

```
<script type="module"> import  
mermaid from  
'https://cdn.jsdelivr.net/npm/mermaid  
@10/dist/mermaid.esm.min.mjs';  
mermaid.initialize({ startOnLoad: true  
}); </script>
```

Vorlesung

Werkstofftechnik -

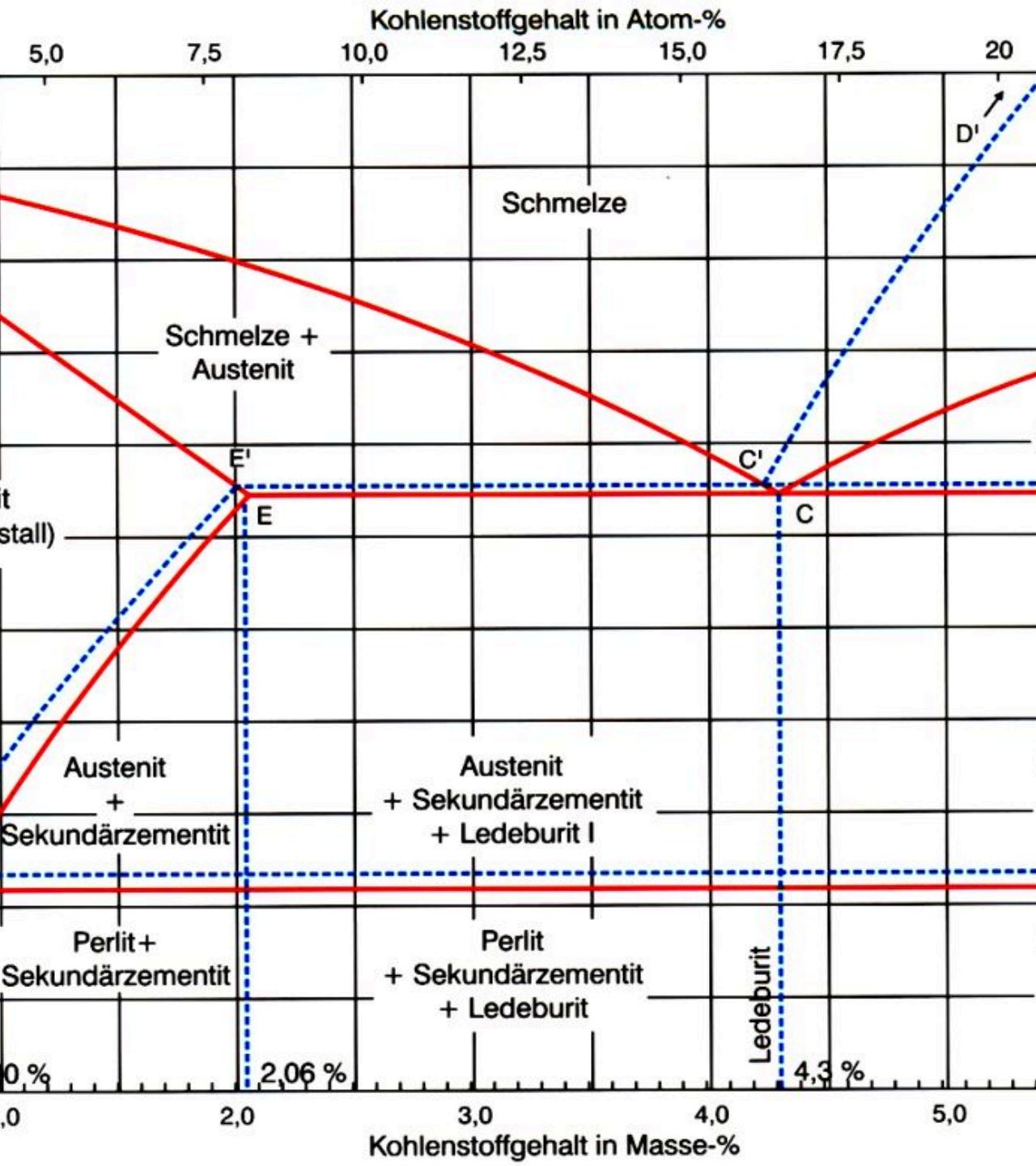
Legierungsbildung -

Grundlagen

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg ^{id}

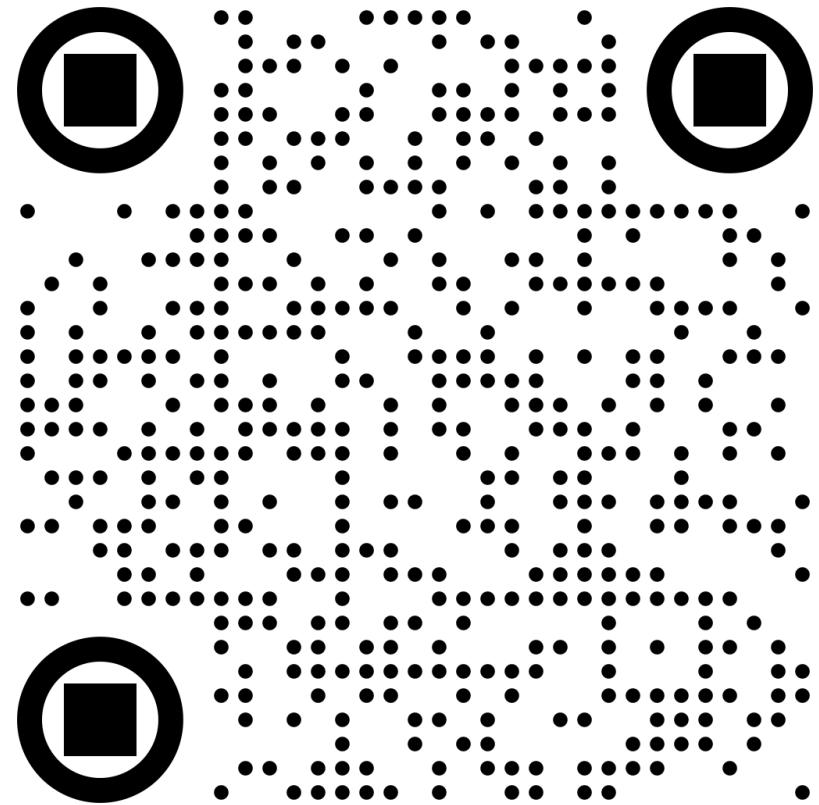
Kontakt: christian.willberg@h2.de

Teile des Skripts sind von Prof. Dr.-
Ing. Jürgen Höberle übernommen



Inhalte

- **Grundbegriffe** der Legierungsbildung
- **Kristallbildung** und Gefügeentstehung
- **Zustandsdiagramme** und Phasen
- **Diffusion** und Massentransport



Was ist eine Legierung?

Legierung

- **Herkunft:** von lateinisch "ligare" = zusammenbinden, verbinden, vereinigen
- **Definition:** Gemisch aus mehreren Atomsorten (*Komponenten*) mit *metallischem Charakter*

Komponenten können sein:

- **Metallisch:** Cu (Kupfer), Ni (Nickel), Fe (Eisen), Al (Aluminium)
- **Nicht-metallisch:** C (Kohlenstoff), P (Phosphor), S (Schwefel), N (Stickstoff), O (Sauerstoff)

Warum Legierungen?

Vorteile gegenüber reinen Metallen:

- Höhere Festigkeit
- Bessere Korrosionsbeständigkeit
- Verbesserte Verarbeitungseigenschaften
- Anpassbare mechanische Eigenschaften
- Wirtschaftlichkeit

Beispiele aus dem Alltag:

- Stahl (Fe + C)
- Bronze (Cu + Sn)
- Messing (Cu + Zn)

Konzentration und Zusammensetzung

1. Massenanteil (Gewichtsprozent)

$$m_{rel} = \frac{m_1}{\sum_i m_i} \cdot 100 [\%]$$

2. Atomanteil (Atomprozent)

$$n_{rel} = \frac{n_1}{\sum_i n_i} \cdot 100 [\%]$$

Wann sind beide Angaben gleich?

Merke:

- Wenn die Atommassen **ähnlich** sind $\rightarrow m_{rel} \approx n_{rel}$
- Wenn die Atommassen **unterschiedlich** sind $\rightarrow m_{rel} \neq n_{rel}$

Beispiel:

- Cu (63.54 u) und Ni (58.69 u) \rightarrow ähnliche Massen
- Fe (55.85 u) und C (12.01 u) \rightarrow sehr unterschiedliche Massen!

Aufgabe

Eine Legierung mit 1 kg Gesamtmasse enthält:

- 25 Atom-% Ni
- 75 Atom-% Cu

Fragen:

1. Wie groß ist die Masse von Ni und Cu beim **Atomanteil**?
2. Wie groß wäre die Masse beim **Massenanteil** von 25% Ni und 75% Cu?

Gegeben:

- $A_{Cu} = 63.54 \text{ u}$; $A_{Ni} = 58.69 \text{ u}$; $u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Lösung - Teil 1: Massenanteil

- ▶ □ Lösung anzeigen

► □ Lösung anzeigen

Was ist eine Phase?

Allgemeine Definition:

Eine Phase ist ein chemisch und physikalisch **gleichartiger homogener Bestandteil** einer Legierung oder von Materie überhaupt.

Bekannt aus Aggregatzuständen:

- Fest (s)
- Flüssig (l)
- Gasförmig (g)
- Plasmaförmig (p)

Aber: In Legierungen gibt es mehr als nur Aggregatzustände!

Phasenbeispiele

Einphasig Zweiphasig

- Reines Aluminium
- Reines Eisen
- Flüssiges Wasser
- Wasserdampf
- Nebel (Wasser + Luft)
- Eis in Wasser
- Übersättigte Lösungen
- Viele technische Legierungen



Phasenänderungen

1. Umwandlungen

- Instabile Gittermodifikationen wandeln sich in stabile um
- Unterhalb einer **Gleichgewichtstemperatur**
- Beispiel: $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ bei Abkühlung unter 911°C
- Bei Legierungen: Änderung der Mischkristallkonfiguration

2. Ausscheidungen

- **Löslichkeit** nimmt ab (meist durch Temperaturänderung)
- Phasen scheiden aus dem Mischkristall aus
- Erfordert **Massentransport** (Diffusion)
- Benötigt **Wärme und Zeit**

Diffusion - Die Grundlage

Definition: Temperatur- und zeitabhängiger Massentransport

1. Ficksches Gesetz:

$$dm_A = -D \frac{dc_A}{dx} S dt$$
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_A}{RT}\right)$$

Parameter:

- dm_A = diffundierte Stoffmenge der Komponente A
- D = Diffusionskoeffizient
- c_A = Konzentration der Komponente A
- x = Ortskoordinate

Diffusion

Wichtig für:

- Härtung von Stahl (Einsatzhärtung, Nitrieren)
- Verzinken
- Glühen
- Schweißen
- Löten

Auch außerhalb der Metallurgie:

- Gasdiffusion aus Tanks
- Diffusion von Gasen durch Membranen
- Korrosion

Mischkristalle

Definition:

Ein Mischkristall ist ein chemisch homogener, gleichartiger Kristall, der aus **mehreren Atomsorten** aufgebaut ist.

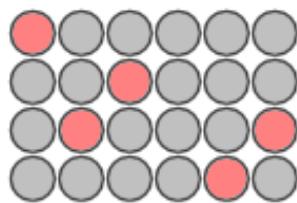
Eigenschaften:

- Mindestens 2 Atomsorten
- **Homogen** auf makroskopischer Ebene
- Heterogenität erst im atomaren Bereich sichtbar
- Englisch: "solid solution" (feste Lösung)
- Führt zu "Verspannungen" im Gitter

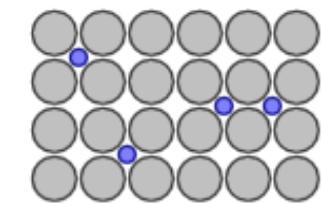
Arten von Mischkristallen

1. Substitutionsmischkristall

- Ähnlicher chemischer Charakter
- Ähnlicher Atomdurchmesser (< 15% Unterschied)
- Gleiches Kristallgitter



Substitutionsmischkristalle



Einlagerungsmischkristalle

Beispiele:

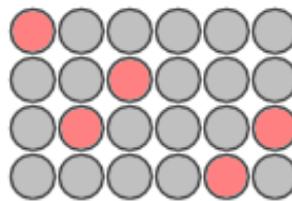
- Cu-Ni (vollständig mischbar)
- Cu-Zn (Messing)

Bildquelle

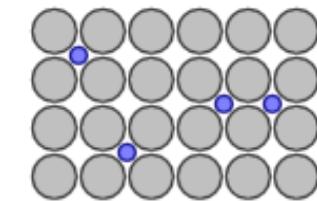
Arten von Mischkristallen

2. Einlagerungsmischkristall

- Kleinere Atome
- Durchmesserverhältnis:
$$f = \frac{d}{D} \leq 0.41$$
- Atome in Lücken
(Zwischengitterplätze)



Substitutionsmischkristalle



Einlagerungsmischkristalle

Beispiele:

- C in Fe (Stahl!)
- N in Fe (Nitrieren)

Wichtig: Beide Arten sind
einphasig!

Intermetallische Phasen

Charakteristika:

- Komplizierter Gitteraufbau (mehrere hundert Atome)
- Unabhängig von Ausgangsgittern
- **Starke Anziehungskräfte** zwischen Atomsorten
- Bindungsform: metallisch + kovalent + ionisch
 - → **Intermediär** zwischen metallisch und chemisch

Eigenschaften:

- Sehr **hart**
- Sehr **spröde**
- In technischen Legierungen meist < 10%

Wichtige intermetallische Phasen

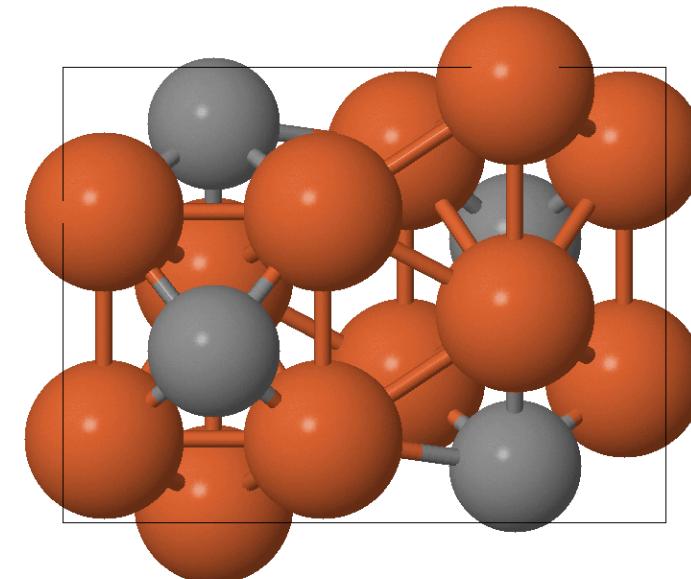
Interstitialle Phasen (Einlagerungsstrukturen)

Carbide:

- Fe_3C (Zementit) in Stahl
- Cr_{23}C_6 in rostfreien Stählen
- WC in Hartmetallen

Weitere:

- Nitride (z.B. Fe_4N)
- Boride (z.B. Fe_2B)



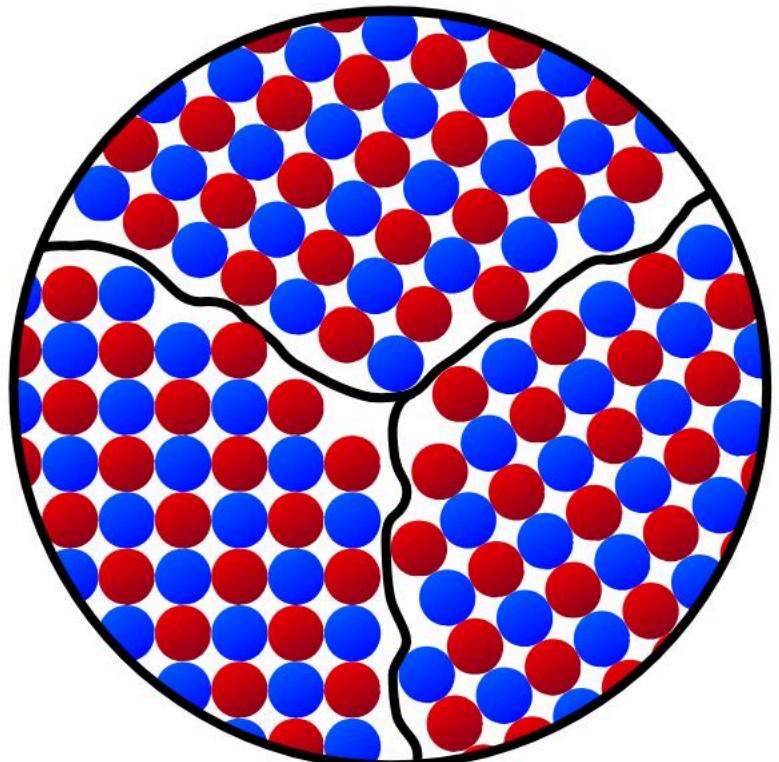
Anwendung:

- Werkzeugstähle
- Hitzebeständige Stähle
- Verschleißfeste Beschichtungen

Legierungstypen

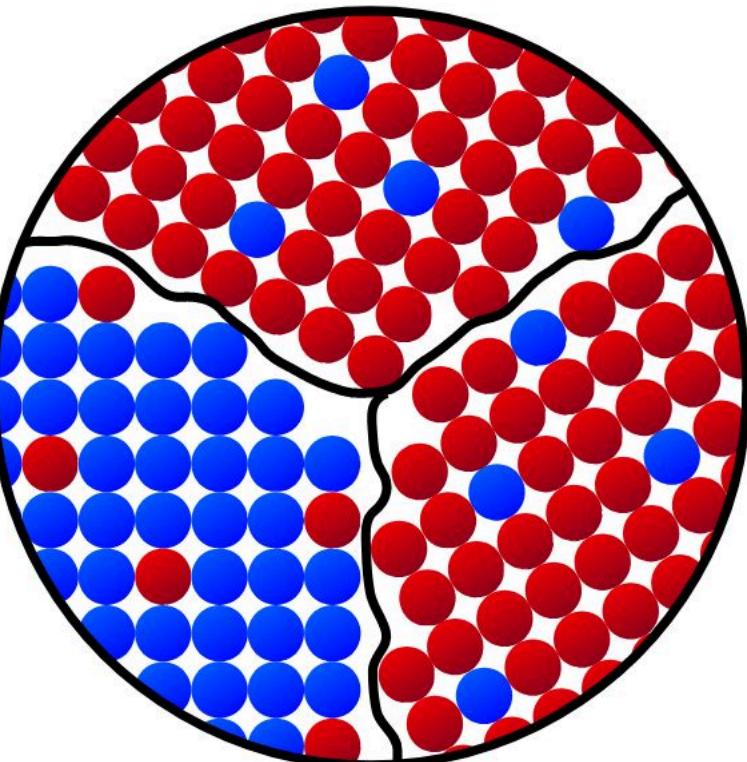
Die Komponenten der Legierung
sind im festen Zustand ineinander ...

vollkommen löslich



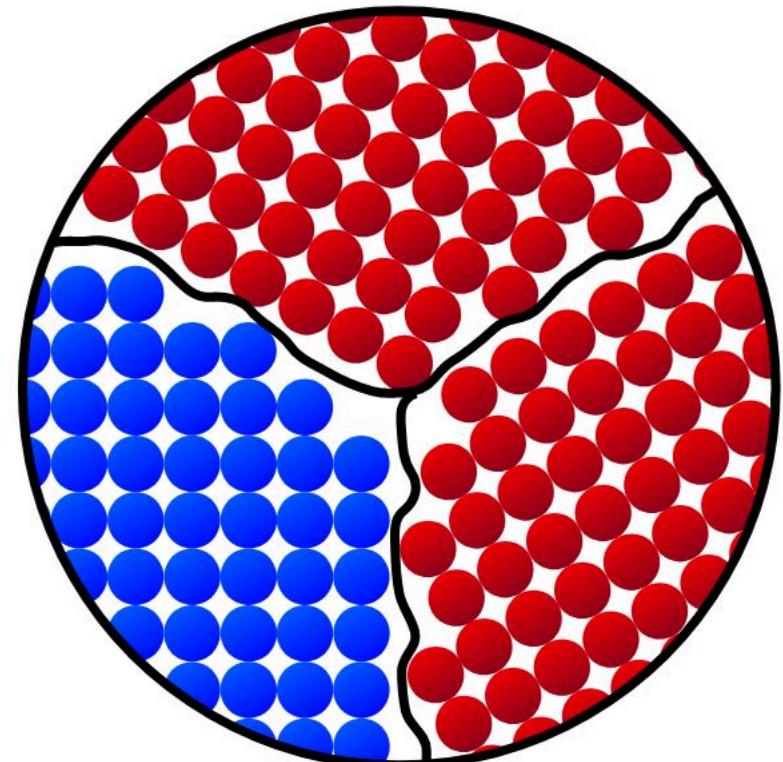
Mischkristall

begrenzt löslich



Kristallgemisch aus
Mischkristallen

vollkommen unlöslich



Kristallgemisch

Gefüge der Werkstoffe

Definition:

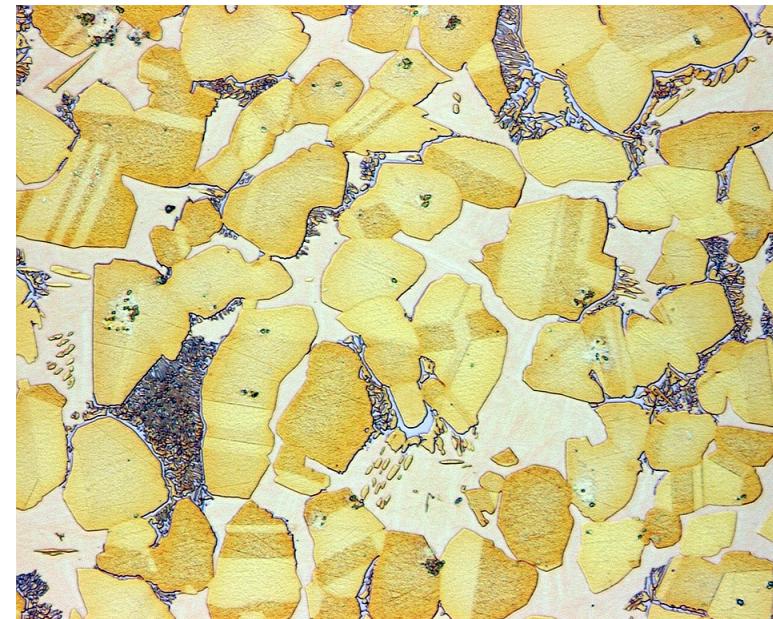
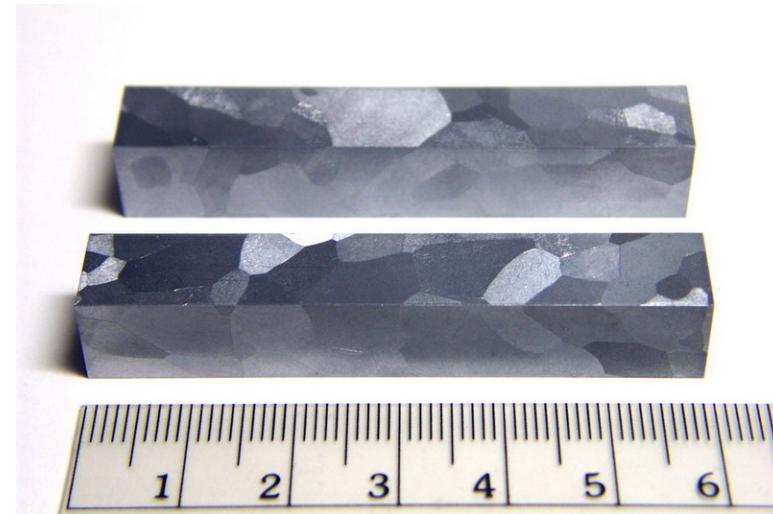
Charakterisiert durch **Art, Größe,**

Form, Orientierung und
Anordnung der einzelnen

Bestandteile (Phasen):

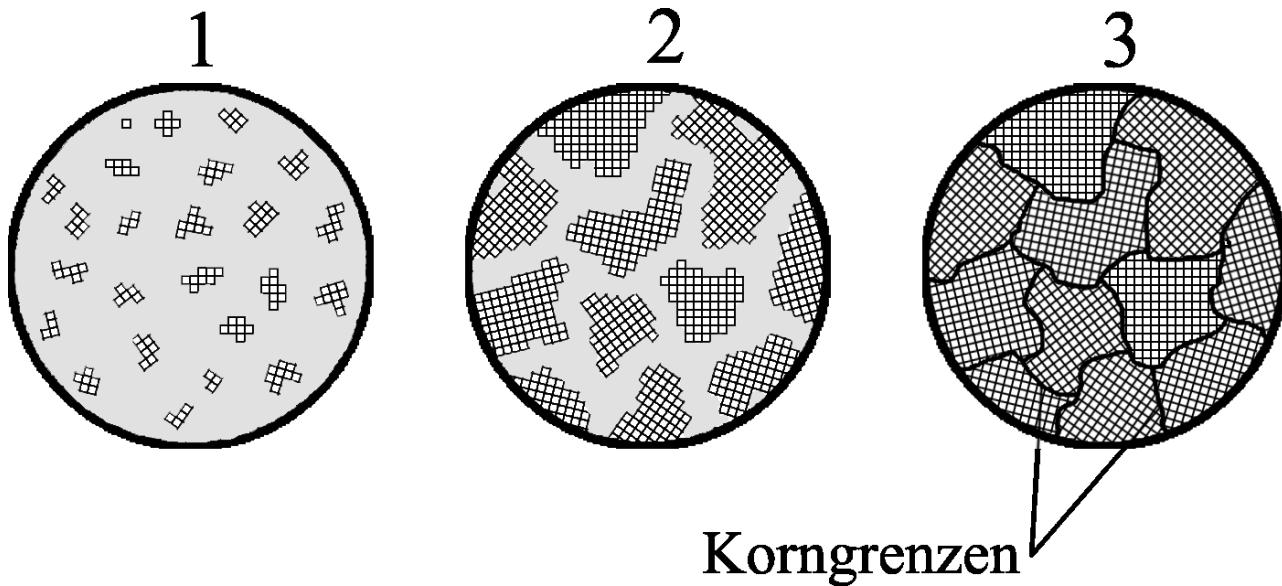
- Kristallite (Körner)
- Amorphe Bereiche
- Verstärkungsstoffe
- Füllstoffe

 Video zum Kristallwachstum



Entstehung des Gefüges - Ablauf

A[Schmelze] --> B[Abkühlung / Unterkühlung]
B --> C[Keimbildung homogen + heterogen]
C --> D[Keimwachstum]
D --> E[Kristallisation]
E --> F[KristallitbildungKörner + Korngrenzen]
F --> G[Gefüge]



Keimbildung

Zwei Arten:

Homogene Keimbildung

- **Arteigene** Keime
- Schwankungen in der Schmelze
- Höhere Unterkühlung nötig
- Seltener in der Praxis

Heterogene Keimbildung

- **Artfremde** Keime (Verunreinigungen, Kokillenwand)
- Geringere Unterkühlung nötig
- Häufigste Form in der Praxis
- Kann gezielt genutzt werden (Impfkristalle)

Kristallwachstum

Zusammenhänge:

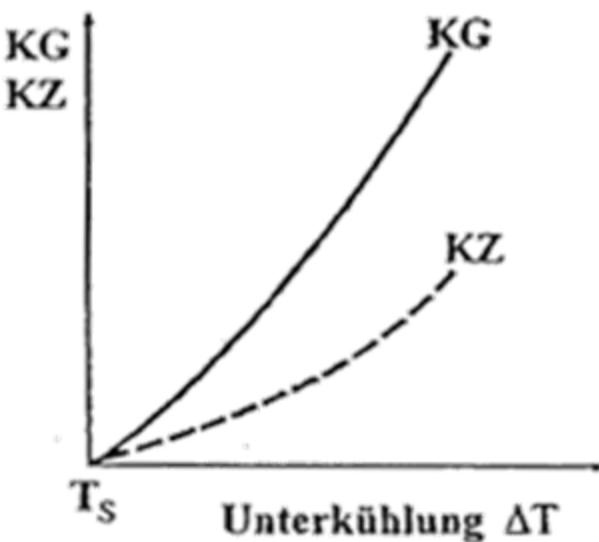
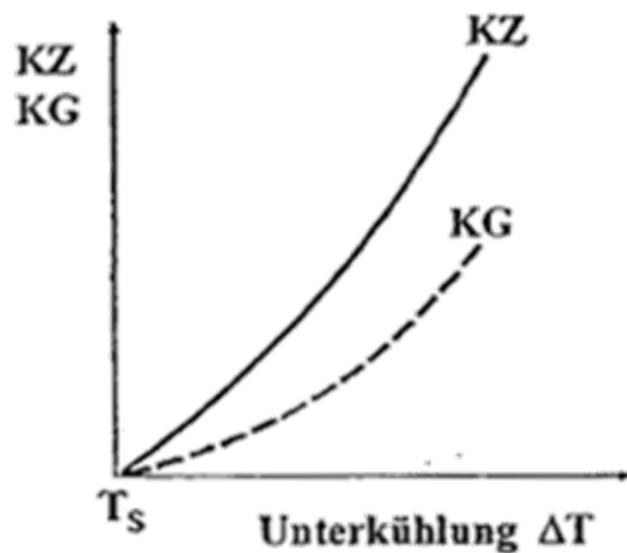
- **Keimzahl (KZ)** hängt von Unterkühlung ab
- **Kristallisationsgeschwindigkeit (KG)** hängt von Unterkühlung ab

Einfluss auf Korngröße:

Bedingung	Ergebnis
Viele Keime + langsames Wachstum	Feinkörnig
Wenige Keime + schnelles Wachstum	Grobkörnig

Merke: Schnelle Abkühlung → viele Keime → feinkörnig!

Einfluss der Korngröße



a) Feinkörniges Gefüge

- Viele Keime
- Schnelle Abkühlung
- **Vorteile:**
 - Höhere Festigkeit
 - Bessere Zähigkeit
 - Gleichmäßige Eigenschaften

b) Grobkörniges Gefüge

- Wenige Keime
- Langsame Abkühlung
- **Nachteile:**
 - Geringere Festigkeit
 - Spröder
 - Anisotrope Eigenschaften

Begriffe: Korn und Korngrenze

Korn (Kristallit)

- Keime haben Wachstum abgeschlossen
- Körner stoßen aneinander
- **Kristallorientierung** zwischen Körnern ist unterschiedlich

Form bestimmt durch Wärmefluss:

- Gleichmäßig in alle Richtungen → **globulitisch** (kugelförmig)
- Vorzugsrichtung → **transkristalline** Erstarrung (stängelförmig)

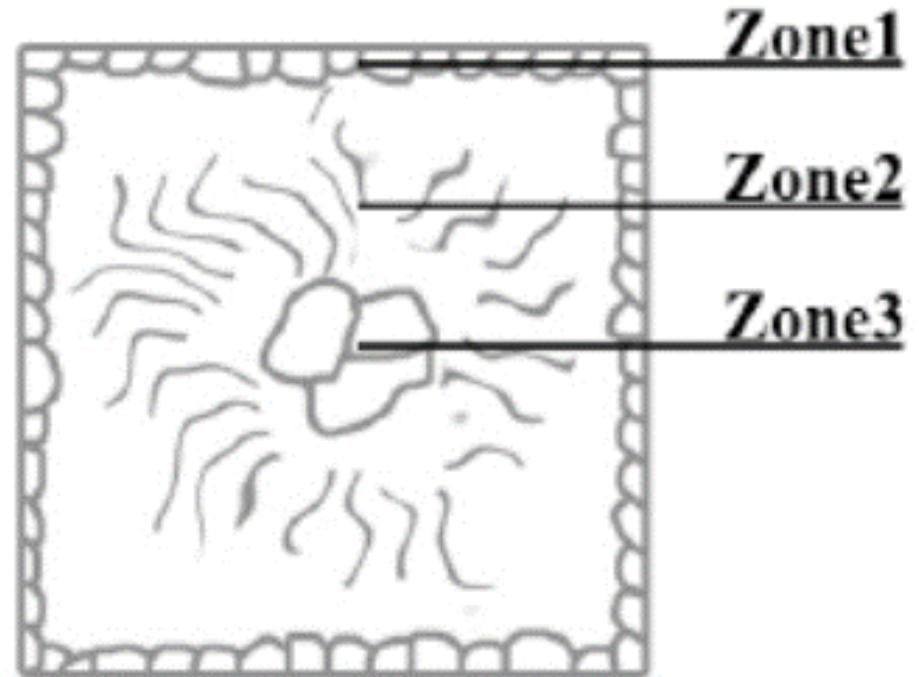
Korngrenze

- Übergangsflächen zwischen Körnern
- Gestörte Gitterstruktur
- Wichtig für mechanische Eigenschaften!

Gießen und Stranggießen - Drei Zonen

Beim Gießen in eine Metallform (Kokille) bilden sich **drei charakteristische Zonen**:

1. Feinkörnige Randzone
2. Transkristallisationszone
3. Globulare Kernzone



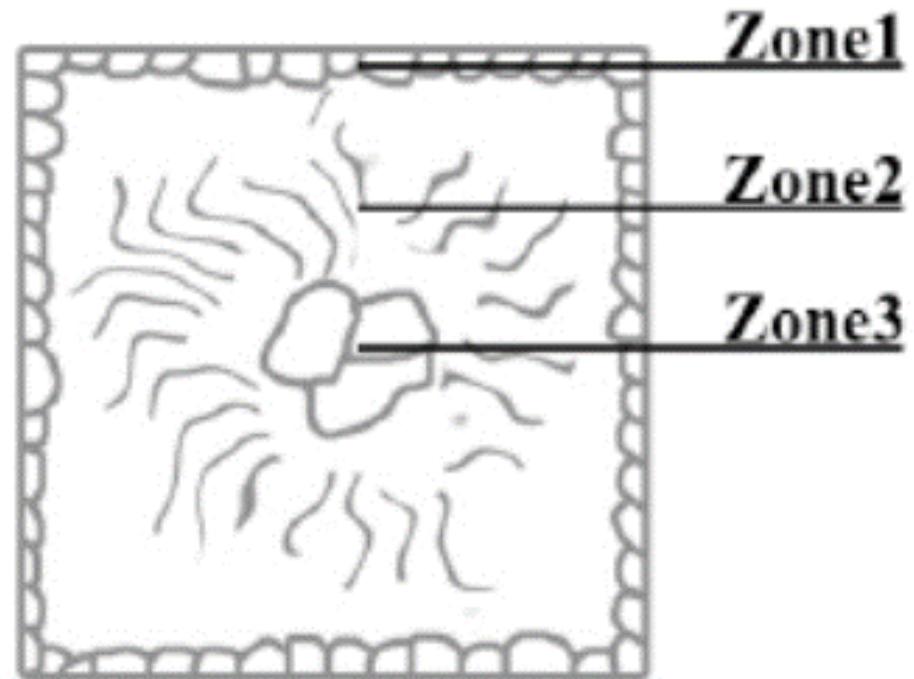
Zone 1: Feinkörnige Randzone

Entstehung:

- Starke **Unterkühlung** an Kokillenwand
- Viele Kristallkeime bilden sich gleichzeitig
- Schnelles Erstarren

Ergebnis:

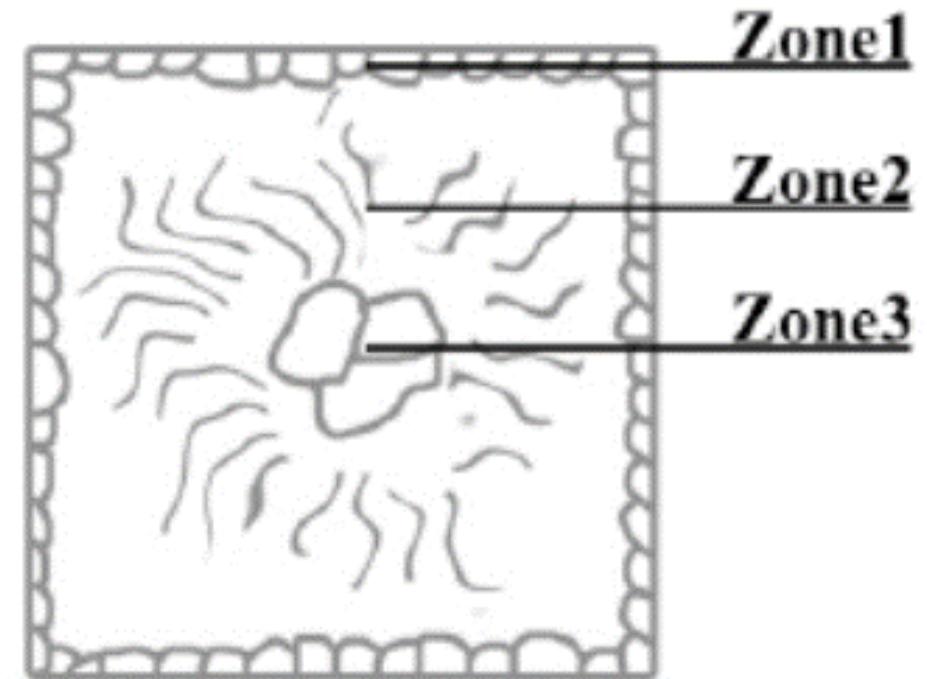
- Kleine, gleichmäßige Kristallite
- Globulare Form
- Feinkörniges Gefüge



Zone 2: Transkristallisationszone

Entstehung:

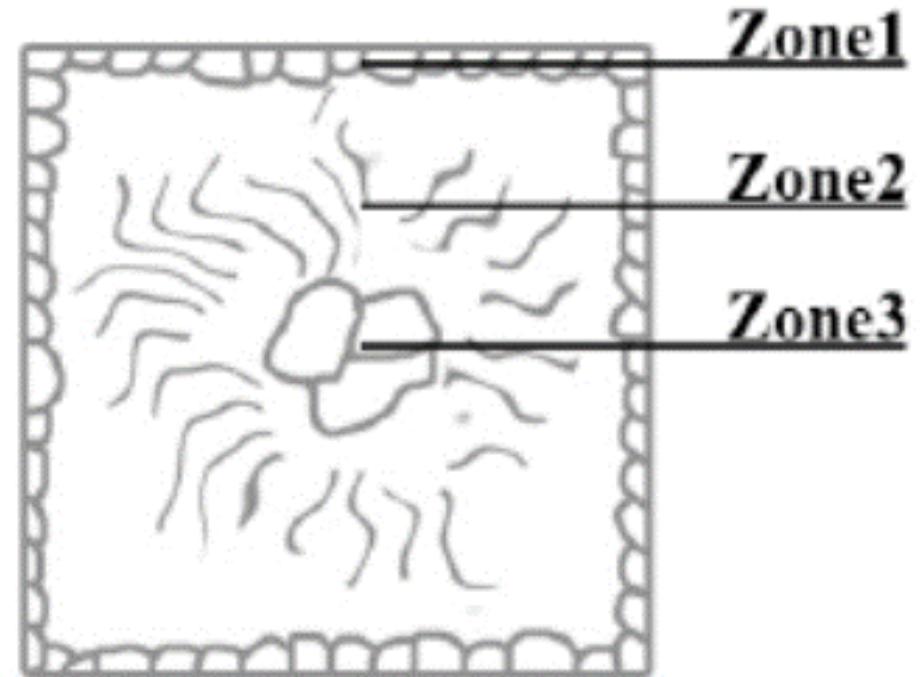
- **Gerichtetes** Wachstum von Kristalliten
- Wachstum entgegen dem Wärmestrom
- Kristallographische Orientierung parallel zum Temperaturgradienten



Zone 2: Transkristallisationszone

Ergebnis:

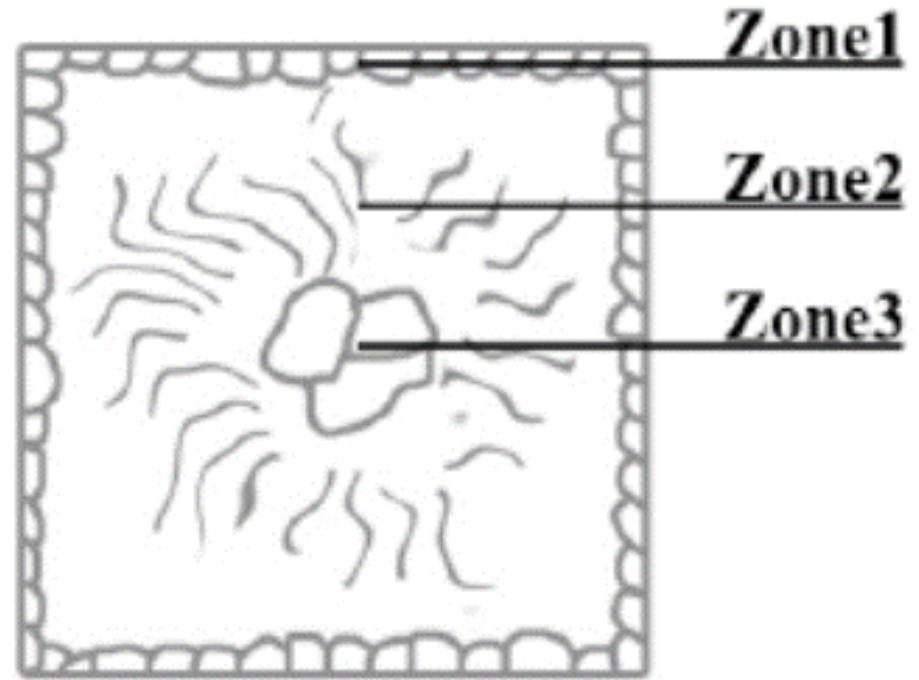
- **Stängelkristalle** (sehr grob)
- Ausgeprägte Vorzugsorientierung
- → **Gusstextur** entsteht
- **Anisotrope** Eigenschaften



Zone 3: Globulare Kernzone

Entstehung:

- Verunreinigungen werden von Stängelkristallen "vorgeschoben"
- Anreicherung im Kern (**Seigerung**)
- Viele **artfremde Keime**



Ergebnis bei normalen Metallen:

- Globulare, feinkörnige Struktur

Bei sehr reinen Metallen:

- Grobkörniges Gefüge

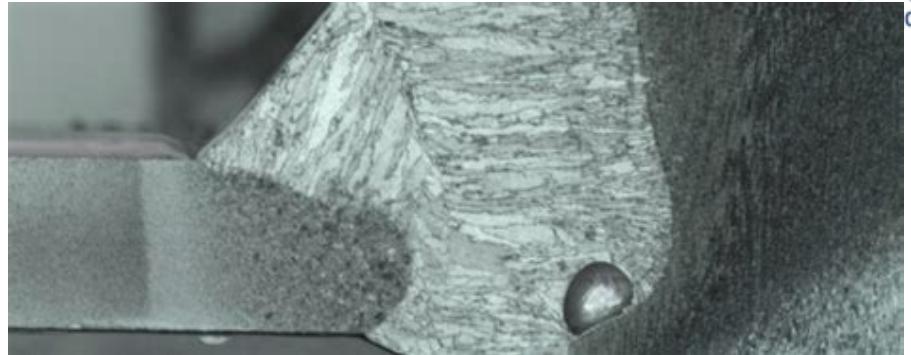
Schweißen - Gefügebildung

Ähnliche Zonen wie beim Gießen:

- Wärmeeinflusszone (WEZ)
- Schmelzzone mit Erstarrungsgefüge
- Übergangszone

Besonderheiten:

- Sehr schnelle Abkühlung möglich
- Feinkörniges Gefüge
- Aber: Gefahr von Aufhärtung



Gefügenachweise - Warum?

Problem:

- Kristallite sind normalerweise **nicht sichtbar**
- Werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen erfordern Sichtbarmachung

Ziel:

- Mikrostruktur analysieren
- Korngröße bestimmen
- Phasenverteilung untersuchen
- Fehler erkennen

Gefügenachweise - Arbeitsschritte

Probenpräparation:

1. Gezielte Probenentnahme

- Repräsentative Stelle wählen
- Schonende Trennung (Vermeidung von Gefügebeeinflussung)

2. Schleifen

3. Polieren

4. Ätzen

Mikroschliffe

Untersuchungsmethoden:

Lichtmikroskop

- Bis ca. 1000× Vergrößerung
- Einfache Handhabung
- Ausreichend für viele Anwendungen

Elektronenrastermikroskop (REM)

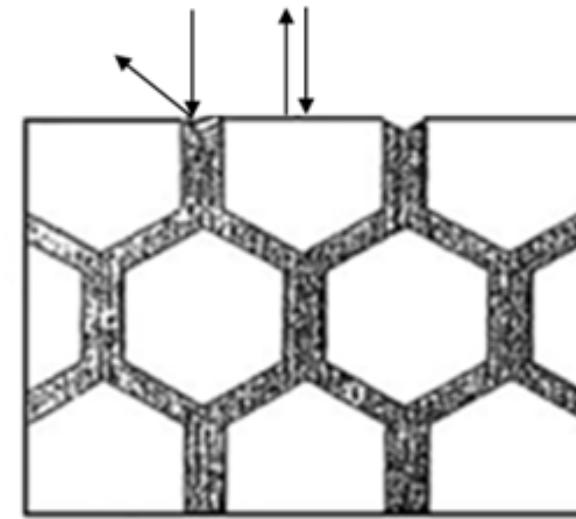
- Bis > 100.000× Vergrößerung
- **Höhere Auflösung**
- **Größere Schärfentiefe**
- Elementanalyse möglich (EDX)

Ätzverfahren

**Ätzen = kontrollierter
Korrosionsvorgang**

1. Korngrenzenätzung

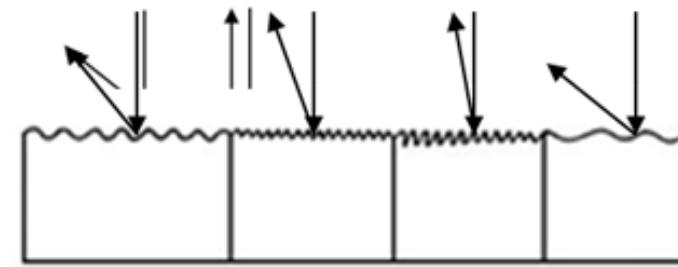
- Bevorzugtes Auflösen von **Korngrenzen**
- Korngrenzen erscheinen als dunkle Linien
- Körner werden sichtbar



Ätzverfahren

2. Kornflächenätzung

- Kornschnittflächen werden unterschiedlich aufgeraut
- Oder: unterschiedliche Oxidschichtdicken
- Körner reflektieren Licht **unterschiedlich stark**
- → Kontrastbildung durch verschiedene Grautöne



Makroschliffe

Definition: Gefügeuntersuchung mit bloßem Auge oder Lupe

Anwendungen:

1. Seigerungen nachweisen und lokalisieren

- Ätzungen nach Heyn und Oberhoffer
- Baumannabdruck (für Schwefel)

2. Qualität von Schweißverbindungen

- Adlerätzung

3. Kraftwirkungslinien nach plastischer Verformung

- Ätzung nach Fry
- Faserverlauf sichtbar machen

Fachbegriffe für Gefügebeschreibung

Wissenschaftliche Disziplinen:

Werkstoff	Fachgebiet
Metalle	Metallographie
Keramiken	Keramographie
Polymere	Plastographie

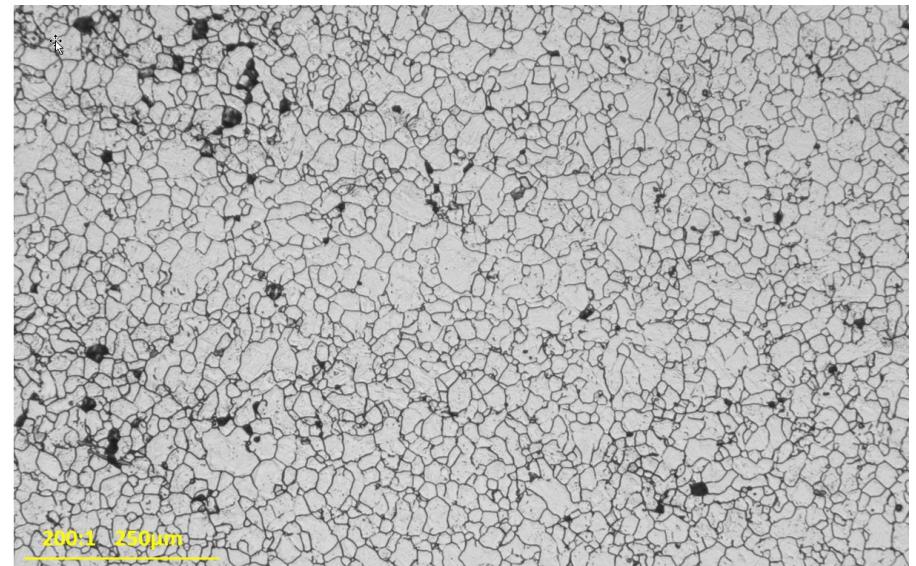
Qualitative Beschreibung: Gefügeform, Phasenverteilung

Quantitative Beschreibung: Korngröße, Phasenanteile, Korngrößenverteilung

Korngrenzen im Detail

Wichtiger Effekt:

- Unlösbare Bestandteile und Verunreinigungen werden von Kristallfronten **vorgeschoben**
- Anreicherung an Korngrenzen
- → **Korngrenzensubstanzen**



Einfluss von Korngrenzensubstanzen

Fall 1: Verformbare Korngrenzensubstanz

- Materialverhalten wird durch **Körner** dominiert
- Gute Duktilität
- Beispiel: Reine Metalle mit geringen Verunreinigungen

Fall 2: Spröde Korngrenzensubstanz

- Materialverhalten wird durch **Korngrenzen** dominiert
- Interkristalline Brüche
- → **Versprödung** des Materials!
- Beispiel: Phosphor-Seigerung in Stahl

Wichtig für: Schweißbarkeit, Warmformgebung, Zähigkeit

Zusammenfassung

Kernpunkte dieser Vorlesung:

- ✓ Legierungen = Mehrstoffsysteme mit metallischem Charakter
- ✓ Konzentration: Massenanteil \neq Atomanteil (außer bei ähnlichen Atommassen)
- ✓ Phasen = homogene Bereiche mit einheitlichen Eigenschaften
- ✓ Diffusion = temperatur- und zeitabhängiger Massentransport
- ✓ Mischkristalle: Substitution und Einlagerung
- ✓ Gefüge entsteht durch Keimbildung und Kristallwachstum
- ✓ Korngröße beeinflusst mechanische Eigenschaften erheblich
- ✓ Gefügenachweis durch Schliff und Ätzung

Ausblick - Nächste Vorlesung

Zustandsdiagramme:

- Wie lesen wir Phasendiagramme?
- Hebelgesetz
- Eutektikum und Eutektoid
- Praktische Anwendung: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Vorbereitung:

- Wiederholen: Phasen, Konzentration, Löslichkeit
- Übungsaufgaben zu Legierungszusammensetzungen

Referenzen

Lehrbücher:

- Rainer Schwab: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für Dummies*, 2019; ISBN-10: 352771538X

Online-Ressourcen:

- [Grundlagen der Metallkunde](#)

Videos:

- [Kristallwachstum Visualisierung](#)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

 christian.willberg@h2.de

 [ORCID](#)

Nächste Vorlesung:

Zustandsdiagramme und Phasengleichgewichte