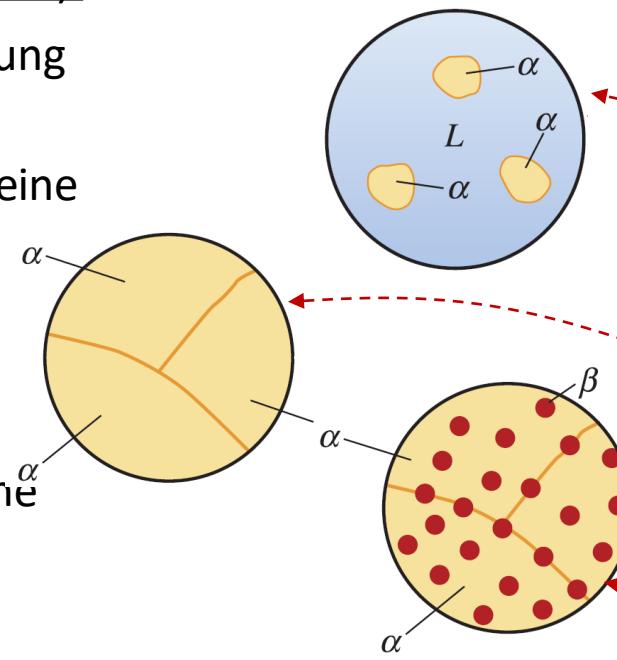
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Eutektische Zustandsdiagramme

Darstellung der vier Erstarrungsarten am System „Blei – Zinn“ (Pb – Sn)

Fall 2: Legierungen, welche die Löslichkeitsgrenze überschreiten (2 – 19% Sn):

- Zunächst erfolgt auch hier eine Erstarrung zu einer einphasigen festen Lösung α .
- Bei weiterer Abkühlung erfolgt jedoch eine Festphasenreaktion, d.h. die Phase β wird aus der ursprünglichen Phase α ausgeschieden.
- Die β Phase bewirkt hierdurch eine Ausscheidungshärtung (hohe technische Relevanz bei Al-Legierungen)



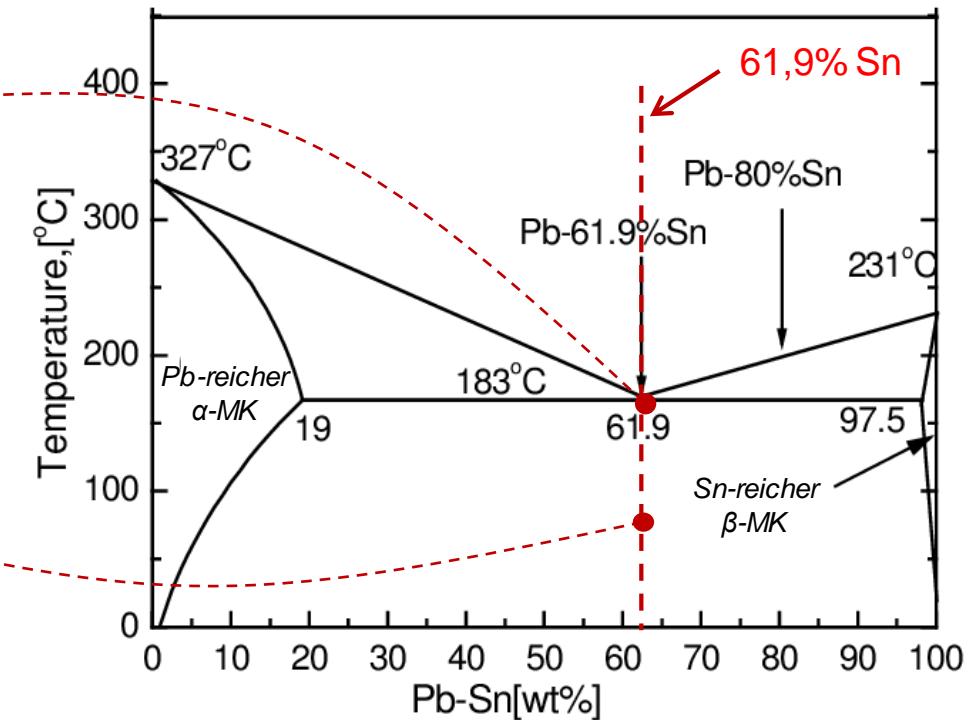
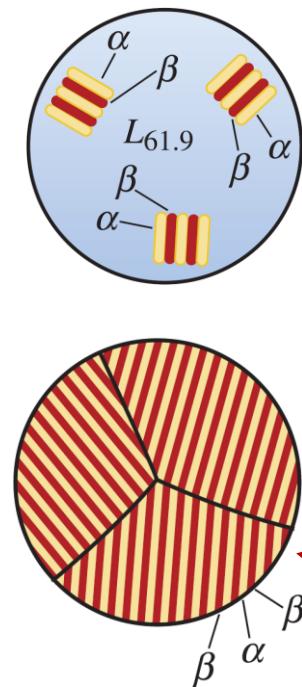
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

Darstellung der vier Erstarrungsarten am System „Blei – Zinn“ (Pb – Sn)

Fall 3: Eutektische Legierungen (61,9% Sn):

- Oberhalb von 183 ° C ist die Legierung flüssig und muss als Schmelze 61,9 % Sn enthalten.
- Bei 183° C erfolgt die Reaktion $L_{61,9\% \text{Sn}} \rightarrow \alpha_{19\% \text{Sn}} + \beta_{97,5\% \text{Sn}}$ und die beiden Phasen α und β liegen nebeneinander vor.
- In der Regel erstarrt das Eutektikum lamellenartig, aufgrund kürzerer Diffusionswege

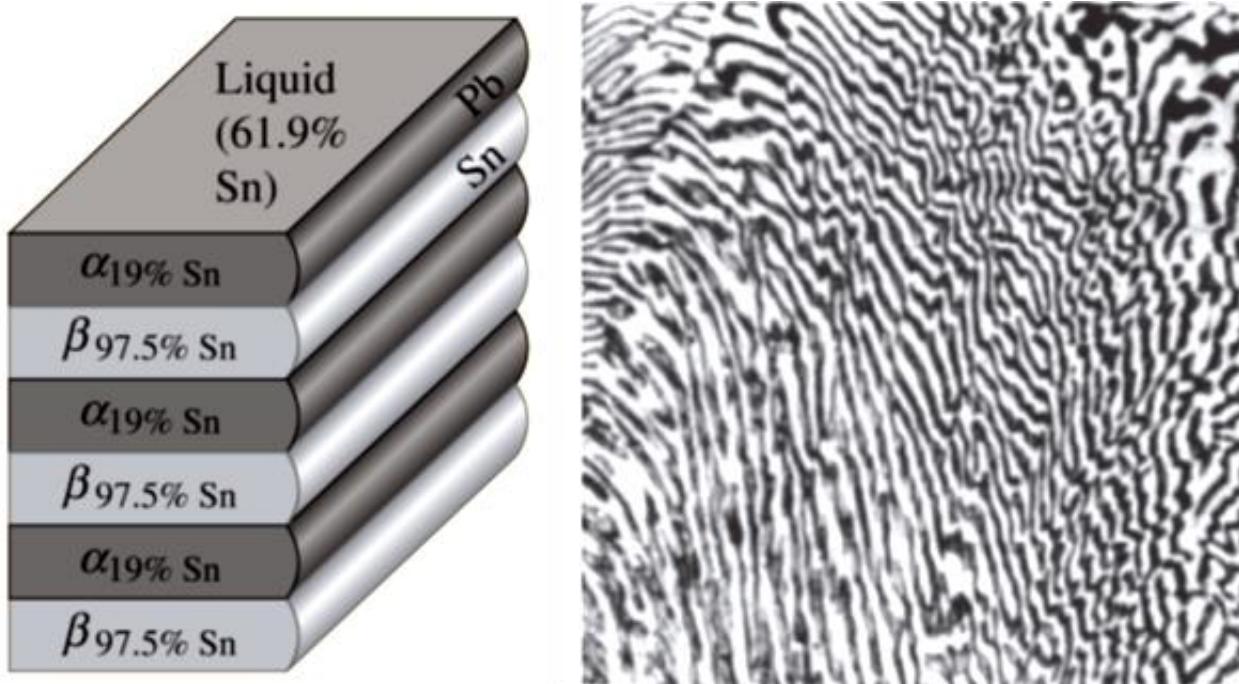


Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

Darstellung der vier Erstarrungsarten am System „Blei – Zinn“ (Pb – Sn)

Fall 3: Eutektische Legierungen (61,9% Sn):



Besonderheiten eutektischer Legierungen:

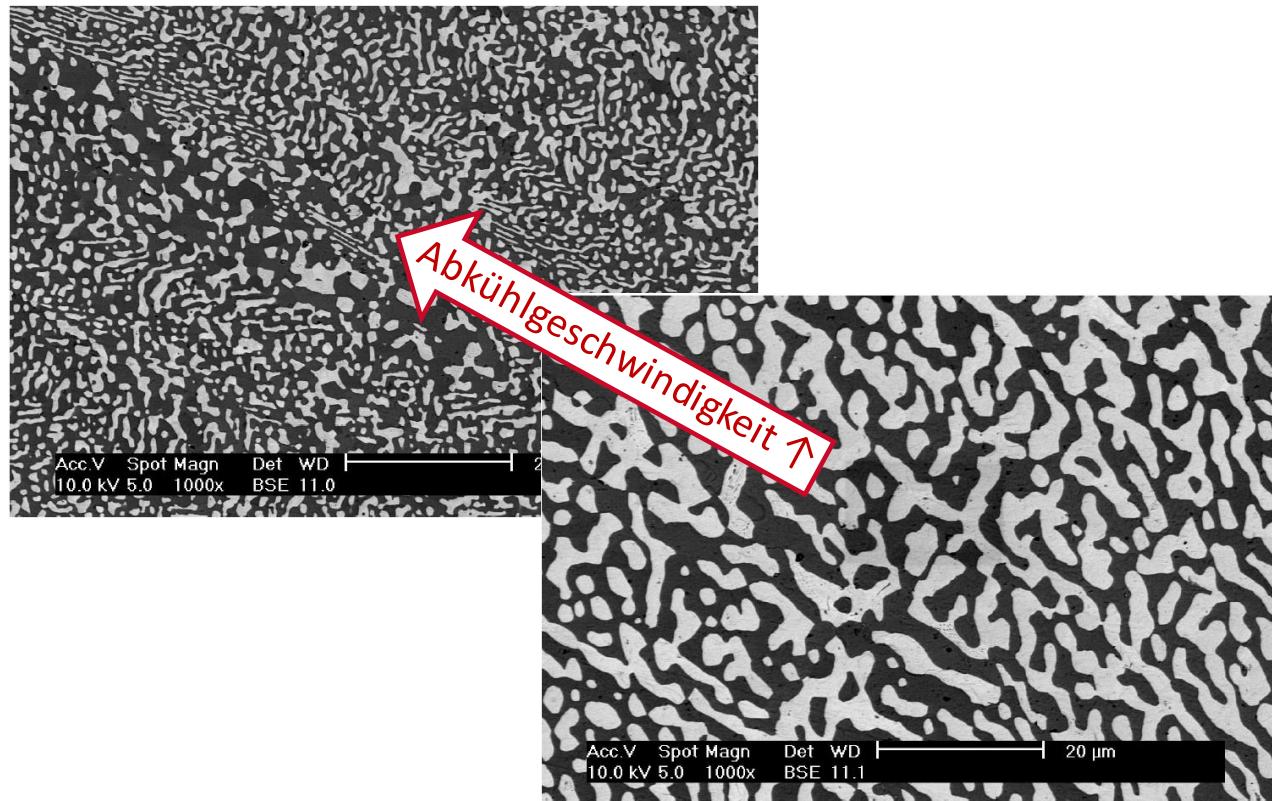
- Eutektische Legierungen besitzen eine hervorragende Gießbarkeit wegen des fehlenden Erstarrungsintervalls und der sehr niedrigen Schmelztemperatur.
- Die Festigkeit des Gefüges wird durch die Verringerung des lamellaren Abstandes erhöht.
- Dies wird erreicht durch die Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit oder durch die Zugabe von Impfkeimen in die Schmelze.

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

Darstellung der vier Erstarrungsarten am System „Blei – Zinn“ (Pb – Sn)

Fall 3: Eutektische Legierungen (61,9% Sn):



Besonderheiten eutektischer Legierungen:

- Eutektische Legierungen besitzen eine hervorragende Gießbarkeit wegen des fehlenden Erstarrungsintervalls und der sehr niedrigen Schmelztemperatur.
- Die Festigkeit des Gefüges wird durch die Verringerung des lamellaren Abstandes erhöht.
- Dies wird erreicht durch die Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit oder durch die Zugabe von Impfkeimen in die Schmelze.

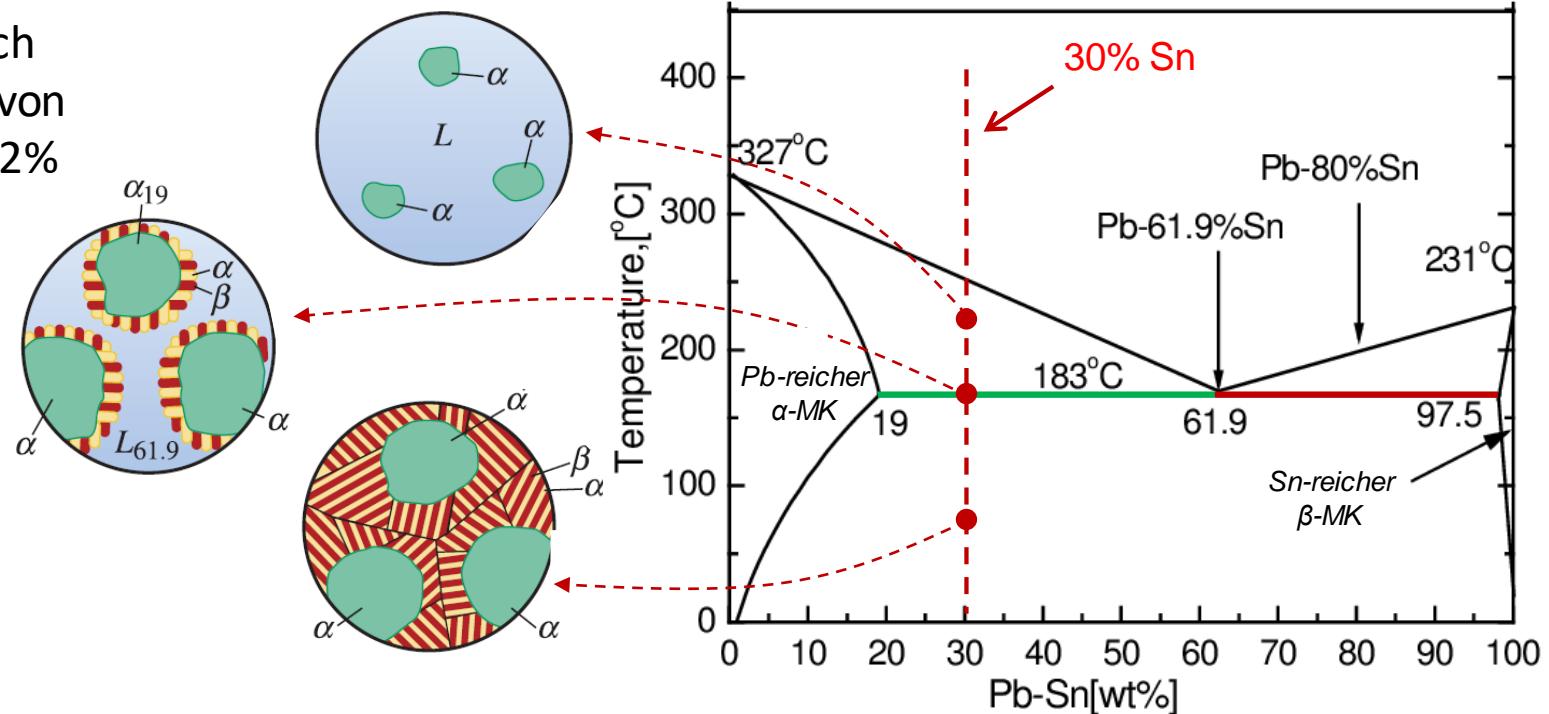
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

Darstellung der vier Erstarrungsarten am System „Blei – Zinn“ (Pb – Sn)

Fall 4: Unter- (19 bis 61,9%) und
übereutektische (61,9 bis 97,5 %) Legierungen:

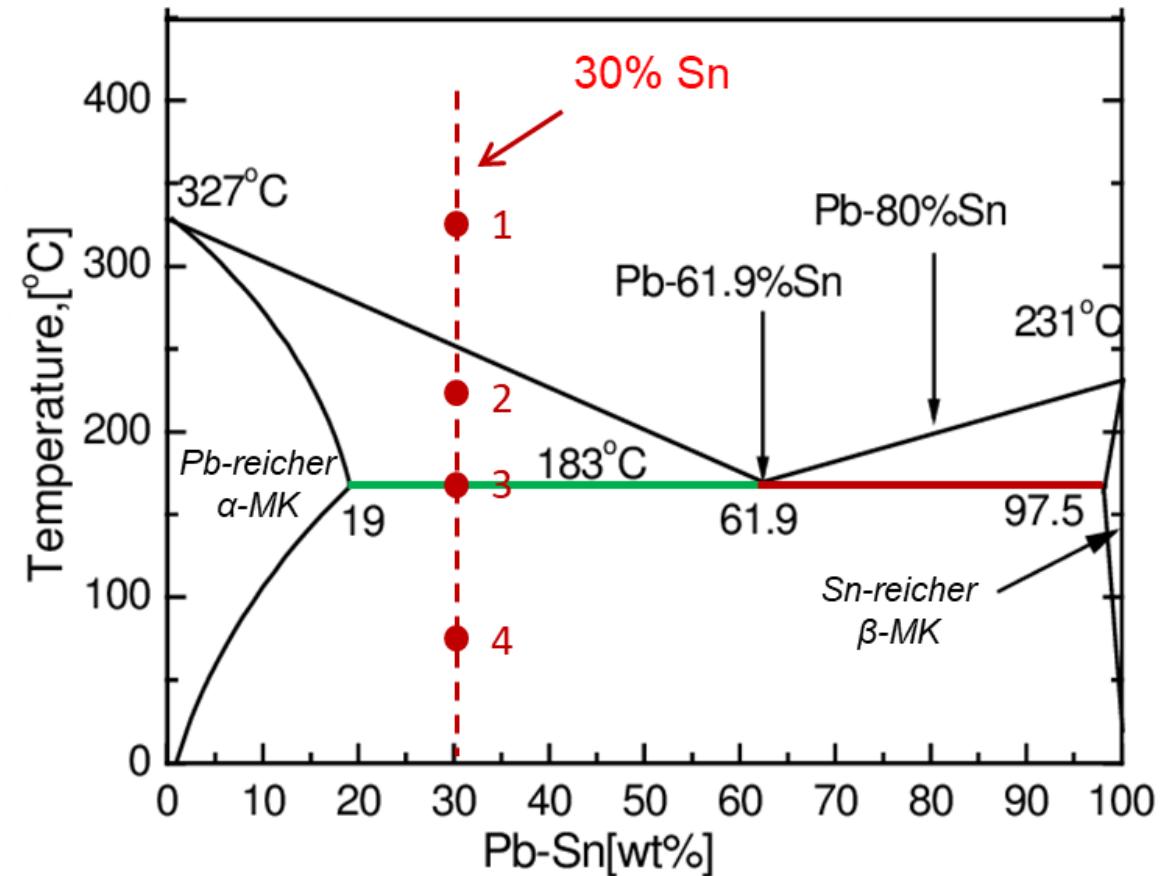
- Bei einer Pb-Sn(30%)-Legierung bildet sich beim Erreichen der Liquidustemperatur von 260°C die feste Phase α mit ungefähr 12% Sn.
- Bei 184°C ergibt sich aus der Hebellinie ein Sn-Anteil der α -Phase von 19%, während in der Restschmelze 61,9% Sn enthalten sind. Sie besitzt also eine eutektische Zusammensetzung.



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

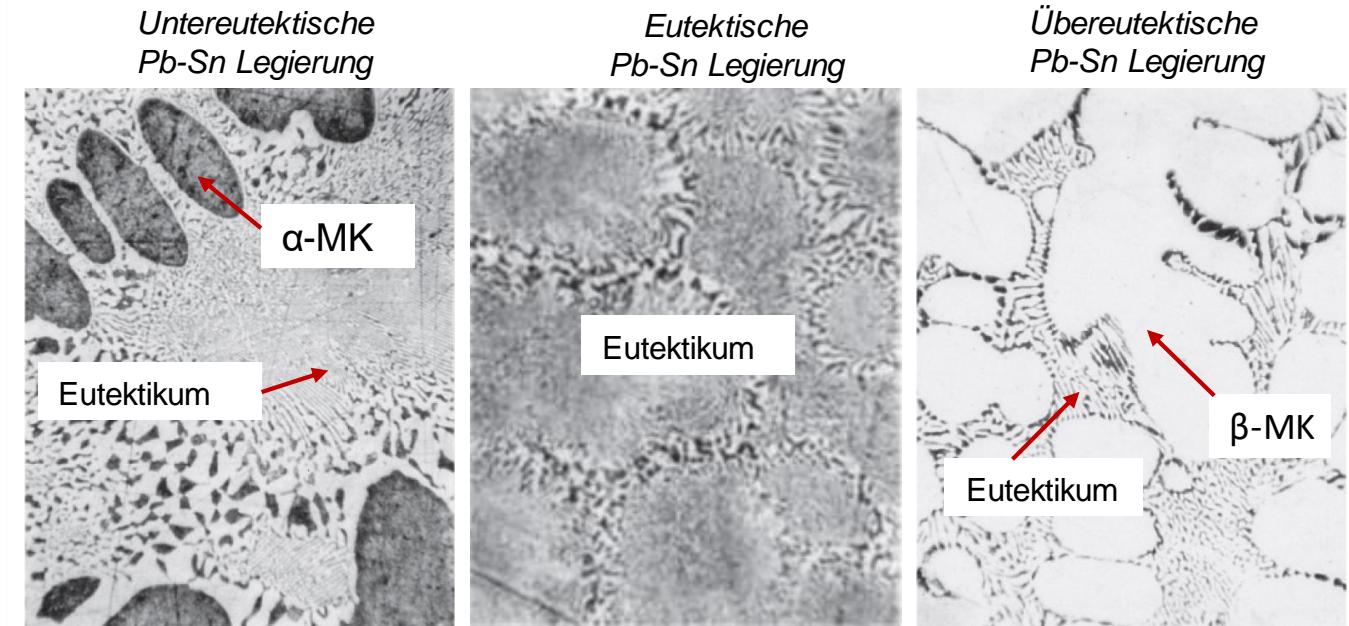
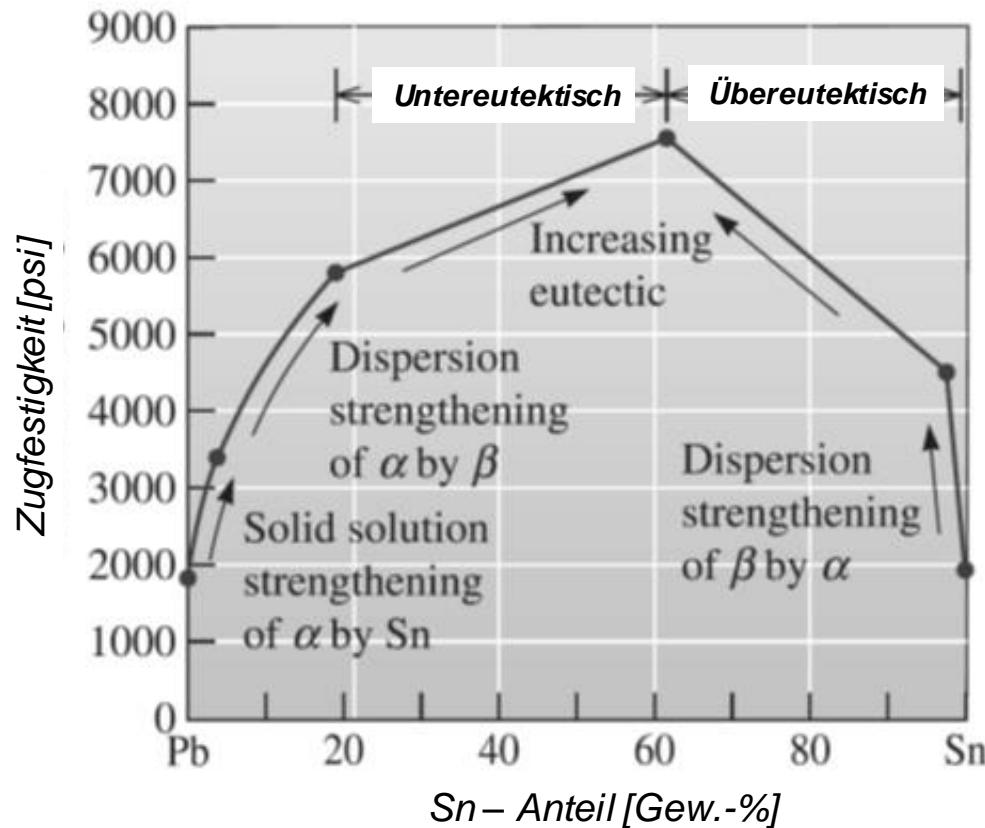
Für die Ermittlung der Volumenanteile greift man wieder auf das Hebelgesetz zurück.



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

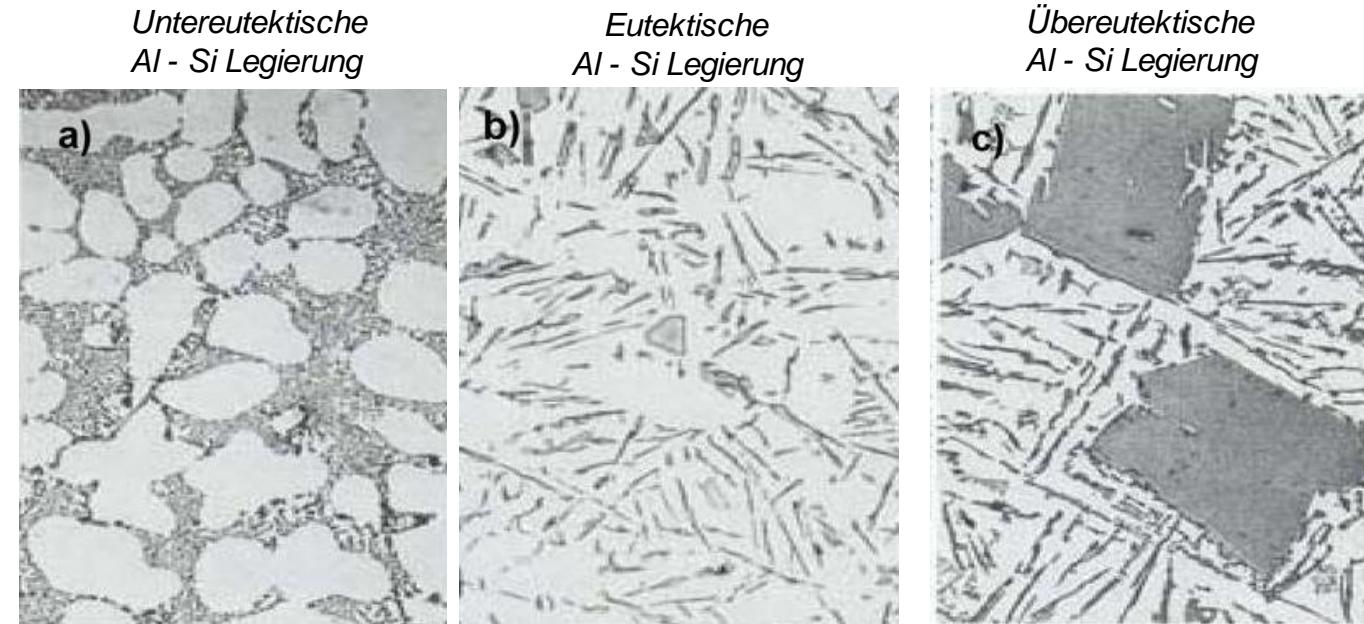
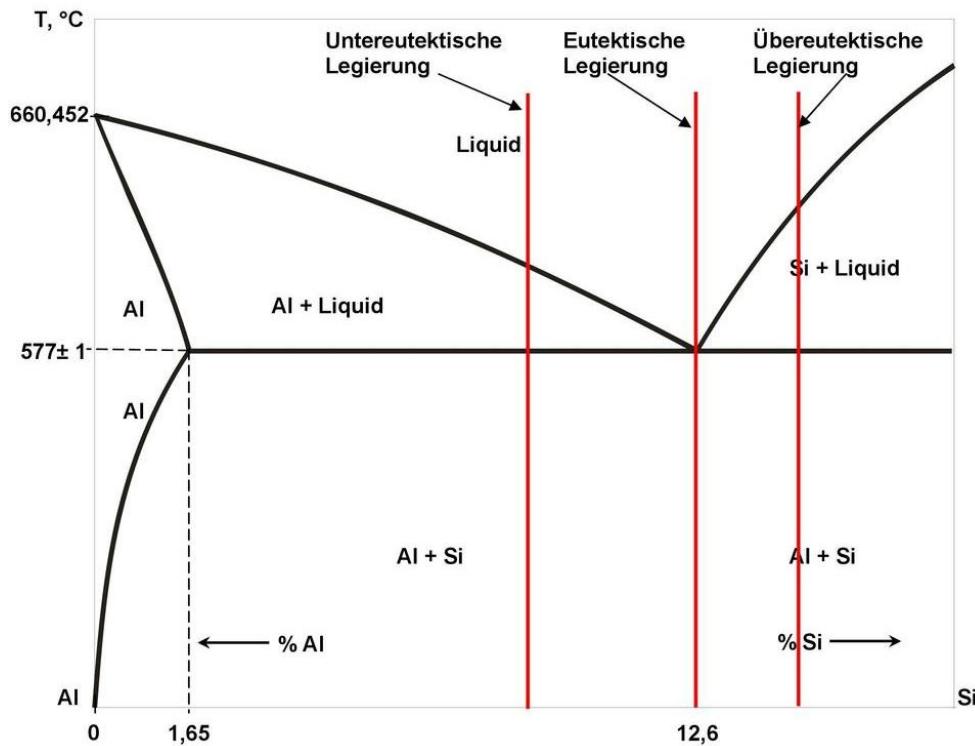
Darstellung der vier Erstarrungsarten am System „Blei – Zinn“ (Pb – Sn)



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

Das System „Aluminium - Silizium“ (Al – Si)



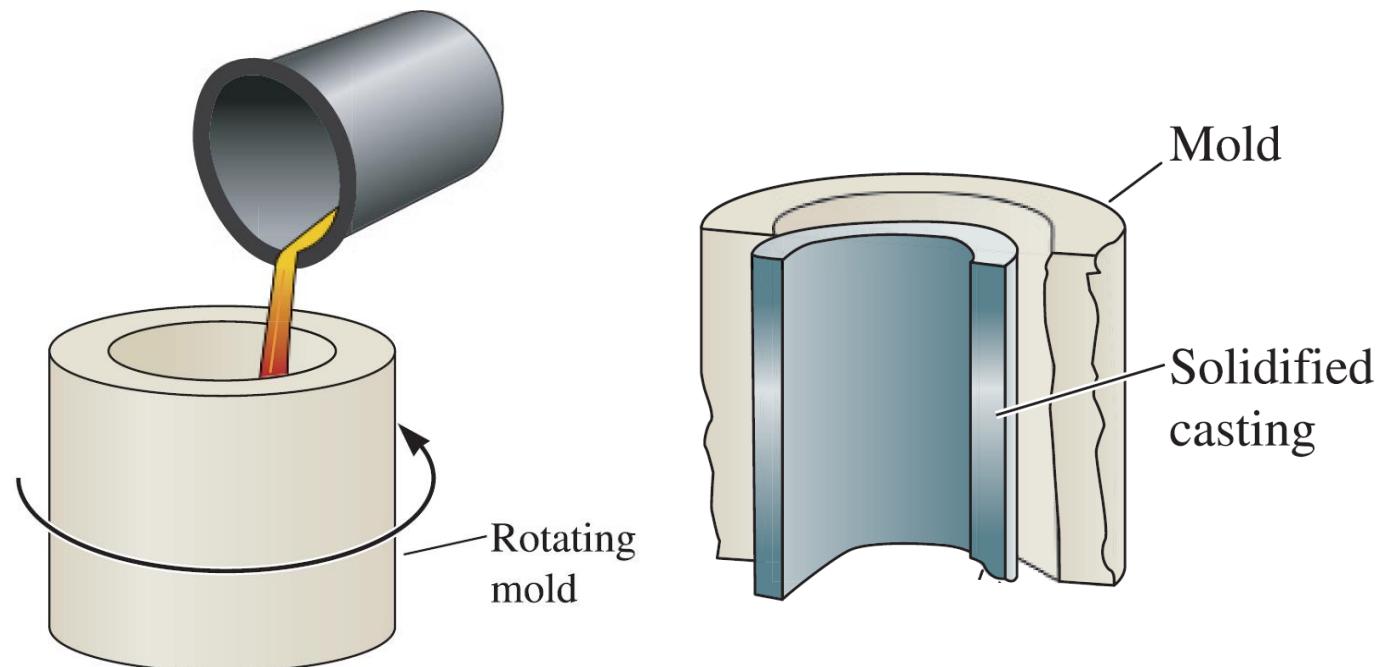
Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Eutektische Zustandsdiagramme

Das System „Aluminium - Silizium“ (Al – Si) - Gedankenexperiment

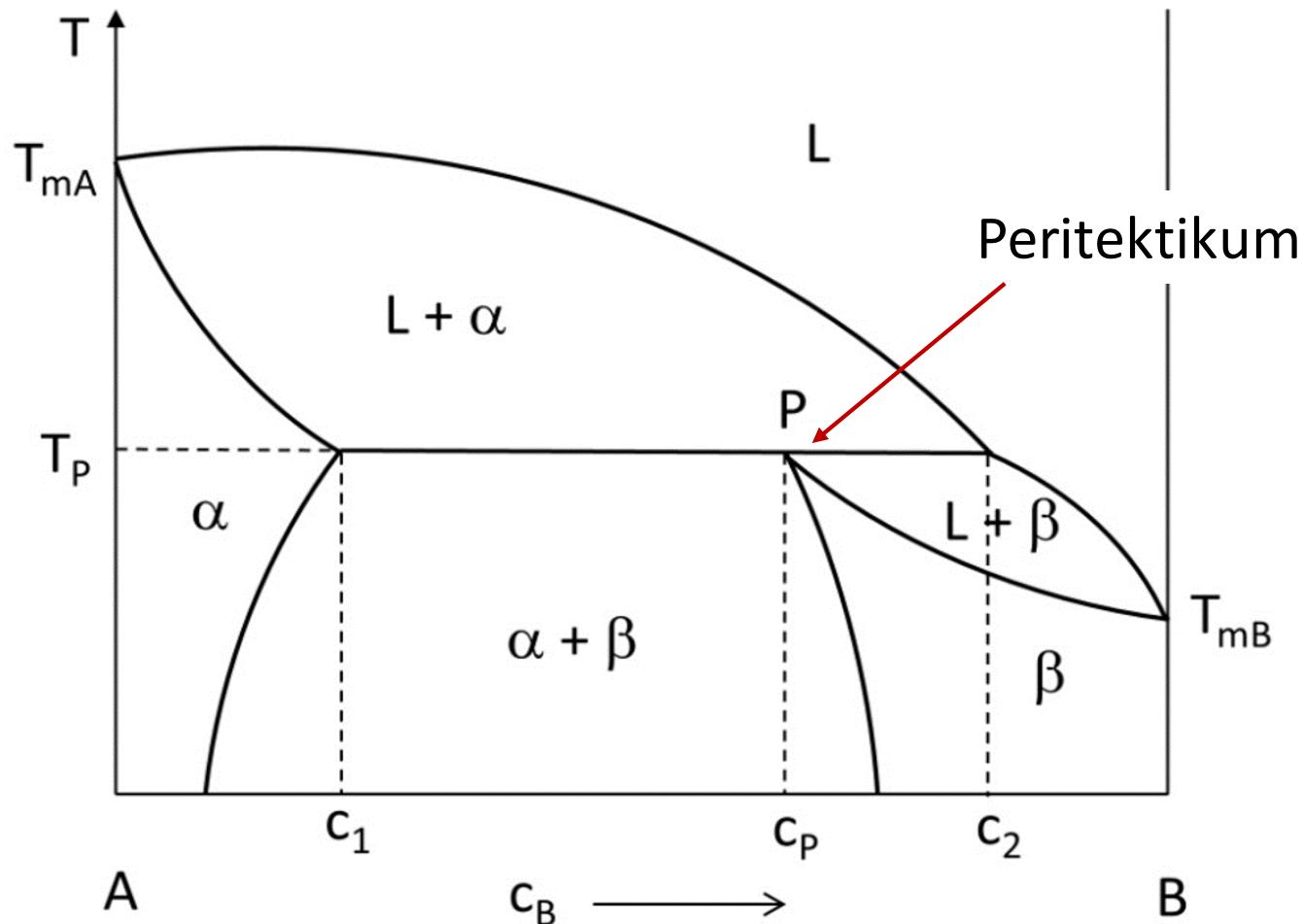
Ziel ist die Entwicklung eines Al-Si Motorblocks mit einer hochverschleißbeständigen Innenlauffläche. Welches Verfahren könnten wir nutzen? Welchen Legierungstyp können wir einsetzen ?

- Dichte Al: 2,7 g/cm³
- Dichte Si: 2,33 g/cm³
- Hohe Härte des Si-reichen β -Mischkristalls



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Peritektische Zustandsdiagramme



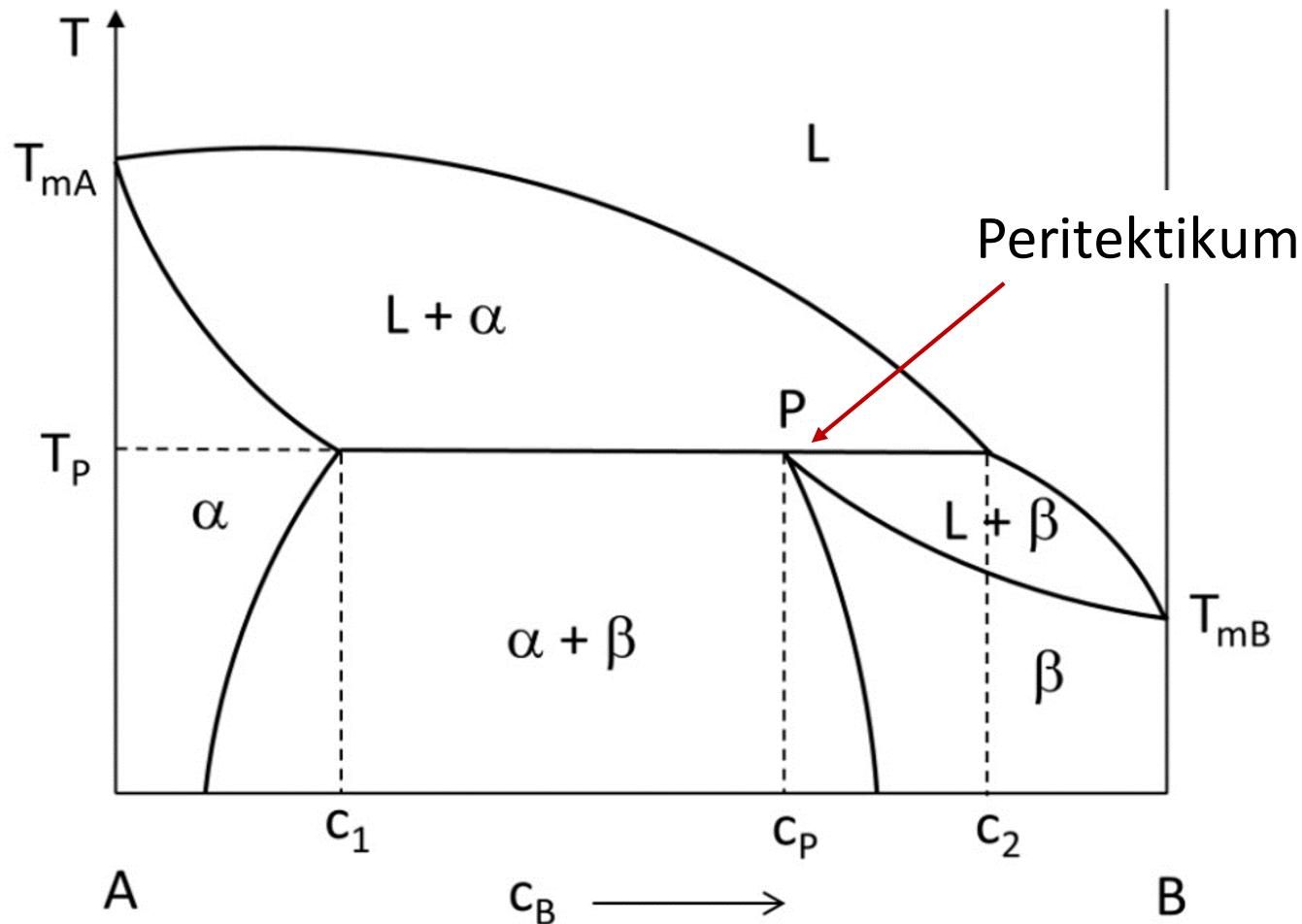
Peritektische Reaktion



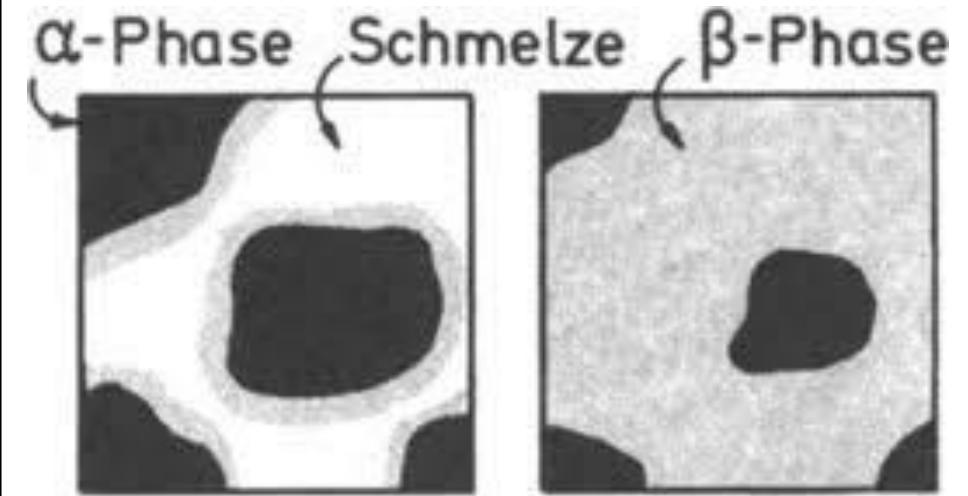
- Der α -Mischkristall löst sich wieder auf und setzt sich mit der Restschmelze zu einem β -Mischkristall um.
- Die Umwandlung findet an der Grenzfläche zwischen α -Mischkristall und Schmelze statt.
- Tritt bevorzugt auf bei sehr unterschiedlichen Schmelztemperaturen der Elemente
- Beispiele: Fe-Fe₃C, Ag - Pt

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Peritektische Zustandsdiagramme



Peritektische Reaktion

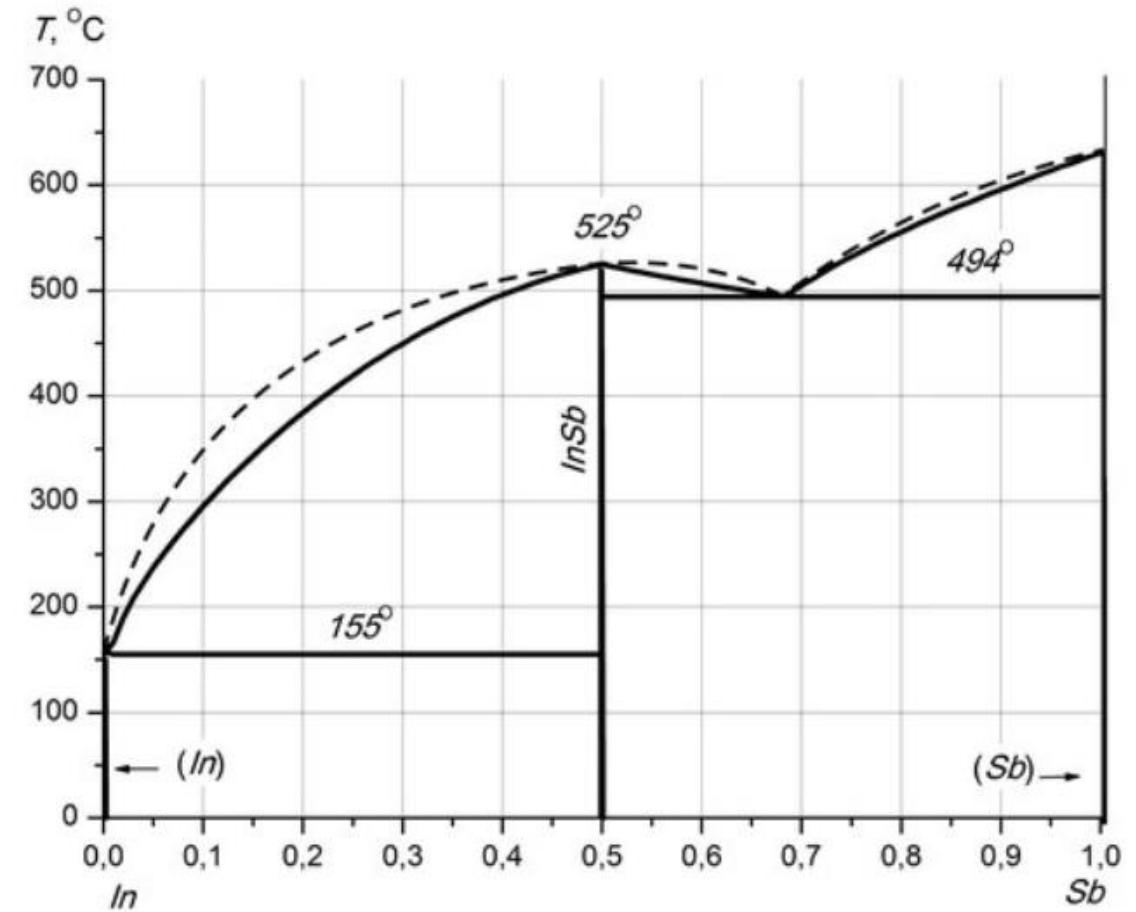


„Peri = Darum Herum“

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Intermetallische Verbindungen

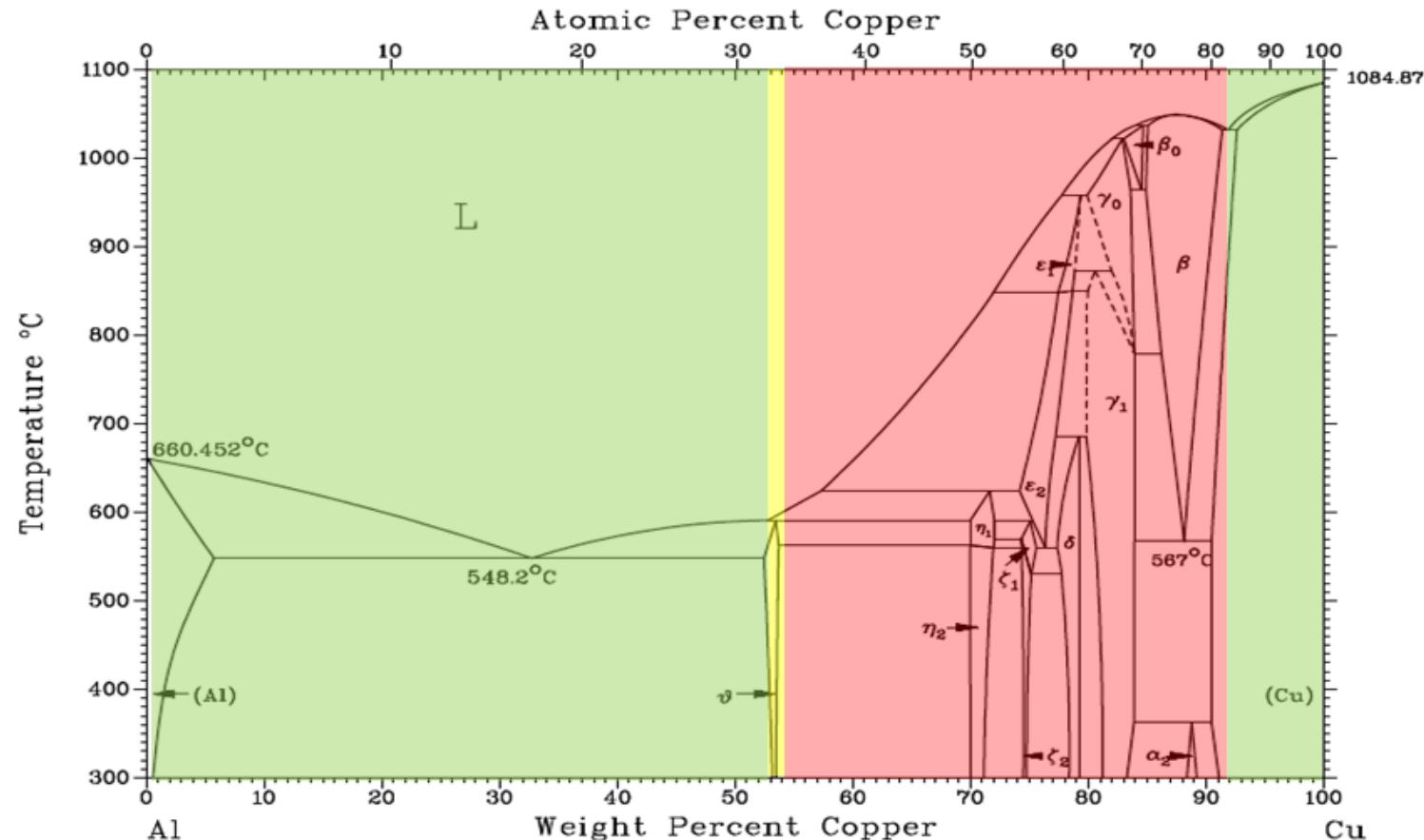
- Einige Legierungssysteme enthalten intermetallische Verbindungen
- Intermetallische Verbindungen bzw. Phasen bestehen aus zwei oder mehr Elementen.
- Sie bilden eine neue Phase mit eigener Zusammensetzung, eigener Kristallstruktur und spezifischen Eigenschaften.
- Intermetallische Phasen sind fast immer spröde.
- Stöchiometrische intermetallische Phasen weisen eine definierte Zusammensetzung auf.



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Intermetallische Phasen

Das System „Aluminium - Kupfer“ (Al – Cu)

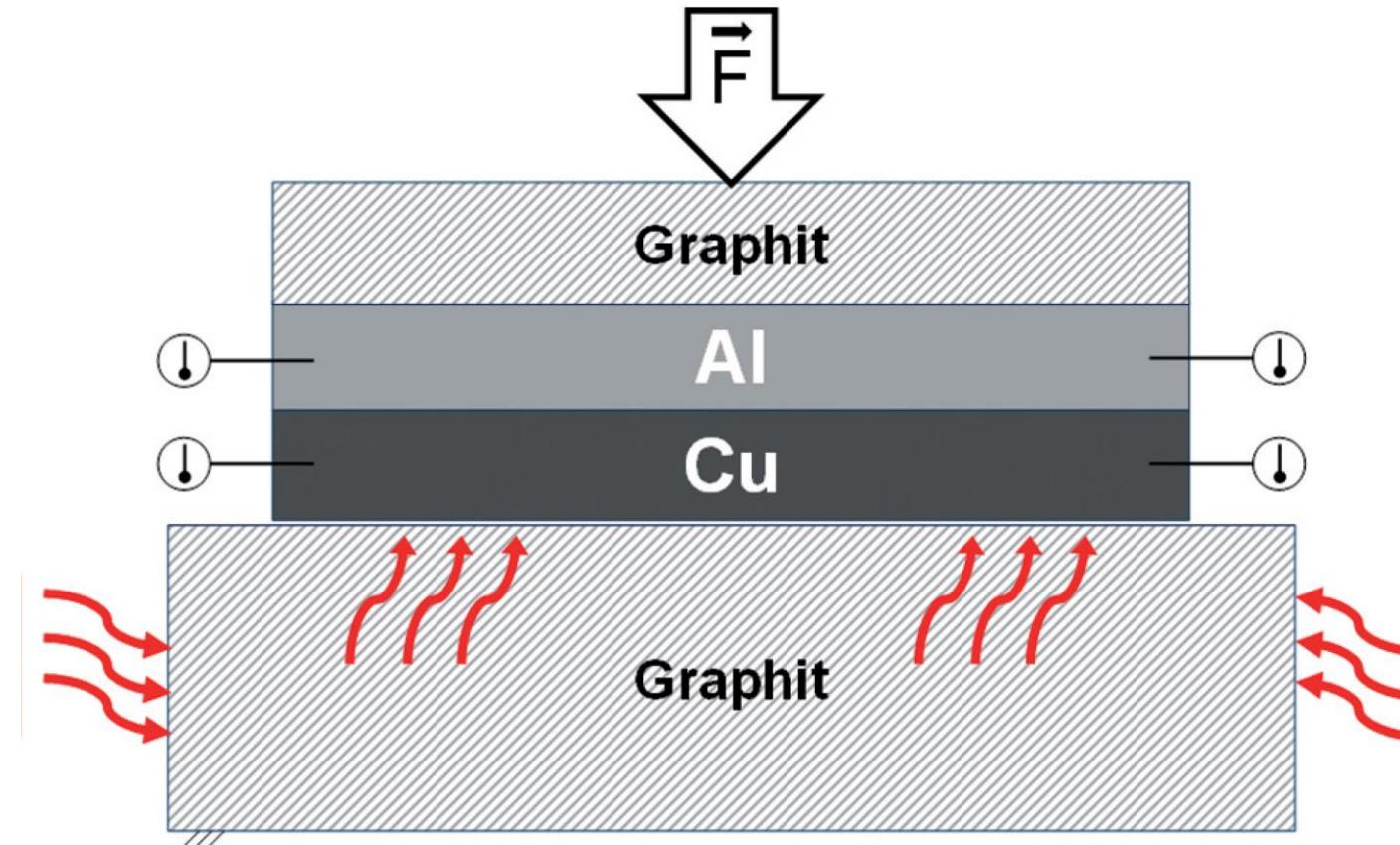


Quelle: TU Ilmenau

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Intermetallische Phasen

Das System „Aluminium - Kupfer“ (Al – Cu)

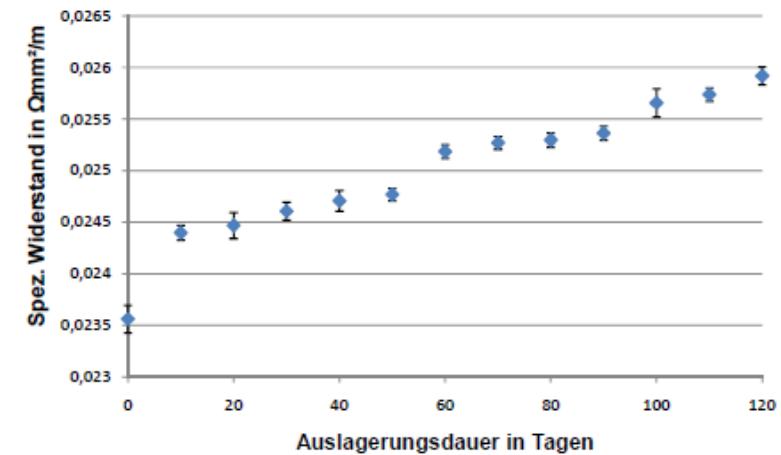
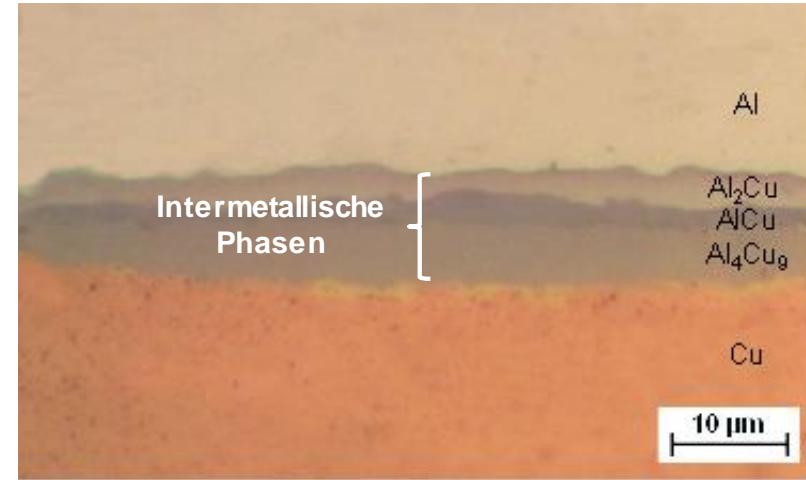
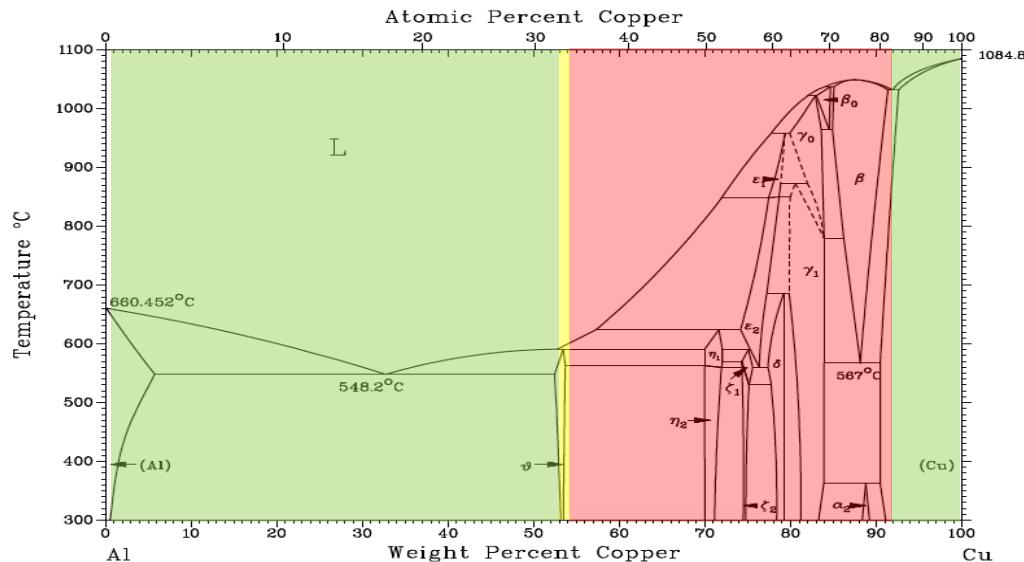


Quelle: Bergmann et al.

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Intermetallische Phasen

Das System „Aluminium - Kupfer“ (Al – Cu)

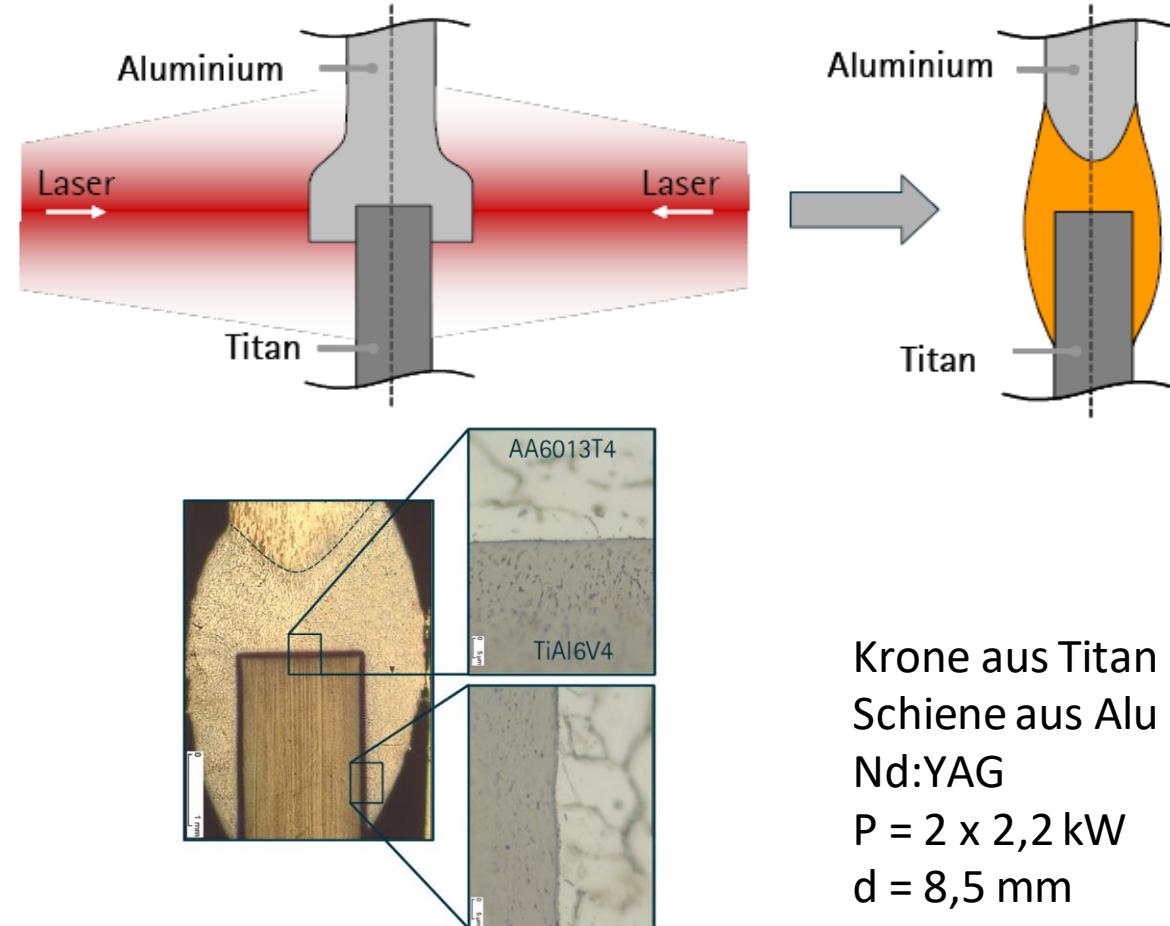


Quelle: TU Ilmenau

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Intermetallische Phasen

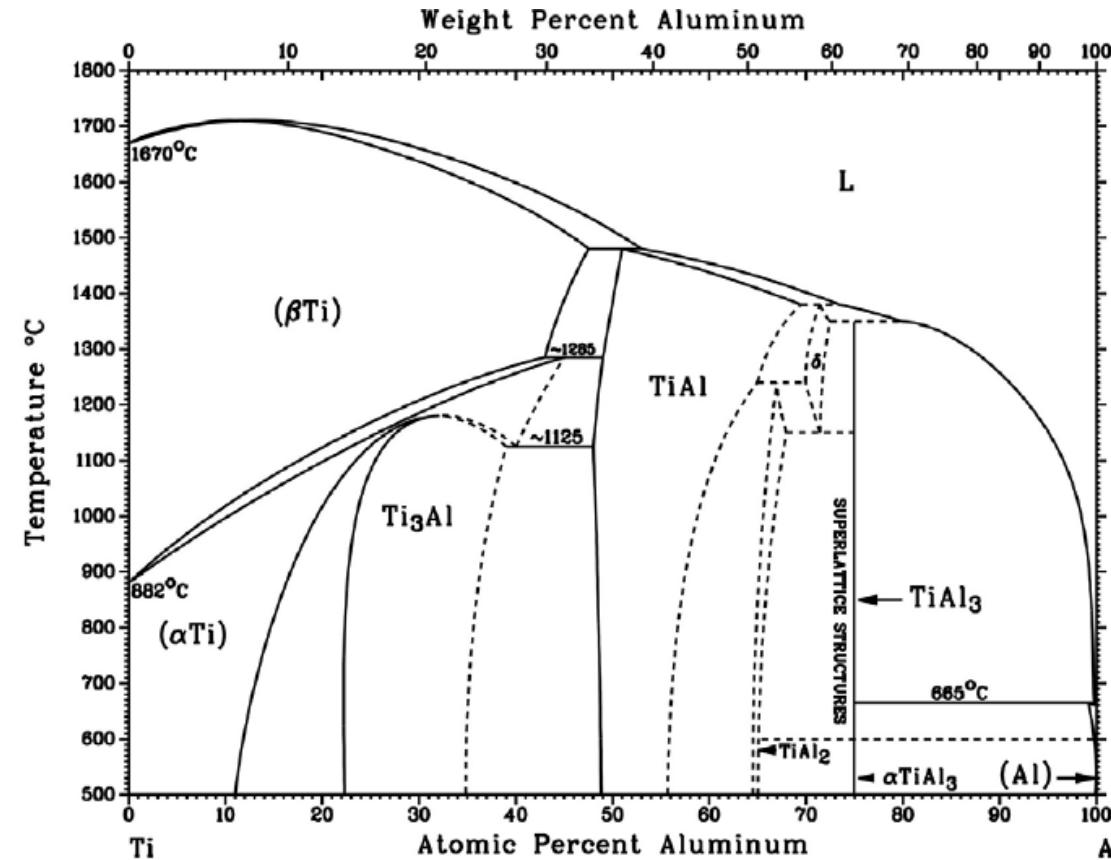
Das System „Titan - Aluminium“ (Ti – Al)



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Intermetallische Phasen

Das System „Titan - Aluminium“ (Ti – Al)

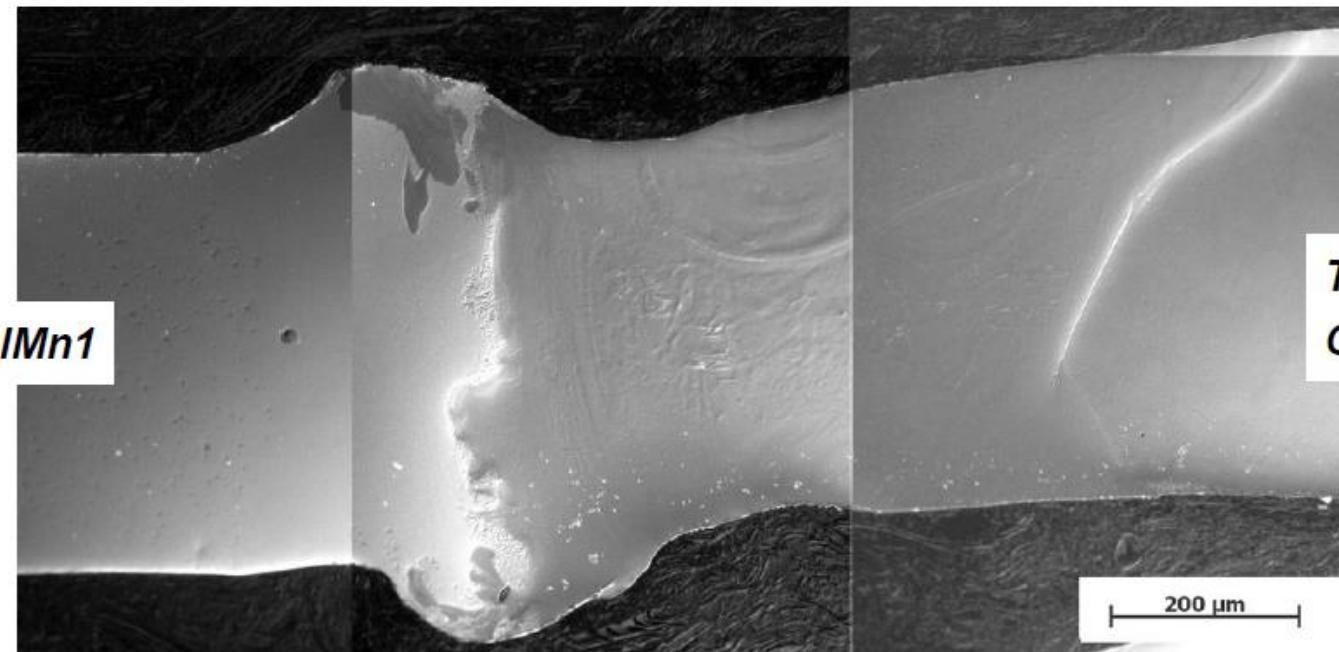
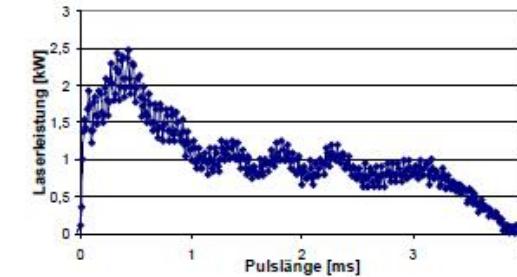


Quelle: TU Ilmenau

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme – Intermetallische Phasen

Werkstoff:	Titan Grade 2	Parameter:	3,9 J Pulsenegie
	AlMn1		4 ms Pulslänge
Laser:	SLS 200 CL 60		2,8 kW max. Leistung
Schutzgas:	Argon		400 mm/min
		Pulsform:	moduliert



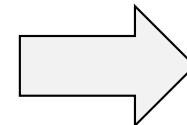
Quelle: TU Ilmenau

Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Nichtgleichgewichtserstarrung

Vorgänge bei der Nichtgleichgewichtserstarrung

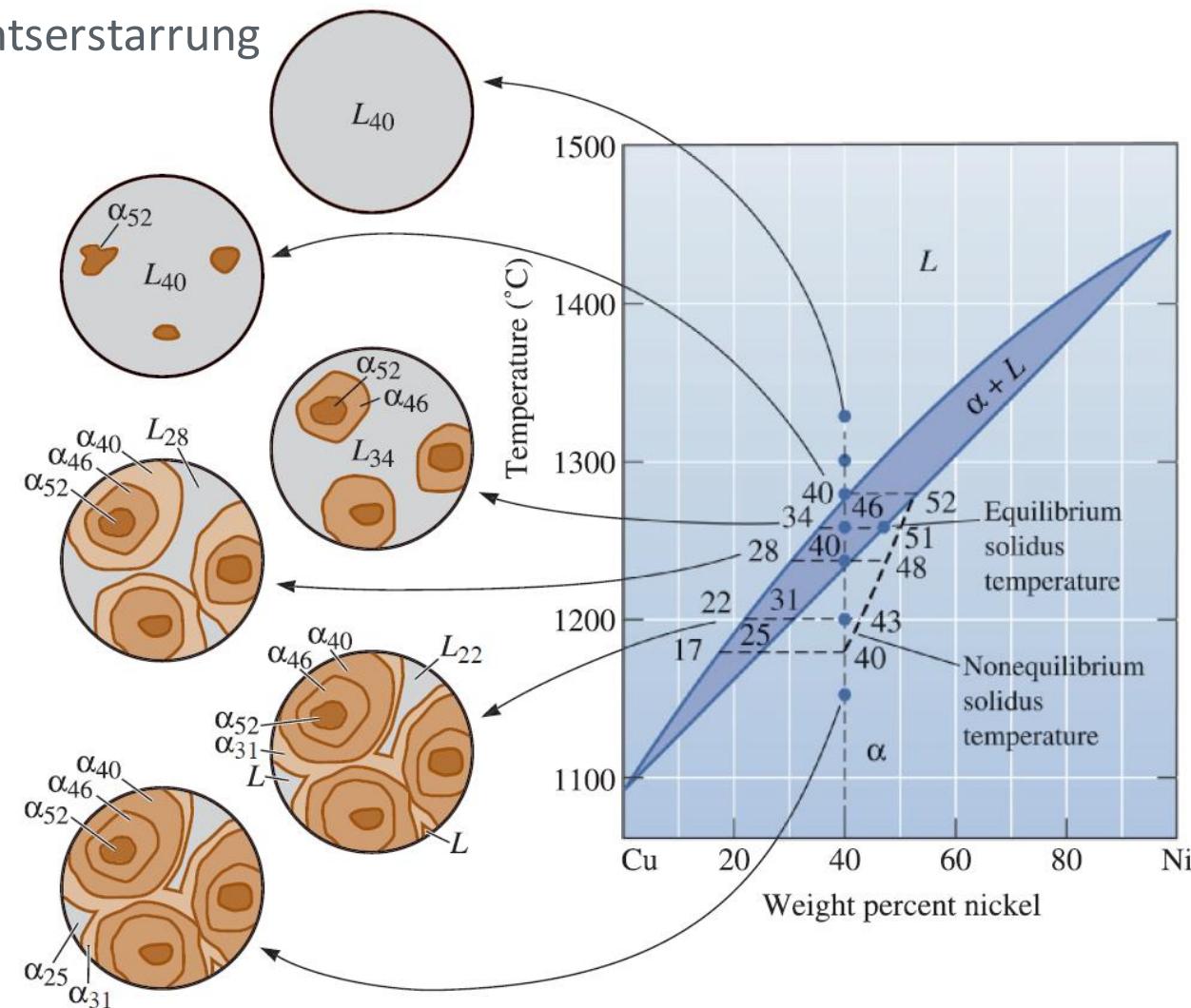
- Erfolgt die Abkühlung zu schnell, kann sich das Gleichgewicht nicht einstellen.
- Die Diffusion in der Flüssigkeit erfolgt schneller. Dadurch findet jedoch nur ungenügender Diffusionsausgleich mit dem hinzugewachsenem Bereich des Festkörpers (Mischkristalls) statt.
- Mit fortschreitender Erstarrung weicht die Nichtgleichgewichts-Soliduslinie kontinuierlich von ihrem Gleichgewichtsverlauf ab.
- Je schneller die Abkühlung, desto schneller die Abweichung vom Gleichgewicht.



Bildung von Seigerungszonen

Zustandsdiagramme

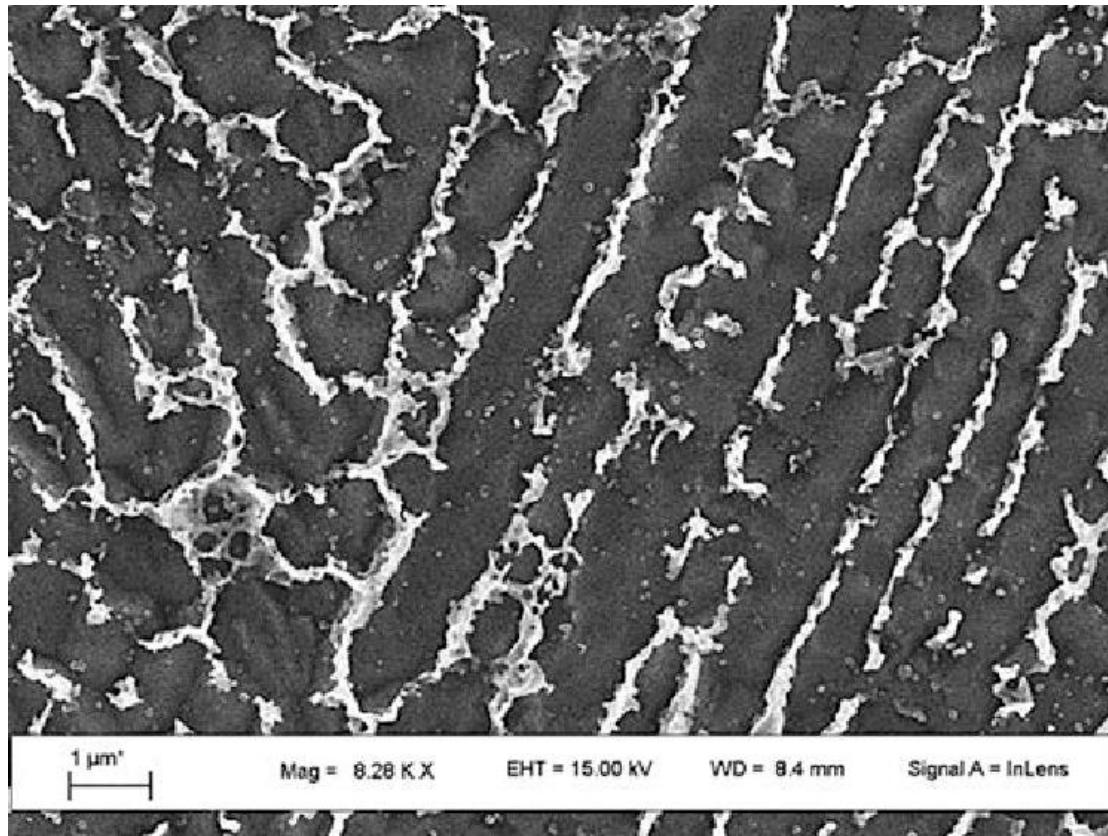
Zweistoffsysteme - Nichtgleichgewichtserstarrung



Zustandsdiagramme

Zweistoffsysteme - Nichtgleichgewichtserstarrung

Nichtgleichgewichtserstarrung – Beispiel einer Mikroseigerung im Schweißgutgefüge



Mikroseigerungen in einer Ni-Basislegierung (Inconel 718)

