

Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen

The image is a 3x3 grid of smaller images. The top-left image shows a table with material properties. The top-middle image shows a grid with a diagonal line. The top-right image shows a grid with a diagonal line. The middle-left image shows a table with material properties. The middle-middle image shows a grid with a diagonal line. The middle-right image shows a grid with a diagonal line. The bottom-left image shows a table with material properties. The bottom-middle image shows a grid with a diagonal line. The bottom-right image shows a grid with a diagonal line.

Stoffnummer	Temperatur [°C]	Zeit [h]	in Wasser	in Luft	Temperatur [°C]
44200S O	520-53	3-6	20-50	-	-
44200K O	520-53	3-6	20-50	-	-
43000S T6	520-53	3-6	20-50	-	-
43200S T6	520-53	3-6	20-50	-	-
43200K T6	510-52	3-6	20-50	-	-
44000S T6	520-53	3-6	20-50	-	-
44000K T6	520-53	3-6	20-50	-	-
43300S T6	525-53	4-8	20-50	-	-
43300K T6	525-53	4-8	20-50	-	-
42100S T6	525-53	3-8	20-50	-	-
42100K T6	525-53	3-8	20-50	-	-
48000K T6	510-52	4-7	20-80	-	-
48000K T6	525-53	4-8 ^{II}	50-80	-	-
41100S T64	525-53	4-8 ^{II}	50-80	-	-
41100K T64	525-53	4-8 ^{II}	50-80	-	-
41100S T6	525-53	4-8 ^{II}	50-80	-	-
41100K T6	525-53	4-8 ^{II}	50-80	-	-
41000S T4	520-53	4-8 ^{II}	50-80	-	-
41000K T4	520-53	4-8 ^{II}	50-80	-	-

Inhalt

Vorwort	03	7.4.1	Lösungsglühen	13
Teil 1 – Wärmebehandlung von Aluminium-Knetwerkstoffen	03	7.4.2	Abschrecken	14
1. Wärmebehandlung der Aluminium-Knetlegierungsarten	03	7.4.3	Auslagern	15
1.1 Die Verfestigungsmechanismen der naturharten Aluminium-Knetlegierungen	04	7.4.3.1	Warmauslagern	15
1.2 Wärmebehandlungen bei naturharten Aluminium-Knetlegierungen	05	7.4.3.2	Kaltauslagern	15
1.3 Die Aushärtemechanismen/Verfestigung der aushärtbaren Aluminium-Knetlegierungen	05	7.5	Sonderfälle des Aushärtens	16
1.4 Die Wärmebehandlung der aushärtbaren Aluminium-Knetlegierungen	06	7.5.1	Sonderfälle des Warmauslagerns	16
2. Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften durch Wärmeeinwirkung beim Schweißen, Löten und Einbrennlackieren	07	7.5.1.1	Teilaushärten	16
2.1 Auswirkungen der Schweißwärme	07	7.5.1.2	Überhärten (Stabilisieren)	16
2.2 Wärmebehandlung von Bauteilen vor und nach dem Schweißen	08	7.5.2	Sonderfall des Lösungsglühens	16
2.3 Wärmeeinfluss beim Einbrennlackieren	08	7.5.2.1	Stufenglühen	16
3. Eigenspannungen in spanend bearbeiteten Werkstücken aus Knethalbzeug	08	7.5.3	Aushärten ohne Lösungsglühen	16
3.1 Abbau von Eigenspannungen in Knethalbzeugen für die spanende Bearbeitung beim Verarbeiter	08	7.5.3.1	Vereinfachtes Aushärten	16
4. Biegen von Halbzeugen	09	7.5.3.2	Selbstaushärten	17
4.1 Wärmebehandlung für das Biegen von Halbzeugen	09	8. Wärmebehandlung für Sonderzwecke		17
5. Wärmebehandlungsprozess beim Verarbeiter in der Praxis	09	8.1	Allgemeine Wärmebehandlung	17
Teil 2 – Wärmebehandlung von Aluminium-Gusslegierungen	10	8.1.1	Entspannungsglühen	17
6. Wärmebehandlung von Aluminium-Gusslegierungen	10	8.1.2	Weichglühen	18
7. Aushärten	10	8.2	Legierungsabhängige Wärmebehandlung	18
7.1 Aushärtbare Legierungen	11	8.2.1	Glühen von EN AC-Al Si12(a)	18
7.2 Grundlagen des Aushärtens	11	8.2.2	Homogenisieren von EN AC-Al Mg9	18
7.3 Normen und Richtlinien	12	9. Einrichtungen für die Wärmebehandlung		18
7.4 Verfahrensschritte des Aushärtens	12	9.1	Öfen	18
		9.2	Abschreckbäder	18
		9.3	Temperaturmessung	19
		9.4	Warengestelle	19
		10. Tabellenteil		20
		10.1	Wärmebehandlung von Aluminium-Knetlegierungen	20
		10.2	Wärmebehandlung von Aluminium-Gusslegierungen	25

Der GDA dankt herzlich für die Unterstützung bei der Überarbeitung dieses Merkblatts:

Wolf-Dieter Finkelburg,
Hydro Aluminium Deutschland GmbH

Reinhold Gitter,
Aluconsult

Dr. Ing. Peter Furrer
Novelis Technology AG (CH)

Prof. Dr. Ing. Jürgen Hirsch,
Hydro Aluminium Deutschland GmbH

Lothar Wenk,
Verein Deutscher Giessereifachleute e.V.

Vorwort

Das Merkblatt „W7“ ist als Informationsheft für den Verarbeiter von Aluminium gedacht. Die vielfältigen Erzeugnisse aus Aluminium-Knetlegierungen und die unterschiedlichen Verarbeitungstechniken in der Industrie bedingen aber eine Beschränkung auf die Grundzüge. Das komplexe Themengebiet der Wärmebehandlung ist dabei auf die notwendigen Aussagen reduziert. Als weiterführende und vertiefende Literatur sei hier auf die Standardwerke „Aluminium – Taschenbuch“ und „Aluminium von innen“ verwiesen. Die Zahlenwerte zur Wärmebehandlung in diesem Merkblatt sind als Richtwerte zu verstehen, die im konkreten Fall durch Rücksprache mit dem Halbzeughersteller und Prüfungen im eigenen Betrieb zu bestätigen sind. Die Gründe hierfür liegen in der großen Anzahl der Einflussparameter auf das Ergebnis der Wärmebehandlung. So ist die „Vorgeschichte“ des Halbzeuges hinsichtlich mechanischer und

thermischer Verarbeitung beim Halbzeugwerk ein entscheidender Einflussfaktor. Oftmals ist der vorliegende Werkstoffzustand beim Verarbeiter nur unzureichend bekannt, so dass genaue Angaben zur Behandlung erst nach einer Analyse des Ist-Zustandes erfolgen können. Die Wärmebehandlung von Aluminiumknetwerkstoffen erfordert eine gewisse Erfahrung in der Prozessführung. Weitere Einflussparameter sind die vorhandene Ofentechnik, die Geometrie des Werkstückes, die dadurch erzielbaren Metalltemperaturen an der Oberfläche und im Inneren, der Zeitverzug vom Ofen bis zum Abschrecken (Vorkühlung) und die technischen Möglichkeiten beim Verarbeiter, den entstandenen Gefügestand zu beurteilen. Die Tabellenwerte sind deshalb nur qualitativ zu verstehen und erheben keinen Anspruch darauf, in jedem Einzelfall das Optimum anzugeben. Bevor größere Materialmengen einer Behandlung unterzogen werden sollen, sind möglichst an Proben derselben Charge die Prozessparameter zu überprüfen.

Teil 1 – Wärmebehandlung von Aluminium-Knetwerkstoffen

1. Wärmebehandlung der Aluminium-Knetlegierungsarten

Aufbau der verschiedenen Legierungsarten

Die Hauptlegierungselemente in technischen Aluminiumlegierungen sind Magnesium (Mg), Silizium (Si), Mangan (Mn), Zink (Zn), und Kupfer (Cu). Entsprechend internationaler Festlegungen beziehungsweise DIN EN 573 werden die Legierungen durch vierstellige Zahlen unterschieden, wobei die erste Zahl die Legierungsart charakterisiert:

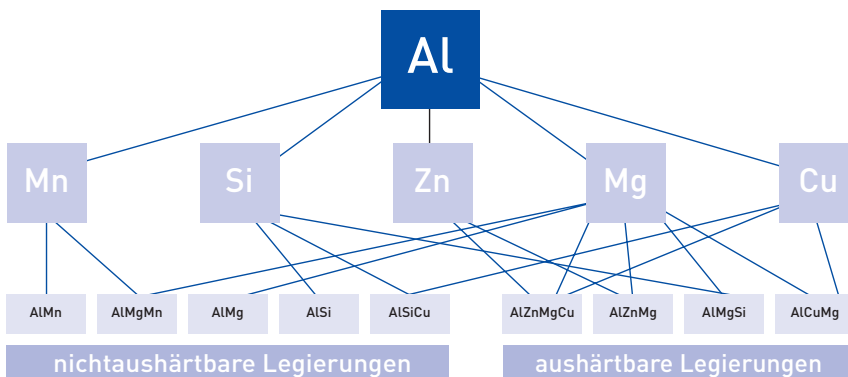
1xxx (Al99,99 ... Al99,5), 2xxx (AlCu), 3xxx (AlMn), 4xxx (AlSi), 5xxx (AlMg(Mn)), 6xxx (AlMgSi), 7xxx (AlZnMg(Cu)), 8xxx (sonstige, z.B. AlFe, AlLi). Dabei gibt es die beiden Hauptgruppen der Aluminiumlegierungen:

- naturharte (nichtaushärtbare) Legierungen
- aushärtbare Legierungen

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Hauptgruppen besteht in den Verfestigungs- beziehungsweise Aushärtemechanismen, die für die Festigkeitseigenschaften verantwortlich sind (Bild 1).

Die Bezeichnung Knetwerkstoffe kommt daher, weil sie hauptsächlich durch Warm- und Kaltwalzen, Strangpressen, Ziehen und Schmieden, das heißt über eine Kombination aus Umformen und Wärmebehandlung zu Halbzeug verarbeitet werden.

Legierungssysteme von Aluminium mit den wichtigsten Legierungsgruppen (Bild 1)



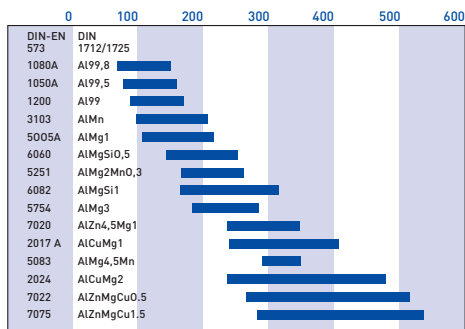
■ Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Möglichkeiten, über die Gefügebbeeinflussung die Festigkeit des Materials zu erhöhen:

- Einbau von Legierungsatomen in das Aluminiumatomgitter (Mischkristallverfestigung)
- Erhöhung der Versetzungsdichte durch plastische Verformung (Kaltverfestigung)
- Erzeugung feinsten Ausscheidungen mit abweichender Zusammensetzung und Struktur (Aushärtung beziehungsweise Dispersionsverfestigung)

Für die Beurteilung der Festigkeitseigenschaften wird meistens die Zugfestigkeit R_m als Kennwert herangezogen. Die Bandbreite, innerhalb derer dieser Wert eingestellt werden kann, ist in Bild 2 für die gängigsten aushärtbaren und nichtaushärtbaren Legierungen als Diagramm dargestellt.

Festigkeitsbereiche von Aluminium-Knetlegierungen (Bild 2)



Zugfestigkeit R_m in MPa

Die damit zusammenhängenden anderen Werkstoffeigenschaften wie Streckgrenze $R_{p0,2}$, Bruchdehnung A , Kerbempfindlichkeit und Korrosionsbeständigkeit verhalten sich teilweise entgegengesetzt. Für den jeweiligen Anwendungsfall müssen deshalb über die Werkstoffwahl und die Wärmebehandlung die Werkstoffeigenschaften eingestellt werden, mit denen die Anforderungen an das Bauteil bezüglich Fertigung und im späteren Betrieb am besten erfüllt werden.

1.1 Die Verfestigungsmechanismen der naturharten Aluminium-Knetlegierungen

Zu dieser Werkstoffgruppe gehören Reinaluminium und die Legierungstypen AlMg, AlMn, AlMgMn und AlFe. Bei diesen Gruppen wirken die Mechanismen Kaltverfestigung und Mischkristallverfestigung zur Festigkeitssteigerung.

Die Mischkristallverfestigung erfolgt über den Einbau von Legierungsatomen in das Aluminiumkristallgitter. Bis zu einem bestimmten Anteil der Fremdatome lässt sich dieser

Effekt steigern. Durch den Einbau der Legierungsatome werden die Abgleitvorgänge im Kristallgitter behindert, was zu höheren Festigkeitswerten führt.

Die Kaltverfestigung kommt durch das Entstehen von Gitterstörungen/Versetzung von Gitterebenen infolge der plastischen Verformung zustande, wobei diese Versetzungen sich ineinander „verhaken“ und so die Festigkeitssteigerung hervorrufen.

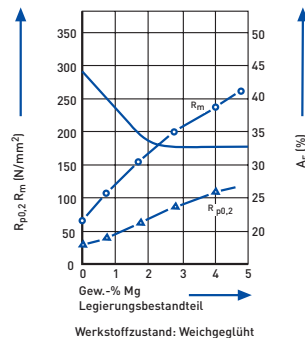
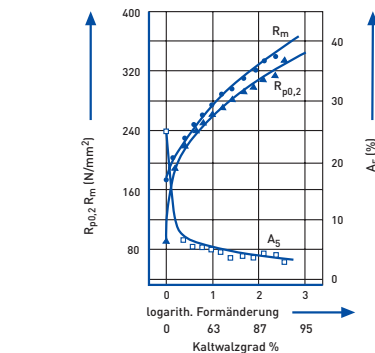
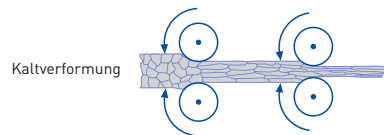
Bei der Herstellung der naturharten Halbzeuge hat die Kaltverfestigung den größten Einfluss auf die Festigkeit.

In Bild 3 ist die Wirkung der Mischkristallverfestigung für ein AlMg-System und der Kaltverfestigung an einem AlMgMn-Typ verdeutlicht.

Verfestigung der naturharten Aluminium-Knetlegierungen (Bild 3)

Mischkristallverfestigung

- = Al-Atom
- = z. B. Mg-Atom



1.2 Wärmebehandlungen bei naturharten Aluminium-Knetlegierungen

Durch die Kombination der oben beschriebenen Mechanismen zur Festigkeitssteigerung werden die verschiedenen Halbzeuge vom Herstellwerk in dem Zustand geliefert, wie sie der Verarbeiter benötigt. Durch gewollte oder ungewollte Wärmebehandlung werden die Eigenschaften der nicht-aushärtbaren Legierungen jedoch weiter beeinflusst. Zu den gewollten Eigenschaftsänderungen gehören unter anderem das Rückglühen und das Weichglühen (Rekristallisationsglühen), wenn beim Umformen, zum Beispiel beim Biegen, das Formänderungsvermögen eines Werkstoffs für die Endform des Bauteiles nicht ausreicht. Der Wärmeeinfluss beim Schweißen und Löten gehört dagegen zu den unerwünschten Beeinflussungen.

Abhängig von Höhe der Temperatur und Dauer des Wärmeeintrags werden die Festigkeitseigenschaften der verfestigten naturharten Werkstoffe verringert. Die Wärmebehandlung bewirkt ein Ausheilen von Versetzungen und Fehlstellen im Atomgitter, die durch die Kaltverformung entstanden sind. Dies ist verbunden mit einer Abnahme der Festigkeit und einer Zunahme der Kaltverformbarkeit. Liegt die Temperatur oberhalb von zirka 350 °C, so tritt neben der bereits bei niedrigeren Temperaturen ablaufenden Erholung eine Rekristallisation ein. Die verformten, gestreckten Körner bilden sich wieder neu und nehmen eine runde Form an. Durch Rekristallisation werden Kaltverfestigung und Eigenspannungen abgebaut (Bild 4).

Die erforderliche Temperatur und Glühzeit für die Weichglühung (Rekristallisation) wird stark von der vorangegangenen Kaltumformung und der Legierungszusammensetzung bestimmt. Bei entsprechenden Vorbedingungen kann die Re-

kristallisation auch zu ungünstigem, grobem Gefüge führen, was insbesondere bei Halbzeugen und Bauteilen, die bei der Verarbeitung örtlich unterschiedliche Verformungen erlitten haben, zu unerwünschten optischen und mechanischen Effekten führen kann. Die üblichen Weichglühtemperaturen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Glühzeit sollte mit Rücksicht auf die Bildung groben Gefüges nicht zu lang sein. Bei Legierungen der 5000er Gattung (AlMg und AlMgMn-Typen) mit mehr als 3 % Mg sind spezielle Abkühlbedingungen zu beachten, da sich sonst das Korrosionsverhalten (interkristalline Korrosion) verschlechtert.

Der Festigkeitsabfall durch Erholung und Rekristallisationsglühen ist beziehungsweise wäre nur durch erneutes Kaltumformen wieder auszugleichen. Daher ist zum Beispiel bei Schweißkonstruktionen aus naturharten Werkstoffen eine nachträgliche Steigerung der Festigkeit in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht nicht möglich.

1.3 Die Aushärtemechanismen / Verfestigung der aushärtbaren Aluminium-Knetlegierungen

Die Aushärtbarkeit entsteht durch die Kombination von in der Regel zwei oder drei geeigneten Legierungselementen mit dem Aluminium. Hierzu gehören die Legierungsgattungen 2xxx, 6xxx und 7xxx (AlCuMg, AlMgSi und AlZnMg(Cu)). Die Festigkeitssteigerung durch Kaltverformung hat hier nicht die Bedeutung wie bei den naturharten Legierungen. Die Wärmebehandlung im Verfestigungsprozess hat bei den aushärtbaren Legierungen mit Abstand den größeren Stellenwert. Für die Festigkeitssteigerung müssen zwei Voraussetzungen gegeben sein:

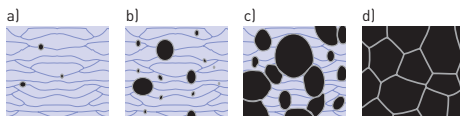
- Im festen Zustand mit sinkender Temperatur sinkende Löslichkeit der Legierungselemente im Aluminiumgitter
- Bildung von feinverteilten Ausscheidungen im Metallgitter.

Die Wärmebehandlung der aushärtbaren Legierungen läuft in drei Prozessabschnitten:

- **Lösungsglühen:**
Die Legierungselemente werden bei hoher Temperatur (zirka 450 °C bis 550 °C) im Aluminiumkristall gelöst.
- **Abschrecken:**
Durch eine große Abkühlgeschwindigkeit wird die Bildung von Ausscheidungen unterdrückt, die Legierungselemente bleiben im Aluminiumkristall gleichmäßig fein verteilt (übersättigter Zustand).
- **Auslagern:**
Hierbei bilden sich feinverteilte Ausscheidungen, die die Festigkeit steigern. Die Auslagerung findet bei Raumtemperatur (Kaltauslagerung) oder mäßigen Temperaturen bei zirka 140 °C bis zirka 190 °C (Warmauslagerung) statt.

Die einzelnen Verfahrensschritte sind in Bild 5 schematisch dargestellt. Durch schnelles Aufheizen in den Bereich der Lösungsglüh-temperatur werden die Legierungselemente im Aluminiumkristall gelöst. Die Temperatur darf dabei nur

Keimbildung und Kornwachstum bei der Rekristallisation (schematisch)(Bild 4)



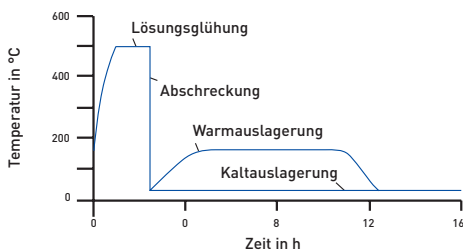
- a) Drei Rekristallisationskeime haben sich im verformten Gefüge gebildet (kurz nach Erreichen der Rekristallisationstemperatur)
- b) Weitere Keime werden gebildet, während die zuvor entstandenen gewachsen sind.
- c) Die Keime wachsen weiter. Einige der Rekristallisationskörner stoßen bereits aneinander und behindern sich dadurch gegenseitig im Wachstum.
- d) Die primäre Rekristallisation ist vollständig abgeschlossen. Aus dem kaltverfestigten Korngefüge ist das „Rekristallisationsgefuge“ entstanden.

a) bis d) sind Momentaufnahmen bei konstanter Temperatur, aber zunehmender Glühzeit.

so hoch sein, dass der Werkstoff nirgendwo anschmilzt (gefährdet sind dabei im Inneren oft die Korngrenzen). Durch das Abschrecken werden die gelösten Legierungselemente „eingefroren“. Das Kalt- oder Warmauslagern im Anschluss daran dient der Bildung sehr feiner, gleichmäßig verteilter Ausscheidungen. Diese feinverteilten Legierungsbausteine behindern Abgleitvorgänge im Kristallgitter und wirken so festigkeitssteigernd. Bild 6 zeigt beispielhaft für das Legierungssystem AlCu die Gefügestände in Abhängigkeit von der Temperatur.

Bei den aushärtbaren Legierungen sind neben der Ausscheidungshärtung grundsätzlich auch die Verfestigungsmechanismen Mischkristallverfestigung und Kaltverfestigung möglich. Die größte Wirkung geht dabei von der Ausscheidungshärtung aus, weshalb diese Werkstoffgruppe überwiegend entsprechenden Wärmebehandlungen unterzogen wird.

Schema der Aushärtung (Bild 5)



1.4 Die Wärmebehandlung der aushärtbaren Aluminium-Knetlegierungen

Die 6000er (AlMgSi)-Legierungsfamilie:

Das Lösungsglühen findet hierbei im Temperaturbereich von 525 °C bis 540 °C statt. Höhere Gehalte an Mg, zum Beispiel bei der Legierung EN AW-6082 (alte Normung: AlMgSi1), erfordern eine größere Abkühlgeschwindigkeit (20 bis 30 s) als bei EN AW-6060 (alte Normung: AlMgSi0,5) (40 bis 60 s), nähere Einzelheiten siehe Tabelle 6. Deshalb muss der erste Werkstoff mit Wasser, der zweite kann auch in bewegter Luft (Geflüsse) abgekühlt werden. Ein abschreckempfindlicher Werkstoff wie EN AW-6082 darf daher auf dem Weg vom Ofen zum Abschreckbad praktisch keine Temperatur verlieren.

Eine Besonderheit stellen die Karosseriebleche für die Automobilindustrie aus den 6000er Legierungen dar (zum Beispiel EN AW-6016). Sie werden schon beim Halbzeughersteller darauf hin optimiert, dass sie, unter Berücksichtigung ihrer Kaltverfestigung aus der Umformung der Karosserieteile, in der recht kurzen Einbrennzeit der kathodischen Tauchlackierung (KTL) der Rohkarosserie aushärten und dabei eine relativ hohe Festigkeit erreichen. Die typischen Bedingungen für diese Art der Warmauslagerung sind 175 °C bis 185 °C während 20 bis 30 Minuten. Dadurch kann

ein fast voll ausgehärteter Zustand erreicht werden, ohne dass eine spezielle Warmaushärtung notwendig ist. Eine solche oder vergleichbare Wärmebehandlung ist jedoch beim Anwender in anderen Marktbereichen nicht oder nur in Ausnahmefällen möglich.

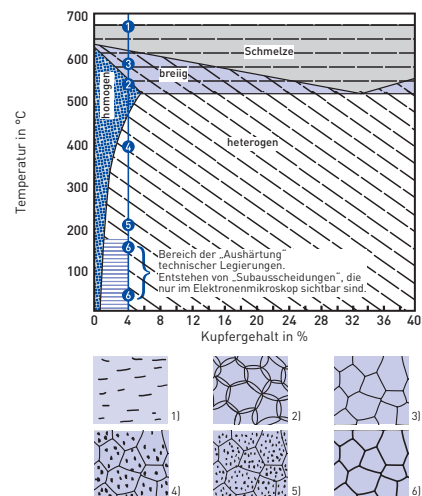
Die 2000er (AlCuMg)-Legierungsfamilie:

Bei dieser Legierungsgruppe ist besonders auf die genaue Einhaltung der Lösungsglühtemperaturen (495 °C bis 505 °C) und der engen Intervalle zu achten, da sich bei zu hoher Temperatur Ansmelzungen im Gefüge bilden und bei zu niedriger Temperatur die gewünschte Festigkeit nicht erreicht wird. AlCuMg-Werkstoffe werden in Wasser abgeschreckt. Hinsichtlich des Temperaturverlusts vor dem Abschrecken gilt dasselbe wie bei EN AW-6082. AlCuMg-Typen werden normalerweise kaltausgelagert. Eine Warmauslagerung ermöglicht eine höhere Festigkeit, womit sich aber hier gleichzeitig die Korrosionsbeständigkeit deutlich verschlechtert.

Die 7000er (AlZnMg)-Legierungsfamilie ohne Kupfer:

Die AlZnMg-Legierungen werden bei 460 °C bis 485 °C lösungsgelöst. Diese Legierungen weisen im Allgemeinen eine geringe Abschreckempfindlichkeit auf. Im Übrigen darf das Abschrecken auch nicht zu rasch erfolgen (Herstellangaben), um keine Empfindlichkeit in Bezug auf Spannungsrisskorrosion (SpRK) zu erzeugen. Um Beständigkeit gegen SpRK sicherzustellen, ist auch eine besondere Warmauslagerung nötig. Die Auslagerung findet bei EN AW-7020 (AlZn4,5Mg1) nach 3 bis 5 Tagen Raumtemperatur in zwei Temperaturintervallen statt. Bei dieser sogenannten Stufenauslagerung wird der abgeschreckte Werkstoff in der ersten Stufe bei 90 °C bis 100 °C ausgelagert und in der zweiten Stufe mit 145 °C bis 155 °C.

Zusammenhang zwischen der Temperatur und den unterschiedlichen Gefügebildern beim System AlCu (Bild 6)



Die 7000er (AlZnMgCu)-Legierungsfamilie mit Kupfer:

Zur Vermeidung von Anschmelzungen muss auch hier die Lösungsglüh-temperatur mit 460 °C bis 485 °C begrenzt werden. Im Gegensatz zu den kupferfreien AlZnMg-Legierungen ist schroffes Abschrecken, das heißt in Wasser erforderlich. Auch die Stufenauslagerung ist aus Korrosionsgründen erforderlich. Dazu wird - wieder nach 3 Tagen bei Raumtemperatur - in der ersten Stufe bei 100 °C bis 140 °C und anschließend in der zweiten Stufe bei 160 °C bis 190 °C ausgelagert. Bei den zink- und kupferhaltigen höherfesten Legierungen sind die Werkstoffeigenschaften hohe Festigkeit und relative Beständigkeit gegen Schicht- und Spannungsrissskorrosion (SpRK) gegenläufig (Tabelle 6). Soll höchste Festigkeit erreicht werden, wird die Temperatur in der ersten Auslagerungsstufe länger, die in der zweiten kürzer gehalten. Wird dagegen größeres Gewicht auf gutes Korrosionsverhalten gelegt, kann ein überalterter Auslagerungszustand durch eine kürzere erste und eine längere zweite Stufe eingestellt werden. Die Normung kennt mehrere verschiedene überalterte Zustände mit abfallender Festigkeit und steigender Korrosionsbeständigkeit (T79 bis T73).

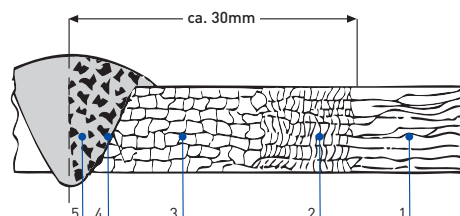
Die Richtwerte für die Wärmebehandlung der aushärtbaren Legierungen sind in Tabelle 2 (Weichglühen) und in Tabelle 3 (Lösungsglüh-, Abschreck-, und Auslagerungsbedingungen) zusammengestellt.

2. Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften durch Wärmeeinwirkung beim Schweißen, Löten und Einbrennlackieren

2.1 Auswirkungen der Schweißwärme

Die erforderliche Wärmemenge zum Schmelzschweißen von Aluminium ist trotz des niedrigeren Schmelzbereiches, 630 °C bis 660 °C, etwa gleichgroß wie beim Stahlschweißen. Der Grund hierfür liegt in der hohen Wärmeleitfähigkeit des Materials. Die Wirkung der Schweißwärme gehört eher zu den ungewollten Nebenwirkungen dieser Fügetechnik, da hiermit Werkstoffveränderungen und Bauteilverzüge verbunden sind. Entsprechend den Ausführungen in den vorangegangenen Kapiteln unterscheiden sich die aushärtbaren und die nichtaushärtbaren Legierungsgruppen in ihrem Verhalten bezüglich Festigkeitsänderung nur wenig, weil beide in der Regel einen Festigkeitsverlust erleiden. Ausnahmen bilden lediglich die nichtaushärtbaren Werkstoffe im Zustand weich und in den nur geringfügig verfestigten Zuständen H22/H32, bei denen kein beziehungsweise nur ein geringer Festigkeitsverlust auftritt. Je nach Schweißverfahren und Konstruktion ist der Bereich, in dem sich der geschweißte Grundwerkstoff verändert, unterschiedlich breit. Allgemein wird eine Zone von zirka 30 mm rechts und links der Naht als Wärmeeinflusszone (WEZ) mit Werkstoffveränderungen angesehen. Vom unbeeinflussten Grundwerkstoff über die Übergangszone und die erweichte Rekristallisationszone reichen die Werkstoffveränderungen bis zum Gussgefüge im aufgeschmolzenen Nahtbereich (Bild 7). Die Unter-

Gefügebereiche in der Wärmeeinflusszone einer Schweißnaht (Bild 7)

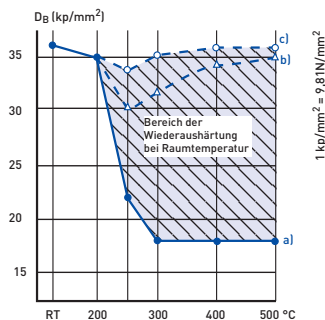


- 1: unbeeinflusster Grundwerkstoff; 2: Übergangszone;
3: Rekristallisationszone (weich); 4: Bindezone/Schmelzlinie;
5: Gussgefüge in der Naht

schiede in der Wirkung der Schweißwärme auf die verschiedenen Legierungsgruppen ist Tabelle 1 zu entnehmen. Die nichtaushärtbaren Aluminiumlegierungen erleiden in der Wärmeeinflusszone einen Festigkeitsabfall, der bis auf den Werkstoffzustand „weich“ des Grundwerkstoffes zurückgehen kann. Dieser Verlust ist nicht wieder rückgängig zu machen, da dazu eine erneute Kaltverformung notwendig wäre. Die aushärtbaren Legierungen zeigen ebenfalls den Festigkeitsabfall in der WEZ. Hierbei besteht jedoch die Möglichkeit, wenn es das Werkstück zulässt (Größe, Verzug), über eine vollständige Wärmebehandlung – Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern – die Schweißnahtfestigkeit wieder anzuheben. Die ursprünglichen Festigkeiten der Knetlegierungen können aber meist dann doch nicht ausgenutzt werden, wenn die Schweißnaht als solche geringere mechanische Werte bedingt. Wird nach dem Schweißen lediglich warmausgehärtet, ist allerdings ebenfalls eine gewisse Festigkeitssteigerung möglich. Dieser Effekt ist bei abschreckempfindlichen Legierungen wie EN AW-6082 (DIN 1725: Al MgSi1) gering, bei Al MgSi0,5-ähnlichen (EN AW-6060, -6063, -6106) durchaus beachtenswert. Was im Einzelfall hier zu gewinnen ist, muss durch Versuche ermittelt werden.

Eine Sonderstellung innerhalb der Schweißwerkstoffe nimmt EN AW-7020 (Al Zn4,5Mg1) ein. Nach dem Wärmestoß durch die Schweißung (Lösungsglühen) findet bei Raumtemperaturlagerung von 60 bis 90 Tagen eine selbständige Festigkeitssteigerung in der Wärmeeinflusszone durch Kaltaushärtung statt (Bild 8). Allerdings ist der Werkstoff dann in der WEZ hinsichtlich Korrosion nicht mehr in einem optimalen Zustand. Aus diesem Grund wird oft, abhängig von der Durchbildung der Konstruktion und von den Umgebungsbedingungen, eine nochmalige Warmauslagerung (Zweistufenauslagerung, siehe Tabelle 3a) der geschweißten Konstruktion vorgeschrieben (siehe auch DIN 4113-3, Abschnitt 7.4.10). Dabei werden die Beständigkeit gegen Schichtkorrosion und Spannungsrissskorrosion (SpRK) verbessert und Eigenspannungen abgebaut.

Wiederaushärtung bei Raumtemperatur von AlZn4,5Mg1 nach Wärmestoß (Bild 8)



- a) unmittelbar nach dem Wärmestoß (4 Minuten Dauer)
b) nach 1 Monat Raumtemperlagerung
c) nach 3 Monaten Raumtemperlagerung

2.2 Wärmebehandlung von Bauteilen vor und nach dem Schweißen

Bei größeren Materialquerschnitten kann ein Vorwärmen der Fügezone erforderlich sein. Dabei sollten die Temperaturen auch kurzzeitig die Grenze von 200 °C nicht überschreiten. Dies gilt für die aushärtbaren und nichtaushärtbaren Legierungen. In einer Schweißkonstruktion entstehen zwangsläufig Schweißspannungen. Die Höhe wird von der jeweiligen Konstruktion, dem verwendeten Schweißverfahren und von der Schweißfolge wesentlich beeinflusst. Ein „Spannungsarmglühen“ ist aber nur sehr bedingt möglich. Außerdem sollte dazu die gesamte Schweißbaugruppe in den Ofen eingebracht werden.

Im konkreten Fall muss beachtet werden, ob die Wärmebehandlung den Werkstoffzustand nicht unkontrolliert verändert. Nichtaushärtbare Legierungen können, sofern sich alle Komponenten bereits vor dem Schweißen im weichen Zustand befinden, bei der Weichglühtemperatur von 350 °C spannungsfrei geglüht werden. Um einen ausreichend spannungsarmen Zustand zu erreichen, werden auch Temperaturen von 250 °C über einige Stunden angewendet. Die Entfestigung des Grundwerkstoffes ist bei kaltverfestigtem Material allerdings zu beachten.

Die Temperaturen und Glühzeiten, die bei den aushärtbaren Legierungen zum Spannungsarmglühen angewendet werden müssten, sind so hoch, dass die Gefügeveränderungen zu unkontrollierten Zuständen in Bezug auf Festigkeit und teilweise zu verschlechtertem Korrosionsverhalten führen würden. Zu einem Spannungsarmglühen kann daher nicht geraten werden. Ein eingeschränkter Abbau von Schweißspannungen ist durch eine Behandlung im Warmauslagerungsbereich jedoch möglich.

Generell ist zu beachten, dass durch Spannungsarmglühen weiterer Verzug der Bauteile erfolgen kann.

Schweißkonstruktionen aus EN AW-7020 T6 (DIN 1725: AlZn4,5Mn F35/F34) dürfen erst voll beansprucht werden, wenn die Kaltaushärtung abgeschlossen ist.

Die Zugfestigkeit einer MIG-Stumpfnahst steigt dabei auf 275 N/mm² bei Dicken ≤ 15 mm, bei Kehlnähten (Schub) werden 65 % dieses Wertes angesetzt.

Diese Kaltaushärtung gilt nach 3 Monaten Lagerung bei Raumtemperatur als erreicht. Um den Prozess zu beschleunigen, bieten sich als Behandlungsmöglichkeiten an (DIN 5513):

- Nach 1 bis 3 Tagen Raumtemperlagerung wird eine Auslagerung bei 120 °C bis 135 °C über 24 h gefahren
- alternativ 60 °C über 60 h.

2.3 Wärmeeinfluss beim Einbrennlackieren

Einbrennlackieren ist mit den modernen Anlagen und Temperaturführungen im Allgemeinen problemlos möglich. Keine nennenswerten Festigkeitsminderungen ergeben sich bei Einhaltung folgender Parameter:

EN AW-6060 (DIN 1725: AlMgSi0,5)	240 °C, 40 min.
EN AW-6063 (DIN 1725: AlMgSi0,5)	200 °C, 120 min.
EN AW-6082 (DIN 1725: AlMgSi1)	200 °C, 30 min.
EN AW-7020 (AlZn4,5Mg1)	180 °C, 30 min.

Prozessdaten für andere Legierungen lassen sich danach abschätzen oder sind beim Halbzeugwerk zu erfragen.

3. Eigenspannungen in spanend bearbeiteten Werkstücken aus Knethalbzeug

Eigenspannungen im Halbzeug können bei der spanenden Bearbeitung aus dem Gleichgewicht gebracht werden. Das führt dann zu Verwerfungen und Maßabweichungen am Werkstück. Die Eigenspannungen können aus Kaltumformungen und Wärmebehandlungsprozessen stammen. Die maximale Höhe der inneren Spannungen ist durch die Dehngrenze des Werkstoffes gegeben. Im Halbzeugwerk werden die Eigenspannungen durch Recken beziehungsweise Stauchen abgebaut. Durch geringfügige Umformung (1 bis 3 %) oberhalb der Dehngrenze werden die vorhandenen Eigenspannungen durch leichtes plastisches Fließen weitgehend abgebaut. Halbzeuge in diesen Werkstoffzuständen sind auf jeden Fall Halbzeug, das beim Verarbeiter einer nachträglichen Wärmebehandlung unterzogen wird, vorzuziehen. Bei den aushärtbaren Legierungen wären dies die Zustände Tx5xx (siehe Tabelle 5).

3.1 Abbau von Eigenspannungen in Knethalbzeugen für die spanende Bearbeitung beim Verarbeiter

Eigenspannungen in kaltverfestigtem Material lassen sich ohne Einbuße an Festigkeit über eine Glühbehandlung nicht beseitigen. Auch die warm-aushärtenden Legierungen be-

nötigen für einen weitgehenden Eigenspannungsabbau so hohe Temperaturen, dass mit Eigenschaftverschlechterungen hinsichtlich Festigkeit, Korrosionsverhalten und Spanbarkeit gerechnet werden muss. Ein geringer Eigenspannungsabbau findet im Bereich der Warmauslagerungstemperaturen statt. Die Werkstoffe der weit verbreiteten Automatenlegierung 2007 (DIN 1725: Al CuMgPb) können zum Beispiel über eine vorsichtige Wärmebehandlung bei 200 °C über 2 h behandelt werden. Dabei ist aber mit Festigkeitsverlust zu rechnen.

4. Biegen von Halbzeugen

Die kleinsten erzielbaren Biegeradien sind abhängig vom Querschnitt des Werkstückes, vom Werkstoff und Werkstoffzustand, von der Biegegeschwindigkeit und der Biegetemperatur. Im weichem Zustand sind die kleinsten Radien erzielbar. Mit zunehmender Werkstofffestigkeit ergeben sich größere minimal erzielbare Halbmesser. Eine weitere Verkleinerung der Biegeradien lässt sich nur durch Warmbiegen erreichen. Als Anhaltswert kann man in etwa die Hälfte der durch Kaltbiegen erzielbaren Radien ansetzen. Auch hierbei sind Vorversuche notwendig. Ebenso muss der Verarbeiter klären, ob die durch die Anwärmung verursachten Festigkeitsänderungen und gegebenenfalls Festigkeitsprünge durch lokales Erwärmen im fertigen Bauteil zulässig sind.

4.1 Wärmebehandlung für das Biegen von Halbzeugen

Für die in Frage kommenden Legierungen liegen die an sich idealen Warmformtemperaturen zwischen 300 °C bis 450 °C. Kaltverfestigte Werkstoffe verlieren dabei in den erwärmten Bereichen ihre Festigkeit. Bei längerer Erwärmung gehen die Werte auf die des weichen Zustandes zurück. Die warmausgehärteten Legierungen sinken ebenfalls in ihrer Festigkeit und müssten vollkommen neu wärmebehandelt werden. Abhängig von Legierung und Herstellungsprozess muss – sowohl bei naturharten wie auch aushärtbaren Werkstoffen – zudem mit Grobkorn (Optik) und Beeinträchtigung in der Korrosionsbeständigkeit gerechnet werden.

Aus diesem Grund werden die Biegetemperaturen und die Einwirkungszeiten in der Praxis geringer gewählt. Ein Anwärmen auf 100 °C bis 200 °C erleichtert bereits die Biegearbeit. Im Temperaturbereich unterhalb 200 °C kann AlMgSi-Material 30 min gehalten werden (mit Aufheizen oder mehrmaligem Erwärmen), niedrig legiertes AlMgSi auch länger. Unter diesen Bedingungen ist mit keinem großen Festigkeitsabfall zu rechnen. Bei AlZnMg-Legierungen liegen die Temperaturen mit maximal 180 °C etwas niedriger. Eine Ausnahme bilden die Legierungen AlCuMg und AlMg5, die nach Möglichkeit aus Korrosionsgründen nicht erwärmt werden sollten.

Ein oft gebrauchtes Verfahren beim Umformen aushärtbarer Werkstoffe besteht darin, die Verformung im Zustand T4 (= kalt-

ausgehärtet) vorzunehmen und danach auf T6 auszuhärten. Die Temperaturführung sollte mit dem Hersteller des Halbzeugs abgeklärt werden. Zum Beispiel kann der Werkstoff EN-AW 7020 (Al Zn4,5 Mg1) speziell für Biegearbeiten im Zustand T4 bezogen werden. In diesem Zustand oder nach einer Rückbildungsglühung/Stoßglüfung (gemäß Hersteller, zum Beispiel 150 °C, 30 min) erfolgt die Biegeoperation. Danach erfolgt das Warmauslagern auf den Zustand T6. Wenn Halbzeug im Zustand T6 gebogen werden muss (ohne oder nach einer speziellen Glüfung gemäß Hersteller), sollte es in der Regel, abhängig von der späteren Verwendung und den Umgebungsbedingungen, einer nochmaligen abschließenden Wärmebehandlung unterzogen werden, entsprechend den üblichen Warmauslagerungsbedingungen, möglichst in zwei Stufen.

5. Wärmebehandlungsprozess beim Verarbeiter in der Praxis

Aluminiumwerkstoffe zeigen gegenüber Stahl keine Anlauffarben bei Erwärmung des Materials. Für die Beurteilung der vorliegenden Temperatur eines Werkstückes gibt es die Möglichkeit, mit Temperaturindikatoren (Thermofarben) zu arbeiten. Die Anzeige erfolgt durch Farbumschlag im entsprechenden Temperaturintervall. Thermoelemente auf Nickel-Chrom-Nickel-Basis liefern exaktere Werte, die eine genaue Temperaturmessung im Ofen und in der Charge selber erlauben. Mit mobilen und direkt anzeigenden Kontaktthermometern ist die Oberflächentemperatur am Werkstück sofort zu bestimmen. Wärmebehandlungsöfen sind von den Herstellern meist mit geeigneten Messmitteln ausgestattet.

Die Genauigkeit und Sorgfalt bei der Wärmebehandlung von Aluminium ist eine entscheidende Voraussetzung, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Diese Bedingungen liegen meist nur in industriell genutzten Ofenanlagen vor. Eine Genauigkeit der Temperaturregelung von ± 3 °C bis 5 °C ist besonders für die Legierungsgattungen mit Zink- und Kupferanteilen erforderlich, um Anschmelzungen zu vermeiden (eine ausreichende Homogenität im Halbzeug vorausgesetzt). Die Angabe der Lösungsglühtemperatur bezieht sich auf die Metalltemperatur.

Die Glühzeiten betragen im Normalfall 30 min, je nach Werkstückform, Stapeldichte und Ofengegebenheit aber auch bis zu 6 h (unter Berücksichtigung der Durchwärmzeiten). Wie bereits erwähnt, sind die angegebenen Temperaturwerte und Zeiten als Anhaltswerte zu verstehen, die im konkreten Fall mit dem Halbzeughersteller abgesprochen werden müssen. Das zur vollständigen Wärmebehandlung notwendige Anschrecken aus Lösungsglühtemperatur ist wärmetechnisch gesehen im Allgemeinen immer erfolgreich und bereitet auch wenig Mühe, wenn man die Teile so mit Wasser abschrecken kann, indem man sie völlig in Wasser eintaucht. Abschreckbäder sollten grundsätzlich neben den Glühöfen angeordnet werden, damit der Temperaturverlust beim Wechsel vom Glühofen zum Abschreckbad möglichst gering ist.

Abschrecken mit Wasser bedingt fast immer Verzug, den man durch kontrolliertes Eintauchen bis zu einem gewissen Grad klein halten kann, zum Beispiel in dem längliche Teile nicht quer eingetaucht werden. Das Eintauchen der Teile in warmes Wasser oder die Verwendung von sogenannten Quenchants hilft ebenfalls mit, den Verzug gering zu halten. Quenchants sind Zusätze zum Wasser in der Form wasserlöslicher Polymere. Das Abschrecken großer Teile, vor allem wenn sie dazu noch dünnwandig sind, ist immer ein Problem, denn ein alternatives Abschrecken mit dem Wasserschlauch bringt meist nur noch mehr Verzug und birgt das zusätzliche Risiko, dass einzelne Stellen nicht mit ausreichender Geschwindigkeit abgekühlt werden. Hier sind dann meist Versuche angesagt.

Das Verwenden von Luft zum Abschrecken, wie dies in den Halbzeugwerken bei den dafür geeigneten Legierungen fast ausschließlich geschieht, kann beim Verarbeiter eigentlich kaum praktiziert werden, weil das Abkühlen mit Luft sehr kontrolliert gesteuert werden muss, anderenfalls man nur unzureichende Endfestigkeiten oder ungleich ausgehärtetes Material erhält. Will ein Verarbeiter dieses Verfahren an-

wenden, so kommt er um den Bau entsprechender Anlagen kaum herum. Solche Anlagen und die in diesem Zusammenhang notwendigen Gebläse und Gebläseleistungen müssen weitgehend der Werkstückform angepasst sein, wobei die Wirksamkeit der im Einzelfall getroffenen Einstellungen (Anzahl der Gebläse, Blasrichtung und Luftgeschwindigkeit) anhand von Materialproben (Zugstäbe, unter Umständen auch Härtemessungen) am ausgehärteten Material zu überprüfen ist.

Das Aushärten setzt entsprechende Öfen voraus. Öfen, die zum Lösungsglühen verwendet werden, lassen sich meist auch hierfür verwenden. Wenn nur ausgehärtet werden soll, weil zum Beispiel Werkstücke nach einem vorgenommenen Umformvorgang vom Zustand T4 (kaltausgehärtet) auf den Zustand T6 (voll warmausgehärtet) gebracht werden sollen, genügen auch Öfen, die lediglich bis zirka 200 °C fahren und die deshalb auch preisgünstiger sind. Das Aushärten selbst ist wegen der in der Regel langen Ofenzeiten relativ unproblematisch. Wichtig ist, dass die Öfen auch bei großen Ofenfrachten die notwendige Leistung bringen und die Wärme gleichmäßig verteilt wird (keine toten Ecken).

Teil 2 – Wärmebehandlung von Aluminium-Gusslegierungen

6. Wärmebehandlung von Aluminium-Gusslegierungen

Die Eigenschaften von Aluminium-Gusslegierungen lassen sich durch eine Wärmebehandlung gezielt verbessern, wobei sich die Art der Wärmebehandlung im Wesentlichen richtet nach dem

- Ziel (beabsichtigte Wirkung),
- Gusswerkstoff und/oder
- Gießverfahren
(siehe Tabelle 7).

Im Vergleich zu Sand- und Kokillenguss ist bei Druckguss zu beachten, dass bei Druckgussstücken Blasenbildung oder Blisterbildung möglich ist, und deshalb nur eine eingeschränkte Wärmebehandlung erfolgen kann (siehe 7.5.3.1). Druckgussstücke, die nach speziellen Druckgießverfahren hergestellt wurden, lassen sich dagegen normal aushärten.

7. Aushärten

Das Aushärten, die weitaus wichtigste Wärmebehandlung, ermöglicht es, die Festigkeit, die 0,2 %-Dehngrenze sowie die Härte aushärtbarer Gusswerkstoffe zu erhöhen (siehe 7.1). Die Festigkeitssteigerung erfolgt im Gegensatz zur Kaltverfestigung ohne nennenswerte Einbuße an Dehnung beziehungsweise Verformbarkeit.

Es werden zwei Hauptfälle des Aushärtens unterschieden:

Aushärten

Normalfall des Aushärtens: a) + b) + c)

- a) Lösungsglühen
- b) Abschrecken
- c) Auslagern
 - Warmauslagern
 - Kaltauslagern

Sonderfälle des Aushärtens

- **Sonderfälle des Warmauslagerns**
 - Teilaushärten
 - Überhärten (Stabilisieren)
- **Sonderfall des Lösungsglühens**
 - Stufenglühen
- **Aushärten ohne Lösungsglühen**
 - vereinfachtes Aushärten
 - Selbstaushärten

Je nach dem verwendeten Verfahrensschritt spricht man auch von Warm-, Kalt- oder Teilaushärten. So wird zum Beispiel der Zustand warmausgehärtet (T6) durch die Verfahrensschritte Lösungsglühen, Abschrecken und anschließendes Warmauslagern erreicht (siehe auch Tabelle 10).

7.1 Aushärtbare Legierungen

Aluminium-Gusslegierungen, die folgende Legierungsbestandteile enthalten, lassen sich aushärten:

- | | |
|------------------------|--------------|
| a) Kupfer | AlCu Typen |
| b) Silizium | AlSiMg Typen |
| zusammen mit Magnesium | |
| c) Zink | AlZnMg Typen |
| zusammen mit Magnesium | |

Das Aushärtungsverhalten der einzelnen Legierungsbestandteile ist jeweils unterschiedlich und wird von den übrigen Legierungsbestandteilen beeinflusst. Liegen die Gehalte der aushärtenden Legierungsbestandteile an der unteren Grenze der Norm, so ist der Aushärtungseffekt verhältnismäßig gering. Aushärtbare Legierungen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

7.2 Grundlagen des Aushärtens

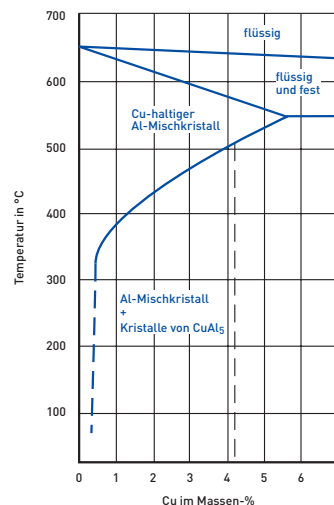
Das Aushärten beruht auf **Entmischungsvorgängen**, die im übersättigten Mischkristall bei Raumtemperatur oder mäßig erhöhter Temperatur ablaufen. Im Gegensatz zu der diffusionslosen martensitischen Umwandlung bei Stahl ist hier die Entmischung diffusionsgesteuert und stark von der Zeit und Temperatur abhängig.

Entmischungsvorgänge können stattfinden, wenn der Aluminiummischkristall eine mit der Temperatur abnehmende Löslichkeit für einen bestimmten Legierungsbestandteil aufweist. Kühlt man von einer hohen Temperatur rasch ab (abschrecken), kann der im Mischkristall gelöste Legierungsbestandteil nicht schnell genug ausscheiden. Es entsteht ein instabiler übersättigter Mischkristall, der bestrebt ist, den im Überschuss gelösten Bestandteil auszuscheiden und sich damit dem energetisch günstigeren Gleichgewichtszustand anzunähern. Dies geschieht während des Auslagerns. Die treibende Kraft für die diffusionsgesteuerte Entmischung bei Raumtemperatur oder mäßig erhöhter Temperatur ist jedoch zu gering, um die Ausscheidung innerhalb der gewählten Zeit vollständig ablaufen zu lassen. Die Atome des im Überschuss gelösten Bestandteiles gruppieren sich lediglich auf bevorzugte Stellen im Gefüge des Al-Mischkristalls um, ohne die endgültige Gleichgewichtsphase zu bilden. Diese Umgruppierung (submikroskopisch kohärente und teilkohärente Ausscheidungen) führt zu einer Verspannung im Kristallgitter und somit zu einem Anstieg der Festigkeit.

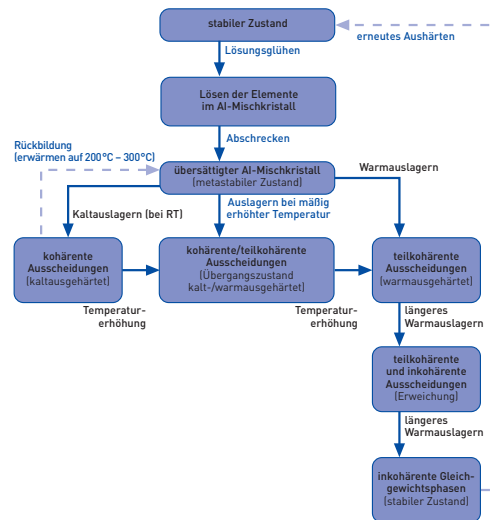
Das Zustandsdiagramm für Al-Cu (Bild 9) zeigt die Abhängigkeit der Löslichkeit von der Temperatur. Die maximale Löslichkeit von Cu im Al-Mischkristall fällt von über 4 % bei 500 °C auf unter 0,5 % bei 300 °C. Legierungen, die ein ähnliches Verhalten aufweisen, sind im Abschnitt 7.1 aufgeführt.

Der Vorgang des Aushärtens ist reversibel. Er lässt sich wiederholen (Bild 10), jedoch besteht hierbei die Gefahr einer Kornvergrößerung.

Löslichkeit von Kupfer in Aluminium (Bild 9)



Schema des Aushärtungsvorganges (Bild 10)



Basierend auf einschlägigen Arbeiten des französischen Gießereinstitutes mit der Legierung EN AC-Al Si7Mg (EN AC-42000) werden zwei Größen wie folgt definiert:

Qualitätsindex: $Q = 0,1 \times R_m + 15 \times \log A$
 0,2 %-Dehngrenze: $R_{p0,2} = R_m - 60 \times \log A - 13$

wobei R_m = Zugfestigkeit, A = Bruchdehnung und die Konstanten 15, 60 beziehungsweise 13 legierungsabhängig sind.

■ Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen

Der Qualitätsindex gibt einen Hinweis auf die Qualität des Gussstückes. Er ist im Wesentlichen von den Gefügemerkmalen (Porosität, Korngröße, Einschlüsse, Dendritenarmabstand) abhängig und lässt sich durch ein nachträgliches Warmauslagern, im Gegensatz zur 0,2 %-Dehngrenze, kaum verändern. Durch Änderung von Zeit und Temperatur beim Warmauslagern kann man lediglich eine Eigenschaft (zum Beispiel Zugfestigkeit) auf Kosten der anderen (Dehnung) verbessern; der Qualitätsindex bleibt jedoch unverändert (Verlauf entspricht Linie Mg in Bild 13). Beide Eigenschaften lassen sich gleichzeitig nur durch eine Erhöhung der Gefügequalität verbessern; der Qualitätsindex steigt (entspricht Linie Fe in Bild 13). Die Gefügequalität (bestimmt durch die Gießtechnologie, Legierungszusammensetzung, Veredlungsgrad u.a.) ist Voraussetzung, gute Ergebnisse durch Aushärten zu erzielen.

7.3 Normen und Richtlinien

Die Legierungen, bei denen die Aushärtung technisch angewendet wird, sind in Tabelle 8 angegeben.

Der Zustand wird als Kurzzeichen (T4, T6) angegeben (Tabelle 10 sowie DIN EN 1706 Ziff. 4.3 und AlZ-Merkblatt W 2). Tabelle 9 enthält Richtlinien für die Wärmebehandlung von Gussstücken (Tabelle 9). Darüber hinaus sind Temperatur und Dauer der Behandlung nach der beabsichtigten Wirkung, nach Gestalt, Gewicht, Wanddicke und Gefügeausbildung der Gussstücke, Gießverfahren und vorhandenen Einrichtungen zwischen Gießerei und Abnehmer festzulegen.

7.4 Verfahrensschritte des Aushärtens

Das Aushärten besteht im Wesentlichen aus den drei Teilschritten (siehe Bild 11):

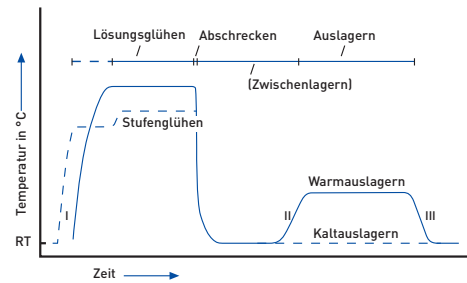
- Lösungsglühen
- Abschrecken
- Auslagern

Der Erfolg des Aushärtens hängt entscheidend von den Lösungsglüh-, Abschreck- und Auslagerungsbedingungen ab. Wichtig ist die Einhaltung der Zeiten vor dem Abschrecken (Vorkühlzeit) und Warmauslagern (Zwischenlagerungszeit). Durch zweckmäßiges Abstimmen der einzelnen Vorgänge bei der Wärmebehandlung, wie Dauer und Temperatur des Lösungsglühens und des Auslagerns sowie Vorkühlzeit und Zwischenlagerungszeit, lassen sich die für den jeweiligen Verwendungszweck am besten entsprechenden Eigenschaften erreichen.

Die Wirkung des Aushärtens wird außerdem von folgenden Parametern beeinflusst:

- Zusammensetzung der Legierung
- Gefügemodifikationen
(Schmelzbehandlung, Veredlung u.a.)
- geometrische Gussstückabmessungen.

Schema des Aushärtungsverfahrens (Bild 11)

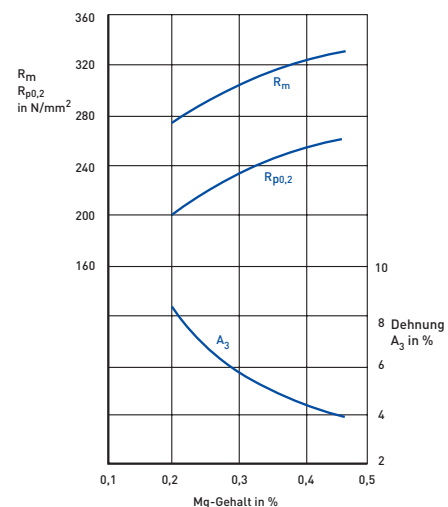


I, II, III: unkritische Aufheiz-/Abkühlgeschwindigkeit;
RT: Raumtemperatur

Der Einfluss der Legierungsbestandteile ist in Bild 12 für EN AC-Al Si7Mg0,3 T6 dargestellt. Durch die Erhöhung des Mg-Gehaltes von 0,2 auf 0,4 % lässt sich die Festigkeit der ausgehärteten Legierung von unter 280 bis über 320 N/mm² steigern, wobei gleichzeitig die Dehnung abnimmt.

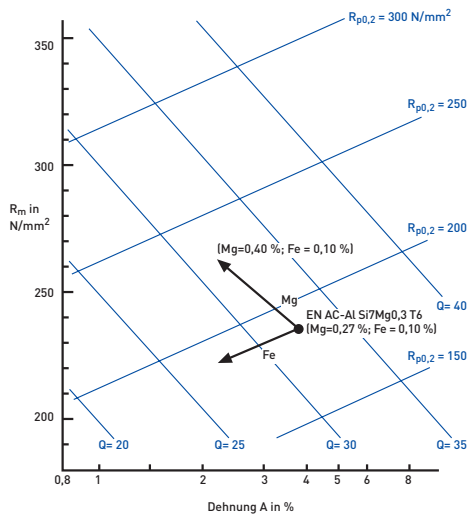
Die unterschiedliche Wirkung des Mg sowie der Legierungsbeimengung Fe auf die Aushärtbarkeit ist in Bild 13 für EN AC-Al Si7Mg0,3 T6 dargestellt. Während Mg die Aushärtbarkeit beeinflusst, wird die Gussqualität entscheidend durch eine Abnahme des Fe-Gehaltes verbessert. Es ist hier deutlich zu erkennen, daß eine analytische Überwachung in Gießereien erforderlich ist, besonders wenn Schrott und Rücklaufmaterial neben Masseln verwendet werden.

Einfluss des Mg-Gehaltes auf die Aushärtbarkeit von EN AC-Al Si7Mg0,3 (Normzugstäbe in Sandguss nach BS) (Bild 12)



R_m = Zugfestigkeit R_{p0,2} = 0,2 %-Dehngrenze

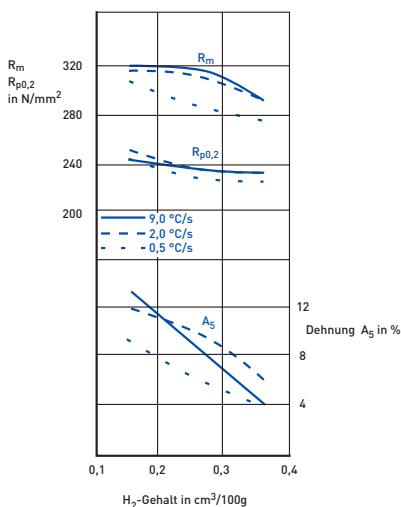
Einfluss des Mg- und Fe-Gehaltes auf die Eigenschaften von EN AC-Al Si7Mg0,3 T6 (Bild 13)



R_m = Zugfestigkeit; $R_{p0,2}$ = 0,2 %-Dehngrenze; Q = Qualitätsindex

Die Abhängigkeit der Eigenschaften von EN AC-Al Si7Mg0,3 T6 von den Gießbedingungen, wie Entgasungsbehandlung und Erstarrungsgeschwindigkeit, zeigt Bild 14. Der Einfluss der Wanddicke der Gussstücke auf die Endeseigenschaften ist in Bild 18 dargestellt. Die Wanddicke beeinflusst den Temperaturgradienten beim Abschrecken.

Einfluss des H₂-Gehaltes und Erstarrungsgeschwindigkeit auf die Eigenschaften von EN AC-Al Si7Mg0,3 T6 (Bild 14)



R_m = Zugfestigkeit; $R_{p0,2}$ = %-Dehngrenze

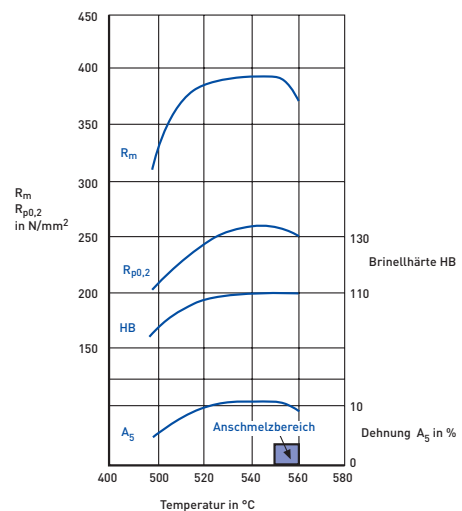
7.4.1 Lösungsglöhnen

Durch Lösungsglöhnen werden die aushärtenden Legierungsbestandteile bei erhöhter Temperatur vollständig in Lösung gebracht.

Temperatur und Dauer des Lösungsglühens beeinflussen sich gegenseitig und sollen aufeinander abgestimmt sein. Bei höheren Temperaturen reicht eine kürzere Glühzeit. Zu hohe Glühtemperaturen führen zu Anschmelzungen, und das Gussstück wird unbrauchbar. Eine zu niedrige Lösungsglühtemperatur kann jedoch nicht durch eine verlängerte Glühzeit ausgeglichen werden. Zu hohe Temperaturen und zu lange Glühzeiten können eine Kornvergrößerung bewirken.

Glühtemperatur: In der Praxis liegen die Lösungsglühtemperaturen etwa 10 °C bis 15 °C unterhalb des Ansmelzbegins und müssen sehr genau eingehalten werden. Auch wenn die angegebene Höchsttemperatur nicht überschritten wird, kann es zu Anschmelzungen kommen. Dies kann auch der Fall sein, wenn die Zusammensetzung nicht normgerecht ist (zum Beispiel erhöhter Siliziumgehalt bei AC-Al Cu4Ti) oder wenn niedrigschmelzende eutektische Gefügebestandteile vorhanden sind. Überhitzte (verbrannte) Gussstücke erkennt man häufig an Ausschwitzungen oder an einer Schwarzfärbung bei magnesiumhaltigen Legierungen. Ein Unterschreiten der angegebenen Lösungsglühtemperatur verringert den Aushärtungseffekt (Bild 15). Das Ansmelzverhalten der Legierung kann man durch die Anwendung der Differenzial-Thermoanalyse an kleinen Proben rasch ermitteln.

Einfluss der Lösungsglühtemperatur auf die nach dem Warmauslagern erreichten Festigkeitseigenschaften von EN AC-Al Cu4Ti (Bild 15)

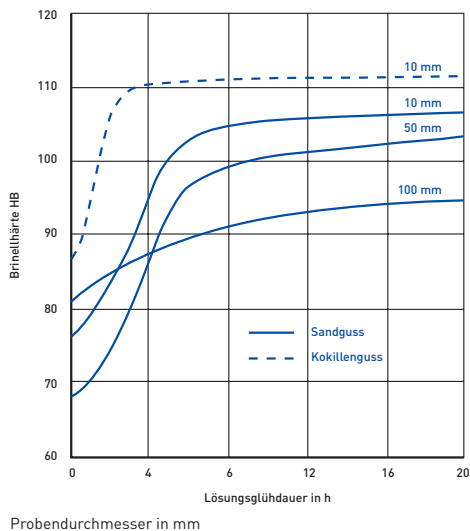


R_m = Zugfestigkeit; $R_{p0,2}$ = 0,2 %-Dehngrenze

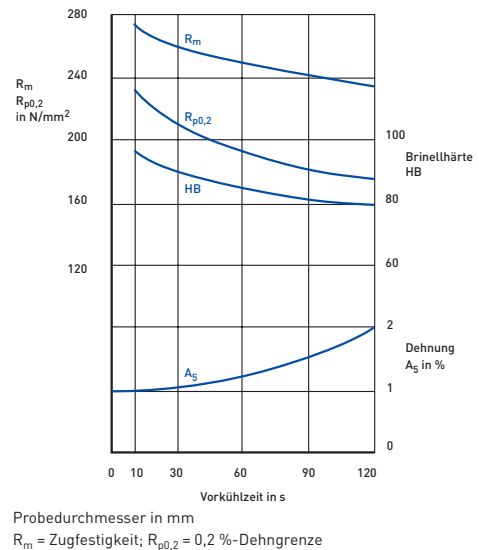
Glühdauer: Die Glühdauer (in der Regel mehrere Stunden) wird vom Gießverfahren, Gussteilabmessungen, metallurgischer Vorgeschichte und Gießparametern sowie Lösungsglüh-temperatur mitbestimmt. Die Glühzeit zählt ab Erreichen der vorgeschriebenen Lösungsglüh-temperatur (Metalltemperatur). Während des Lösungsglühens gehen die aushärtenden Bestandteile umso rascher und vollständiger in Lösung, je feiner das Gefüge vorliegt (Bild 16).

Die angegebene Zeitspanne (Tabelle 9) ist daher so zu verstehen, dass die kürzere Zeit für Kokillenguss, dünnwandige Gusstücke und höhere Lösungsglüh-temperaturen gilt, die längere Zeit entsprechend für Sandguss, dickwandige Gusstücke und niedrige Lösungsglüh-temperaturen. Der Vorgang des Lösungsglühens wird beschleunigt in Gusstücken, die schon einmal wärmebehandelt waren. Eine Verlängerung der Glühzeit kann bei sehr langsam erstarrten Gusstücken, etwa bei dickwandigem Sandguss, nützlich sein. Sie wird gelegentlich bei Gusstücken aus EN AC-Al Cu4Ti und EN AC-Al Cu4MgTi angewendet, um Höchstwerte der mechanischen Eigenschaften zu erzielen.

Einfluss der Lösungsglüh-dauer auf die Härte von warm-ausgehärtetem EN AC-Al Si10Mg(a) bei verschiedenen Gieß-bedingungen (Bild 16)



Einfluss der Vorkühlzeit auf die mechanischen Eigenschaften von warmausgehärtetem (T6) EN AC-Al Si10Mg(a) (Bild 17)



verbleiben im Abschreckbad, das sich höchstens auf 40 °C bis 60 °C erwärmen darf. Die Zeit zwischen Entnahme aus dem Ofen und Abschrecken muss kurz sein, um den gewünschten Aushärtungseffekt zu erzielen (Bild 17). 10 Sekunden sind bei kleineren Gusstücken anzustreben.

Abschreckmittel: Wasser wird am häufigsten als Abschreckmittel eingesetzt. Durch die Änderung der Ausgangstemperatur des verwendeten Wassers ist es möglich, die Abschreckgeschwindigkeit zu steuern und spezielle Effekte zu erzielen (Tabelle 11 und Bild 18). Die Bildung von Dampfblasen im Abschreckmittel stört den Wärmeübergang. Bei Gusstücken mit Hohlräumen ist zu berücksichtigen, dass die Wärmeabfuhr aus den Innenflächen vermindert ist. Durch die verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten in den unterschiedlich dicken Partien von komplizierten Gusstücken können Spannungen entstehen, die unter Umständen zu einem Verziehen des Gusstückes führen. Bei solchen Gussteilen und bei Legierungen, die zu hohen Gussspannungen neigen, sind Maßnahmen für einen geringeren Temperaturgradienten beim Abschrecken zu treffen (zum Beispiel Temperatur des Abschreckbades auf 70 °C bis 100 °C erhöhen).

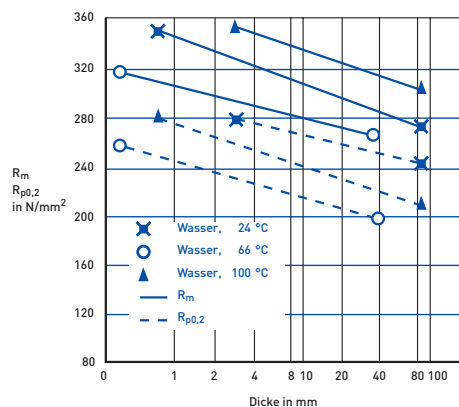
7.4.2 Abschrecken

Nach dem Lösungsglühen werden die Teile auf Raumtemperatur abgeschreckt, um eine Ausscheidung der übersättigt gelösten Bestandteile zu vermeiden.

Beim Abschrecken kommt es darauf an, das Temperaturgebiet zwischen Lösungsglüh-temperatur und etwa 200 °C möglichst rasch zu durchlaufen. Man schreckt in der Regel durch Eintauchen in kaltes Wasser ab. Die Gusstücke

Dadurch werden die Spannungen vermindert bei gleichzeitiger Abnahme der Festigkeitseigenschaften. Es kann zweckmäßig sein, Teile aus einem warmen Abschreckbad anschließend sofort in ein Bad mit kaltem Wasser zu tauchen, um ein unkontrolliertes Aushärten zu vermeiden. Unmittelbar nach dem Abschrecken sind die Gusstücke noch weich und verformbar. Erforderliche Richtarbeiten sind in diesem Zustand auszuführen. Teile, die man nach dem Abschrecken nicht sofort richten kann, werden tiefgekühlt gelagert, um einen Härteanstieg zu vermeiden.

Einfluss der Probendicke und Abschreckgeschwindigkeit auf die Eigenschaften der warmausgehärteten USA Legierung A 356-T6 (ähnlich EN AC-Al Si7Mg0,3 T6) (Bild 18)



Wärmebehandlung: 538 °C-10 h/abgeschreckt/177 °C-3 h
 Abschreckgeschwindigkeiten gerechnet für den Bereich 399-288 °C.
 R_m = Zugfestigkeit; $R_{p0,2}$ = 0,2 %-Dehngrenze

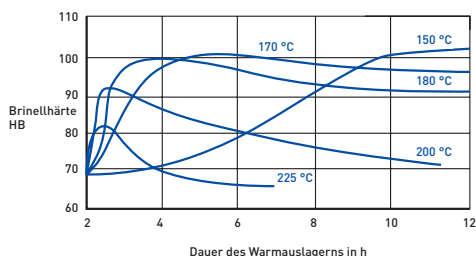
7.4.3 Auslagern

Nach dem Lösungsglühen und Abschrecken werden die Gussstücke mehrere Tage bei Raumtemperatur (Kaltauslagern) oder mehrere Stunden bei mäßig erhöhter Temperatur (Warmauslagern) gehalten, um durch Entmischungsvorgänge die gewünschten Festigkeitseigenschaften zu erzielen. Zwischen diesen Auslagerungsarten gibt es keine scharfen Übergänge.

7.4.3.1 Warmauslagern

Gussstücke werden nach dem Abschrecken vorwiegend warmausgelagert, das heißt mehrere Stunden bei Temperaturen zwischen 155 °C und 185 °C geglüht. Richtlinien für die üblichen Auslagerungsbedingungen sind in Tabelle 9 angegeben. Durch das Warmauslagern werden Eigenspannungen teilweise abgebaut. Mit Beginn der Warmauslagerung setzt die langsame Ausscheidung der übersättigt gelösten Bestandteile ein. Gleichzeitig nehmen Festigkeit und Härte zu, erreichen einen Höchstwert und gehen, wenn die Auslagerung zu lange fortgesetzt wird, mit fortschreitender Ausscheidung wieder zurück (Bild 19). Die Dehnung nimmt bis zum Erreichen der Höchstfestigkeit stetig ab. Diese Vorgänge laufen um so schneller ab, je höher die Auslagerungstemperatur (Bild 19) ist. Die höchsterreichbare Festigkeit nimmt mit der Höhe der Auslagerungstemperatur ab. Bei zu hohen Temperaturen findet die Aushärtung nicht statt. Die Auslagerungsdauer richtet sich nach der Auslagerungstemperatur und nimmt mit steigender Temperatur ab. Zu jeder Temperatur gibt es ein Zeitintervall, in dem mit den Höchstwerten gerechnet werden kann („Plateaus“ der Kurven in Bild 19).

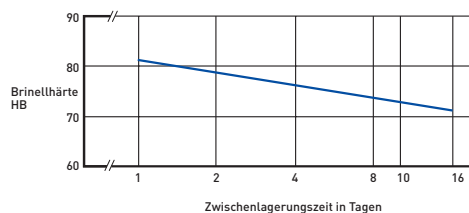
Zeitlicher Verlauf des Warmaushärtens von EN AC-Al Si10Mg(a) bei verschiedenen Temperaturen (Bild 19)



Nach Erreichen der gewünschten mechanischen Eigenschaften wird das Auslagern durch Abkühlen an Luft abgebrochen. Wurde der günstigste Aushärtungszustand versehentlich überschritten, etwa durch zu langes Auslagern oder durch zu hohe Temperatur, so kann man die Aushärtungsbehandlung wiederholen (Lösungsglühen, Abschrecken, erneutes Auslagern). Hierbei besteht die Gefahr der Kornvergrößerung.

Manchmal ist eine **Zwischenlagerung** bei Raumtemperatur vor dem Warmauslagern nicht zu umgehen. In solchen Fällen nehmen durch das anschließende Warmauslagern Festigkeit, 0,2 %-Dehngrenze und Härte zwar zu, erreichen aber die Werte des reinen Warmauslagerns nicht (Bild 20). Längere Zwischenlagerungszeiten setzen die Werte der 0,2 %-Dehngrenze um 10 bis 20 % herab. Zwischenlagern bei tiefen Temperaturen verhindert eine unkontrollierte Ausscheidung.

Einfluss des Zwischenlagerns bei Raumtemperatur auf die Härte von EN AC-Al Si7Mg0,3 T6 (Bild 20)



7.4.3.2 Kaltauslagern

Das Kaltauslagern findet bei Raumtemperatur nach dem Lösungsglühen und Abschrecken statt. Es tritt im Vergleich zum Warmauslagern eine geringere Zunahme von Festigkeit, 0,2 %-Dehngrenze und Härte, aber auch ein nur schwacher Dehnungsverlust ein.

Gussstücke werden relativ selten kaltausgelagert. Lediglich für die Legierung EN AC-Al Cu4MgTi ist der Zustand kaltausgehärtet (T4) genormt. Das Aushärten durch Kaltauslagern verläuft langsam und dauert mehrere Tage.

7.5 Sonderfälle des Aushärtens

Um besondere Effekte zu erzielen, kann man die einzelnen Teilschritte des Aushärtens ändern. In erster Linie wird entweder das Warmauslagern oder das Lösungsglühen modifiziert.

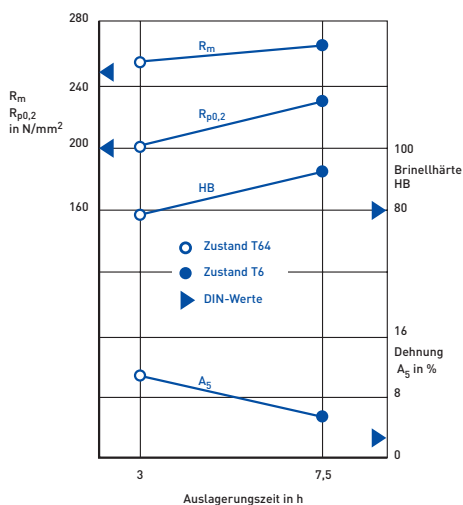
7.5.1 Sonderfälle des Warmauslagerns

Den Vorgang des Warmauslagerns kann man verkürzen (Teilaushärten) oder verlängern (Überhärten).

7.5.1.1 Teilaushärten

Das Teilaushärten (T64) ist ein spezieller Fall des Warmaushärtens, in dem der Teilschritt Warmauslagern abgebrochen wird, ehe der Höchstwert der Festigkeit erreicht ist. Man erhält dadurch bei geringer Einbuße an Festigkeit eine höhere Dehnung. Das Teilaushärten der Legierung EN AC-Al Cu4Ti wird durch eine Senkung der Temperatur des Warmauslagerns um 20 °C bei gleicher Auslagerungsdauer erreicht. Bei EN AC-Al Si7Mg0,3 wird zum Beispiel für den teilausgehärteten Zustand die Auslagerungszeit um 4,5 Stunden verringert (Bild 21).

Vergleich der mechanischen Werte in einem Hinterachslenker aus dauerveredeltem Kokillenguss EN AC-Al Si7Mg0,3 im Zustand teilausgehärtet (T64) und warmausgehärtet (T6) (Bild 21)



Aushärten: 530 °C - 8 h/H₂O um 20 °C/160 °C - x h

(R_m = Zugfestigkeit; $R_{p0,2}$ = 0,2 %-Dehngrenze)

7.5.1.2 Überhärten (Stabilisieren)

Im Gegensatz zum Teilaushärten wird hier das Warmauslagern soweit fortgeführt, dass die zum Erreichen der maximalen Festigkeitswerte erforderlichen Parameter (Zeit und Temperatur) überschritten werden. Diese Behandlung ist in Europa (DIN EN 515 für Knetlegierungen) und für die deutsche Luft- und Raumfahrt (DIN EN 3350 für Knetlegierungen) genormt (T7, siehe auch Tabelle 10). Gussteile werden stabilisiert, um eine nachträgliche Änderung der Maße (bei Präzisionsteilen) oder Festigkeitseigenschaften, besonders bei erhöhter Betriebstemperatur, zu verhindern. Solche Änderungen werden durch Aushärtungs- und Ausscheidungs Vorgänge, die im Betrieb noch ablaufen können, verursacht. Um bei Präzisionsteilen eine nachträgliche Maßänderung durch Ausscheidungen zu vermeiden, stabilisiert man vor der Bearbeitung bei Temperaturen zwischen 200 °C und 300 °C oder bei Betriebstemperatur mit Luftabkühlung. Fahrzeugkolben müssen besonders behandelt werden, um nachträgliche Maßänderungen durch Ausscheidungs Vorgänge zu verhindern. Bei magnesiumhaltigen Gusslegierungen, insbesondere bei den AlMg-Legierungen können zur vollständigen Maßstabilisierung Temperaturen bis 350 °C (zirka 2 Std.) erforderlich sein.

Leitlegierungen für Strom führende Gussteile werden nach dem Lösungsglühen abgeschreckt und dann überhärten (auch überaltert), um die Leitfähigkeit zu verbessern.

7.5.2 Sonderfall des Lösungsglühens

7.5.2.1 Stufenglühen

Durch ein vorgeschaltetes Lösungsglühen bei Temperaturen, die um 20 °C bis 30 °C niedriger liegen als die üblichen Lösungsglühtemperaturen, kann man den Temperaturbereich für das nachfolgende optimale Glühen wesentlich erweitern. Die optimalen Festigkeitseigenschaften werden erreicht, ohne die maximalen Werte zu verändern (Bild 22). Für die Praxis ergibt sich daraus der technische und wirtschaftliche Vorteil einer niedrigeren Glühtemperatur und durch Vermeidung einer Temperaturüberschreitung im Gussstück eine Verringerung des Ausschusses.

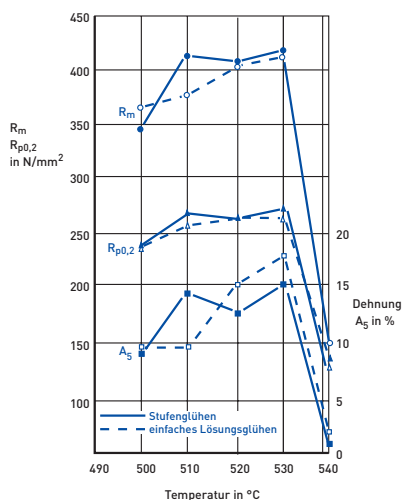
7.5.3 Aushärten ohne Lösungsglühen

Das Lösungsglühen erübrigt sich, wenn die Abkühlungsgeschwindigkeit aus der Gusshitze heraus ausreicht, um ein vorzeitiges Ausscheiden der im Überschuss gelösten Bestandteile zu verhindern. Die gegossenen Teile können dann entweder warm- oder kaltausgelagert werden.

7.5.3.1 Vereinfachtes Aushärten

Beim vereinfachten Aushärten werden die Gussteile warmausgelagert, ohne ein vorgeschaltetes Lösungsglühen. Diese energiesparende vereinfachte Wärmebehandlung eignet sich besonders für dünnwandige Kokillen- und Druckgussstücke.

Stufenglühen und einfaches Lösungsglühen für die Legierung EN AC-Al Cu4MgTi T4 [Bild 22]



Einfaches Lösungsglühen: x °C/14 h/H₂O
 Stufenglühen: 490 °C/5 h + einfaches Lösungsglühen
 (R_m = Zugfestigkeit; R_{p0,2} = 0,2 %-Dehngrenze)

Festigkeit und Härte solcher Gussstücke lassen sich durch Warmauslagern steigern, erreichen aber nicht die gleiche Höhe wie nach einer vollen Wärmebehandlung. Infolge unterschiedlicher Übersättigung in verschiedenen dicken Gussstückpartien muss mit größeren Streuungen der Eigenschaften gerechnet werden. Der Aushärtungseffekt lässt sich verstärken, indem man das Gussstück nach Entnahme aus der Form sofort in Wasser abschreckt. Die Legierungen G-AlSi5Mg (nur nach der zurückgezogenen DIN 1725-2 genormt), EN AC-Al Si10Mg(a) und EN AC-Al Zn5Mg (Tabelle 9) sprechen auf das vereinfachte Aushärten deutlich an.

Bei **Druckgussstücken** können die darin enthaltenen Gaseinschlüsse beim Lösungsglühen zu Blasenbildung oder zu kraterartigem Aufbrechen der Oberflächen führen. Außerdem kann das schroffe Abschrecken nach dem Lösungsglühen bei dünnwandigen Teilen Maßabweichungen durch Verzug hervorrufen. Mit teilweise gutem Erfolg werden Druckgussstücke direkt an der Maschine aus der Form in einem Wasserbad abgeschreckt und danach warmausgelagert (170 °C – 210 °C).

Die hier besprochene Wärmebehandlung ist in jedem Einzelfall zwischen Gießer und Abnehmer zu vereinbaren.

7.5.3.2 Selbstaushärten

Selbstaushärtende Legierungen erreichen hohe Festigkeitswerte durch einfaches Lagern bei Raumtemperatur. Selbst-aushärten ist besonders interessant für Gussstücke, die nicht wärmebehandelt werden können, oder die Wärmebehand-

lung zu kostspielig wird (zum Beispiel wegen der Größe des Gussstückes). EN AC-Al Zn5Mg und G-Al Zn10Si8Mg härten auch nach dem Schweißen im Bereich der Wärmeeinflusszone selbsttätig wieder aus, was für Guss-Schweißkonstruktionen von Bedeutung sein kann.

Es gibt eine Reihe von Gusslegierungen, die im Allgemeinen nicht ausgehärtet werden aber selbstaushärtend sind. Das betrifft vor allem die Gusslegierungen mit hohem Kupfergehalt neben Silicium und einigen zehntel Prozent Magnesium (EN AC-Al Si6Cu4, EN AC-Al Si9Cu3(Fe)). Diese Werkstoffe zeigen vor allem als Kokillenguss bei der Lagerung einen Festigkeits- und Härteanstieg durch Kaltaushärten. Mit Rücksicht hierauf sollte die Festigkeitsprüfung erst nach acht Tagen Lagerung bei Raumtemperatur vorgenommen werden. Auch die mechanische Bearbeitung soll nicht früher erfolgen. Alle Richtarbeiten, auch zum Beispiel das Stauchen angegossener Nietschäfte, sind möglichst frühzeitig vorzunehmen.

8. Wärmebehandlung für Sonderzwecke

8.1 Allgemeine Wärmebehandlung

Weitere Wärmebehandlungsmethoden sind Entspannungsglühen und Weichglühen.

8.1.1 Entspannungsglühen

Das Entspannungsglühen wird durchgeführt, um Eigenspannungen (innere Spannungen) in den Gussstücken abzubauen. Eigenspannungen entstehen bei schnellem Erstarren von Gussstücken (Gussspannungen), bei schroffem Abschrecken nach dem Lösungsglühen oder bei mechanischer Bearbeitung. Sie verursachen störende Formänderungen durch Verziehen der Gussstücke (plastische Verformung) und werden dadurch zum Teil abgebaut. Eigenspannungen als Gussspannungen vermeidet man am besten schon bei der Gestaltung des Gussstücks (gleichmäßige Wanddicke, geringe Querschnittsunterschiede) und beim Gießen. Durch geeignete Maßnahmen bei der Bearbeitung (geringe Spantiefen, mehrstündige Ruhepausen zwischen den Arbeitsgängen) lassen sich häufig die geforderten Maßtoleranzen einhalten.

Beim Entspannungsglühen werden Gussstücke aus nichtaushärtbaren Legierungen zwischen 200 °C und 300 °C geglüht und anschließend langsam im Ofen oder in ruhender Luft abgekühlt. Die Behandlung ist umso wirksamer, je höher die Temperatur und je länger die Glühzeit ist. Bei der Wahl der Glühbedingungen muss möglichst auf bleibende Veränderungen der Werkstoffeigenschaften Rücksicht genommen werden, da außer den mechanischen Eigenschaften auch zum Beispiel die Spanbarkeit betroffen wird.

Ausgehärtete Gussstücke dürfen nur vorsichtig geglüht werden, wobei die Auslagerungstemperatur nicht nennenswert und nur kurzfristig überschritten werden darf. Meist kom-

binert man das Entspannungsglühen mit dem Warmauslagern. Zum Abschrecken nach dem Lösungsglühen ist in diesen Fällen 80 °C warmes Wasser zu verwenden.

Abschreckspannungen in aushärtbaren Legierungen lassen sich durch das „up-hill quenching“ auslöschen. Dazu werden die Gussteile, möglichst vor dem Auslagern, auf Temperaturen bis -195 °C tiefgeköhlt und dann rasch auf Raumtemperatur erwärmt. Die Gussstücke können anschließend normal ausgehärtet werden. Das Entspannungsglühen muss stets vor der Bearbeitung, mindestens aber vor der letzten Spanabnahme erfolgen, weil es mit einer bleibenden Deformation verbunden ist. Gussstücke dürfen nach dem Entspannungsglühen nicht mehr gerichtet werden, da sonst neue Spannungen entstehen.

8.1.2 Weichglühen

Gussstücke werden zum Beispiel zur Steigerung des Formänderungsvermögens für eine nachfolgende geringe Kaltverformung (zum Beispiel Vernieten) weichgeglüht. Um das Formänderungsvermögen zu steigern, werden Gussstücke lösungsgeglüht und dann sehr langsam im Ofen oder in ruhender Luft abgekühlt. Die Teile werden anschließend mehrere Stunden bei 350 °C bis 450 °C weichgeglüht. Bei 400 °C bis 450 °C sind die Gusslegierungen eingeschränkt warmverformbar.

8.2 Legierungsabhängige Wärmebehandlung

Die nachfolgend beschriebenen Behandlungen beschränken sich auf einzelne Legierungen.

8.2.1 Glühen von EN AC-Al Si12(a)

EN AC-Al Si12(a) ist eine nichtaushärtbare Legierung mit guter Festigkeit und Dehnung. Durch ein 3- bis 4-stündiges Glühen bei 520 °C bis 530 °C mit anschließendem Abschrecken in kaltem Wasser lassen sich Dehnung, Schlagzähigkeit und Dauerfestigkeit weiter verbessern. Der Zustand heißt ge-
glüht und abgeschreckt („ga“)

8.2.2 Homogenisieren von EN AC-Al Mg9

Die Legierung EN AC-Al Mg9 zeichnet sich in dem nicht genormten homogenisierten Zustand („ho“) durch sehr gute Festigkeit, hohe Dehnung und hohe chemische Beständigkeit aus.

Im Gusszustand ist EN AC-Al Mg9 spröde und neigt zu Spannungsrisskorrosion. Günstige Eigenschaften erreicht man erst durch ein 8- bis 10-stündiges Glühen bei 425 °C bis 435 °C und Abschrecken (Homogenisieren). Mit Rücksicht auf die Spannungsempfindlichkeit der Legierung wird in der Regel in Öl von 80 °C bis 120 °C, höchstens 160 °C, abgeschreckt. Zum Temperatenausgleich kann das Gussstück bis zu einer halben Stunde im Ölbad belassen werden. Dann folgt Abschrecken in Öl oder Wasser von Raumtemperatur oder Abkühlen in ruhender Luft.

Komplizierte Gussstücke mit großen Querschnittsunterschieden kann man vor dem Abschrecken im Ofen auf 385 °C bis 395 °C abkühlen lassen. Nur sehr einfache Stücke dürfen unmittelbar in kaltem oder warmem Wasser abgeschreckt werden. Bei dieser Legierung sind Betriebstemperaturen oberhalb 80 °C nur mit Vorbehalt zulässig.

9. Einrichtungen für die Wärmebehandlung

Der Erfolg der Wärmebehandlung hängt vom genauen Einhalten der geeigneten Glühbedingungen ab. An die verwendeten Glühöfen sind hohe Anforderungen zu stellen, denn die zeitlichen und räumlichen Schwankungen der Temperatur müssen sehr klein sein.

Für praktisch alle Wärmebehandlungen von Aluminiumlegierungen ist das Einhalten der exakten Temperatur besonders wichtig.

Wärmebehandlungsanlagen bestehen aus Glühöfen, Abschreckbecken sowie Auslagerungsöfen. Dazu gehören entsprechende Einsatzkästen oder Glühkörbe aus möglichst hitze- und zunderbeständigem Stahl und entsprechende Transporteinrichtungen (Kranbahnen usw.).

9.1 Öfen

Umluftöfen (Luftumwälzungsöfen) verschiedener Bauart mit elektrischer Heizung oder indirekter Brennstoffbeheizung werden in großem Umfang für die Glühbehandlung von Aluminium verwendet. Wichtig für gleichmäßige Temperaturen an allen Stellen des Ofens ist eine gute Luftumwälzung. Luftumwälzöfen sind zum Auslagern bei Temperaturen von 100 °C bis 200 °C besonders vorteilhaft und werden auch bei Glühtemperaturen über 520 °C eingesetzt. Die Gussstücke sind mit genügendem Abstand gegeneinander und vor allem auch gegen die Ofenwandungen einzusetzen, um ein Durchstreifen der heißen Luft sicherzustellen.

9.2 Abschreckbäder

Um die Vorkühlzeit, besonders bei dünnwandigen Teilen, klein zu halten, werden Abschreckbäder neben oder unter dem Glühofen angeordnet. Hebezeuge mit Schnellgang sorgen für ein rasches Umsetzen des Glühgutes.

Die Größe des Wasserbeckens errechnet sich nach folgender Mischregel

$$V_w = \frac{(t_A - t_N) \times (M_1 \times c_1 + M_2 \times c_2)}{(t_N - t_w) \times P_w \times c_w}$$

Hierin bedeuten:

M_1 = Masse des Einsatzkorbes

c_1 = mittlere spezifische Wärme
des Einsatzkorbmaterials

M_2 = Masse des Gussstückeinsatzes

c_2 = mittlere spezifische Wärme
der Gusslegierung zirka 984 J/(kg × K)

V_w = Volumeninhalt des Wasserbeckens

P_w = Dichte des Wassers

c_w = spezifische Wärme des Wassers

t_A = Temperatur zum Lösungsglühen

t_w = Ausgangstemperatur des Wassers

t_N = Temperatur des Wassers nach dem Abschrecken

Nach dem Abschrecken sollte die Wassertemperatur nicht höher als 60 °C sein.

9.3 Temperaturmessung

Die meisten Fehler bei der Wärmebehandlung sind durch fehlerhafte oder unzureichende Temperaturmessung bedingt. Der Aufwand für die Temperaturmessgeräte muss dem für die Öfen entsprechen. Moderne Öfen besitzen eingebaute automatische Temperaturmess- und -regeleinrichtungen. Der Einsatz von Temperaturaufzeichnungseinrichtungen ist zu empfehlen.

Es ist zweckmäßig, die Temperaturen an mehreren festen Stellen im Ofen und zusätzlich mit beweglichen Thermoelementen auch innerhalb der Glühcharge zu registrieren. Die Anforderungen an die Temperaturgleichmäßigkeit von Wärmebehandlungsöfen ist in DIN 17052 festgelegt.

9.4 Warengestelle

Gussstücke werden allgemein nicht direkt in den Ofen chargiert, sondern vorzugsweise in Gestellen oder Einsatzkörben, vorwiegend aus hitze- und zunderbeständigem Stahl. Die Gussstücke muss man mit genügend Abstand stapeln können, damit die heiße Luft (beziehungsweise Kühlwasser beim Abschrecken) auch zu den weiter innen liegenden Stücken gelangen kann. Da die Festigkeit mit zunehmender Temperatur abnimmt, kann eine unsachgemäße Stapelung zu einem Verformen der Gussstücke führen. Große Gussstücke werden daher in eigens gefertigten Gestellen in den Ofen eingefahren. Eine Dampfbildung während des Abschreckens in den Hohlräumen ist durch geeignete Lagerung der Gussstücke zu vermeiden.

10. Tabellenteil

10.1 Wärmebehandlung von Aluminium-Knetlegierungen

(Tabelle 1) Wärmeeinflusszone bei Aluminium-Schweißverbindungen

	Werkstoff	Ausgangszustand	Festigkeit in der Wärmeeinflusszone	Möglichkeit der Festigkeitssteigerung in der Wärmeeinflusszone
nicht-aus-härtbar	Al 99,5 Al Mn Al MgMn Al Mg3 Al Mg4,5Mn	weich [Rekristallisationsgefüge]	keine Veränderung	keine
		halbhart, hart Verformungsgefüge	Entfestigung	keine
aus-härtbar	Al MgSi	kaltausgehärtet warmausgehärtet [Aushärtungsgefüge]	Entfestigung	erneutes Lösungsglühen, Abschrecken und Aushärten
	Al ZnMg	kaltausgehärtet warmausgehärtet [Aushärtungsgefüge]	Entfestigung	a) Kaltaushärten b) Warmaushärten

(Tabelle 3a) Lösungsglüh-, Abschreck- und Auslagerungsbedingungen für Aluminium-Knetwerkstoffe
Bedingungen für die Wärmebehandlung zum Aushärten¹⁾

DIN EN 573 EN AW-	DIN EN 573 Kurzzeichen	Lösungsglüh- temperatur ²⁾ °C	Abschrecken in	Kaltauslagern Zeit d	Warmauslagern Temperatur ³⁾ °C	Warmauslagern Zeit ⁴⁾ h
–	E-Al MgSi	525-540	Wasser	5-8	155-190	4-16
6101B	E-Al MgSi	525-540	Luft/Wasser	5-8	155-190	4-16
6060	Al MgSi	525-540	Luft/Wasser	5-8	155-190	4-16
6063	Al Mg0,7Si	525-540	Luft/Wasser	5-8	155-190	4-16
6106	Al MgSiMn	525-540	Luft/Wasser	5-8	155-190	4-16
6008	Al SiMgV	525-540	Luft/Wasser	5-8	155-190	4-16
6005	Al SiMg(Al)	525-540	Luft/Wasser	5-8	155-190	4-16
6082	Al Si1MgMn	525-540	Wasser/Luft	5-8	155-190	4-16
6061	Al Mg1SiCu	525-540	Wasser/Luft	5-8	155-190	4-16
6012	Al MgSiPb	520-530	Wasser bis 65 °C	5-8	155-190	4-16
2011	Al CuBiPb	515-525	Wasser bis 65 °C	5-8	165-185	8-16
2007	Al Cu4PbMgMn	480-490	Wasser bis 65 °C	5-8	⁴⁾	⁴⁾
2017A	Al Cu4MgSi(Al)	495-505	Wasser	5-8	⁴⁾	⁴⁾
2024	Al Cu4Mg1	495-505	Wasser	5-8	180-195 ⁵⁾	16-24 ⁴⁾
2014	Al Cu4SiMg	495-505	Wasser	5-8	160-180	8-16
7003	Al Zn6Mg0,8Zr	460-485	Luft	mind. 90 d ⁵⁾	I 90-100 II 140-160 ⁵⁾	I 8-12 II 16-24 ⁵⁾
7020	Al Zn4,5Mg1	460-485	Luft	mind. 90 d ⁵⁾	I 90-100 II 140-160 ⁵⁾	I 8-12 II 16-24 ⁵⁾
7022	Al Zn5Mg3Cu	470-480	Wasser	⁵⁾	I 115-125 II 165-180 ⁵⁾	I 12-24 II 4-6 ⁵⁾
7075	Al Zn5,5MgCu	470-480	Wasser	⁵⁾	I 115-125 II 165-180 ⁵⁾	I 12-24 II 4-6 ⁵⁾

1) Empfehlungen, genaue Vorschriften in Abstimmung mit dem Halbzeugwerk

2) Metalltemperatur

3) Stufenauslagerung in den Stufen I und II

4) üblicherweise nur Kaltauslagern

5) Verwendung von Halbzeug im Zustand kaltausgehärtet im allgemeinen nicht empfohlen

(Tabelle 3b) Abschreckzeiten für aushärtbare Aluminiumlegierungen

Legierungsgattung	Lösungsglühtemperatur	Abkühldauer auf < 200 °C	Typisches Abschreckmedium ¹⁾
AlCuMg (mit etwa 4 % Cu-Gehalt)	500 °C	5-15 s	Wasser
Niedrig legiertes AlCuMg (mit 2 % Cu-Gehalt)	475-505 °C	40-60 s	Wasser, bei Blechen unter 1,5 mm auch rasch bewegte Luft
AlMgSi, höherlegiert (je zirka 1 % Si und 1 % Mg mit Mn-Zusatz)	540 °C	20-30 s	Wasser bei > 3 mm Wanddicke, bewegte Luft bei < 3 mm Wanddicke
AlMgSi niedriglegiert (je zirka 0,5 % Mg und 0,5 % Si)	530 °C	40-60 s	Wasser bei > 5 mm Wanddicke, Luft bei < 5 mm Wanddicke
AlZnMg niedriglegiert (mit 4-5 % Zn)	450 °C	5-20 min	bewegte Luft
AlZnMgCu (mit 6 % Zn, 2 % Mg, 1,5 % Cu)	530 °C	30-40 s	Wasser oder Sprühnebel

1) bewegte Luft entspricht Gebläse

(Tabelle 2) Anhaltswerte für das Weichglühen von Aluminium-Knetlegierungen
Bedingungen zum Weichglühen von Aluminium-Knetwerkstoffen¹⁾

DIN EN 573 Legierungsnummer EN AW-	DIN EN 573 Kurzzeichen EN AW-	Glühtemperatur ²⁾ °C	Glühzeit ³⁾ h	Abkühlbedingungen ⁴⁾
1098	Al 99,98	290-310	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
-	Al 99,9	320-350	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
1080A	Al 99,8(A)	320-350	0,5-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
1070A	Al 99,7	320-350	0,5-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
1050A	Al 99,5	320-350	0,5-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
1350A	EA1 99,5(A)	340-360	0,5-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
1200	Al 99,0	340-360	0,5-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5310	Al RMg0,5	320-340	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
5605	Al RMg1	320-340	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
5210	Al 99,9Mg0,5	320-340	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
5505	Al 99,9Mg1	320-340	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
6401	Al 99,9MgSi ⁵⁾	360-380	1-2	≤30 °C/h bis 250 °C
5110	Al 99,85Mg0,5	340-360	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
5305	Al 99,85Mg1	340-360	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
-	Al 99,85MgSi ⁵⁾	360-380	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
-	Al 99,8ZnMg ⁵⁾	360-380	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
8011A	Al FeSi(A)	340-400	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
3207	Al Mn0,6	380-420	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
3103	Al Mn1	380-420	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
3003	Al Mn1Cu	380-420	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
3105	Al Mn0,5Mg0,5	380-420	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
3005	Al Mn1Mg0,5	380-420	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
3004	Al Mn1Mg1	380-420	0,5-1	Ofenabkühlung unkontrolliert
5005A	Al Mg1(C)	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5005B	Al Mg1,5	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5051A	Al Mg2(B)	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5052	Al Mg2,5	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5754	Al Mg3	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5082	Al Mg4,5	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5019	Al Mg5	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5251	Al Mg2	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5049	Al Mg2Mn0,8	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5454	Al Mg3Mn	360-380	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5086	Al Mg4	380-420	1-2	Ofenabkühlung unkontrolliert
5083	Al Mg4,5Mn0,7	380-420	1-2	30-50 °C/h
5182	Al Mg4,5Mn0,4	380-420	1-2	30-50 °C/h
6101	Al MgSi ⁵⁾	360-400	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6101B	Al MgSi(B) ⁵⁾	360-400	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6060	Al MgSi ⁵⁾	360-400	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6063	Al Mg0,7Si	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6106	Al MgSiMn	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6008	Al SiMgV	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6005A	Al SiMg(A) ⁵⁾	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6082	Al Si1MgMn ⁵⁾	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6061	Al Mg1SiCu ⁵⁾	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
6012	Al MgSiPb ⁵⁾	360-400	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
2011	Al Cu6BiPb ⁵⁾	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
2007	Al Cu4PbMgMn ⁵⁾	380-420	1-2	≤ 30 °C/h bis 250 °C
2117	Al Cu2,5Mg ⁵⁾	380-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 250 °C
2017A	Al Cu4MgSi(A) ⁵⁾	380-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 250 °C
2024	Al Cu4Mg1 ⁵⁾	380-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 250 °C
2014	Al Cu4SiMg ⁵⁾	380-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 250 °C
7003	Al Zn6Mg0,8Zr	400-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 230 °C + 3-5 h Haltezeit
7020	Al Zn4,5Mg1 ⁵⁾	400-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 230 °C + 3-5 h Haltezeit
7022	Al Zn5Mg3Cu ⁵⁾	380-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 230 °C + 3-5 h Haltezeit
7075	Al Zn5,5MgCu ⁵⁾	380-420	2-3	≤ 30 °C/h bis 230 °C + 3-5 h Haltezeit

1) Anhaltswerte, genaue Vorschriften in Abstimmung mit dem Halbzeugwerk (Berücksichtigung der vorherigen Fertigungsschritte)

2) Metalltemperatur

3) Zeiten beziehen sich auf Metalltemperatur, Aufheizzeit auf Metalltemperatur, abhängig von Ofenbauart und Ofenfüllung, so kurz wie möglich (Grobkornbildung vermeiden)

4) Unterhalb 250 °C an Luft beliebig schnell abkühlen

5) Sofern nur eine Kaltverfestigung beseitigt werden soll, 320 °C bis 360 °C/2 bis 3 h

■ Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen

(Tabelle 4) Gegenüberstellung der Werkstoffzustandsbezeichnungen nach DIN EN 515 und den alten DIN-Bezeichnungen nach DIN 1712 Teil 3 beziehungsweise DIN 1725 Teil 1 und DIN 17007 Teil 4

Bezeichnung	Zustand	Bemerkungen ^{a)}	alte DIN Bezeichnung Zeichen Nummer ^{b)}
F	Herstellungszustand	Grenzwerte der mechanischen Eigenschaften und Herstellverfahren sind nicht festgelegt.	F .07; .08
O	Weichgeglüht	Um möglichst geringe Festigkeiten zu erzielen.	W .1 n
O1		Bei hoher Temperatur geglüht und langsam abgekühlt.	
O2		Thermomechanisch behandelt; für nachfolgende superplastische Verformung.	
O3		Homogenisiert; Formbarkeit von Gießdraht und Gießbändern verbessert.	
H	Kaltverfestigt	Um festgelegte mechanische Eigenschaften zu erreichen.	F .2g; .3g
H1x		Nur kaltverfestigt, ohne zusätzliche thermische Behandlung.	
H2x		Kaltverfestigt und rückgeglüht; geringfügig verbesserte Dehnung gegenüber entsprechendem H1x Zustand.	G .2u; .3u
H3x		Kaltverfestigt und stabilisiert; mechanische Eigenschaften stabilisiert und Umformvermögen verbessert.	
H4x		Kaltverfestigt und einbrennlackiert (das heisst teilweise entfestigt).	
W	Lösungsgeglüht	Instabiler Zustand; für Legierungen, die nach dem Lösungsglühen spontan bei Raumtemperatur aushärten; eine angehängte Zeit für das Kaltauslagern macht den Zustand eindeutig, zum Beispiel W 0,5 h.	
T	Wärmebehandelt	Um stabilen Zustand zu erzielen.	
T1		Abgeschreckt aus der Warmformungstemperatur und kaltausgelagert.	
T2		Abgeschreckt aus der Warmformungstemperatur, kaltumgeformt und kaltausgelagert.	
T3		Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und kaltausgelagert.	
T4		Lösungsgeglüht und kaltausgelagert.	ka .4n; .5n
T5		Abgeschreckt aus der Warmformungstemperatur und warmausgelagert.	
T6		Lösungsgeglüht und warmausgelagert.	wa .6n; .7n
T7		Lösungsgeglüht und überhärte/stabilisiert; verbessert Bruchzähigkeit und Beständigkeit gegen Spannungsriß- und Schichtkorrosion.	
T8		Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und warmausgelagert.	
T9		Lösungsgeglüht, warmausgelagert und kaltumgeformt.	
1) g = gerade Zahl; u = ungerade Zahl; n = g oder u			
2) Der Begriff „Lösungsgeglüht“ schließt hier ein legierungsangepasstes Abschrecken mit ein			

(Tabelle 5) Übersicht über gebräuchliche Werkstoffzustandsbezeichnungen nach DIN EN 515

Zustand	Bedeutung ^[2]
F	Herstellungszustand [keine Grenzwerte für mechanische Eigenschaften festgelegt].
O	Weichgeglüht — Mit dem Zustand O können Erzeugnisse bezeichnet werden, bei denen die für den weichgeglühten Zustand geforderten Eigenschaften durch Warmumformungsverfahren erzielt werden.
O1	Annähernd bei Lösungsglühtemperatur und -zeit thermisch behandelt und langsam auf Raumtemperatur abgekühlt (früher als T41 bezeichnet).
O2	Thermomechanisch auf besseres Umformvermögen behandelt, wie sie zum Beispiel für Superplastisches Umformen (SPF) gefordert ist.
O3	Homogenisiert
H12	Kaltverfestigt — 1/4 hart.
H14	Kaltverfestigt — 1/12 hart.
H16	Kaltverfestigt — 3/4 hart.
H18	Kaltverfestigt — 4/4 hart (voll durchgehärtet).
H19	Kaltverfestigt — extrahart.
Hxx4	Gilt für dessinerte oder geprägte Bleche oder Bänder, die aus dem entsprechenden Hxx-Zustand hergestellt sind.
Hxx5	Kaltverfestigt — Gilt für geschweißte Rohre.
H111	Geglüht und durch anschließende Arbeitsgänge, zum Beispiel Recken oder Richten, geringfügig kaltverfestigt (weniger als H11).
H112	Durch Warmumformung oder eine begrenzte Kaltumformung geringfügig kaltverfestigt. (mit festgelegten Grenzwerten der mechanischen Eigenschaften).
H116	Gilt für Aluminium-Magnesium-Legierungen mit einem Magnesiumanteil $\geq 4\%$, für die die Grenzwerte der mechanischen Eigenschaften und die Beständigkeit gegen Schichtkorrosion festgelegt sind.
H22	Kaltverfestigt und rückgeglüht — 1/4 hart.
H24	Kaltverfestigt und rückgeglüht — 1/2 hart.
H26	Kaltverfestigt und rückgeglüht — 3/4 hart.
H28	Kaltverfestigt und rückgeglüht — 4/4 hart (voll durchgehärtet).
H32	Kaltverfestigt und stabilisiert — 1/4 hart.
H34	Kaltverfestigt und stabilisiert — 1/2 hart.
H36	Kaltverfestigt und stabilisiert — 3/4 hart.
H38	Kaltverfestigt und stabilisiert — 4/4 hart (voll durchgehärtet).
H42	Kaltverfestigt und einbrennlackiert — 1/4 hart.
H44	Kaltverfestigt und einbrennlackiert — 1/2 hart.
H46	Kaltverfestigt und einbrennlackiert — 3/4 hart.
H48	Kaltverfestigt und einbrennlackiert — 4/4 hart (voll durchgehärtet).

(Tabelle 5) Fortsetzung

Zustand	Bedeutung ^[12]
W	Lösungsgeglüht (instabiler Zustand). Die Zeitspanne des Kaltauslagerns kann auch festgelegt werden (W2h,...).
W51	Lösungsgeglüht (instabiler Zustand) und durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzt oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %). Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
W510	Lösungsgeglüht (instabiler Zustand) und durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %). Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
W511	Wie W510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
W52	Lösungsgeglüht (instabiler Zustand) und durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt.
W54	Lösungsgeglüht (instabiler Zustand) und durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt (Gesenskschmiedestücke).
T1	Abgeschreckt aus der Warmumformungstemperatur und kaltausgelagert.
T2	Abgeschreckt aus der Warmumformungstemperatur, kaltumgeformt und kaltausgelagert.
T3	Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und kaltausgelagert.
T31	Lösungsgeglüht, etwa 1 % kaltumgeformt und kaltausgelagert.
T351	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzte oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %) und kaltausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T3510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und kaltausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T3511	Wie T3510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T352	Lösungsgeglüht, durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt und kaltausgelagert.
T354	Lösungsgeglüht, durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt und kaltausgelagert.
T36	Lösungsgeglüht, etwa 6 % kaltumgeformt und kaltausgelagert.
T37	Lösungsgeglüht, etwa 7 % kaltumgeformt und kaltausgelagert.
T39	Lösungsgeglüht und einen bestimmten Grad kaltumgeformt zur Erzielung der festgelegten mechanischen Eigenschaften. Das Kaltumformen kann vor oder nach dem Kaltauslagern erfolgen.
T4	Lösungsgeglüht und kaltausgelagert.
T42	Lösungsgeglüht und kaltausgelagert. Gilt für Versuchswerkstoffe, die aus dem weichgeglühten oder F-Zustand wärmebehandelt werden, oder für Erzeugnisse, die aus beliebigem Zustand beim Verbraucher wärmebehandelt werden.
T451	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzte oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %) und kaltausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T4510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und kaltausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T4511	Wie T4510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T452	Lösungsgeglüht, durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt und kaltausgelagert.
T454	Lösungsgeglüht, durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt und kaltausgelagert.
T5	Abgeschreckt aus der Warmformungstemperatur und warmausgelagert.
T51	Abgeschreckt aus der Warmformungstemperatur und zur Verbesserung der Formbarkeit nicht vollständig warmausgelagert.
T56	Abgeschreckt aus der Warmformungstemperatur und warmausgelagert — bessere mechanische Eigenschaften als T5 durch spezielle Verfahrenskontrolle (Legierungen der Reihe 6000).
T6	Lösungsgeglüht und warmausgelagert.
T61	Lösungsgeglüht und zur Verbesserung der Formbarkeit nicht vollständig warmausgelagert.
T6151	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %) und dann zur Verbesserung der Formbarkeit nicht vollständig warmausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T62	Lösungsgeglüht und warmausgelagert. Gilt für Versuchswerkstoffe, die aus dem weichgeglühten oder F-Zustand wärmebehandelt werden, oder für Erzeugnisse, die aus beliebigem Zustand beim Verbraucher wärmebehandelt werden.
T64	Lösungsgeglüht und dann zur Verbesserung der Formbarkeit nicht vollständig warmausgelagert [zwischen T6 und T61].
T651	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzte oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %) und warmausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T6510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und warmausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T6511	Wie T6510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T652	Lösungsgeglüht, durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt und warmausgelagert.
T654	Lösungsgeglüht, durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt und warmausgelagert.
T66	Lösungsgeglüht und warmausgelagert — bessere mechanische Eigenschaften als T6 durch spezielle Kontrolle des Verfahrens (Legierungen der Reihe 6000).
T7	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert).
T73	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer optimalen Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion.
T732	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer optimalen Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion. Gilt für Versuchswerkstoffe, die aus dem weichgeglühten oder F-Zustand wärmebehandelt werden, oder für Erzeugnisse, die aus beliebigem Zustand beim Verbraucher wärmebehandelt werden.
T7351	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzte oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %) und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer optimalen Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T73510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer optimalen Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T73511	Wie T73510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T7352	Lösungsgeglüht, durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer optimalen Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion.
T7354	Lösungsgeglüht, durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer optimalen Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion.

■ Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen

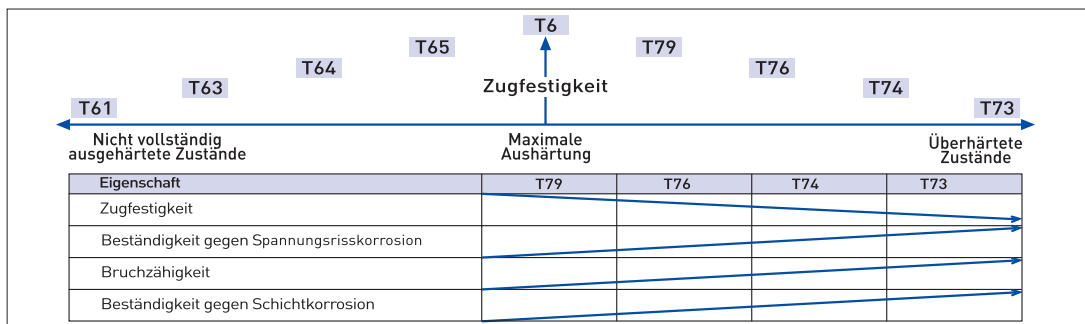
(Tabelle 5) Fortsetzung

Zustand	Bedeutung ¹⁾²⁾
T74	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert) [zwischen T73 und T76].
T7451	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzte oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %) und überhärtet (warmausgelagert). [zwischen T73 und T76]. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T74510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und überhärtet (warmausgelagert) [zwischen T73 und T76]. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T74511	Wie T74510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T7452	Lösungsgeglüht, durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt und überhärtet (warmausgelagert) [zwischen T73 und T76].
T7454	Lösungsgeglüht, durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt und überhärtet (warmausgelagert) [zwischen T73 und T76].
T76	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer guten Beständigkeit gegen Schichtkorrosion.
T761	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer guten Beständigkeit gegen Schichtkorrosion [gilt für Bleche und Bänder aus Werkstoff 7475].
T762	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer guten Beständigkeit gegen Schichtkorrosion. Gilt für Versuchswerkstoffe, die aus dem weichgeglühten oder F-Zustand wärmebehandelt werden, oder für Erzeugnisse, die aus beliebigem Zustand beim Verbraucher wärmebehandelt werden.
T7651	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzte oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %) und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer guten Beständigkeit gegen Schichtkorrosion. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T76510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer guten Beständigkeit gegen Schichtkorrosion. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T76511	Wie T76510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T7652	Lösungsgeglüht, durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer guten Beständigkeit gegen Schichtkorrosion.
T7654	Lösungsgeglüht, durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt und überhärtet (warmausgelagert) zur Erzielung einer guten Beständigkeit gegen Schichtkorrosion.
T79	Lösungsgeglüht und (sehr begrenzt) überhärtet (warmausgelagert).
T79510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und (sehr begrenzt) überhärtet (warmausgelagert). Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T79511	Wie T79510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T8	Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und warmausgelagert.
T81	Lösungsgeglüht, etwa 1 % kaltumgeformt und warmausgelagert.
T82	Beim Verbraucher lösungsgeglüht, um mindestens 2 % kontrolliert gereckt und warmausgelagert (Legierung 8090).
T832	Lösungsgeglüht, um einen bestimmten Grad kontrolliert gereckt und warmausgelagert [gilt für gezogene Rohre aus Werkstoff 6063].
T841	Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und nicht vollständig warmausgelagert [gilt für Bleche und Bänder aus den Legierungen 2091 und 8090].
T84151	Lösungsgeglüht, durch ein kontrolliertes Recken mit einem Reckgrad von 1,5 % bis 3 % entspannt und nicht vollständig warmausgelagert (Platten aus den Legierungen 2091 und 8090).
T851	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: Bleche 0,5 % bis 3 %, Platten 1,5 % bis 3 %, gewalzte oder kalt nachverformte Stangen 1 % bis 3 %, Freiformschmiedestücke oder geschmiedete und gewalzte Ringe 1 % bis 5 %) und warmausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T8510	Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt (Reckgrad: stranggepresste Stangen, Profile und Rohre 1 % bis 3 %, gezogene Rohre 0,5 % bis 3 %) und warmausgelagert. Die Erzeugnisse werden nach dem Recken nicht nachgerichtet.
T8511	Wie T8510, jedoch geringfügiges anschließendes Nachrichten zur Einhaltung der festgelegten Grenzabmaße zulässig.
T852	Lösungsgeglüht, durch 1 % bis 5 % bleibende Stauchung entspannt und warmausgelagert.
T854	Lösungsgeglüht, durch Kaltnachrichten im Fertiggesenk entspannt und warmausgelagert.
T86	Lösungsgeglüht, etwa 6 % kaltumgeformt und warmausgelagert.
T87	Lösungsgeglüht, etwa 7 % kaltumgeformt und warmausgelagert.
T89	Lösungsgeglüht, um einen bestimmten Grad kaltumgeformt zur Erzielung der festgelegten mechanischen Eigenschaften und warmausgelagert.
T9	Lösungsgeglüht, warmausgelagert und kaltumgeformt.

1) Der Begriff „lösungsgeglüht“ schließt hier ein legierungsangepasstes Abschrecken mit ein.

2) Einige Legierungen der Reihe 6000 oder 7000 erreichen dieselben festgelegten mechanischen Eigenschaften, ob sie nun im Ofen lösungsgeglüht oder aus der Warmumformungstemperatur so schnell abgeschreckt werden, dass die Legierungselemente in Lösung bleiben. In diesen Fällen werden die Zustandsbezeichnungen T3, T4, T6, T7, T8 und T9 gleichwertig für beide Verfahren verwendet.

(Tabelle 6) Zusammenhang zwischen Wärmebehandlungszuständen und Materialeigenschaften bei spannungsriß- und schichtkorrosionsempfindlichen Legierungen (nach DIN EN 515)



10.2 Wärmebehandlung von Aluminium-Gusslegierungen

(Tabelle 7) Wärmebehandlungsarten und die erzielten Wirkungen (WB = Wärmebehandlung)

erzielte Wirkung	Art der Wärmebehandlung	Wärmebehandlung eingesetzt für Werkstoffe (Legierungstyp)	WB eingesetzt für Gießverfahren				Bemerkungen
			G-	GK-	GF-	GD-	
Festigkeit verbessert	Aushärten	aushärtbare Legierungen	X	X	X	-	Festigkeit verbessert, teilweise auf Kosten der Dehnung; Vorgang ist schnell (Stunden)
	- Warmaushärten	Al Si10Mg	X	X	-	-	
		Al Si10Mg(Cu)	X	X	-	-	
		Al Si9Mg	X	X	-	-	
		Al Si7Mg	X	X	X	-	
		Al Si5Mg	-	X	-	-	
		Al Cu4Ti	X	X	-	-	
		Al Mg3Si	X	X	X	-	
	- Kaltaushärten	Al Cu4MgTi	X	X	X	-	Vorgang dauert Tage
	- Teilaushärten	Al Cu4Ti	X	X	-	-	Dehnung verbessert auf Kosten der Festigkeit gegenüber T6
	- Selbstaus härten	Al Si6Cu4	(X)	X	-	-	geeignet für Guss-Schweißkonstruktionen
		Al Si9Cu3	(X)	X	-	-	
		Al Zn10Si8Mg	X	X	-	X	
	- vereinfachtes Aushärten	aushärtb. Leg. Al Si5Mg Al Si10Mg	- - -	X X X	- - -	X X X	in Dauerformen gegossene Legierungen, insbesondere für Druckguss
Verzug verhindert	Entspannungsglühen	alle	X	X	X	(X)	Eigenspannungen abgebaut
Dimensionale Stabilität	Überhärten, Stabilisieren	aushärtbare Legierungen	X	X	X	(X)	Zeitliche Maßänderung verhindert, elektrische Leitfähigkeit verbessert
Kaltverformbarkeit verbessert	Weichglühen	alle	X	X	X	(X)	Für Kaltformung (zum Beispiel Vernieten)
Zähigkeit erhöht	Glühen	Al Si12	X	X	-	-	
		Al Si11	X	X	-	-	
chemische Beständigkeit verbessert	Homogenisieren	Al Mg10	X	X	-	-	Widerstand gegen Korrosion, sowie Festigkeit und Dehnung verbessert

(Tabelle 8) Aushärtbare Legierungen nach DIN EN 1706

Legierung	Verwendung im Zustand			
	Gusszustand F	kaltausgehärtet T4	warmausgehärtet T6	teilausgehärtet T64
Al Cu4Ti	-	-	X	X
Al Cu4MgTi	-	X	-	-
Al Si10Mg(a)	X	-	X	-
Al Si10Mg(Cu)	X	-	X	-
Al Si9Mg	-	-	X	-
Al Si7Mg	-	-	X	-
Al Si5Mg	X	-	X	-
Al Mg3Si*	X	-	X	-

* Legierung war in der zurückgezogenen DIN 1725 genormt, ist aber in der DIN EN 1706 nicht mehr genormt.

■ Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen

(Tabelle 9) Richtlinien für die Behandlung von Aluminium-Gussstücken*

Legierung EN AC-	Werkstoffnummer DIN EN 1706 EN AC-	Lösungsglühen		Abschrecken		Austlagern	
		Temperatur [°C]	Zeit ¹⁾ [h]	in Wasser [°C]	in Luft	Temperatur [°C]	Zeit ¹⁾ [h]
Al Si12(a) O	44200S O	520-530	3-6	20-50	-	-	-
Al Si12(a) O	44200K O	520-530	3-6	20-50	-	-	-
Al Si10Mg(a) T6	43000S T6	520-530	3-6	20-50	-	160-170	6-8
Al Si10Mg(a) T6	43000K T6	520-530	3-6	20-50	-	160-170	6-8
Al Si10Mg(Cu) T6	43200S T6	510-525	3-6	20-50	-	160-170	6-8
Al Si10Mg(Cu) T6	43200K T6	510-525	3-6	20-50	-	160-170	6-8
Al Si11 O	44000S T6	520-530	3-6	-	(ruhend)	-	-
Al Si11 O	44000K T6	520-530	3-6	-	(ruhend)	-	-
Al Si9Mg T6	43300S T6	525-535	4-8	20-50	-	160-170	6-8
Al Si9Mg T6	43300K T6	525-535	4-8	20-50	-	160-170	6-8
Al Si7Mg0,3 T6	42100S T6	525-535	3-8	20-50	-	155-165	6-8
Al Si7Mg0,3 T6	42100K T6	525-535	3-8	20-50	-	155-165	6-8
Al Si7Mg0,3 T6	42100L T6	525-535	3-8	20-50	-	155-165	6-8
Al Si12CuNiMg T6	48000K T6	510-520	4-7	20-80	-	165-185	5-7
Al Si12CuNiMg T7	48000K T7	-	-	-	-	210-220	5-8
Al Cu4Ti T64	21100S T64	525-535 ²⁾	4-8 ²⁾	50-80	-	140-150	6-8
Al Cu4Ti T64	21100K T64	525-535 ²⁾	4-8 ²⁾	50-80	-	140-150	6-8
Al Cu4Ti T6	21100S T6	525-535 ²⁾	4-8 ²⁾	50-80	-	160-170	6-8
Al Cu4Ti T6	21100K T6	525-535 ²⁾	4-8 ²⁾	50-80	-	160-170	6-8
Al Cu4MgTi T4	21000S T4	520-530 ²⁾	4-8 ²⁾	50-80	-	20	120
Al Cu4MgTi T4	21000K T4	520-530 ²⁾	4-8 ²⁾	50-80	-	20	120
Al Cu4MgTi T4	21000L T4	520-530 ²⁾	4-8 ²⁾	50-80	-	20	120
Al Zn5Mg F	71000S+K F	-	-	-	(bewegt) ⁵⁾	20	500
Al Zn5Mg T6	71000S+K T6	-	-	-	(bewegt) ⁵⁾	175-185 oder 150-175	4-10 oder 6-15
(europäisch nicht genormte Legierungen)⁶⁾							
GK-Al Si5Mg T6	3.2341.62	525-535	3-6	20-50	-	155-165	6-8
G-Al Mg5SiCu(Mn) (entspannt)	-	-	-	-	-	250-300	2-6 ⁴⁾
G-Al Cu4Ni2Mg T4	-	510-520	3-6	20-80 ³⁾	-	20 ⁴⁾	120
G-Al Cu4Ni2Mg T6	-	510-520	3-6	20-80 ³⁾	-	160-180	4-6
G-Al Cu4Ni2Mg T7	-	510-520	3-6	-	(ruhend)	260-288	2-3
G-Al Mg3Si T6	3.3241.61	545-555	4-8	20-50	-	160-170	8-10
GK-Al Mg3Si T6	3.3241.62	545-555	4-8	20-50	-	160-170	8-10
GF-Al Mg3Si T6	3.3241.63	545-555	4-8	20-50	-	160-170	8-10
*) Anhaltswerte, ermittelt an den in Deutschland üblichen Legierungen (DIN EN 1706 beziehungsweise DIN 1725-2)							
1) Dauer ohne Anwärmzeit; längere Zeiten für Sandguss, kürzere Zeiten bei Kokillenguss							
2) Bei dickwandigem Sandguss Temperatur 510 °C bis 520 °C, Glühzeit von 8 bis 24 h							
3) oder in Öl							
4) oder 95 °C bis 105 °C, zirka 2 h							
5) Gegebenenfalls beschleunigte Abkühlung nach dem Gießen							
6) nicht europäisch genormte Legierungen, werden mit den alten Bezeichnungen (nach DIN 1725-2) beschrieben							

[Tabelle 10] Vergleich der europäisch genormten Zustandskurzzeichen (nach DIN EN 1706 bzw. auch DIN EN 515) und der alten DIN-Anhängezahlen und anderen national genormten Anhängezahlen für wärmebehandelte Gussstücke

Wärmebehandlung	Europäisches Kurzzeichen DIN EN 1706	Deutsches Kurzzeichen (DIN) ¹⁾	USA Kurzzeichen (AA)	Britisches Kurzzeichen (BS)	Französisches Kurzzeichen (AFNOR) ²⁾	ISO	Anhängezahl (DIN)
kaltausgehärtet	T4	ka	-T4	-TB	Y34	TB	.41; .42; .45
warmausgehärtet	T6	wa	-T6	-TF	Y33	TF	.61; .62; .63
teilausgehärtet	T64	ta	-	-	-	-	.63; .64
kaltausgelagert	T1	-	-	-	-	-	-
warmausgelagert	T5	-	-T5	-TE	Y35	TE	-
geglüht und abgeschreckt	-	-	-	-	-	-	-
nicht abgeschreckt	-	g	-	-	-	O	.44; .45
überhärtet	T7	-	T7	-TB7	Y36	-	.81; .82
entspannt	-	-	-	-TS	-	(O)	-
stabilisiert	-	-	-	-	Y35	TM	-
weichgeglüht	O	-	-O	-	Y31	O	-
Gusszustand	F	³⁾	-F	-M	Y30	M	.01; .02; .05; .09
1) Nur die mit einem europäischen Kurzzeichen versehenen Zustände sind in DIN EN 1706 Teil 2 genormt							
2) Die Kurzzeichen gelten für Kokillenguss; statt erster Ziffer 3 werden die Ziffern 2 und 4 für Sand- bzw. Druckguss verwendet							
3) Vorangestelltes Kurzzeichen: G-, GK-, GD-, GF- für Sand-, Kokillen-, Druck- und Feinguss							
Anmerkung: Bei Aluminium-Gusslegierungen, die nach dem Lösungsglühen bei erhöhten Temperaturen abgeschreckt werden, können Verformungen auftreten.							

[Tabelle 11] Typische Mittelwerte der Abschreckgeschwindigkeit
(Beispielhaft für 10 mm dicke Bleche aus Al MgSi1Cu [Knetlegierung 6061])

Kühlmittel (Vol.-%)	Temperatur °C	Abschreckgeschwindigkeit in °C/s im Bereich 400 bis 200 °C
Wasser (100 %)	24 bis 27	650 bis 900
Wasser (100 %)	71	85
Wasser (100 %)	100	6
Ölemulsion (10 %)	24 bis 27	55
Mineralöle (100 %)	24 bis 27	70
Flüssigstickstoff (100 %)	-196	6
Ruhige Luft (100 %)	24 bis 27	0,6

Herausgeber

GDA – Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.
Am Bonnhof 5
40474 Düsseldorf
Germany

Gestaltung

Sektor GmbH, Düsseldorf



GESAMTVERBAND DER
ALUMINIUMINDUSTRIE e.V.

Am Bonnheshof 5
40474 Düsseldorf
Postfach 10 54 63
40045 Düsseldorf
Tel.: 0211 - 47 96 - 279/285
Fax: 0211 - 47 96 - 410
information @ aluinfo.de
www.aluinfo.de