

Protokoll: Aushärtbarkeit von Aluminiumlegierungen

Datum: 26.05.2009

Verfasser: Dimitrij Fiz

Gruppe: 12

Betreuer: Regina Hörth

1. Einleitung

Die Aushärtbarkeit zweier Aluminiumlegierungen soll analysiert werden. Dazu werden Proben einer Aluminium-Kupfer- und einer Aluminium-Silizium-Legierung ausgelagert, die Härte und der elektrische Widerstand in bestimmten Zeitintervallen gemessen und anschließend jeweils ein Vickershärte-Auslagerungsdauer und ein Widerstand-Auslagerungsdauer-Diagramm erstellt. Anhand der Diagramme sollen die Gefügeumwandlungen im Material diskutiert werden.

2. Grundlagen

2.1. Verfestigungsmechanismen

Man unterscheidet prinzipiell zwischen zwei Mechanismen um die Härte und die Festigkeit eines Metalls zu steigern. Diese sind die Verformungsverfestigung und die Legierungsverfestigung. Beiden liegt die Behinderung der Versetzungsbewegung im Werkstoff zugrunde, im Folgenden soll jedoch nur auf die Legierungsverfestigung näher eingegangen werden.

Durch das Zulegieren von Fremdatomen entsteht im Atomgitter des Werkstücks ein Spannungsfeld, da die Atome sich in Größe unterscheiden. Dieses Spannungsfeld kann mit dem um eine Versetzung wechselwirken und somit die Versetzungsbewegung beeinträchtigen. Das Ausmaß der Härteerhöhung hängt dabei stark von der Verteilung der Fremdatome in der Matrix ab.

Sind die Fremdatome in einem Mischkristall atomar gelöst, spricht man von Mischkristallhärtung. Da die Härtesteigerung in solchen Kristallen für technische Anwendungen zu gering ist, werden Legierungen solcher Art auch als "nicht aushärtbar" bezeichnet. Ein Beispiel dafür ist das binäre System Al-Si, bei welchem man durch Abschrecken ein feinlamellares eutektisches Gefüge mit Al-Kristallen erhält.

Im Unterschied dazu steht die Teilchen- bzw. Ausscheidungsverfestigung, wobei die Härtesteigerung auf der Ausbildung von Zweitphasen im Material beruht. Solche Legierungen werden als "aushärtbar" bezeichnet, da sie eine wesentlich höhere Härte und Festigkeit gegenüber reinem Metall aufweisen. In diesem Versuch wird das System Al-Cu als Beispiel einer solchen Legierung betrachtet. Schreckt man so eine Legierung aus dem homogenen Gebiet ab, wird die Ausscheidung der sogenannten Θ -Phase (Al_2Cu) gehemmt und es bildet sich ein übersättigter metastabiler Mischkristall. Dieser geht beim Auslagern durch das Ausscheiden weiterer verschiedener metastabiler Phasen in die stabile Θ -Phase

über. Da diese Ausscheidungen sehr feindispers sind, kommt es dadurch zu einem wesentlichen Härteanstieg. Die dabei auftretenden Übergangsphasen sind:

- Guinier-Preston I-Zonen (GP I-Zonen): Monoatomare Schichten von Cu-Atomen auf {100}-Ebenen, welche eine kohärente Grenzflächen zum Mischkristall aufweisen. An diesen Grenzflächen auftretende Spannungen führen zu großen Härteanstiegen.
- GP II-Zonen; θ'' -Phase: Eine Überstruktur von abwechselnden Cu- und Al-Atomschichten parallel zur {100}-Ebenen, welche sich erst nach einer Inkubationszeit bilden und ebenfalls kohärente Grenzflächen aufweisen.
- Nichtgleichgewichtsphase θ' : Eine tetragonale Gitterstruktur, welche nur noch teilweise kohärente Grenzflächen zum Mischkristall aufweist.
- θ -Phase: Stabile Gleichgewichtsphase mit einer tetragonalen Struktur und völlig inkohärenten Grenzflächen zum Mischkristall. Sie trägt kaum mehr zur Härtung bei.

Im Verlauf der Auslagerung bilden sich zunächst die GP I- und GP II-Zonen, weshalb es zu einem enormen Härteanstieg kommt. Nach einer gewissen Zeit werden auf Kosten dieser Beiden Phasen erst die θ' -Phase und schließlich die θ -Phase vermehrt in den Kristall eingebaut. Dies führt zur Absenkung der Härte, was als Überalterung bezeichnet wird.

2.2. Härtemessung nach Vickers

Bei dieser Prüfmethode wird eine Diamantpyramide mit einem Flächenöffnungswinkel von 136° verwendet (Abb. 1). Das Verhältnis der Belastung P zur Eindrucksfläche O wird als Vickershärte HV bezeichnet und mit folgender Formel berechnet:

$$HV = \frac{P}{O} = \frac{2P \sin 68^\circ}{d^2} = \frac{1,8544P}{d^2} \quad \left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \right] \quad (Gl. 1)$$

Dabei wird die Belastung in Kilopond angegeben ($1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$). d steht für das arithmetische Mittel der Diagonalen des Eindrucks und wird in mm angegeben (Abb. 1).

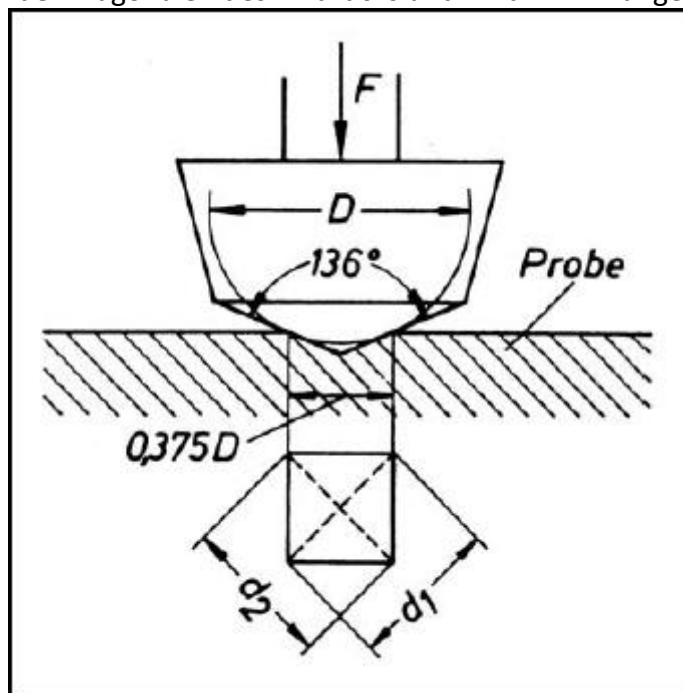


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Vickers-Härteprüfung. [1]

2.3. Messung des elektrischen Widerstands

Der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters setzt sich allgemein aus zwei Anteilen zusammen: Dem temperaturunabhängigen durch Störungen im Kristall bedingten Restwiderstand R_0 und dem temperaturabhängigen von Gitterschwingungen herrührenden Anteil $R(T)$. Es gilt:

$$R = R_0 + R(T) \quad (Gl. 2)$$

Der Widerstand der Metalle ist sehr gering, daher wird eine Gleichstrom-Thomson-Brücke benutzt (Abb. 2), um diese zu erfassen. Mit ihr lassen sich Widerstände im Bereich $1 \mu\Omega$ bis 1Ω genau bestimmen. Es gilt $R_1 = R_0$ und $R_2 = R_4$, d.h. es wird im stromlosen Zustand gemessen.

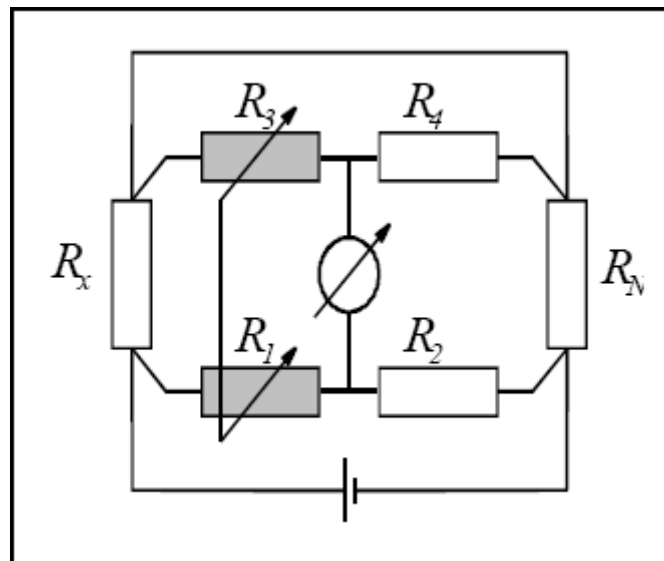


Abb. 2: Darstellung einer Thomsonbrücke. [1]

3. Versuchsdurchführung

Zwei vorbereitete Proben bestehend aus einer Al-Cu- und einer Al-Si-Legierung werden in einem Ofen bei ca. $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgelagert. Eine der Legierungen ist dabei mit einem Loch markiert, jedoch ist den Versuchsdurchführenden unbekannt, zu welcher Legierung sie gehört.

Zu Zeitpunkten 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 (jeweils in min Auslagerungsdauer) werden an beiden Proben jeweils 3 Härteprüfungen nach Vickers durchgeführt, wobei die Last von 2 kp für 15 s angelegt wird (HV 2/15). Die Diagonalen des Eindrucks werden mithilfe eines Lichtmikroskops vermessen und deren Mittelwert und der Härtewert mithilfe eines Computers nach (Gl. 1) errechnet.

Außerdem werden zu den oben genannten Zeitpunkten Messungen des elektrischen Widerstands der beiden Proben an einer Thomson-Brücke vorgenommen.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die ermittelten Messwerte und die dazugehörigen Diagramme dargestellt und beschrieben.

Tab. 1: Werte der Probe mit Loch.

Auslagerungs- dauer [min]	Widerstand [mΩ]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d [mm]	HV 2/15 [kp/mm ²]
0	0,303	0,276	0,276	0,276	48,220
		0,281	0,274	0,278	
		0,280	0,275	0,278	
5	0,283	0,287	0,283	0,285	46,527
		0,281	0,280	0,281	
		0,285	0,277	0,281	
10	0,272	0,291	0,284	0,287	45,768
		0,283	0,285	0,284	
		0,287	0,279	0,283	
15	0,267	0,283	0,285	0,284	45,768
		0,284	0,282	0,283	
		0,287	0,287	0,287	
20	0,265	0,287	0,286	0,286	44,922
		0,288	0,289	0,289	
		0,286	0,288	0,287	
30	0,260	0,287	0,287	0,287	44,818
		0,289	0,294	0,292	
		0,283	0,285	0,284	
45	0,255	0,285	0,291	0,288	44,715
		0,287	0,286	0,287	
		0,286	0,292	0,289	
60	0,255	0,292	0,287	0,290	44,303
		0,292	0,282	0,287	
		0,295	0,287	0,291	
80	0,255	0,292	0,288	0,290	44,100
		0,292	0,289	0,291	
		0,292	0,296	0,289	
100	0,250	0,294	0,294	0,294	43,006
		0,298	0,291	0,295	
		0,294	0,291	0,292	

Tab. 2: Werte der Probe ohne Loch.

Auslagerungs- dauer [min]	Widerstand [mΩ]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d [mm]	HV 2/15 [kp/mm ²]
0	0,290	0,185	0,187	0,186	107,203
		0,185	0,187	0,186	
		0,188	0,185	0,186	
5	0,266	0,169	0,167	0,168	130,886
		0,166	0,171	0,168	
		0,172	0,166	0,169	
10	0,261	0,169	0,176	0,173	127,830
		0,169	0,169	0,169	
		0,167	0,171	0,169	
15	0,256	0,167	0,166	0,166	130,886
		0,176	0,170	0,173	
		0,167	0,166	0,166	
20	0,251	0,168	0,168	0,168	132,984
		0,165	0,170	0,168	
		0,165	0,166	0,165	
30	0,248	0,167	0,163	0,165	134,591
		0,166	0,167	0,166	
		0,163	0,171	0,167	
45	0,244	0,169	0,173	0,171	127,830
		0,167	0,173	0,170	
		0,170	0,170	0,170	
60	0,241	0,174	0,179	0,176	121,566
		0,171	0,175	0,173	
		0,172	0,179	0,175	
80	0,240	0,172	0,172	0,172	123,444
		0,171	0,179	0,175	
		0,170	0,176	0,173	
100	0,241	0,171	0,175	0,173	121,566
		0,178	0,171	0,174	
		0,176	0,178	0,177	

Beobachtung während der Härteprüfung:

Die unter dem Lichtmikroskop betrachteten Eindrücke der Diamantpyramide fallen bei der Probe mit Loch deutlich größer aus als bei der ohne Loch.

Die Widerstandswerte der Proben unterscheiden sich nur geringfügig voneinander.

Dies lässt sich auch an (Tab. 1/2) erkennen.

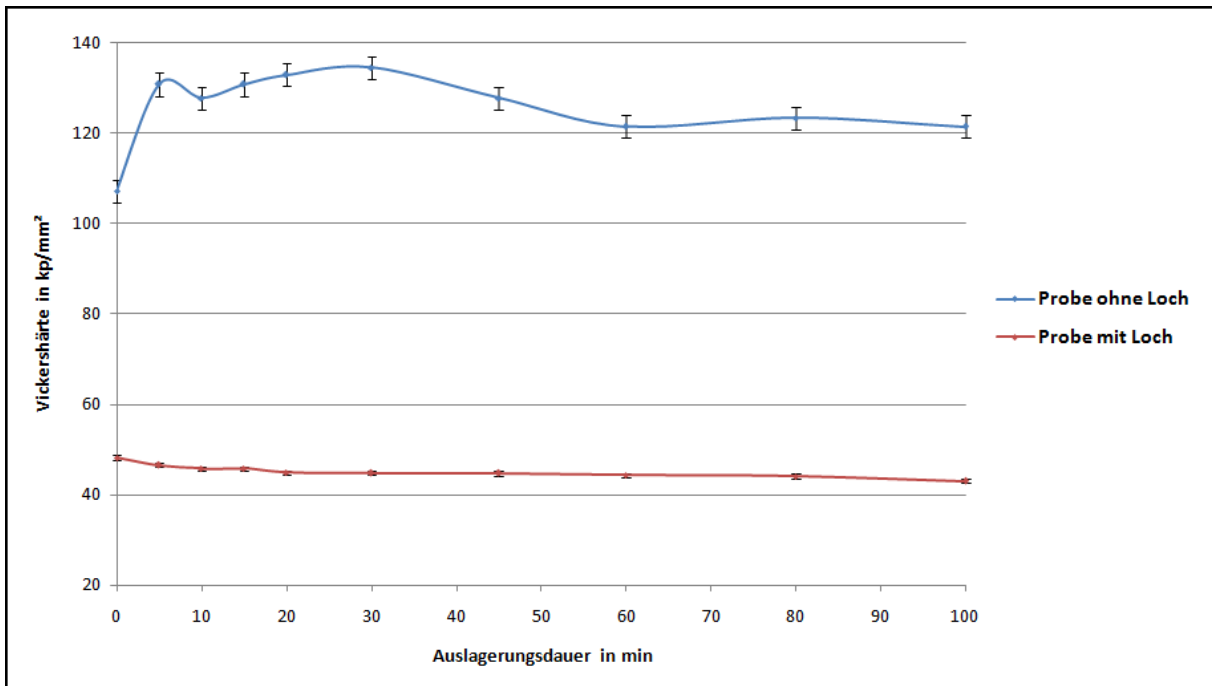


Abb. 3: Vickershärte-Auslagerungsdauer-Diagramm beider Proben.

Beobachtung:

Zunächst fällt auf, dass die Härtewerte der Probe ohne Loch deutlich über denen der Probe mit Loch liegen (vgl. (Tab. 1/2) und (Abb. 3)). Auch der Verlauf der beiden Kurven ist sehr unterschiedlich. Die Härte der Probe ohne Loch nimmt in den ersten Minuten stark zu, erreicht nach etwas einer halben Stunde ihr Maximum und fällt dann wieder leicht ab. Die Härte der Probe mit Loch bleibt dagegen fast konstant, es ist lediglich nur eine ganz schwache Abnahme zu verzeichnen.

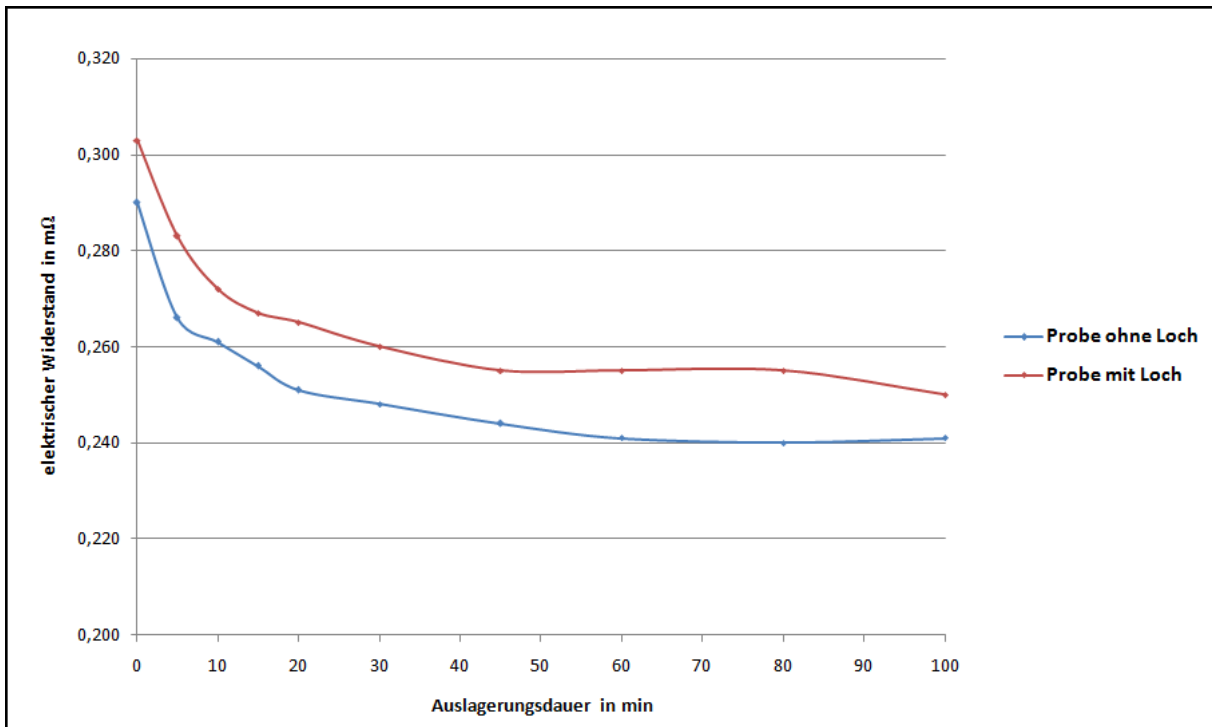


Abb. 4: Widerstand-Auslagerungsdauer-Diagramm beider Proben.

Beobachtung:

Wie oben bereits erwähnt, unterscheiden sich die Widerstände der beiden Proben kaum. Aus (Abb. 4) wird zudem ersichtlich, dass auch die zeitliche Änderung der Widerstandswerte bei beiden Proben in etwa gleich ist. Sie nehmen zunächst stark und im Verlauf der Auslagerung immer weniger ab.

5. Diskussion der Ergebnisse

5.1. Fehlerbetrachtung

Für die Härte kann mit einer Fehlerfortpflanzung ein absoluter Fehler berechnet werden. Dazu wird ein Messfehler für die Diagonalen des Eindrucks $\Delta d = \pm 0,002$ mm angenommen. Die Fehlerfortpflanzung liefert dann:

$$\Delta HV = \left| \frac{\partial HV}{\partial d} \right| \Delta d = \left| \frac{-2 \cdot 1,8544P}{d^3} \right| \Delta d \quad (Gl. 3)$$

Nach (Gl. 3) ergeben sich somit die in (Tab. 3) angegebenen Fehler. Diese sind auch in (Abb. 3) eingetragen.

Tab. 3: Für die Härte ermittelte Fehler.

Auslagerungs- dauer [min]	$\Delta HV_{mit\ Loch}$ [kp/mm ²]	$\Delta HV_{ohne\ Loch}$ [kp/mm ²]
0	± 1	± 3
5	± 1	± 4
10	± 1	± 3
15	± 1	± 4
20	± 1	± 4
30	± 1	± 4
45	± 1	± 3
60	± 1	± 3
80	± 1	± 3
100	± 1	± 3

Allgemein ist zu erwähnen, dass bei den Härteprüfungen die Vermessung der Diagonalen sich als schwierig erwies, da die Ecken der Eindrücke nicht immer klar erkennbar waren. Dies ist also als eine der Fehlerquellen anzuführen. Auch die Belastungszeit kann als eine Fehlerquelle angenommen werden, da die Belastungszeit manuell kontrolliert werden musste. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass die Härte an einer durch Fehler im Kristall bedingten ungünstigen Stelle geprüft werden konnte.

Die Widerstände lassen sich, wie bereits oben erwähnt, sehr genau bestimmen. Deshalb gibt es für die Widerstandsmessungen keine nennenswerten Fehlerquellen, außer der möglichen Passivierung der Proben und damit verbundenen Widerstandsänderung.

5.2. Interpretation der Diagramme

Der Verlauf der blauen Kurve in (Abb. 3) lässt darauf schließen, dass es sich bei der Auslagerung der Probe ohne Loch um eine Ausscheidungsverfestigung handelt, d.h. um das Al-Cu-System. Dementsprechend ist die Probe mit Loch die Al-Si-Legierung. Dies lässt sich auch an den Härtewerten belegen, da diese mit den erwarteten Werten im Wesentlichen übereinstimmen.

Der schnelle und starke Härteanstieg von Al-Cu ist damit zu erklären, dass sich in dieser Phase der Auslagerung GP I-Zonen ausbilden. Da es sich hierbei um sehr feindisperse Ausscheidungen handelt, welche durch homogene Keimbildung regellos im Kristall erfolgen und kohärent zur Matrix sind, führt dies zu einer starken Behinderung der Versetzungsbewegung und dem damit verbundenen enormen Härteanstieg. Der weitere Verlauf der Auslagerung dient als Inkubationszeit für die Ausbildung der GP II-Zonen, welche ebenfalls zur Verfestigung beitragen, die Härte steigt. Nach etwa einer halben Stunde wird die optimale Auslagerungsdauer überschritten, die Überalterung setzt ein. An Versetzungen wird bevorzugt die teilkohärente Nichtgleichgewichtsphase θ' eingebaut, an Korngrenzen bildet sich schließlich die inkohärente Gleichgewichtsphase θ . Dies geschieht auf Kosten der kohärenten Phasen, was eine leichte Härteabnahme zur Folge hat.

Da es sich bei der Probe mit Loch um ein abgeschrecktes Al-Si-System handelt, welches aus feinlamellarem Eutektikum und Al-Kristallen besteht, lässt sich mithilfe der in (Abb. 3) gezeigten dazugehörigen Kurve die Härteänderung erklären. Diese nimmt leicht ab, was darauf zurückzuführen ist, dass sich die Teilchen Vergrößern, ihre Anzahl geringer wird und die Versetzungen damit weniger Widerstand erfahren. Außerdem wird aus dem Diagramm ersichtlich, dass es sich um eine "nicht aushärtbare" Legierung handelt, da es zu keiner Erhöhung der Härte im Verlauf der Auslagerung kommt.

Die Widerstände beider Legierungen nehmen im Verlauf der Auslagerung ab. Die Ursache hierfür ist der fortschreitende Störstellenabbau im Gefüge.

6. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei der Al-Cu-Legierung nach der optimalen Auslagerungsdauer von etwa einer halben Stunde eine Härtesteigerung um das 10-fache gegenüber reinem Aluminium erreicht werden konnte.

Das Al-Si-System konnte im Gegensatz dazu nicht gehärtet werden.

Tab. 4: Zusammenfassung der Ergebnisse.

Auslagerungs- dauer [min]	Al-Si		Al-Cu	
	Widerstand [mΩ]	HV [kp/mm ²]	Widerstand [mΩ]	HV [kp/mm ²]
0	0,303	48 ± 1	0,290	107 ± 3
5	0,283	47 ± 1	0,266	131 ± 4
10	0,272	46 ± 1	0,261	128 ± 3
15	0,267	46 ± 1	0,256	131 ± 4
20	0,265	45 ± 1	0,251	133 ± 4
30	0,260	45 ± 1	0,248	135 ± 4
45	0,255	45 ± 1	0,244	128 ± 3
60	0,255	44 ± 1	0,241	122 ± 3
80	0,255	44 ± 1	0,240	123 ± 3
100	0,250	43 ± 1	0,241	122 ± 3

7. Literatur

- [1] Prof. Dr. H. P. Strunk, *Skript zum Werkstoffwissenschaftlichen Grundpraktikum "Aushärtbarkeit von Aluminiumlegierungen (AH)"*, 2009
- [2] Skript zur Vorlesung "Einführung in die Materialwissenschaft", 2007