

Einsatz der Magnetimpulstechnologie (MPT) zum Fügen von hochfesten Stahl-Aluminium-Verbindungen im Dünoblechbereich

A. Rebensdorf, S. Kümper, W. Grünwald und S. Böhm, Kassel

Die steigende Nachfrage nach kalten Fügeverfahren ermöglicht der Magnetimpulstechnologie (MPT) ihre Potentiale auszuschöpfen. Dies spiegelt sich besonders bei Mischverbindungen nieder, wo durch die zunehmenden Anforderungen an den Leichtbau der Fügeverfahren eine besondere Rolle zusteht. So wurde im Rahmen des öffentlich geförderten Forschungsprojektes (Akronym „PulsRepeat“, FOSTA P 1029 / IGF-Nr. 18290 N) der Einsatz der Magnetimpulstechnologie zum Schweißen von artungleiche Werkstoffkombinationen untersucht. Betrachtet wurden neben den höherfesten Aluminiumknetlegierungen (z.B. EN AW-6016-T6, EN AW-5754-H22) auch hochfeste Stahllegierungen (z.B. 22MnB5, DP600) und auf die Reproduzierbarkeit hin untersucht.

Die Forschungsergebnisse verdeutlichen, dass durch die Jet-Bildung geringe Anforderungen an die Nahtvorbereitung (speziell auf der Flyer-Seite) gestellt werden, die in Abhängigkeit der Schweißparameter, der Werkstoffe und deren Kontamination auch komplett entfallen kann. Die optionale Integration der Oberflächenvorbehandlung in den Herstellungsprozess ermöglicht allerdings selbst bei schwer schweißbaren artfremden Materialkombination das Prozessfenster zu erweitern und stellt die Energieeffizienz in den Vordergrund.

Zusammenfassend ermöglicht das Magnetimpulsschweißen mit den technologisch-mechanischen Eigenschaften und dem Nachweis der Schwingfestigkeit sowie Alterungsbeständigkeit eine optimale Auslegung des Fertigungsprozesses. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen das hohe Potential des Magnetimpulsschweißens zum Fügen von Mischverbindungen und zeigen ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit hinsichtlich des Fügeergebnisses.

1 Einführung

Die optimale Ausnutzung der technischen Werkstoffeigenschaften wird durch die Kombination artfremder Legierungen branchenübergreifend realisiert. Besonders die Stahl-Aluminium-Kombination steht im Fokus der Anwender und zeigt durch die metallurgischen Herausforderungen die Bedeutung der Fügeverfahren. So existieren im Bereich der Schweißtechnik nur wenige Verfahren, die sich die Herausforderung aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht annehmen können. Dies führt dazu, dass im Dünoblechbereich überwiegend die mechanischen Fügeverfahren eingesetzt werden. Eine Alternative zum stoffschlüssigen Verbinden von artfremden Werkstoffkombinationen bietet das Magnetimpulsschweißen (MPS) als innovatives Fügeverfahren. Durch die physikalisch-chemischen Bindungsmechanismen des MPS können besonders bei artfremden Materialien optimale Verbindungseigenschaften ohne intermetallischen Phasen realisiert werden. Aufgrund technologischer und metallurgischer Vorteile (z.B. keine Wärmeeinflusszonen (WEZ), kein thermischer Verzug, keine (Heiß-)Rissproblematik sowie fehlender Notwendigkeit von Zusatzwerkstoffen und Schutzgas) lässt sich das Verfahren in nahezu alle Bereiche der Fertigung integrieren. Die Schweißzeit liegt weit unter 20 μ s und lässt sich ideal in automatisierte Prozesse einbinden. Es bestehen geringe Anforderungen an die Oberflächenvorbehandlung und können bei optimaler Auswahl der Prozessparameter auch komplett entfallen. Darüber hinaus können Schweißnahtlängen bis zu 3.000 mm pro Puls umgesetzt werden. Dabei können rotations-symmetrische als auch flache Verbindungen realisiert werden.

Trotz des hohen Potentials wird der Einsatz des Magnetimpulsschweißens nach wie vor hinterfragt. Gründe hierfür liegen in der mangelnden Erfahrung hinsichtlich der Reproduzierbarkeit sowie Prozessstabilität. Die bisherigen Forschungsaktivitäten beantworten diese Fragen nicht und beschränken sich vermehrt auf die

phänomenologische Betrachtung der Verbindungsbildung [1-5]. Es fehlen wichtige Erkenntnisse zu den technologisch-mechanischen Eigenschaften (insbesondere zyklische und dynamische Eigenschaften) und der Alterungsbeständigkeit der Verbindung. Des Weiteren wird die Übertragbarkeit der technologischen Prozessparameter auf höherfeste Materialkombinationen kaum untersucht, eine statistische Absicherung fehlt gänzlich.

Um das Potential und die zurzeit vorliegenden Grenzen des Magnetimpulsschweißens herauszukristallisieren, sind Untersuchungen im Rahmen eines öffentlich geförderten Projektes eingeleitet worden (Akronym „PulsRepeat“, FOSTA P 1029 / IGF-Nr. 18290 N). Der Schwerpunkt des Projektes stellt die Untersuchung der Schweißbarkeit von hochlegierten Stahl-Aluminium-Verbindungen mittels der Magnetimpulstechnologie dar. Neben der Charakterisierung der quasistatischen Festigkeitseigenschaften, sind Ermüdungsfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt worden. Die Wiederholbarkeit des Schweißergebnisses steht dabei besonders im Fokus. Mit den erarbeiteten Erkenntnissen zur Alterungsbeständigkeit, explizit unter dem Einfluss der Korrosion sowie Temperatur, kann schließlich ein Beitrag zur Definition der Randbedingungen und damit einhergehender Gewährleistung und Einhaltung der industriellen Anforderungen geleistet werden.

2 Stand der Technik

Das Magnetimpulsschweißen (MPS), auch als Elektromagnetisches Pulsfügen (EMPT) bezeichnet, wird nach der DIN 1910 zu den Pressschweißverfahren zugeordnet. Der Prozess selbst wird in der DIN EN 14610:2004 als Schockweißen beschrieben, „[...] wobei ein Hochstromimpuls in einer das Werkstück umschließender Spule ein Magnetfeld erzeugt, das die Kraft zum Schweißen hervorruft“ [6]. Die Abbildung 1 stellt das Prinzip des Verfahrens exemplarisch dar. Unter dem magnetischen Druck wird der Flyer (z.B. Aluminium) auf einen Target (z.B. Stahl) beschleunigt.

Nach dem Aufprall wird der Schweißvorgang durch das Abrollen des Flyers auf dem Target eingeleitet.

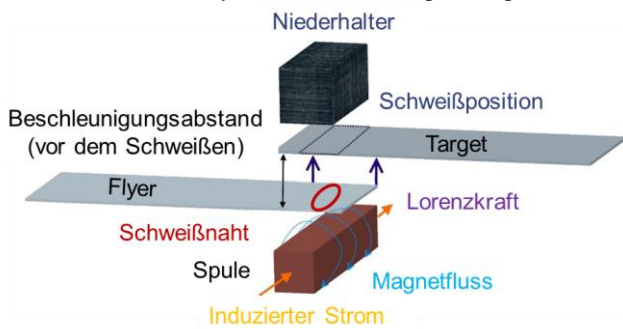


Abbildung 1: Prinzipskizze zum Magnetimpulsschweißen (MPS)

Zur Beschreibung des Schweißvorganges werden nach dem Stand der Technik bei den Aufschlag-schweißverfahren die kinematischen sowie physikalischen Prozessgrößen herangezogen. So wird in Anlehnung an das Explosionsschweißen die Kollisionspunktgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Kollisionswinkels betrachtet und das Prozessfenster definiert. [7] Bei den physikalischen Prozessgrößen wird in einem Zeit-Druck-Temperatur-Diagramm der physikalische Zusammenhang betrachtet. Charakteristisch zeichnet sich das MPS durch einen hohen Druck und kurze Schweißzeit aus. Dabei wird kaum Wärme induziert und in Abhängigkeit von der Materialkombination eine Phasenbildung vermieden.

3 Untersuchungsmethoden und Versuchswerkstoffe

Die Schweißarbeiten wurden mit der Anlage Blue-Wave PS 48-16 durchgeführt. Die Systemtechnologie ermöglicht bei Entladefrequenzen von ca. 20 kHz einen maximalen Stromstoß von bis zu 480 kA an die Spule zu übertragen. Die maximale Entladeenergie der Kondensatoren liegt bei 48 kJ bei Spannungen von bis zu 16 kV. Für die Versuchsdurchführung wurde die Flachspule B80/5 eingesetzt.

Für die Untersuchungen sind aushärtbare und naturharte Aluminiumknetlegierungen eingesetzt worden. Als Stahllegierungen kamen der Kaltarbeitsstahl DC04 sowie höherfeste Stahllegierungen, z.B. DP600 oder pressgehärteter Mangan-Bor-Stahl. Den gesamten Überblick liefert die Tabelle 1:

Tabelle 1: Übersicht eingesetzter Werkstoffe

Werkstoffe	Wandstärke [mm]	Zug-	Streck-
		festigkeit [N/mm ²]	
EN AW-5754-H22	1	246	189
EN AW-6016-T6	1.25	211	107
DC04	1	289	159
HX420LAD+Z100MB	1.2	545	470
DP600	2	600-700	330-410
DP780+GI	2	780-900	500-600
22MnB5+AS 150 (ungehärtet)	1.5	500-700	350-550
22MnB5+AS 150 (pressgehärtet)	1.5	1.300-1.650	1.000-1.250

Bei der Versuchsdurchführung wurde die Geometrie der Proben auf (120 x 45) mm festgelegt. Die Überlappung zwischen den beiden Blechen wurde auf 35 mm eingestellt. Die quasistatische Prüfung der Verbindungseigenschaften wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 14273 durchgeführt. Die Schweißungen sind sowohl im unbehandelten Zustand als auch mit einer Oberflächenvorbehandlung realisiert worden. Dabei wurde zudem zwischen Laserablation sowie Politur (mechanische Vorbehandlung) unterschieden. Bei der Laserablation wurde das Lasersystem CleanLaser CL50 eingesetzt. Die Pulsfrequenz lag bei 200 kHz, der Abstand zum Werkstück betrug 340 mm. Der Auslastungsgrad wurde, mit einem Vorschub von 8.500 mm/s, auf 50 % festgelegt.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Mechanisch-technologische Eigenschaften

Die Hauptuntersuchungen wurden mit der Materialkombination EN AW-6016-T6 sowie DC04 durchgeführt. So wurde der Einfluss der Oberflächentopografie im Zusammenhang mit den Prozessparametern untersucht. Variiert wurden im speziellen der Beschleunigungsabstand (h) sowie die Entladeenergie (E). Der Beschleunigungsabstand nimmt zwangsläufig einen Einfluss auf den Kollisionswinkel. Mit zunehmendem Beschleunigungsabstand wird dieser erhöht. Die Entladeenergie und damit verbundene max. Stromstoß (I) beeinflusst die Aufschlaggeschwindigkeiten sowie die Kollisionspunktgeschwindigkeiten. Als Probenumfang (n) wurden bei den Untersuchungen jeweils 8 Proben geschweißt. Die Ergebnisse sind der Abbildung 2 zu entnehmen:

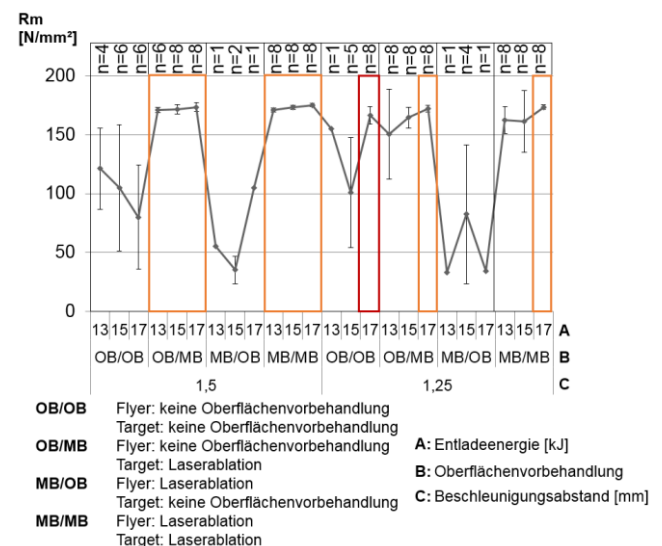


Abbildung 2: Einfluss der Oberflächentopographie auf das Schweißergebnis

Die besten Ergebnisse konnte die Versuchsreihe mit einem Beschleunigungsabstand von 1,5 mm sowie einer eingestellten Entladeenergie von 17 kJ (I=370 kA) erzielen. Beide Fügepartner wurden einer Oberflächenvorbehandlung durch Laserablation unterzogen. Die Hybridverbindung konnte bei quasistatischer Zugbeanspruchung Festigkeiten von bis zu 177 N/mm² erzielen (R_m von EN AW-6016-T6 beträgt 211 N/mm²). Eine Prüfung auf Normalverteilung nach

dem Anderson-Darling-Test (0,544) bestätigte die Aussagekraft der Ergebnisse. Der Median der Versuchsreihe beträgt 175 N/mm². Die Standardabweichung liegt mit 1,55 N/mm² auf hohem Niveau. Auffällig ist, dass eine Oberflächenvorbehandlung nicht zwingend notwendig ist. So zeigt die Versuchsreihe mit E=17 kJ (I=370 kA) und h=1,25 mm vergleichbare Ergebnisse, obwohl keine Oberflächenvorbehandlung durchgeführt wurde. Auch hier ist die Streuung der Festigkeitswerte kaum vorhanden. Tendenziell lässt sich jedoch erkennen, dass der Einfluss der Laserablation vorhanden ist und bereits hier Auswirkungen auf die Reproduzierbarkeit hat. Die Laserablation von Stahl genügt, um bereits mit geringeren Stromstärken (I>300 kA) ein gutes Ergebnis zu erzielen und damit einen Einfluss auf die Stabilität des Prozessfensters zu nehmen.

Zur Beschreibung der Möglichkeit des Magnetpuls-schweißens wurden weiterführend unterschiedliche Stahllegierungen betrachtet. Die Festigkeiten der Stähle lagen beginnend bei 420 N/mm² bis zu 1500 N/mm². Die Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der erzielten Festigkeiten der magnetpuls-geschweißten Mischverbindungen.

Bei allen Versuchsreihen wurde der Beschleunigungsabstand mit 1,5 mm eingestellt. Der maximale Stromstoß lag bei Entladefrequenzen von 19,7 kHz bei I=350 kA. Die Oberflächen der Stahllegierungen sind mechanisch vorbehandelt worden.

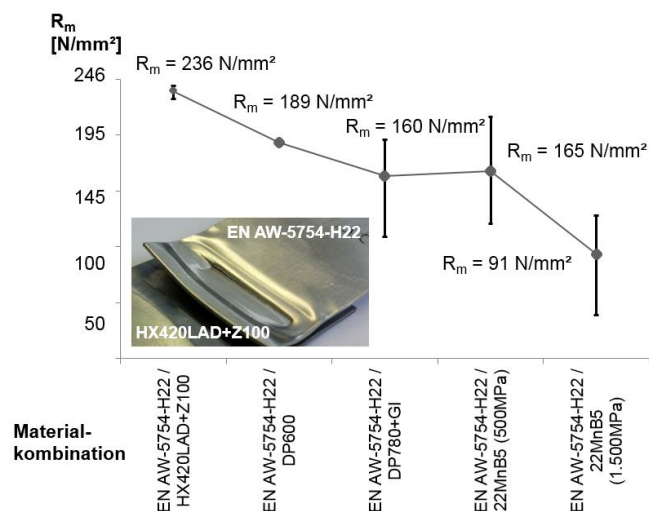


Abbildung 3: Technologisch-mechanische Eigenschaften magnetimpuls-geschweißter Stahl-Aluminium-Verbindungen nach DIN EN ISO 14273

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die relative Festigkeit der Verbindung mit zunehmender Festigkeit der Stahllegierungen abnimmt. Da wo bei der Materialkombination der EN AW-5754-H22 mit HX420LAD+Z100 das Versagen im Aluminium, an der druckbelasteten Umformzone, stattfindet R_m = 236 N/mm², zeigen die Versuchsreihen mit höherfesten Stahllegierungen geringere Verbindungsfestigkeiten (Versagen in der Schweißnaht). Bei allen Stahllegierungen wurde die Beschichtung durch das Polieren (z.B. AS 150) entfernt. Eine Ausnahme stellt die Legierung DP780+GI dar. Der pressgehärtete Mangan-Bor-Stahl weist in Kombination mit EN AW-5754-H22 be-

reits beim Schweißen im unteren Prozessfenster Festigkeiten von R_m = 91 N/mm² auf.

Die Untersuchungen bei hochfesten Stahllegierungen bestätigen die Erkenntnisse aus dem gut erforschten Explosionsschweißen. Denn angesichts der unterschiedlichen mechanischen Werkstoffeigenschaften der hoch- und ultrahochfesten Stähle, werden höhere Kollisionspunktgeschwindigkeiten benötigt, was die quasistatischen Untersuchungen widerspiegeln. Um die hohen Kollisionspunktgeschwindigkeiten erzielen zu können, muss jedoch der maximale Stromstoß erhöht werden. Dadurch steigt der Energieeintrag zur plastischen Deformation und die kritische Schweißnahtgrenze kann überschritten werden. So ist davon auszugehen, dass bei I>350 kA (Limitierung seitens der Flachspule) höhere Verbindungsfestigkeiten, nahe dem schwächeren Grundwerkstoff (EN AW-5754-22), selbst bei ultrahochfesten Stahllegierungen erzielt werden können.

4.2 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Die Ergebnisse der quasistatischen zerstörenden Prüfung bestätigen die Schweißeignung von Stahl-Aluminium-Verbindungen mit der Magnetimpulstechnologie. Für den industriellen Einsatz ist es jedoch essentiell, die Verbindungseigenschaften bei zyklischer und dynamischer Beanspruchung zu untersuchen. Ein Nachweis der Schwingfestigkeit ist notwendig. Hierfür sind Untersuchungen mit der Materialkombination EN AW-6016-T6 und DC04 durchgeführt worden. Als technologische Schweißparameter ist ein Beschleunigungsabstand von 1,25 mm sowie maximale Stromstoß von 370 kA eingestellt worden. Die Entladefrequenz lag im Durchschnitt bei f = 19,6 kHz. Für die Versuchsdurchführung wurde ein Magnet-Resonanz-Pulser HPF 5100 der Firma Roell AMSLER Prüfmaschinen GmbH auf dem Funktionsprinzip eines Drei-Massen Oszillators verwendet. Bei der zyklischen Belastung ist ein Spannungsverhältnis von R=0,1 eingestellt worden (Zugschwellbereich). Die Belastung wurde dabei über die aufgebrauchte Oberkraft F_o eingestellt, aus der sich dann mit dem gewählten Spannungsverhältnis die zugehörige Unterkraft F_u ergab.

Als Versagenskriterium wurde eine Änderung der Resonanzfrequenz während des Versuchs von Δf > 5 Hz angenommen. Die Resonanzfrequenz ändert sich im Falle des Versagens aufgrund der nicht mehr vorhandenen Verbindung der Bleche, beziehungsweise der nicht mehr vorhandenen Verbindung des Ober- und Unterteils des Pulsers. Die Grenzschwingspielzahl, nach der eine Probe als „Dauerläufer“ bezeichnet wird, ist auf N_G = 10⁷ Zyklen eingestellt worden und orientiert sich an die Norm zu der Schwingfestigkeit für Punktschweißverbindungen (DIN EN ISO 14324) und der IIW-Richtlinien [8-11]. Die Resonanzfrequenz lag bei den Schwingfestigkeitsuntersuchungen bei f_{Res} = 40-49 Hz.

Aus den Ergebnissen der Schwingfestigkeitsversuche wurden die Wöhlerkurve und die daraus ableitbaren Kennwerte für die gefügte Werkstoffkombination erstellt (Abbildung 4).

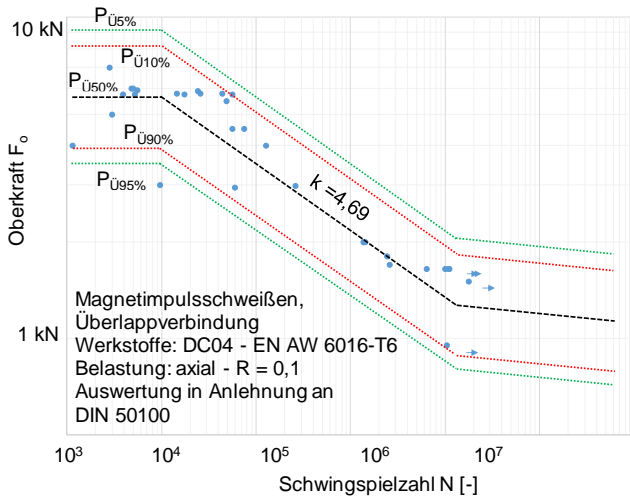


Abbildung 4: Wöhlerdiagramme der Materialkombination EN AW-6016-T6 und DC04

Des Weiteren sind die Überlebenswahrscheinlichkeiten (P_U) berechnet worden und die Lebensdauer der untersuchten magnetimpulsgeschweißten Stahl-Aluminium-Verbindungen bei unterschiedlich ausgeprägten Lastkollektiven abgeschätzt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht zu den ermittelten Lastspannungsamplituden der Materialkombination EN AW-6016-T6 und DC04 (Q – Fläche des Querschnitts der Aluminiumlegierung mit $A = 56,25 \text{ mm}^2$; SN – Fläche der Schweißnaht mit ca. 100 mm^2)

Kurzzeitfestigkeitsbereich $N < 10^4$ mit σ_a [N/mm ²]					
	$P_{U5\%}$	$P_{U10\%}$	$P_{U50\%}$	$P_{U90\%}$	$P_{U95\%}$
$\sigma_{a,Q}$	124	124	102	124	124
$\sigma_{a,SN}$	70	70	57	70	70
N	34.817	21.573	3.979	733	454
Dauerfestigkeitsbereich $N > 10^7$ mit σ_a [N/mm ²]					
	$P_{U5\%}$	$P_{U10\%}$	$P_{U50\%}$	$P_{U90\%}$	$P_{U95\%}$
$\sigma_{a,Q}$	17	17	23	17	17
$\sigma_{a,SN}$	9,5	9,5	13	9,5	9,5
N	407.352.671	252.407.300	46.556.063	8.587.180	5.320.861

Zur Auswertung der Proben wurde neben der Bruchbildanalyse auch die metallographische Auswertung eingesetzt. Bei Proben, die höheren Kräften ausgesetzt waren ($F_o > 4.000 \text{ N}$), konnte die Bildung einer Risskante im Grundwerkstoff des Stahls am unteren Schweißnahttrand beobachtet werden (Abbildung 5). Die Proben versagten jedoch innerhalb der Schweißnaht, sodass der entstandene Riss nicht maßgeblich zum Versagen der jeweiligen Probe beiträgt.

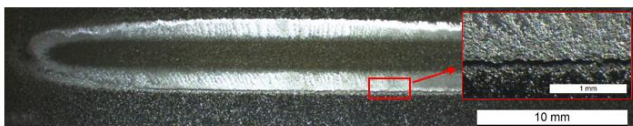


Abbildung 5: Bruchbildanalyse der Stahllegierung DC04; Rissinitialisierung ausgehend vom Schweißnahttrand, $F_o = 5.750 \text{ N}$, $N = 56.360$

Bei Proben, die niedrigeren Kräften, aber höheren Schwingspielzahlen ausgesetzt waren ($F_o = 1650-2990 \text{ N}$; $N > 10^6$), war diese Rissbildung jedoch der Hauptgrund für das Versagen der Verbindung. Die Schweißnaht war in diesen Fällen bis zum Versagen des Grundwerkstoffes intakt (Abbildung 6).

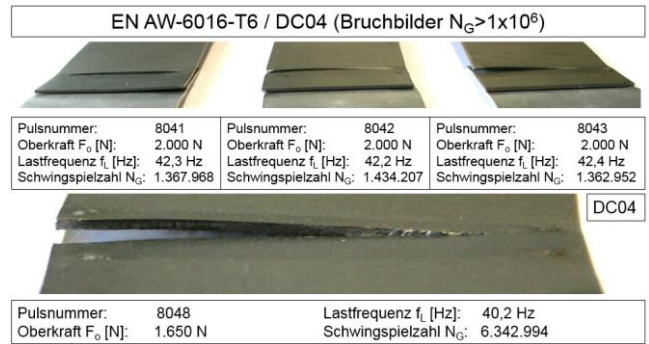


Abbildung 6: Versagensbild im Zeitfestigkeitsbereich

Der Rissverlauf wurde durch die metallographischen Untersuchungen der Proben bestätigt. Hier konnte festgestellt werden, dass der Anriss der Proben im Grenzbereich zwischen den verbundenen Blechen entsteht. Die Risseinleitung ist dabei jeweils in der Schweißnahtmitte zu finden, wie die metallographischen Untersuchung des Längsschliffes gezeigt hat. Anschließend setzt sich der Riss in Richtung des Stahl-Grundwerkstoffes und zum Rand der Schweißnaht fort und führt dort bei hohen Schwingspielzahlen letztendlich zum Versagen der Probe. Es lässt sich ebenso festhalten, dass, bezogen auf die Steigung der Wöhlerlinie, die Kerbwirkung der magnetimpulsgeschweißten Verbindung geringer als die Kerbwirkung konventioneller Schweißverbindungen ausfällt. Anrisse bzw. Rissbeginn konnten bei den metallographischen Untersuchungen auch in den als Durchläufer gewerteten Proben beobachtet werden.

Bei Proben, welche in der Schweißnaht versagten, konnte festgestellt werden, dass typische Merkmale für einen Schwingbruch vorhanden sind. Dies lässt darauf schließen, dass sich die magnetimpulsgeschweißte Naht der untersuchten Werkstoffkombination mit den gewählten Prozessparametern duktil verhält. Bei Proben, die keine Schwingbruchmerkmale aufwiesen, wurde zunächst von einem spröden Verhalten der Schweißnaht ausgegangen. Außerdem wurde beobachtet, dass einige Proben aufgrund von Schweißnahtunregelmäßigkeiten (Anbindungsfehler) und der damit verbundenen geringeren Schweißnahtfläche früher ausfielen (Abbildung 7).

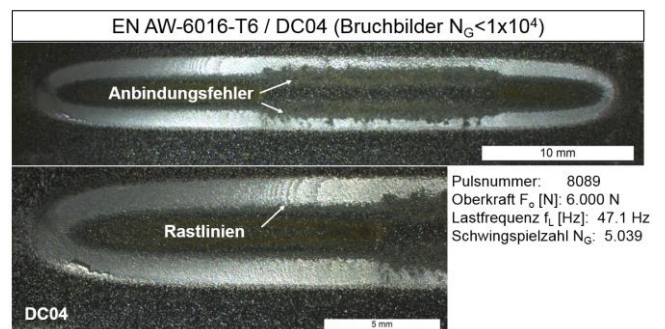


Abbildung 7: Einfluss von Schweißnahtunregelmäßigkeiten auf die Schwingfestigkeit

Das spröde Verhalten der Schweißnaht konnte mit Hilfe von Härtemessungen bestätigt werden. Dabei wurde deutlich, dass hohe Härten (ab ca. 230HV_{0,3}) und vereinzelte Härtespitzen (ca. 250HV_{0,3}) zu einem früheren Versagen der Schweißnaht führen können. Ein mäßiger Härteanstieg von etwa 180-200HV_{0,3} im

Schweißnahtbereich wird jedoch für die Ausbildung einer guten Verbindung benötigt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass grundlegende Erkenntnisse über das zyklische Verhalten von magnetimpulsgeschweißten Verbindungen gewonnen wurden. Neben dem Einfluss der Härte des Schweißnahtbereichs konnten Ansätze zur Rissausbildung und zum Rissverlauf in schwingend belasteten Verbindungen aufgezeigt werden. Mit den Ergebnissen kann somit die Lebensdauer der untersuchten Werkstoffkombination beim Magnetimpulsschweißen abgeschätzt werden.

4.3 Korrosions- und Klima-Wechsel-Tests

Die Alterungsbeständigkeit wurde in Anlehnung an die neutrale Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 sowie einem Klima-Wechsel-Test nach VDA-233-102 geprüft. Für die Untersuchungen ist die Werkstoffkombination EN AW-6016-T6 sowie DC04 eingesetzt worden. Als Schweißparameter wurden die optimalen Einstellgrößen gewählt. Der Beschleunigungsabstand betrug 1,25 mm und der maximale Stromstoß lag bei 370 kA. Die Bestimmung der Schweißnahtqualität erfolgte auch hier zunächst anhand einer Zugscherfestigkeitsprüfung in Anlehnung an die DIN EN ISO 14273 (Abbildung 8). Bei der Probenvorbereitung wurde Laserablation beim DC04 eingesetzt. Nach dem Fügevorgang sind die Versuchsproben einer KTL-Beschichtung unterzogen worden.

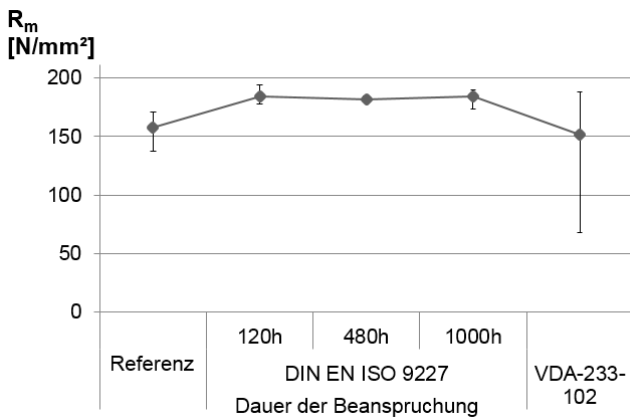


Abbildung 8: Ergebnisse des Korrosions- und Temperatur-Wechsel-Tests

Bei der Betrachtung der Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Schweißnaht für das Magnetpulsschweißen bei Mischverbindungen vorliegt und die Alterungsbeständigkeit gewährleistet werden kann. Besonders bei dem Test nach DIN EN ISO 9227 ist kein Festigkeitsabfall zu verzeichnen, selbst bei einer Belastungsdauer von 1000 Stunden liegen die Festigkeitswerte auf einem hohen Niveau, welche sich auch mit einer hohen Reproduzierbarkeit auszeichnen.

Die Bruchbildanalyse nach einer Salzsprühnebelprüfung liefert jedoch interessante Erkenntnisse. Die Abbildung 9 zeigt eine Versuchsreihe mit 1000 h als Dauer der Beanspruchung.

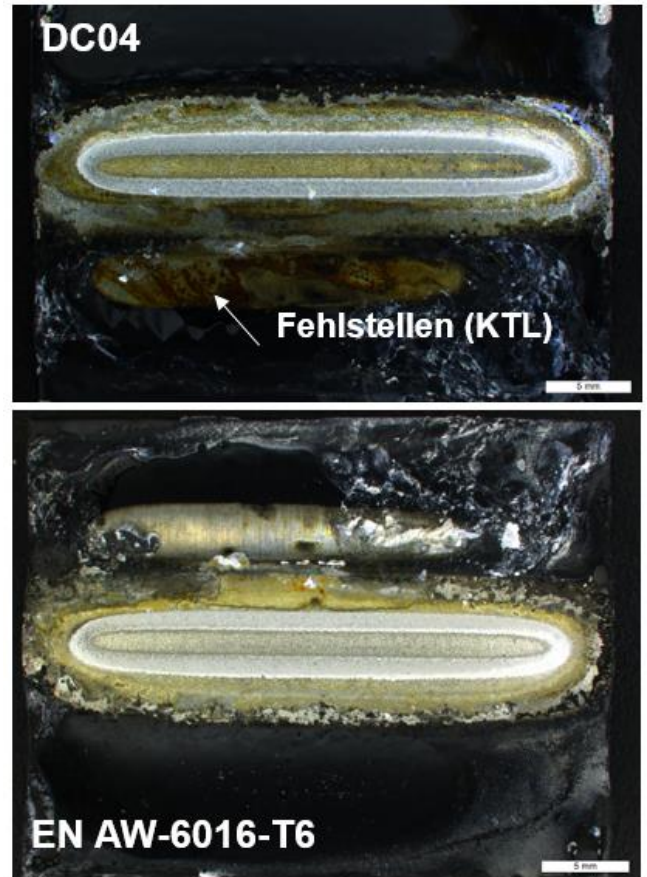


Abbildung 9: Bruchbildanalyse einer Versuchsreihe mit einer Dauer der Beanspruchung von 1000 Std. (DIN EN ISO 9227)

Zunächst ist zu erkennen, dass die Schweißnaht vom korrosiven Angriff unberührt bleibt. Lediglich die druckbelastete Zone weist Korrosion auf. So wird auch gleich deutlich, dass der Bereich der Überlappung (außerhalb der Schweißnaht) einige Fehlstellen aufweist. Dabei liegt die KTL-Beschichtung an den Fehlstellen nicht vor. Ein Grund hierfür kann in der unzureichenden Benetzung der Beschichtung liegen. Angesichts möglicher Luftporen während des Eintauchvorganges in das KTL-Bad, ist nicht der komplette Bereich beschichtet worden. So lag bei der Salzsprühnebelprüfung sowie Klima-Wechsel-Test keine galvanische Trennung der Korrosionspartner vor. In der Abbildung 9 ist zusätzlich zu erkennen, dass die KTL-Beschichtung sich abgelöst hat. Sobald ein Elektrolyt vorlag, ist bei dem Aluminium als unedleres der beiden Metalle ein massiver Materialverlust beobachtet worden. Dennoch war die Schweißnaht davor unberührt und konnte bei der Salzsprühnebelprüfung keinen Festigkeitsabfall hervorrufen.

Vergleichbare Ergebnisse liefert der VDA-Test. Sobald die Proben um die Schweißnaht herum Fehlstellen bei der Beschichtung aufgewiesen haben, sind die Festigkeitswerte rapide gesunken. Dies spiegelt sich bei der hohen Streuung der Festigkeitswerte wieder und bestätigt im Einklang mit der Bruchbildanalyse und den Mikroschliffen die Bedeutung der galvanischen Trennung. Es ist jedoch anzumerken, dass beim Stahl kein passiver Korrosionsschutz vorlag.

5. Fazit

Das Magnetimpulsschweißen (MPS) ist eine relativ junge Technologie. Unberührt von dem Entwicklungsstadium wird der Einsatz des MPS durch die zunehmend steigende Nachfrage nach Mischverbindungen länger diskutiert. Besonders durch die physikalisch-chemischen Bindungsmechanismen können - bei optimaler Einhaltung der Prozessparameter - Stahl-Aluminium-Verbindungen ohne intermetallischen Phasen verschweißt werden und erreichen Festigkeiten des schwächeren Grundwerkstoffes. Das öffentlich geförderte Projekt bestätigt mit den ersten grundlegenden Untersuchungen zur Alterungsbeständigkeit und Schwingfestigkeit, dass eine magnetimpulsgeschweißte Verbindung den industriellen Anforderungen gerecht werden kann.

Es bleibt allerdings festzuhalten, dass in Abhängigkeit von der Materialkombination und den Prozessrandbedingungen am unteren Schweißnahtfenster gearbeitet wurde. Dies bietet nicht nur die Möglichkeit den Schweißprozess zu optimieren, sondern die Anlagentechnik weiter zu entwickeln.

6. Danksagung und Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Eigenschaftsbestimmung des Schweißergebnisses zwischen Aluminium und Stahl mittels Magnetpulsschweißen“, IGF-Projekt Nr. 18290 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

7. Literatur

- [1] Kapil, Angshuman; Sharma, Abhay (2015): Magnetic pulse welding: An efficient and environmentally friendly multi-material joining technique. *Journal of Cleaner Production* 100, 35–58.
- [2] Göbel, Gunther; Beyer, Eckard; Kaspar, Jörg; Brenner, Berndt (2012): Dissimilar Metal Joining: Macro- and Microscopic Effects of MPW. In: Technische Universität Dortmund (Hrsg.): 5th International Conference on High Speed Forming, 179–188.
- [3] Raelison, R. N.; Buiron, N.; Rachik, M.; Haye, D.; Franz, G.; Habak, M. (2013): Study of the elaboration of a practical weldability window in magnetic pulse welding. *Journal of Materials Processing Technology* 213, 1348–1354.
- [4] Verstraete, J.; De Waele, W.; Faes, K. (2011): Magnetic Pulse Welding: Lessons to be learned from Explosive Welding. *Sustainable Construction and Design*, 458–464.
- [5] Watanabe, Mitsuhiro; Kumai, Shinji; Hagimoto, Go; Zhang, Qingsheng; Nakayama, Koji (2009): Interfacial Microstructure of Aluminum/Metallic Glass Lap Joints Fabricated by Magnetic Pulse Welding. *MATERIALS TRANSACTIONS* 50, 1279–1285.

- [6] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 14610:2004 Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe für Metallschweißprozesse.
- [7] Bahrani, A. S.; Black, T. J.; Crossland, B. (1967): The Mechanics of Wave Formation in Explosive Welding. In: The Royal Society (Hrsg.): Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 123–136.
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 50100: Schwingfestigkeits-versuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile. Berlin.
- [9] Deutsches Institut für Normung e.V. (Dezember 2003): DIN EN ISO 14324: Widerstandsschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißungen - Schwingfestigkeitsprüfung von Punktschweißverbindungen. Berlin.
- [10] Haibach, Erwin (2006): Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. (VDI-Buch) Berlin.
- [11] Hobbacher, A. F. (2016): Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. (IIW Collection) Cham, s.l.