

# Bericht 5152/11

Schlussbericht

IBS-3621b/160/1-IGF-0710-0002

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

## **Weiterentwicklung des Magnetimpulsschweißens (MPW) zur Herstellung hochfester Verbindungen im Automotivbereich und im Apparatebau**

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

Der Bericht enthält 102 Seiten.

Juni 2011

Hinweis:

Das Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen IBS-3621b/160/1-IGF-0710-0002, wurde aus Haushaltsmitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie 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.

München, den 28.6.2011

## Weiterentwicklung des Magnetimpulsschweißens (MPW) zur Herstellung hochfester Verbindungen im Automotivbereich und im Apparatebau

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehensweise, Durchführung des Projektes</b> .....	<b>7</b>
2.1	Auslösungsgründe .....	7
2.2	Aufgaben und Problembeschreibung.....	7
2.3	Schwerpunkte (Arbeitsprogramm) .....	8
<b>3</b>	<b>Stand der Technik / Theorie</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Experimentelle Randbedingungen</b> .....	<b>11</b>
4.1	MPW-Maschine 25-50KJ /9 kV .....	11
4.2	Verwendete Spulensysteme und Feldformer .....	11
4.3	Fixierung und Positionierung der Fügeteile in der Spule.....	13
4.4	Messtechnik zur Ermittlung des Impulsstromes und der Frequenz.....	14
4.5	System- und Prozessparameter.....	15
4.6	Ermittlung von Systemkennwerten für die eingesetzte Magnetimpulsanlage ..	18
4.7	Versuchswerkstoffe und Probengeometrien .....	20
<b>5</b>	<b>Einfluss der Arbeitsrandbedingungen und Schweißparameter auf die Magnetpuls-Schweißverbindung</b> .....	<b>21</b>
5.1	Rohrüberlappverbindungen Aluminium/Aluminium artgleich.....	22
5.1.1	Einfluss der Impulsenergie und des Spulenstroms.....	22
5.1.2	Einfluss der axialen Bauteilpositionierung in der Spule .....	24
5.1.3	Axiale Überlappung beider Fügeteile .....	25
5.1.4	Axialposition bei reduziertem Bauteildurchmesser 20 und 16 mm und verändertem Spulensystem.....	26
5.1.5	Scherzugversuche.....	26
5.1.6	Vergleich der Fügezonlänge für unterschiedliche Werkstoffzustände und Rohrwanddicken.....	28
5.1.7	Beinflussung der Härte .....	29
5.1.8	Zusammenfassung artgleiche Al/Al-Verbindungen.....	29

5.2	Rohrüberlapp-Mischverbindungen .....	30
5.2.1	Aluminium/Kupfer-Mischverbindungen .....	30
5.2.2	Aluminium/Stahl-Mischverbindungen .....	33
5.3	Fertigungsanwendungen .....	35
5.3.1	Erprobung einer Verbindung mit Stahlrohren .....	35
5.3.2	Rohr-Schlauchverbinder Aluminium/Kupfer.....	36
5.3.3	Aluminium-Filtergehäuse.....	37
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Wirtschaftliche Bedeutung.....</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Schrifttum .....</b>	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>49</b>
10.1	Tabellen .....	49
10.2	Bilder.....	58

## 1 Einleitung

Das Magnetimpulsschweißen ist ein kaltes Fügeverfahren für bevorzugt dünnwandige überlappende Strukturen, das neben artgleichen Verbindungen auch für Mischverbindungen eingesetzt werden kann. Die elektromagnetische Impulstechnologie ist neben dem Schweißen auch zum Krimpen/Verpressen, zum Umformen und zum Trennen (Stanzen, Schneiden, Perforieren) einsetzbar (Bild 1).

In der Literatur wird bislang eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahrensbegriffe und Verfahrensbezeichnungen verwendet, z.B.: Magnetic Pulse Welding/-Crimping MPW/MPC (Magnetimpuls-Schweißen/-Krimpen), Elektromagnetische Puls Technologie (EMPT), Elektromagnetisches Impulsschweißen (EMPS), Magnet Puls Umformung (MPU), Electromagnetic Forming (EMF), Electromagnetic Cutting (EMC), Schockschweißen, und andere mehr in deutscher und englischer Bezeichnung bzw. Abkürzung. Die Vielzahl unterschiedlicher Begriffe hat es dem potenziellen Anwender seit der Erfindung des Verfahrens in den 1960er Jahren erschwert, sich einen Überblick über das Verfahren, seine Anwendungspotentiale und die verschiedenen Geräteanbieter zu verschaffen. In DIN EN ISO 4063:2011-03 (Tab. 1, /1/) ist der Verfahrensbegriff „Magnetpulsschweißen“ (engl.: magnetic pulse welding „MPW“) erstmals mit der Ordnungsnummer 442 international normiert. Das Magnetpulsschweißen ist der übergeordneten Verfahrensgruppe 42 - Schweißen mit hoher mechanischer Energie - eingegliedert. Die nun normierte Bezeichnung wird zu einer Vereinheitlichung der Verfahrensbezeichnung in der Fachliteratur beitragen. Gleichwohl werden daneben auch firmenspezifische Verfahrensbezeichnungen weiterbestehen, wie dies auch bei vielen anderen Schweißprozessen (z.B. MagnetArc, ColdArc, etc.) üblich ist. In diesem Bericht wird – mit Ausnahme des Originaltitels - fortan der genormte Begriff „Magnetpulsschweißen“ (MPW) verwendet.

Durch Einsatz dieser Fügetechnologie lassen sich u.a. aufgrund kurzer Prozesszeiten ( $< 1$  ms) und der berührungsfreien Handhabung wirtschaftliche Vorteile für neue Anwendungen oder als Fertigungsalternative bei bayerischen Fertigungsbetrieben erschließen. Wirtschaftliche MPW-Prozesse fanden bisher aber kaum Einzug in die Fertigung bayerischer Betriebe. Hauptgründe dafür sind fehlende oder eingeschränkte Strukturen, d.h. eine Mangel an Verfügbarkeit von technologischen Know-How (Blackbox-Fügetechnologie) und die räumliche Distanz bayerischer Fertigungsbetriebe zu den namhaften MPW-Anlagenherstellern. Im Vergleich zu herkömmlichen Schweißprozessen sind die Anwendungsmöglichkeiten und Anwendungsvoraussetzungen des Magnetpulsschweißens nur wenig bekannt und daher bisher kaum nutzbar. Kenntnisse über elementare Entscheidungsgrundlagen, wie z.B. Prozessparameter und ihre Einflüsse auf die Verbindung, werkstoffabhängig schweißbare Durchmesser und Wanddicken, die dabei erzielbaren Verbindungseigenschaften in Relation zu den Grundwerkstoffeigenschaften sind der Allgemeinheit bisher nicht geeignet zugänglich. Bei immer kürzeren Entwicklungszyklen und Applikationszeiten ist es erforderlich, den Fertigungsbetrieben den Einsatz dieser

wirtschaftlichen Technologie dadurch zu ermöglichen, dass technologische Prozesskennwerte allgemein verfügbar werden und zudem ein ortsnaher Technologietransfer für Entwicklungsabteilungen nutzbar ist. Erst wenn die Möglichkeiten und Grenzen eines neuen Verfahrens bekannt sind, kann ein Vergleich mit herkömmlichen Fügeprozessen hinsichtlich Qualität und Wirtschaftlichkeit erfolgen. Diese Voraussetzung für die Akzeptanz und den Einsatz des MPW-Schweißens in den Produktionsbetrieben fehlt bislang. Derzeit gibt es nur wenige namhafte Maschinenhersteller. Umso wichtiger ist es für den Anwender, dass vor einer Investition in ein neues Fertigungsverfahren, ein wissenschaftlich-neutraler Bewertungs- und Entscheidungshintergrund zur Verfügung steht.

Ziel des Projektes war die Untersuchung und Festlegung spezifischer Randbedingungen für die Anwendung des Magnetpulsschweißens. Dazu wurden Untersuchungen an konkreten Dimensionen (Durchmesser, Wanddicke, Überlappungslänge), Werkstoffen (artgleich und Werkstoffkombinationen/Mischverbindungen) durchgeführt und dazu anzuwendende Arbeitsbedingungen (Bauteilvorbereitung, Bauteilfixierung, Schweißparameter) und die erzielbaren Verbindungseigenschaften ermittelt. Die prozesstechnischen Grundlagen ermöglichen Anwendern den Einstieg in diese innovative Fertigungstechnologie.

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden prozesstechnische und werkstoffkundliche Untersuchungen zum Magnetimpulsschweißen hochfester Verbindungen mit artgleichen Aluminiumwerkstoffen und Werkstoffkombinationen durchgeführt, um neue Anwendungsgebiete im Automotivbereich und im Apparatebau zu erschließen. Das Magnetpulsschweißen (engl.: Magnetic Pulse Welding, MPW) ist ein kaltes, berührungsloses Hochgeschwindigkeitsschweißverfahren für bevorzugt dünnwandige Überlappverbindungen, z.B. an rohrförmigen Bauteilen und Behältern. Die Schweißversuche wurden auf einer 9kV-50kJ-Magnetimpulsanlage ausgeführt, bei der neben der Ladespannung auch die Speicherkapazität variiert werden kann. Mittels Kondensatorentladung wird ein Hochstromimpuls durch ein Spulensystem geleitet, in dem durch Induktion ein elektromagnetischer Kraftstoß entsteht, der eine schlagartige, berührungslose Kompressionsverbindung herstellt. Kombiniert mit austauschbaren mehrwindigen Spulensystemen (MultiTurnCoils, MTC) und Feldformern angepasster Baugröße wurden Überlappverbindungen mit Rohren im Durchmesserbereich 16 - 25 mm und Wanddicken 1 - 2 mm unter variablen Arbeitsbedingungen geschweißt und deren Einfluss auf die Qualität der Verbindung untersucht. Da eine Magnetimpulsanlage als gedämpfter elektrischer Schwingkreis mit der Kapazität des Energiespeichers und erst zusammen mit der Induktivität des angeschlossenen Spulensystems als geschlossenes System arbeitet, müssen für das jeweils verwendete Spulensystem ("Arbeitswerkzeug") zunächst die Systemparameter bestimmt werden. Die Ladespannung ist dabei der einzige, stufenlos variabel einstellbare "Schweißparameter" zur Variation der Impulsenergie ( $E = 1/2 CU^2 = 1/2 Li^2$ ). Weil sowohl der für den magnetischen Impuls maßgebliche Spulenstrom als auch die Geschwindigkeit der Entladung (Eigen-/Entladefrequenz) von der Induktivität des Spulensystems abhängen, ist die Angabe der Systemparameter für das Gesamtsystem aus Energiespeicher und verwendeter Spule für die Prozessbeschreibung notwendig. Bei variabler Ladespannung 3,0 - 8,5 kV wurde mit Kapazitäten 674 - 1348  $\mu\text{F}$ , Energieniveaus von 8,5 - 38 kJ, Spulenströmen von 165 bis 355 kA und Entladefrequenzen von 7,1 bis 11,7 kHz gearbeitet. Daraus ergeben sich extrem kurze "Schweißzeiten" von nur ca. 50  $\mu\text{s}$  (bei 10 kHz, Impulszeit = 1. Halbwelle). Bei vergleichbarer Frequenz ist die Schweißzeit unabhängig vom Fügedurchmesser bzw. von der Umfangs-Nahtlänge, da die Kompression und Verschweißung gleichzeitig über dem ganzen Umfang erfolgt.

Artgleiche Rohrüberlappverbindungen aus AlMgSi0,5-T6 mit Rohren  $\varnothing 25 \times 2$  mm lassen sich in einen vergleichsweise weiten Arbeitsbereich für die Impulsenergie von 17 - 22 kJ (Spulenstrom 245 - 286 kA) sicher magnetpulsschweißen. Die dabei gemessenen Längen der Verbindungszone betragen über 8 mm, was dem mehr als Vierfachen der Wanddicke 2 mm entspricht. Festzustellen war, dass sich an der Untergrenze dieses Energiearbeitsfensters der Einfluss des Spulen-Feldformerspalt zeigt. Dort ist die magnetische Kraft etwas geringer, wodurch auch die Umformgeschwindigkeit und die erzielte Verbindungslänge bei zu niedriger Impulsenergie verringert ist, z.B. 5 - 6 mm. Dies ist bei korrekter Prozessabstimmung eine

beherrschbare Prozesserscheinung - wie sie ähnlich auch beim Schmelzschweißen von Nahtanfang-/ende-Übergängen bei Rohrschweißungen als beherrschbare Abweichung von der normalen Fügezone vorliegt. Bei zunehmender Festigkeit des Rohrwerkstoffes ( $\text{AlMgSi1}$  statt  $\text{AlMgSi0,5}$ ) bzw. verändertem Wärmebehandlungszustand, oder bei größerer Wanddicke verschiebt sich auch die für die Umformung notwendige Impulsenergie zu höheren Werten. Besonderes Kennzeichen aller magnetpuls geschweißten Verbindungen ist, dass an beiden Rändern der überlappend geschweißten Fügezone auch unverschweißte Randzonen (Spalte) verbleiben. Dies ist typisch für pressgeschweißte Überlappverbindungen, so z.B. auch bei Widerstandspunkt- oder -rollnahtschweißen. Im Fall erhöhter korrosiver Beanspruchung kann deshalb eine nachträgliche Versiegelung zweckmäßig sein, zumal der Schweißprozess stets mit blanken Fügeflächen ausgeführt wird (hier: Rohr innen gebürstet oder gedreht, Welle gedreht), um die Wiederholgenauigkeit und Prozesssicherheit zu gewährleisten. Die Tragfähigkeit der Verbindung ist durch die Randspalte nicht beeinträchtigt. Aufgrund der großen verbundenen Überlappung, die ein Vielfaches der Rohrwanddicke beträgt, erfolgt der Bruch im Scherzugversuch im Grundwerkstoff des Rohres. Durch spezielle Prüfteilvorbereitung war dabei der Festigkeitsanteil mechanischer Verklammerung ausgeschlossen, der ansonsten eine zweite Festigkeitskomponente der Verbindung zur Erhöhung der Tragfähigkeit liefert bzw. zur Entlastung der Schweißverbindung beitragen kann.

Die mikroskopische Untersuchung der Fügezone lässt plastische, wellenförmige Verwirbelungen an der Fügelinie erkennen, wie sie aufgrund vergleichbarer Verbindungsmechanismen auch vom Explosions- oder Sprengschweißen bekannt sind. Diese Welligkeit verändert sich entlang der Fügelinie und lässt so Rückschlüsse auf die idealen Kollisionbedingungen als metallografische Merkmale zu. Bei den artgleichen Verbindungen mit  $\text{AlMgSi0,5}$  war etwa in der Mitte der verbundenen Zone die feinste Welligkeit (kürzeste Wellenlänge) vorhanden, die zu beiden Rändern immer langwelliger abflacht. Dies bietet bei weiterer Analyse die Möglichkeit, anhand metallografischer Spezifikationen bei der Bauteilfreigabe, eine verbesserte Fehlerquellenanalyse für die Fertigung zu betreiben, z.B. im Hinblick auf Werkstoffchargeneinflüsse. Daraus lassen sich aber auch weitere Hinweise auf die optimierte Auslegung der Fügegeometrie bezüglich der geeigneten Kollisionsbedingungen für eine definierte Werkstoffpaarung gewinnen. Die Härteprüfung bei Verbindungen mit unterschiedlichen Aluminiumlegierungen und Behandlungszuständen zeigt gegenüber dem Grundwerkstoff stets eine geringfügige Zunahme der Härte im Fügebereich aufgrund von Kaltverfestigung. Eine Härteabnahme mit Festigkeitsverlust, wie bei thermischen Schweißprozessen üblich, tritt beim Magnetpulsschweißen in keiner der untersuchten Varianten auf. Somit wird im Zugversuch mit Bruchlage im Rohr-Grundwerkstoff die tatsächliche Festigkeit des Grundwerkstoffes übertroffen - ohne thermisch bedingte Entfestigung.

Als Mischverbindungen wurden Überlappverbindungen Aluminium/Kupfer sowie Aluminium/Stahl untersucht. Aufgrund der niedrigen Fügetemperatur lassen sich diese metallischen Mischverbindungen schweißen, wobei allerdings engere Grenzen

für die geeigneten Arbeitsrandbedingungen einzuhalten sind. Dabei sind Entladefrequenzen über 10 kHz anzustreben, weil damit auch der Einfluss des Feldformerspaltens gemindert wird (verbesserter "Konturstrom" bei reduzierter Skintiefe im Feldformer). Diese Mischverbindungen bieten besondere Anwendungspotenziale für elektrisch leitende Verbindungen sowie für hochfeste Leichtbaukomponenten.

Im Rahmen der Anwendungserprobung und -analyse wurden auch Versuche zum Magnetpulsschweißen mit umzuformenden Stahlrohren  $\varnothing 25 \times 1$  mm aus unlegiertem und legiertem Stahl erprobt. Hier konnten die erwarteten werkstoffbedingten Anwendungsgrenzen bestätigt werden. Aufgrund der verminderten elektrischen Leitfähigkeit von Stählen ist die Induktion gehemmt und somit auch der im Bauteil fließende Strom. Daraus resultiert ein abgeschwächtes "Gegenmagnetfeld" und eine verringerte magnetische Kraft - bei gleichzeitig erhöhtem Kraftbedarf durch die erhöhte Festigkeit. Trotz erhöhter Impulsenergie bis 38 kJ (Spulenstrom 355 kA) konnte mit unlegiertem Stahls235 zwar eine Kompression aber keine Schweißverbindung erzielt werden. Deshalb gilt unlegierter Stahl als zum Magnetpulsformen geeignet, aber nicht zum Magnetpulsschweißen. Noch weniger Verformung ist bei legiertem Stahl X5CrNi18-10 zu erzielen, aufgrund der nochmals verringerten elektrischen Leitfähigkeit und der verstärkten Tendenz zur Kaltverfestigung schon während der Umformung. Deshalb ist als werkstoffliche Anforderung für das umzuformende Fügeglied beim Magnetpulsschweißen immer die Kaltumformbarkeit und eine gute elektrische Leitfähigkeit erforderlich.

Mit den Untersuchungsergebnissen kann neuen Anwendern ein erweiterter Einblick in die Füge-technologie, die erforderlichen Arbeitsbedingungen und die erzielbaren Verbindungseigenschaften beim Magnetpulsschweißen gegeben werden. Zwar ist das Magnetpulsschweißen ein bis heute noch wenig bekanntes und verbreitetes Verfahren. Dennoch gibt es inzwischen Serienanwendungen, die neben der Prozessfähigkeit und Wirtschaftlichkeit auch das weitere Innovationspotential dieser Füge-technik aufzeigen - sowohl zum Schweißen, wie auch zum Krimpen. Teilbare Spulensysteme und Feldformer ermöglichen das Bauteil- oder Anlagenhändling für komplexe Fügestrukturen. Mehrfach-Spulensysteme können parallel mehrere Verbindungen mit einem Entladeimpuls ausführen. Die SLV München unterstützt interessierte Anwenderbetriebe bei der Einführung dieser innovativen Füge-technologie durch Kooperation mit Anlagenherstellern und Lohnfertigern, sowie durch Beratung und Anwendungsentwicklung auf eigenen MPW-Anlagen.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (Förderkennzeichen IBS-3621b/160/1-IGF-0710-0002) gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlussbericht zu dem Forschungsvorhaben ist von der GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV München, zu beziehen.

München, den 28.6.2011

Prof. Dr.-Ing. H. Cramer

Dipl.-Ing. L. Appel