

# Fülldrahtentwicklung für das MSG-Verbindungsschweißen von Aluminium Knet- und Druckgusslegierungen

M. Düding, Cottbus, D. Franik, Chemnitz, J. Herrmann, Halle, V. Michailov, Cottbus, R. Rosert, Altleiningen

## Kurzfassung

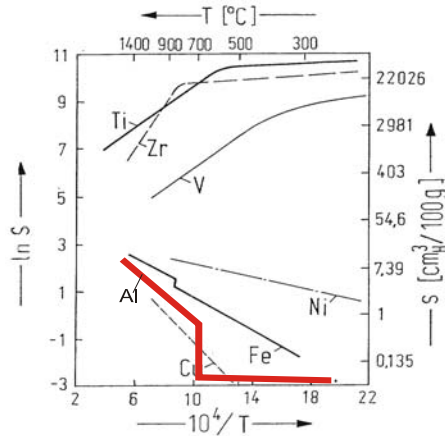
Eine gezielte metallurgische Beeinflussung der Schweißnaht zur Reduzierung von Poren und ebenso die Erhöhung der Verbindungsfestigkeit, über die derzeit mit Massivdrähten erreichbaren Werte, waren die wesentlichen Ziele der Untersuchungen. Diese leisten einen Beitrag zur Entwicklung von Al-Fülldrähten und der dazugehörigen Schweißtechnologie, welche letztendlich auch für das Verbindungsschweißen von Mischverbindungen aus hochfesten Aluminium-Knet- und Druckgusswerkstoffen zur Anwendung gelangen können. Mit dem neu entwickelten Schweißzusatzwerkstoff ließen sich Verbindungen reproduzierbar herstellen. Als Grundwerkstoffe wurden im Wesentlichen die Aluminium-Knetlegierungen EN-AW 6082 und EN-AW 7020 sowie die Druckgusslegierung AC AlMg5Si2Mn untersucht. Zur Legierungsentwicklung des angestrebten Fülldrahtes kamen neben dem MIG-Prozess mit Pulverzufuhr noch das Pulver-Plasmalichtbogenschweißen und das WIG-Schweißen mit Füllstäben sowie Massivdrahtkombinationen zum Einsatz. Es wurden verschiedene Legierungen wie AlMg, AlSi und AlMn mit unterschiedlichen Zusatzelementen wie bspw. Zn, Cu, Ni, Ti, V, Zr betrachtet. Aus den Versuchsergebnissen resultierend wurden Legierungssysteme zur Fülldrahtherstellung ausgewählt. Die schweißtechnischen Untersuchungen bezogen sich auf die Bewertung des Schweißverhaltens der entwickelten Fülldrähte, die Ermittlung der mechanisch-technologischen Gütewerte sowie äußerer und innerer Unregelmäßigkeiten, insbesondere der Porosität.

## 1 Einleitung

Aluminium hat sich zunehmend als Konstruktionswerkstoff im industriellen Einsatz bewährt und entfaltet im Rahmen von Leichtbaukonzepten vielversprechendes Potential. Im Zuge der Ressourceneinsparung und der daraus resultierenden Masseinsparung bewegter Teile und Baugruppen, insbesondere aus der Fahrzeug- und Luftfahrttechnik, gibt es vermehrt Forderungen nach dem Einsatz und der Verbindung höherfester Aluminiumwerkstoffe. Das betrifft sowohl Bleche als auch Stranggussprofile ggf. in Verbindung mit Druckguss. Bei der Verbesserung der Nutzlastanteile von Fahrzeugen weist die Verbindungstechnik eine zentrale Stellung auf. Die Schweißnaht muss die gleiche Festigkeit wie das Bauteil besitzen, um als kraftübertragendes Element wirken zu können. Das Schweißen mit Fülldrähten bietet generell die Möglichkeit, angepasste Zusatzwerkstoffe zu entwickeln, die die geforderten Eigenschaften erreichen und sich gut verarbeiten lassen. In einem Gemeinschaftsprojekt des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik (LFT) der BTU Cottbus, der SLV Halle und CeWOTec aus Chemnitz wurden Legierungssysteme für Fülldrähte zum Schweißen von Aluminium-Druckguss- und Knetlegierungen untersucht. Der LFT konzentrierte sich hierbei auf die Porenproblematik von Al-Druckguss und ihre Reduzierungsmöglichkeiten und die SLV Halle sowie CeWOTec auf die Fügbarkeit von hochfesten Aluminium-Knetlegierungen unter dem Aspekt des Erhalts der Festigkeit der Gesamtkonstruktion unter Einbeziehung der Schweißverbindung. Dies bedingt die Erzeugung einer höheren Verbindungsfestigkeit, als das mit den derzeit verwendeten Massivdrähten möglich und in der DIN 1732 Teil 3 festgeschrieben ist.

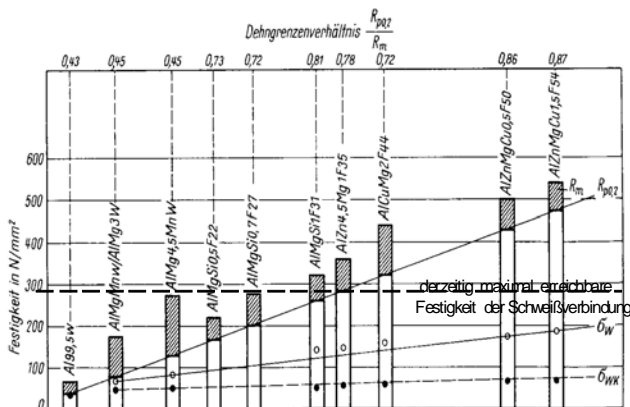
## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Der im Herstellungsprozess zwangsgelöste Wasserstoff im Druckguss gilt als Hauptursache der Porenbildung beim Schweißen. Durch den Einsatz von Formtrennmitteln und Kolbenschmierstoffen, begünstigt durch die schnelle Erstarrung, verbleiben Gasanteile zwangsgelöst im Bauteil. Die Vakuumdruckgusstechnologie verhindert durch Evakuierung der Gussform, dass sich die flüssige Aluminiumschmelze mit Gasen aus dem Hohlraum der Form anreichert. Dennoch bleiben höhere Wasserstoffgehalte im Druckguss im Vergleich zu den Knetlegierungen bestehen. Während des Schweißens scheidet der Wasserstoff aus und bildet Poren im Schweißgut (SG). Wasserstoffaffine Elemente (AMe) wie Titan, Zirkon und Vanadium haben eine höhere Löslichkeit für Wasserstoff als Aluminium und kleine Mengen der Elemente binden hohe Wasserstoffanteile, Bild 1. Durch die Zugabe von AMe soll das SG metallurgisch positiv beeinflusst werden, um eine Minimierung und homogene Verteilung der Poren während des Schweißprozesses zu erreichen.



**Bild 1: Löslichkeit von Wasserstoff in verschiedenen Elementen in Anlehnung an [1]**

Neben der Porenbildung tritt beim Schweißen eine Entfestigung in der Wärmeinflusszone (WEZ) auf. Diese hängt vom verwendeten Grundwerkstoff (GW) und vom Energieeintrag ab. Durch Einbringung von geeigneten Zusätzen in das Schweißgut und anschließende Auslagerungsprozesse sollen Festigkeits- und Härteverluste ausgeglichen werden. Derzeit liegen die maximal erreichbaren Festigkeiten bei ca. 290 N/mm<sup>2</sup> von Schweißverbindungen mit Massivdrähten als Schweißzusatz, Bild 2 (nach DIN 1732-3 - mechanisch-technologischen Kennwerte von häufig verwendeten Aluminiumwerkstoffen).



**Bild 2: Festigkeiten von Grundwerkstoffen [2]**

Neben dem Weichglühen, dem Spannungsarmglühen und dem Hochglühen stellt auch das Aushärten ein wesentliches Wärmebehandlungsverfahren von Aluminium dar. Durch dieses Verfahren kann die Festigkeit aushärtbarer Aluminiumlegierungen signifikant erhöht werden.

Das Aushärten von Aluminiumlegierungen erfolgt grundsätzlich in folgenden 3 Arbeitsschritten:

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

Kalt- bzw. Warmauslagerung und Überalterung sind dabei nicht immer genau voneinander abzugrenzen. Die für die einzelnen Vorgänge relevanten Temperaturen und Zeiten sind zudem stark legierungsabhängig [4].

### 3 Methoden zur Entwicklung von Legierungssystemen für Fülldrähte

#### 3.1 Grundwerkstoffe, Untersuchungs- und Bewertungskriterien

Als Grundwerkstoffe sind vorrangig die Knetlegierungen EN AW-6082, EN AW-7020 und die Druckgusslegierungen AC AlMg5Si2Mn und AC AlSi9MgMn (Vakuum-Druckgussverfahren) in verschiedenen Ausführungen für die Schweißversuche verwendet worden. Platten von Bauteilen der Legierung AC AlSi9MgMn weisen geringere Wasserstoffgehalte (3,85 - 8,99 ppm) als die der Legierung AC AlMg5Si2Mn (5,78 - 11,20 ppm) auf. Gehalte einer separaten Versuchsplatte der Legierung AC AlMg5Si2Mn wurden im Bereich von 3,98 - 10,28 ppm ermittelt. In den Plattenbereichen können die Wasserstoffgehalte deutlich variieren. Differenzierte Gussfehler mit verschieden starker lokaler Ausprägung wurden bei Durchstrahlungsprüfungen von Versuchsplatten festgestellt.

Untersuchungsschwerpunkte waren neben der Schweißignung die Härte- und Festigkeitseigenschaften (Zugversuche) sowie die Porenbildung. Als mögliche Legierungselemente wurden die Einzelelemente Ni, Cu, Si, Cr, Zn, Mg, Mn, Sc, Ti, V, Zr, Li und weitere ausgewählt, wobei einige dieser Elemente zu Systemen zusammengefasst wurden. Bei hochfesten Knetlegierungen ist es notwendig, eine Bestimmung der Härte zur Abschätzung erreichbarer Festigkeiten vorzunehmen. Als mindestens zu erreichende Härte wurden 90 HV<sub>10</sub> festgelegt. Für Druckgusslegierungen waren die qualitative und quantitative Bewertung des Schweißgutes hinsichtlich der Porenbildung entscheidend.

Verschleiß und Korrosion können zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines Bauteiles oder eines ganzen Systems führen. Durch Korrosionsuntersuchungen sollte gesichert werden, dass es vor allem in der WEZ zu keiner Verschlechterung der Korrosionseigenschaften im Vergleich zum GW kommt.

#### 3.2 Möglichkeiten zur Legierungsbestimmung

Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur schweißtechnischen Verarbeitung von Aluminiumschweißzusätzen hinsichtlich der Legierungsbestimmung zur Entwicklung von Fülldrähten zum Auftrag- und Verbindungsschweißen untersucht und bewertet. Mehrere Verfahren bzw. Verfahrensvarianten kamen zum Einsatz und geeignete Legierungssysteme mit den typischen, verfestigend sowie porenreduzierend wirkenden Legierungselementen wurden erzeugt. Das Versuchsprogramm zum Schweißen mit den unterschiedlichen Zusatzwerkstoffkonfigurationen umfasste verschiedene Prozesse, unter anderem:

- MIG-Schweißen mit Pulverzumischung (Draht-Pulverkombinationen)
- Pulver-Plasmalichtbogenschweißen (AC-PTA)
- WIG-Schweißen
  - mit Füllstäben

- mit Drahtkombinationen
- mit Pressstäben

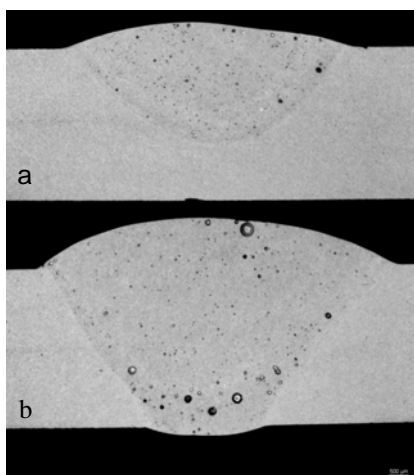
### 3.3 Auswertung des Versuchsprogramms

Die **Draht-Pulverkombinationen** haben sich als eine grundsätzlich mögliche Verfahrensweise zur Erzeugung geeigneter Legierungssysteme erwiesen. Da jedoch das parameterabhängige Einrieseln des Pulvers in das Schmelzbad nicht immer reproduzierbar gewährleistet werden konnte, kam es zu nicht genau berechenbaren Pulververlusten und somit zu Abweichungen der angestrebten chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes.

Das **Pulver-Plasmaauftragschweißen** eignet sich durch die brennerintegrierte Pulverzuführung (Mischpulver) sehr gut hinsichtlich der Einstellung einer gewünschten chemischen Zusammensetzung.

Bei Versuchen mit Knetlegierungen wurden die angestrebten Härtewerte von ca. 90 HV<sub>10</sub> im unbehandelten Schweißgut mit keinem der Grundwerkstoffe erreicht. Durch die Wärmebehandlung (Lösungsglühen, Abschrecken in Wasser und Warmauslagern) konnten die Härtewerte mit dem Legierungssystem Al 2224 von Schweißraupen auf den Grundwerkstoffen EN AW-6082 und EN AW-7075 signifikant gesteigert werden. Die mit dem Pulver Al 7075 als Zusatzwerkstoff auf den Substratwerkstoffen EN AW-6082 und EN AW-7020 erreichten Härtewerte entsprachen in etwa denen, die mit dem Zusatzwerkstoff Al 2224 erreicht werden konnten. Es kam nach der Wärmebehandlung zu keinem Härteabfall in der WEZ und im GW beim EN AW-7020. Der Cu-Anteil dieser Zusatzwerkstoffe liegt jedoch im Maximum des heißrissgefährdeten Bereichs. Aus diesem Grund wurden weiterführend verschiedene Mischpulver mit angepassten Cu-Gehalten untersucht.

**Füllstäbe** wurden durch ein mit Pulver bzw. Pulvergemisch gefülltes Rohr erstellt und anschließend WIG-AC (Argon) verarbeitet. Ein Füllstab Ø 2 mm (Rohr AlMgSi0,5 mit AlSi12-Pulver und AlTi5 Drahtkern) mit einem Füllgrad von ca. 50 % wurde auf Bauteilplatten AC AlMg5Si2Mn verschweißt, Bild 3a.

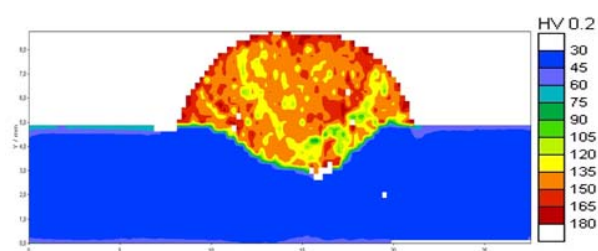


**Bild 3: Schliffbilder WIG-AC verschweißter AC AlMg5Si2Mn-Platte mit Füllstab a) Al-Si-Ti und Massivdraht b) AlMg4,5Mn**

Kleine fein verteilte Poren und eine geringe Ausbildung von größeren Poren kennzeichnen das Schweißgut bei einem Ti-Gehalt von ca. 0,9 - 1,8 %. Ein durchschnittlicher Porenanteil von 2,45 % wurde ermittelt. Das Schweißgut mit dem Zusatzwerkstoff AlMg4,5MnZr weist vermehrt größere Poren und einen Porenanteil von 2,60 % auf, Bild 3b.

Mit einem durch Hochenergiemahlen hergestellten Pulvergemisch (Al, Mg, Si, Cu, Zn) konnten Schweißversuche auf den Knetlegierungen EN AW-7020 und EN AW-6082 durchgeführt werden. Für Metalle überwiegt beim Mahlen mit hohen Drehzahlen aufgrund der hochenergetischen Kugelzusammenstöße der Effekt des Verschweißens, während die bei geringen Drehzahlen auftretenden Scherkräfte ein Brechen des Mahlgutes bewirken. Bei duktilen Materialien, wie Aluminium, findet ein Zerkleinern allerdings nur begrenzt statt. Insbesondere tritt dies bei bereits stark abgeflachten Partikeln auf [3]. Die so durch Hochenergiemahlen erzeugten mechanisch legierten Pulverpartikel eigneten sich gut zur anschließenden Herstellung von Füllstäben. Zur Erzeugung von Aluminiumpulvergemischen, die sich durch Gasverdüsen aufgrund ihrer Zusammensetzung schwer herstellen lassen, stellt das Hochenergiemahlen eine gute Alternative zum üblicherweise verwendeten Pulververdüsen dar.

**Drahtkombinationen** als Schweißzusätze - wurden durch Verdrillen mehrerer Schweißdrähte unterschiedlicher Durchmesser und Werkstoffe mit entsprechenden Legierungssystemen hergestellt. Neben einer Al-Cu-Ti-Legierung wurde auch eine Al-Cu-Zn-Legierung untersucht. Die Auftragsraupe einer Al-Cu-Zn-Legierung auf Al 99,5 hat eine gleichmäßige Nahtschuppung. Die Ergebnisse der UCI-Härtemessung weisen maximale Härtewerte mit bis zu 180 HV<sub>0,2</sub> der Schweißnaht auf, Bild 4.



**Bild 4: UCI-Härteverteilung in einer mit den Legierungselementen Al, Cu, Zn erzeugten Auftragraupe**

**Pressstäbe** (Pulver wurde in einer Matrize verpresst und unter Schutzgas wärmebehandelt) aus Mischpulver wurde auf AC AlMg5Si2Mn mit WIG-AC (Argon) verschweißt. Ein porenarmes Schweißgut mit geringer Mikroporosität wurde mit Mischpulver AlMg4,5Mn / TiAl6V4 (Mischungsverhältnis 8:2) erreicht. Die Wärmebehandlung und dabei entstandene Verbindungen unter den Pulver-Partikeln (Diffusionsbrücken) können sich positiv auf die Porenreduzierung auswirken.

Die Methoden zur Bestimmung der Legierungszusammensetzungen mit verschiedenen Schweißzusätzen haben sich grundsätzlich bewährt.

## 4 Al-Fülldrähte

Geeignete Legierungssysteme waren die Basis zur Herstellung von Al-Pulver und Al-Fülldrähten. Die Herstellung der Al-Fülldrähte erfolgte durch Befüllung des Al-Rohr-Rohlings mit dem entsprechenden Pulver und das Ziehen auf Endmaß in mehreren Ziehstufen. Die Fülldrahtherstellung erfolgte aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen der entsprechenden Legierungssysteme. Anschließend wurden die Fülldrähte für verschiedene schweißtechnische und -technologische Untersuchungen verwendet, Bild 5. Der nahtlose Fülldraht Al-Ti-V wurde mit dem Pulver der Legierung TiAl6V4 gefüllt, Bild 5a. Das Pulver wurde durch Verdüsung unter Schutzgasatmosphäre (Stickstoff) hergestellt. Wie die  $\mu$ CT-Bilder zeigen, dringen Partikel teilweise in die angrenzende Mantelfläche ein. Ein nahtloser Fülldraht des Legierungssystems Al-Mn-Si (Mn 16,9%, Si 5,8% / GDOES – Tiefenprofil) wurde ebenfalls eingesetzt, Bild 5b. Weiterhin wurde auf der Basis von Vorversuchen ein Al-Pulver mit den chemischen Elementen AlSiMnTi hergestellt und der nahtlose Fülldraht Al-Si-AMe mit diesen Pulver gefüllt, Bild 5c.

FD	Oberfläche	$\varnothing$ [mm]	Partikel	H <sub>2</sub> [ppm] gemittelt
a	glatt	1,6	sphärisch 100-250 $\mu$ m	7,7
b	glatt	1,2	blockig, kantig	6,7
c	rau, matt	1,6	sphärisch 60-145 $\mu$ m	12

**Bild 5: Eigenschaften nahtloser Fülldrähte und dessen Analyse mittels  $\mu$ CT**

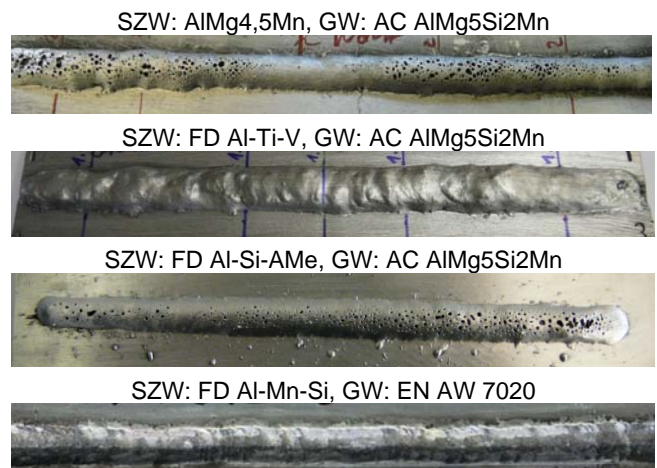
Im Anlieferungszustand wurde der Wasserstoffgehalt der Fülldrähte ermittelt. Der Fülldraht Al-Si-AMe hat einen erhöhten Gehalt von ca. 12 ppm und liegt damit im Bereich der Druckguss-Grundwerkstoffe. Die geringsten Werte wurden beim Fülldraht Al-Mn-Si mit ca. 6,7 ppm und beim Fülldraht Al-Ti-V mit ca. 7,7 ppm ermittelt.

## 5 Schweißen mit Al-Fülldrähten

### 5.1 Verarbeitung

Die untersuchten Fülldrähte konnten zum Auftrag- und Verbindungsschweißen mit dem WIG- und MIG-Prozess verwendet werden. Verschiedene Schweißanlagen (Fronius, Cloos, Lorch) wurden unter Verwendung der Schutzgase Argon und Argon/Helium eingesetzt.

Die Verarbeitung der Fülldrähte mit dem WIG-AC-Prozess ist ohne Probleme möglich. Saubere und gleichmäßige, feinschuppige Nähte konnten geschweißt werden. Beim Schweißen mit den Fülldrähten Al-Mn-Si und Al-Si-AMe bildeten sich auf der Nahtoberfläche unregelmäßige Ablagerungen (Pulveranteile aus dem Kernbereich). Die Nahtoberflächen, die Ausbildung der Nahtwurzel sowie die Durchstrahlungsprüfung von mit dem Fülldraht Al-Mn-Si geschweißten Verbindungen an Knetlegierungen entsprachen den Kriterien einer Bewertungsgruppe B. Bei der Verarbeitung des Fülldrahtes Al-Ti-V auf Druckguss mit dem MIG- und MIG-Puls-Prozess stellten sich unregelmäßige Oberflächenstrukturen ein, die Anbindung zum Grundwerkstoff war prinzipiell aber gut, Bild 6.



**Bild 6: MIG-Schweißnähte mit Massiv- und Fülldraht auf Druckguss- und Knetlegierungen**

Die Verarbeitung der nahtlosen Fülldrähte Al-Mn-Si und Al-Si-AMe mit dem MIG-Prozess erbrachte ein gutes Ergebnis an Knetlegierungen und war ohne Prozessstörungen möglich. Die besten Ergebnisse konnten vorrangig mit dem Impulslichtbogen und stehender Brennerstellung erzielt werden. Eine gute, äußere Nahtqualität wurde sowohl mit Argon, als auch mit Argon/Helium-Schutzgasgemischen erreicht. Jedoch traten offene Poren in der Schweißnaht bei der Legierung AC AlMg5Si2Mn auf, die sich ebenso mit Massivdraht AlMg4,5Mn bildeten.

### 5.2 Untersuchungsergebnisse

#### 5.2.1 Nahtloser Fülldraht FD Al-Ti-V

WIG-AC-Schweißversuche (Argon) mit Fülldraht auf AC AlMg5Si2Mn deuteten auf die Wirkungsweise der Abbildung des Wasserstoffs durch das Metallpulver

im Fülldraht (TiAl6V4) hin. Mit Erhöhung der Streckenergie konnte bei mechanisierter Kaltdrahtzufuhr jedoch keine Porenreduzierung durch den Fülldraht erreicht werden. Ebenso blieben Pulveranteile auch trotz Variation des Schutzgases (Argon/Helium) im Schweißgut teilweise unaufgeschmolzen. Auftragsschweißungen mit Stromstärken von 180 A an Knetlegierungen weisen partiell deutliche Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Schweißraupe auf. Diese wurden im REM dedektiert. Im mittleren Raupenbereich waren eine größere Anzahl dunkler unaufgeschmolzener Ti-Pulverpartikel vorhanden. Darunter befanden sich sowohl langgestreckte als auch kompakte, ebenfalls dunkle Zonen (intermetallische Verbindungen zur Hälfte aus Titan und Aluminium). Bei 200 A sind weniger unaufgeschmolzene Ti-Partikel im Schweißgut, dafür weiter ausgedehnte dunkle Bereiche mit Ti-Gehalten von ca. 28 %. Ein etwas besseres Aufschmelzverhalten der Ti-Partikel wurde unter Verwendung eines Argon/Helium (50/50) Schutzgasgemisches erreicht.

MIG-Auftragsgrauen (Argon) an AC AlMg5Si2Mn und AC AlSi9MgMn zeigten keine Verbesserung des Porenbildes im Schweißgut. EDX-Analysen des Schweißgutes sind gekennzeichnet durch Ti-Al-Phasenanteile bei einem Titangehalt von 36,81 %. Die frühzeitige Erstarrung und die hohe Viskosität von Teilen des Schweißgutes, insbesondere im Decklagenbereich wirken sich durch den hohen Titananteil negativ auf den Entgasungsprozess aus. Schlauchporen im Wurzelbereich werden durch die Al<sub>3</sub>Ti-Verbindungen (Sperrschicht) begünstigt. Die Schmelze wird zähflüssig und behindert die Ausgasung. Die Härtewerte des Schweißgutes variieren stark im Bereich von 64 HV<sub>2</sub> bis 174 HV<sub>2</sub>. Auch die Härteverteilung mittels UCI-Messung verdeutlicht die ungleichmäßige Ausprägung des Schweißgutes im Decklagenbereich. Der Einsatz des MIG-Puls-Verfahrens führte zu minimaler Verbesserung der Ergebnisse.

### 5.2.2 Nahtloser Fülldraht Al-Mn-Si

Nach der Wärmebehandlung von Verbindungsschweißungen wurden aus Blechen (t = 3 mm) der geschweißten Grundwerkstoffe Zugproben hergestellt und Zugversuche durchgeführt. Die gute, äußere Nahtqualität, die durch die Durchstrahlungsprüfungen bestätigt wurde, konnte sowohl mit Argon als auch mit Argon/Helium-Schutzgasgemischen erzeugt werden. Nadel- bzw. plattenförmige Manganausscheidungen bilden sich in der Aluminiummatrix im Schweißgut aus.

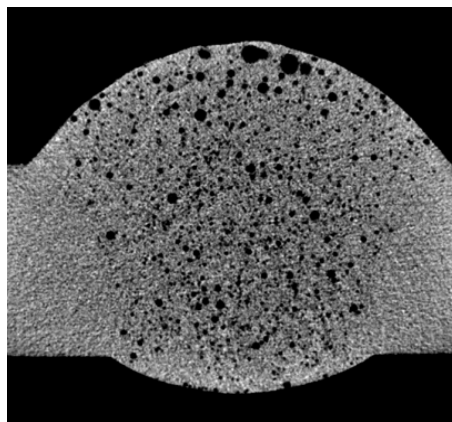
Der konzipierte Fülldraht wurde ebenfalls für das MIG-Schweißen von Druckguss eingesetzt. Bei der Analyse von MIG-Schweißnähten mittels  $\mu$ CT wurde eine Porosität von ca. 13,6 % bei Auftragsgrauen und 20,97 % bei einer I-Stoßverbindung ermittelt. Die Härteverteilung mittels UCI-Methode in der Schweißnaht weist eine deutliche Härtesteigerung um ca. 40 HV<sub>0,1</sub> gegenüber dem Grundwerkstoff auf ca. 95 HV<sub>0,1</sub> auf. Qualitätsgerechte Schweißverbindungen mit entsprechenden Festigkeiten ermöglichten die Herstellung

von Mischverbindungen aus Druckguss und höherfesten Knetwerkstoffen.

### 5.2.3 Nahtloser Fülldraht Al-Si-AME

Bei Durchstrahlungsprüfungen von MIG-Auftragsschweißungen wurde auch bei Knetlegierungen Porosität festgestellt.

Bei WIG-Schweißnähten wurden die Ablagerungen auf AC AlMg5Si2Mn als Al-Si-Mg Verbindungen klassifiziert. So wurden je nach EDX-Messpunktlage Titan, Mangan und Eisen detektiert. Punktuell wurden Gehalte von 36,84 % Titan ermittelt. Die Porosität der Auftragsgraue auf einer Versuchsplatte steigt deutlich mit Vergrößerung der Poren zum Nahtende an. Die ermittelte Porosität ( $\mu$ CT) der Schweißnaht war 0,68 % am Nahtanfang und 2,56 % am Nahtende. Ein höherer Wärmeeintrag zum Nahtende, mit teilweise sehr großen Poren, deutet auf den geringeren Gehalt an AME und einer stärkeren Ausgasung des Schweißgutes an dieser Stelle hin. Die Qualität des Gusswerkstoffs hat den größeren Einfluss und kann durch den Schweißzusatz nicht kompensiert werden. Beim MIG-Schweißen von Bauteilplatten (t = 4 mm) aus AC AlMg5Si2Mn entstehen im Decklagenbereich sehr große Poren und kleine Poren im Rest des Schweißgutes. Schlifffildanalysen weisen eine Porosität von 17,35 % auf. Durch die  $\mu$ CT-Analyse eines Schweißnahtbereiches wird dieser Eindruck bestätigt, jedoch wurden im Schweißgut Bereiche ohne große, mit nur fein verteilten Poren festgestellt, Bild 7.

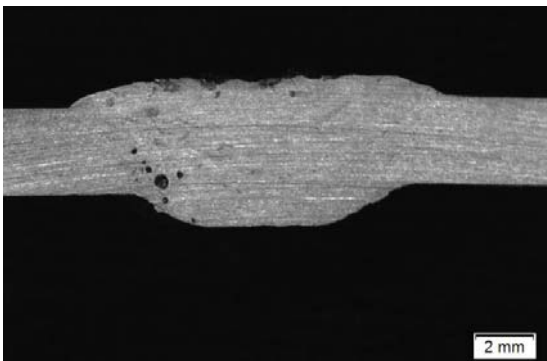


**Bild 7:  $\mu$ CT-Bild einer MIG-Auftragsgraue mit FD Al-Si-AME auf einer Bauteilplatte AC AlMg5Si2Mn**

Im betrachteten Nahtabschnitt wurde eine Porosität von ca. 11,15 % ( $\mu$ CT) ermittelt. Die flächenhafte Härteverteilung mittels UCI-Methode ergab eine um ca. 30 HV<sub>0,1</sub> höhere Härte des Schweißgutes als der Grundwerkstoff. Im Decklagenbereich entstehen teils größere Poren. Auftragschweißversuche auf der Versuchsplatte AC AlMg5Si2Mn weisen ähnliche Nahtcharakteristika auf. Bei deutlich geringerem Einbrand und dem Schweißen auf der Gusshaut haben sich ebenfalls offene Poren in der Naht gebildet (Porosität von 16,31 %,  $\mu$ CT). Eine reduzierte Porosität von 4,3 % ( $\mu$ CT) wurde an einem I-Stoß von AC AlSi9MgMn-Bauteilen festgestellt.

### 5.3 Mischverbindungen

Mischverbindungen der Knetlegierungen EN AW 6082 und der Versuchsplatten AC AlMg5Si2Mn mit jeweils einer Dicke von 3 mm wurden mit dem Fülldraht Al-Mn-Si und dem WIG-AC-Prozess verschweißt. Makroschliffbilder weisen auf der Seite des Druckgusses einige größere Poren auf, Bild 8. Auch einige Mikroporen im Schweißgut, vorwiegend im Wurzelbereich, wurden detektiert. Die UCI-Härteprüfung der Schweißnaht verzeichnet eine um ca. 20 HV<sub>0,1</sub> höhere Härte des Schweißgutes gegenüber den angrenzenden Grundwerkstoffen. Bei einer Grundhärte von ca. 95 HV<sub>1</sub> des Druckgusses ist die WEZ nahezu unbeeinträchtigt. Bei der Knetlegierung tritt ein Härteabfall in der WEZ auf.

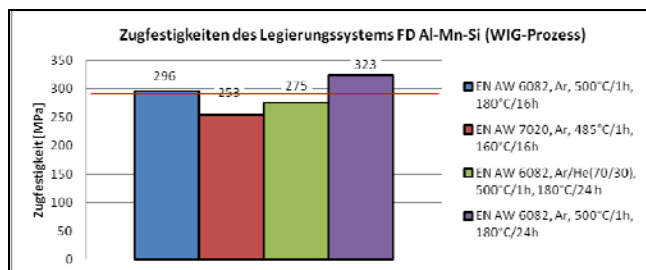


**Bild 8: Schliffbild (ungeätzt) einer Mischverbindung (links Druckguss)**

Das Gefüge ist durch stengelige Al-Mn-Si Phasenteile gekennzeichnet.

### 5.4 Festigkeiten von Schweißverbindungen

Mit den WIG-Schweißverbindungen sind höhere Festigkeiten als mit den MIG-Schweißungen erreicht worden. Die höchsten Festigkeiten von 323 MPa wurden mit dem Fülldraht Al-Si-Mn in Verbindung mit einer modifizierten Wärmebehandlung mit der Legierung EN AW 6082 erreicht, Bild 9. Das Lösungsglühen wurde bei 500 °C und die Auslagerung bei 180 °C innerhalb von 24 Stunden durchgeführt.



**Bild 9: Erreichte Zugfestigkeiten von WIG-AC-Schweißverbindungen an Knetlegierungen**

Angepasste Zugprobenformen wurden für Schweißverbindungen von Druckguss und Mischverbindungen verwendet. Die Proben waren entsprechend auf die max. Stoßbreite von 120 mm skaliert, und die Schweißnahtüberhöhungen wurden nicht abgearbei-

tet. Die WIG-AC Mischverbindung mit jeweils 3 mm dicken Platten erreichte im Mittel eine Festigkeit von 278 MPa. Der Bruch erfolgte in der WEZ zum Grundwerkstoff der Knetlegierung. Durch eine nachträgliche Wärmebehandlung der Schweißverbindungen (legierungsbezogene Parameteranpassung notwendig) können die erreichten Festigkeitswerte weiter erhöht werden.

## 6 Korrosionsverhalten

Das Korrosionsverhalten der Schweißverbindungen und Auftragraupen, erzeugt mit dem MIG- und WIG-Prozess (Grundwerkstoffe EN AW-6082 und EN AW-7020) und mit dem Fülldraht Al-Mn-Si, wurde unter Verwendung einer 3%igen Natriumchloridlösung (NaCl) untersucht. Die stationären Elektrodenpotentiale der Auftragraupen waren 0,04 bis 0,2 V positiver und die Korrosionsbeständigkeit etwas höher als die der Grundwerkstoffe. Weiterhin wurde eine zyklische Korrosionsuntersuchung an Mischverbindungen nach VDA 621-415 Wechseltest bei 35 °C mit einer 5%igen NaCl-Lösung in einer Klimakammer durchgeführt. Innerhalb einer Prüfdauer von 3 Wochen fanden 3 Zyklen statt. Die Schweißnähte der Proben und der angrenzende Grundwerkstoffbereich wurden mechanisch gereinigt und waren vor der Korrosionsprüfung metallisch blank. Erheblich mehr Korrosionsprodukte waren auf der Knetlegierung zu verzeichnen, insbesondere unmittelbar auf der Schweißnaht. Eine dunkle Verfärbung der Nahtoberfläche wurde festgestellt.

## 7 Zusammenfassung

Die untersuchten schweißtechnologischen Varianten, mit welchen geeignete Werkstoffsysteme mit typischen, verfestigend wirkenden und porenreduzierenden Legierungselementen erzeugt werden können, haben sich als geeignet erwiesen. Dabei wurden an Knetlegierungen, die am besten auswertbaren Ergebnisse sowohl mit dem Pulver-Plasmalichtbogenschweißen als auch mit dem WIG-Schweißen mit Drahtkombinationen erzielt. Versuche mit einigen Legierungssystemen wie Al-Si-Ti zeigen Tendenzen zu einer geringen Porosität im Schweißgut von Druckguss.

Die mit dem Fülldraht Al-Ti-V hergestellten Schweißnähte sind mit wasserstoffaffinen Elementen (Ti, V) überlegiert. Eine Entgasungsbehinderung der Schmelze beim Schweißen von Druckguss (infolge Bildung von Intermetalliden) insbesondere beim MIG-Prozess ist die Folge. Bessere Ergebnisse wurden mit dem MIG-Pulsprozess erzielt.

Der Fülldraht Al-Mn-Si ist zur Erzeugung höherfester Aluminiumschweißverbindungen von Knetlegierungen geeignet und kann auch die Qualitätsanforderungen erfüllen. An Schweißverbindungen der Druckgusslegierung AC AlMg5Si2Mn ließen sich ebenfalls trotz Porosität höhere Festigkeiten erreichen.

Beim Schweißen dieser Legierung mit dem Fülldraht Al-Si-AMe (Titangehalt im Pulver 1,3 %) lagen die Poren größtenteils fein verteilt im Schweißgut vor. Es

konnte keine signifikante Porenreduzierung wegen des hohen Wasserstoffgehaltes im Fülldraht und GW erzielt werden. Mit AC AlSi9MgMn wurden bessere Ergebnisse durch den geringeren Wasserstoffgehalt im GW erreicht.

Durch Hochenergiemahlen erzeugte Vorlegierungen der pulverförmigen Füllungen können einerseits zur Begrenzung von Oxid- und Hydroxidanteilen des Fülldrahtes und des Schweißgutes dienen und andererseits die benötigten chemischen Zusammensetzungen bestimmter Legierungssysteme erst ermöglichen.

## 8 Schrifttum

- [1] Dushman S.;u. J. M. Lafferty: Scientific Foundations of Vacuum Technique. John Wiley & Sons, London 1962.
- [2] Aluminium-Taschenbuch, 15. Auflage Band 3, S. 366
- [3] Suryanarayana, C.: Progress in Materials Sciences, January 2001, Volume 46, Issue1
- [4] Aluminium-Taschenbuch, 15. Auflage Band 1

### DANKSAGUNG

Das IGF-Vorhaben 16.034 BR/DVS-Nummer 01.065 der Forschungsvereinigung „Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf“ wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Unterstützung sei gedankt. Des Weiteren danken wir Frau Dr. Nestler und Herrn Siebeck vom IWW der TU Chemnitz für die Bereitstellung des hochenergiegemahlene Pulvers.

