

# Ausscheidungs- härten von Aluminium- legierungen



Herr Dr.-Ing. Olaf Keßler, geb. 1965, studierte Produktionstechnik an der Universität Bremen und ist seit 1989 am Institut für Werkstofftechnik, Bremen, im Bereich Wärmebehandlung und Beschichtung metallischer Werkstoffe tätig. Die Promotion erfolgte 1995. Seit 1996 baute er innerhalb des Instituts eine neue Gruppe „Wärmebehandlung von Leichtmetallelegierungen / Kombinationsverfahren“ auf, für deren Leitung er seitdem verantwortlich ist.

Teil 1

Dr.-Ing. O. Keßler

Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen

Aluminiumlegierungen sind aufgrund ihrer geringen Dichte von ca.  $2,7 \text{ g/cm}^3$  eine wichtige Werkstoffgruppe insbesondere für den Verkehrsmittelbau. Neben ihrer geringen Masse müssen Bauteile aus Aluminiumlegierungen aber auch die an sie gestellten Anforderungen bspw. hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit erfüllen. Für verschiedene Einsatzbereiche stehen daher unterschiedliche Aluminium-Legierungssysteme zur Verfügung. In den Tabellen 1 und 2 sind die wesentlichen Legierungssysteme mit ihren typischen Zusammensetzungen aufgeführt. Unterschieden werden Aluminium-Knetlegierungen und Gußlegierungen. Knetlegierungen zur Herstellung von Halbzeugen sind durch relativ geringe Gehalte an Legierungselementen, einen Aluminiummischkristall als überwiegenden Gefügebestandteil und eine gute plastische Verformbarkeit charakterisiert. Gußlegierungen zur Herstellung von Formgußteilen sind durch hohe Gehalte an Legierungselementen (in der Nähe eutektischer Konzentrationen), ein überwiegend eutektisches Gefüge und eine gute Gießbarkeit gekennzeichnet.

# Precipitation Hardening of Aluminum Alloys

Part 1

by Dr.-Ing. O. Keßler

Stiftung Institut für Werkstofftechnik,  
Bremen, Germany

Aluminum alloys, due to their low density of approx.  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , are an important group of materials, in particular for the construction of public transport vehicles. However, aside from their low mass, components made from aluminum alloys must also meet other demands, for instance, with regard to stiffness and strength. Therefore, various different types of aluminum alloy systems are available for different areas of application. Tables 1 and 2 show the most important alloy systems with their typical compositions. We differentiate between aluminum wrought alloys and cast alloys. Wrought alloys for the manufacture of semi-finished goods are characterized by relatively low contents of alloying elements, an aluminum solid solution as predominant structural constituent and positive plastic deformation properties. Cast alloys for the manufacture of finished casting parts are characterized by high contents of alloying elements (close to eutectic concentrations), a predominantly eutectic structure and excellent castability.

Alloy system	Designation by Number System	Composition [Ma. %]	Precipitation Hardenability
Legierungssystem	Bezeichnung nach Nummernsystem	Zusammensetzung [Ma. %]	Aushärtbarkeit
Al	1XXX	Al $\geq$ 99,0%	nicht aushärtbar not prec. hardenable
Al-Cu	2XXX	3,5-5,5% Cu	aushärtbar prec. hardenable
Al-Mn	3XXX	<1,5% Mn	nicht aushärtbar not prec. hardenable
Al-Si	4XXX		nicht aushärtbar not prec. hardenable
Al-Mg	5XXX	0,5-5,5% Mg	nicht aushärtbar not prec. hardenable
Al-Mg-Si	6XXX	0,3-1,5% Mg 0,2-1,6% Si	aushärtbar prec. hardenable
Al-Zn-Mg	7XXX	6-7% Zn + Mg	aushärtbar prec. hardenable
Al - andere Elem. other elem.	8XXX		

Tabelle 1: Aluminium-Knetlegierungen  
Table 1: Aluminum wrought alloys

Alloy system	Designation by Number System	Composition [Ma. %]	Precipitation Hardenability
Legierungssystem	Bezeichnung nach Nummernsystem	Zusammensetzung [Ma. %]	Aushärtbarkeit
Al	1XX.X	Al $\geq$ 99,0%	nicht aushärtbar not prec. hardenable
Al-Cu	2XX.X	4-5% Cu	aushärtbar prec. hardenable
Al-Si-Cu	3XX.X	4-10% Si 1-4% Cu	aushärtbar prec. hardenable
Al-Si-Mg		5-10% Si 0,3-0,5% Mg	aushärtbar prec. hardenable
Al-Si	4XX.X	5-20% Si	nicht aushärtbar not prec. hardenable
Al-Mg	5XX.X	3-12% Mg	nicht aushärtbar not prec. hardenable
Al-Zn-Mg	7XX.X	4-7% Zn 0,3-0,5% Mg	aushärtbar prec. hardenable
Al-Sn	8XX.X		
Al - andere Elem. other elem.	9XX.X		

Tabelle 2: Aluminium-Gußlegierungen  
Table 2: Aluminum cast alloys

Zur gezielten Einstellung definierter Eigenschaften von Aluminiumlegierungen ist, wie bei allen Werkstoffen, das Verständnis des Zusammenhangs Werkstoff → Behandlung → Gefüge → Eigenschaften erforderlich. Das Gefüge metallischer Werkstoffe ist aus einer Vielzahl von Körnern aufgebaut, in denen die Atome jeweils in regelmäßigen Kristallgittern angeordnet sind. Maßgeblich für das mechanische Verhalten metallischer Werkstoffe sind vorhandene Störungen dieser regelmäßigen Kristallgitter, insbesondere die sogenannten Versetzungen, die das Gitter in linienförmigen Bereichen stören. Diese Versetzungen sind unter der Wirkung von mechanischen Spannungen im Kristallgitter beweglich, wenn sie nicht durch andere Gitterstörungen behindert werden. Solange sich die Versetzungen im Bauteil unter äußerer Last nicht bewegen, wird das Bauteil rein elastisch verformt (Werkstoffbeanspruchung unterhalb der Fließspannung). Sobald sich die Versetzungen im Bauteil unter äußerer Last bewegen, wird das Bauteil elastisch-plastisch verformt (Werkstoffbeanspruchung oberhalb der Fließspannung).

Zur Festigkeitssteigerung metallischer Werkstoffe kann daher die Behinderung der Versetzungsbewegung durch die Einstellung bestimmter Werkstoffgefüge gezielt genutzt werden. Grundsätzlich existieren dazu die in Bild 1 dargestellten Verfestigungsmechanismen. Die Behinderung der Versetzungsbewegung kann durch andere Versetzungen, Korngrenzen, Fremdatome und Teilchen erfolgen [Mach85]. Bezogen auf die Aluminiumlegierungen können die Mechanismen Versetzungsverfestigung, Korngrenzenverfestigung und Mischkristallverfestigung für nahezu alle in den Tabellen 1 und 2 aufgeführten Legierungssysteme genutzt werden, bspw. durch Kaltumformung, Einstellung kleiner Korngrößen und Höhe der Legierungselementgehalte. Die Teilchenverfestigung dagegen kann nur bei solchen Aluminium-Legierungssystemen genutzt werden, die die dazu notwendigen metallkundlichen Voraussetzungen aufweisen. Diese Legierungssysteme sind in den Tabellen 1 und 2 als aushärtbar bezeichnet. Aushärtbar sind, sowohl bei den Knetlegierungen als auch bei den Gußlegierungen, insbesondere die Legierungssysteme Al-Cu(-Mg), Al-Mg-Si und Al-Zn-Mg. Als Ausscheidungshärten wird die Wärmebehandlung bezeichnet, die die Teilchenverfestigung gezielt zur Festigkeitssteigerung nutzt.

Reale Aluminiumlegierungen enthalten neben den Legierungselementen, die zur Ausscheidungshärtung beitragen stets noch weitere Elemente, wie Si und Fe, die in Form von Primär- oder Hochtemperaturausscheidungen im Gefüge vorliegen und bspw. die Korngröße beeinflussen. Im folgenden werden das Ausscheidungshärten sowie die metallkundlichen Voraussetzungen, die ein Legierungssystem dafür aufweisen muß vereinfacht am Bsp. des binären Systems Al-Cu beschrieben.

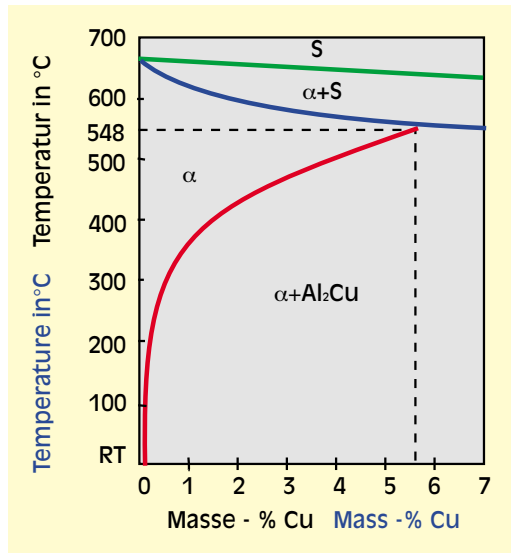
As is the case with all materials, a well-founded understanding of the inter-relationship → material → treatment → structure is required for the selective adjustment of defined attributes of aluminum alloys. The structure of metallic materials is built up from a multitude of grains, in which the atoms are arranged in regular crystal lattices. The ruling factors for the mechanical behavior of metallic materials are existing disturbances of these regular crystal lattices, in particular the so-called dislocations, which disturb the lattice in line-shaped areas. These dislocations are mobile under the effect of mechanical stresses in the crystal lattice, if they are not impeded by other disturbances of the lattice. As long as dislocations in the component do not shift under external loads, the components will be deformed in a purely elastic way (material load below yield stress). As soon as the dislocations in the component begin to shift under external loads, the components are deformed in an elastic-plastic way (material load above yield strength).

	$\Delta R_1 = R_{\text{vers}} = \alpha_1 G b \sqrt{\rho_{\text{ges}}}$	1. Versetzungen 1. Dislocation
	$\Delta R_2 = R_{\text{KG}} = \frac{k}{\sqrt{d}}$	2. Korngrenzen 2. Grain boundaries
	$\Delta R_3 = R_{\text{MK}} = \alpha_2 G C^n$ $0,5 \leq n \leq 1$	3. Fremdatome 3. Foreign atoms
	$\Delta R_4^{(a)} = R_{\text{Aus}} = \alpha_3 \gamma_{\text{eff}} \frac{r^m}{1+2r}$ $m = 1 \text{ bzw. } 1,5$	4. Teilchen 4. Particle a) kohärente Ausscheidungen a) coherent precipitation
	$\Delta R_4^{(b)} = R_{\text{Teil}} = \alpha_4 \frac{Gb}{l} \ln \frac{r}{b}$	b) inkohärente Ausscheidungen b) incoherent precipitation
	$\Delta R_4^{(c)} = R_{\text{P,k}} = \frac{k'}{\sqrt{\lambda}}$	c) zweite Phase körnig c) second phase globular
	$\Delta R_4^{(d)} = R_{\text{P,l}} = \frac{\alpha_5}{\lambda}$	d) zweite Phase lamellar d) second phase lamellar
	$\Delta R_4^{(e)} = R_{\text{P,g}} = (R_B - R_A) f_B$	e) grobe Zweiphasigkeit e) coarse two-phased

Bild 1: Verfestigungsmechanismen [Mach85]  
Figure 1: Hardening mechanisms [Mach85]

Therefore, in order to increase the strength of metallic materials, it is possible to selectively take advantage of the impediment of the dislocation motion through the adjustment of a certain material structure. On principle, the hardening mechanisms shown in Fig. 1 are available for this purpose. The impediment of the dislocation motion can be achieved by other dislocations, grain boundaries, for-

- S: Schmelze
- $\alpha$ : Al-Mischkristall
- Cu substitutionell gelöst  
max. Löslichkeit 5,7  
Ma.% bei 548°C,  
abnehmende Löslichkeit  
mit sinkender Temperatur
- Al<sub>2</sub>Cu ( $\theta$ ):  
intermetallische Verbindung
- S: melt
- $\alpha$ : Al solid solution,  
Cu substitutional dissolved,  
max. solubility 5.7 % by  
weight at 548°C, decreasing  
solubility with decreasing  
temperature
- Al<sub>2</sub>Cu ( $\theta$ ):  
intermetallic compound

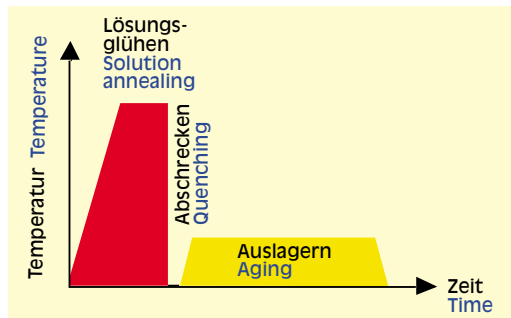


**Bild 2: Zustandsdiagramm Al-Cu, aluminiumreiche Seite [Mach85]**

**Figure 2: Structural diagram Al-Cu, aluminum-rich side [Mach85]**

ben. Bild 2 zeigt die aluminiumreiche Seite des Zustandsdiagramms Al-Cu. Als feste Phasen treten der Aluminiummischkristall ( $\alpha$ ) und die intermetallische Verbindung Al<sub>2</sub>Cu ( $\theta$ ) auf. Der Aluminiummischkristall besitzt eine maximale Löslichkeit von 5,7 Ma. % Cu bei 548°C. Übliche Al-Cu-Knetlegierungen und Gußlegierungen weisen geringere Cu-Gehalte von ca. 4 Ma. % auf; eine typische binäre Legierung wäre entsprechend AlCu<sub>4</sub>. Als wesentliche Voraussetzung für das Ausscheidungshärten zeigt das Zustandsdiagramm Al-Cu eine abnehmende Löslichkeit des Aluminiummischkristalls an Kupfer mit sinkender Temperatur. Mit Hilfe solcher Zustandsdiagramme können Wärmebehandlungen mit langsamen Erwärm- und Abkühlvorgängen und die dabei im Gleichgewicht vorliegenden Phasen beschrieben werden.

**Bild 3: Temperatur/Zeit-Verlauf beim Ausscheidungshärten**  
**Figure 3: Temperature/time curve during precipitation hardening**



Lösen von Legierungselementen	Erzeugen eines übersättigten Mischkristalls (ÜMK) mit hoher Leerstellendichte	Ausscheiden von Teilchen aus dem ÜMK
Dissolution of alloying elements	Creating a supersaturated solid solution (SSS) with high vacancy density	Precipitation of particles from the SSS

Die Wärmebehandlung Ausscheidungshärten besteht aus den in Bild 3 dargestellten drei Schritten Lösungsglühn, Abschrecken und Auslagern. Der erste Schritt des Ausscheidungshärtens ist das Lösungsglühn. Dabei wird die Aluminiumlegierung AlCu<sub>4</sub> langsam bis in das Gebiet des Aluminiummischkristalls erwärmt und dort gehalten. Das Zustandsdiagramm (Bild 2) zeigt, daß dabei alle Kupferatome im Aluminiummischkristall in Lösung gehen. Bei der Wahl der Lösungsglühntemperatur ist zu beachten, daß sie einer-

eigen atoms and particles [Mach85]. In relation to aluminum alloys, the mechanisms of dislocation hardening, grain boundary hardening and solid solution hardening can be applied to nearly all alloy systems shown in Tables 1 and 2, for example, by means of cold forming, adjustment of small grain sizes and the level of alloying element contents. In contrast, particle hardening can only be used for aluminum alloy systems exhibiting all necessary metallurgy conditions for that purpose. These alloy systems are indicated in Tables 1 and 2 as precipitation hardenable. Precipitation hardenable are, among wrought alloys as well as among cast alloys, in particular the alloy systems Al-Cu(-Mg), Al-Mg-Si and Al-Zn-Mg. The designation of precipitation hardening is applied to heat treatment methods employing selective particle hardening to increase strength.

Real aluminum alloys always contain, aside from alloying elements contributing to precipitation hardening, further elements, such as Si and Fe, which are present in form of primary or high-temperature precipitations in the structure and, for example, have an influence on grain size. The following describes precipitation hardening as well as the metallurgical conditions that an alloy system must exhibit for that purpose by means of the simplified example of the binary system Al-Cu. Figure 2 shows the aluminum-rich side of the phase diagram Al-Cu. Aluminum solid solution ( $\alpha$ ) and the intermetallic compound Al<sub>2</sub>Cu ( $\theta$ ) occur as solid phases. The aluminum solid solution has a maximum solubility of 5.7 Ma. % Cu at 548°C. Common Al-Cu wrought alloys and cast alloys exhibit lower Cu contents of approx. 4 Ma. %; correspondingly, a typical binary alloy would be AlCu<sub>4</sub>. As an essential condition for precipitation hardening, the phase diagram Al-Cu shows a decreasing solubility of aluminum solid solutions on copper with dropping temperatures. Heat treatment processes with slow heating and cooling procedures and the equilibrium phases occurring in these processes can be demonstrated with the aid of such phase diagrams.

The heat treatment method of precipitation hardening comprises the three steps of solution heat treatment, quenching and aging shown in Figure 3. The first step of the precipitation hardening process is the solution annealing. In this step, the aluminum alloy AlCu<sub>4</sub> is slowly heated until it reaches the range of aluminum solid solutions and is kept at that temperature. The phase diagram (Figure 2) shows that in this procedure all copper atoms in the aluminum solid solution are dissolved. When selecting the solution annealing temperature it must be observed that, on the one

seits möglichst hoch liegen sollte, um die Lösungsglühdauer zu verkürzen, aber andererseits nicht zu hoch liegen darf, um Anschmelzungen zu vermeiden. Die Lösungsglühtemperaturen einiger gebräuchlicher Aluminiumlegierungen betragen für AlSi1MgMn (6082): 525-540°C, AlCu4Mg1 (2024): 495-505°C und AlZn5,5MgCu (7075): 470-480°C [Alum98, ASM91]. Das Lösungsglühen von Aluminiumlegierungen wird überwiegend in Luft- bzw. Schutzgasumwälzöfen oder Salzbadern durchgeführt.

**W**ürde die Aluminiumlegierung AlCu4 nach dem Lösungsglüh langsam abgekühlt werden, so würde sich gemäß Zustandsdiagramm nach Unterschreiten der Löslichkeitslinie die intermetallische Verbindung Al<sub>2</sub>Cu ausscheiden. Die Ausscheidung würde aufgrund der günstigeren Bedingungen für die Keimbildung auf den Korngrenzen der Aluminiummischkristall-Körner stattfinden. Bei Raumtemperatur würde dann ein Gefüge aus Aluminiummischkristall-Körnern, deren Korngrenzen stark mit Al<sub>2</sub>Cu belegt sind vorliegen. Ein solches Gefüge würde aufgrund der Sprödigkeit des Al<sub>2</sub>Cu auf den Korngrenzen schlechte mechanische Eigenschaften aufweisen. Außerdem würden die nebeneinander vorliegenden und unterschiedlich edlen Phasen Aluminiummischkristall und Al<sub>2</sub>Cu eine hohe Korrosionsanfälligkeit bewirken.

hand, it should be as high as possible but, on the other hand, not too high, in order to prevent melting. The solution annealing temperatures of some common aluminum alloys are: AlSi1MgMn (6082): 525-540°C, AlCu4Mg1 (2024): 495-505°C and AlZn5,5MgCu (7075): 470-480°C [Alum98, ASM91]. Solution annealing of aluminum alloys is predominantly carried out in air or protective atmosphere furnaces or salt bath furnaces.

**I**f the aluminum alloy AlCu4 were cooled down slowly after solution annealing, the intermetallic compound Al<sub>2</sub>Cu would be precipitated, according to the phase diagram, after falling below the solubility line. The precipitation would take place, owing to the more favorable for nucleation, on the grain boundaries of the aluminum solid solution grains. Then, at room temperature, a structure of aluminum solid solution grains, having grain boundaries heavily with Al<sub>2</sub>Cu would be obtained. Such a structure, due to the brittleness of the Al<sub>2</sub>Cu at the grain boundaries, would exhibit poor mechanical properties. In addition, the parallel existing and differently refined phases aluminum solid solution and Al<sub>2</sub>Cu would result in a high degree of susceptibility to corrosion.

**INFO: 209**