

## Bericht 5160/11

AiF-Nr. 16.096 N

DVS-Nr. 04.047

### **Entwicklung eines geeigneten Elektrodenbearbeitungsverfahrens für das Widerstandspunktschweißen von Aluminiumwerkstoffen**

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der GSI mbH, Niederlassung SLV München, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der GSI mbH, Niederlassung SLV München.

Der Bericht enthält 177 Seiten.

September 2011



## Zusammenfassung

In diesem Forschungsvorhaben werden Untersuchungen zur geeigneten Elektrodenbearbeitung für das Widerstandspunktschweißen durchgeführt, um die bisher ungenügende Elektrodenlebensdauer bzw. Standmenge beim Schweißen von Aluminiumlegierungen deutlich zu erhöhen. Ziel ist es, die Elektrodenstandmenge von Punktschweißelektroden durch eine geeignete Vorbereitung bzw. variierende Bearbeitungszyklen der Elektrodenoberfläche (gefräste, geschliffene und polierte Oberflächen) zu steigern. Die Schweißversuche werden an verschiedenen Aluminiumwerkstoffen (aushärtbar, nicht aushärtbar, Werkstoff AW5182 AlMg4,5Mn – AW6016 AlSi1,2Mg0,4, Blechdicke  $t = 1,5$  mm und  $1,0$  mm) ausgeführt. Die Aluminiumoberflächen sind TiZr passiviert und mit Trockenschmierstoff versehen. Die Durchführung der Schweißversuche erfolgt mit einer geeigneten robotergeführten Mittelfrequenz-Punktschweißzange.

Als Kriterien für das Standmengenende werden Punktdurchmesser  $d_P < 5\sqrt{t}$  und Prozessfähigkeitswert  $CpK < 1,67$  festgelegt. Weitere Kriterien wie Oberflächenrisse, Oberflächenbeschaffenheit der Schweißpunkte sowie Anhaftungen der Elektrode an der Blechoberfläche werden im weiteren Projektverlauf nur bewertet.

Als Bearbeitungsmittel kommen Poliervliese, Schleifwalzen und Fräser zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen auf, dass das Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen mit guter Prozesssicherheit möglich ist, wenn frühzeitig eine Elektrodenbearbeitung mit geringem Abtrag erfolgt. Bei hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität der Schweißpunkte sind bei der Legierung AW5182 ( $t = 1,5$  mm, TiZr passiviert) ca. 30 Punkte möglich. Bei einer möglichst frühzeitigen Bearbeitung werden die Anlegierungsrückstände auf der Elektrode vollständig entfernt und es bilden sich fast keine Erosionsstellen. Mit dieser Methode sind mit einem Elektrodenpaar mehrere tausend Schweißpunkte möglich. Danach treten stärkere Anlegierungen auf, die aber den Punktdurchmesser nicht negativ beeinflussen. Werden schlechtere Oberflächenqualitäten zugelassen, sind auch 60 Schweißpunkte möglich. Jedoch muss dann zwischen den Bearbeitungszyklen ein Zwischenfräsen durchgeführt werden, um die stärkeren Anlegierungen vollständig zu beseitigen. Dadurch wird die Elektrodenlebensdauer reduziert. Restrückstände auf der Elektrodenoberfläche beeinträchtigen nur das Erscheinungsbild des Schweißpunktes.

Bei der Legierung AW6016 ( $t = 1,5$  mm, TiZr passiviert) reduzieren sich die Punktzahlen, wenn saubere und blanke Schweißpunktoberflächen gewünscht werden, auf ca. 10 bis 15 Punkte. Dann treten häufig stärkere Anhaftungen und Anlegierungen auf. Für diese Legierungen empfehlen sich kürzere Bearbeitungszyklen durch Polieren oder Fräsen mit geringen Abträgen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

#### Hinweis:

Das Forschungsvorhaben AiF-Nr. 16.096 N wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) mit Unterstützung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) gefördert.

Die GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV München, übernimmt keine Haftung für Schäden, die aufgrund weiterführender oder fehlerhafter Anwendung der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse entstehen.

An dieser Stelle möchten wir uns bei den im Rahmen der Durchführung des Vorhabens beteiligten Industrieunternehmen für die gute Zusammenarbeit und die materielle Unterstützung bedanken.

#### Unser Dank gilt:

AEG SVS Schweißtechnik GmbH  
AUDI AG  
BMW AG  
Daimler AG  
Düring Schweißtechnik GmbH  
Harms & Wende GmbH & Co. KG  
Lutz Precision Automotive GmbH  
Alcan Technology & Management Ltd  
Wedo Automotive GmbH

**Arbeitsplanänderung des projektbegleitenden Ausschusses:**

Ursprünglich war im Arbeitsplan vorgesehen, Schweißversuche mit Deltaspot (Fa. Fronius) durchzuführen. Der pbA ist der Meinung, dass Schwerpunkt der Untersuchung die Ermittlung einer geeigneten Elektrodenbearbeitung sein soll. Ein Verfahrensvergleich mit Delta Spot wird als nicht sinnvoll bezeichnet. Die dafür vorgesehene Projektzeit wird für weitere Untersuchungen zum Intervallschleifen und Schweißen verwendet.

# Entwicklung eines geeigneten Elektrodenbearbeitungsverfahrens für das Widerstandspunktschweißen von Aluminiumwerkstoffen

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Vorgehensweise.....</b>	<b>12</b>
3.1 Methodischer Lösungsweg.....	12
3.2 Arbeitsschritte .....	12
<b>4 Experimentelle Randbedingungen .....</b>	<b>15</b>
4.1 Werkstoffe .....	15
4.2 Servomotorische Mittelfrequenz Schweißpunktzange und Roboter.....	16
4.3 Qualitätsüberwachung Harms und Wende.....	16
4.4 Blechaufspannung .....	16
4.5 Schleif- und Poliereinrichtungen.....	16
4.6 Fräseinrichtungen .....	17
4.7 Messgeräte .....	17
4.8 Elektroden.....	18
4.9 Standmengenendekriterien .....	18
4.9.1 Unterschreitung $d_{Pmin}$ .....	18
4.9.2 CpK-Faktoren .....	19
4.9.3 Oberflächenrisse, Oberflächenbeschaffenheit.....	19
4.9.4 Anhaften der Elektrode.....	20
4.9.5 Bewertungsmatrix.....	20
4.10 Prüfmethoden.....	22
<b>5 Ergebnisse.....</b>	<b>24</b>
5.1 Ermittlung der geeigneten Schweißparameter .....	24
5.2 Herstellung der Elektroden mit variierender Rauigkeit .....	24
5.3 Grundlegendes zum Anlegierungsverhalten .....	25

5.3.1	Veränderung der Kontaktwiderstände .....	25
5.3.2	Bestimmung der Anhaftkraft Elektrode-Blech .....	26
5.4	Serienschweißungen zur Ermittlung der maximal möglichen Schweißpunktzahl – Standmengenendekriterium $d_{Pmin} + CpK$ .....	27
5.4.1	Schweißversuche mit 112 Schweißpunkten .....	27
5.4.2	Schweißversuche mit 192 Schweißpunkte .....	28
5.4.3	Zusammenfassung .....	29
5.5	Einfluß der Oberflächenqualität auf die Elektrodenstandmenge .....	30
5.5.1	Vorgehensweise .....	31
5.5.2	Elektrode geschliffen mit Leinenprodukten.....	31
5.5.3	Elektrode geschliffen mit Vliesprodukten.....	33
5.5.4	Elektrode gefräst .....	35
5.5.5	Elektrode sandgestrahlt.....	36
5.5.6	Zusammenfassung .....	36
5.6	Elektrodenlebensdaueroptimierung durch Zwischenbearbeitungsprozesse nach 15 Schweißpunkten.....	37
5.6.1	Intervallbearbeitung nach 15 Punkten .....	37
5.6.2	Intervallschliff mit Schleifleinen P80 .....	37
5.6.3	Intervallschliff mit Vlies fein .....	38
5.6.4	Zusammenfassung Zwischenbearbeitungsprozesse nach 15 Schweißpunkten .....	38
5.7	Mehrmalige Intervallbearbeitung der Elektroden mit Polier- und Schleifwerkzeug..	39
5.7.1	Serienschweißungen mit 30 Punkten – Intervallpolieren .....	39
5.7.2	Serienschweißungen mit 40 Punkten – Intervallpolieren .....	41
5.7.3	Serienschweißungen mit 50 Punkten – Intervallpolieren .....	42
5.7.4	Serienschweißungen mit 60 Punkten – Intervallpolieren .....	44
5.7.5	Serienschweißungen mit 30 Punkten – Intervallschleifen P80 .....	45
5.7.6	Serienschweißungen mit 40 Punkten – Intervallschleifen P80 .....	46
5.7.7	Serienschweißungen mit 50 Punkten – Intervallschleifen P80 .....	48
5.7.8	Serienschweißungen mit 30 Punkten – Intervallfräsen.....	49
5.7.9	Serienschweißungen mit 40 Punkten – Intervallfräsen.....	50
5.7.10	Serienschweißungen mit 50 Punkten – Intervallfräsen.....	51
5.7.11	Zusammenfassung der Bewertungsmatrix .....	52
5.8	Einfluss der Elektrodenkappenlänge .....	53
5.9	Einfluss des Elektrodenkappendurchmessers.....	54
5.9.1	Serienschweißungen mit 30 Punkten – Intervallpolieren, Elektrode $\varnothing$ 16 mm.....	54
5.9.2	Serienschweißungen mit 30 Punkten – Intervallschleifen, Elektrode $\varnothing$ 16 mm.....	55

5.9.3	Zusammenfassung – Auswirkungen eines kleineren Elektrodendurchmessers.....	56
5.10	Optimierung der Elektrodenbearbeitung für die Aluminiumlegierung 6016 .....	57
5.10.1	Schweißparameterermittlung.....	57
5.10.2	Gefräste Elektroden – AW6016.....	57
5.10.3	Polierte Elektrodenoberfläche .....	58
5.10.4	Geschliffene P80 Elektrodenoberfläche .....	59
5.10.5	Schweißversuche mit AW6016, t = 1,0 mm.....	60
5.10.6	Einfluss des Elektrodenkappenwerkstoffes .....	63
5.10.7	Zusammenfassung AW6016 .....	63
5.11	Weitere Möglichkeiten der Steigerung der Elektrodenlebensdauer bzw Einflußfaktoren .....	64
5.11.1	Umpolung nach 3 Schweißungen.....	64
5.11.2	Einfluß der Blechoberflächenqualität.....	65
5.11.3	Härteveränderung der Elektrodenkappe.....	65
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Darstellung: Foschungsziel – angestrebte Forschungsergebnisse – erzielte Forschungsergebnisse, Verwendung der Zuwendung.....</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>Schriftum .....</b>	<b>76</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>79</b>
10.1	Tabellen .....	79
10.2	Bilder.....	83



## **1 Einleitung**

Das Widerstandspunktschweißen ist in der blechverarbeitenden Industrie ein innovatives, weitverbreitetes und wirtschaftliches Schweißverfahren /1-5/. Über eine Milliarde Widerstandspunktschweißverbindungen werden hauptsächlich in der Blechverarbeitung und im Automobilbau (Karosserierohbau) täglich ausgeführt. Das Verfahren erfreut sich wegen seiner sehr hohen Wirtschaftlichkeit einer großen Beliebtheit.

Das Ziel, Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen, kann aktuell nur durch Entwicklung neuer Hybridkonzepte im Antriebs- und auch Karosserieleichtbau erreicht werden. Die Fahrzeugkonzepte streben deshalb hin zu leichteren und dünneren Materialien bei gleichzeitiger Steifigkeitserhöhung. Neben kompletten Karosserien aus Aluminium (z.B. Audi A8, A2, Jaguar XJ, BMW Z8, etc.) bieten sich auch Hybridbauweisen (z.B. BMW 5er Vorderbau) oder die Fertigung von Einzelkomponenten an /6-7/.

In zahlreichen Anwendungen wird dort mit großem Erfolg das mechanische Fügen (Clinchen und Stanznieten) eingesetzt. Diese Verbindungen zeigen großes Potential auf und sind besonders auch bei Misch- oder Hybridverbindungen bevorzugt einzusetzen. Obwohl die Festigkeitseigenschaften (Schwingfestigkeit und Crashverhalten) von geschweißten Konstruktionen schlechter sind als die von mechanischen Verbindungen, könnte nach Aussage einiger Automobilhersteller für viele Anwendungen das aufgrund neuerer Entwicklungen kostengünstigere gewordene Widerstandspunktschweißen dennoch verwendet werden.

In vielen Bereichen, wie z.B. bei der Karosserieaußenhaut und einfachen Blechgehäusen sind nicht qualitativ hochfeste Verbindungen notwendig, d.h. die Hauptlast wird nicht von den Schweißpunkten getragen. Dort liegt das Potential des Widerstandspunktschweißens, da die Fertigungskosten deutlich geringer sind.

Nach derzeitigem Stand hindert aber vor allem die geringe Elektrodenlebensdauer (Gesamtanzahl der Schweißpunkte, die mit einem Elektrodenpaar inklusive Bearbeitung der Elektrode erzielt werden kann) bzw. Standmenge (Anzahl der Schweißpunkte, die ohne Bearbeitung der Elektrode, z.B. Fräsen, erzielt werden kann) den großflächigen Einsatz des Widerstandspunktschweißens in der Fertigung.

Beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumwerkstoffen ist die gegenüber Stahl geringe Standmenge der Elektroden ein wichtiges Argument gegen den verbreiteten Einsatz dieses an sich sehr wirtschaftlichen und sicheren Schweißverfahrens. Die größten Probleme bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen bereitet die sehr unregelmäßige Oberflächenbeschaffenheit, die zu großen Prozessschwankungen beim Widerstandsschweißen führt. Dies ist insbesondere bei unbehandelten Aluminiumwerkstoffen ein großes Problem. Bereits nach wenigen Schweißungen an unbehandelten Aluminiumoberflächen entstehen Kontakt- und Schmorstellen auf der Elektrodenoberfläche.

Bei weiteren Schweißungen erfolgt dann ein Ankleben der Elektrode an das Blech und ein Elektrodenwechsel oder eine Elektrodenbearbeitung ist notwendig. Die Lebensdauer der Elektrode beträgt nur wenige Punkte und die Schweißqualität ist mangelhaft.

Mit der Einführung der Elektrodenbearbeitung durch z.B. Elektrodenfräsen wird insbesondere beim Widerstandspunktschweißen von beschichteten Stahlfeinblechen eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer erzielt. In dem Forschungsprojekt „Standmengenerhöhung beim Widerstandspunktschweißen durch Elektrodenfräsen“ /8/ konnte eine Elektrodenlebensdauer von bis zu 40000 Schweißpunkten für verzinkte Stahlbleche ermittelt werden. Es sind unter konstanten Randbedingungen z.B. bis zu 400 Punkte (ohne Stromstepper!) ohne Bearbeitung der Arbeitsfläche möglich. Je nach Anwendung sind mit Stromstepper bis zu 1000 Punkte möglich.

Beim Punktschweißen von Aluminium ist man noch von diesen hohen Punktzahlen noch weit davon entfernt. Je nach Beschaffenheit der Aluminiumoberfläche ist dort teilweise bereits nach 10 Punkten eine Bearbeitung der Elektrode nötig. Darunter leidet die Wirtschaftlichkeit des Widerstandspunktschweißens erheblich, da die Taktzeiten deutlich verlängert werden. Neben der Oberflächenbeschaffenheit beeinflussen zusätzlich die Elektrodengeometrie, der Elektrodenwerkstoff, die Schweißparameter und die Maschineneigenschaften die Elektrodenlebensdauer /9-11/.

Gelingt es, ein geeignetes Verfahren zur Elektrodenbearbeitung zu qualifizieren, kann eine wesentliche Voraussetzung für den verbreiteten Einsatz auch in der Serienfertigung geschaffen werden.

## 8 Zusammenfassung

Ziel des Forschungshabens ist es, durch systematische und wissenschaftliche Untersuchungen ein geeignetes Elektrodenbearbeitungsverfahren zum Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen zu entwickeln, um die bisher ungenügende Elektrodenlebensdauer bzw. Standmenge deutlich zu erhöhen. Damit soll sichergestellt werden, dass auch KMU über qualifizierte und unabhängige Entscheidungskriterien verfügen und diese Ergebnisse in die eigenen Anwendungsbereiche umsetzen. Durch die definierte Variation der Randbedingungen und Analyse der Auswirkung auf die Lebensdauer der Elektroden wurden zahlreiche Hinweise zum effektiven Einsatz der Bearbeitungsmethoden Schleifen, Polieren, Fräsen und Sandstrahlen geschaffen.

Die Schweißversuche erfolgen an verschiedenen Aluminiumwerkstoffen (aushärtbar, nicht aushärtbar, Werkstofflegierung AW5182, AlMg4,5Mn und AW6016 AlSi1,2Mg0,4, Blechdicke  $t = 1,0$  und  $1,5$  mm) mit Konversionsschicht TiZr und Trockenschmierstoff. Für die Untersuchungen werden u.a. eine servomotorischen Mittelfrequenz-Punktschweißzange und ein Schweißpunktroboter genutzt.

Im ersten Untersuchungspunkt wird der Einfluss der Elektrodenkappenrauigkeit auf die Elektrodenstandmenge ermittelt. Die Versuche werden mit polierten, geschliffenen und gefrästen Elektrodenoberflächen durchgeführt. Die Rauigkeiten betragen 2 bis 30  $\mu\text{m}$ .

Als Elektrodenstandmenge werden folgende Kriterien festgelegt:

- a) Punktdurchmesser  $< 5 \times \sqrt{t}$
- b) Qualitätsfähigkeitwert (CpK-Wert)  $< 1,67$

Weitere Kriterien wie Oberflächenrisse, Oberflächenbeschaffenheit der Schweißpunkte sowie Anhaftungen der Elektrode an der Blechoberfläche werden im weiteren Projektverlauf nur mit bewertet.

Bei allen durchgeführten Versuchen wird ein kontinuierlicher Punktdurchmesseranstieg über die Punktzahl festgestellt. Anhand von Messungen des Kontaktwiderstandes mit blanken und anlegierten Elektrodenkappen wird bestätigt, dass der Widerstand von verschlissenen Elektrodenkappen ca. 9 mal größer ist als bei blanken Elektrodenoberflächen. Dies führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Schweißlinse und der Punktdurchmesser wächst mit steigender Anlegierung zunächst an. Das Oberflächenbild der Schweißpunkte wird aufgrund der größeren Erwärmung jedoch immer schlechter, bis hin zu starken Anschmelzungen und Spritzern auf der Blechoberfläche.

Tendenziell wird festgestellt, dass bei besonders feinen Oberflächen die ersten Punktdurchmesser um 0,1 bis 0,2 mm kleiner ausfallen.

Für alle Verfahren gilt, dass bei der Legierung AW5182 nach ca. 30 Punkten Oberflächenrisse auftreten können. Dies ist unabhängig vom Bearbeitungsverfahren. Die Anlegungsbilder auf der Elektrode und Blech unterscheiden sich nur minimal. Oberflächenrisse treten früher auf, wenn die Punktdurchmesser auf einem Niveau größer 7,5 mm liegen. Dies ist ein Indiz für eine größere Wärmeeinbringung, wodurch die Rissbildung im Kontaktbereich gefördert wird.

Problematisch bei den rauen Bearbeitungsmedien (Schleifen P60) ist die Gefahr der starken Geometrieänderungen, wenn mehrmals geschliffen wird. Der Balligkeitsradius wird dadurch schneller vergrößert und die Stromdichte verändert sich schneller. Die Punktdurchmesser sind aus diesem Grund bei den rauerer Leinenprodukten auch häufig unrunder und elliptischer als bei den Vlies-Produkten.

Weiterhin werden mit der Aluminiumlegierung AW5182 mehrmalige Serienschweißungen mit 30, 40, 50 und 60 Punkten ausgeführt, um den Einfluß von anlegierten und bearbeiteten Elektrodenkappen auf die Standmenge herauszuarbeiten. Als Bearbeitungsmethoden werden das Polieren mit Vlies fein, Schleifen mit P80 und Folgefräsen eingesetzt. Anschließend werden die jeweiligen Elektrodenkappenbearbeitungsvarianten nach folgenden Kriterien miteinander verglichen und bewertet:

1. Erfüllung des min. CpK-Werts
2. Elektrodenlebensdauer
3. Punktzahl bei der Bearbeitung erfolgt (Bearbeitungsintervall)
4. Oberflächengüte der Schweißreihe

Für jedes Kriterium werden Punktzahlen von 0 bis 4 (nicht ausreichend bis ausgezeichnet) vergeben und Gesamtpunktzahlen ermittelt. Da die Anwender die Wichtigkeit der Kriterien unterschiedlich bewerten wurde zusätzlich die Benotung der Bearbeitungsvarianten mit fünf variierenden prozentualen Verteilungen der Kriterien durchgeführt. Legt beispielsweise ein Anwender A hohe Anforderungen an die Erfüllung der Prozessfähigkeit ( $CpK > 1,67$ ) so gewichtet er diese Kriterium mit 50%. Neben diesem Kriterium ist die Elektrodenlebensdauer eine zweite wichtige Anforderung an den Schweißprozess und wird hier mit 20% gewichtet. Die Punktzahl nach der die Bearbeitung erfolgt (Bearbeitungsintervall) und die Oberflächengüte der Schweißreihe sind weitere Faktoren und werden jeweils mit 15% bewertet. Als geeignete Methode, eine hohe Oberflächengüte, eine hohe Elektrodenlebensdauer und eine gute Prozessstabilität sicherzustellen, empfiehlt sich das Polieren nach 30 Punkten. Nachteil dieser Variante ist das „frühzeitige“ Bearbeitungsintervall für eine Serienfertigung, da nach 30 Punkten der Fertigungsprozess für die Bearbeitung unterbrochen werden muss. Die Elektrode legiert nur sehr gering an und die Rückstände lassen sich weitestgehend vollständig entfernen. Der Vorgang des Polierens lässt sich mindestens 35 mal durchführen, ohne dass das Standmengenende erreicht

wird. Dies entspricht ca. 1050 Schweißungen. Erst dann ist ein Fräsvorgang (Abtrag 0,2 mm) notwendig, um die Elektrodengeometrie wieder herzustellen. Theoretisch würde sich eine Elektrodenlebensdauer von 30000 Schweißpunkten ergeben. Werden optisch noch höhere Ansprüche gestellt, wie beispielsweise keinerlei Anlegierungen auf der Elektrode und keine Oberflächenrisse, ist eine Bearbeitung nach 15 Schweißungen zu empfehlen. Es sind mit dem kürzeren Bearbeitungsintervall ebenso ca. 1000 Schweißungen möglich.

Das Intervallschleifen, beispielsweise mit P80, liefert hinsichtlich Prozesssicherheit hohe Schweißpunktzahlen. Nachteil des Schleifens ist die stärkere Geometrieänderung, die zu einer Reduzierung der Stromdichte führt. Dies führt bereits nach 14 Schleifvorgängen zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Prozessstabilität und zum Standmengenende durch Unterschreitung des CpK-Wertes. Es errechnet sich eine Elektrodenlebensdauer von ca. 6000 Schweißpunkten.

Das konventionelle Folgefräsen mit einem Abtrag von 0,1 mm erreicht nicht diese hohen Punktzahlen. Mit gefrästen Oberflächen sind nahezu 200 Schweißungen bis zur Unterschreitung des CpK-Wertes möglich. Die Elektrodenarbeitsfläche verschleißt bei diesen hohen Punktzahlen sehr stark, sodass ein Abtrag von 0,45 mm notwendig ist. Dadurch werden im Vergleich nur geringe Elektrodenlebensdauern von ca. 2500 Punkten erzielt. Zudem sind die Schweißpunkte an der Oberfläche stark angeschmolzen und deutlich schlechter als die Bearbeitungsverfahren Polieren und Schleifen.

Eine interessante Alternative wäre das Fräsen mit minimalem Abtrag von 0,02 mm je Fräsvorgang. Damit könnte frühzeitig die Elektrode gefräst werden und es würden sich deutlich größere Elektrodenlebensdauern ergeben.

Bei Punktzahlen zwischen 40 und 50 Punkten ist ebenso das Polieren zu bevorzugen, sofern der Anwender seine Schwerpunkte auf Prozessstabilität und Elektrodenlebensdauer legt. Bei allen Versuchsreihen erreicht das Polieren hohe Punktzahlen beim Kriterium Prozessstabilität (3,6 Punkte von max. 4). Nachteil ist, dass die Oberflächengüte der Schweißpunkte mit zunehmender Intervallzahl immer schlechter wird und dort nach fünf Intervallen deutliche Anschmelzungen und Risse auf der Blechoberfläche auftreten. Beim Schleifen ist die Prozessstabilität und Oberflächengüte geringfügig schlechter. Legt der Anwender Wert auf beste Oberflächenqualität, so ist das Fräsen im Vorteil, da die Elektrodenarbeitsfläche bei entsprechenden Fräsparmetern immer vollständig abgearbeitet werden kann. Dies geht aber auf Kosten der Elektrodenlebensdauer, sofern konventionell gefräst wird.

Bei Verwendung von Elektrodenkappen mit  $D_{El} = \varnothing 16$  mm ist mit einer stärkeren Anlegierung der Elektroden zu rechnen als bei  $D_{El} = \varnothing 20$  mm. Ein Grund dafür ist die Verwendung geringerer Elektrodenkräfte (5,5 kN), wodurch die Kontaktwider-

stände höher sind als bei  $D_{El} = 20$  mm. Zudem sind die kleineren Elektrodenkappen wegen der geringeren Masse thermisch höher belastet, sodass die Anlegierungsneigung intensiver ist. Betrachtet man das Kriterium Prozessstabilität, so sind bei einem Intervall von 30 Schweißpunkten Schweißungen mit  $D_{El} = 16$  mm nicht schlechter als bei dem Elektrodendurchmesser  $D_{El} = 20$  mm. Es ist aber davon auszugehen, dass bei mehr als fünf Bearbeitungsintervallen die hohen Elektrodenlebensdauern von bis zu 20000 Punkten wie bei  $\varnothing 20$  mm nicht erreicht werden können.

Bei der Aluminiumlegierung AW6016 ist die Anlegierungsneigung stärker als bei AW5182. Erfolgt die Bearbeitung der Elektroden nach 30 Punkten, verbleiben deutlich Erosionsbereiche auf der Elektrodenarbeitsfläche. Die Anlegierungen sind vergleichbar mit 50 bis 60 Schweißpunkten bei AW5182. Da der Punktdurchmesser bereits nach 10 bis 15 Punkten von anfangs 7,0 auf 8,5 mm ansteigt, ist der CpK1 Wert unterhalb von 1,67. Führt man die Bewertung für CpK6 durch, erfüllen die Schweißungen die Mindestkriterien, da alle Punktdurchmesser  $> 6\sqrt{t}$  mm mit 7,35 mm in die Berechnung eingehen und die Streuungen geringer werden.

Der Grund für die stärkeren Anlegierungen sind die höheren Temperaturen im Kontaktbereich Elektrode und Blech. Mit Hilfe der Simulation konnte bestätigt werden, dass um 60°C höhere Temperaturen auftreten können. Damit einher geht auch ein schlechteres Oberflächenbild der Schweißpunkte im direkten Vergleich.

Bei dünneren Blechdicken 1,0 mm ( $\varnothing 16$  mm) sind Bearbeitungsintervalle von 15 Punkten zu empfehlen. Die durchaus sehr positiven Ergebnisse bei der Legierung AW5182 lassen sich beim AW6016 nicht ganz bestätigen.

Als Elektrodenwerkstoff hat sich die Legierung CuCr1Zr bewährt. Schweißungen mit dem Elektrodenwerkstoff CuAg0,1 zeigen optisch ansprechendere Schweißpunkt-oberflächen mit geringeren Anschmelzungen. Betrachtet man aber Punktdurchmesser und Cpk-Werte, so sind die Unterschiede zwischen CuCr1Zr und CuAg0,1 gering.

### Resümee

Die Elektrodenlebensdauer kann durch eine geeignete Bearbeitung deutlich verbessert werden. Das Ziel des Vorhabens, eine Elektrodenstandmenge von 30 Schweißpunkten ohne Zwischenbearbeitung zu erreichen, wurde für beide untersuchten Aluminiumlegierungen erreicht. Die höchsten Elektrodenlebensdauern werden mit der Legierung AW5182,  $t = 1,5$  mm erzielt. Es sind theoretisch 20000 Schweißpunkte mit einem Elektrodenpaar möglich, sofern beispielsweise nach 30 Punkten poliert wird.

Da durch den Bearbeitungsprozess die Elektrodenballigkeit sukzessive reduziert wird ist aber beispielweise nach 30 Poliervorgängen eine Fräsbearbeitung notwendig, um ausreichend große Punktdurchmesser und somit hohe Prozesssicherheit zu gewährleisten. Höhere Punktzahlen (ca. 60 Punkte) sind möglich, jedoch geht dies auf Kosten der Elektrodenlebensdauer und der Schweißpunktoberflächenqualität.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse des Projektes sind grundlegende Voraussetzungen für den verbreiteten Einsatz des Widerstandspunktschweißens von Aluminiumlegierungen in der Serienfertigung geschaffen worden. Die GSI mbH, NL SLV München verfügt über langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet des Widerstandspunktschweißens von Leichtbauwerkstoffen und unterstützt Anwender und Fertigungsbetriebe – auch mit diesen aktuellen Forschungsergebnissen - bei der Einführung und Umsetzung innovativer Leichtbauwerkstoffe.

Bereits publizierte Ergebnisse im Rahmen der AGV3.4 Sitzung am 19.10.2010 in Berlin, dem FA4 Kolloquium am 23.11.2010 und der Posterpräsentation auf der Veranstaltung Zulieferer Innovativ sind auf reges Interesse potenzieller Anwender gestoßen. Die Ergebnisse werden unmittelbar in die laufenden Seminare der SLV eingearbeitet und weitervermittelt. Durch die enge Zusammenarbeit mit den Arbeitsgruppen AGV3 „Widerstandsschweißen“ werden die Ergebnisse in der Merkblatt- und Normungsarbeit berücksichtigt.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

Die Untersuchungen werden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF-Nr. 16.096 N) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Unser Dank richtet sich auch an folgende Firmen, für die Unterstützung der Forschungsarbeit: AEG Schweißtechnik, AUDI AG, BMW AG, Daimler AG, Düring Schweißtechnik GmbH, Harms & Wende GmbH & Co. KG, Lutz Precision Automotive GmbH, Alcan Technology & Management Ltd, Wedo Automotive GmbH und die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

München, September 2011