

Universität  Siegen
Institut für Werkstofftechnik

WERKSTOFFTECHNIK-GRUNDPRAKTIKUM

Versuch G5:
Aushärtung einer Aluminiumlegierung

Inhalt

1. Grundlagen
2. Aufgabenstellung
3. Versuchsdurchführung
4. Versuchswerkstoff
5. Literatur
6. Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung

Name:

Vorname:

Matr. Nr.:

Testat:

Grundpraktikum

Laborversuch: Aushärten einer Aluminiumlegierung

Im Versuch soll die Abhängigkeit der Härte (Gefügeänderung) der ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung AlMgSi1 von Temperatur und Zeit bestimmt werden. Dazu werden die Kalt- und Warmaushärtung sowie das Weichglühen angewendet.

1 Grundlagen

Die Ausscheidungshärtung hat sehr große Bedeutung für die Festigkeitssteigerung von NE-Metall-Legierungen, besonders für Aluminium. Das Prinzip der Festigkeitssteigerung besteht in der Behinderung der Versetzungsbewegung durch Blockieren von Gleitebenen. Was bedeutet das? Zunächst zu den Versetzungen: Versetzungen sind linienförmige Baufehler des Gitters. Es werden zwei verschiedene Formen unterschieden: **Stufenversetzungen** kann man sich als Rand von Gitterebenen vorstellen, die im Kristall enden, während bei **Schraubversetzungen** die Gitterebenen wendelförmig verzerrt sind. Diese reinen Formen treten nur auf kleinen Teilstücken in Erscheinung, im allgemeinen existieren Kombinationen beider Komponenten, die man als gemischte Versetzungen bezeichnet.

Nun zu den Gleitebenen: Wird ein Material ausreichend hoch belastet, so verformt es sich plastisch. Dabei gleiten bestimmte Kristallebenen (sogenannte Gleitebenen) in bestimmten Richtungen aufeinander ab (Abb. 1).

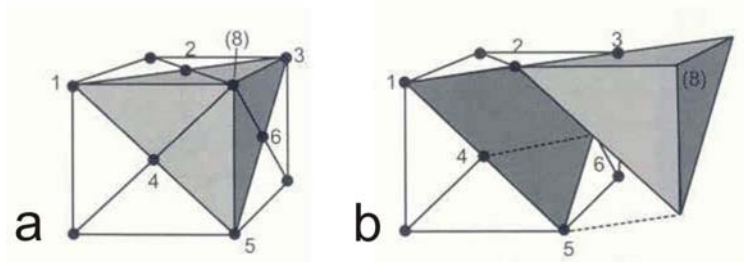


Abbildung 1: Atompositionen und Gleitebene im kubisch-flächenzentrierten Gitter

In Abb. 1a ist eine Elementarzelle des kubisch-flächenzentrierten Gitters abgebildet, welches typisch für Aluminium ist. Die Atome sitzen dabei in den Ecken des Würfels und zusätzlich in der Mitte jeder der sechs Seiten des Würfels. Die Abgleitung erfolgt bei diesem Gittertyp auf einer $\{111\}$ -Gleitebene, wie in Abb. 1b gezeigt. Allerdings verschieben sich nicht, wie in Abb. 1b dargestellt, komplette Atomebenen, da dies einen viel zu hohen Aufwand an Energie benötigen

würde. Vielmehr erfolgt die Ableitung in der Art, dass eine Versetzung sich auf einer Gleitebene durch den Kristall bewegt. Die beteiligten Atome verändern dabei nicht ihre Position, sondern ihre Bindungen mit den Nachbaratomen (vgl. Vorlesungsskript Werkstofftechnik I, S. 73, 74).

Hindernisse auf den Gleitebenen können die Versetzungsbewegung verhindern oder behindern sie zumindest. Sie können durch Ausscheidungen gebildet werden, die die Versetzungen zwingen, sich durchzubiegen und die Teilchen zu umgehen (Orowan-Mechanismus, schematisch in Abbildung 2 dargestellt) oder die Teilchen zu schneiden¹. Typischer Teilchendurchmesser ist ca. 1 nm, typische Teilchenabstände 10 bis 20 nm \Rightarrow in 1 mm³ ca. 10^{10} bis 10^{20} Teilchen.

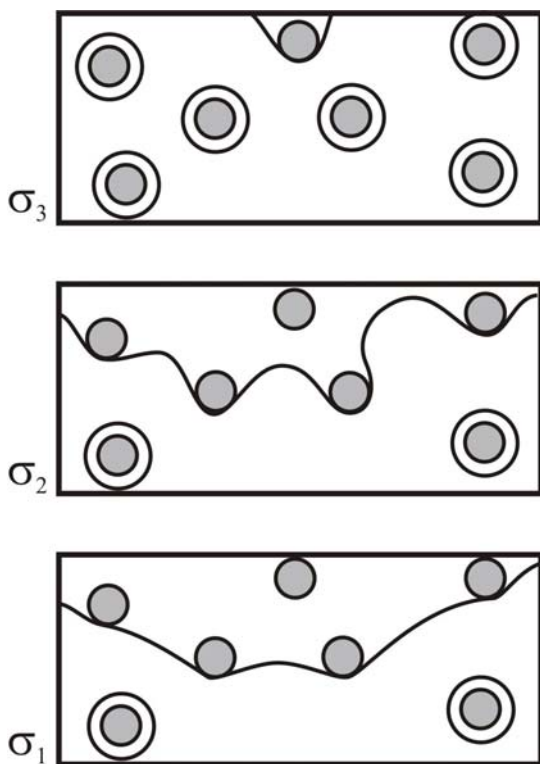


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Orowan-Mechanismus. Bei der Spannung σ_1 kann die Versetzung die untere Reihe der ausgeschiedenen Partikel umgehen, bleibt jedoch an der mittleren Reihe hängen. Eine Erhöhung der Belastung auf σ_2 führt zu einer stärkeren Durchbiegung der Versetzung, bis sie schließlich bei σ_3 auch diese Partikel umgehen kann.

Zweck des Glühens bei einer Ausscheidungshärtung ist das Erzeugen der Hindernisse, welche in sehr fein verteilter Form im Grundgitter vorliegen müssen. Durch die Behinderung der Versetzungsbewegung erhöht sich der Widerstand gegen plastische Verformung, und die zur plastischen Verformung nötige Spannung steigt an (das Metall verfestigt). Damit sich durch das Glühen Ausscheidungen erzeugen lassen, muss die auszuhärtende Legierung geeignete Legierungselemente enthalten (im Falle von Aluminium ist dies vor allen Dingen Magnesium). Die Voraussetzungen für die Aushärtung sind dabei die folgenden:

¹ Animierte Illustrationen hierzu finden sich im Internet unter der Web-Adresse <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=71&pageid=1006363262>. Dort kann man z.B. bei der Darstellung des Orowan-Mechanismus Teilchenabstand und äußere Belastung variieren um den Effekt auf die Versetzungsbewegung zu erkennen.

- Es liegt eine begrenzte Löslichkeit des Legierungselementes im festen Zustand vor.
- Die Löslichkeit nimmt mit abnehmender Temperatur ab.
- Das Umwandlungsverhalten ist träge, so dass durch rasches Abkühlen (Abschrecken) der übersättigte Zustand erhalten bleibt.

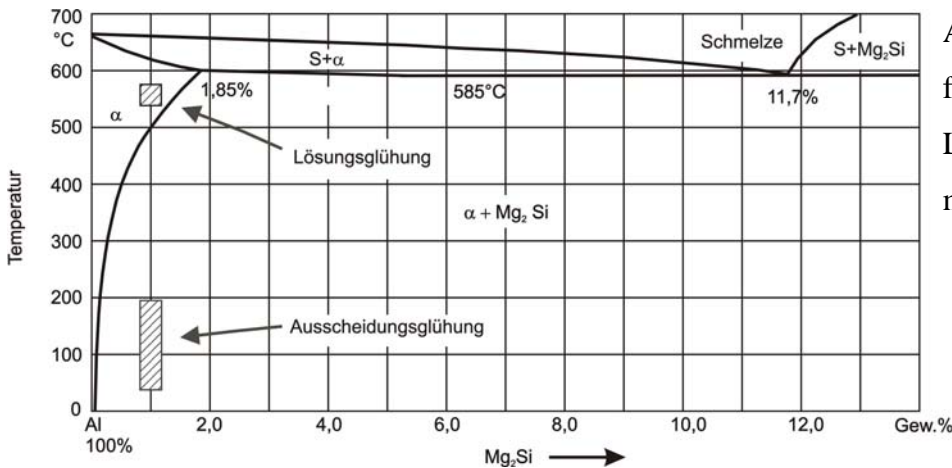
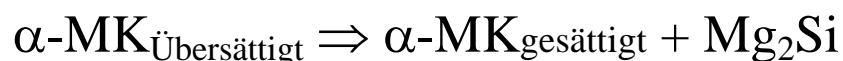


Abbildung 3: Zustandsdiagramm für die ausscheidungshärtbare Legierung AlMgSi1 (schematisch)

Die Wärmebehandlung bei einer Ausscheidungshärtung wird im Folgenden am Beispiel der ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung AlMgSi1 erläutert. Sie setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

- **Lösungsglühen** (homogenisieren): Glühen im Zustandsfeld des homogenen α-Mischkristalls (α-MK). Dies führt zum vollständigen Auflösen vorher ausgeschiedener Partikel der zweiten Phase Mg₂Si. Geglüht wird bei etwa 540 °C.
- **Abschrecken** (einfrieren): Sehr schnelle Abkühlung in Wasser, es entsteht eine an Mg₂Si übersättigte feste Lösung von α-MK.
- **Auslagern/Aushärten**: Der übersättigte α-MK wird auf eine erhöhte Temperatur gebracht, bei der Diffusionsprozesse in Richtung auf das stabile Gleichgewicht ablaufen, d.h. es wird soviel Mg₂Si ausgeschieden, bis keine Übersättigung mehr vorliegt. Der Temperaturbereich bei Aluminium liegt dabei zwischen RT (Kaltauahärten) und ca. 200 °C (Warmauahärten).

Beim Auslagern versucht die Legierung in den stabileren Gleichgewichtszustand überzugehen. Das Wirtsgitter (α-MK) ist bestrebt, nachträglich die in Lösung gehaltene 2. Komponente (Mg₂Si) auszuscheiden:



Als Aushärtungsarten unterscheidet man, wie oben bereits angedeutet, Kaltaushärten und Warmaushärten. Beim Kaltaushärten kommt es in bestimmten Gitterebenen durch Platzwechselvorgänge (Diffusion, Leerstellen) zur Bildung von Entmischungszonen (Clusterbildung). In der Nähe der kohärenten Grenzflächen dieser Entmischungszonen wird das Wirtsgitter elastisch verzerrt und dadurch die Gleitebenen blockiert (schematisch in Abbildung 4 dargestellt).

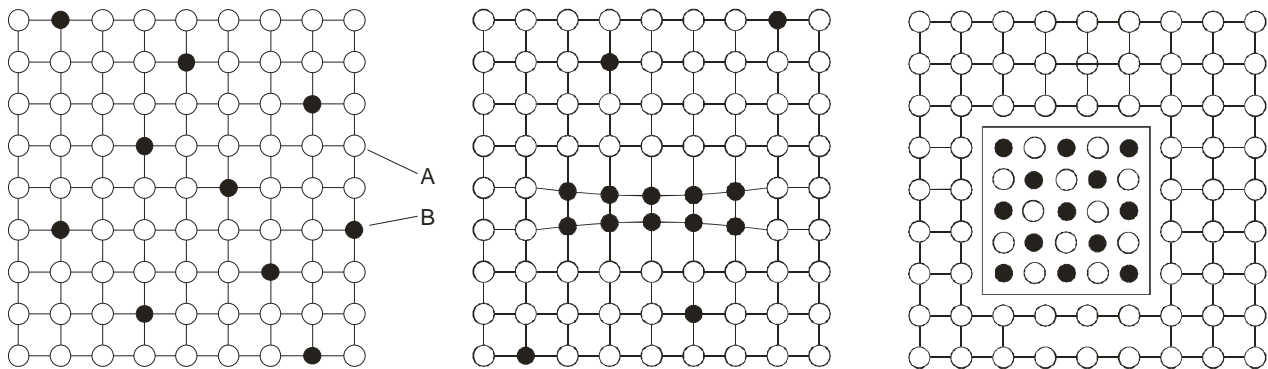


Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen Zwischenzustände beim Auslagern einer aushärtbaren Legierung:

- a) mit B übersättigter Mischkristall
- b) Entmischung und Clusterbildung beim Kaltauslagern: kohärente Phasengrenzen, starke Gitterverspannung, homogenes Gefüge
- c) Bildung der Ausscheidung AB (50% A, 50% B) beim Warmauslagern: inkohärente Phasengrenzen, geringere Gitterverspannungen, heterogenes Gefüge

Das stöchiometrische Verhältnis der 2. Phase wird beim Kaltaushärten allerdings nicht erreicht, d.h. es findet keine Bildung von Mg_2Si statt. Durch eine kurzzeitige Lösungsglühbehandlung lassen sich diese Entmischungszonen leicht wieder auflösen.

Eine Beschleunigung der Vorgänge beim Kaltaushärten kann durch Erhöhung der Temperatur erreicht werden (Warmaushärten). Beim Warmaushärten wird das zwangsgelöste Legierungselement bei höheren Temperaturen aus dem übersättigten MK ausgeschieden (aufgrund der höheren Temperatur verbesserte Diffusionsbedingungen). Die Legierungsatome reichern sich nicht in Form von Ebenen, sondern in räumlich ausgedehnten Bereichen an. Mit fortschreitender Anreicherung kommt es zur Bildung der 2.Phase. Diese erfolgt über kohärente und teilkohärente Zwischenphasen (bei denen sich die Gitterebenen des Matrixgitters über mindestens eine Grenzfläche stetig in das ausgeschiedene Teilchen fortsetzen, Abbildung 4). Zwischen den sich schließlich bildenden stabilen Ausscheidungen und umgebender MK-Matrix besteht keine Kohärenz mehr, der stetige Übergang zwischen beiden Gittern fehlt (inkohärente Teilchen).

Der Drang zur Ausscheidung der 2. Phase wird mit fortschreitender Aushärtung wegen der dabei abnehmenden Übersättigung des MK immer geringer. Des weiteren wachsen die kleinen Teilchen zu größeren zusammen (koagulieren), wobei ihre Anzahl abnimmt. Ebenso werden bei höheren Auslagerungstemperaturen die Ausscheidungen größer und ihre Anzahl geringer (Abbildung 5).

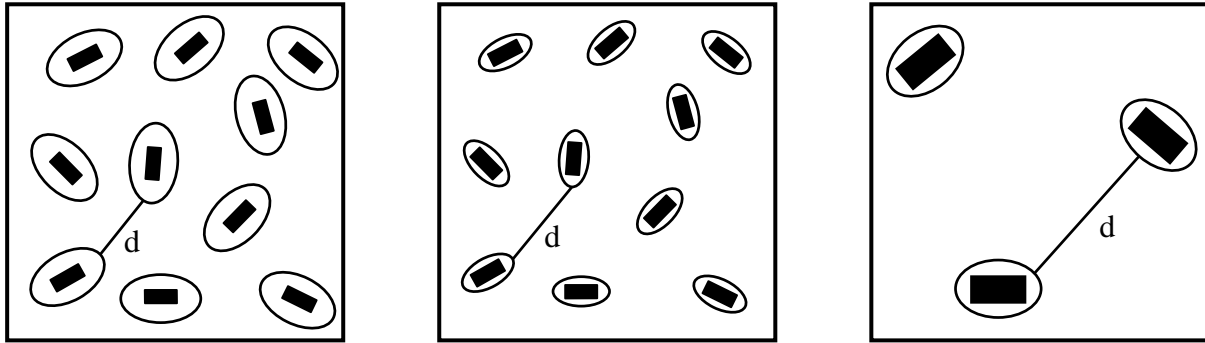


Abbildung 5: Einfluss der Gitterkohärenz und der Teilchengröße auf den Teilchenabstand d

- Die wirksame Größe kohärenter Teilchen wird durch das Volumen der sie umgebenden verspannten Matrix (symbolisiert durch die Größe der Ellipse) erhöht.
- Vergleichenbare Teilchen einer Gleichgewichtsausscheidung (bei uns Mg_2Si) haben eine geringere wirksame Größe und deshalb ein höheres d .
- Im Stadium der Überalterung ballen sich die Teilchen zusammen, wodurch der Abstand d noch größer wird.

Durch den sich ergebenden größeren Abstand können die Teilchen leichter von den Versetzungen umgangen werden, was in einer Entfestigung resultiert. Der Werkstoff verliert an Festigkeit und die plastische Verformbarkeit erhöht sich. Diesen Vorgang nennt man Überhärten.

Die Aushärtung beeinflusst die mechanischen Kennwerte folgendermaßen: Härte, Zugfestigkeit und Streckgrenze werden erheblich gesteigert, die Bruchdehnung fällt ab. Der Einfluss unterschiedlicher Auslagerungstemperaturen T und Auslagerungszeiten t auf die Zugfestigkeit ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

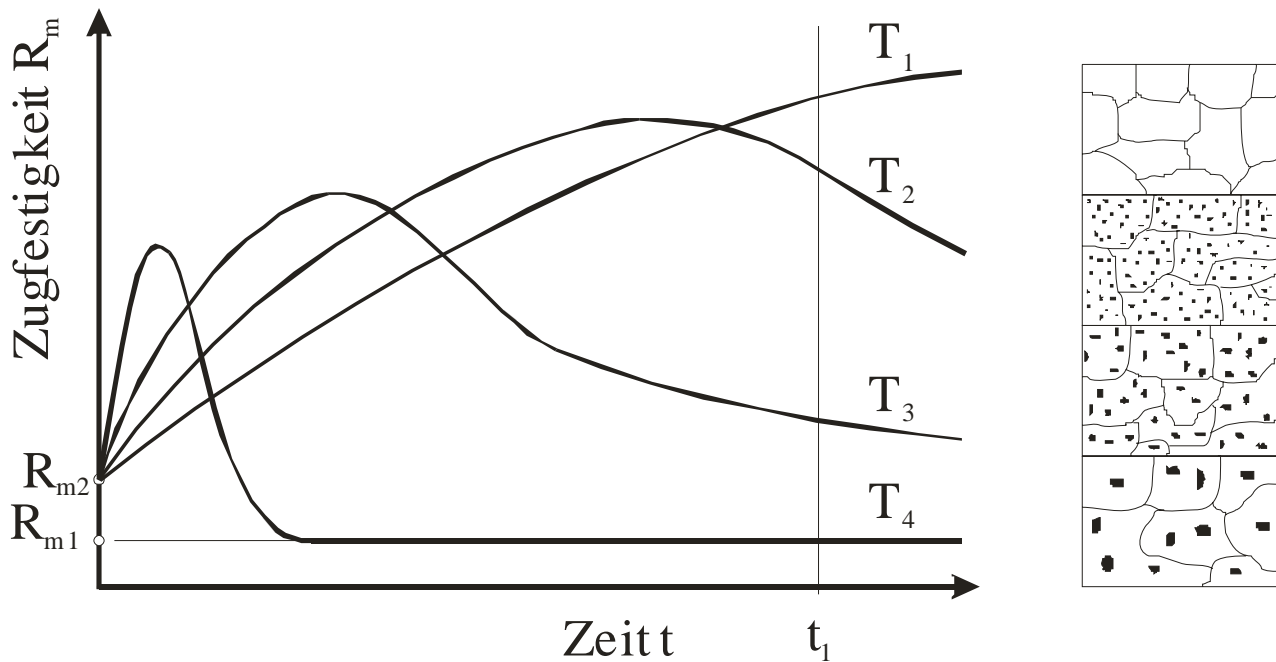


Abbildung 6: Einfluss unterschiedlicher Auslagerungstemperaturen T und Auslagerungszeiten t auf die Festigkeitswerte (schematisch, $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$). Die Größe der Ausscheidung in den Gefügebildern ist stark übertrieben, ihre tatsächliche Anzahl ist wesentlich größer.

R_{m1} : Festigkeit im Gleichgewichtszustand (wenn die Übersättigung verschwunden ist und die vielen kleinen Ausscheidungen zu wenigen, großen koaguliert sind).

R_{m2} : Festigkeit im Zustand lösungsgeglüht und abgeschreckt

Je höher die Auslagerungstemperatur, um so schneller wird das Maximum der Festigkeit erreicht, dieses Maximum ist jedoch höher, je niedriger die Auslagerungstemperatur gewählt wird. Für die industrielle Praxis muss also ein Kompromiss zwischen möglichst hoher Festigkeit und sinnvollen Auslagerungszeiten gefunden werden.

2 Aufgabenstellung

Es soll die Zeitabhängigkeit der Härte für verschiedene Auslagerungstemperaturen untersucht werden. Je zwei Proben sollen bei 50°C kaltausgehärtet, bei 200°C warmausgehärtet und bei 350°C weichgeglüht werden. Die resultierenden Härteverlaufskurven sind in das Diagramm am Ende des Versuchsskriptes einzutragen.

3 Versuchsdurchführung

Zur Härtemessung wird das Verfahren nach Brinell verwendet (HB 2.5/62.5, 30s). Der zu notierende Härtewert ergibt sich als Mittelwert aus 2 Einzelmessungen. Vor den Messungen müssen die Härtemessgeräte mit Hilfe von Proben, von denen der Härtewert bekannt ist, kalibriert werden.

Es sollen jeweils zwei Proben kaltausgehärtet, warmausgehärtet und weichgeglüht werden. Dazu erhält die Gruppe vier lösungsgeglühte und zwei ausgelagerte Proben (maximale Härte). Die vier lösungsgeglühten Proben (1-1, 1-2, 2-1 und 2-2) wurden vorher für ca. 30 min bei 540 °C geglüht und in Eiswasser abgeschreckt.

Bei der ersten Probe (1-1) wird zunächst die Härte gemessen, um den Ausgangszustand zu ermitteln. Die erste und zweite Probe (1-1 und 1-2) werden dann in einem Ofen bei 50 °C kaltausgehärtet. Bei der einen Probe (1-1) wird der Härteverlauf nach 15 / 30 / 60 min Gesamtglühzeit gemessen (jeweils nach dem Abschrecken), bei der anderen (1-2) nach 90 min.

An der dritten Probe (2-1) wird wieder die Ausgangshärte bestimmt, dann werden die dritte (2-1) und vierte (2-2) Probe im Ofen bei ca. 200 °C warmausgehärtet. Bei der einen Probe (2-1) wird der Härteverlauf nach 4 / 10 / 20 / 30 / 50 / 60 min Gesamtglühzeit gemessen (jeweils nach dem Abschrecken), bei der anderen (2-2) nach 90 min.

Die fünfte und sechste Probe (3-1 und 3-2) sind Proben, die die maximale Härte besitzen (d. h. Vorbehandlungszeit und -temperatur, bei denen der maximale Härtewert erreicht wird). Es soll der Härteverlauf beim Glühen mit ca. 350 °C festgestellt werden. Dazu werden bei der einen Probe (3-1) die Härtewerte (jeweils nach dem Abschrecken) nach 4 / 8 / 15 / 30 / 60 min Gesamtglühzeit und bei der anderen Probe (3-2) nach 90 min aufgenommen.

Jeder Versuchsteilnehmer benötigt alle Messwerte. Die Härtewerte sollen während des Versuchs in das mit den Versuchsunterlagen ausgegebene Diagramm eingetragen werden, so dass bei Versuchsende jeder Teilnehmer 3 Härteverlaufskurven skizzieren kann.

Zusammenfassung der Laborübung Kalt- und Warmaushärtung einer Aluminiumlegierung

Bestimmung der Zeitabhängigkeit der Härte und der Gefügeänderung von AlMgSi1 bei Kalt- und Warmaushärtung sowie der Entfestigung beim Weichglühen.

1. Schritt: Kalibrieren der Härtemesser.

2. Schritt: Probe 1-1 wird bei ca. 50 °C kaltausgehärtet. Nach 15 / 30 / 60 min Gesamtglühzeit wird sie aus dem Ofen genommen, abgeschreckt und die Härte gemessen, danach wieder in den Ofen verbracht.

3. Schritt: Probe 1-2 wird bei ca. 50 °C kaltausgehärtet. Nach 90 min wird sie aus dem Ofen genommen, abgeschreckt und die Härte gemessen.

4. Schritt: An der Probe 2-1 wird die Ausgangshärte gemessen.

5. Schritt: Probe 2-1 wird bei ca. 200 °C warmausgehärtet. Nach 4 / 10 / 20 / 30 / 50 / 60 min Gesamtglühzeit wird sie aus dem Ofen genommen, abgeschreckt und die Härte gemessen, danach wieder in den Ofen verbracht.

6. Schritt: Probe 2-2 wird bei ca. 200 °C warmausgehärtet. Nach 90 min wird sie aus dem Ofen genommen, abgeschreckt und die Härte gemessen.

7. Schritt: An der Probe 3-1 wird die Ausgangshärte gemessen.

8. Schritt: Probe 3-1 wird bei ca. 350 °C weichgeglüht. Nach 4 / 8 / 15 / 30 / 60 min Gesamtglühzeit wird sie aus dem Ofen genommen, abgeschreckt und die Härte gemessen, danach wieder in den Ofen verbracht.

9. Schritt: Probe 3-2 wird bei ca. 350 °C weichgeglüht. Nach 90 min wird sie aus dem Ofen genommen, abgeschreckt und die Härte gemessen.

10. Schritt: Eintragen der Messwerte ins Diagramm und Auswertung.

4 Versuchswerkstoff

Versuchswerkstoff ist die aushärtbare Aluminiumlegierung mit der DIN-Bezeichnung AlMgSi1. Die deutsche Werkstoffnummer ist 3.2315, die internationale ist 6082. Die chem. Zusammensetzung ist in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Zusammensetzung nach DIN EN 485-2:1999

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,7 - 1,3	< 0,5	< 0,10	0,4-1,0	0,6-1,2	< 0,25	< 0,20	< 0,10

Eigenschaften für Bleche DIN EN 485-2:1999 (Lösungsglühtemperatur 520-540°C)

		R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	H _B
Kaltaushärten	20°-80°C	> 275	> 110	> 16	65
Warmaus härten	150°-180°C	> 205	> 200	> 10	85
Weichglühen	350°-400°C	< 150	> 85	> 18	35

AlMgSi1 findet Verwendung im Maschinen-, Fahrzeug- sowie Schiffsbau, außerdem im Bauwesen und bei der Möbelherstellung.

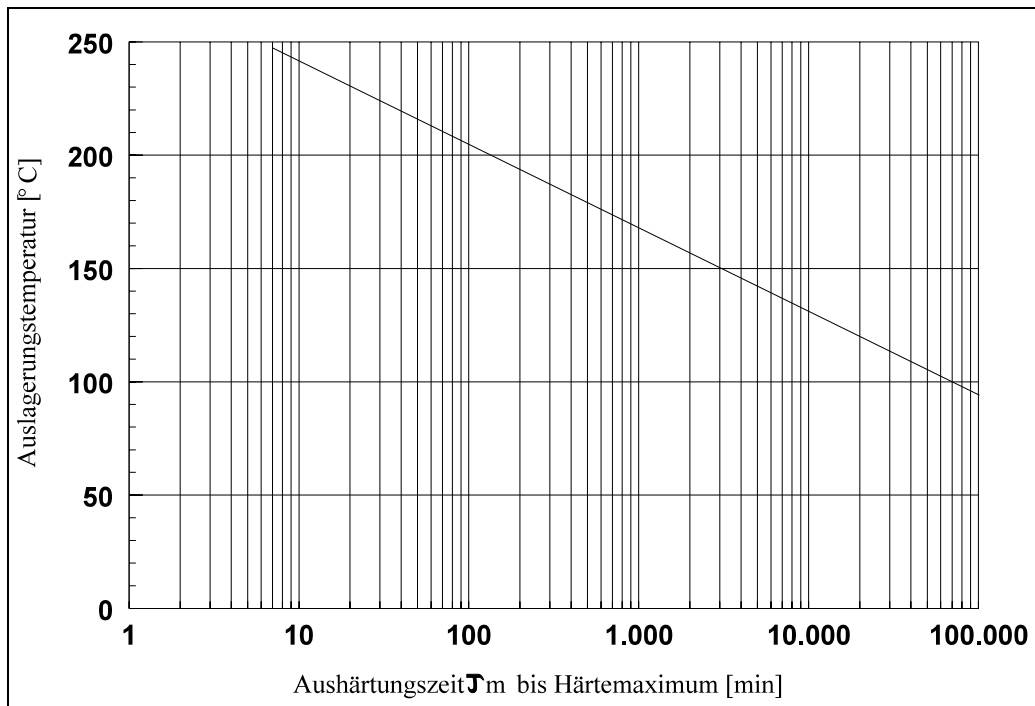


Abbildung 7: Zeit-Temperatur-Diagramm zur Ermittlung des Härtemaximums

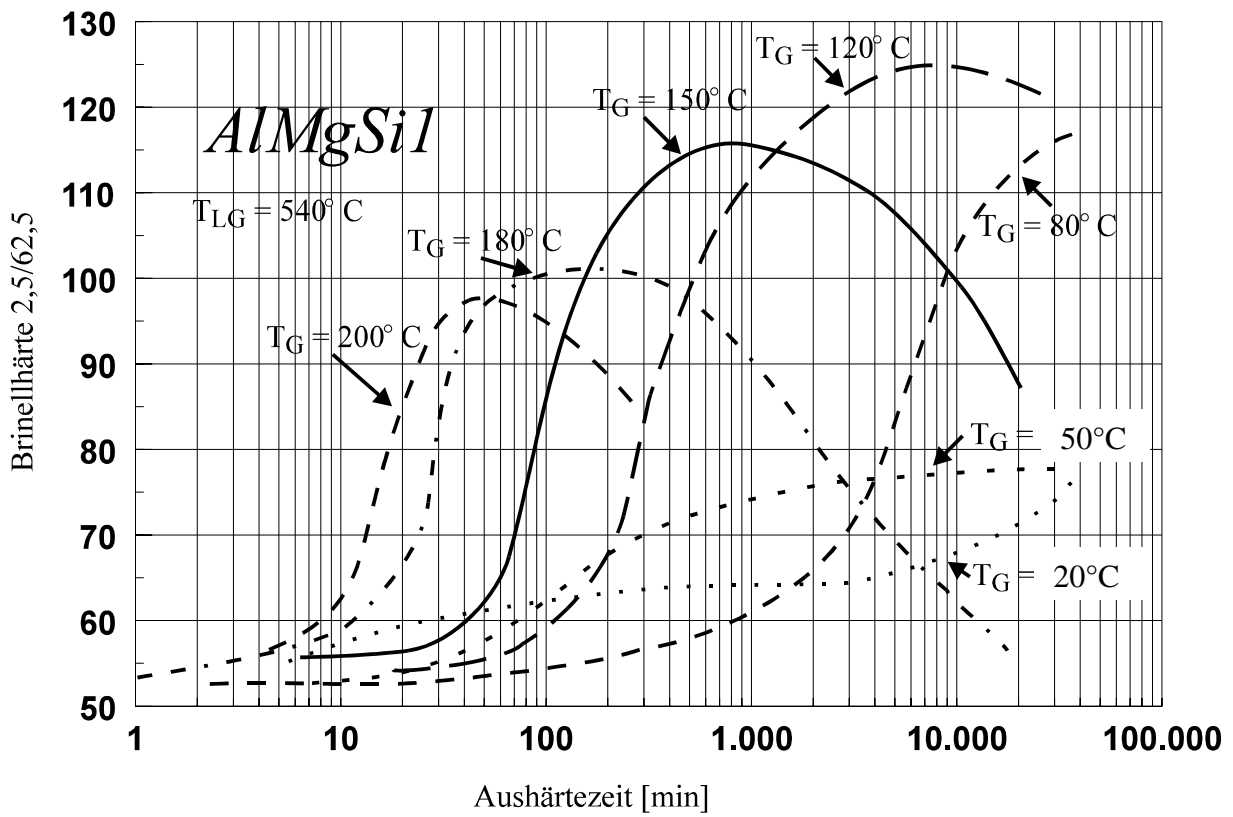


Abbildung 8: Zeit-Brinellhärte-Diagramm

5 Literatur:

- Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, Springer-Verlag 1998
- Macherauch, E.: Praktikum in Werkstoffkunde. 10. Auflage. Braunschweig (u.a.): Vieweg 1992.
- Hornbogen, E.: Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften. 3. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag 1983.
- Altenpohl, D.: Aluminium von innen betrachtet: Eine Einführung in die Metallkunde der Aluminiumwerkstoffe. 4. Auflage. Düsseldorf: Aluminium-Verlag 1979.
- Domke, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 10. Auflage. Düsseldorf (u.a.): Cornelsen Girardet 1989

6 Fragen zum Versuch:

- Welche Voraussetzungen muss eine Legierung erfüllen, damit sie aushärtbar ist?
- Wie kommt die Festigkeitssteigerung zustande (Mechanismus)?
- Aus welchen Schritten besteht die Wärmebehandlung beim Aushärten?
- Wozu und bei welcher Temperatur wird das Lösungsglühen durchgeführt? An welchem Punkt im Zustandsdiagramm hat sich das Mg_2Si (ca. 1%) im α -MK vollständig aufgelöst?
- Welchen Zweck hat das Abschrecken?
- Welche Aushärtungsarten unterscheidet man?
- Kaltaushärten: bei welchen Temperaturen? Welche Veränderungen gehen im Gefüge vor?
- Warmaushärten: bei welchen Temperaturen? Welche Veränderungen gehen im Gefüge vor?
- Was heißt "Überhärten"? Warum findet dort eine Festigkeitsabnahme statt?
- Welche mechanischen Kennwerte werden durch die Aushärtung beeinflusst ?
- Wie funktioniert die Härtemessung nach Brinell?
- Was ist ein Zustandsdiagramm (Achsenbeschriftung, was kann man ablesen)?
- Welchen der drei nachstehenden Zustandsdiagrammtypen hat $AlMgSi1$?
 - Vollständige Löslichkeit im flüssigen und im festen Zustand,
 - vollständige Löslichkeit im flüssigen und teilweise Löslichkeit im festen Zustand,
 - vollständige Löslichkeit im flüssigen und vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand.
- a) Abbildung 7: Bei welcher Temperatur muss die Legierung ausgelagert werden, wenn nach 50 h das Härtemaximum erreicht werden soll?
- b) Abbildung 8: Die Legierung soll bei $120^\circ C$ 10 Tage lang ausgelagert werden. Mit welcher Brinellhärte ist zu rechnen?

Brinellhärte

2,5/62,5

