

## Aushärtung einer Aluminiumlegierung (AluHart)

### 1 Versuchsziel

Kennenlernen der praktischen Schritte der Ausscheidungshärtung am Beispiel einer Aluminiumlegierung.

### 2 Versuchsgrundlagen

Die technische Anwendung von Aluminiumlegierungen als Konstruktionswerkstoff in der Elektrotechnik und im Maschinenbau erfordert neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit eine hohe mechanische Festigkeit (bei großer Dehnung und guter Zähigkeit) bzw. eine große Härte.

Durch gezielte Ausnutzung werkstoffwissenschaftlicher Erkenntnisse können die Festigkeitswerte bei bestimmten Aluminiumlegierungen gesteigert werden. Dabei werden die höheren Festigkeitswerte nicht allein durch den Legierungsprozeß erreicht, sondern insbesondere durch den Prozeß der Ausscheidungs-Aushärtung.

In der Übersicht über technisch wichtige Aluminiumlegierungen in Bild 1 sind die aushärtbaren besonders gekennzeichnet.

#### 2.1 Mechanismen der Festigkeitssteigerung

Die Festigkeit metallischer Werkstoffe hängt einerseits von den Bindungsverhältnissen (Bindungsarten) im Kristallgitter und andererseits von der Dichte und der Beweglichkeit der Fehlorderungen, besonders der Stufenversetzungen, ab. Alle Methoden der Festigkeitssteigerung beruhen deshalb vorwiegend auf einer Blockierung der Versetzungen im Kristallgitter. Die damit verbundene Erhöhung der inneren Energie im Kristallgitter muß bei einer Verformung zusätzlich überwunden werden, was mit einer höheren Festigkeit identisch ist. Folgende festigkeitssteigernde Maßnahmen sind bekannt:

- a) Festigkeitserhöhung durch **Kaltverformung** beruht auf der Steigerung der Versetzungsdichte im Werkstoff bei dessen plastischer Verformung. Diese höhere Versetzungsdichte ist gleichbedeutend mit einer größeren inneren Energie des Kristallgitters, die bei der weiteren Verformung zusätzlich überwunden werden muß (Kaltverfestigung). Die zum Wandern einer einzelnen Stufenversetzung erforderliche Schubspannung (die sog. Peierls-Spannung) beträgt bei Metallen etwa  $5 \cdot 10^4 Pa$ .
- b) Durch den **Einbau von Fremdatomen** in das Kristallgitter (Legierung) wird dieses verspannt, seine innere Energie erhöht. Bei Substitutionsmischkristallen erfolgt der Einbau auf regulären Gitterplätzen, bei Einlagerungsmischkristallen auf Zwischengitterplätzen. Zur Bewegung der Versetzungen bedarf es daher nun eines höheren Kraftaufwandes (Mischkristallverfestigung). Bei Einlagerungsmischkristallen zeigen die Fremdatome die Tendenz, sich in

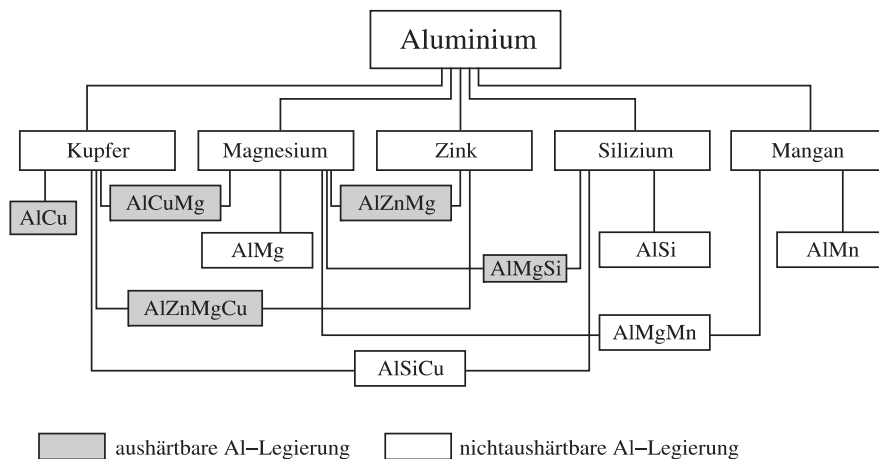


Bild 1: Aushärtbare und nichtaushärtbare Aluminiumbasislegierungen

sogenannten „Wolken“ um die Versetzungen herum anzulagern und so deren Bewegung zusätzlich zu behindern.

- c) Bei **Gefügekorn-Verfeinerung** steigt relativ der Anteil an Großwinkel-Korngrenzen pro Raumeinheit. Diese Korngrenzen sind Gitterbereiche mit stark gestörtem Aufbau. Sie wirken als Hindernisse für die Versetzungsbewegung, was einer Festigkeitssteigerung gleichkommt.
- d) Die **Umwandlungshärtung** wird bei der Veredlung von Stählen angewendet als diffusionslose Umwandlung des kfz  $\gamma$ -Eisen in krz Martensit mit tetragonaler Verzerrung infolge eines Abschreckvorgangs. Durch diesen kurzzeitigen Prozeß kommt es zur Bildung von Martensit. Die Festigkeits- und Härtesteigerung tritt nicht nur wegen der Gitterverspannung durch die überschüssigen, zwangsweise gelösten C-Atome auf, sondern vor allem durch die besondere Struktur des Martensits mit einer großen Zahl von Korngrenzen, Zwillingsgrenzen und Versetzungen.
- e) Die **Ausscheidungshärtung** beruht auf der Ausscheidung sekundärer Phasen im Werkstoff, die sich in Abhängigkeit von der Temperatur bilden und deren Löslichkeit mit fallender Temperatur sinkt. Die Ausscheidungen sind in Größe, Form und Verteilung vielfältig. Dabei tritt erfahrungsgemäß eine Festigkeitssteigerung auf bei genügend großem Volumenanteil der Sekundärphase und ihrer Verteilung mit einem optimalen Teilchenabstand. Die mit dieser Sekundärphase reagierenden Stufenversetzungen werden in ihrer Bewegung gehemmt und bilden Quellen für neue Stufenversetzungen (Frank-Read-Mechanismus).

## 2.2 Ausscheidungshärtung von Aluminiumlegierungen

Die Ausscheidungshärtung tritt auf, wenn die Legierung folgende Voraussetzungen erfüllt:

1. Eine Zwei- oder Mehrstofflegierung mit beschränkter Mischkristallbildung muß vorliegen (siehe Bild 2).
2. Die Löslichkeit der Legierungskomponente im Grundgitter nimmt mit sinkender Temperatur ab (siehe Bild 2).
3. Der Mischkristall muß nach dem Abschrecken aus dem Bereich des homogenen  $\alpha$ -Mischkristalles bei Raumtemperatur zunächst - in übersättigter Form - erhalten bleiben (siehe Bild 2).

4. Die Ausscheidungen der übersättigten Komponenten müssen durch die Wärmebehandlung in einer für die gewünschte Festigkeitserhöhung geeigneten Art, Form und Verteilung (Teilchenabstand!) im Grundgitter, der Matrix, erzeugbar sein.

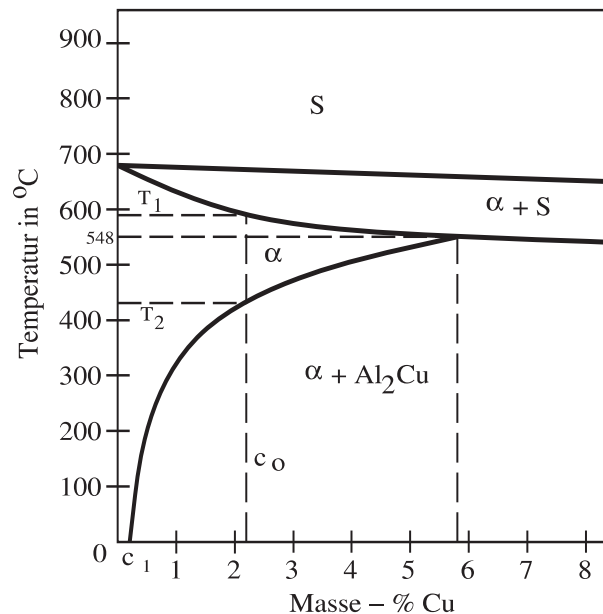


Bild 2: Aluminiumreiche Seite des Zustandsdiagramms AlCu

## 2.3 Verlauf der Ausscheidungshärtung an einer AlCu-Legierung

### Homogenisierungsglühen (Lösungsglühen)

Die Legierung mit der Cu-Konzentration  $c_0$  (siehe Bild 2) wird so lange (z. B. 30 min) im Temperaturbereich  $T_2 < T < T_1$  lösungsgeglüht, bis sich homogene  $\alpha$ -Mischkristalle bilden. Bei diesen Substitutionsmischkristallen nehmen die Cu-Atome regellos Gitterplätze in der Al-Matrix ein.

### Abschrecken

Durch Eintauchen der Legierung in Wasser erfolgt das Abschrecken. Dadurch wird die Einstellung des Phasengleichgewichtes verhindert, die Cu-Atome werden auf ihren Gitterplätzen „eingefroren“. Es liegt ein übersättigter Mischkristall vor, der einen instabilen Legierungszustand besitzt, weil das Al-Gitter bei Raumtemperatur im Gleichgewicht nur eine Cu-Konzentration  $c_1$  lösen kann.

Der Mischkristall ist nicht nur an Cu-Atomen, sondern auch an Leerstellen übersättigt und strebt einem Zustand größerer Stabilität (gleichbedeutend mit niedrigerer innerer Energie) zu. Das erfolgt in der Auslagerung durch Diffusion der Cu-Atome und durch die Spannungsfelder der Fehlordnung als Triebkraft entgegen dem Konzentrationsgefälle (Berg-auf-Diffusion oder negative Diffusion).

### Auslagerung

Den technologischen Ablauf einer Aushärtung zeigt Bild 3. Die übersättigt gelösten Cu-Atome scheiden sich je nach Auslagerungstemperatur aus und bilden in der Al-Matrix die in Bild 4 dargestellten Ausscheidungen.

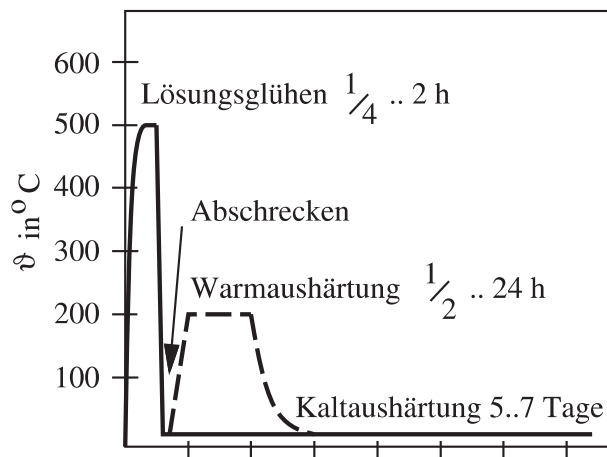
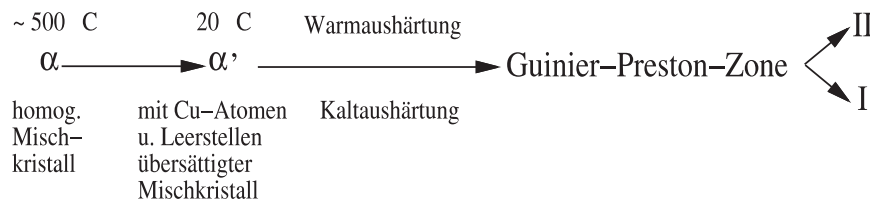


Bild 3: Aushärtung von Al-Cu-Mg-Legierungen

- Bei der **Kaltaushärtung (Auslagerung bei Raumtemperatur oder mäßig erhöhter Temperatur  $\sim 80^\circ\text{C}$ )** bilden sich flächenhafte Anreicherungen von Cu-Atome parallel zu den (100)- Würfelflächen des kfz-Aluminium in der Dicke einer Atomschicht und mit Durchmessern von etwa 10 nm (GP-I-Zone, Bild 4, bezeichnet nach ihren Entdeckern Guinier und Preston). Die Radien der Cu-Atome sind um 11% größer als die des Al. Die eingelagerten Kupferebenen im Mischkristall führen zur Veränderung der Netzebenenabstände in diesem Bereich (s. Bild 4a). Diese Umgruppierung der im Mischkristall statistisch verteilten Fremdatome wird auch als „einphasige Entmischung“ bezeichnet. In der Umgebung dieser kohärenten Entmischungszonen kommt es zu Verspannungen des Matrixgitters, die von einer Erhöhung der inneren Energie und von einer Festigkeitssteigerung begleitet sind, ohne daß Dehnung und Verformbarkeit nennenswert abnehmen.
- Bei der **Warmaushärtung (Auslagerung bei Temperaturen von 80 bis  $200^\circ\text{C}$ )** bilden sich Anhäufungen der Cu-Atome in mehreren Atomlagen (GP-II-Zone, Bild 4b). Diese plattenförmigen Ausscheidungen parallel zu den (100)-Würfelflächen des kfz-Aluminiums weisen einen Ordnungszustand der Atome auf und sind bis zu 10 nm dick und bis zu 150 nm groß. Sie entstehen durch Umordnen der Atome in den GP-I-Zonen. Aufgrund der wesentlich größeren Übergangsfläche der kohärenten Ausscheidung zum Matrixgitter des Mischkristalls ist auch ein größerer Härteanstieg als bei GP-I-Zonen festzustellen.
- Bei Auslagerungstemperaturen zwischen  $\vartheta = 150$  bis  $300^\circ\text{C}$  tritt eine  $\Theta'$ -Phase und oberhalb  $300^\circ\text{C}$  eine  $\Theta$ -Phase (=  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) auf, die hier nicht berücksichtigt werden, da sie keine Härtesteigerung bewirken, im Gegenteil.

Die Form der Zonen hängt vom Gitterparameterunterschied zur Matrix ab. Ist dieser gering, wie bei AlZn- und AlAg-Legierungen, bilden sich kugelartige Zonen. Wird der Gitterparameterunterschied

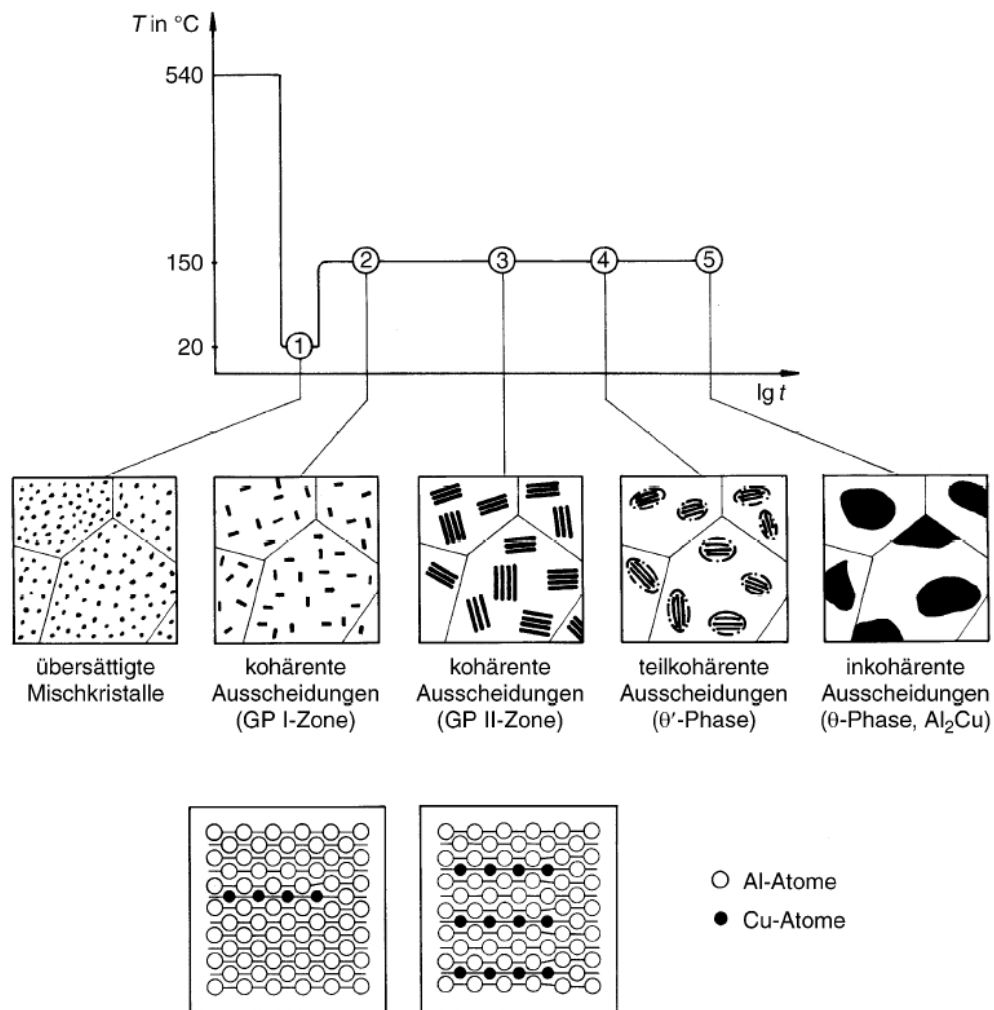


Bild 4: Mögliche Stadien der Warmaushärtung einer AlCu-Legierung (schematisch)

größer, tendieren die Zonen zwecks Verringerung der Kohärenzspannungen zur Platten- (AlCu-Legierungen) oder Stabform (AlMgSi-Legierungen).

Die aushärtbare Wirkung der GP-Zonen beruht darauf, daß sich diese als kohärente Teilchen in sehr feiner Verteilung in der Matrix bilden können, während sich  $\Theta$ -Teilchen ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) als nicht kohärente Phase in größerer Verteilung und bevorzugt an den Korngrenzen bilden.

### 3 Vorbereitungsaufgaben

1. Erklären Sie den Unterschied zwischen Mischkristall und Kristallgemisch, welche Voraussetzungen müssen für eine Mischkristallbildung erfüllt sein?
2. Was bedeutet „Löslichkeit im festen Zustand“ bzw. „beschränkte Löslichkeit im festen Zustand“ ?
3. Wonach richtet sich die Wahl der Homogenisierungstemperatur?

4. Welche Ausscheidungszustände sind beim Aushärten anzustreben, welche nicht? Was heißt kohärente Ausscheidung?
5. Beschreiben Sie das Prinzip der Härtemessung! Worin unterscheiden sich die Verfahren nach Brinell und Vickers?
6. Welche Verfahren zur Messung spezifischen elektrischer Widerstände gibt es? Welches dieser Verfahren arbeitet berührungsfrei?

## 4 Praktikumsaufgaben

1. Die Versuchsproben werden 30 min. bei  $\approx 500^\circ\text{C}$  zur Homogenisierung (siehe Kap. 2.3) geglüht und in Wasser abgeschreckt.
2. Von einer Probe wird sofort die Vickershärte und der spez. elektrische Widerstand gemessen. Sie wird bei Raumtemperatur kaltausgelagert.
3. Bis auf die kalt ausgelagerte werden alle Proben im Laborofen bei  $\approx 180^\circ\text{C}$  warm ausgelagert.
4. Nach 10, 30, 50, 70, 90 und 110 min wird jeweils eine Probe dem Ofen entnommen und an ihr nach langsamen Abkühlen die Vickershärte und der spezifische elektrische Widerstand gemessen.
5. Von der kalt ausgelagerten Probe wird in den gleichen Zeitabständen die Vickershärte und der spezifische elektrische Widerstand gemessen.
6. Von einer etwa 1 Woche kalt ausgelagerten Probe sind die Vickershärte und der spezifische elektrische Widerstand zu messen.
7. Stellen Sie für die Kaltaushärtung und für die Warmaushärtung den Verlauf der Härte und des spezifischen elektrischen Widerstands über der Zeit graphisch dar und diskutieren Sie die Ergebnisse. Schätzen Sie hierbei die Fehlergrößen der Meßverfahren ab!

**Eine detaillierte Aufgabenstellung liegt am Versuchsplatz im  
Meitnerbau, G.-Kirchhoff-Str. 5, Raum 3.2.309 aus!**

## Literaturliste

- [1] OETTEL, H. ; SCHUMANN, H.: *Metallographie*. 15. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH, 2011
- [2] SCHATT, W. ; POMPE, W. ; WORCH, H.: *Werkstoffwissenschaft*. 10. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2011. – 578 S. – ISBN 978-3527323234
- [3] GUILLERY, P. ; HEZEL, R. ; REPPICH, B.: *Werkstoffkunde für die Elektrotechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn, 1992
- [4] MACHERAUCH, E. ; ZUCH, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. 11. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 602 S. – ISBN 978-3-8348-0343-6
- [5] KNEDLIK, Ch.: *Werkstoffe der Elektrotechnik*,. 1. Lehrbrief, TU Ilmenau, 1996
- [6] HAHN, F.: *Werkstofftechnik - Praktikum: Werkstoffe prüfen und verstehen*. Hanser Fachbuchverlag, 2015
- [7] Aluminium und Aluminiumlegierungen – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe. In: *Deutsche Norm DIN EN 12258-1* (2012)
- [8] Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1 bis 4. In: *Deutsche Norm DIN EN ISO 6507* (2006)