

Einseitiges Punktschweißen mit Thermoexpansionsregelung im Leichtbau

One-sided Spot Welding with Thermo-Expansion-Regulation in Lightweight Construction

Dipl.-Ing. Tobias Broda, Leipzig (Deutschland), Dr. Niels Hammer, Wissen (Deutschland), Prof. Dr.-Ing. Steffen Keitel, Halle (Deutschland)

Zusammenfassung

Widerstandsschweißen ist nach wie vor eine der wirtschaftlichsten Verbindungstechniken. Um dies bei der Produktion von Aluminiumstrukturen mit einseitiger Zugänglichkeit anzuwenden, wurde das Konstantkraftsystem magneticDRIVE entwickelt, das die Elektrodenkraft mittels eines hochdynamischen Elektromagneten erzeugt. Der Ansatz beruht darauf, dass sich bei Temperaturerhöhung höherschmelzende Werkstoffe ausdehnen. Diese Thermoexpansion führt zu einer Elektrodenbewegung, die mittels der im magneticDRIVE enthaltenen Weg- und Kraftmessung analysiert werden kann. Zuerst wurden die Schweißversuche mittels einer Simulation und anschließend mit einem Versuchsaufbau verifiziert. Dazu wurden verschiedene Kraft- und Stromprogramme mit unterschiedlichen Impulsen verwendet, um so die Auswirkung auf Spritzerbildung, Elektrodeneindruck und Linsenwachstum zu überprüfen. Der Schwerpunkt der Analyse liegt dabei auf der Korrelation mit der Thermoexpansion.

Abstract

Resistance welding is still one of the most economical joining procedures. In order to apply this to the production of aluminum structures with one-sided accessibility, the magneticDRIVE constant force system has been developed, which generates the electrode force thanks to a highly dynamic electromagnet. The approach is based on the fact that higher-melting materials expand when the temperature rises. This thermal expansion leads to an electrode movement, which can be analysed thanks to the measurement of way and force contained in the magneticDRIVE. First of all, the welding tests are verified by means of a simulation and then with a test setup. Different force and current programs with different pulses are used to verify the effect on spatter formation, electrode indentation and lens growth. The focus of the analysis is on the correlation with thermal expansion.

1 Einleitung

Das Widerstandspunktschweißen ist eine effiziente Methode, Feinbleche kostengünstig und sicher zu verbinden. Das zweiseitige Widerstandspunktschweißen ist die übliche Prozessanordnung, bei der die Elektroden auf Bauteilflanschen aufsetzen und eine Schmelze zwischen den Blechen zur Verbindungsbildung erzeugt wird. Leichtbaukonzepte basieren häufig auf Profilkonstruktionen und Werkstoffen wie Aluminium. Deshalb ist es notwendig, das Widerstandspunktschweißen für eine einseitige Zugänglichkeit und diesen Werkstoff zu entwickeln. Vorgestellt wer-

den Ergebnisse zum einseitigen Widerstandsschweißen auf einer stationären Maschine mit einseitiger Elektrodenanordnung und fester Gegenlage. Die Nutzung einer magnetischen Nachsetzeinheit dient als Prozesskontrolle und liefert erstmals neue Daten zu einer Punktschweißung. Durch die Konstantkraftregelung mit in-situ Kraftanpassung, kann einer Widerstandsschweißung ein spezifischer Wegverlauf zugeordnet werden, der als Qualitätskriterium dient. Die Forschungsergebnisse liefern die Grundlage für eine Prozessregelung, die auf dem Wegverlauf basiert. Zur Entwicklung ist es notwendig, den Prozess hinsichtlich Einflussgrö-

ßen zu untersuchen. Abschließend wird das Anlagenkonzept für einen Doppelstoßpunkt mit zwei aktiven Elektroden vorgestellt.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Konstantkraftsystem magneticDRIVE

Die Aufgaben des Antriebs bei Widerstandsbuckel- und -punktschweißungen sind die Bewegung der Elektroden, die Stromkontaktierung, die Nachsetzbewegung und das Zusammenpressen der Fü-

gestelle. Eine neuartige Antriebstechnik ist die Kombination von zwei Aktoren mit getrennten Funktionen zur Erfüllung dieser Aufgaben.

Ein Servomotor stellt die Elektroden schnell und kontrolliert zu und eine Sensorik erkennt die Kontaktierung auf dem Fügebauteil. Anschließend wird ein linearmagnetischer Aktor von einem Umrichter gezielt bestromt und baut die geforderte Schweißkraft auf. Während des Schweißverlaufs wird die entsprechend erforderliche Nachsetzbewegung von diesem Aktor eigenständig ausgeführt.

Da dieser Magnetumrichter in einer geschlossenen Regelschleife (Bild 1) den Aktor mit einem Gleichstrom beaufschlagt, wird der von der Steuerung geforderte Kraftpegel jederzeit wiederholbar erreicht. Der von der Kraftsensorik erfasste Istwert wird mit dem von der Steuerung kommenden Sollwert verglichen und von der Leistungselektronik des Magnetumrichters durch entsprechende Bestromung des Aktors geregelt.

Während der Schweißung mit den einsetzenden Ausdehnungen und Schrumpfungen der Materialien erfährt der Kraftaktor Wegänderungen bei beispielsweise konstanter Kraft. Diese Weginformationen können direkt im Antrieb messtechnisch erfasst und von der Steuerung ausgewertet werden. Bild 2 zeigt den Wegaufnehmer am Aktor sowie ein Diagramm mit dem zeitlichen Verlauf der Größen

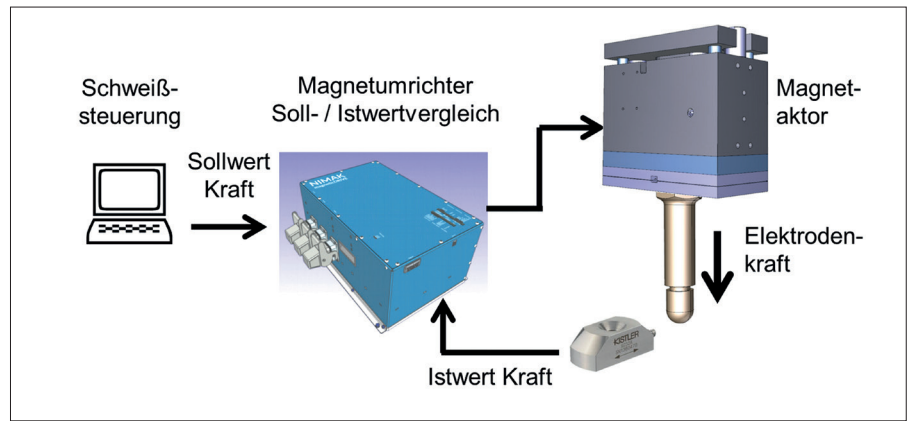


Bild 1: Komponenten der Kraftregelung

Elektrodenkraft, Schweißstrom und Magnetspalt. Bei konstant geregelter Elektrodenkraft und zwei Strompulsen dehnt sich die Fügestelle aus, was mit einer Bewegung des Magnetankers einhergeht. Auch das Eindringen der Elektroden in den Grundwerkstoff sowie das Abkühlen der Fügestelle sind im Wegverlauf sichtbar.

2.2 Aluminiumpunktschweißen

Das Aluminium-Punktschweißen ist seit vielen Jahren bekannt und wird derzeit für Leichtbaukonzepte der automobilen Massenfertigung weiterentwickelt. Lösungen und Anwendungen von Aluminiumwerkstoffen sind eine Antwort auf die Frage nach Ressourcenschonung

und Energieeffizienz, da die Reduzierung von CO₂-Ausstoß überwiegend nur durch Gewichtseinsparungen im Fahrzeugbau zu erreichen ist [1]. Nicht nur im Automobilbau ist der Werkstoff in den Interessensfokus gerückt, auch im Flugzeug-, Schiffbau oder bei Schienenfahrzeugen steigt die Nachfrage nach Aluminium [2].

Das zweiseitige Aluminiumpunktschweißen wurde u.a. von Meschut [3] hinsichtlich auftretender Unregelmäßigkeiten untersucht. Einen Eingang in DVS-Regelwerke, z.B. DVS 2932 [4], haben die Erkenntnisse leider nie gefunden. Im genannten DVS-Regelwerk wurde aber bereits auf eine mögliche positive Wirkung von Strom-Kraftprogrammen hingewiesen, die von Meschut [3] positiv für we-

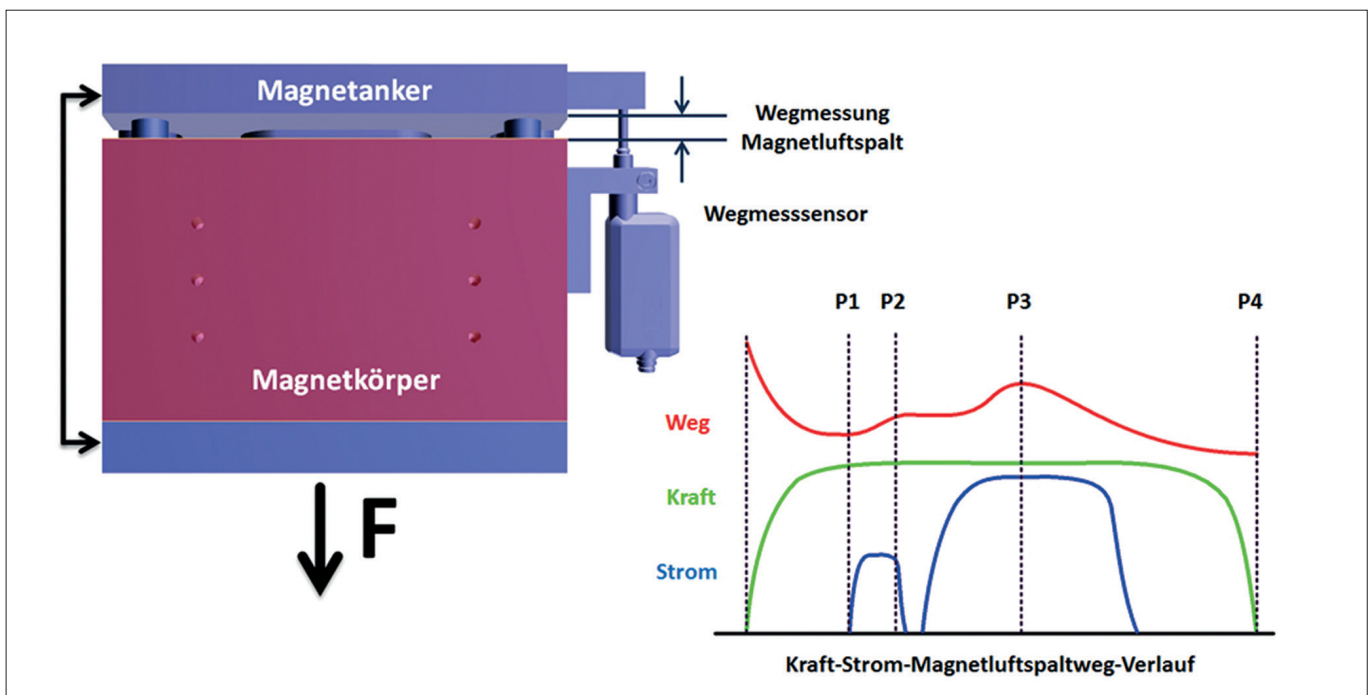


Bild 2: Wegmessung am Aktor für das Beispiel einer Konstantkraft

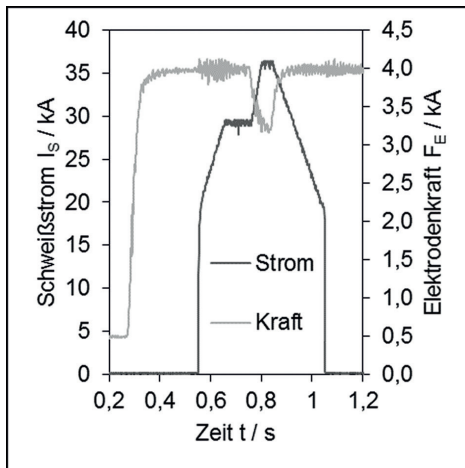


Bild 3: Typisches Strom-Kraftprogramm

niger Porosität in der Schweißlinse angewandt wurden.

Lösungsansätze zur adaptiven Regelung des Aluminiumpunktschweißens bieten Steuerungshersteller derzeit über eine Kraftüberwachung und entsprechende Nachführung von Schweißstrom und -zeit. Notwendig sind diese neuen Regelungssysteme, da Aluminium im Gegensatz zu ferritischem Stahl nicht das genutzte Widerstandsmaximum aufweist [5]. Als positiv für die sonst geringe Elektrodenstandzeit wurde von Latimer [6] eine raue Elektrodenkappenoberfläche beschrieben, um das Anhaften von Aluminium hinauszuzögern.

2.3 Einseitiges Punktschweißen

Das einseitige Widerstandspunktschweißen ist ein Verfahren für die stetige Entwicklung hin zur profil-intensiven

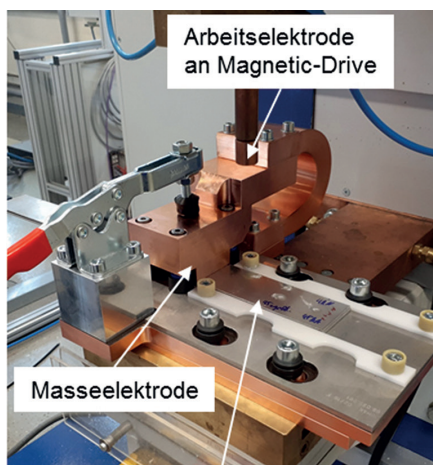


Bild 4: Schweißvorrichtung

Bild 4: Schweißvorrichtung

Bauweise von Fahrzeugstrukturen und der damit verbundenen Beschränkung der Zugänglichkeit der Fugestelle. Den Umgriff der Schweißstelle, wie er bei klassischen Schweißzangen möglich ist, gilt es hier durch eine einseitige Elektrodenkontaktierung zu ersetzen. So setzt neben dem Straßenfahrzeugbau auch der Schienenfahrzeugbau auf Skelettbauweisen.

Die bisherige Entwicklung des Verfahrens beschränkt sich auf Stähle. Schiebahn [7] berichtet von der grundsätzlichen Machbarkeit des einseitigen Punktschweißens (single side spot welding – SSSW), weist jedoch auf die Schwierigkeit bei gleichen Blechdicken oder geringen Festigkeiten der Bleche hin. Ideal seien dünne elektrodenseitige Bleche und dicke Tragstrukturen mit vorzugsweise hoher Steifigkeit. Kim [8] weist in seinen Ausführungen darauf hin, dass die Position der Stromableitung zu berücksichtigen ist, da ein Teil des Stroms durch das Deckblech abfließt, was auch bei Schiebahn [7] zu der Aussage führt, eine Einführung des einseitigen Doppelpunktschweißens (single side double spot welding – SSDSW) sei für die praktische Anwendung zweifelhaft.

3 Zielsetzung

Das Aluminiumpunktschweißen hat die industrielle Praxis erreicht und ermöglicht einen robusten Prozess. Schweißsteuerungen regeln den Schweißstrom bzw. die -zeit adaptiv. Unbeachtet blieb bisher das Wegsignal der Elektroden, da nur die Krafteinleitung gesteuert ist. Mit dem System magneticDRIVE kommt eine regelbare Prozessgröße hinzu, die genutzt wird, um den Elektrodenweg erstmals als Qualitätskriterium für eine Punktschweißung zu erfassen. Das Weg- bzw. Stromsignal des Magneten wird genutzt, um durch Kraftanpassung auf die Schweißlinsengröße Einfluss zu nehmen.

Im ersten Teil der folgenden Ausführungen soll die grundsätzliche Machbarkeit nachgewiesen werden, d.h. die Frage nach möglicher Korrelation zwischen der Ausdehnung der Fugestelle aufgrund der Erwärmung (Thermoexpansion) und dem Punktdurchmesser beim SSSW. Gelingt das, fließen die Erkenntnisse in einen Regler für das SSDSW ein.

4 Lösungsansatz

4.1 Theoretische Betrachtungen

Die meisten Werkstoffe dehnen sich bei Temperaturerhöhung aus. Je höher schmelzend der Werkstoff ist, desto kleiner ist sein Ausdehnungskoeffizient α (Grüneisen'sche Regel). Werkstoffe erfahren vom absoluten Nullpunkt bis zur Schmelze eine Volumenvergrößerung von 6 bis 7%, bzw. eine Längenänderung von etwa 2% [9]. Beim absoluten Nullpunkt ($T_0 = 0$ K) schwingen Atome nicht mehr. Sie nehmen einen Abstand im Gitter an, der sich aus den Anziehungskräften der Elektronenwolken und den Abstoßungskräften der Atomkerne ergibt. Die Anziehungskräfte sind größer als die Abstoßungskräfte, somit hält das Atomgitter zusammen. Die Summation der Kraftkurven ergibt die resultierende Kraft auf ein Atom. Bei Temperaturerhöhung beginnen die Atome zu schwingen. Da die abstoßende Kraft schneller ansteigt als die anziehende, resultiert daraus eine Vergrößerung des Atomabstands. Der Werkstoff dehnt sich aus.

Dieser thermophysikalische Zusammenhang wird genutzt, um die Elektrodenbewegung beim Punktschweißen zweier Blechstreifen aus EN AW-5754 zu analysieren. Die verwendeten Bleche sind in EN 485-2 [10] genormt. Das obere Blech hat eine Blechdicke von 2 mm im Zustand H22. Dies ist ein kaltverfestigtes und teilentfestigtes (rückgekühltes) Aluminium. Das untere Blech (3 mm) im Zustand H12 ist ein kaltverfestigtes Aluminium. Zur Darstellung der Fugstellenexpansion Δz wurde die Fugestelle eines Doppelpunktschweißers mit Sorpas 3D modelliert. In die Simulation wurden die Schweißparameter aus Bild 3 eingegeben.

4.2 Praktische Versuche

Geschweißt wurde auf einer Buckelschweißmaschine Nimak BMP20 magneticDRIVE. Der Strombereich beträgt $I_S = 20$ bis 80 kA bei möglichen Elektrodenkräften von $F_E = 0,6$ bis 24 kN. Der hohe Anfangsstrom begründet sich durch den genutzten Inverter mit 3 x 180 kVA-Mittelfrequenz-Transformatoren. Bild 4 zeigt die Schweißvorrichtung, die isoliert gegen den T-Nutentisch der Schweißmaschine angebaut wurde. Der Stromfluss entsteht zwischen oben angebaute

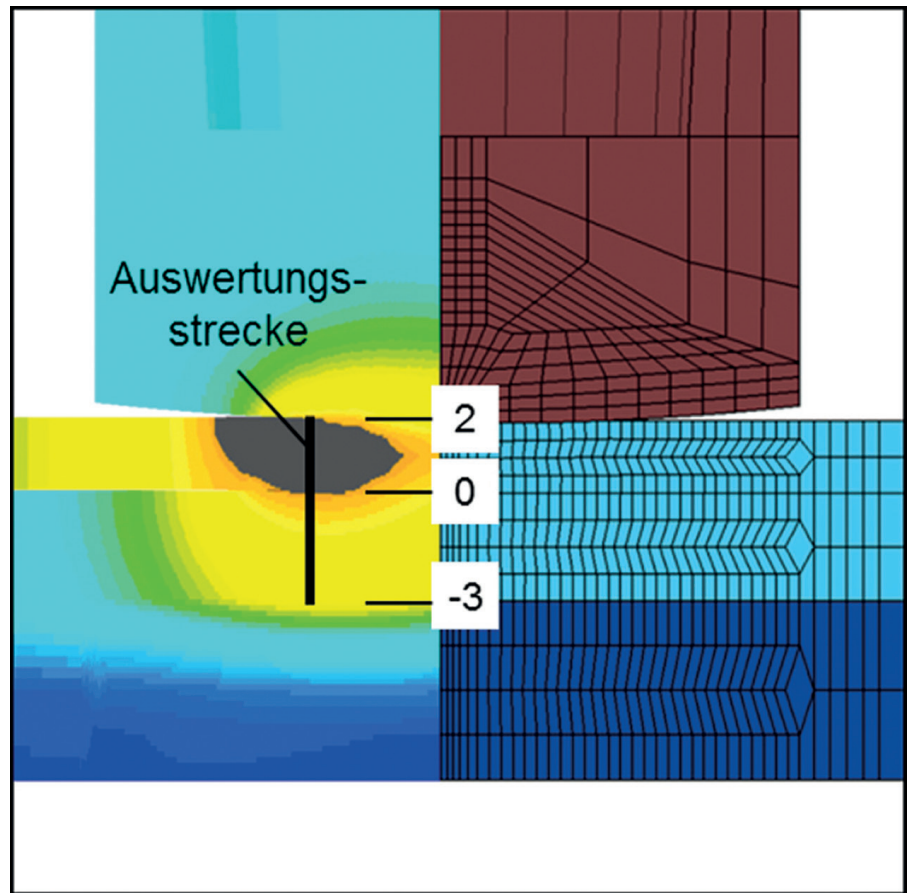
Arbeitselektrode und einer Masselektrode, welche den Strom zum unteren T-Nuten-tisch leitet. Der Abstand zwischen Arbeits- und Masselektrode beträgt 50 mm, auch der Punktabstand wurde durch Verschieben der zu schweißenden Bleche mit $e = 50$ mm gewählt. Das entwickelte Strom-Kraftprogramm im gemessenen Verlauf zeigt Bild 3. Die Elektrodenkraft wird zunächst auf $F_E = 4$ kN eingestellt und dabei der Schweißstrom I_S vom Minimum von 20 kA innerhalb von 100 ms auf 30 kA hochgerampft und für 100 ms gehalten. Diese ersten 200 ms dienen der Blechkonditionierung bzw. der Anpassung der Blechoberfläche an die Elektrode, um eine möglichst geringe Stromdichte zwischen Elektrode und Blech zu realisieren. Es folgt ein Elektrodenkraftabfall, der durch die Trägheit zeitlich verzögert seinen Zielwert (hier 3,2 kN) erreicht. Die Zeitdauer des Kraftabfalls beträgt 80 ms, wobei hierin der Strom in 40 ms auf 37 kA gesteigert und für 40 ms gehalten wird. Es schließt eine Stromabfallzeit von 200 ms an, wobei die Elektrodenkraft auf 4 kA ohne Rampe angehoben wird. Die Elektroden wurden mit Schleifpapier der Körnung 40 angeraut. Dies wirkte sich positiv auf die Elektrodenstandzeit und das Mindern von Oberflächenspritzern aus.

Vergleichend zur Simulation wurden Versuche durchgeführt (zwei Schweißpunkte je Parametersatz in Anlehnung an SEP1220-2 [11]) und die Kraftabsenkung wurde variiert. Die Elektrodenwege wurden aufgezeichnet und auch der dazugehörige Magnetstrom analysiert. Die Aufzeichnung erfolgte in einem National Instruments Multi-Kanal-Rekorder. Abschließend wurden statische Zugversuche der Schweißverbindungen durchgeführt. Die Zugproben wurden aus den Blechstreifen entnommen und Proben nach DIN EN ISO 14273 [12] herausgearbeitet.

5 Ergebnisse

5.1 Theoretische Betrachtungen

Das berechnete Temperaturfeld sieht wie folgt aus: Entsprechend der geringen Wärmeableitung zwischen den Elektroden entsteht ein Wärmestau, was dazu führt, dass die Schweißlinse exzentrisch unterhalb der jeweiligen Elektrode entsteht. Die berechnete Stromdichte beträgt in beiden Blechen etwa 200 A/mm^2 . Damit



! Bild 5: Detail aus Temperaturfeld mit Auswertungsstrecke

entsteht der Stromfluss in Ober- und Unterblech gleichermaßen.

Bild 5 zeigt links im Schnitt ein Detail einer simulierten Fügestelle. Rechts ist das Netz des Modells zu sehen. Über die dargestellte Auswertungsstrecke wurde an jedem Knoten auf der Strecke der Temperaturverlauf über die Schweißzeit ausgegeben. Die Auswertung zu den maximalen Temperaturen ist in Bild 6 dargestellt. Das obere Blech ist von 2 bis 0 dargestellt ($t = 2$ mm), das untere Blech von 0 bis -3 (3 mm). Mit den Angaben von Leitner [13] zur Dichte von Aluminiumschmelzen, kann aus den Temperaturverteilungen über die Auswertestrecke hinweg die Thermoexpansion Δz der Fügestelle berechnet werden:

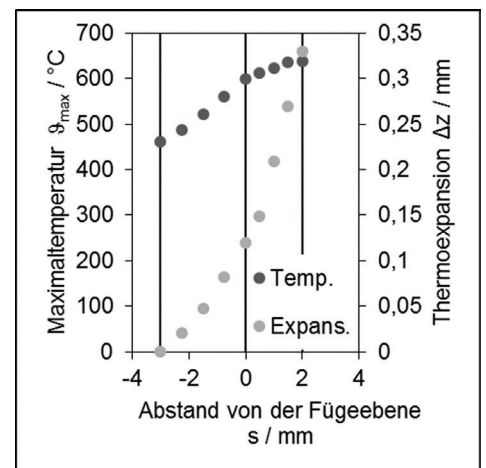
$$\Delta z = \sum_{i=1}^n \frac{s_{i,RT}(\rho_{RT} - \rho_i)}{\rho_i} \quad (1)$$

- $s_{i,RT}$ – Knotenabstand,
- ρ_{RT} – Dichte bei Raumtemperatur und
- ρ_i – Dichte am Knoten.

Das graphische Ergebnis ist in Bild 6 enthalten. Die maximale Thermoexpansion beträgt $\Delta z = 0,33$ mm und stellt eine messtechnisch erfassbare Größenordnung für die praktischen Versuche dar.

5.2 Experimentelle Validierung

Der Literatur [7, 8] ist zu entnehmen, möglichst geringe Elektrodenkräfte für



! Bild 6: Maximale Temperaturen und dadurch hervorgerufene Thermoexpansion zwischen den Knoten



Bild 7: Schliffbild mit ausgetretener Schmelze beim SSSW mit $F_E = 1,5 \text{ kN}$, $I_S = 45 \text{ kA}$, $t_S = 160 \text{ ms}$

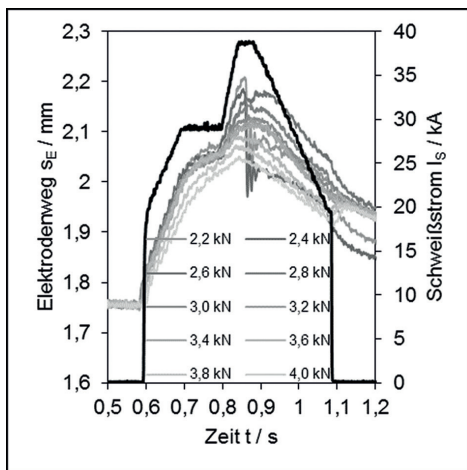


Bild 8: Elektrodenwege bei verschiedenen Kraftminderungen in der Hochstromphase (vgl. Bild 3)

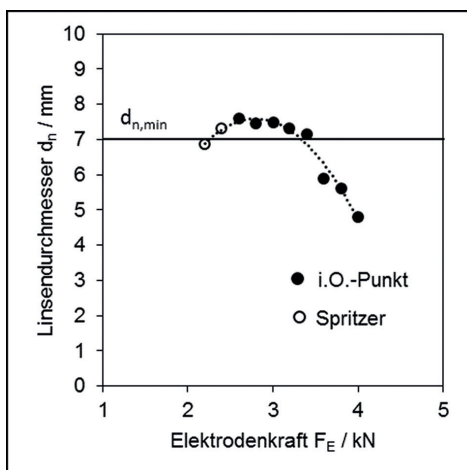


Bild 9: Korrelation zwischen erreichtem Linsendurchmesser und Kraft in der Hochstromphase

das einseitige Punktschweißen zu verwenden. Der Grund liegt im Versagen der Struktur des Profils, wenn keine Gegenlage genutzt wird. Da die Versuche auf der stationären Maschine stattfanden, wurde zunächst untersucht, welche Ergebnisse mit geringen Elektrodenkräften, hier $F_E = 1,5 \text{ kN}$, möglich sind. Es wurde mit einem Schweißstrom von $I_S = 45 \text{ kA}$ gearbeitet und ein Rechteckimpuls mit verschiedenen Schweißzeiten genutzt. Bild 7 zeigt das Schliffbild bei einer Schweißzeit von $t_S = 160 \text{ ms}$. Rechts in Bild 7 ist zu erkennen, dass sich die Oberfläche am Elektrodenrand öffnet und Schmelze austritt. An dieser Stelle kommt es zu Anlegierungen von Aluminium an der Elektrode und zu einer Schädigung der Blechoberfläche. Die Öffnung der Linse erfolgt stets in Richtung der Masseelektrode, was aus der Simulation bekannt ist und deren Ursache wohl im Temperaturfeld liegt.

Zur Klärung bei welchen Bedingungen Oberflächenspritzer entstehen, wurden Versuche mit geringen Kräften und sehr kurzen Schweißzeiten unternommen. Bereits bei sehr kurzen Schweißzeiten von $t_S = 20 \text{ ms}$ sind Schweißspritzer am Rand des Elektrodeneindrucks erkennbar. Erst bei einer Elektroden-

kraft von $F_E = 7 \text{ kN}$ bleiben die Oberflächenspritzer auch bei Schweißzeiten von $t_S = 100 \text{ ms}$ aus. Mit einer Reduzierung des Schweißstroms auf $I_S = 30 \text{ kA}$ können diese guten Oberflächeneigenschaften des Elektrodenabdrucks auch mit geringeren Elektrodenkräften ($F_E = 4 \text{ kN}$) erreicht werden. Eine Stromanstiegszeit von 50 ms hat sich als geeignet erwiesen. Damit scheint auch die Problematik des Temperaturfelds in der praktischen Anwendung lösbar.

Zur Entwicklung des oben gezeigten Strom-Kraftprogramms (Bild 3) wurden mehrere Iterationsschleifen mit Parametervariation zu Schweißstrom und Kraftabfall in der Hochstromphase durchlaufen. Bild 8 zeigt, dass bei konstantem Stromverlauf (schwarze Kurve) der Verlauf der Elektrodenkraft unterschiedliche Expansionen der Fugestellen zulässt. In den Verläufen sind z.B. auch Schweißspritzer als stark abfallende Wegkurven erkennbar. Es sei erwähnt, dass bei den dargestellten Kurven die Aufbiegung der Buckelschweißmaschine nicht herausgerechnet wurde.

Bild 9 zeigt, dass es zielführend ist, das Schweißlinsenwachstum über eine Kraftabsenkung zu erreichen. Im Bereich um $F_E = 3,2 \text{ kN}$ werden Linsengrößen erreicht, die größer sind als $d_n = 5\sqrt{v}$. Sind die Elektrodenkräfte in der Hochstromphase zu gering, treten Schweißspritzer auf. Steigen die Elektrodenkräfte über einen Maximalwert an (hier $3,6 \text{ kN}$), ergeben sich kleinere Schweißpunkte.

Den Zusammenhang zwischen erreichtem Linsendurchmesser d_n und thermischer Expansion Δz der Fugestelle zeigt Bild 10. Für ausreichend große Schweißlinsen sollte demnach eine Fugestellenexpansion von etwa $0,4 \text{ mm}$ auftreten. Konsistent ist dieser Zusammenhang für die genutzte Buckelschweißmaschine.

Bei Analyse der Graphen aus Bild 8 ist erkennbar, dass nicht nur die Maximalwerte der Fugestellenexpansion bei unterschiedlicher Kraftabsenkung abweichen, sondern auch die Anstiege ds/dt . Die Anstiege wurden berechnet und in Bild 11 und Bild 12 in Korrelation zu Elektrodenkraft bzw. erreichtem Linsendurchmesser dargestellt. Expansionsgeschwindigkeiten von 2 mm/s scheinen geeignet, um ausreichend große Linsen zu erzeugen.

Zur Klärung der geeigneten Elektrodengeometrie wurden mit dem Schweißpro-

gramm nach Bild 4 neben der A20R100-Kappe auch die Radien R50 und R150 untersucht und mit Zugversuchen bewertet. Es wurden jeweils fünf Zugproben mit und ohne Schweißspritzer betrachtet. Die erreichten Scherzugwerte wurden den entsprechenden Linsendurchmessern zugeordnet. Schweißspritzer sollten mit allen verwendeten Kappen vermieden werden, hier bestätigen sich die Aussagen zu Bild 10. Spritzer führen beim SSSW zu kleineren Schweißpunkten. Mit kleineren und größeren Elektrodenradien werden jeweils kleinere Scherzugkräfte und Linsendurchmesser erreicht, weshalb für die weiteren Arbeiten ein Kappenradius von 100 mm vorzuziehen ist.

Bei Auswertung der Wegkurven fiel auf, dass auch bei sehr lang gewählten Nachhaltezeiten immer ein „Restweg“ verbleibt, d.h. die Elektrode befindet sich zum Ende der Nachhaltezeit in einer größeren z-Position als vor der Schweißzeit. Dies lässt den Schluss zu, dass trotz Stromabfall beim Schrumpfen der Schmelze nicht alle Hohlräume geschlossen werden, was Bild 13 zeigt.

6 Ausblick

Die genutzte Buckelschweißmaschine verfügt über eine hochdynamische Kraftkonstantregelung, womit Kraftsprünge innerhalb der Schweißzeit möglich sind, z.B. von 4 auf 3,2 kN und zurück (Bild 14). Der Magnetstrom, der den Elektromagneten versorgt, korreliert mit zwei der bisher messbaren Größen, weshalb beim Aufbau des Punktschweißsystems mit einseitigem Doppelpunktschweißen SSDSW ein Regelsystem auf dieser Basis entwickelt werden wird. Damit sind sowohl Informationen über die Elektrodenkraft als auch über die Thermoexpansion der Fügestelle auswert- und einstellbar.

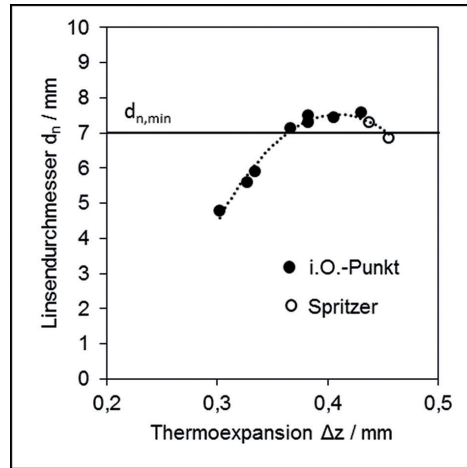


Bild 10: Korrelation zwischen erreichtem Linsendurchmesser und Expansion der Fügestelle

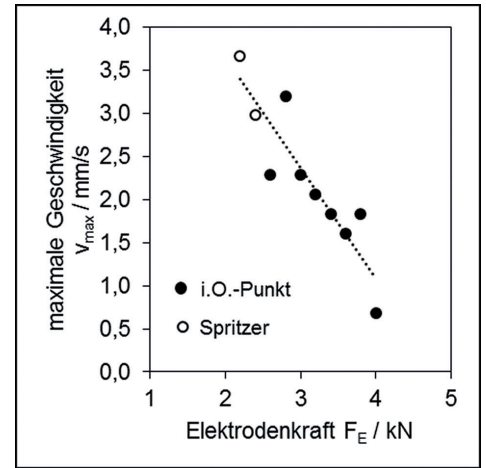


Bild 11: Korrelation zwischen Elektrodenkraft in der Hochstromphase und maximaler Geschwindigkeit

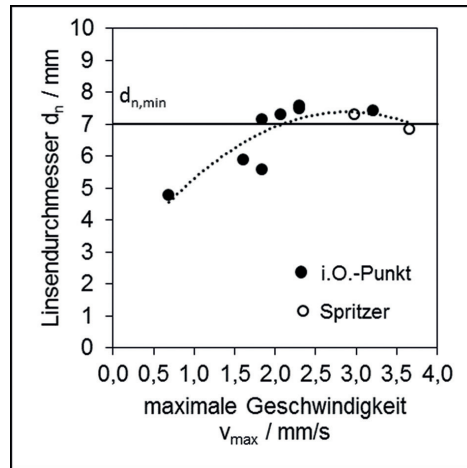


Bild 12: Korrelation zwischen maximaler Geschwindigkeit und erreichtem Linsendurchmesser

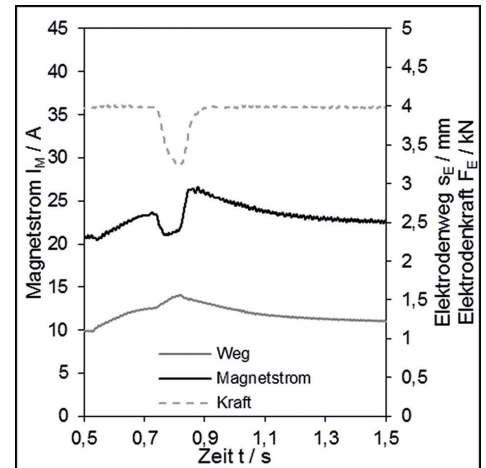


Bild 14: Strom, Weg und Magnetstrom einer qualitativ guten Schweißung



Bild 13: Schliffbild der einseitig geschweißten Verbindung

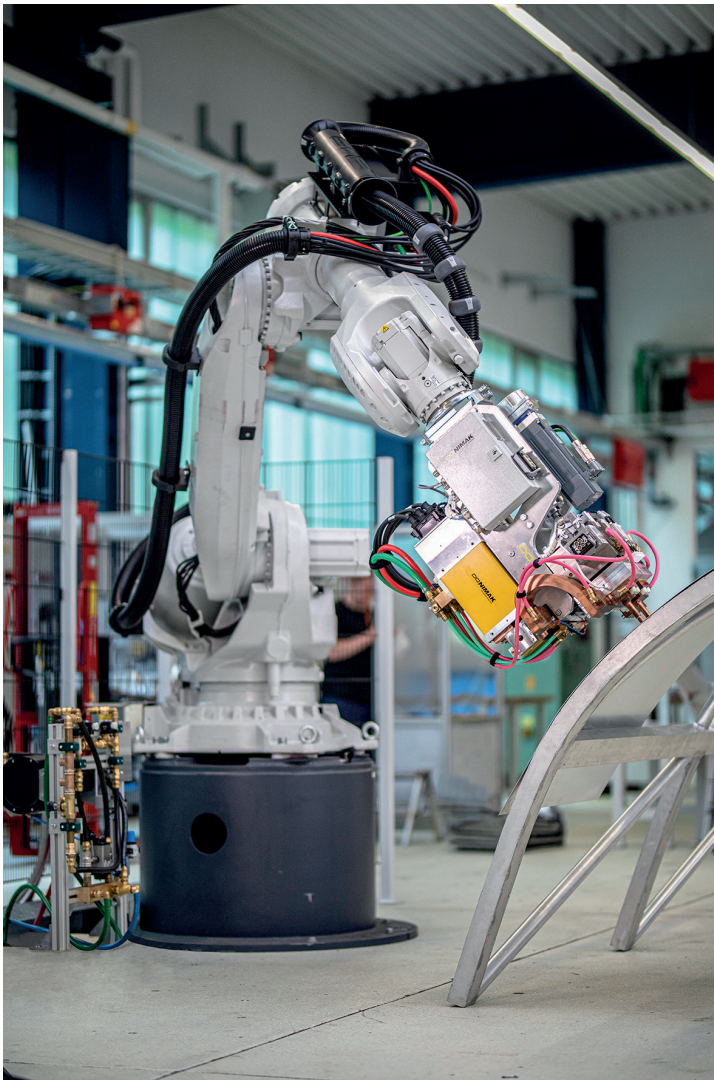


Bild 15: Robotergeführter einseitiger Doppelstoßpunkter

Den Aufbau eines Doppelpunktsystems, das robotergeführt betrieben wird, zeigt *Bild 15*. Genutzt werden zwei unabhängige Aktoren, die jeweils kraftgeregelt sind. Die Zustellbewegung kann durch den Roboter erfolgen, oder wie in der Abbildung dargestellt, durch einen zusätzlichen Spindelmotor. Eine der beiden elektromagnetischen Antriebe kann auch als flächige Kontaktierelektrode ausgeführt werden.

Die Prozessregelung erfolgt durch die Unterteilung des Punktschweißablaufs in einzelne Parametermodule. Der zeitliche Übergang in die Prozessschritte basiert auf der Auswertung der beschriebenen Wegmessung und dem Detektieren von Triggerpunkten in der Wegverlaufskurve. Neben den variablen Zeitbereichen kann im Folgemodul auch die Schweißkraft, die von der Wegänderungsgeschwindigkeit abgeleitet wird, variieren. Die Übergän-

ge der Prozessmodule können stufenartig oder über Rampen verschleppt erfolgen

7 Zusammenfassung

Fahrzeugkonstruktionen für Straßen- und Schienenfahrzeuge erhalten zunehmend Profile als Tragstruktur. Das Widerstandsschweißen muss sich dieser Aufgabe durch neue Konstruktions- und Steuerungsarten stellen. Das einseitige Widerstandsdoppelpunktschweißen SSDSW mit magnetischer Kraftregelung besitzt die Möglichkeit, die Anforderungen dieser Fügestellen zu erfüllen. Dafür wurde die Fügestelle FE-modelliert und analysiert. Durch das Temperaturfeld und die damit einhergehende Volumenzunahme entsteht bei der gewählten Blechdickenkombination eine theoretische reversible Blechdickenzunahme von 0,3 bis 0,4 mm, die als Thermoexpansion bezeichnet wird.

Die experimentell mit Hilfe des Kraftsystems magneticDRIVE ermittelten Werte liegen im Bereich von 0,4 bis 0,5 mm und befinden sich damit geringfügig über den Werten der Simulation. Darüber hinaus gelang es, im Rahmen der Arbeiten eine Korrelation zwischen Thermoexpansion und Schweißlinsendurchmesser nachzuweisen.

Durch die spezielle Ansteuerung des Magneten werden Regelstrategien möglich, die den Magnetstrom des magneticDRIVE-Kraftsystems gezielt beeinflussen. Die SSDSW-Einheit befindet sich derzeit in der Qualifizierungsphase.

Danksagung

Das Vorhaben ZF4316503FH7 SLV-Halle / ZF4084003FH7 NIMAK des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Für diese Förderung möchten sich die Autoren ausdrücklich bedanken.

#672_A3

(Bildnachweis: 1 bis 15, Verfasser)

Literatur

- [1] Ressourceneffizienz von Aluminium. Broschüre des GDA – Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., 2010.
- [2] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin 2014.
- [3] Meschut, G., et al.: Bestimmung der Eigenschaften imperfektionsbehafteter Widerstandspunktschweißungen von karosseriebaurelevanten Aluminiumwerkstoffen. In: Tagungsbericht 23. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen, Duisburg, 2016, S. 131-139.
- [4] DVS 2932-3: Widerstandspunkt- und rollenachtschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen von 0,35 bis 3,5 mm Einzeldicke – Vorbereitung und Durchführung des Schweißens. Beuth-Verlag, Berlin April 1986.
- [5] Matsuyama, K.: Quality Management of Resistance Welds. IIW-Doc. III-1496-08, 2008.
- [6] Latimer, E., et al.: Prozesssicher Widerstandspunktschweißen von Strukturbauteilen aus Aluminium in der automobilen Serienfertigung am Beispiel einer Fallstudie. In: Bericht 23. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen, Duisburg 2016, S. 51-76.
- [7] Schiebahn, A., et al.: Merkmale des einseitigen Widerstandspunktschweißens ohne Abstützung von der Gegenseite. Schweißen und Schneiden 68 (2016) Heft 9, S. 592-596.
- [8] KIM, J. H., et al.: Estimation of the weldability of single-sided resistance spot welding. Journal of Manufacturing Systems 32 (2013) 3, S. 505-512.
- [9] Hannoschöck, N.: Wärmeleitung und -transport. Springer Verlag, Berlin 2018.

- [10] DIN EN 485-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Bänder, Bleche und Platten – Teil 2: Mechanische Eigenschaften. Beuth-Verlag, Berlin 10/2018.
- [11] SEP1220-2: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die Fügeignung von Feinblechen aus Stahl – Teil 2: Widerstandspunktschweißen, 2011.

- [12] DIN EN ISO 14273: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Probenmaße und Verfahren für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln. Beuth-Verlag, Berlin 2016.

- [13] Leitner, M., et al.: Thermophysical properties of liquid aluminum. Metallurgical and Materials Transactions A, 48 (2017) Nr. 6, S. 3036-3045.



Dipl.-Ing. (FH) Tobias Broda (38). 2003 bis 2007 Ausbildung zum Mechatroniker bei der Demag Ergotech GmbH, 2003 bis 2008 Studium Maschinenbau, Fachrichtung Fertigungstechnik, an der Fachhochschule Schmalkalden; 2008

bis 2019 Forschungsingenieur und Fachbereichsleiter bei der SLV Halle; seit 2020 Planer Fügedatenmanagement bei der Porsche Leipzig GmbH.

Anschrift: Porschestraße 1, 04158 Leipzig, Deutschland.

E-Mail: tobias.broda@porsche.de



Dr.-Ing. Niels Hammer (47). 2001 bis 2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter / Abteilungsleiter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der TU Dortmund, dort Promotion auf dem Gebiet der Produktionstechnologie; 2007 bis 2012 Project Engineer / Operation Manager / Senior Consultant bei der Siemens AG; 2013 bis 2016 CTO & COO bei Moventas Gears Oy / Santasalo Gears Oy; seit 2016 CEO der Nimak GmbH, Wissen.

Anschrift: Nimak GmbH, Frankenthal 2, 57537 Wissen, Deutschland.

E-Mail: niels.hammer@nimak.de



Prof. Dr.-Ing. Steffen Keitel (62). 1985 bis 1988 Promotion an der TU Magdeburg; 1988 Wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Gebiet der Elektronenstrahltechnik, Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR, Halle, Rechtsnachfolger: SLV Halle GmbH; 1992 bis 1995 Abt.-Leiter Werkstoffprüfung und Strahltechnik, später zusätzlich

Leiter der Abt. Forschung und Entwicklung. Seit 1996 Geschäftsführer der SLV Halle GmbH, 1999 bis 2000 Geschäftsführer der SLV Berlin-Brandenburg, 1999 bis 2013 Geschäftsführer der GSI – Schweißtechnik International GmbH sowie 2003 bis 2011 Leiter der SLV Duisburg.

Anschrift: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Köthener Straße 33a, 06118 Halle, Deutschland.

E-Mail: keitel@slv-halle.de