

## 8 Schweißen von Aluminiumwerkstoffen

### 8.1 Grundlegende Eigenschaften von Aluminium

#### 8.1.1 Einleitung

Bei Aluminium handelt es sich im Vergleich zu Stahl um einen noch relativ jungen Konstruktionswerkstoff. Noch bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts war das Metall Aluminium unbekannt. Erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde es möglich, Aluminium auf elektrolytischem Weg in größeren Mengen zu erzeugen. Voraussetzung hierfür war die Bereitstellung großer Mengen elektrischer Energie. Als Konstruktionswerkstoff gewann Aluminium an Bedeutung, als mit der Entwicklung des Flugzeugbaues, der Fahrzeugindustrie und des Bauwesens der Ruf nach leichten und dabei hochfesten, isotropen Werkstoffen immer lauter wurde.

#### 8.1.2 Aufbau und Eigenschaften von Aluminium

In Tabelle 8-1 sind grundlegende physikalische Eigenschaften von Eisen und Aluminium gegenübergestellt. Neben dem verschiedenen mechanischen Verhalten sind für das Schweißen von Aluminium folgende Unterschiede von Bedeutung:

- erheblich geringerer Schmelzpunkt,
- dreimal größere Wärmeleitfähigkeit,
- erheblich geringerer elektrischer Widerstand,
- doppelt so großer Ausdehnungskoeffizient und
- Schmelzpunkt von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist erheblich höher als von Aluminium, bei Eisen schmelzen Metall und Oxide bei etwa gleicher Temperatur.

Auffällig bei Aluminium ist das Vorhandensein nur eines Oxides, während Stahl in verschiedenen Oxidationsstufen vorliegen kann.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  schmilzt erst bei sehr hohen Temperaturen und bildet sich auf der metallisch blanken Aluminiumoberfläche bei Raumtemperatur selbständig innerhalb kürzester Zeit wieder neu. Einerseits verbessert die recht dünne

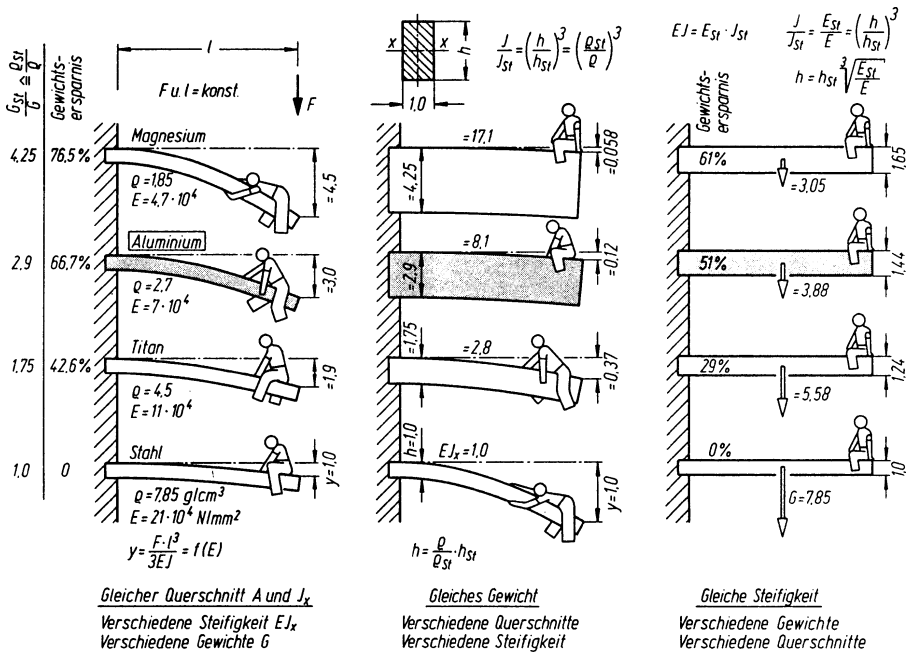
Oxidschicht den Korrosionswiderstand des Aluminiums, andererseits vermindert diese elektrisch nicht leitende Schicht die Schweißneigung des Werkstoffes und sollte vor dem Schweißprozess entfernt werden.

**Tabelle 8-1.** Vergleich der wichtigsten physikalischen Größen von Aluminium und Eisen [8-1].

		Al	Fe
Atommasse	g/mol	26,9	55,84
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,7	7,87
Kristallgitter		kfz	krz
Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>	71 * 10 <sup>3</sup>	210 * 10 <sup>3</sup>
R <sub>p0,2</sub>	N/mm <sup>2</sup>	10	100
R <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	50	200
spezifische Wärmekapazität	J/(g * K)	0,88	0,53
Schmelzpunkt	°C	660	1539
Wärmeleitfähigkeit	W/(cm * K)	2,30	0,75
spezifischer elektrischer Widerstand	μΩ * m	28 bis 29	97
Ausdehnungskoeffizient	1/K	24 * 10 <sup>-6</sup>	12 * 10 <sup>-6</sup>
Oxide		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Schmelzpunkt der Oxide	°C	2050	1400 1600 (1455)

Bild 8-1 vergleicht die mechanischen Eigenschaften von Stahl mit denen einiger Leichtmetalle. Wesentlichste Vorteile der Leichtmetalle gegenüber Stahl zeigen sich hier vor allem im rechten Teilbild. Gleiche Steifigkeit zugrunde gelegt, hat der Aluminiumträger zwar den 1,44fachen Querschnitt des Stahlträgers, dafür aber nur etwa die halbe Masse. Aluminiumgerechte Konstruktionen weisen oft einen großen Trägerquerschnitt auf, um hierdurch ein möglichst großes Flächenträgheitsmoment zu erzielen und die resultierende Durchbiegung zu reduzieren.

Mit Ausnahme des Reinstaluminiums werden fast ausschließlich legierte Aluminiumwerkstoffe technisch eingesetzt. Wichtigste Legierungselemente sind Kupfer, Silicium, Magnesium, Zink und Mangan. In Spuren

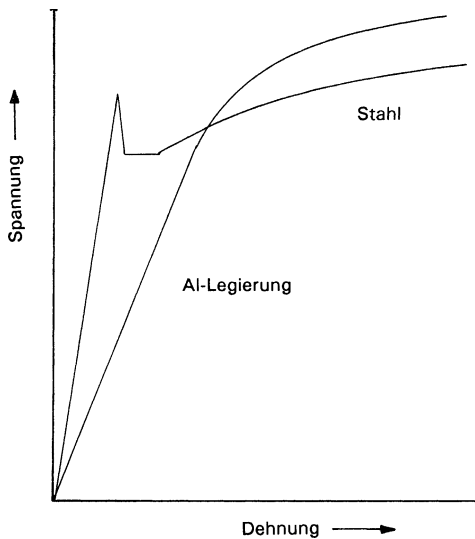


**Bild 8-1.** Durchbiegung und Gewichte von Kragträgern aus unterschiedlichen Werkstoffen unter konstanter Belastung [8-1].

können Beryllium, Bor, Natrium und Strontium in Aluminium enthalten sein. Für Aluminium existiert kein Element, das eine ähnliche Wirkung wie der Kohlenstoff bei Stahl hat. Im Gegensatz zum Stahl liegt Aluminium bei Raumtemperatur im kfz-Gitter vor. Aluminium zeigt keine Gitterumwandlung, wie dies bei unlegierten und niedriglegierten Stählen zu beobachten ist. Es ist also mit den umwandlungsfreien Aluminiumwerkstoffen nicht möglich, ein Abschreckgefüge wie Martensit zu erzeugen. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm kann aufgrund der kubisch flächenzentrierten Gitterstruktur auch keine ausgeprägte Streckgrenze nachgewiesen werden, wie sie für das krz-Gitter typisch ist (Bild 8-2).

Da Aluminium während der Abkühlung keine Gitterumwandlung erfährt, besteht bei diesem Werkstoff keine Aufhärtungsgefahr in der WEZ. Dieses Verhalten geht einher mit sehr guten Zähigkeiten, die auch bei extrem tiefen Temperaturen erhalten bleiben. Aluminium wird daher auch sehr häufig im Tieftemperaturbereich eingesetzt, z. B. für Flüssiggastanks.

Tabelle 8-2 zeigt in einer Übersicht die am häufigsten eingesetzten Aluminiumlegierungen, deren Einsatzbereiche und die zugehörigen Schweißzusatzwerkstoffe. Aluminiumwerkstoffe werden oft artgleich verschweißt, jedoch erfolgt häufig ein leichtes Überlegieren des Zusatzwerk



**Bild 8-2.** Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven von Aluminiumlegierungen und Stahl (schematisch).

**Tabelle 8-2.** Verwendungszweck und Zusatzwerkstoffe für Aluminiumlegierungen.

Al-Legierung	typischer Verwendungszweck	Verwendete Zusatzstoffe
Al 99,5	Elektrotechnik	1 Al 99,8; 4 AlSi 5
AlCuMg 1	Ingenieur- und Maschinenbau, und Nahrungsmittelindustrie	S-AlMg 4,5 Mn
AlMgSi 0,5	Bauwesen, Elektrotechnik und Eloxalqualität	S-AlMg 3; S-AlMg 5; S-AlMg 4,5 Mn
AlSi 5	Bauwesen und Eloxalqualität	S-AlSi 5
AlMg 3	Bauwesen, Apparate-, Fahrzeug-, Schiff-, Ingenieurbau und Möbelindustrie	2 AlMn; S-AlMg 3; S-AlMg 5; S-AlMg 4,5 Mn
AlMgMn	Apparate-, Geräte-, Fahrzeug-, und Schiffbau	2 AlMn; S-AlMg 3; S-AlMg 4,5 Mn
AlMn	Apparate-, Fahrzeugbau und Lebensmittelindustrie	2 AlMn; S-AlMg 3; S-AlMg 5

Grundwerkstoff Aluminium,

Prozentsatz der Legierungselemente ohne Faktor.

stoffes, um Abbrandverluste, insbesondere von Magnesium und Zink, zu kompensieren und somit die mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes auch in der Schweißnaht zu gewährleisten.

### **8.1.3 Metallkundliche Mechanismen bei der thermischen und mechanischen Behandlung von Aluminium**

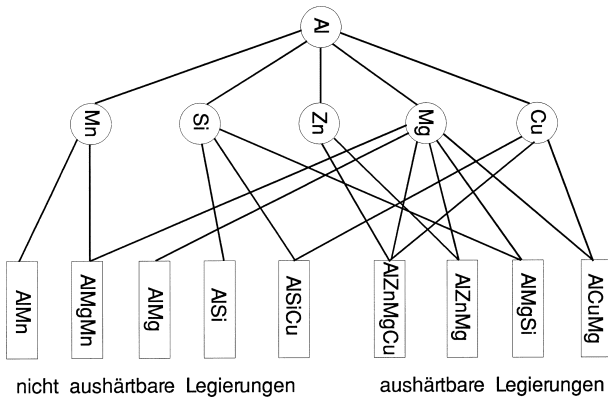
#### **8.1.3.1 Erholung und Rekristallisation**

Werden Aluminiumwerkstoffe im kalten Zustand verfestigt, so steigen Streckgrenze, Zugfestigkeit und Härte an, bei gleichzeitiger Abnahme der Bruchdehnung und -einschnürung. Die Verfestigung spielt eine besondere Rolle bei den Aluminium-Knetwerkstoffen. Um bei diesen Werkstoffen die gute Verformbarkeit wieder zu erlangen, können die Ausgangswerte durch eine Glühbehandlung teilweise oder vollständig wiederhergestellt werden. Erfolgt die Glühung oberhalb der Rekristallisationstemperatur, so findet eine vollständige Entfestigung bis auf den Ausgangszustand statt, unterhalb dieser Temperaturschwelle ist nur eine Teilentfestigung des Werkstoffes möglich. Im ersten Fall wird von der Rekristallisation gesprochen, im zweiten Fall wird der Vorgang als Erholung bezeichnet.

Bei der Erholung wird ein Festigkeitsabbau durch einen Abbau der Versetzungsdichte im Metall erzielt. Platzwechsellvorgänge von Atomen und Leerstellen führen zu einem Ausheilen der Versetzungen. Die Festigkeit des Aluminiums nimmt ohne sichtbare Veränderung des Gefüges ab. Im Gegensatz hierzu ist die Rekristallisation mit einer völligen Neubildung des Gefüges verbunden. In den Bereichen größter Verformung des Kristallgitters bilden sich aufgrund der thermischen Aktivierung Kristallkeime, die solange in das verformte Gefüge hineinwachsen, bis sie an Korngrenzen eines benachbarten Kristallisationskeimes stoßen. Entscheidend für den Verlauf einer Rekristallisation sind der Grad der eingebrachten Verformung, die Höhe der Rekristallisationstemperatur und die Dauer der Glühung. Unter gleichen Glühbedingungen gilt, dass mit steigendem Verformungsgrad die Anzahl an Kristallisationskeimen im Kristallgitter zunimmt und damit das neue Gefüge feinkörniger wird.

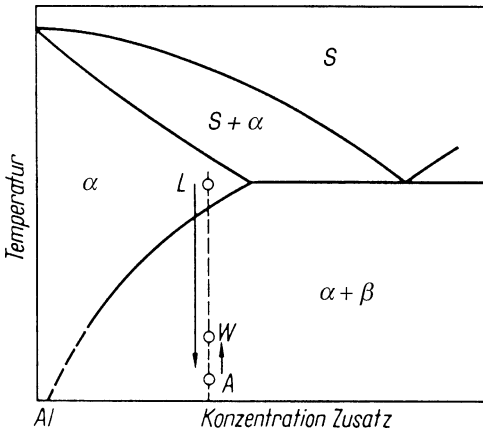
#### **8.1.3.2 Aushärtung**

Eine der wichtigsten Eigenschaft des Aluminiums ist die Aushärtbarkeit durch gezielte Zugabe von Legierungselementen. Bild 8-3 zeigt die wichtigsten Legierungselemente des Aluminiums und ihre möglichen Kombinationen. Hieraus resultiert eine grundsätzliche Einteilung der Aluminiumwerkstoffe in aushärtbare und nicht aushärtbare Al-Legierungen.



**Bild 8-3.** Einteilung des Aluminiums in aushärtbare und nicht aushärtbare Werkstoffe.

Neben den Legierungselementen ist eine gezielte Wärmebehandlung des Aluminiums wichtig für die Aushärtung des Werkstoffes. Das Aushärten lässt sich in drei Arbeitsgänge unterteilen, in denen unterschiedliche metallkundliche Mechanismen ablaufen. Der Temperaturverlauf für eine Wärmebehandlung ist anhand eines binären Systems im Bild 8-4 dargestellt:



**Bild 8-4.** Binäres System eines aushärtbaren Aluminiumwerkstoffes und zugehörige Wärmebehandlung zur Aushärtung [8-2].

1. Durch eine Glühung bei hohen Temperaturen werden die zur Aushärtung benötigten Legierungselemente im Aluminiumgitter vollständig ge-

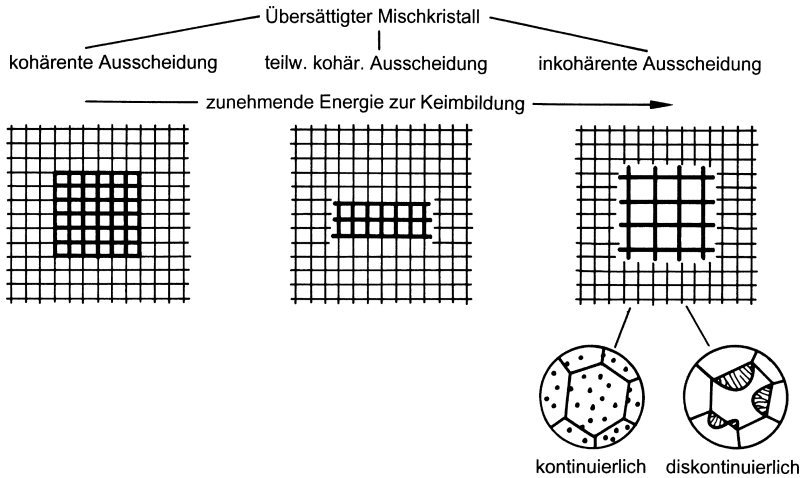
löst. Nach hinreichend langer Glühbehandlung liegt nur noch ein einphasiges Gefüge vor (Bild 8-4, Punkt L). Dieser Vorgang wird auch als Lösungsglüh bezeichnet und ist durchaus mit dem Lösungsglüh von Kohlenstoff in hochlegierten austenitischen Cr-Ni-Stählen zu vergleichen.

2. Durch schnelles Abkühlen des Aluminiums werden die gelösten Legierungselemente im Al-Gitter eingefroren, d. h., beim Erreichen des Punktes A im Bild 8-4 liegt ein an Legierungselementen übersättigter Mischkristall vor ( $\alpha$ ). Bei sehr langsamer Abkühlung, d. h. gleichgewichtsnaher Abkühlung, müsste sich entsprechend dem binären System im Bild 8-4 ein zweiphasiges Gefüge ausbilden ( $\alpha + \beta$ ). Infolge der sehr schnellen Abkühlung ist die Bildung der zweiten Phase ( $\beta$ ) jedoch unterdrückt, so dass sich der  $\alpha$ -Mischkristall aufgrund seiner Übersättigung im thermodynamischen Ungleichgewicht befindet. Nach [8-2] ist beim Abschrecken des Werkstoffes auf eine beschleunigte Abkühlung zwischen Lösungsglühtemperatur und 200°C zu achten, um eine vorzeitige Ausscheidung der gelösten Legierungselemente zu vermeiden.
3. Während einer Auslagerung des übersättigten Mischkristalls bei Raumtemperatur oder auch bei erhöhter Temperatur (Punkt W) erfolgt die Ausscheidung der zweiten Phase ( $\beta$ ); der Kristall ist durch die Ausscheidung bestrebt, das thermodynamische Gleichgewicht zu erreichen. Die Ausscheidungen haben eine Steigerung der Zugfestigkeit, Streckgrenze und Härte zur Folge, ohne die Zähigkeitswerte erheblich zu verringern. Die Bewegung von Versetzungen wird durch Ausscheidungen bzw. die dadurch erzeugten Spannungsfelder stark behindert, woraus die Änderungen der oben genannten mechanischen Kennwerte resultieren. Mit zunehmender Dichte und Feinheit der Ausscheidungen ist ein Anstieg der mechanischen Kennwerte zu beobachten.

Je nach Höhe der Auslagerungstemperatur werden die Aluminiumwerkstoffe in kaltaushärtende und warmaushärtende Werkstoffe unterteilt. Eine Kaltaushärtung des Aluminiums erfolgt in der Regel bei Raumtemperatur, hingegen wird von einer Warmaushärtung des Aluminiums bei erhöhten Temperaturen gesprochen. Die Auslagerungstemperatur hat einen entscheidenden Einfluss auf die Form und die Verteilung der Ausscheidungen. So bilden sich bei einer Kaltauslagerung kohärente Teilchen, deren chemische Zusammensetzung von der Matrix abweicht, die jedoch annähernd die gleiche Gitterstruktur besitzen (Bild 8-5). Wegen der großen Ähnlichkeit der beiden Gitterstrukturen ist die zur Keimbildung (der Ausscheidung) erforderliche Energie sehr klein, wodurch die Bildung der kohärenten Ausscheidungen bei niedrigen Temperaturen verständlich wird.

Mit zunehmender Auslagerungstemperatur sind auch teilkohärente Ausscheidungen zu beobachten, die mit einer Grenzfläche der Matrix kohärent

sind (Bild 8-5). Dabei muss die Struktur der Ausscheidung nicht mit der Struktur der Matrix übereinstimmen. Aufgrund der größeren Grenzflächenenergie (es ist zusätzlich eine Arbeit für die Bildung einer neuen Oberfläche aufzubringen), ist die Keimbildungsarbeit bei teilkohärenten Phasen größer als bei kohärenten Ausscheidungen.



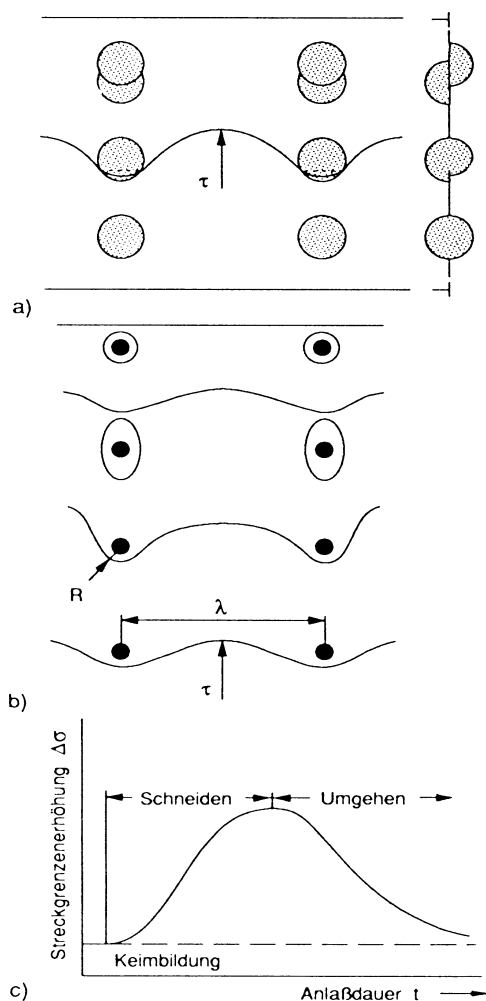
**Bild 8-5.** Ausscheidungsformen eines übersättigten Aluminium-Mischkristalls. Aus: Böhm H.: Einführung in die Metallkunde. B.I.-Hochschultaschenbücher. Band 196. Mannheim 1968, S. 194.

Als letzte Stufe der Ausscheidungen bilden sich bei stark erhöhten Temperaturen inkohärente Ausscheidungen. Bei diesem Ausscheidungstyp weicht die Gitterstruktur vollständig von der Struktur der Grundmatrix ab und erfordert folglich die größte Keimbildungsarbeit (Bild 8-5). Durch thermische Aktivierung ist es auch möglich, dass bei Raumtemperatur gebildete kohärente Ausscheidungen durch Diffusionsvorgänge in teilkohärente und inkohärente Ausscheidungen umwandeln.

Die Ausscheidungsform hat einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Die größte Gitterverspannung und somit die höchsten Festigkeitswerte sind durch Ausscheidung kohärenter Teilchen zu erzielen. Bei einer plastischen Verformung des Werkstoffes müssen sich Versetzungslinien durch das Metallgitter bewegen, wobei die Ausscheidungen als Hindernisse fungieren (Bild 8-6). Die Versetzungen können diese Hindernisse nur durch ein Schneiden (Kelly und Fine) oder Umgehen unter Zurücklassung eines Versetzungsringes (Orowan-Mechanismus) überwinden. Die hierzu benötigte Spannung ist genau dann am größten, wenn ein Schneiden der Teilchen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit geschieht, wie ein Umgehen, siehe auch Abschnitt 5.4.1.



Der im Bild 8-6 schematisch dargestellte Verformungsmechanismus des Schneidens ist vorwiegend in Legierungen mit kleinem Teilchenabstand, wie dies bei den kohärenten Ausscheidungen oft der Fall ist, zu beobachten. Der Orowan-Mechanismus tritt besonders stark bei grob verteilten Teilchen auf, die überwiegend bei inkohärenter Ausscheidung der Phasen entstehen.



**Bild 8-6.** Versetzungsbewegung in ausscheidungshärtenden Legierungen.

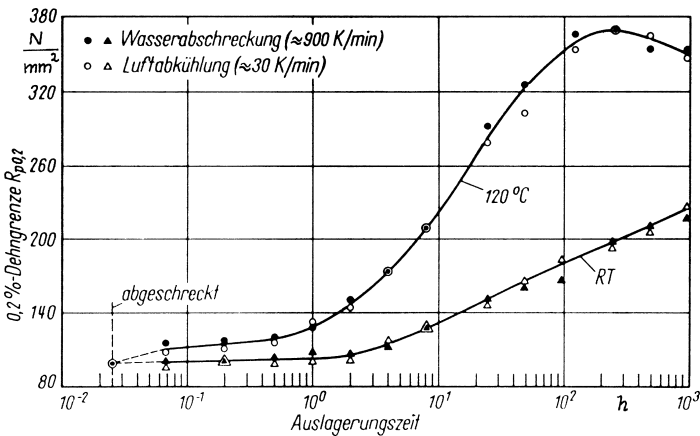
a) Schneidmechanismus (nach Kelly und Fine);

b) Orowan-Mechanismus;

c) Streckgrenzenerhöhung durch Schneiden und Umgehen von Ausscheidungen.

Aus: Schulze G., Krafka, H., u. P. Neumann: Schweißtechnik, Werkstoffe – Konstruieren – Prüfen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.

Im Bild 8-7 sind die unterschiedlichen Streckgrenzen der Legierung AlZnMg 1 für eine Kalt- und Warmauslagerung abgebildet. Die Festigkeitszunahme erfolgt bei einer Warmauslagerung wegen der begünstigten Diffusion erheblich schneller als bei einer Auslagerung bei Raumtemperatur. Jedoch wird bald ein Festigkeitsmaximum erreicht, danach ist ein deutlicher Festigkeitsabfall bei zu langen Glühzeiten zu erkennen. Dieser Festigkeitsabfall wird bei der Warmauslagerung als Überalterung bezeichnet. Die Überalterung ist nur bei einer Warmauslagerung des Al-Werkstoffes zu beobachten und auf die Zusammenballung der ausgeschiedenen Teilchen zurückzuführen. Das Zusammenballen der Ausscheidungen wird als Koagulation bezeichnet. Grund für die Koagulation ist die Verringerung der Teilchenoberfläche bei einem Zusammenschluss vieler kleiner zu wenigen großen Ausscheidungen. Hierdurch wächst der mittlere Teilchenabstand  $\lambda$  (siehe Bild 8-6), so dass die Festigkeitswerte bei einer Überalterung des Al-Werkstoffes wieder abnehmen. Die Koagulation der Ausscheidungen ist der wichtigste Grund für die eingeschränkte Schweißeignung der aushärtbaren Al-Werkstoffe, da durch die Wärmezufuhr eine unkontrollierte Erwärmung des Grundwerkstoffes erfolgt und in der WEZ dieser Werkstoffe eine deutliche Festigkeitsabnahme zu verzeichnen ist.

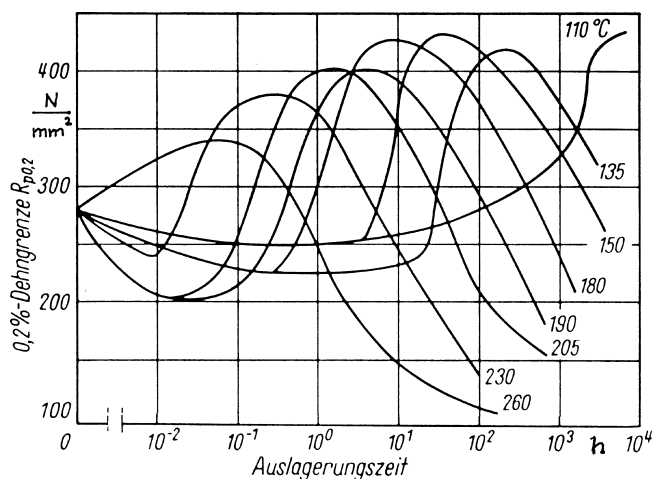


**Bild 8-7.** Streckgrenzenenerhöhung des aushärtbaren Aluminiumwerkstoffes AlZnMg 1 bei Warm- und Kaltauslagern [8-2].

Aus Bild 8-7 wird eine weitere Besonderheit des Aushärtungsvorganges deutlich. Aus dem einphasigen Gefüge wird aufgrund der thermodynamischen Instabilität eine zweite Phase ausgeschieden. Damit dieser Vorgang ablaufen kann, müssen zuerst Keime der zweiten Phase gebildet werden.

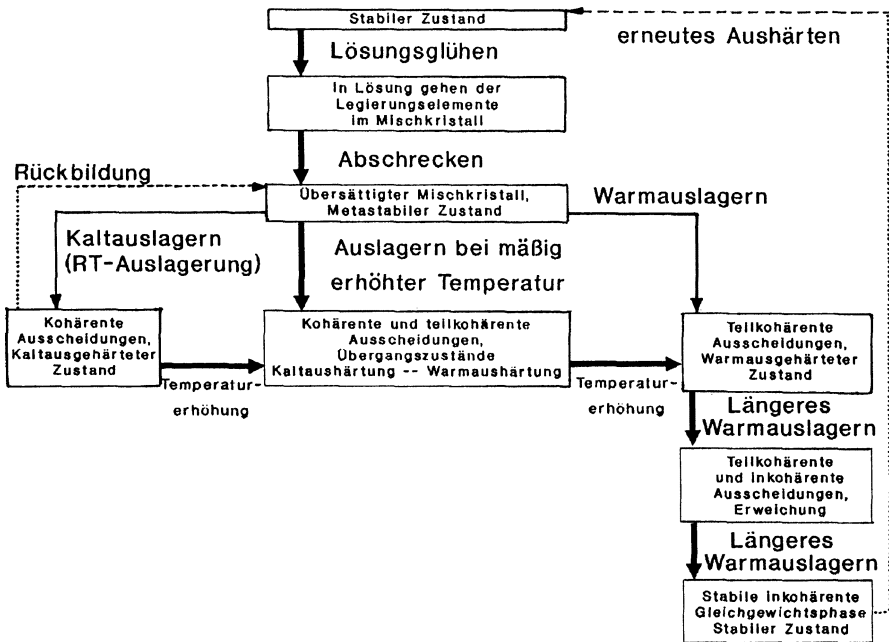
Bis zum Beginn der Keimbildung ist aber eine gewisse Zeit erforderlich, die auch als Inkubationszeit bezeichnet wird. Nach Bildung der ersten Ausscheidungskeime ist ein deutlicher Festigkeitsanstieg des Al-Werkstoffes festzustellen.

Die Auslagerungstemperatur beeinflusst zusätzlich Höhe und Lage des Festigkeitsmaximums. Prinzipiell gilt, dass mit steigenden Auslagerungstemperaturen das Festigkeitsmaximum zu geringeren Zeiten verschoben ist, jedoch die erzielbare Festigkeit mit steigender Temperatur abnimmt. Hieraus lässt sich ableiten, dass die höchsten Festigkeitswerte bei einer Kaltaushärtung des Werkstoffes zu erzielen sind, jedoch ist das Maximum der Festigkeit erst nach sehr langen Auslagerungszeiten zu erreichen. Im Bild 8-8 ist dieser Sachverhalt nochmals anhand der aushärtbaren Al-Legierung AlCuSiMn dargestellt. Es ist zu erkennen, dass selbst bei einer Auslagerungstemperatur von 110°C das Maximum der Streckgrenze erst nach über einem Jahr ( $10^4$  h) erreicht wird, die erzielte Streckgrenzenerhöhung jedoch deutlich über der einer Aushärtung bei 260°C liegt.



**Bild 8-8.** Einfluss der Auslagerungstemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Aushärtung und erzielbare Festigkeitssteigerung einer AlCuSiMn-Legierung [8-2].

Bild 8-9 zeigt abschließend noch einmal einen vollständigen Überblick über die einzelnen Schritte zur Aushärtung von Al-Werkstoffen.

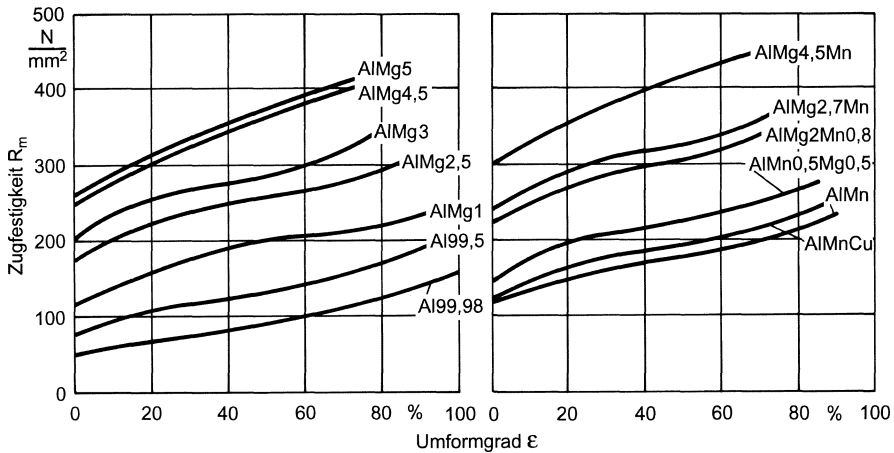


**Bild 8-9.** Überblick über den Vorgang der Aushärtung von Aluminium [8-2].

### 8.1.3.3 Kaltverfestigung

Nicht aushärtbare Al-Werkstoffe besitzen in der Regel eine geringe Festigkeit. Aus diesem Grund wird zur Festigkeitssteigerung eine Kaltumformung des Werkstoffes vorgenommen (Kaltverfestigung). Dadurch wird die Versetzungsdichte im Aluminium erhöht, was wiederum zu einem Anstieg der Streckgrenze, Zugfestigkeit und Härte, aber auch zu einem Verlust an Bruchdehnung und -einschnürung führt. Neben dem Umformgrad ist das Verfestigungsverhalten von der chemischen Zusammensetzung, dem Gefügezustand, der Umformgeschwindigkeit und der Umformtemperatur abhängig.

Im Bild 8-10 ist die Auswirkung einer Kaltverformung auf die Festigkeit von nicht aushärtbaren Al-Werkstoffen dargestellt. Deutlich erkennbar ist auch der Einfluss der Legierungselemente auf die Festigkeitssteigerung. Der Effekt der Festigkeitssteigerung durch Zugabe anderer Elemente wird auch als Mischkristallverfestigung bezeichnet.



**Bild 8-10.** Kaltverfestigung von Aluminiumwerkstoffen in Abhängigkeit vom Umformgrad [8-1].

## 8.2 Schweißen von Aluminium

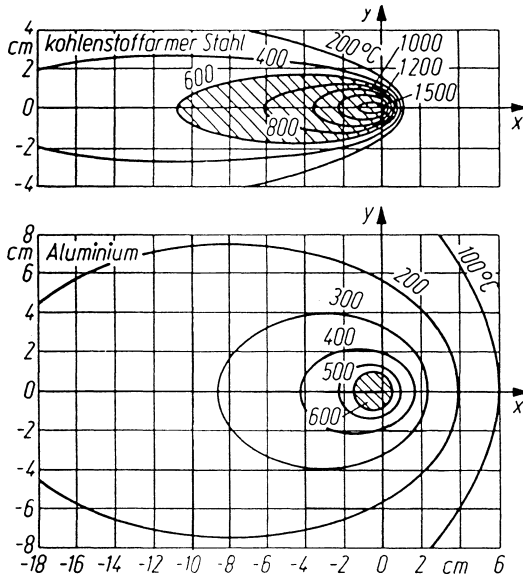
### 8.2.1 Einleitung

Das Schweißen der Aluminiumwerkstoffe weist einige Besonderheiten auf, die aus den besonderen physikalischen Eigenschaften des Aluminiums resultieren. Häufig werden die physikalischen Eigenschaften denen des Stahles gegenübergestellt, um daran die Unterschiede bei der schweißtechnischen Verarbeitung der beiden Werkstoffe zu erklären. Da Aluminium vorwiegend mit dem WIG- oder MSG-Verfahren geschweißt wird, sollen die Probleme, die hierbei auftreten können, in den folgenden Abschnitten unter besonderer Beachtung dieser beiden Schweißverfahren erläutert werden.

### 8.2.2 Auswirkungen der Wärmeausdehnung und -ableitung auf das Schweißergebnis

Die wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums gegenüber der von Stahl hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der Isothermenfelder beim Schweißen (Bild 8-11). In Aluminium ist der Temperaturgradient um die Schweißstelle erheblich kleiner als beim Stahl. Obwohl die Spitzentemperatur beim Aluminiumschweißen rund 900 K tiefer liegt als beim Stahlschweißen, hat das Isothermenfeld um die Schweißstelle eine erheblich größere Ausdehnung. Aus dieser Eigenschaft des Alumi-

niums folgt, dass trotz seiner tieferen Schmelztemperatur beim Aluminiumschweißen der gleichen Blechdicke nahezu die gleiche Wärmemenge wie beim Stahlschweißen eingebracht werden muss [8-3].



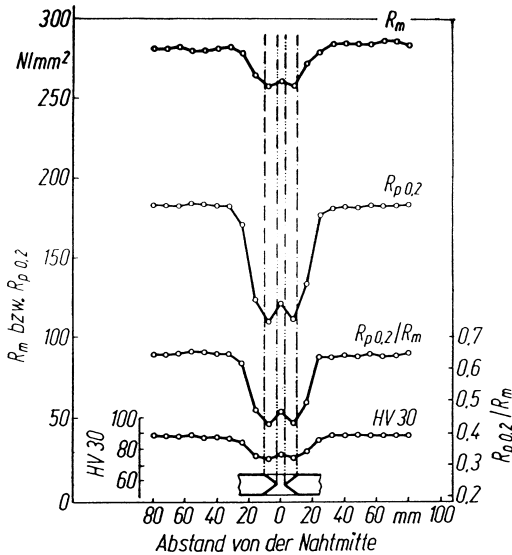
**Bild 8-11.** Isothermenfelder beim Schweißen von Stahl und von Aluminium.

Durch die große thermische Dehnung des Aluminiums und die relativ große Wärmeeinflusszone kommt es bei paralleler Schweißspalteinstellung zu einem starken Verzug der verschweißten Teile. Um diesen Verzug zu minimieren, muss den Teilen vor dem Verschweißen ein entsprechender Winkel vorgegeben werden. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei Schrumpfungsbinderung durch eine feste Einspannung der Bleche eine erhöhte Rissgefahr besteht.

### 8.2.3 Schweißen von ausgehärteten und kaltverfestigten Aluminiumlegierungen

Nicht aushärtbare Aluminiumlegierungen werden oftmals kaltverfestigt. Dabei werden die Werkstoffe je nach Umformgrad in den Anlieferungszustand „weich“, „halbhart“, „dreiviertelhart“ und „hart“ unterteilt. Durch den Schweißvorgang ist insbesondere bei den stärker verfestigten Güten mit einer erheblichen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften zu rechnen. In den Bereichen hoher Wärmeeinbringung ist bei harten und

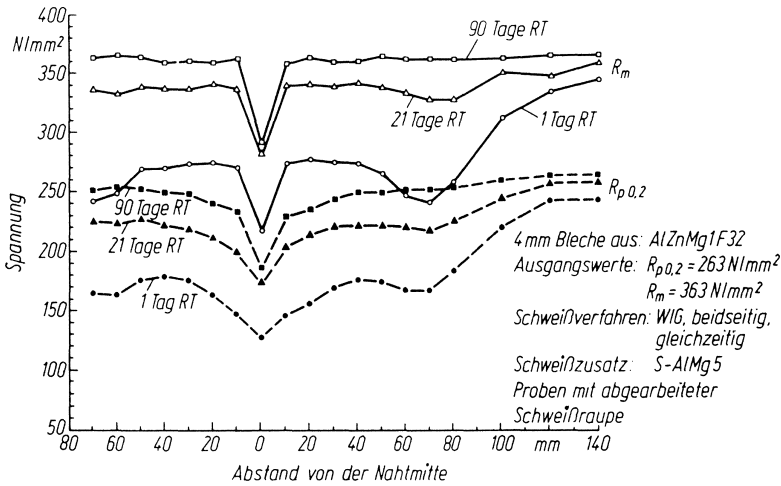
dreiviertelharten Aluminiumgüten ein starker Festigkeits- und Härteabfall zu verzeichnen (Bild 8-12).



**Bild 8-12.** Härte- und Festigkeitsabfall in der WEZ einer kaltverfestigten Aluminiumlegierung.

Infolge der beim Schweißen eingebrachten Wärme wird die Versetzungsverfestigung im Bereich der Schweißnaht aufgehoben (Erholung), darüber hinaus wird in der WEZ eine Kornvergrößerung einsetzen, was zusätzlich zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt. Dies hat zur Folge, dass Streckgrenze und Zugfestigkeit im Bereich von Schweißnaht und der WEZ stark verringert werden. Die Höhe des Festigkeitsverlustes ist im Wesentlichen von der gewählten Streckenenergie und der Anzahl der geschweißten Lagen abhängig. Während sich die Festigkeit der Schweißnaht durch die Wahl der Legierung des Schweißzusatzes beeinflussen lässt, ist der Festigkeitsverlust durch den Schweißvorgang in der WEZ irreversibel.

Ähnlich den kaltverfestigten Aluminiumlegierungen ist ein Abfall der Festigkeits- und Härtewerte auch bei den aushärtenden Legierungstypen festzustellen (Bild 8-13). Als Folge der Schweißwärme kommt es zu einem Lösungsglühen der Ausscheidungen und somit zu einem Abfall der Festigkeitswerte im Bereich der Schweißnaht. Handelt es sich bei dem verschweißten Aluminiumwerkstoff um eine warmaushärtende Legierung, so ist der Festigkeitsabfall nur durch die im Abschnitt 8.1.3.2 beschriebene Wärmebehandlung wieder aufzuheben.



**Bild 8-13.** Festigkeit einer geschweißten kaltaushärtenden Aluminiumlegierung nach verschiedenen Auslagerungszeiten bei Raumtemperatur.

Wesentlich unproblematischer ist das Verschweißen einer kaltaushärtenden Legierung. Direkt nach dem Schweißen ist in der WEZ der kaltaushärtenden Legierung ein Festigkeitsabfall festzustellen, der Werkstoff härtet bei Raumtemperatur selbständig aus. Beim Schweißen muss darauf geachtet werden, dass beim Abkühlen das Temperaturintervall zwischen  $300^\circ\text{C}$  und  $200^\circ\text{C}$  schnell durchlaufen wird.

Verweilzeiten länger als 1 min setzen die Fähigkeit des Wiederaushärtens bei Raumtemperatur stark herab. Sollten die Verweilzeiten im oben genannten Temperaturintervall eine Wiederaushärtung des Werkstoffes verhindern, so kann nur durch eine nochmalige Wärmebehandlung aus Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern die Endfestigkeit des Werkstoffes wiederhergestellt werden.

#### 8.2.4 Beeinflussung des Schweißergebnisses durch die Al-Oxidschicht

Als Folge der hohen Affinität des Aluminiums zum Sauerstoff entsteht an Luft sehr schnell eine dünne Oxidschicht auf der Werkstückoberfläche. Das Oxid der Zusammensetzung  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bildet eine dichte, festhaftende, elektrisch nicht leitende Schicht, die eine weitere, tiefergehende Oxidation des Aluminiums verhindert. Der Schmelzpunkt des Oxids liegt bei rund  $2050^\circ\text{C}$  und weicht somit erheblich vom Schmelzpunkt der Aluminiumlegierungen ab, die in einem Temperaturbereich von  $550^\circ\text{C}$  bis  $650^\circ\text{C}$  schmelzen. Beim Schweißen verhindert die Oxidschicht ein Zusammen-



laufen des Schmelzbades, so dass eine unvollständige Bindung zwischen den Fugenflanken entsteht. Um dies zu vermeiden, werden die Oxidschichten an den Nahtflanken mechanisch oder chemisch entfernt. Eine mechanische Entfernung der Oxidschichten erfolgt beim Schutzgasschweißen am besten mit Hilfe einer Edelstahlbürste, Feile, o. ä. Beim Gasschweißen werden vorwiegend Flussmittel zur chemischen Entfernung der Deckschicht eingesetzt. Direkt nach der mechanischen Entfernung der Oxidschicht bildet sich diese zwar sofort wieder neu, jedoch ist sie zum einen sehr dünn, und zum anderen besitzt sie über die Länge der Nahtflanke eine gleichmäßige Dicke.

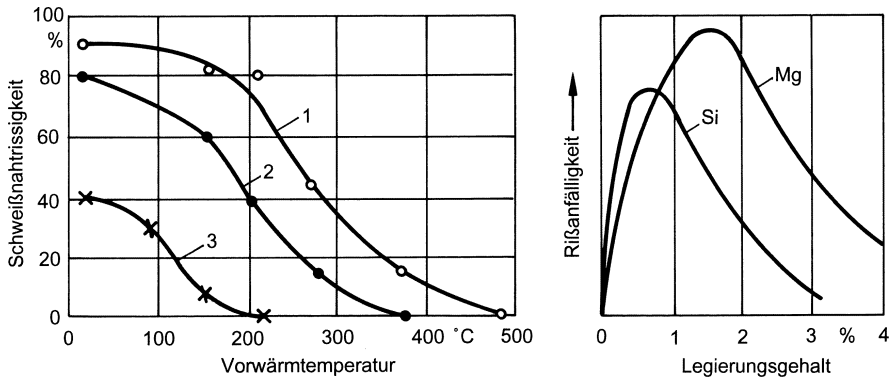
Als weiterer wichtiger Punkt zur Zerstörung der Oxidschicht ist die richtige Polung der Elektrode oder die Verwendung eines geeigneten Schutzgases beim WIG/MSG-Schweißen zu nennen. Durch eine positive Polung der Elektrode wird die Oxidhaut während des Schweißens zerstört; dieser Effekt wird auch als kathodischer Reinigungseffekt bezeichnet.

### 8.2.5 Heißrisse in Aluminiumlegierungen

Aluminiumlegierungen besitzen häufig ein großes Erstarrungsintervall und sind aus diesem Grund heißrissgefährdet. Durch die Bildung von niedrigschmelzenden Korngrenzeneutektika sind die aushärtbaren Aluminiumlegierungen am stärksten heißrissgefährdet. Kupfergehalte über 0,3 % erhöhen die Heißrissempfindlichkeit, Zirkon senkt hingegen die Rissneigung stark ab [8-4]. Deswegen müssen diese Werkstoffe mit einem Zusatzwerkstoff verschweißt werden, der nicht heißrissempfindlich ist. Dabei muss allerdings in Kauf genommen werden, dass der Zusatzwerkstoff ggf. nicht aushärtet.

Eine zusätzliche Möglichkeit zur Vermeidung der Heißrisse besteht im Vorwärmen des Werkstoffes (Bild 8-14). Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Vorwärmtemperatur der Anteil der gerissenen Schweißverbindungen zurückgeht. Das unterschiedliche Verhalten der drei eingetragenen Legierungen erklärt sich aus dem rechten Teilbild. Hier ist zu erkennen, dass der Magnesiumgehalt wesentlichen Einfluss auf die Heißrissigkeit hat. Das Maximum dieser Heißrissanfälligkeit liegt bei rund 1 % Mg (entsprechend Legierung 1). Mit steigendem Magnesiumgehalt nimmt die Heißrissneigung stark ab (vgl. auch Legierung 2 und 3, linkes Teilbild).

Zur Vermeidung von Heißrissen werden für die unterschiedlichen Legierungen z. T. sehr verschiedene Vorwärmtemperaturen empfohlen. Zschötte schlug vor, die Vorwärmtemperaturen zu berechnen, indem die Wärmeableitungsbedingungen der Aluminiumlegierung mit denen eines unlegierten Kohlenstoffstahls mit 0,2 % C verglichen werden [8-6]. Bild 8-15 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung, in der Bildlegende steht die



**Bild 8-14.** Riss­häufigkeit in einer Aluminiumschweißnaht in Ab­hän­gig­keit von der Vorwärmtemperatur [8-5].

Kurve 1: AlMgMn; Kurve 2: AlMg 2,5; Kurve 3: AlMg 3,5.

entsprechende Formel. Diese Ergebnisse sind nur als Näherung zu betrachten, im Einzelfall richtet sich die Vorwärmtemperatur nach den Herstellerangaben.

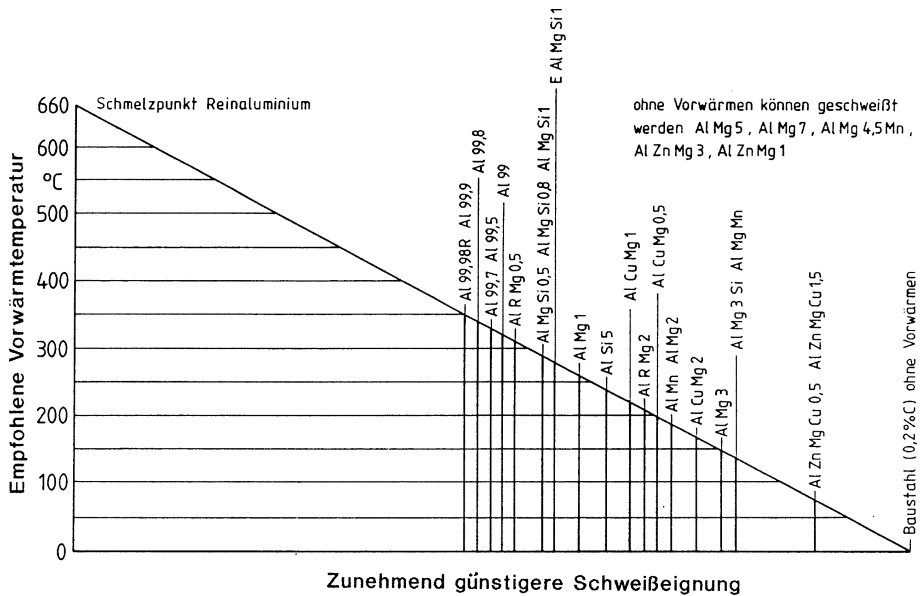
$$T_{\text{Vorw}} = T_S - \frac{745}{\lambda_{\text{Al-Leg}}};$$

$T_{\text{Vorw}}$  Vorwärmtemperatur in °C;

$T_S$  Temperatur des Schmelzbeginns (Solidustemperatur) in °C;

$\lambda_{\text{Al-Leg}}$  Wärmeleitfähigkeit in J / (cm \* s \* K).

Bei kaltaushärtenden Legierungen entstehen Heißrisse häufig in den Endkratern der Schweißnaht. Nach [8-4] ist dies auf die unterschiedliche Erstarrungstemperatur von Grundwerkstoff und Oxidhaut zurückzuführen. Wird mit hohen Lichtbogenspannungen geschweißt, so wird das Schmelzbad im Endkrater durch den Lichtbogendruck verdrängt, es entsteht ein tiefer Endkrater. Um den tiefen Endkrater aufzufüllen, sind niedrige Lichtbogenspannungen erforderlich, die jedoch eine beschleunigte Erstarrung des Schmelzbades und somit Erstarrungsrisse verursachen. Vor dem Überschiessen eines Endkraters sollten die Risse ausgeschliffen werden, da sonst eine Rissfortpflanzung innerhalb der Schweißnaht möglich ist, die bis zur völligen Zerstörung des Bauteiles führen kann. Nach [8-4] ist der Umfang der sich bildenden Endkraterisse sehr stark von den handwerklichen Fähigkeiten des Schweißers abhängig. Eine vollständige Vermeidung dieser Risserscheinung ist nicht immer möglich.



**Bild 8-15.** Richtwerte für das Vorwärmen von Aluminiumlegierungen, bezogen auf ohne Vorwärmung geschweißten Baustahl [8-5].

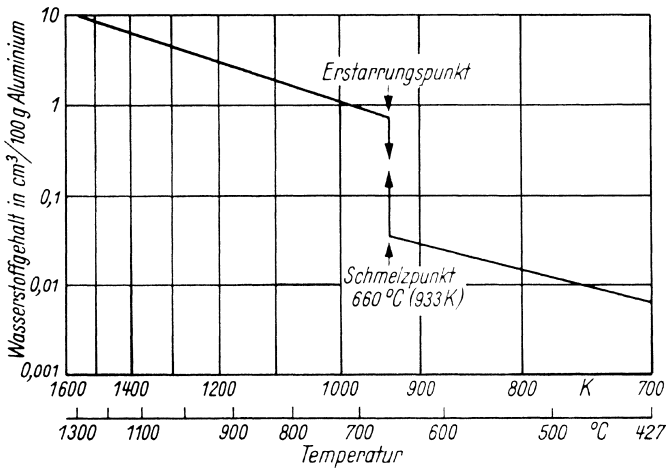
### 8.2.6 Porenbildung beim Schweißen von Aluminium

Eine weitere Problematik des Aluminiumschweißens ist die auftretende Porosität der Schweißnähte. Sie wird durch das Zusammenwirken verschiedener Besonderheiten von Aluminium hervorgerufen und ist schwierig zu vermeiden.

Die Poren entstehen im Aluminium zumeist durch Wasserstoff, der bei der Erstarrung aus der Schmelze ausgeschieden wird. Die Löslichkeit von Wasserstoff im Aluminium ändert sich am Phasenübergang Schmelze-Kristall sprunghaft, d. h., die Schmelze kann bei gleicher Temperatur im Vergleich zum sich bildenden Kristall ein Mehrfaches an Wasserstoff lösen (Bild 8-16).

Dies bedeutet, dass es bei der Erstarrung als Folge der Kristallisation zu einem Wasserstoffüberschuss in der Schmelze kommt. Dieser Überschuss scheidet sich als Gasblase an der Erstarrungsfront aus. Da Aluminium einen sehr niedrigen Schmelzpunkt und eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, ist die Erstarrungsgeschwindigkeit relativ hoch, so dass ausgetriebene Gasblasen oft keine Möglichkeit haben, in der Schmelze bis an die Oberfläche aufzusteigen. Statt dessen werden die Blasen von der Erstarrungsfront „überholt“ und verbleiben als Poren in der Schweißnaht. Dieser Vorgang wird auch als metallurgische Porenbildung bezeichnet.

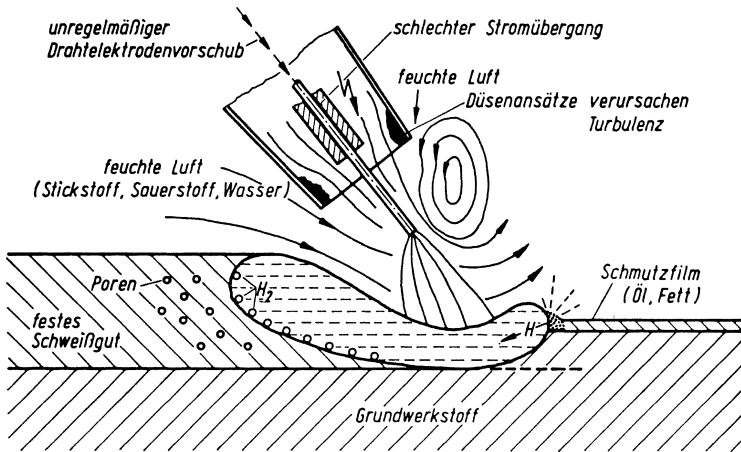
Besonders groß ist die Gefahr der Porenbildung beim Verschweißen von Reinaluminium [8-7]. Da Reinaluminium kein Schmelz- bzw. Erstarrungsintervall besitzt, besteht für die Poren keine Möglichkeit bis zur Schmelzbadoberfläche aufzusteigen. Zusätzlich tritt eine Änderung des spezifischen Volumens auf, was die Gefahr der Porenbildung weiter steigert. Die wichtigste Maßnahme zur Vermeidung von Poren in Reinaluminium ist eine ausreichende Vorwärmung des Werkstoffes.



**Bild 8-16.** Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium [8-8].

Des Weiteren ist zur Vermeidung von Poren grundsätzlich das Wasserstoffangebot in der Schmelze zu minimieren. Bild 8-17 zeigt die Wasserstoffquellen beim MSG-Schweißen von Aluminium.

Als wesentliche Wasserstoffquellen sind eine falsche Brenneranstellung zum Werkstück und daraus resultierende Turbulenzen im Schutzgasstrom, Turbulenzen durch Düsenansätze und wasserstoffhaltige Schweißzusatzwerkstoffe zu nennen. Öle und Fette auf der Blechoberfläche erhöhen ebenfalls den Wasserstoffgehalt im Schweißgut und somit die Porenhäufigkeit. Eine oftmals nicht beachtete Wasserstoffquelle stellt das Schlauchpaket beim Schutzgasschweißen dar. Die Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft kann aufgrund des großen  $\text{H}_2\text{O}$ -Partialdruckunterschiedes sehr leicht in das Schlauchpaket eindringen und von dort mit dem Schutzgasstrom in den Lichtbogen transportiert werden. Die Aufspaltung des Wassers in seine atomaren Bestandteile im Lichtbogen führt zu zahlreichen Poren im Aluminiumschweißgut.



**Bild 8-17.** Mögliche Wasserstoffquellen beim MSG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen [8-8].