

Prozessanalyse für das Magnetimpulsschweißen von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen

SFU 2016

Verena PSYK, Christian SCHEFFLER, Maik LINNEMANN und Dirk LANDGREBE

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz

Abstract

Im Rahmen des EU-geförderten JOIN'EM Projektes werden Kupfer-Komponenten durch hybride Aluminium-Kupfer-Bauteile substituiert, um Kosten- und Gewichtsvorteile ohne Qualitätsverlust zu erreichen. Dazu wird das Magnetimpulsschweißen für den industriellen Einsatz qualifiziert. Einen wichtigen Beitrag dazu leistet die vorgestellte kombinierte experimentelle und numerische Prozessanalyse. In dieser werden Zusammenhänge zwischen einstellbaren Parametern des Prozesses, Kollisionsparametern in der Fügezone und der Qualität des resultierenden Verbundes hergestellt.

Keywords Kupfer, Aluminium, Fügechnik, Magnetimpulsschweißen

1 Motivation und Zielsetzung

Exzellente thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie chemische Beständigkeit machen Kupfer speziell in der Wärme- und Kältetechnik sowie in elektrischen und elektronischen Applikationen zu einem der meistverwendeten Werkstoffe. Dies hat zu einem Anstieg des Kupferbedarfs und -preises geführt (siehe Abbildung 1.1), sodass seitens der Industrie großes Interesse an alternativen Lösungen besteht. Auch führt die hohe Dichte von Kupfer ($8,96 \text{ g/cm}^3$) zu hohem Bauteilgewicht, das besonders bei mobilen Anwendungen der Forderung nach Leichtbau widerspricht. Um den Interessenskonflikt zwischen technologischen Vorteilen und Einschränkungen hinsichtlich Kosten und Gewicht zu lösen, werden im Rahmen des EU-geförderten JOIN'EM Projektes Bauteile, die derzeit komplett aus Kupfer gefertigt sind, mit Aluminium-Kupfer-Hybridbauteilen substituiert. Da der Preis von Aluminium etwa 40%, die Dichte etwa 30%, die thermische und elektrische Leitfähigkeit hingegen etwa 60% der Werte von Kupfer betragen, besteht dadurch ein großes Einsparpotenzial.

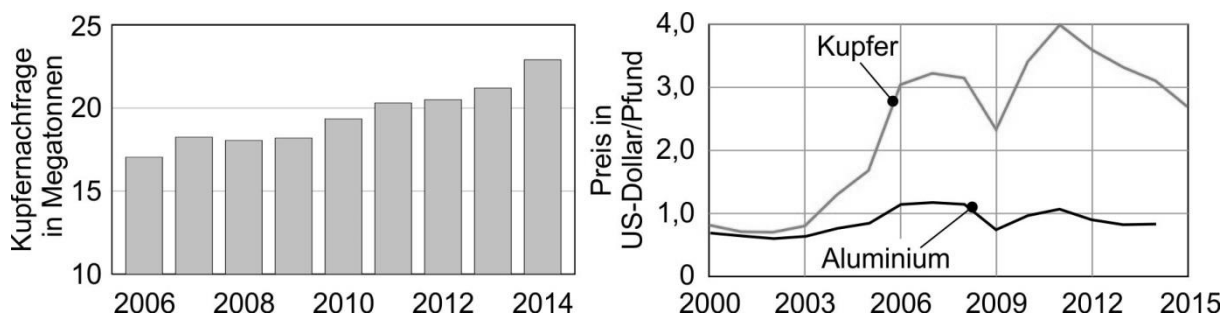


Abbildung 1.1: Zeitliche Entwicklung von Kupfernachfrage und -preis nach Statista [nn16]

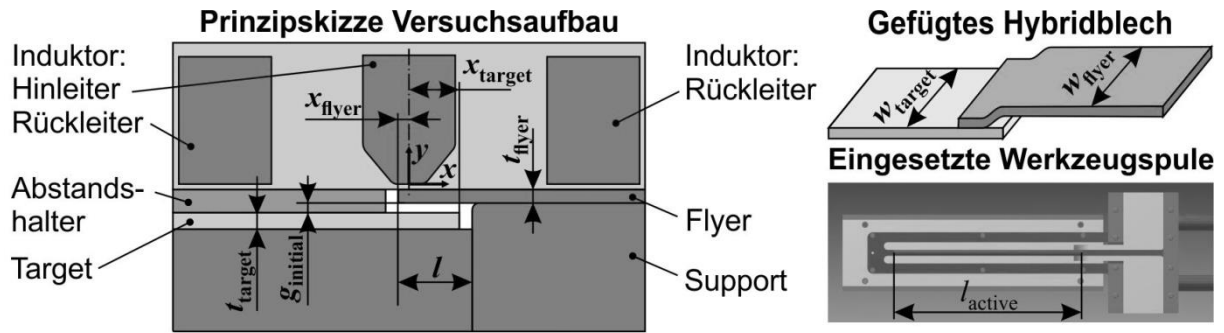
Jedoch erfordert der Ansatz eine geeignete Technologie zur wirtschaftlichen Fertigung qualitativ hochwertiger Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen. Magnetimpulsschweißen (MIS) bietet viele Vorteile: Der Verbund entsteht durch Hochgeschwindigkeitskollision der Fügepartner (Flyer und Target) ohne nennenswerte Erwärmung des Werkstücks und temperaturinduzierte Probleme wie Verzug, Festigkeitsverluste in der Wärmeeinflusszone oder intermetallischer Phasen (Shribman und Tomer [Shr06]). Schutzgase, Zusatz- oder Hilfsstoffe werden nicht benötigt. Der Prozess ist durch geringe Werkzeugbindung flexibel einsetzbar und zeichnet sich durch gute Reproduzier- und Automatisierbarkeit, kurze Prozesszeiten und geringen Energieeinsatz aus. Die Machbarkeit für zahlreiche Mischverbindungen ist umfassend nachgewiesen. So fügten z.B. Watanabe et al. Aluminium mit Eisen, Nickel und Kupfer [Wat06], Aizawa und Kashani Aluminium mit niedriglegiertem Stahl, Titan und Magnesium [Aiz09] und Kore et al. Aluminium und Edelstahl [Kor08].

Vorgeschlagen wurde der Prozess zum Fügen von Rohren und Blechen bereits in Lysenko et al. [Lys70] und obwohl die Grundlagen der Verbundausbildung bei diesem Solid-State-Schweißverfahren, das in Psyk et al. [Psy11] detailliert erläutert wird, bis heute Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen sind, liegen bislang noch keine hinreichenden Prozess- und Fügstellenauslegungsstrategien vor. Diese sind aber zwingende Voraussetzung für eine industrielle Implementierung des MIS. Häufig werden, analog zum Explosionsschweißen, die Kollisionsparameter Aufprallgeschwindigkeit und –winkel zur Beschreibung des Prozessfensters herangezogen. Aktuelle Beispiele hierfür finden sich unter anderem in Oliveira et al. [Oli 14] und Cuq-Lelandais et al. [Cuq16]. Allerdings erläutern Göbel et al. ausführlich, dass signifikante Unterschiede zwischen diesen Prozessen bestehen und somit die vom Explosionsschweißen bekannten Prozessfenster nicht direkt auf das MIS übertragbar sind [Göb12]. Quantitative Prozessfenster für das MIS sind jedoch kaum vorhanden. Auch die genannten Beispiele beschränken sich auf eine rein qualitative Darstellung. Erschwerend kommt hinzu, dass die Kollisionsparameter im Prozess nicht direkt einstellbar sind, sondern aus der Kombination zahlreicher equipment- und geometrieabhängiger Prozessgrößen resultieren. Eine Analyse, wie z.B. in Lueg-Althoff et al. für das MIS von Aluminium- auf Stahlrohre durchgeführt [Lue16], ist folglich nicht zwingend auf andere Verfahrensvarianten und Werkstoffkombinationen übertragbar.

Die Schaffung von Grundlagen für die Bereitstellung von Richtlinien und Werkzeugen zur Fügstellen- und Prozessauslegung für Aluminium-Kupfer-Hybridverbindungen von Blechen ist daher Ziel der vorliegenden Arbeiten. Dazu wird der Einfluss wichtiger Prozessparameter auf die Kollision der Fügepartner und das Fertigungsergebnis beim Magnetimpulsschweißen von Blechen in einer kombinierten experimentellen und numerischen Prozessanalyse umfassend untersucht. Eine gekoppelte elektromagnetische und strukturmechanische Simulation dient der Quantifizierung lokaler Kollisionsparameter in der Fügezone während die Verbundcharakterisierung experimentell erfolgt.

2 Planung der Analyse

Um den experimentellen und numerischen Aufwand der Analyse zu begrenzen, wurden Methoden der statistischen Versuchsplanung eingesetzt. Abbildung 2.1 zeigt den Versuchsaufbau im Querschnitt, die Geometrie der Werkzeugspule (Induktor), die betrachteten Parameter und die Bereiche innerhalb derer variiert wurde. Es wurden 26 Parameterkombinationen für die Analyse gewählt.



Maschinenparameter	Werkstückparameter	Parameter des Aufbaus
Kondensatorladeenergie E : variiert von 10 bis 40 kJ	Flyerdicke t_{flyer} : variiert von 0,3 bis 1,5 mm	Initialer Abstand von Flyer und Target g_{initial} : variiert von 1 bis 3 mm
Kapazität C : festgelegt zu 300 μF	Targetdicke t_{target} : festgelegt zu 2 mm	x-Position der Flyerkante x_{flyer} : variiert von -2 bis +2 mm
Werkzeugparameter	Flyerbreite w_{flyer} : festgelegt zu 100 mm	x-Position der Targetkante x_{target} : festgelegt zu 14 mm
Wirklänge des Induktors l_{active} : festgelegt zu 100 mm	Targetbreite w_{target} : festgelegt zu 100 mm	Freie Länge l : festgelegt zu 16 mm
	Flyerwerkstoff: Kupfer DHP	
	Targetwerkstoff: EN AW-1050	

Abbildung 2.1: Versuchsaufbau und Parameter für die Prozessanalyse

3 Experimentelle Untersuchungen zum Magnetimpulsschweißen

Zur Absicherung der Reproduzierbarkeit wurden für jede Parameterkombination mindestens drei Fügeversuche durchgeführt. Die Charakterisierung der Last für die statistische Auswertung, erfolgte durch Bestimmung der signifikanten Frequenz f aus der Stromanstiegszeit Δt_{rise} und des maximalen Induktorstromes I_{max} aus gemessenen Induktorstromverläufen (vergleiche Gleichung (1) und Abbildung 3.1).

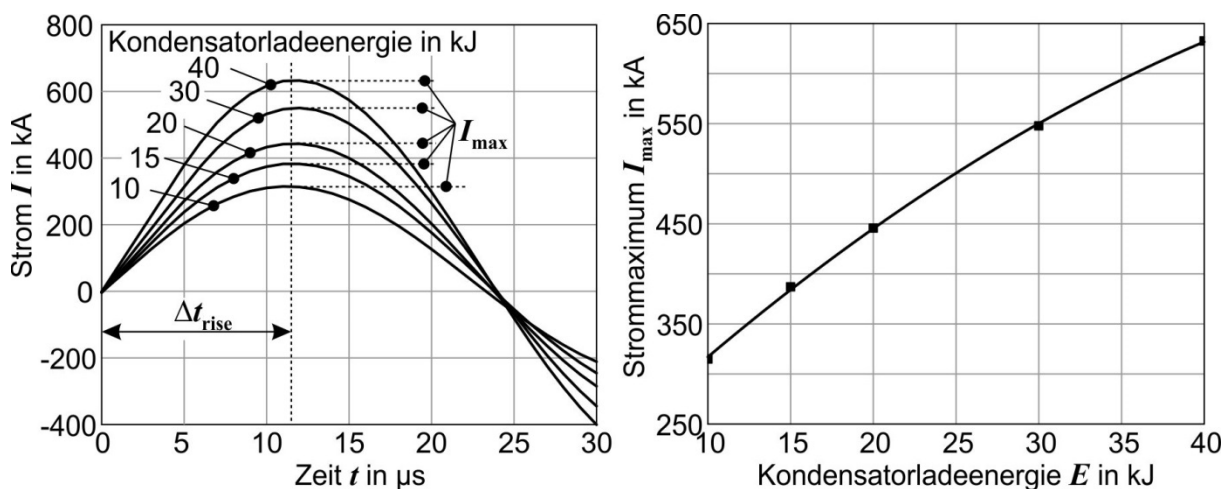


Abbildung 3.1: Stromverläufe beim Magnetimpulsschweißen mit unterschiedlichen Kondensatorladeenergien und Zusammenhang zwischen Kondensatorladeenergie und Strommaximum

$$f = \frac{1}{4 \cdot \Delta t_{rise}} \quad (1)$$

Es zeigt sich, dass die charakteristische Frequenz für alle betrachteten Parameterkombinationen zwischen 21,7 kHz und 22,7 kHz liegt und keine der betrachteten Einflussgrößen nennenswerten Einfluss darauf hat. Das Strommaximum variiert zwischen 315 kA und 635 kA. Eine Pareto-Analyse bestätigt, dass die Kondensatorladeenergie die dominierende Einflussgröße ist, während die Bedeutung aller weiteren betrachteten Einflussgrößen vernachlässigbar ist. Abbildung 3.1 zeigt die für das MIS relevante erste Halbwelle exemplarischer Stromverläufe sowie den Zusammenhang zwischen Kondensatorladeenergie und Strommaximum.

4 Numerische Simulation des Magnetimpulsschweißens

Parallel zu den Experimenten wurde der Prozess für alle gewählten Parameterkombinationen in einer gekoppelten elektromagnetischen und strukturmechanischen Simulation abgebildet. Nach Beerwald et al. berücksichtigt diese Wechselwirkungen verschiedener physikalischer Felder und führt im Vergleich zur Modellierung ohne Kopplung zu deutlich genaueren Simulationsergebnissen [Bee03]. Genutzt wurde die Software LS-Dyna. Details zum Programm beschreiben L'Epplattenier und Caldichoury [Epp16]. Abbildung 4.1 zeigt das numerische Modell.

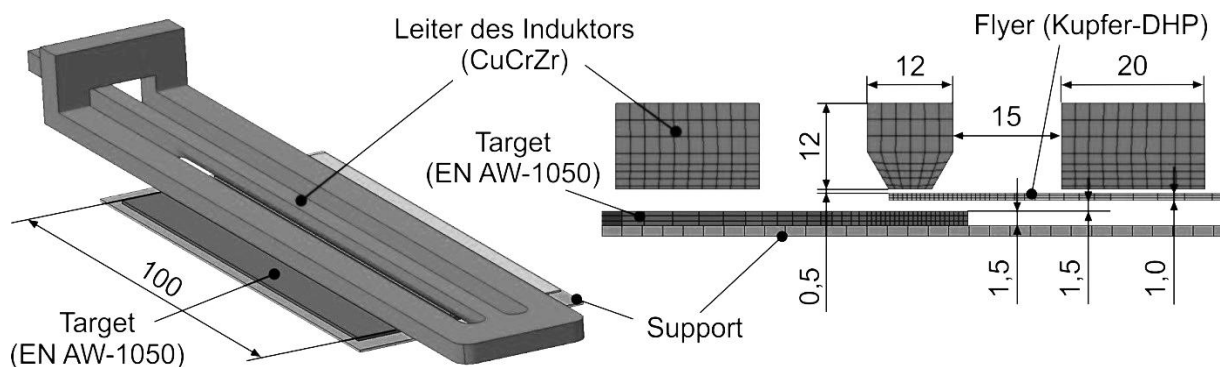


Abbildung 4.1: Modell für die numerische Prozesssimulation

Als Eingangsdaten für die Simulation dienten neben den geometrischen Daten

- die mechanischen Werkstoffkennwerte der Fügepartner ermittelt in Zugversuchen bei quasistatischer und dynamischer Belastung,
- die elektrische Leitfähigkeit σ der Fügepartner und des Leiterwerkstoffs des Induktors, berechnet aus einem gemessenen Spannungsabfall ΔU_{mess} infolge eines eingepprägten Stromes I_{mess} unter Berücksichtigung von Probenlänge l und Probenquerschnitt A (vergleiche Gleichung (2)), sowie
- der im Fügeversuch gemessene Induktorstrom.

$$\sigma = \frac{l \cdot I_{mess}}{\Delta U_{mess} \cdot A} \quad (2)$$

Als Ausgangsgrößen wurden die normal zur Targetoberfläche gerichtete Geschwindigkeitskomponente und der Aufprallwinkel entlang der Flyerunterkante quantifiziert.

Die Verläufe dieser Kollisionsparameter sind in Abbildung 4.2 für eine Parameterkombination dargestellt, die zu einer besonders hohen Verbundfestigkeit führt. Ergänzend ist die in den Schliffbildern bestimmte Ausdehnung des verschweißten Bereiches gekennzeichnet. Qualitativ sind die Verläufe für alle betrachteten Parameterkombinationen ähnlich. So sind die Aufprallgeschwindigkeiten stets im Bereich der Flyerkante (d.h. bei $d=0$ mm) maximal und sinken mit zunehmendem Abstand zu dieser Kante stetig ab. Der Aufprallwinkel ist an der Flyerkante zunächst klein und steigt mit der Distanz. Vielfach wird bei Erreichen einer parameterabhängigen Distanz ein Maximalwert erreicht, bei dessen Überschreiten der Aufprallwinkel wieder abnimmt.

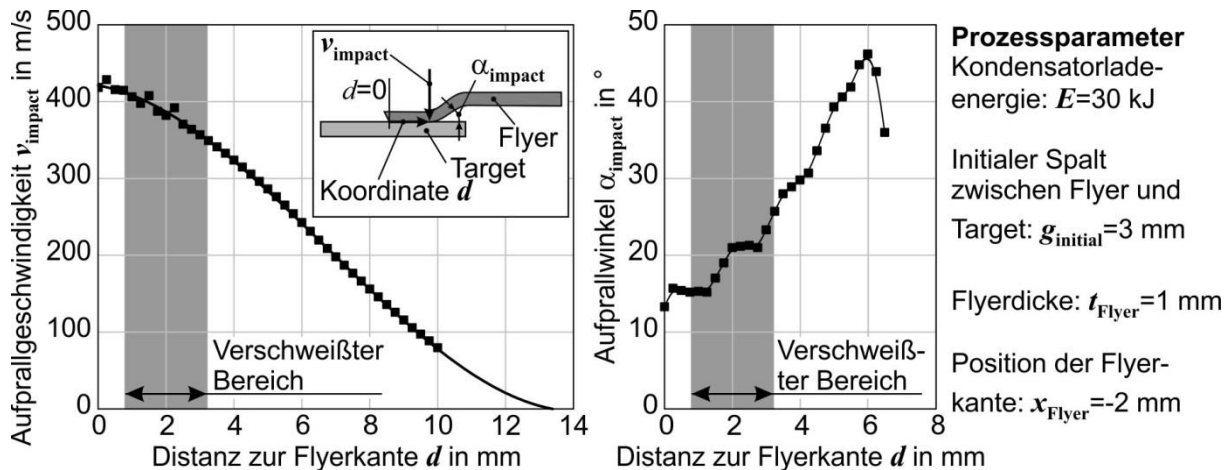


Abbildung 4.2: Exemplarischer Verlauf von Aufprallgeschwindigkeit und -winkel entlang der Flyerunterseite

Für die statistische Auswertung der Einflüsse auf Aufprallgeschwindigkeit und -winkel wurde die Geschwindigkeit bzw. der Winkel im Abstand $d=2$ mm zur Flyerkante betrachtet, da diese Position in der Regel in der Verbindungszone liegt.

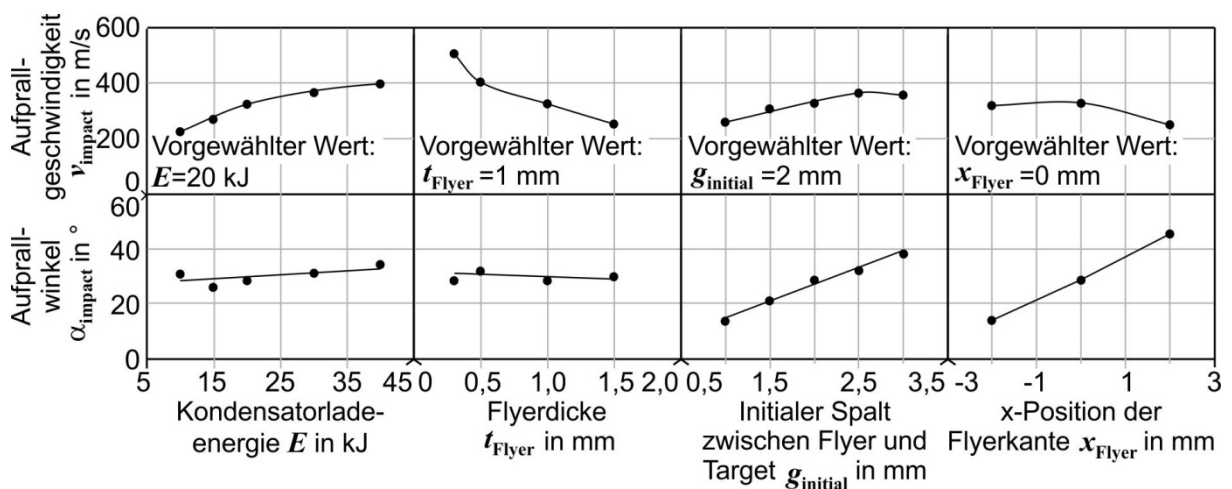


Abbildung 4.3: Einfluss von Kondensatorladeenergie, Flyerdicke, initialem Spalt zwischen Flyer und Target und x-Position der Flyerkante auf Aufprallgeschwindigkeit und -winkel

Eine Paretoanalyse zeigte, dass die Aufprallgeschwindigkeit wesentlich von Kondensatorladeenergie und Flyerdicke abhängt, der Aufprallwinkel hingegen weitgehend vom initialen Spalt zwischen Flyer und Target und x-Position der Flyerkante bestimmt wird. Details zeigt Abbildung 4.3. Erwartungsgemäß ist die Aufprallgeschwindigkeit größer bei höherer Kondensatorladeenergie und somit höherer Kraft sowie bei geringerer Flyerdicke und entsprechend weniger zu beschleunigender Masse. Mit steigendem Spalt steigt die Geschwindigkeit bis zu einem Maximalwert und sinkt dann mit weiterer Steigerung der Spaltweite. Dies entspricht Untersuchungen zum Geschwindigkeitseinfluss beim kraftschlüssigen Fügen von Profilen dargestellt von Bühler und von Finckenstein [Büh68] und später von Marré et al. [Mar04]. Auch kleinere x-Positionen der Flyerkante (d.h. größere Überlappungslängen von Induktor und Flyer) begünstigen tendenziell höhere Geschwindigkeiten. Der Aufprallwinkel bleibt von der Kondensatorladeenergie und der Flyerdicke nahezu unbeeinflusst, steigt jedoch mit zunehmendem initialen Spalt zwischen Flyer und Target sowie mit steigender x-Position der Flyerkante deutlich an.

5 Charakterisierung und Bewertung des Verbundes

Eine erste Evaluation des Versuchsergebnisses erfolgte hinsichtlich der Fragestellung, ob es zu einem bleibenden stoffschlüssigen Verbund der beiden Fügepartner gekommen ist. Auf dieser Basis konnte unter Berücksichtigung der Ergebnisse der numerischen Simulation das in Abbildung 5.1 skizzierte quantitative Prozessfenster für das MIS erstellt werden. Dazu wurden die Aufprallbedingungen an der Position $d=2\text{ mm}$ für alle betrachteten Parameterkombinationen in ein Diagramm eingetragen. Eine Kennzeichnung der Versuche, in denen reproduzierbar eine Verschweißung erzeugt wurde, ermöglicht hier die Eingrenzung von Bereichen, in denen die Kollisionsbedingungen die Verbundentstehung begünstigen. Parameterkombinationen, bei denen sich nur für einen Teil der Versuche ein Verbund eingestellt hat, kennzeichnen den Rand des Prozessfensters, in dem der Prozess noch nicht mit hinreichender Robustheit geführt werden kann. Parameterkombinationen, die reproduzierbar zu keiner Verbundausbildung führen, kennzeichnen Bereiche außerhalb des Prozessfensters.

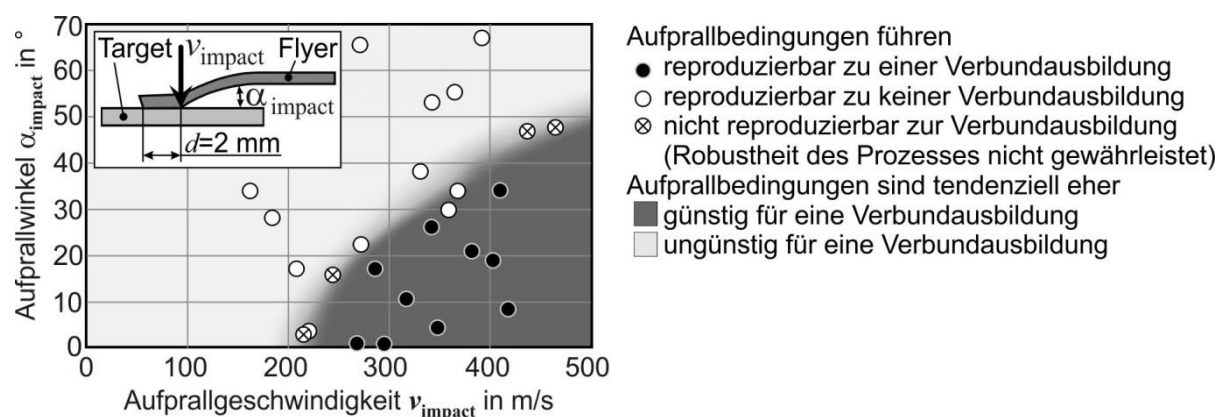


Abbildung 5.1: Prozessfenster für das Magnetimpulsschweißen

Es zeigt sich, dass für die hier betrachtete Kombination von Flyer und Target bei Aufprallgeschwindigkeiten $<250\text{ m/s}$ kein reproduzierbarer Verbund erreicht wird und

dass größere Aufprallwinkel höhere Geschwindigkeiten für ein Verschweißen erfordern. Jedoch sind Geschwindigkeiten >450 m/s für Kupferflyer beim Magnetimpulsschweißen kaum erreichbar. Dementsprechend sind Aufprallwinkel von ca. 5° bis maximal 30° durch die Wahl geeigneter Parameter des Aufbaus anzustreben.

Anschließend wurden die Verbunde einer detaillierteren Charakterisierung unterzogen. Dazu wurden wie in Abbildung 5.2 links dargestellt jeweils drei Proben aus einem Hybridblech präpariert, an denen zunächst elektrische Widerstandsmessungen und anschließend Scherzugversuche durchgeführt wurden. Auch wurden Schliffbilder des Verbundes zur Bestimmung der verschweißten Bereiche erzeugt (vergleiche Abbildung 4.2). Im Folgenden wird jedoch auf die Auswertung von Widerstandsmessung und Scherzugversuch fokussiert, da diese Untersuchungen aussagekräftiger im Hinblick auf die Anwendung der magnetimpulsgeschweißten Verbindungen sind.

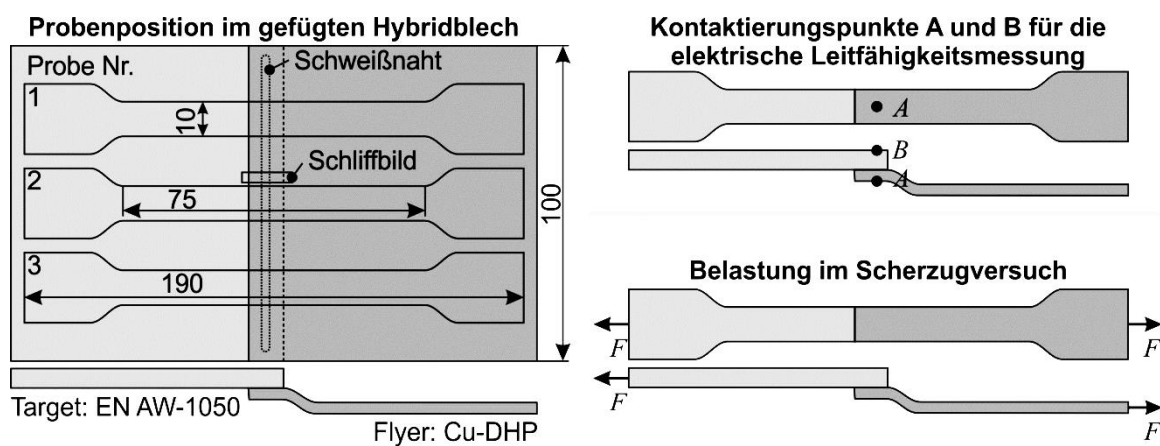


Abbildung 5.2: Probenabmessungen und -position im Hybridblech sowie Kontaktierungspunkte bei der elektrischen Leitfähigkeitsmessung und Belastung im Scherzugversuch

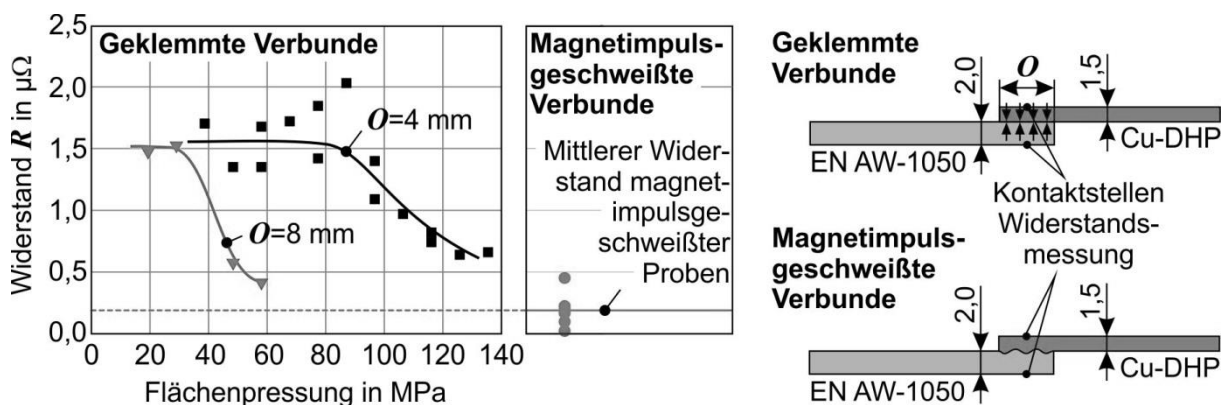


Abbildung 5.3: Elektrische Widerstände magnetimpulsgeschweißter und geklemmter Verbindungen

Die Bestimmung des elektrischen Widerstands des Verbundes erfolgte senkrecht zur Fügezone durch Einprägung eines definierten Stromes, Messung der entsprechenden Spannung und Berechnung durch das Ohmsche Gesetz. Referenzmessungen an den Ausgangshalbzeugen zeigen keinen messbaren Widerstand, sodass der ge-

gemessene Verbundwiderstand direkt dem Übergangswiderstand am Kontakt von Aluminium und Kupfer entspricht. Abbildung 5.3 vergleicht den Widerstand magnetimpulsgeschweißter und mechanisch geklemmter Verbunde. Für letztere ist, gerade bei kleinen Überlappungslängen, die zur Einsparung von Material, Kosten und Gewicht oft angestrebt werden, ein geringer Widerstand nur bei hoher Flächenpressung erreichbar. Für größere Überlappungslängen sind bereits geringere Flächenpressungen ausreichend, es ist aber zu berücksichtigen, dass diese bereits hohe Kräfte erfordern. Magnetimpulsgeschweißte Verbindungen weisen durchweg sehr kleine Verbundwiderstände auf, die durch ein Verkleben der Bleche kaum erreichbar sind.

Für den Scherzugversuch wurden die Proben in einer konventionellen Prüfmaschine belastet. Versagen tritt in Abhängigkeit von den Prozessparametern beim Magnetimpulsschweißen in der Fügestelle, im Kupfer-Grundwerkstoff oder im Aluminium-Grundwerkstoff auf. Versagen im Kupfer-Grundwerkstoff ist nur möglich, wenn die Dicke gegenüber dem Aluminium gering ist, da nur dann Kupfer den schwächeren Fügepartner darstellt. Bei größeren Dicken des Kupferblechs ist das Aluminiumblech der schwächere Partner und versagt zuerst. Abbildung 5.4 stellt Kraft-Verlängerungs-Verläufe von Verbunden, gemessen im Scherzugversuch, und entsprechende Kurven der Ausgangshalbzeuge, ermittelt in Zugversuchen, gegenüber.

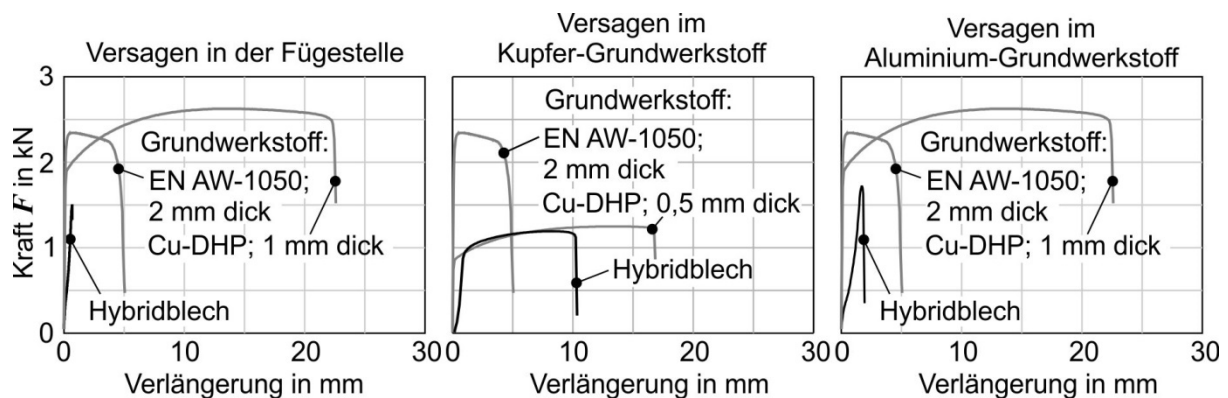


Abbildung 5.4: Versagensarten und entsprechende Kraft-Weg Kurven im Scherzugversuch

Beim Versagen in der Fügestelle liegen die übertragenen Kräfte deutlich unterhalb der für die Grundwerkstoffe ermittelten Werte. Im Gegensatz dazu stimmt die Kraft-Verlängerungs-Kurve bei Versagen im Kupfer-Grundwerkstoff in weiten Bereichen mit der entsprechenden Kurve des Ausgangshalbzeuges überein. Dies zeigt, dass die plastische Deformation des Hybridbleches im Wesentlichen im Kupfer stattfindet. Die Abweichungen am Anfang der Kurve sind auf die Geometrie magnetimpulsgeschweißter Verbindungen zurückzuführen. Diese weisen eine Krümmung der Probe in der Fügezone auf, die im Scherzugversuch teilweise reversiert wird, bevor eine plastische Deformation des Ausgangshalbzeuges auftritt. Bei Versagen im Aluminium liegen die übertragbaren Kräfte unter der Kurve des Ausgangshalbzeuges und das Versagen tritt stets in der Nähe der Fügestelle auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Aufprall des Kupferbleches zu einer Verringerung der Aluminiumblechstärke und einer entsprechenden Schwächung des Halbzeuges führt. Auch kommt es in der Fügezone durch die spezielle Probengeometrie zur Überlagerung von Zug- und Biegespannungen, die zur Reduktion der übertragbaren Kräfte beitragen kann. Dennoch wurden für diesen Versagensfall die höchsten übertragbaren Kräfte ermittelt.

Abbildung 5.5 zeigt das Ergebnis der statistischen Auswertung der Einflüsse von Aufprallgeschwindigkeit und -winkel auf die übertragbare Kraft und den Widerstand. Es zeigt sich, dass eine hohe Geschwindigkeit und kleine Winkel die Verbundqualität tendenziell positiv beeinflussen. Konkret kann eine höhere Kraft übertragen und gleichzeitig der Widerstand des Verbundes reduziert werden. Diese Zusammenhänge sind aber nur für die untersuchten Parameterbereiche gesichert. Bei der Auswertung wurde für Parameterkombinationen, die nicht zum Verschweißen geführt haben, die übertragbare Kraft mit 0 kN und der Verbundwiderstand mit $1,5 \mu\Omega$ (entsprechend einer geklemmten Verbindung mit geringer Flächenpressung; siehe Abbildung 5.3) angenommen. Die Geschwindigkeits- und Winkelbereiche, die nicht durch Analysen verschweißter Proben abgesichert sind, sondern durch statistische Methoden unter Berücksichtigung der Daten unverschweißter Proben ergänzt wurden, sind im Diagramm gestrichelt dargestellt. In Bezug auf die Kraft ist zu erwarten, dass die Kurve nicht stetig bis 0 kN verläuft, sondern erste Verschweißungen einen sprunghaften Anstieg bewirken. Für die Praxis der Verbundauslegung sind diese Bereiche wegen geringer übertragbarer Kraft und hohem Verbundwiderstands jedoch nicht relevant.

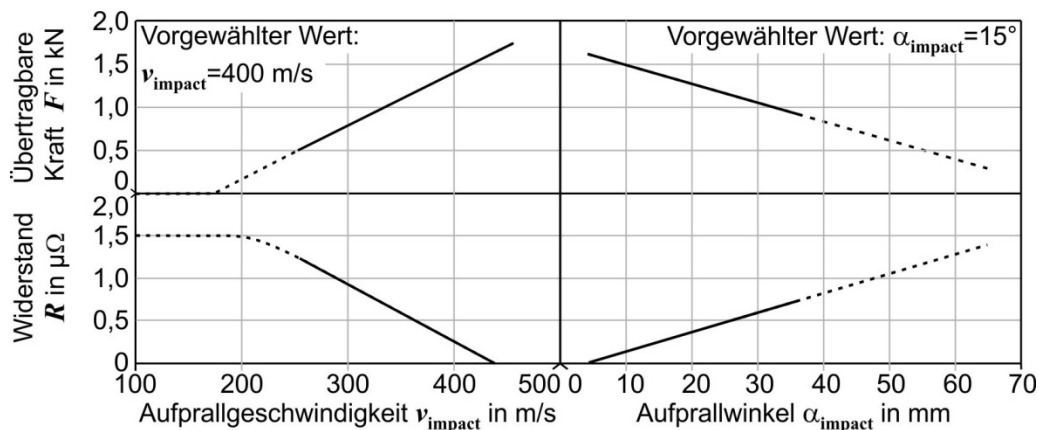


Abbildung 5.5: Einfluss der Kollisionsparameter auf die übertragbare Kraft und den elektrischen Widerstand des Verbundes

6 Zusammenfassung

Mit dem Ziel, Kosten- und Gewichtsvorteile ohne Qualitätsverlust zu erreichen, sollen im Rahmen des EU-geförderten JOIN'EM Projektes derzeit komplett aus Kupfer gefertigte Komponenten durch Kupfer-Aluminium-Bauteile substituiert werden. Um das Magnetimpulsschweißen für den industriellen Einsatz zur Fertigung der hybriden Kupfer-Aluminium-Verbunde zu qualifizieren und so die verfahrensspezifischen Vorteile nutzbar zu machen, wurde eine kombinierte experimentelle und numerische Prozessanalyse unter Nutzung statistischer Methoden zur Planung und Auswertung durchgeführt. Ergebnisse von Simulation und Experiment wurden zusammengeführt, um geeignete Parameter für das Magnetimpulsschweißen von Kupferflyern auf Aluminiumtargets zu identifizieren und im Sinne eines Prozessfensters darzustellen.

Weiterhin wurde gezeigt, dass sich hohe Aufprallgeschwindigkeiten und geringe Aufprallwinkel bei der Kollision der Fügepartner positiv auf die relevanten Verbundeigenschaften – übertragbare Kraft im Scherzugversuch und elektrischer Widerstand –

auswirken. Hohe Geschwindigkeiten lassen sich besonders durch hohe Kondensatorladeenergien und geringe Flyerdicken realisieren. Geringe Aufprallwinkel werden durch eine geringe initiale Spalte zwischen Flyer und Target sowie eine tendenziell größere Überlappung von Flyer und Werkzeugspule bzw. Induktor begünstigt.

7 Danksagung

Die Arbeiten entstanden im Rahmen des Projektes “JOINing of copper to aluminium by ElectroMagnetic fields - JOIN’EM”, gefördert von der Europäischen Union im Rahmen des Horizon 2020 research and innovation programme unter Grant Agreement Nr. 677660.



8 Literatur

- [Aiz09] Aizawa, T.; Kashani, M.: Magnetic Pulse Welding (MPW) Method for Dissimilar Sheet Metal Joints. 57th Ann. Assembly of the Int. Institute of Welding (IIW) Osaka, 2004.
- [Bee03] Beerwald, C.; Brosius, A.; Homberg, W.; Kleiner, M.; Klocke, M.; Kulig, S.: Extended Finite Element Modelling of Electromagnetic Forming. 10th Int. Conf. on Sheet Metal, S. 559-566, Jordanstown, 2003.
- [Büh68] Bühler, H.; von Finckenstein, E.: Fügen durch Magnetumformung. Werkstatt und Betrieb 101(4), S. 209-215, 1968.
- [Cuy16] Cuq-Lelandais, J.-P.; Avriilaud, G.; Ferreira, S.; Mazars, G.; Nottebaert, A.; Teilla, G.; Shribman, V.: 3D Impacts Modeling of the Magnetic Pulse Welding Process and Comparison to Experimental Data. 7th Int. Conf. on High Speed Forming, S. 13-22, Dortmund, 2016.
- [Epp16] L'Epplattenier, P.; Caldichoury, I.: A Coupled 3D/2D Axisymmetric Method for Simulation Magnetic Metal Forming Processes in LS-Dyna. 7th Int. Conf. on High Speed forming, S. 3-12, Dortmund, 2016.
- [Göb12] Göbel, G.; Beyer, E.; Kaspar, J.; Brenner, B.: Dissimilar Metal Joining: Macro- and Microscopic Effects of MPW. 5th Int. Conf. on High Speed forming, S. 179-188, Dortmund, 2012.
- [Kor08] Kore, S. D.; Date, P. P.; Kulkarni, S. V.: Electromagnetic impact welding of aluminium to stainless steel sheets. Journal of materials processing technology 208, S. 486–493, 2008.
- [Lue16] Lueg-Althoff, J.; Schilling, B.; Bellmann, J.; Gieß, S.; Schulze, S.; Tekkaya, A. E.; Beyer, E.: Influence of the Wall Thickness on the Joint Quality During Magnetic Pulse Welding in Tube-to-Tube Configuration. 7th Int. Conf. on High Speed forming, S. 259-268, Dortmund, 2016.
- [Lys70] Lysenko, D. N.; Ermolaev, V. V.; Dudin, A. A.: Method of Pressure Welding. US Patent 3,520,049, 1970.
- [Mar04] Marré, M.; Beerwald, C.; Psyk, V.; Homberg, W.; Kleiner, M.: Einfluss der Geschwindigkeit beim kraftschlüssigen Fügen rohrförmiger Werkstücke durch elektromagnetische Kompression. 11. Paderborner Fügesymposium, S. 162-172, Paderborn, 2004.
- [nn16] <http://de.statista.com>
- [Oli14] Oliveira, I.; Teixeira, P.; Reis, A.: Magnetic Pulse Welding of dissimilar metals: Influence of process parameters. 6th Int. Conf. on High Speed Forming, S. 117-126, Daejeon, 2014.
- [Psy11] Psyk, V.; Risch, D.; Kinsey, B.L.; Tekkaya, A.E.; Kleiner, M.: Electromagnetic forming – A review. Journal of Materials Processing Technology 211 S. 787-829, 2011.
- [Shr06] Shribman, V.; Tomer, Y.: Magnetic pulse technology for improved tube joining and forming. Tube & Pipe Technology, S. 91-95, 2006.
- [Wat06] Watanabe, M.; Kumai, S.; Aizawa, T.: Interfacial microstructure of magnetic pressure seam welded Al-Fe, Al-Ni, and Al-Cu lap joints. Mat. Science Forum, 519-521, S. 1145-1150, 2006.