

# Werkstofftechnik II

## Aluminiumlegierungen

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Christ

Datum:

- Korrosion und Korrosionsschutz
- ...
- Aluminiumlegierungen
  - Allgemeines zu Aluminiumlegierungen
  - Technische Aluminiumlegierungen
  - Ausscheidungshärtung
  - Anodische Oxidation
- Keramische Werkstoffe
- Polymerwerkstoffe
- Verbundwerkstoffe

# Leichtmetalle

Aluminium und seine Legierungen gehört zu der Gruppe der **Leichtmetalle**. Aluminium ist nach den Fe-Basismetallen (insbesondere Stahl) das am häufigsten verwendete Metall.

| Leichtmetalle |                   |                                |                           |                     |                 |
|---------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------|
| Element       | Ordnungs-<br>zahl | Dichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Schmelz-<br>punkt<br>[°C] | Gitter-<br>struktur | Atom-<br>radius |
| Lithium       | 3                 | 0,53                           | 186                       | krz                 | 1,57            |
| Magnesium     | 12                | 1,74                           | 651                       | hex                 | 1,60            |
| Beryllium     | 4                 | 1,82                           | 1278                      | hex                 | 1,13            |
| Aluminium     | 13                | 2,70                           | 660                       | kfz                 | 1,43            |
| Titan         | 22                | 4,54                           | 1800                      | hex/krz             | 1,47            |

Zum  
Vergleich:

Fe 7,8 g/cm<sup>3</sup>

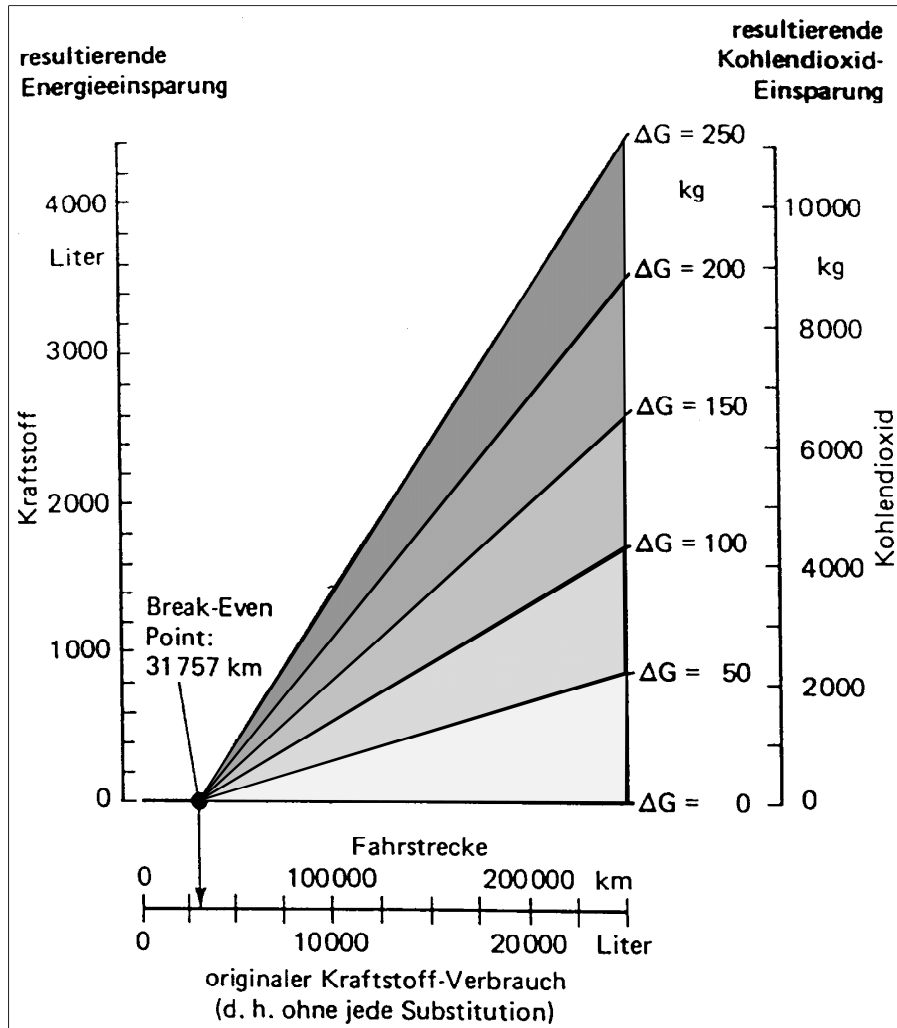
## Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Aluminiumlegierungen

Die große Verbreitung von Aluminiumlegierung resultiert aus deren Eigenschaften:

- Geringe Dichte (etwa ein Drittel der Dichte von Stahl)
- Festigkeitseigenschaften ( $60 \text{ MPa} \leq R_m \leq 530 \text{ MPa}$ )
- Gute Korrosionsbeständigkeit
- Gute Umform-, Span- und Schweißbarkeit
- Hohe elektr. Leitfähigkeit  
(Al:  $3,7 \times 10^7 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ ; Cu:  $5,8 \times 10^7 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ )
- Gute Wärmeleitfähigkeit
- Niedriger E-Modul (72,5 GPa)
- Niedriger Schmelzpunkt (660 °C)

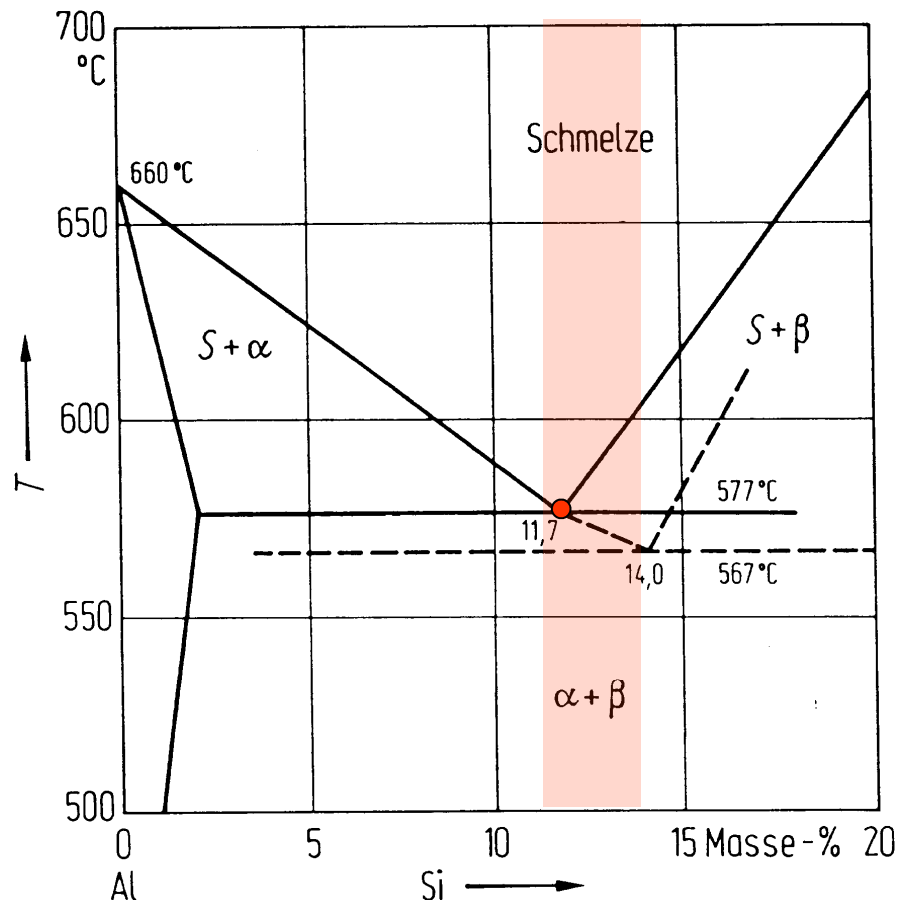
| Anwendungsgebiet     | Prozentsatz |
|----------------------|-------------|
| Getränkedosen        | 40          |
| Elektrotechnik       | 12          |
| Drähte               | 5           |
| Kraftfahrzeuge       | 24          |
| Flugzeugbau          | 3           |
| Geschirr             | 3           |
| Bauindustrie         | 8           |
| Verpackungsindustrie | 3           |
| Metallindustrie      | 2           |

# Eigenschaften von Aluminiumlegierungen



- Gegen die großtechnische Verwendung von Aluminium spricht in erster Linie der Preis, welcher primär auf den großen Energieaufwand bei der Herstellung zurückzuführen ist.
- Durch die geringe Dichte in Kombination mit hoher Festigkeit (hohe **spezifische Festigkeit**) kann dieser Nachteil aber u.U. (z.B. Fahrzeugbau) überkompensiert werden.
- Beispiel: Kraftstoffeinsparung bei einem KFZ durch Substitution von Stahl durch Aluminium.

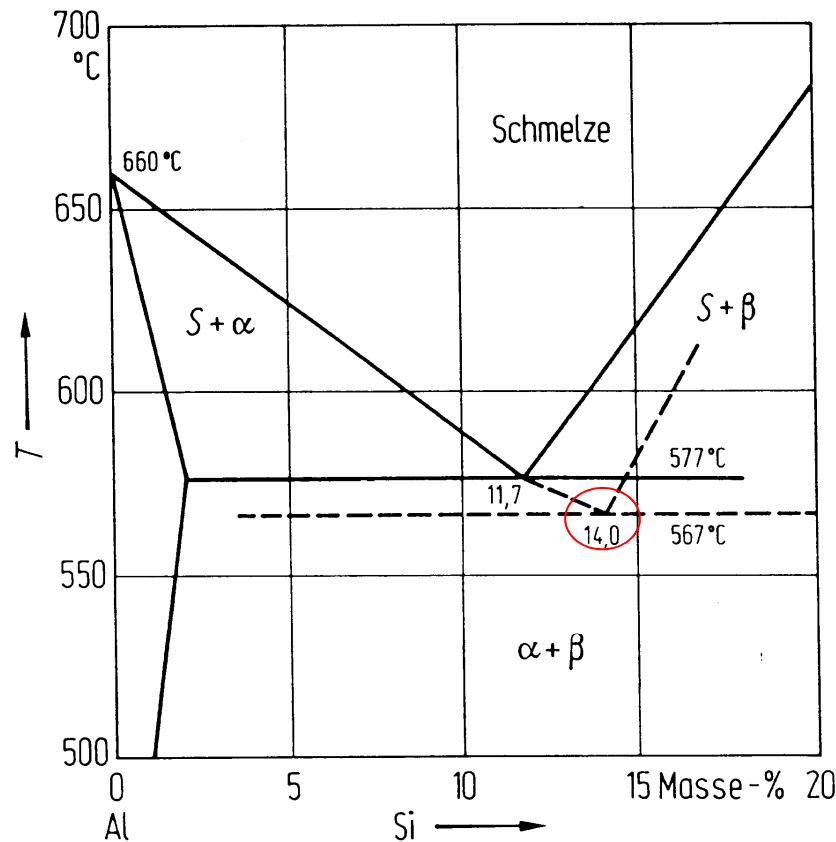
# Gusslegierungen - Grundsätzliches



## Gusslegierungen:

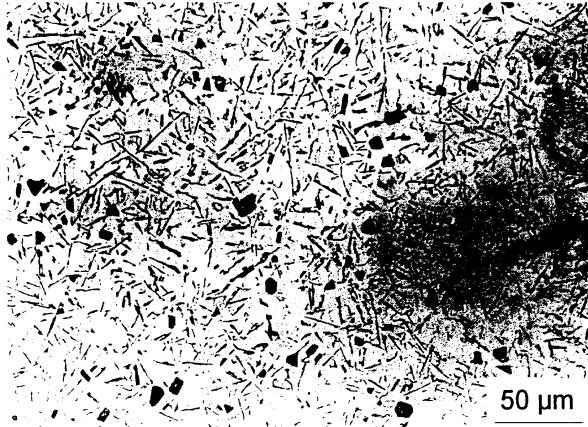
- Die technisch bedeutsamsten Al-Gusslegierungen sind die Al-Si-Legierungen.
- Das System Al-Si bildet ein einfaches eutektisches System mit einem eutektischen Punkt bei 11,7% Si und 577 °C.
- Die naheutektischen Legierungen mit Si-Gehalten von 11 bis 13% Si sind unter der Bezeichnung **Silumin** bekannt.
- Bei langsamer Abkühlung (Sandguss) bildet sich ein grobes Gefüge, welches relativ spröde ist und eine geringere Festigkeit als ein feines Gefüge besitzt.

# Veredelung von Al-Si-Legierungen



- Als Veredelung wird ein metallurgisches Verfahren bezeichnet, bei dem durch Einbringen geringer Mengen (einige Hundertstel Prozent) von Natrium in eutektischen und untereutektischen Legierungen ein besonders fein ausgebildetes Eutektikum erzielt wird.
- Die Zugabe von Na in die Schmelze bewirkt eine Verschiebung des eutektischen Punktes nach unten und nach rechts. Das sich einstellende Gefüge entspricht dem einer sehr schnell abgekühlten Schmelze.

## Veredelung von Al-Si-Legierungen



- Gefügebild von unveredeltem Sandguss mit naheutektischer Zusammensetzung:  
Grobe primär ausscheidende Si-Mischkristalle in eutektischer Matrix.

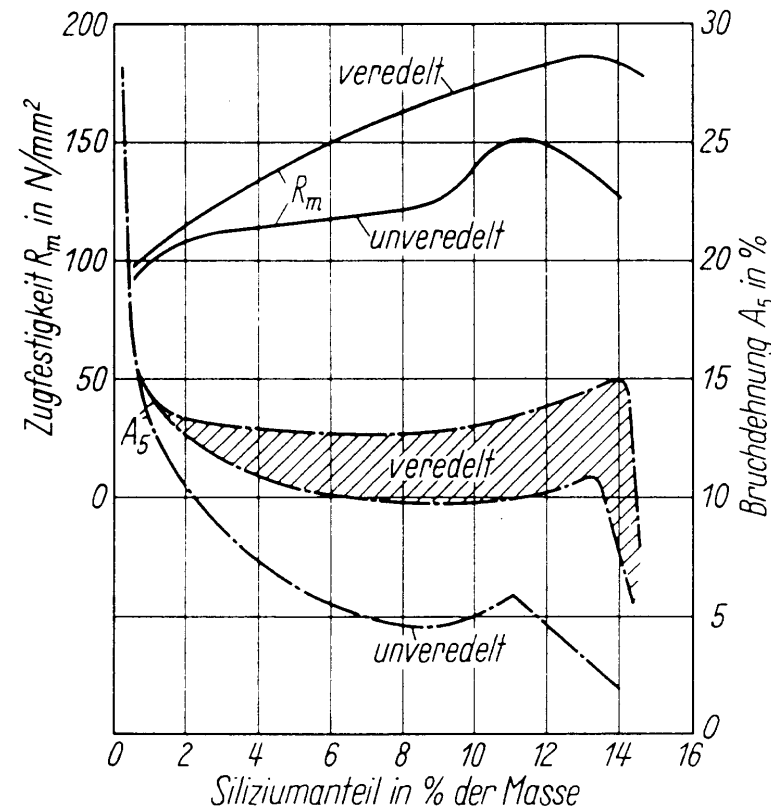


- Veredelter Sandguss einer naheutektischen Al-Si-Legierung:  
Das Gefüge ist deutlich feiner.



## Veredelung von Al-Si-Legierungen

Einfluss der Veredelung auf die mechanischen Eigenschaften im System Al-Si:



Für Kolbenlegierungen wird der Si-Gehalt angehoben und Cu zugegeben (z.B. 25% Si und 5% Cu). Ein weiteres wichtiges Legierungselement für Al-Gusslegierungen ist Mg (bis 10%).

# Knetlegierungen - Grundsätzliches

## Knetlegierungen:

In Knetlegierungen sind die Legierungsgehalte insgesamt geringer als in Gusslegierungen. Letztere enthalten auch meist höhere Verunreinigungsgehalte, da sie oft unter Verwendung von Schrott hergestellt werden (Energieersparnis!).

## Wichtige Knetlegierungen sind:

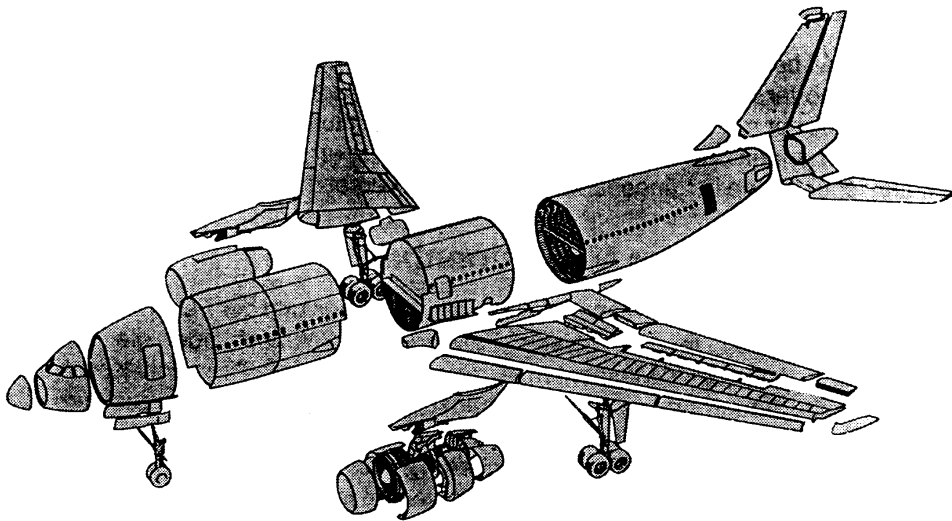
- AlMg- und AlMn-Legierungen = nicht aushärtbar (Vorteil beim Schweißen und bei langzeitigen Anwendungen bei höheren Temperaturen)
- Al-Cu-Mg und Al-Zn-Mg sind aushärtbare Knetlegierungen

## Neuere Entwicklung:

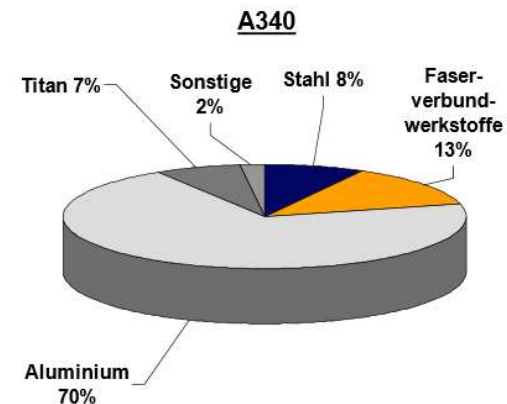
- Al-Li-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Festigkeit bei gleichzeitig niedriger Dichte für die Luftfahrt sehr interessant .
- Partikelverstärkte Aluminiumlegierungen: z.B. 15% SiC-Partikel in einer Al-Legierungsmatrix führen zu einer deutlichen Erhöhung des E-Moduls.
- Partikelverstärktes Aluminium gehört in die Klasse der Verbundwerkstoffe. Aufgrund der metallischen Matrix spricht man von MMC (metal matrix composite).

## Anwendung

- Erst durch die Verfügbarkeit hochfester (durch Aushärtung!) Aluminiumlegierungen ist die **moderne Luftfahrt** möglich geworden.
- Trotz der Konkurrenz durch faserverstärkte Kunststoffteile werden Leichtmetalle (Al und Ti) die wichtigsten Werkstoffe für die Baugruppen der tragenden Struktur bleiben.
- **Standardlegierungen im zivilen Flugzeugbau sind Aluminiumlegierungen auf der Basis von AlCuMg und AlZnMgCu.**



Baugruppen der tragenden Struktur des Airbus A 310



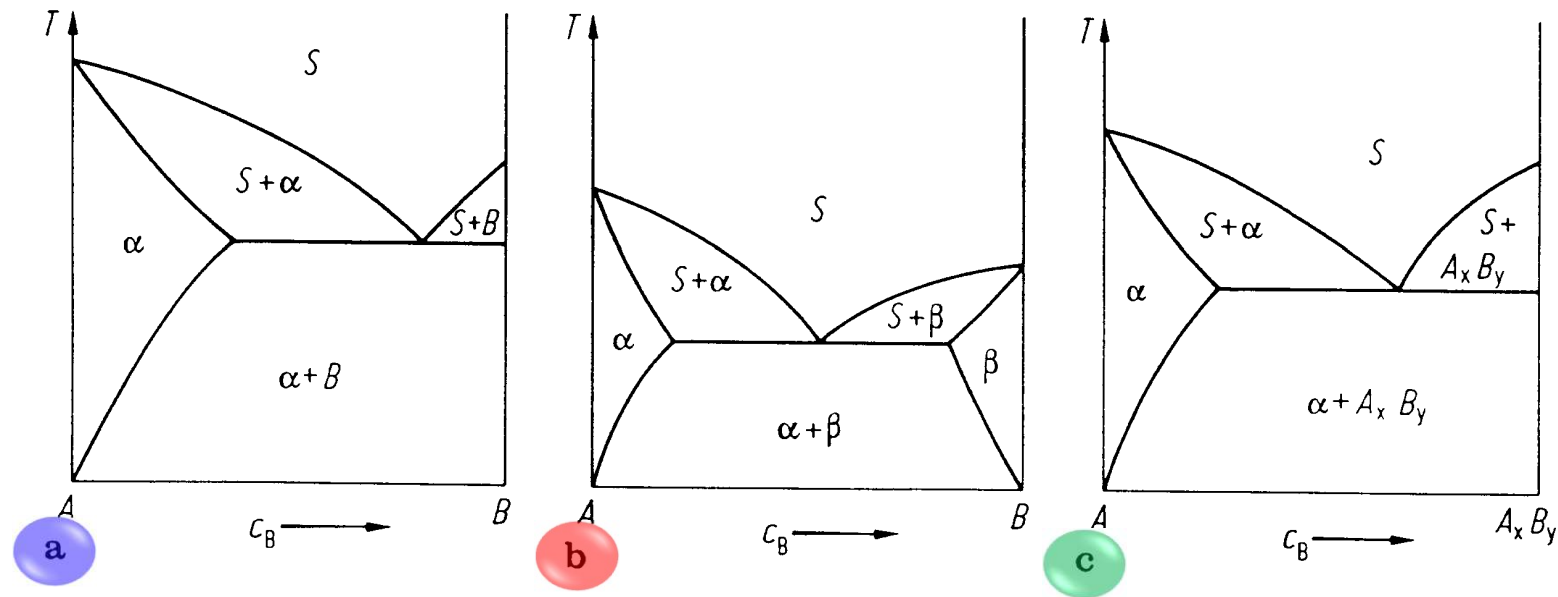
Anteile der Werkstoffe in einem Airbus A340

## Voraussetzungen

---

- In einem aus mindestens zwei Komponenten bestehenden Legierungssystem liegt eine begrenzte Löslichkeit vor (Mischungslücke).
- Die begrenzte Löslichkeit ist temperaturabhängig, so dass mit sinkender Temperatur die Löslichkeit abnimmt.
- Durch rasches Abkühlen ist es möglich, einen übersättigten Zustand einzustellen. Die zwangsgelöste Komponente scheidet sich über Zwischenzustände aus.

# Mögliche Zustandsdiagramme für aushärtbare Legierungen

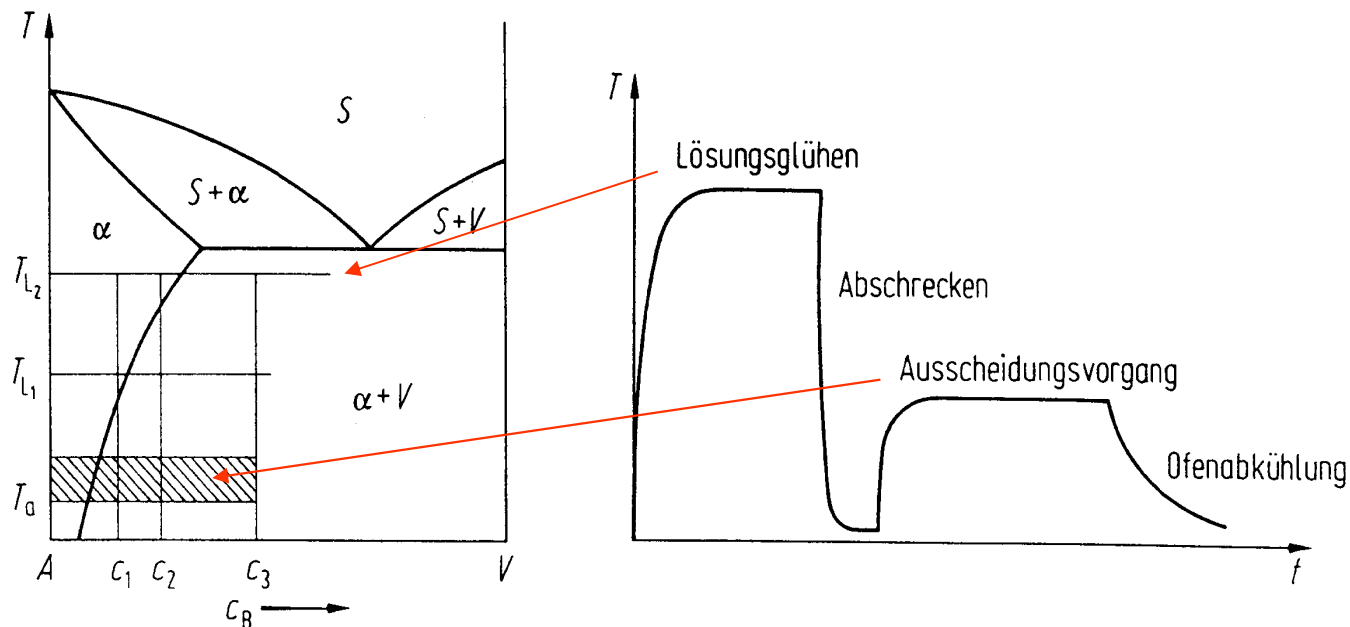


Ausscheidung einer **reinen Komponente (a)**, **eines Mischkristalls (b)** oder **einer intermetallischen Verbindung (c)**.

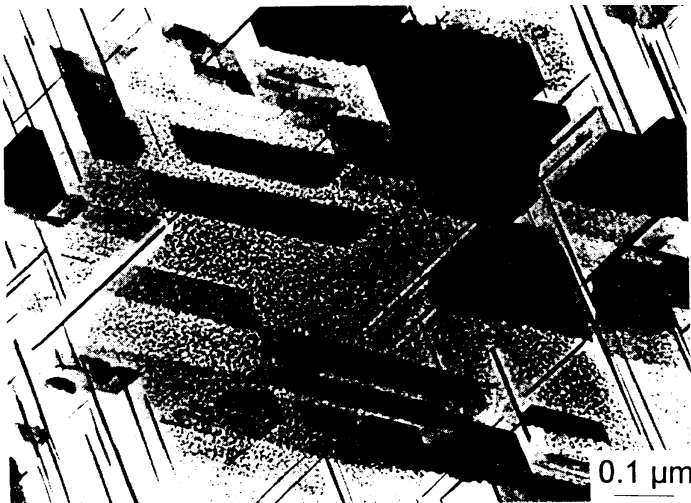
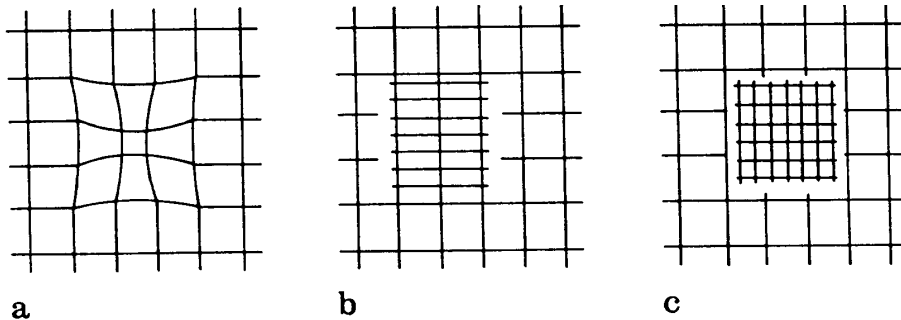
Die Entmischung erfolgt diffusionskontrolliert bei Temperaturen deutlich unterhalb der Grenze der Löslichkeit. Meist entsteht über eine Ausscheidungssequenz eine intermetallische Phase (Fall c).

## Temperaturführung der für die Aushärtung notwendigen Wärmebehandlung

- Lösungsglühen (Homogenisieren): Die dazu notwendige Mindesttemperatur hängt von der Konzentration der gelösten Komponente ab. Um einerseits eine schnelle und sichere Homogenisierung zu erreichen und andererseits ein Aufschmelzen zu vermeiden, wird meist knapp aber sicher unterhalb der eutektischen Temperatur geglüht.
- Abschrecken (meist in Wasser).
- Auslagern im Zweiphasengebiet: Durch die Auslagerungstemperatur wird Form und Ablauf der Entmischung bestimmt. Der Effekt der Aushärtung ist mit der Bildung feinverteilter metastabiler Zwischenzustände verbunden, die nur bei ausreichendem Abstand zur Phasengrenzlinie gebildet werden. Erfolgt die Aushärtung bereits bei Raumtemperatur spricht man von kaltaushärtenden Legierungen.



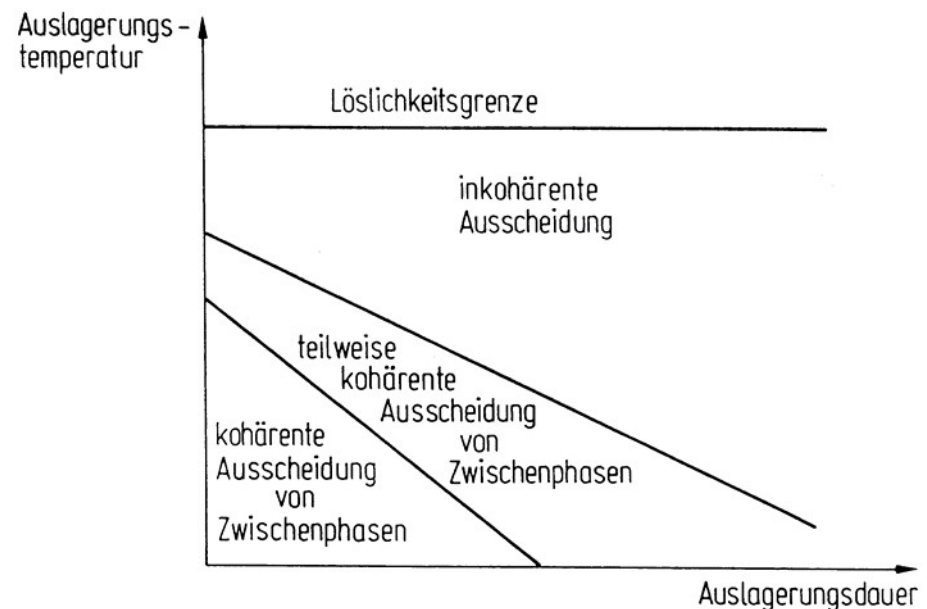
## Grundsätzliches



- Zur Wiederholung:
  - a) Kohärente Ausscheidung
  - b) Teilkohärente Ausscheidung
  - c) Inkohärente Ausscheidung
- Beispiel:  
Transmissionselektronen-  
mikroskopische Aufnahme von  
AlAg10: kohärente (Hintergrund)  
und teilkohärente Ausscheidungen  
(30 000x)

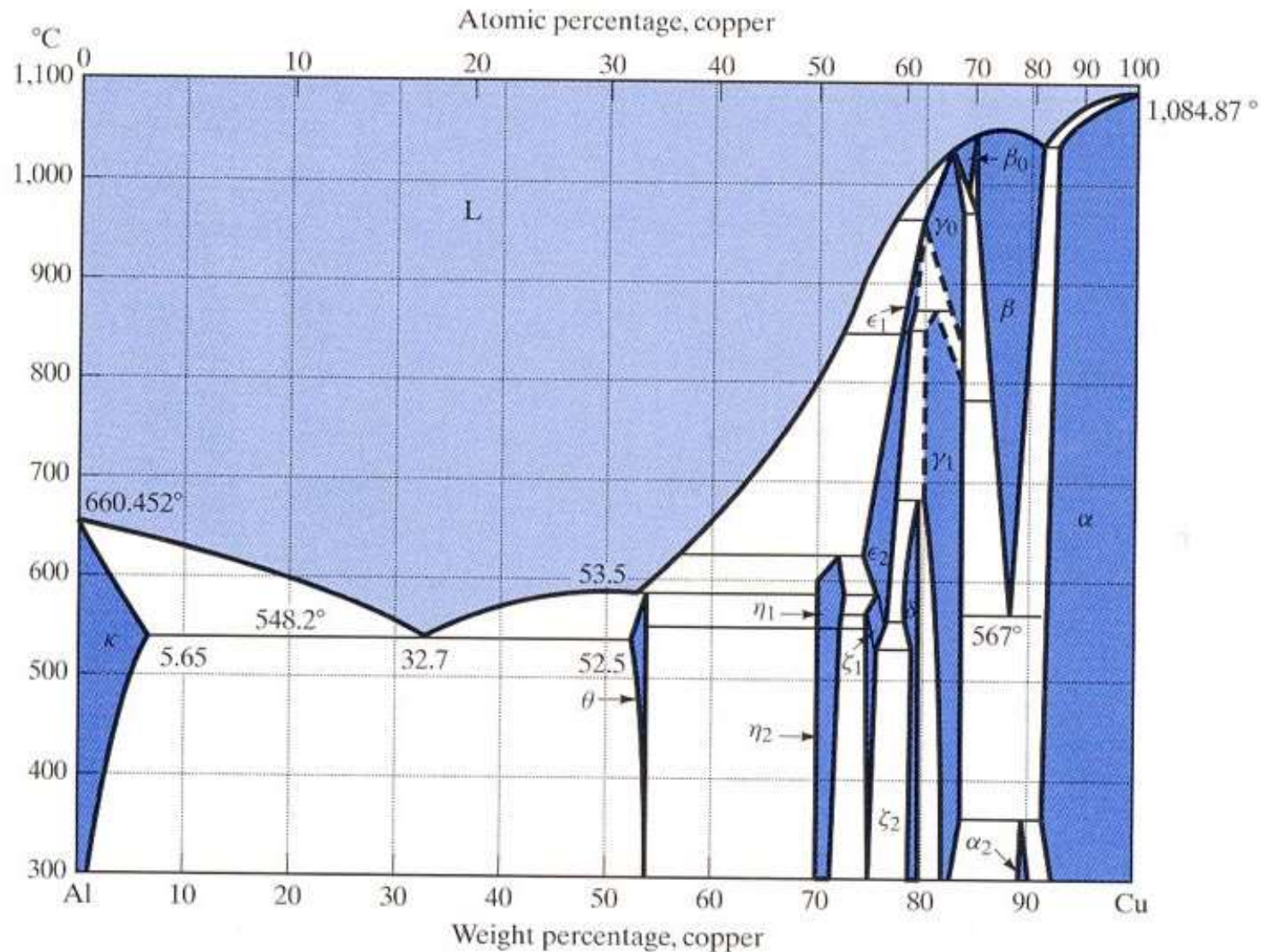
## Grundsätzliches

- Bei niedrigen Auslagerungstemperaturen ist die Beweglichkeit der Atome gering. Damit sind nur kurze Diffusionswege möglich. Es gibt **kohärente Ausscheidung**.
- Bei höheren Auslagerungstemperaturen führen zunehmende Diffusionswege zu Ausscheidungsformen, die energetisch etwas günstiger sind als die kohärenten Ausscheidungen. Es gibt **teilkohärente Ausscheidung**. Die Gestalt des Teilchens ist oft linsen- oder plattenförmig, wobei die großflächige Phasengrenze die kohärente ist.
- Mit zunehmender Annäherung an die Grenzlinie zum homogenen Mischkristall nähert sich die Form (und u.U. die Zusammensetzung) der Gleichgewichtsphase. Da diese Phase in ihrer Gitterstruktur und -konstanten von der der Matrix abweicht, ist im allg. **keine Kohärenz** mehr vorhanden.





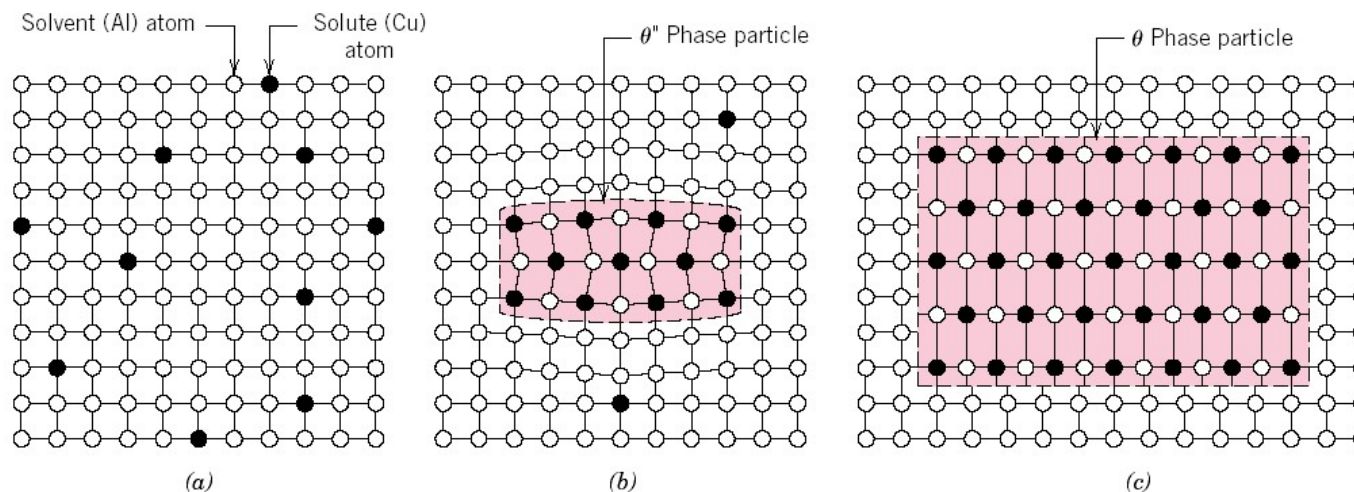
## Beispiel: Ausscheidung im System AlCu



# Ausscheidungssequenz

1. Bildung monoatomarer Schichten von Cu-Atomen (GPI-Zonen nach Guinier und Preston)
2. Periodische Anordnung der Schichten (GP-II-Zonen oder  $\theta''$ -Phase)
3. Aus der  $\theta''$ -Phase oder durch heterogene Keimbildung entsteht die teilkohärente  $\theta'$ -Phase (plattenförmig)
4. Schließlich bildet sich die Gleichgewichtsphase  $\theta$  mit der stöchiometrischen Zusammensetzung  $\text{Al}_2\text{Cu}$

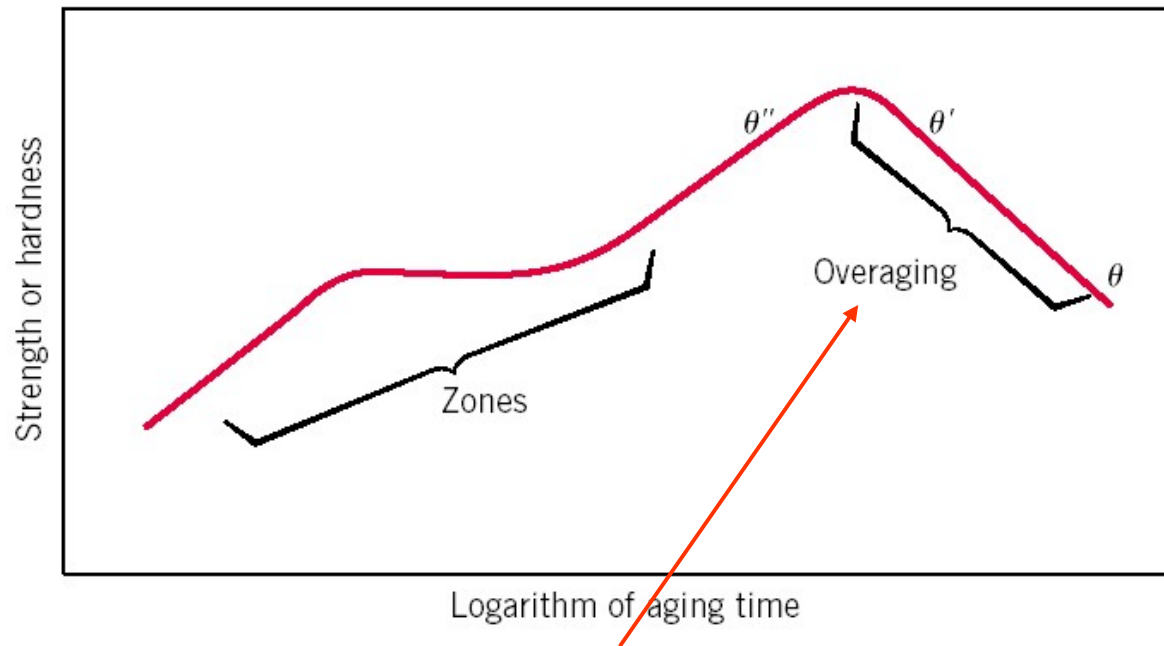
Die GP-Zonen werden nur bei niedrigen Auslagerungstemperaturen gebildet. Bei erhöhter Temperatur und/oder längerer Auslagerungszeit bildet sich  $\theta'$  und  $\theta$ .



## Wiederholung

Die Kinetik der Ausscheidung kann mit Hilfe eines exponentiellen Zeitgesetzes beschrieben werden:

$$W(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^n}$$

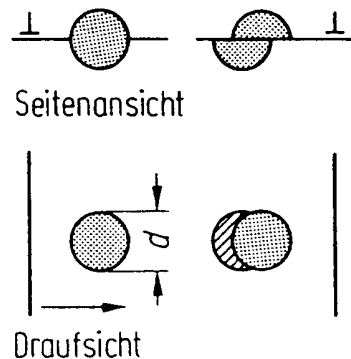


Nach vollständig erfolgter Ausscheidung ( $W=1$ ) kommt es zu einer Vergrößerung der Teilchen (Ostwald-Reifung).

# Verfestigungsmechanismen

- Ziel der Aushärtungsbehandlung ist die Erhöhung des Formänderungswiderstandes. Diese Erhöhung resultiert aus der Behinderung der Beweglichkeit von Versetzungen.
- Durch zwei Arten von Verfestigungsmechanismen können Ausscheidungsteilchen zu einem Festigkeitsanstieg führen.

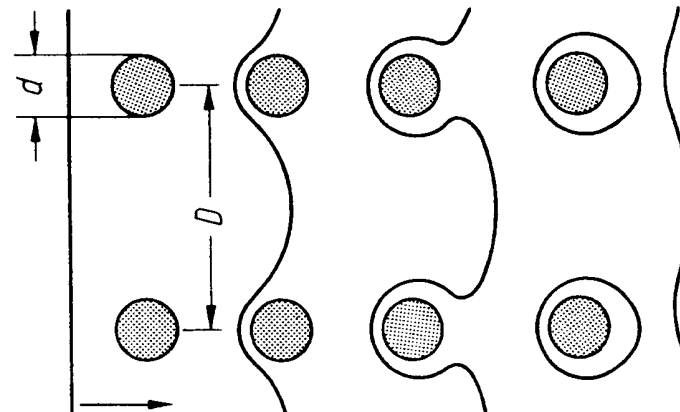
Schneiden schneidbarer Teilchen:



$$\Delta R_p \propto f_v^{\frac{1}{2}} \cdot d^{\frac{1}{2}}$$

(Gilt nur bis etwa 10 nm!)

Umgehung nicht schneidbarer Teilchen:



$$\Delta R_p \propto d^{-1}$$

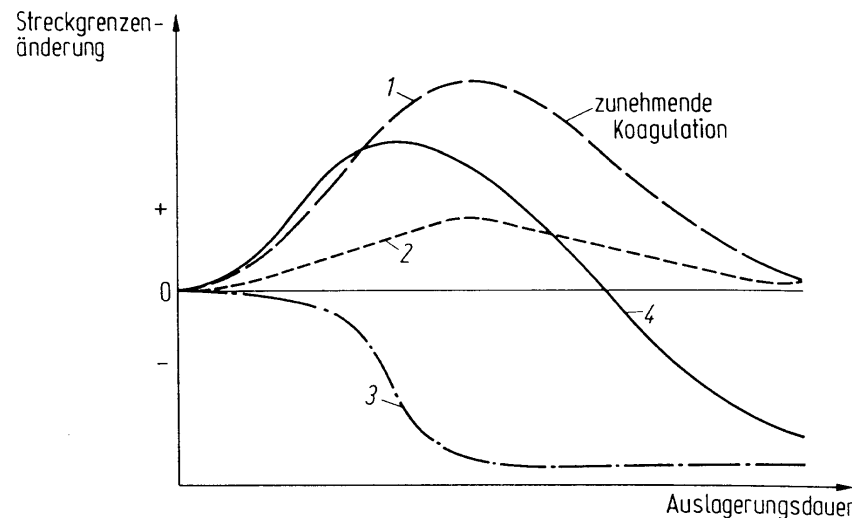
(D >> d)

## Einfluss der Teilchengröße

**Kurve 1:** Durch weiteres Wachstum überschreiten die Teilchen eine optimale Größe, dadurch verlieren die Ausscheidungen an festigkeitssteigernder Wirkung.

**Kurve 2:** Ergibt sich aus der Wirkung der Kohärenzspannungen. Mit zunehmender Größe der Teilchen verliert die Kohärenzspannung an Wirkung, da die Teilchen teil- oder inkohärent werden.

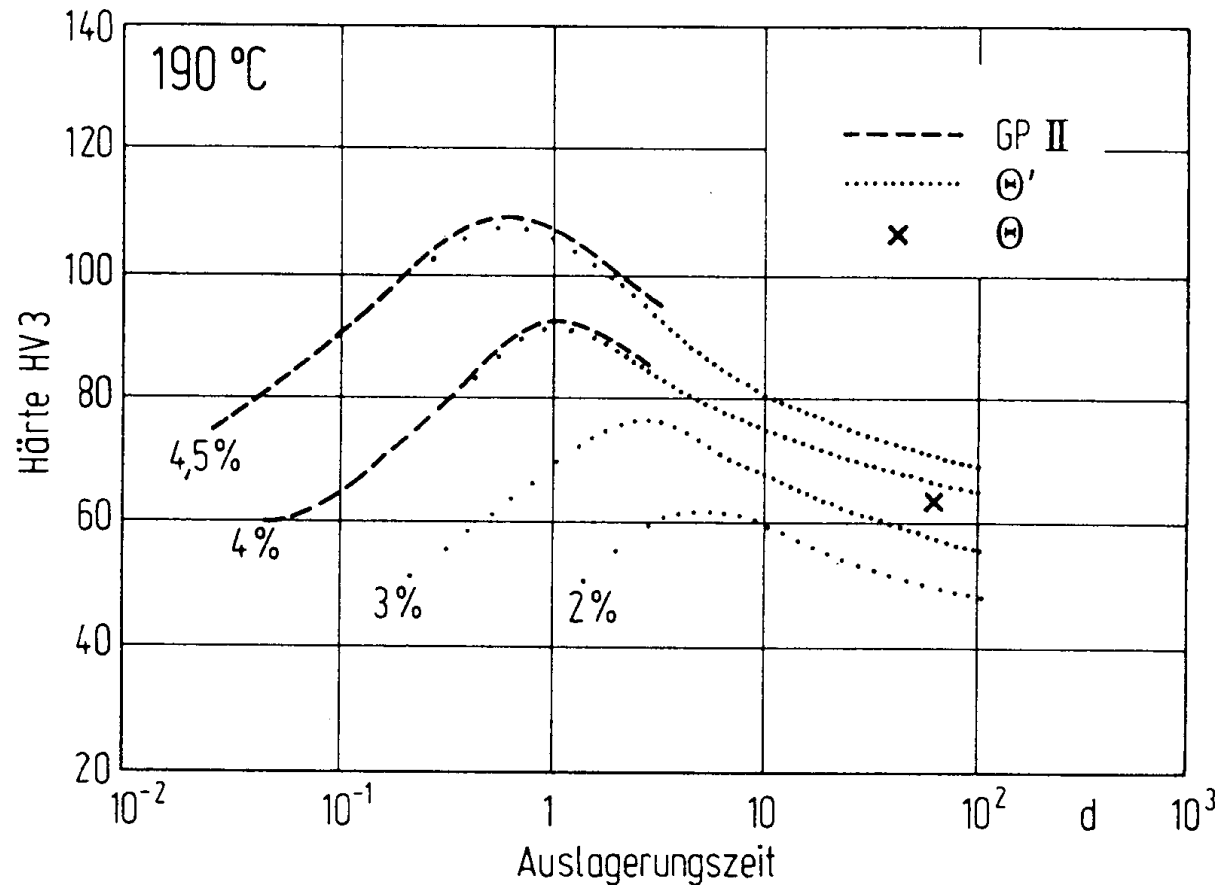
**Kurve 3:** Bei der Ausscheidung erfolgt eine Abnahme der gelösten Legierungselementkonzentration in der Matrix. Dies führt zu einem Verlust an Mischkristallhärtung.



**Gesamtverlauf 4:** Nach einem anfänglichen Anstieg der Festigkeit wird ein Maximum erreicht, welchem ein Abfall auf einen Wert unterhalb des Startwertes folgt

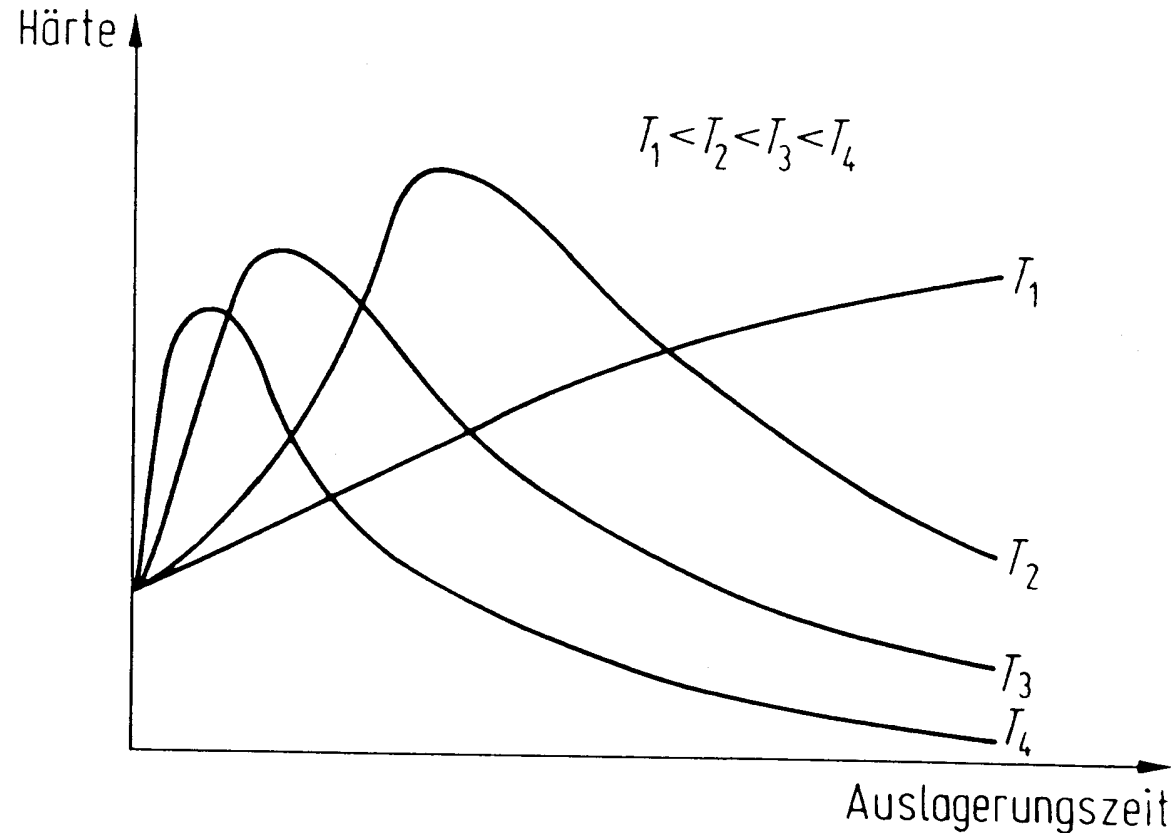
Grobe Dispersionen sind schlechte Dispersionen!

# Einfluss der Legierungselementkonzentration



Mit zunehmender Konzentration nimmt die Übersättigung im abgeschreckten Zustand zu. Damit steigt die Triebkraft der Ausscheidung. Die Ausscheidungsvorgänge laufen schneller ab und führen zu größeren Volumenbruchteilen (höhere Festigkeit).

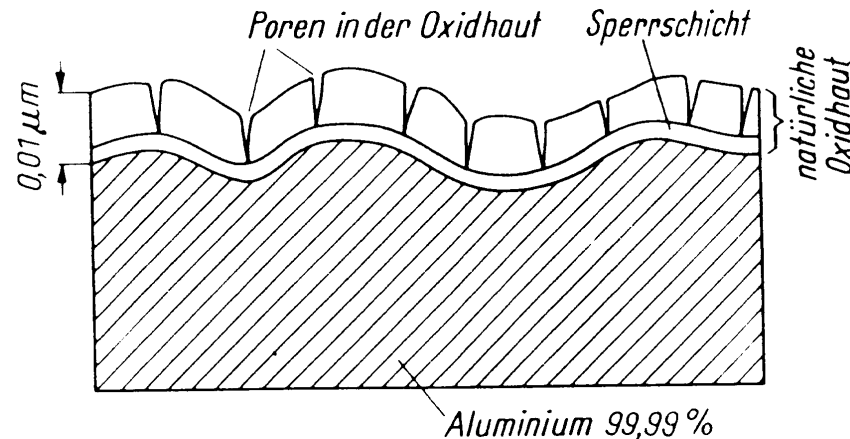
## Einfluss der Auslagerungstemperatur



Mit zunehmender Temperatur werden die Umwandlungsvorgänge schneller, führen aber zu niedrigeren Maxima, da teil- und inkohärente Ausscheidungsformen favorisiert werden.

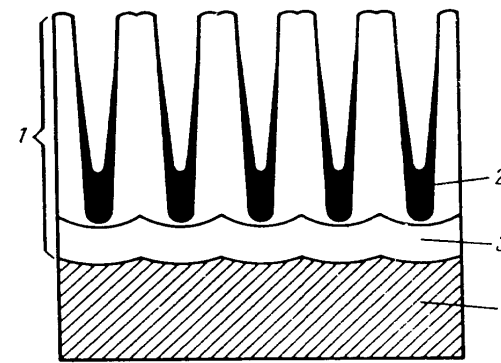
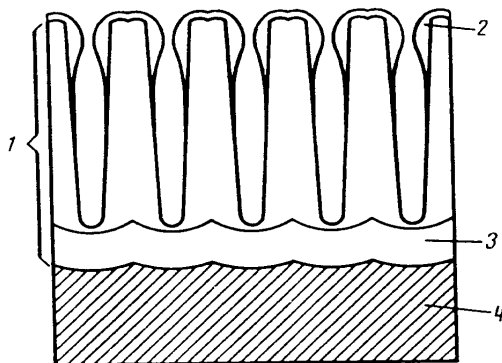


# Bildung einer Oxidschicht



- Aluminium bildet unter normalen Umgebungsbedingungen eine sehr dünne und transparente Oxidschicht, die einen weitgehenden Korrosionsschutz durch Verhinderung des Angriffs des Metalls durch korrosive Medien bewirkt.

- Durch anodische Oxidation (z.B. in Schwefelsäurelösung) kann eine Oxidschicht auf der Aluminiumoberfläche erzeugt werden (1), die gegenüber der natürlichen Oxidschicht um das Tausendfache dicker ist. Auf dem Grundmetall (4) wächst eine dichte Schicht (3) auf, auf der wiederum ein sehr poröses Oxid vorliegt.





## Bildung einer Oxidschicht

- Die Oxidschicht stellt einen guten Schutz z.B. gegenüber atmosphärische Korrosion dar (Hochhausfassaden) und kann wegen ihrer hohen Porosität gut eingefärbt werden.
- Neben einer Einfärbung mit Farbe (linkes Bild: (2) kennzeichnet die Farbschicht) hat sich die elektrolytische Färbung in Metallsalzbädern durchgesetzt (rechtes Bild).
- Durch eine Abscheidung von Metallionen am Grund der Oxidschichtporen entsteht eine haltbare, lichtechte Färbung.

