

Praktikum PWF

Semester:

Professor: Dr.-Ing. H.G. Heinrich

Betreuer: . . Dr.-Ing. H.G. Heinrich

Versuchsbezeichnung:

Aushärten von Aluminium

Name_1:;.....

Name_2:;.....

Name_3:;.....

Name_4:;.....

Name_5:;.....

Name_6:;.....

Name_7:;.....

Name_8:;.....

Name_9:;.....

Name_10:;.....

Gruppe:

Tag des Praktikums:

Abgabetermin :

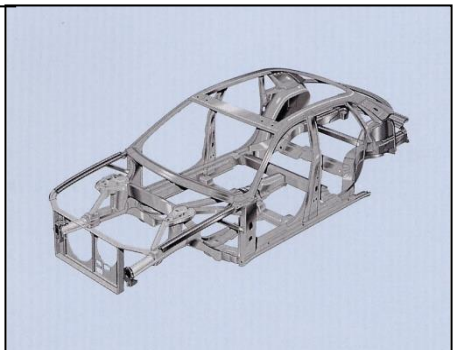
(spätestens 14 Tage nach Durchführung des Praktikums bzw. letzter Abgabetermin am Semesterende)

Testat:

Datum:

© He 10/14

Bitte die im Versuchsbericht angegebenen Punkte bearbeiten und zusammen mit diesem Deckblatt als Auswertung abgeben.



Ergänzende Details zum Aushärten von Al-Legierungen und generell zum Werkstoff Al s. z.B. auch <http://aluminium.matter.org.uk/>

1. Allgemeines

Aluminiumwerkstoffe werden in weiten Bereichen der Technik, wie in der Automobil- oder Luftfahrtindustrie und im Bauwesen, angewendet. Aber auch im Bereich Sport und Freizeit sowie im Haushalt sind sie zu finden. Ihr großer Vorteil ist das geringe Gewicht, das auf der Dichte des Al von nur $2,7 \text{ g/cm}^3$ beruht sowie die gute Leitfähigkeit, die bezogen auf das Gewicht besser ist als die von Cu.

Für die meisten Anwendungen ist reines Al jedoch ungeeignet, da es zu weich ist und eine zu geringe Festigkeit aufweist. Daher sind fast alle technischen Al-Konstruktionswerkstoffe ausgehärtet.

Beispiele für aushärtbare Al-Legierungen sind:

Knetlegierungen	Gußlegierungen
Al-Cu (3,5 – 5,5 % Cu)	Al-Cu (4 – 5 % Cu)
Al-Mg-Si (0,3 – 1,5 % Mg; 0,2 – 1,6 % Si)	Al-Si-Cu (4– 10 % Si) (1 – 4 % Cu)
Al-Zn-Mg (6 – 7 % Zn + Mg)	Al-Si-Mg (5– 10 % Si) (0,3 – 0,5% Mg)
	Al-Zn-Mg (4 – 7 % Zn 0,3 – 0,5% Mg)

Eine Abschreckhärtung wie bei Stahl ist bei Al-Legierungen nicht möglich, da keine Polymorphie vorliegt. Die Zustandsdiagramme Al - Cu (s. Abb.1), Al - Si, Al - Mg zeigen jedoch auf der Al-Seite eine Segregatlinie, so dass eine Aushärtung (die Ihnen unter dem Begriff „Teilchenhärtung“ aus der WT-Vorlesung bekannt ist) bei den entsprechenden Legierungen durchgeführt werden kann.

Al und viele seiner Legierungen können teilweise noch oberflächenveredelt werden → s. Praktikum „Eloxieren“.

Der im Praktikum verwendete Werkstoff ist eine Al-Legierung vom Typ Al-Cu (**AlCuMg1**, Werkstoff-Nr. 3.1355, F39-40 , auch als „Duraluminium“ bezeichnet).

Dieser Werkstoff ist eine bevorzugte Legierung für Bleche und Platten im Ingenieur- und Maschinenbau. Er ist geeignet für hoch beanspruchte Teile, die spanend bearbeitet werden sollen.

Verarbeitungseigenschaften:

- Kaltumformung kaum möglich wegen hoher Festigkeit
- Schweißbarkeit nur unter besonderen Bedingungen
- Schlecht eloxierbar (anodisierbar)
- Geringe Beständigkeit gegen Angriffsmedien durch zulegiertes Kupfer
- Hart- und Weichlöten nicht empfohlen
- Zum Hartverchromen und chemischen Vernickeln geeignet.

2. Ziele des Praktikums:

Am Beispiel dieses Werkstoffes sollen die optimalen Verfahrensparameter für eine Aushärtungsbehandlung (t, T) ermittelt werden. Dabei kommt sowohl die Spanlose Fertigungstechnik in Form des „Stoffeigenschaftenänderns“ als auch die Werkstoffprüfung in Form der Härteprüfung zum Einsatz.

Die Versuchsauswertung soll Folgendes beinhalten:

- Die Berechnung der maximal möglichen Anzahl der zur Härtung ausscheidbaren Teilchen in 1 cm³ der Legierung unter den vereinfachenden Annahmen, dass Sie aus Al₂Cu bestehen, würfelförmig sind und eine Kantenlänge von 0,2 µm haben.
Dazu nötige Infos: ρ_{Al} = 2,77 g/cm³, ρ_{Cu} = 8,92 g/cm³, Cu-Gehalt: 3,7 % (Hebelgesetz → ZSD, s.o.)
- mit Hilfe einer Arrhenius-Darstellung aus den gemessenen Werten für T und t beim (zweiten) Härtemaximum die mittlere Aktivierungsenergie für den Ausscheidungsvorgang und die Werkstoffkonstante t₀ zu ermitteln. Damit kann die Arrheniusgleichung vollständig bestimmt werden, so dass zu jeder Auslagerungstemperatur die Zeit bis zur maximalen Härte (Festigkeit) und umgekehrt berechnet werden kann.
- einen Vergleich der gemessen mit den mit der ermittelten Gleichung errechneten Werten

3. Theoretische Grundlagen

Das Wesen der Aushärtung ist eine Phasenumwandlung im festen Zustand durch Diffusion. Sie wird mit dem Ziel durchgeführt, die Festigkeit eines Werkstoffes zu erhöhen. Alle Festigkeitsmechanismen beruhen auf einer Blockade der Versetzungsbewegungen. Diese wird beim Aushärten erreicht durch die Ausscheidung einer zweiten Phase (Teilchenhärtung). Dies geschieht über eine Entmischung mit anschließender Keimbildung und Keimwachstum, s. Vorlesung B-WTK. Damit der Effekt möglichst groß ist, muss eine optimale Form, Größe und Verteilung der Teilchen vorliegen, was durch die Wahl der Legierung sowie durch die Verfahrensparameter T und t beeinflusst werden kann.

Voraussetzung dafür, dass eine Legierung aushärtbar ist, ist das Vorliegen eines Mischkristalls, d.h. es muss im Zustandsdiagramm (ZSD) ein Bereich existieren, in dem die eine Komponente (hier Cu) vollständig in der anderen Komponente (hier Al) löslich ist. Weiterhin muss die Löslichkeit mit fallender Temperatur sinken, d.h. es muss eine Segregatlinie vorhanden sein. Diese Voraussetzungen sind im System Al-Cu gegeben, s. Abb. 1 und 2.

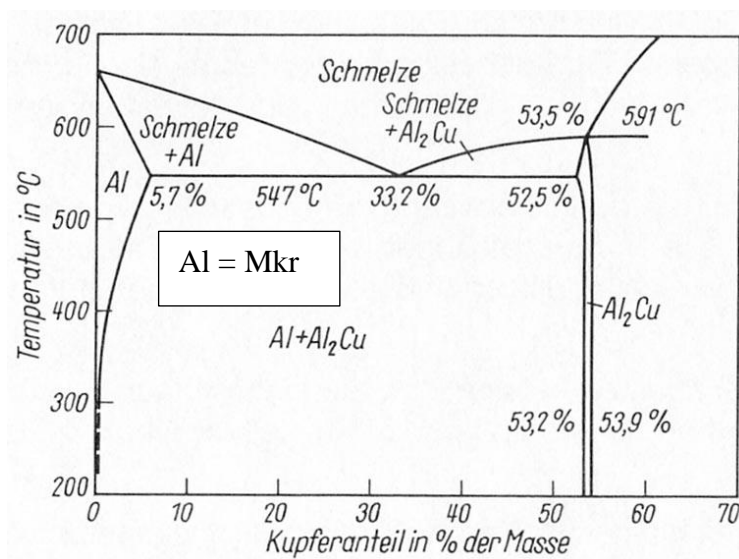


Abb. 1:
Zustandsdiagramm (ZSD) Al-Cu
(Teilbereich Al-Al₂Cu)

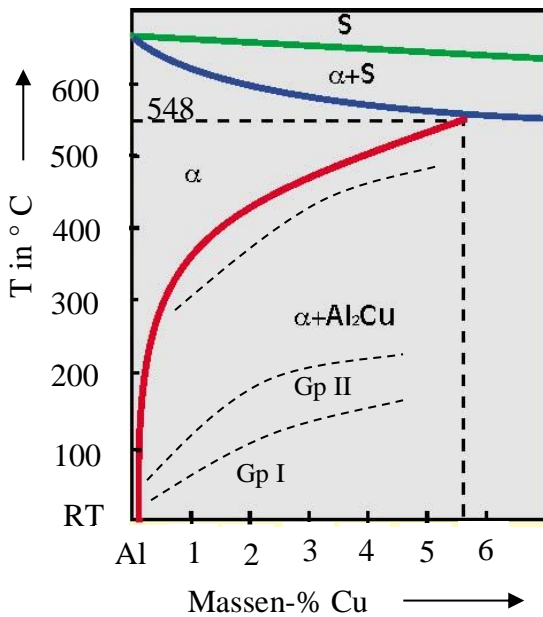


Abb. 2:

Ausschnitt (Al-reiche Seite) aus Abb. 1 mit **Segregat**-, **Solidus**- und **Liquiduslinie** sowie Ausscheidungs-typen (metastabil und stabil)

Der Wärmebehandlungszyklus bei der Aushärtung von Al-Legierungen ist in Abb. 3 dargestellt. Er besteht aus 3 Phasen. Die erforderlichen Temperaturen können aus dem zur Legierung passenden Zustandsschaubild ermittelt werden durch:

1. Glühen bei hoher Temperatur (nach Zustandsschaubild, s. Abb. 1) wird möglichst viel von den zur Aushärtung führenden Legierungszusätzen im Aluminium-Mischkristall gelöst (**Lösungsglühen**);
2. schnelles Abkühlen wird der an diesen Legierungszusätzen angereicherte Mischkristall zunächst in den übersättigten Zustand übergeführt (**Abschrecken**);
3. **Auslagern** (bei Raumtemperatur oder erhöhter Temperatur) kommt es zu Ausscheidungen aus dem übersättigten Mischkristall, die eine Steigerung der Festigkeit und Härte bewirken.

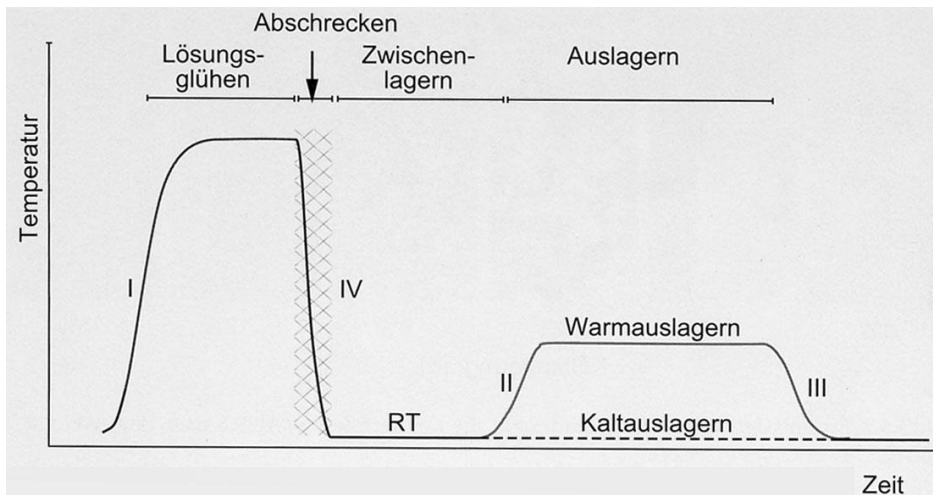


Abb. 3:

Wärmebehandlungszyklus bei der Aushärtung von Al-Legierungen

- I, II: unkritische Aufheizphasen
- III: unkritische Abkühlgeschwindigkeit
- IV: kritische Abkühlgeschwindigkeit

Die Gefügeänderungen, die mit der Bildung einer stabilen Teilchensorte verbunden sind, laufen grundsätzlich in drei Stufen ab:

Unmittelbar nach Unterschreiten der Löslichkeitskurve beginnt im nunmehr übersättigten Mischkristall die Bildung der Keime. Die Dauer dieser Inkubationsperiode hängt von der Unterkühlung ab und ist in einem mittleren Temperaturbereich minimal (→ ZTU-Schaubild!). An die Bildung der Keime schließt sich das diffusionsgesteuerte Wachstum an.

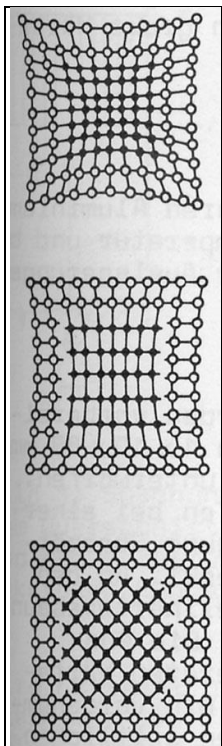
Nach der Ausscheidung der Teilchen ist ein Wachstum dadurch möglich, dass sich kleinere Teilchen mit größeren vereinigen, da dadurch die gesamte Grenzflächenenergie in der Probe erniedrigt wird (Ostwald-Reifung).

Dies ist eine Überalterung; die Ausscheidungen wachsen dabei weiter und sind ab einer gewissen Größe als Hindernis für die Versetzungen nicht mehr effektiv. Die mechanischen Eigenschaften verschlechtern sich wieder, s. Abb. 5.

In technischen Legierungen wird dieser Ablauf modifiziert durch die Bildung mehrerer Teilchensorten und der nach gewisser Zeit erfolgenden Auflösung metastabiler Phasen, s. Versuchsergebnis..

3a. Details:

Bei höheren Auslagerungstemperaturen (etwa 100 bis 200 °C) tritt zunächst eine Reihe metastabiler Phasen (Ausscheidungstypen) auf, die von Aushärtungseffekten (Blockade der Versetzungen) begleitet sind. Diese metastabilen Phasen besitzen eine eigene, vom Gitterbau des Mischkristalls abweichende Struktur, s. Abb. 4. Bei längeren Auslagerungszeiten gehen diese metastabilen Phasen langsam in die stabilen Phasen über.



(a) Bei der Beurteilung der Auswirkung von Ausscheidungen auf die mechanischen Eigenschaften einer aushärtbaren Legierung ist der Begriff der „Kohärenz“ von Bedeutung. Man unterscheidet kohärente, teilkohärente und inkohärente Ausscheidungen. Bei einer kohärenten Ausscheidung korrespondiert das Kristallgitter mit dem der Matrix (a). Die auftretenden Unterschiede in den Atomabständen der beiden Gitter führen zu sog. Kohärenzspannungen.

(b) Besteht eine teilweise Kohärenz zwischen den Gittern der Ausscheidung und der Legierungsmatrix, so spricht man von teilkohärenten Ausscheidungen (b).

(c) Inkohärente Ausscheidungen besitzen stets eine von der Legierungsmatrix deutlich verschiedene Gitterstruktur (c).

In Al-Cu-Legierungen sind die GP I- und GP II- Zonen als kohärent, die Θ' -Phase als teilkohärent und die Θ -Phase als inkohärent anzusprechen.

(c) Bei der Auslagerung treten, GP I- GP II- Zonen, Θ -, und Θ' -Phase in dieser Reihenfolge bei einer Erhöhung der Temperatur/Zeit auf.

Abb. 4: Kohärente (a), teilkohärente (b) und inkohärente (c) Ausscheidungen (schematische, ebene Darstellung)

Bei den kohärenten GP I- und GP II-Zonen, die sehr fein verteilt vorliegen, behindern vor allem die sich um die Zonen ausbildenden Kohärenzspannungen die Bewegung der Versetzungen und beeinflussen die mechanischen Werkstoffwiderstandsgrößen stark. Dabei sind GP I-Zonen wirksamer als GP II-Zonen.

Bei der mit größerer Verteilung plättchenförmig auftretenden Θ' -Phase zeigen die Deckflächen kohärente und die Seitenflächen inkohärente Übergänge zur α -Mischkristallmatrix, und es treten keine Kohärenzspannungen mehr auf.

Mit fortschreitender Auslagerungszeit verschwinden allmählich die kohärenten zugunsten der teilkohärenten Ausscheidungen, d. h. die Größe und der mittlere Abstand zwischen den jeweiligen Ausscheidungstypen wachsen an. Dadurch ändert sich auch der Mechanismus mit dem die Versetzungen diese Hindernisse überwinden. Dies kann dadurch geschehen, dass sie entweder die Ausscheidungen schneiden oder zwischen den Ausscheidungen ausbauchen. Während der Schneidwiderstand mit der Auslagerungsdauer anwächst, fällt der Ausbauchwiderstand mit dieser ab. Hat sich also nach hinreichend langer Auslagerung ein kohärenzspannungsarmer Ausscheidungszustand gebildet, bei dem Ausbauch- und Schneidprozesse gleich wahrscheinlich sind, so führt jede weitere Verlängerung der Auslagerung zu

einer Abnahme des Werkstoffwiderstandes gegen plastische Verformung. Man spricht dann von „Überalterung“.

Noch höhere Temperaturen ($T < T_{\text{Segr.}}$) sowie längere Auslagerungszeiten führen zur Bildung der inkohärenten Gleichgewichtsphasen (z. B. je nach Legierung Al_2Cu ; Mg_2Si ; MgZn_2), wodurch die Aushärtungseffekte weiter zurückgehen. Zwischen Kalt-, Warmaushärtung und Überalterung gibt es keine scharfen Übergänge. Mit höher werdender Auslagerungstemperatur und Auslagerungszeit erreicht der übersättigte Mischkristall über die Bildung von kohärenten, teilkohärenten und inkohärenten Gleichgewichtsphasen den stabilen Zustand. **(Details Ende)**

Im vorliegenden Versuch wird nicht der zeitliche Ausscheidungsverlauf direkt, sondern es werden Änderungen physikalischer Eigenschaften während der Ausscheidung verfolgt welche als Indikator für den Ausscheidungsgrad dienen sollen.

Die Fließspannung bzw. die Härte des Materials wird bestimmt durch Art, Form und Größe der Ausscheidungsteilchen sowie der verbleibenden Cu-Konzentration im Mischkristall. Zunächst dominiert die härtende Wirkung der Teilchen, die die Versetzungsbewegung und damit die Verformbarkeit stark behindern. Kleine Teilchen müssen von den Versetzungen bei der Verformung geschnitten werden, große Teilchen werden von den Versetzungen umgangen. Für einen gleichbleibenden Volumenbruchteil einer Teilchensorte durchläuft die Hinderniswirkung der Teilchen in Abhängigkeit von ihrer Größe ein Maximum und fällt bei großen Teilchen gegen Null ab. Dort bestimmt der Cu-Gehalt des Mischkristalls die Härte, die einfache Mischkristallhärtung liegt vor ($R_{m2} - R_{m1}$).

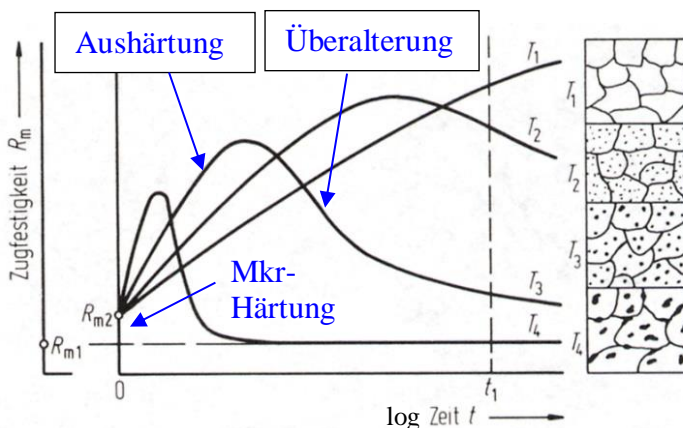


Abb.5:

$R_m = (t, T) \rightarrow T_1 < T_2 < T_3 < T_4$
rechts: schematische Darstellung des Gefüges

Nicht dargestellt: Inkubationszeiten

In Abbildung 5 ist schematisch der gemessene Härteverlauf nach Auslagerung als $f(t, T)$ angegeben. Im Versuch zeigt sich vor dem Erreichen des Endmaximums ein zweites kleineres Maximum. Dieses wird durch eine kurzfristig auftretende, instabile Phase, die sich schnell wieder auflöst, hervorgerufen. Für den technischen Gebrauch des Materials ist zumeist der Zustand im Härtemaximum erwünscht. Zu beachten ist hierbei, dass das Material im Einsatz mit der Zeit seine Eigenschaften beibehalten und nicht altern soll. Abb. 6 zeigt den Einfluss der Gitterkohärenz und der Teilchengröße auf den Teilchenabstand.

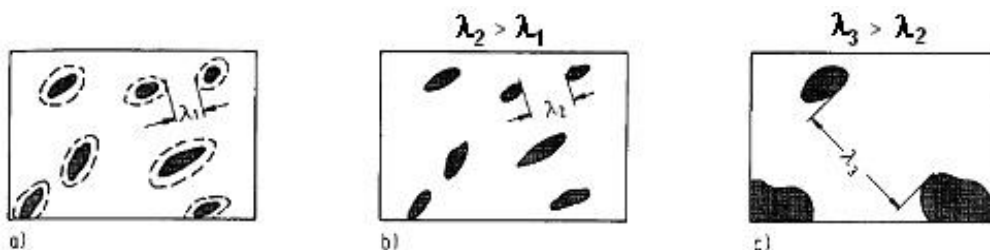


Abb.: 6

Teilchengröße und Teilchenabstand (λ = wirksamer Teilchenabstand)

Den kleinsten Teilchenabstand und damit die größte Verfestigungswirkung findet man erstaunlicher-

weise bei den „kohärenten“ Teilchen, da die verspannten Gitterbereiche um sie herum den scheinbaren Teilchenabstand verringern (Kohärenzspannung). Abb. 7 zeigt die für die Al-Aushärtung optimalen „Zonen“ (= Vorstufen zu einer Ausscheidung)

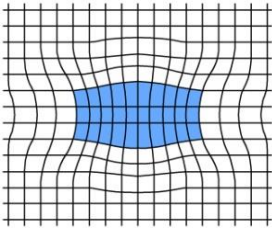


Abb.: 7:

Schematische Darstellung der „Guinier-Preston-Zonen“ (GP II)

Der Legierungstyp Al-Cu erhält seine maximale Härte bei Raumtemperatur-Auslagerung (sog. kalt-aushärtende Legierung). Weitere Härtesteigerung könnte durch eine Kaltumformung nach dem Abschrecken erreicht werden (thermomechanische Behandlung). Wird der Werkstoff im extremen Fall bei z. B. 200 °C eingesetzt, so lösen sich die stark härtenden kleinen Ausscheidungen wieder auf.

4. Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung besteht aus

- einem regelbaren Ofen mit integriertem Thermoelement und
- einem Abschreckbad
- einer Stoppuhr und
- einem Kleinlasthärteprüfer

5. Versuchsdurchführung

Im Praktikum kommt die Legierung AlCu(4)Mg1 zum Einsatz, die zu den technisch wichtigen Knetlegierungen mit hoher Festigkeit zählt. Dieser Legierungstyp erhält seine höchste Festigkeit durch Kaltauslagerung. Aus Zeitgründen und um den Auslagerungsmechanismus zu verdeutlichen, wird hier eine Warmauslagerung durchgeführt.

Die Wärmebehandlungen und Messungen werden nach folgendem Grundmuster durchgeführt:

1. Homogenisieren.
2. Abschrecken.
3. Auslagern
4. Messungen der Härte zu gegebenen Zeiten

5.1 Homogenisieren +Abschrecken

Die Blechproben (2 cm²) werden entsprechend dem ZSD homogenisiert und in einem Wasserbad bei Raumtemperatur abgeschreckt.

5.2 Auslagern

Das Aushärten der Proben erfolgt durch Auslagern in einem thermostatisierten Ofen bei verschiedenen Temperaturen zwischen 20 und 340 °C bei jeweils unterschiedlichen Zeiten.

Der Ofen wird zunächst auf 340°C eingestellt. Das erst Blech wird in den Ofen gelegt und gleichzeitig die Stoppuhr gestartet. Nach verschiedenen vom Versuchsleiter angegebenen Zeiten wird die Härte gemessen. Hierzu nimmt man das heiße Blech aus dem Ofen, schreckt es schnell in Wasser ab und trocknet es.

5.3 Messen

Härte:

Die Härtemessung erfolgt im lösungsgeglühten Zustand und jeweils nach dem Auslagern (zu vor Ort gegebenen verschiedenen Zeiten). Als Vergleich wird die Härte von reinem Aluminium (Al 99,99)

gemessen.

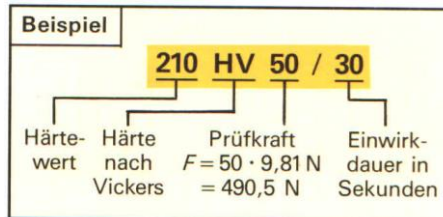
Die Härte der Blechproben wird nach Vickers bestimmt. Dazu wird eine Diamantpyramide von quadratischer Grundfläche unter einem Gewicht von 30 kg (HV 30) auf die Probe aufgesetzt und 30 Sekunden lang senkrecht in die Blechproben gedrückt. Aus dem Mittelwert der Längen der beiden Eindruckdiagonalen wird mit Hilfe der angegebenen Formel der Härtewert HV₂₀ berechnet. Jeder Materialzustand ist durch das Mittel aus drei Eindrücken zu charakterisieren.

6. Formeln

a) Bestimmung der Vickershärte:

$$HV = \frac{0,102 \cdot F \cdot 1,8544}{d^2}$$

Normbezeichnung:



b) Arrheniusgleichung zur Bestimmung der Aktivierungsenergie:

$$t_A = t_0 \cdot e^{+\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right)}$$

Mit

t_0 = Werkstoffkonstante [s]

T = Temperatur [K]

t_A = Zeit bis zum Härtemaximum [s]

Q = Aktivierungsenergie [kJ/mol]

R = allgemeine Gaskonstante [J/mol K]

7. Versuchsausarbeitung

Die Ausarbeitung soll u.a. enthalten:

- den Sinn und die Ziele des Versuchs
- den Versuchsaufbau
- die Versuchsdurchführung
- die Versuchsergebnisse, d.h.
- eine Tabelle $HV_{\max} = f(\text{Auslagerungstemperatur})$
- die Kurven $HV_{30} - \log t$ (Parameter Auslagerungstemperatur)
- die Versuchsauswertung, d.h.
- Berechnung der maximal möglichen Anzahl der zur Härtung ausscheidbaren Teilchen in 1 cm^3 der Legierung
- die Bestimmung der Werkstoffkonstanten t_0
- die Bestimmung der Aktivierungsenergie Q für die optimale Aushärtung → Diagramm $\ln t = f(1/T)$ mit allen Versuchswerten)
- die vollständige Arrheniusgleichung für die optimale Aushärtung unseres Werkstoffes
- Überprüfung der erhaltenen Arrheniusgleichung durch Vergleich mit den Messergebnissen
- die Diskussion der erhaltenen Ergebnisse!

Die Praktikumszeit reicht nicht aus, um bei verschiedenen Temperaturen den gesamten Kurvenverlauf, d.h. auch die Überalterung, zu messen. Es wird pro Praktikum nur 1 von 4 Temperaturen untersucht. Nach dem 4. Praktikum werden alle Ergebnisse der 4 Gruppen als Excel Tabelle für die Auswertung zur Verfügung gestellt.