

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20.164 BR

Thema

Neuartige Füge­technologie zur Herstellung hybrider Bauteilstrukturen mit kurzem Flansch aus höchstfestem Stahl und Aluminium

Berichtszeitraum

01.05.2018 - 31.10.2020

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA

Forschungseinrichtung(en)

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Füge­technik (IWF)

Magdeburg, 22.12.2020

Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Förderhinweis & Danksagung

Das IGF-Vorhaben „Neuartige Füge­technologie zur Herstellung hybrider Bauteilstrukturen mit kurzem Flansch aus höchstfestem Stahl und Aluminium“, IGF-Projekt Nr. 20.164 BR, 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. Für diese Unterstützung sei gedankt.

Weiterer Dank gilt den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PbA) für die materielle und fachliche Unterstützung.

Unser Dank gilt insbesondere:

Bernd Rödder	NIMAK International GmbH
Christian Sinner	Bertrandt AG
Holger Schubert	Daimler AG
Dr. Rudi Pinkernelle	Iweld-Innovative Füge­technik
Anne Linkner	voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd GmbH & Co. KG
Karl-Heinz Kumpf	Karl-Heinz Kumpf GmbH
Dr. Hans Joachim Clobes	RKW Sachsen-Anhalt GmbH
Dr. Matthias Graul	Volkswagen AG
Peter Weber	GEDIA Gebrüder Dingerkus GmbH
Bernd Giggel	Vorrichtungsbau Giggel GmbH
Christian Behrend	H&B OMEGA Europa GmbH
Laurent Cretteur	ArcelorMittal
Robert Gessler	Porsche Leipzig GmbH
Stefan Lindner	Outokumpu Nirosta GmbH
Dr. Tino Adam	Sondermaschinenbau Calvörde GmbH
Dr. Christian Fritzsche	Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH
Vitalij Janzen	Arnold Umformtechnik GmbH & Co. KG
Niels Mitzschke	Harms & Wende GmbH & Co. KG

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projektes wurden für die Forschungseinrichtung „Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (IWF) Lehrstuhl Fügetechnik“ insgesamt 26 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (A1) eingesetzt. Die Arbeiten wurden gemäß dem Forschungsantrag durchgeführt. Die für das Forschungsprojekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

Es wurden keine Geräte beschafft und keine Leistungen Dritter herangezogen.

Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes keine gewerblichen Schutzrechte erworben.
Eine Anmeldung eines gewerblichen Schutzrechtes ist nicht beabsichtigt.

Kurzzusammenfassung

Im Fahrzeugleichtbau werden zunehmend höchstfeste Stähle eingesetzt und diese mit Bauteilen aus Al-Legierungen kombiniert. Für diese Werkstoffkombination wurden mechanische Fügeverfahren weiterentwickelt, die jedoch grundsätzliche technologische Grenzen aufweisen und speziell im Bereich der KMU nicht so verbreitet angewendet werden wie die Widerstandsschweißtechnik. Speziell beim Fügen formgehärteter Bauteile mit dünnen Al-Blechen sind hohe Fügekräfte und kleine Toleranzfelder für einen stabilen Fügeprozess erforderlich.

Für die Realisierung eines kostenattraktiven Leichtbaus soll ein Verfahren für Mischverbindungen aus hoch- und höchstfesten Stählen mit Al-Blechen entwickelt werden, bei dem einfache kostengünstige Fügeelemente und kurze Flansche umsetzbar sind. Darüber hinaus soll dieses Verfahren auch unter unterschiedlichen Produktionsrandbedingungen flexibel anwendbar sein, so wie sie häufig bei KMU erforderlich sind und bei denen kurze Flansche < 10 mm möglich sind.

Die Technologie soll es KMU ermöglichen, ihr Knowhow aus der Widerstandsschweißtechnik zu nutzen um damit Stahl-Aluminium-Verbindungen herstellen zu können, ohne auf Niet- oder Schraubtechnik umzustellen, was mit erheblichen Investitionen in Anlagen und Mitarbeiter verbunden wäre.

Die Fügeelemente wurden aus Schweißdraht hergestellt und bilden in der Verbindungsebene den Werkstoffübergang von Stahl auf Aluminium, ohne die intermetallischen Phasen die Verbindungseigenschaften verschlechtern. Die Verbindung kann durch einen sehr kurzen Schweißprozess < 30 ms erfolgen, der dabei so wenig Wärme einbringt, dass zusätzliches Kleben möglich ist. Die Verbindungseigenschaften wurden sowohl an geeigneten Prüfkörpern mit einem Drahtelement ermittelt, als auch an speziellen Mehrpunktproben, die die komplexen Beanspruchungen im Produktionsprozess sowie im Betrieb nachbilden.

Neben den Anwendern aus dem Bereich der Komponenten- und Zuliefererindustrie sollen Hersteller von Schweißanlagen von den Ergebnissen profitieren, welche größtenteils klein und mittelständig geprägt sind.

Durch die Herstellung von Musterbauteilen mit realitätsnaher Geometrie wurde das Verfahren validiert und das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Abstract

In lightweight vehicle construction, ultra-high strength steels are increasingly being used and are combined with components made of aluminum alloys.

For this combination of materials, mechanical joining processes have been further developed, however, have basic technological limits and are not applied as widely as resistance welding technology, particularly in the small and medium-sized enterprises (SMEs). Especially during joining hot-stamped components with thin Al-sheets, high joining forces and small tolerance fields are required for a stable joining process. The rivet geometry during the self-piercing riveting must be adapted exactly to the application and the required flange length is large.

For the realization of a cost - effective lightweight construction, a novel method for dissimilar joints made of ultra-high strength steels with aluminum sheets was developed. Where by using simple cost-effective joining elements the short flanges < 10 mm can be realized. The technology is intended to enable SMEs to use their know-how in resistance welding technology and thus to produce steel-aluminum joints without having to switch to riveting or screw technology, which involves considerable investments in systems and continuing education of employees. The joining elements can be easily manufactured by cutting welding wire. The intermetallic phases in the joint plane can be avoid or reduce, so the drop off in joint strength can be avoid.

The sheets should be joint by a very short welding time - less than 30 ms, due to the lower heat input and to provide the possibility of additional adhesive bonding.

The properties of joints were determined on suitable test specimens, whereby a special multi-spot-welded specimen simulated the complex stresses during the production process as well as during industrial manufacturing.

In addition to users from the field of component and supplier industries, manufacturers of welding systems, which are mainly small and medium-sized enterprises, can also profit from the results.

The novel technology was validated by manufacturing of joints on structural component with realistic geometry, hence the objective of this research project was accomplished.

Ergebnistransfer in die Wirtschaft Transfer to economy

Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss PbA

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Die Details des Vorgehens sowie die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend im PbA ausführlich diskutiert.	A1 1. PbA-Sitzung in Magdeburg	23.05.'18
	A2 2. PbA-Sitzung in Magdeburg	27.11.'18
	A3 3. PbA-Sitzung in Magdeburg	18.06.'19
	A4 4. PbA-Sitzung in Magdeburg	04.02.'20
	A5 5. PbA-Sitzung Online	21.10.'20

Maßnahme B: Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PbA

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstellen zu einer Vielzahl von Unternehmen, Behörden und Planungsbüros.	B1 Einstellung der Projektkurzfassung und Ansprechpartner in das Forschungsportal Sachsen-Anhalt (http://www.forschung-sachsen-anhalt.de)	seit 06.2018
	B2 Jahresbericht auf der Homepage der Forschungseinrichtung (www.iwf.ovgu.de)	seit 12.2019

Maßnahme C: Publikation der Ergebnisse durch Veröffentlichungen in Zeitschriften

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	C1 Veröffentlichung in Fachzeitschrift „Welding in the World“	Online: 12. 2019, Gedruckt 02.2020
	C2 Veröffentlichung in Fachzeitschrift „Journal of Materials Processing Technology“	Online: 03. 2020, Gedruckt 08.2020

Maßnahme D: Publikation der Ergebnisse auf Tagungen und Kongressen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	D1 Präsentation der Ergebnisse auf dem 39. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik, Eupen, Belgien	09. 2018
	D2 Präsentation der Ergebnisse auf dem 8. Fügetechnischen Gemeinschaftskolloquium 2018 „Gemeinsame Forschung in der Mechanischen Füge-technik“, Paderborn	12. 2018
	D3 Präsentation der Ergebnisse im Rahmen der IIW-Commission C III auf der 72th IIW Annual Assembly, Bratislava, Slovakia	07.2019
	D4 Präsentation der Ergebnisse auf der 1st International Conference on Advanced Joining Processes 2019	
	D5 Präsentation der Ergebnisse auf der Große Schweißtechnische Tagung (GST) und DVS-Congress 2020, Online	10.2019

Maßnahme E: Publikation der Ergebnisse auf der Projekthomepage

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	E1 Einstellung der Projektkurzfassung, Präsentationen und weitere Unterlagen (http://www.forschung-sachsen-anhalt.de)	seit 06.2018
--	---	--------------

Maßnahme F: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Die Otto-von-Guericke-Universität bildet Ingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Masterarbeiten im Verlauf des Projektes erstellt.	F1: Masterarbeit: - „Zerstörungsfreie Prüfung von Widerstandelementschweißverbindungen“	SS 19
	F2: Masterarbeit: - „Analyse der Verbindungsausbildung beim Kurzzeitschweißen von Stahl und Aluminium mit Zusatzelementen“	WS 19/20
	F3: Masterprojektarbeit: - „Konstruktion und Erproben einer Zusatzelementfördereinrichtung für RP-Schweißen mit Zusatzelementen“	WS19/20 WS 20/21

Maßnahmen (G) Nutzung und Industrialisierung der Projektergebnisse

Bereitstellung der Ergebnisse an die Industriepartner, die die Ergebnisse zur Verbesserung Ihrer Produkte nutzen können	G1 Weitergabe der Ergebnisse im Rahmen von PA Treffen	seit 11.2018
---	--	--------------

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme A: Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PbA

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstellen zu einer Vielzahl von Unternehmen, Behörden und Planungsbüros.	A1 Ausgabe des Abschlussberichtes an interessierte Unternehmen, die im Bereich der Forschungsschwerpunkte tätig sind.	ab 12.2020
---	--	------------

Maßnahme B: Publikation der Ergebnisse auf der Projekthomepage

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	B1 Information über Ende des Forschungsprojekts auf der Homepage und über das Forschungsportal Sachsen-Anhalt	ab 11.2020
---	--	------------

Maßnahme C: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Die Otto-von-Guericke-Universität bildet Ingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Masterarbeiten im Verlauf des Projektes erstellt.	C1 Dissertation zum Thema „Untersuchungen zur Herstellung von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen mittels thermischer Fügeverfahren“	nach 2020
---	---	-----------

Maßnahme D: Publikation der Ergebnisse auf Tagungen und Kongressen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	D1 Präsentation der Ergebnisse auf der Konferenz SCT2021	2021
---	---	------

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und
aktualisierten Transferkonzepts
Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten
Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry

Innovative Leichtbaukonzepte sind derzeit in vielen Industrieanwendungen wie z. B. der Luft- und Raumfahrt sowie der Nutzfahrzeug- und Automobilindustrie zu finden. Zunehmend werden auch die Potentiale aus dem Energiesektor, dem Maschinen- und Anlagenbau sowie dem Bauwesen erschlossen. In diesen Bereichen ist eine Vielzahl an kleinen und mittleren Unternehmen tätig, die sich mit innovativen Verbindungstechniken für verschiedene Mischverbindungen, z. B. aus Stahl und Aluminium auseinandersetzen. Mit dem im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelten Verfahren kann eine bestehende Anlagentechnik verwendet werden und es ist kein Umstieg z. B. auf die mechanische Füge-technik erforderlich. So können Investitionen in neue Anlagen und Mitarbeiterqualifikationen vermieden werden.

Der Einsatz eines Fügeelements erweitert das Anwendungsspektrum der Widerstandsschweißtechnologie und ermöglicht außerdem die Reduzierung der Schweißprozesszeiten mit gleichzeitiger Erreichung der angestrebten Verbindungseigenschaften. Dadurch bietet das Vorhaben ein hohes Innovationspotenzial für KMU zur Herstellung von bisher nur bedingt herstellbaren Werkstoffkombinationen mit sehr unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften.

Weiter profitiert vor allem der in Deutschland durch KMU geprägte Anlagen- und Vorrichtungsbau, der Systemlösungen wie z. B. die Automatisierung von Zuführeinrichtungen oder aber auch die Modifizierung der Widerstandsschweißtechnik liefert. Neben diesen KMU, die sich konkret mit der Technologie der Verbindungstechnik beschäftigen, also einen direkten Nutzen aus dem Forschungsvorhaben erzielen, werden auch KMU profitieren, die sich mit der Entwicklung und Umsetzung von neuen Multi-Material-Design- und Leichtbaukonzepten beschäftigen. Durch die neue Verbindungstechnik werden z. B. neue Freiheitsgrade bei der Gestaltung von lastgerechten Konstruktionen geschaffen.

Die Verbindungstechnik, vor allem zwischen artfremden Materialien, ist eine Schlüsseltechnologie für die Umsetzung von Leichtbaukonzepten in Mischbauweise. Mit der Herstellung hybrider Bauteilstrukturen mit kurzem Flansch aus höchstfestem Stahl und Aluminium wird eine sehr kostenattraktive Variante des Leichtbaus ermöglicht, da mit der Flanschverkürzung gleichzeitig Werkstoff und Gewicht eingespart werden kann.

Die Ergebnisse des Vorhabens sind insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen in der metallverarbeitenden Industrie relevant, die Mischbauweisen, insbesondere mit Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für Automobilbau-, Luftfahrtindustrie u. ä. realisieren müssen. Die Technologie basiert auf der Weiterentwicklung der weit verbreiteten Widerstandsschweißtechnik, wodurch der Nutzerkreis als groß einzuschätzen ist. Neben Verarbeitern der Stahlbleche (Teile- oder Produkthersteller, Automobilzulieferer) profitieren ebenso die Hersteller von Schweißanlagen, meist ebenfalls KMU.

Für die neuartige Füge-technologie soll eine handelsübliche Anlagentechnik genutzt bzw. angepasst werden. So können auf bestehenden Anlagen, ohne große Investitionen in Technik und Ausbildung der Mitarbeiter, neue Produkte gefertigt werden. Es können auf einer

Fertigungslinie mit bereits vorhandenen Fügeeinrichtungen (RP-Anlagen) flexibel sowohl Stahl-Stahl-Verbindungen (konventionelles Widerstandspunktschweißen) als auch Stahl-Aluminium-Verbindungen gefertigt werden. Die Anlagentechnik kann dadurch eine höhere Auslastung erfahren, wodurch die Wirtschaftlichkeit gesteigert wird [1].

Die Ergebnisse können gemäß den Vorgaben zur Ergebniseinschätzung in den Fachgebieten Fertigungstechnik (MB), Leichtbau (KC), Produktionstechnologien (MA) sowie Fahrzeug- und Verkehrstechnologien (HA) von Bedeutung sein. Die Wirtschaftszweige, in denen die Technologie genutzt werden kann, setzen sich aus Metallerzeugung und -bearbeitung (24), Maschinenbau (28), Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen (29) sowie sonstiger Fahrzeugbau (30) zusammen.

Inhaltsverzeichnis Content

1	Einleitung / Introduction	1
1.1	Problemstellung / Problem definition	1
1.2	Motivation / Motivation	3
1.3	Zielsetzung / Objective.....	3
1.4	Lösungsansatz / Solution approach	4
2	Stand der Technik / State of the art.....	6
2.1	Grundlagen zum Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen/ Basics of steel-aluminum joining technologies	6
2.2	Bildung intermetallischer Phasen / Formation of intermetallic phases.....	11
3	Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments	13
3.1	Versuchsplan / Experimental Approach.....	13
3.2	Verwendete Werkstoffe und Anlagentechnik / Test materials and experimental equipment	19
3.2.1	Materialcharakterisierung / Material characterisation	19
3.2.2	Probengeometrien und Probenvorbereitung/ Specimen geometries and preparation	23
3.2.3	Anlagentechnik zum Fügen / Welding system	25
3.2.4	Prüftechnik zur werkstofflichen Charakterisierung/ Testing equipment for material characterization	26
4	Ergebnisse Results	27
4.1	Herstellung von Schweißproben mit einem Schweißpunkt/ Joints with one insert element	27
4.1.1	Prozessablauf des neuen Fügeprozesses / Procedure of the new joining process.....	27
4.1.2	Parameterfenster für die DE-Applikation und Auswahl der Werkstoffe für die Drahtelemente / Welding parameters for insert element application and selection of materials for insert elements	28
4.1.3	Kriterien zur Bestimmung der Q-Grenzen für die Applikation der Drahtelemente und die Gesamtverbindung/ Criteria for the boundary definition for application of the insert elements and the steel-aluminum joints.....	32
4.1.4	Bestimmung der Q-Grenzen für DE-Applikation und die Gesamtverbindung / Welding parameters for insert element application and steel-aluminum joints	34
4.2	Analyse der Verbindungsausbildung / analysis of bonded zones	35
4.2.1	Geometrie der Verbindungzone / Geometry of bonded zones.....	35

4.2.2	REM-Analysen der Verbindungszonen / SEM analysis of bonded zones	36
4.2.3	Wärmeeintrag in das Stahlblech / Heat input into the steel sheet.....	38
4.3	Herstellung der Mehrpunktverbindungen / Manufacturing of joints with several insert elements.....	40
4.3.1	Schweißbereichsdiagramme für St-Al- Mehrpunktverbindungen / Welding current ranges for joints with several insert elements.....	40
4.3.2	Vorschläge für optimale Abstände zwischen den Schweißpunkten/ Suggestions for optimal distance between insert elements.....	41
4.3.3	Herstellung der Mehrpunktverbindungen mit Klebstoffschicht / Manufacturing of joints with several insert elements with adhesive layer.....	42
4.3.4	Ermittlung der Spaltgeometrie / Determination of the gap geometry	42
4.3.5	Herstellung der 3-Blech-Verbindungen / Manufacturing of three sheet joints	43
4.4	Festigkeitsversuche / Investigations of joint strength	43
4.4.1	Verbindungsfestigkeit für Verbindungen mit einem Schweißpunkt ohne Klebstoff / Joint strength for joints with one insert element without adhesive	43
4.4.2	Verbindungsfestigkeit für Verbindungen mit einem Schweißpunkt mit Klebstoff und Vergleich mit Nietverbindungen/ Joint strength for joints with one insert element with adhesive and comparing with riveted joints.....	45
4.4.3	Analyse der Bruchfläche und Zusammenhänge zwischen Bruchfläche und Verbindungsfestigkeit / Analysis of the fracture surface and the correlation between fracture surface and joint strength.....	46
4.4.4	Durchführung des Korrosionsversuchs / Corrosion test.....	49
4.5	Automatisierungskonzepte für die Drahtelementapplikation und -identifikation / Automation concepts for insert element application and identification	50
4.5.1	Automatisierungskonzepte zur Drahtelementapplikation / Automation concepts for insert element application	50
4.5.2	Drahtelementidentifikation/ Identification of insert element	52
4.6	Ableitung optimaler Prozessfenster und der Anwendungsgrenzen/ Determination of the process limits	55
4.6.1	Bestimmung der zulässigen Längstoleranzen für Drahtelemente / Determination of the permissible length tolerances for insert elements.....	55
4.6.2	Bewertungskriterien für Widerstandsschweißverbindungen ohne übliche Schweißlinse / Evaluation criteria for joints without common welding nugget	56
4.6.3	Schweißungen mit der Anlagentechnik ohne magnetische Nachsetzeinheit / Investigations on the welding system without magnetic follow-up unit.....	57

4.7	Herstellung eines Musterbauteils mit realitätsnaher Geometrie/ Manufacturing of joints on structural component with realistic geometry	58
5	Zusammenfassung / Summary	60
6	Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project.....	63
7	Literaturverzeichnis / Bibliography	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gefügte Flanschverbindung aus Stahl und Aluminium an einer B-Säule	2
Abbildung 2: Ablauf der neuartigen Füge-technologie basierend auf dem Widerstandsschweißen	5
Abbildung 3: Zuführungsvariante des Drahtelements für die neuartige Füge-technologie	5
Abbildung 4: Verfahrensablauf des Widerstandselementschweißens nach [22] (a) und des Ultraschall-Widerstandspunktschweißens mit dem Fügehilfselement, nach [20] (b)	7
Abbildung 5: Projektablaufplan	14
Abbildung 6: Technische Zeichnungen der verwendeten Schweißprobengeometrien	23
Abbildung 7: Verbindung mit einer Flanschlänge von 6 mm aluminiumseitig (links) und stahlseitig (rechts)	25
Abbildung 8: Schweißanlage (a) und Versuchsaufbau (b).....	25
Abbildung 9: Ablauf der neuartigen Füge-technologie basierend auf dem Widerstandsschweißen	27
Abbildung 10: Parameterfenster für die Drahtelementapplikation (PS I); mit Elektrodenkraft von 1 kN (a) und 2 kN (b).....	29
Abbildung 11: Bestimmung der Prozessgrenzen anhand der mechanischen Eigenschaften von Verbindungen nach Prozessschritt I (PS I) – a) untere Q-Grenze I_{min} Abscherversuch des Drahtelementes; b) obere Q-Grenze I_{max} anhand der Geometrie.....	29
Abbildung 12: Ergebnisse der Abscherversuche für die Proben, die im PS I mit I_{min} geschweißt sind	30
Abbildung 13: Deformation der Drahtelemente bei der DE-Applikation.....	31
Abbildung 14: Prozessmodell der neuartigen Widerstandsschweiß-technologie.....	32
Abbildung 15: Bestimmung der Prozessgrenzen anhand der mechanischen Eigenschaften von Verbindungen nach dem Prozessschritt II. a) unteren Q-Grenze mittels Scherzugversuch; b) obere Q-Grenze anhand der Geometrie	33
Abbildung 16: Schweißbereichsdiagramme für PS I (a) und PS II (b).....	34
Abbildung 17: Zuschnitt der Proben für die Schliffaufnahmen für PS I (a) und PS II (b)	35
Abbildung 18: Querschliffe der auf Aluminiumblech während des Prozessschrittes I aufgeschweißten Cu- und Fe-Basis-Drahtelemente mit 2 kN Elektrodenkraft und 10 ms Schweißzeit bei minimalem Schweißstrom (a, c) und maximalem Schweißstrom (b, d).....	35

Abbildung 19: Querschliffe nach dem Prozessschritt II, geschweißt mit Drahtelementen (DE) auf Cu- und Fe-Basis mit 4 kN Elektrodenkraft und 16 ms Schweißzeit mit (a, c, e, g) minimalem Schweißstrom I_{\min} und (b, d, f, h) mit maximalem Schweißstrom I_{\max} ; (a, b, e, f) wurden im ersten Prozessschritt mit I_{\min} und (c, d, g, h) mit I_{\max} geschweißt.	36
Abbildung 20: REM Aufnahme der Zone zwischen Aluminium und Drahtelement für Verbindungen mit Fe-Basis-DE, wobei die Verbindungen mit I_{\min} (a) bzw. mit I_{\max} (b) gefügt sind	37
Abbildung 21: Schliffbilder der Gesamtverbindungen mit Cu-Basis-DE mit dem entsprechenden REM-Aufnahmen und typischen Merkmalen für beide Drahtelementwerkstoffe, wobei die Verbindungen mit I_{\min} (a) bzw. mit I_{\max} (b) gefügt sind	37
Abbildung 22: Querschliffe der Verbindungen nach dem PS II (mit Nital-Ätzung) für Cu-Basis-Drahtelemente, gefügt mit Schweißstrom I_{\min} (a) und I_{\max} (b).....	38
Abbildung 23: Querschliffe der Verbindungen nach dem PS II (mit Nital-Ätzung) für Fe-Basis-Drahtelemente, gefügt mit Schweißstrom I_{\min} (a) und I_{\max} (b)	39
Abbildung 24: Maximale Zugbelastung (a) und Bruchenergie (b) für 22MnB5 bei einseitiger Belastung mit und ohne Drahtelemente (Cu-Basis und Fe-Basis)	39
Abbildung 25: Probengeometrie für die Mehrpunktverbindungen mit 40 mm Abstand zwischen Drahtelementen: Skizze (a), reale Probe nach PS I (b) und Probe nach PS II (c).....	40
Abbildung 26: Parameterfenster für die Mehrpunktverbindungen im Vergleich zu Einpunktverbindungen	41
Abbildung 27: Ergebnisse der Zugversuche für Mehrpunktproben mit variablen Abständen von 30 mm und 40 mm für Cu-Basis-DE (a) und für Fe-Basis-DE (b).....	41
Abbildung 28: Vermessung der Spaltgeometrie zwischen Drahtelementen (mittig) für Verbindungen mit drei DE	42
Abbildung 29: Spaltgeometrie der Verbindungen mit 40 mm Abstand für Cu-Basis-DE und Fe-Basis-DE	42
Abbildung 30: Ergebnisse der Scherzugversuche für die 3-Blech-Verbindungen.....	43
Abbildung 31: Scherzugfestigkeiten von Verbindungen mit Drahtelementen auf Cu- und Fe-Basis bei verschiedenen Parametervariation.	44
Abbildung 32: Die typischen Bruchflächen der Verbindungen mit Drahtelementen	44

Abbildung 33: Maximal ertragbare Kräfte der Verbindungen mit Cu-Basis- bzw. Fe-Basis-Drahtelementen (abhängig von der Stromhöhe I_{\min} bzw. I_{\max}) und der genieteten Proben ohne und mit Klebstoffeinsatz	45
Abbildung 34: Makroaufnahmen der Querschnitte der Proben mit einem DE geschweißt mit I_{\min} und I_{\max} (a) im Vergleich zum Nieten (b)	46
Abbildung 35: Element-Mapping für die Bruchfläche vom Typ 2 für Cu-Basis-Drahtelemente (aluminiumseitig).....	48
Abbildung 36: Element-Mapping für die Bruchfläche vom Typ 2 für Fe-Basis-Drahtelemente (aluminiumseitig).....	49
Abbildung 37: Darstellung der Probe für die Korrosionsversuche	49
Abbildung 38: Vorgekerbte Drähte auf Fe-Basis mit U-Kerbe und auf Cu-Basis mit 2U-Kerbe	51
Abbildung 39: Vergleich der Drähte für Konzept 1 und Konzept 2 in Bezug auf den verbleibenden Steg	52
Abbildung 40: Versuchsstand Wirbelstromprüfung	53
Abbildung 41: Bildschirmausschnitt der Auswertesoftware Afterscan während einer Wirbelstromprüfung an einer Widerstandselementverbindung mit Fügeelement	53
Abbildung 42: Formen der DE-Fehler schematisch (a) und Aufnahme nach der Wirbelstromprüfung (b)	54
Abbildung 43: Mehrpunktverbindung mit nicht verschweißtem Fe-Basis-DE und Winkelversatz; schematisch (a), X-Anteil (b) und Y-Anteil (c) mit 14 kHz Prüffrequenz und 39 dB Verstärkung	54
Abbildung 44: Gegenüberstellung der Wirbelstromprüfergebnisse zur Größenbestimmung: mittels AxioVision bearbeitetes und vermessenes Y-Bild (b) und Vergleichsuntersuchungen mittels Mikroskops (a).....	55
Abbildung 45: Abhängigkeit der Abscherkraft von der Länge des Elementes.....	56
Abbildung 46: Abscherkräfte der Verbindungen mit nur teilweise aufgeschweißtem Drahtelement	56
Abbildung 47: Bewertungskriterien für Verbindungen mit Drahtelementen.....	57
Abbildung 48: Servoelektrische Schweißzange der Firma Düring mit 1kHz MFDC Inverter und Genius Schweißsteuerung der Firma Harms & Wende.....	57
Abbildung 49: Ergebnisse der Scherzugversuche für die Verbindungen mit Cu-Basis- und Fe-Basis-Drahtelement sowie verwendete Schweißparameter	58

Abbildung 50: Querschliffe der Verbindungen nach dem PS II (mit Nital-Ätzung) für
Cu-Basis- (a) und Fe-Basis-Drahteil (b) 58

Abbildung 51: Musterbauteil mit realitätsnaher Geometrie 59

List of figures

Figure 1: Joined flange made of steel and aluminum on a B-pillar	2
Figure 2: Two stages of a hybrid projection welding process with the insert element: securing of element on aluminum sheet; application of adhesive, if required; and manufacturing of entire joint.....	5
Figure 3: Feeder device for the wire element for the novel joining technology	5
Figure 4: Resistance element welding process (a) and ultrasonic resistance spot welding with insert element (b).....	7
Figure 5: Project schedule	14
Figure 6: Technical Drawings of the sample geometries	23
Figure 7: The joint after stage II from aluminum side (left) and steel side (right) with the 6 mm flange length.....	25
Figure 8: Welding system (a) and test setup (b).....	25
Figure 9: Two stages of a hybrid projection welding process with the insert element: securing of element on aluminum sheet; application of adhesive, if required; and manufacturing of entire joint.....	27
Figure 10: Welding current ranges for the insert element application (PS I); with electrode force of 1 kN (a) and 2 kN (b)	29
Figure 11: Definition of lower (a) and upper (b) boundary of welding current ranges for PS I of the joining process.....	29
Figure 12: Maximum tensile loads for joints prepared with I_{min} on the PS I.....	30
Figure 13: Deformation of the insert elements during DE-application.....	31
Figure 14: Process model of the novel resistance welding technology.....	32
Figure 15: Determination of mechanical properties of joints for determination of lower (a) and upper (b) boundary of welding current ranges after processing stage II	33
Figure 16: Welding current ranges for stage I (a) and for stage II (b)	34
Figure 17: Preparation of spacement for metallographic examinations for PS I (a) and PS II (b)	35
Figure 18: Cross sections of Cu-based and Fe-based insert elements (IE) welded on aluminum sheet on the stage I with 2 kN welding force and 10 ms welding time with lower limit for welding current (I_{min}) (a, c) and upper limit for welding current (I_{max}) (b, d).....	35

Figure 19: Cross sections of joints after stage II welded with 4 kN welding force and 16 ms welding time with lower limit for welding current I_{min} (a, c, e, g) and upper limit for welding current I_{max} (b, d, f, h) by using Cu-based and Fe-based insert elements (IE) 36

Figure 20: SEM micrographs of bonded zones between IE and aluminum in joints with Fe-based IE, prepared with I_{min} (a) and I_{max} (b)..... 37

Figure 21: SEM micrographs of bonded zones between IE and aluminum in joints with Cu-based insert element welded with I_{min} (a) and I_{max} (b) 37

Figure 22: Cross sections of joints after stage II (nital-etched) welded with 4 kN welding force and 16 ms welding time with I_{min} (a) and I_{max} (b) for Cu-based IE..... 38

Figure 23: Cross sections of joints after stage II (nital-etched) welded with 4 kN welding force and 16 ms welding time with I_{min} (a) and I_{max} (b) for Fe-based IE 39

Figure 24: Maximum tensile load (a) and fracture energy (b) for 22MnB5 with one-sided loading with and without welds for two types of insert elements 39

Figure 25: Specimen geometry for joints with three insert elements with 40 mm distance between them; sketch (a), real sample after PS I (b) and sample after PS II (c)..... 40

Figure 26: Welding current ranges for joints with three insert elements for stage II..... 41

Figure 27: Tensile shear load for samples with three insert elements and variable distances 30 mm and 40 mm for Cu-based IE (a) and for Fe-based IE (b)..... 41

Figure 28: Measurement of the gap geometry between insert elements (in the middle) for joints with three IE 42

Figure 29: Gap geometry of the joints with 40 mm distance for Cu-based IE and Fe-based IE 42

Figure 30: Tensile shear load for three sheet joints with insert element 43

Figure 31: Tensile shear load of joints with insert element (Cu- and Fe-based)..... 44

Figure 32: Occurring failure modes by tensile shear load for welds with Cu-based and Fe-based IE and riveted joint..... 44

Figure 33: Tensile shear load of joints with insert element (Cu- and Fe- based) with and without additional adhesive layer and compared to riveting process with and without adhesive. 45

Figure 34: Cross sections of joints with adhesive bonding: with Fe-based IE and welded with I_{min} and I_{max} (a) and riveted steel-aluminum (b)..... 46

Figure 35: Element mapping for the fracture surface of type 2 for Cu-based insert element (aluminum side) 48

Figure 36: Element mapping for the fracture surface of type 2 for Fe-based insert element (aluminum side).....	49
Figure 37: Representation of the sample for the corrosion tests	49
Figure 38: Pre-notched Fe-based wires with U-notch and Cu-based wires with 2U-notch.....	51
Figure 39: Tensile load of the pre-notched wires for concept 1 and concept 2	52
Figure 40: Eddy current test setup.....	53
Figure 41: Screenshot of the software Afterscan during an eddy current testing on the joint with insert element.....	53
Figure 42: Forms of IE defects schematically (a) and picture after eddy current testing (b)	54
Figure 43: Joint with 4 IE with not welded Fe-based IE and angular offset; schematic (a), X-picture (b) and Y- picture (c) with test frequency 14 kHz and amplification 39 dB	54
Figure 44: Comparison of the eddy current test results for size determination of IE: Y image processed and measured using AxioVision (b) and the comparative tests using a microscope (a).....	55
Figure 45: Dependence of the shear force to the length of the insert element.....	56
Figure 46: Shear forces of the partially welded insert elements	56
Figure 47: Evaluation criteria for connections with insert elements.....	57
Figure 48: Servo-electric welding gun of the company Düring with 1kHz MFDC inverter and Genius welding control system of the company Harms & Wende	57
Figure 49: Tensile shear load of joints with insert element Cu- and Fe- based and the welding parameters	58
Figure 50: Cross sections of joints after stage II (nital-etched) for Cu-based (a) and Fe-based IE (b)	58
Figure 51: Joints on structural component with realistic geometry	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht zu bestehenden Fügeverfahren für Stahl-Aluminium-Verbindungen.....	7
Tabelle 2: Abgrenzung der neuen Technologie von bestehenden Patenten.....	9
Tabelle 3: Eigenschaften der intermetallischen Phasen des Typs Fe_xAl_y [3] [43].....	11
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzungen der Aluminiumbleche (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES)	20
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des 22MnB5 (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES).....	20
Tabelle 6: Mechanisch-technologische Eigenschaften des 22MnB5	20
Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung des HX220 (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES).....	21
Tabelle 8: Mechanisch-technologische Eigenschaften des HX220.....	21
Tabelle 9: Chemische Zusammensetzungen der Drahtelemente (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES).	21
Tabelle 10: Mechanisch-technologische Eigenschaften der Drähte.....	22
Tabelle 11: Technische Daten des Klebstoffes BETAMATE™ 1630 [46].....	22
Tabelle 12: Abmessungen der Probengeometrien.....	24
Tabelle 13: Übersicht der eingesetzten Prüftechnik zur Werkstoffcharakterisierung.....	26
Tabelle 14: Auswahl der Werkstoffe für die Drahtelemente.....	31
Tabelle 15: Vergleich zwischen Cu- und Fe-Basis-DE entsprechend der REM-Analysen	38
Tabelle 16: Typisches Bruchverhalten von Verbindungen mit Cu-Basis-Drahtelement	47
Tabelle 17: Typisches Bruchverhalten von Verbindungen mit Fe-Basis-Drahtelement.....	47
Tabelle 18: Zwei Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation	50
Tabelle 19: Vergleich der zwei Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation	51

List of tables

Table 1: Overview of existing joining processes for steel-aluminum connections.....	7
Table 2: Differentiation of the new technology from existing patents	9
Table 3: Properties of the intermetallic phases of the Fe_xAl_y type.....	11
Table 4: Chemical compositions of the aluminium sheets (in wt.-%) according to own analyses (OES).....	20
Table 5: Chemical composition of 22MnB5 (in wt.-%) according to own analyses (OES).....	20
Table 6: Mechanical-technological properties of 22MnB5.....	20
Table 7: Chemical composition of HX220 (in wt.- %) according to own analyses (OES).	21
Table 8: Mechanical-technological properties of HX220	21
Table 9: Chemical compositions of the wire elements (in wt.-%) according to own analyses (OES).	21
Table 10: Mechanical-technological properties of the welding wires	22
Table 11: Technical data of the adhesive BETAMATE™ 1630 [46].....	22
Table 12: Dimensions of the sample geometries	24
Table 13: Overview of the testing equipment used for material characterization	26
Table 14: Selection of materials for insert elements	31
Table 15: Comparison between Cu-based and Fe-based IE based on SEM analyses.....	38
Table 16: Typical fractured surfaces for joints with Cu-based IE	47
Table 17: Typical fractured surfaces for joints with Fe based IE	47
Table 18: Two automation concepts for element application	50
Table 19: Comparison of the two automation concepts for element application.....	51

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

DE/ IE	Drahtelement / insert element (englisch)
REM/ SEM	Rasterelektronenmikroskop/ scanning electron microscope (englisch)

1 Einleitung / Introduction

1.1 Problemstellung / Problem definition

Heutzutage steht die Entwicklung der Leichtbaukonzepte mit einem Einsatz von Mischbauweisen im Automobilbau im Vordergrund. Als Folge werden bei der Entwicklung von modernen Kraftfahrzeugen leichtere Konstruktionen im Karosseriebau immer wichtiger.

Die Entwicklung der Leichtbaukonzepte im Automobilbau erfordert das Fügen von Mischbauweisen. Die Kombinationen von unterschiedlichsten Materialpaarungen ermöglichen vielfältige Karosseriestrukturen, wobei der Materialmix aus hochfestem Stahl und Aluminium von besonderem Interesse ist und hohes Leichtbaupotential zu geringen Kosten offeriert. Aluminium-Legierungen finden insbesondere für großflächige Außenhautteile zunehmende Anwendung. Hochfester Stahl ist für die Massenfertigung im Automobilbau kostengünstig und aufgrund seines hohen Elastizitätsmoduls sowie der ausgezeichneten Verarbeitungseigenschaften von zunehmender Wichtigkeit [2, 3]. Unter anderem führen Leichtbaukonzepte im Anbauteilbereich (Türen und Klappen) zukünftig zu einer Reduzierung der Blechdicken sowie in der Gesamtkarosserie zu einem vermehrten Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe in Mischbauweise [4].

Der Einsatz von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen im Fahrzeugbau erlaubt es, trotz steigender Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit und den Insassenkomfort, die Karosserie leichter zu machen, und dennoch eine hohe Steifigkeit beizubehalten. So lassen sich die zukünftigen Emissionsziele zu geringeren Kosten als bei klassischen Aluminium-Leichtbaustrukturen erreichen [5].

Aufgrund sehr unterschiedlicher chemischer und physikalischer Eigenschaften stehen für das Fügen von hochfesten Stahlblechen mit Aluminiumblechen jedoch nur eingeschränkt Fügeverfahren zur Verfügung. Die Schwierigkeiten beim Schweißen von Stahl mit Aluminium liegen in den sehr unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften wie Schmelztemperatur, Dichte, Wärmeausdehnung, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit. Außerdem kommt es zur Bildung von sehr harten und spröden intermetallischen Phasen und damit zu technisch begrenzt einsetzbaren Verbindungen [6, 7]. Die Entstehung und Morphologie der intermetallischen Phasen ist auf die begrenzte Löslichkeit von Eisen (Fe) in Aluminium (Al) zurückzuführen und in [8] hinreichend geklärt und beschrieben. Nach [9] sind diese Phasen üblicherweise eine Schwachstelle der Fügezone.

Da der Einsatz der neuen Materialien neben den Werkstoffkosten auch immer von ihrer Verarbeitbarkeit und der Prozesstechnik abhängt, setzen die Automobilhersteller auf eine geschickte Kombination aus neuen Werkstofftechnologien, neuen Fertigungstechnologien und neuen Bauweisen [10].

Durch den zunehmenden Einsatz von hochfesten und höchstfesten Stählen für Verstärkungsbauteile, beispielsweise in A-Säulen und B-Säulen und deren Kombination mit Leichtmetallen wird das Fügen derartiger Strukturen immer wichtiger.

Die häufigste Anwendung finden solche Materialkombinationen in der modernen Karosseriefertigung bei möglichst kurzen Flanschverbindungen, die auch in diesem Projekt

betrachtet werden. Diese werden mit dem Ziel der Steifigkeitserhöhung, Erhöhung der Crash- und Schwingfestigkeit sowie der Geräusch- und Vibrationsreduktion häufig zusätzlich geklebt. Da der Klebstoff thermisch ausgehärtet werden muss, besteht die Gefahr, dass aufgrund unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften die Blechteile während der Aushärtung zueinander verschoben werden ($\Delta\alpha$ -Problematik) [1, 11]. Diese Relativverschiebung zwischen den Bauteilen erzeugt eine Gleitbeanspruchung der Klebeverbindung bzw. Spaltbildung, wodurch die Festigkeitseigenschaften und die Alterungsbeständigkeit der verwendeten Strukturklebstoffe reduziert werden [12, 13]. Bei größeren Bauteilen, wie zum Beispiel ein in eine Stahlstruktur geklebtes Aluminiumdach, treten infolge der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten während des KTL-Trocknungsprozesses so hohe Spannungen auf, dass es zur Schädigung der Klebeverbindung während des Fertigungsprozesses kommen kann [4]. Aus diesem Grund ist eine Bauteilfixierung bis zur Aushärtung des Klebstoffs erforderlich.

Die bisher in der Automobilindustrie eingesetzten mechanischen Fügeverfahren wie z. B. das Halbhohlstanznieten eignen sich besonders für das Fügen von Aluminiumwerkstoffen, Mehrblechverbindungen sowie zum Fügen artverschiedener Werkstoffe. Allerdings können mechanische Verfahren wie das Stanznieten, Nageln, Schrauben und Clinchen bei den höchstfesten pressgehärteten Stählen und bei den Werkstoffkombinationen mit einer Festigkeit von > 1000 MPa nicht mehr kostenattraktiv eingesetzt werden [1]. Konventionelle Schweiß- und Lötprozesse wirken sich vielfach negativ auf die Grundwerkstoffeigenschaften und Verbindungseigenschaften aus. Der Einsatz von mechanischen Fügeverfahren wie etwa Schraub-, Niet-, oder Bolzenverbindungen schränken den Gestaltungsprozess ein und führen häufig zu überdimensionierten Schnittstellen, d.h. langen Flanschlängen und damit verbunden zur Zunahme von Masse und Kosten [14]. Abbildung 1 zeigt den bisherigen Einsatz von mechanischen Fügeverfahren bei der geometrisch entkoppelten Schnittstelle von einer Stahl-Aluminium-Flanschverbindung im Audi TT (Stand der Technik) sowie die im Projekt angestrebte direkte Verbindung zwischen hochfestem Stahl und Aluminium mit extrem verkürzter Flanschlänge. Die Verwendung von Nieten erfordert eine Mindestflanschlänge von 16 mm, wodurch sich das Gewicht der Fügeile unnötig erhöht.

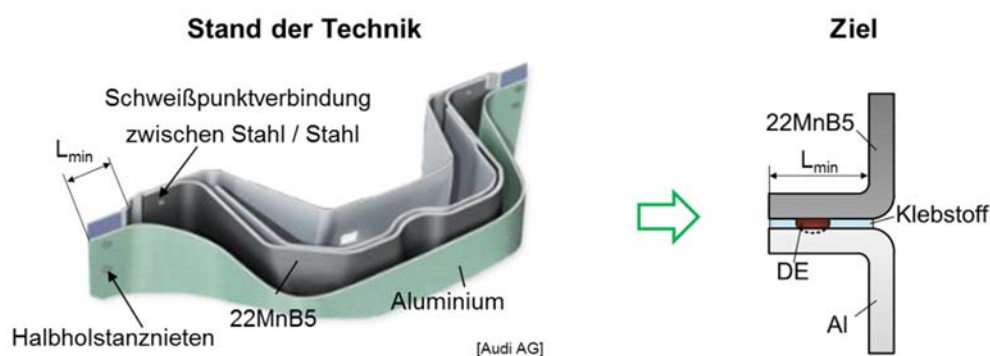


Abbildung 1: Gefügte Flanschverbindung aus Stahl und Aluminium an einer B-Säule

Figure 1: Joined flange made of steel and aluminum on a B-pillar

Die Verwendung von Hybridfügeverfahren als Kombination von Kleben und mechanischen Fügeverfahren, zum Beispiel beim Audi TT [15] oder BMW 5er [16], ist in Außenhautanwendungen aufgrund der auftretenden Verformungen durch den Nietsetzprozess und die sichtbaren Fügeelemente nicht ohne optische Nachteile möglich. Um die

Bauteilsteifigkeit des Aluminiumdaches zu erreichen und die auftretenden Verzüge zu minimieren müssen beim Mitsubishi Outlander [17, 18] oder beispielweise beim Jaguar Land Rover Range Rover Evoque [19] zusätzliche Sicken und Dachquerträger eingebracht werden. Zudem sind sichtbare mechanische Fügeelemente mit Durchtrennung des Außenhautblechs erforderlich, so dass diese durch zusätzliche Dachleisten verdeckt werden müssen [4].

1.2 Motivation / Motivation

Eine innovative hybride Füge-technologie für Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium, die sich im Karosseriebau bereits stark etabliert haben und deren Anzahl in der Zukunft noch zunehmen wird, bietet viele Vorteile.

Die Widerstandsschweißtechnik wird für die Blechverarbeitung aufgrund der guten Automatisierbarkeit oft im Automobil- und Nutzfahrzeugbau und der Zuliefererindustrie für die Verbindung von metallischen Strukturen zur Anwendung gebracht. Durch die Weiterentwicklung des konventionellen Widerstandspunktschweißens kann die Wertigkeit der Verbindungen bezüglich der Anwendungen bei hoch- und höchstfesten Stählen deutlich gesteigert werden.

Durch den Einsatz eines kostengünstigen Fügeelements aus Draht, kann eine Minimierung des Randabstandes in Flanschverbindungen erzielt werden, was zu minimalen Flanschlängen und so zur Gewichtsreduzierung führt. Außerdem wird die Prozesszeit für die Erzeugung von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen durch den Einsatz des Kurzzeit- bzw. Buckelschweißens im Gegensatz zu vergleichbaren Füge-technologien deutlich verkürzt.

1.3 Zielsetzung / Objective

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Schaffung einer schnellen, sicheren und reproduzierbaren Füge-technologie zur Herstellung von Stahl-Aluminium-Verbindungen an einem kurzen Flansch (< 10 mm). Durch eine extrem kurze Schweißzeit (< 30 ms) soll die Entstehung von spröden intermetallischen Phasen vermieden bzw. minimiert werden. Zusätzlich soll eine Klebverbindung ermöglicht werden, ohne dass es zum Abbrand von Klebstoff kommt. Zu berücksichtigen sind die automobilbauspezifischen Randbedingungen hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, Automatisierung und Prozesskette im Speziellen der KTL sowie der damit verbundenen $\Delta\alpha$ -Problematik. Hierzu wird ein Kurzzeit-Widerstandsschweißprozess eingesetzt, mit dem die Verbindung in Millisekunden hergestellt wird und keine Bildung von Schweißlinsen zu erwarten ist. Die besondere Herausforderung liegt hierbei in den hohen mechanischen Belastungen der Fügestelle an realen Bauteilen durch gegenseitige Beeinflussung der Fügstellen speziell im Lackprozess. Hierzu sind geeignete Prüfkörper (Mehrpunktproben) zu realisieren, die diese Beanspruchung realitätsnah nachstellen. Weiter muss eine geeignete Methode zur Identifikation der äußerlich unsichtbaren Fügestelle erprobt werden, die bei automatisierten Schweißprozessen anwendbar ist.

Zur Bewertung der Eigenschaften soll das Stanznieten als Referenzverfahren betrachtet werden. Hier bestehen eingehende Erfahrungen an der Forschungseinrichtung durch weitere Projekte.

Trotz der bereits vorhandenen Lösungen besteht nach wie vor der Bedarf an einer neuartigen Füge-technologie, mit der eine Verbindung aus höchstfestem Stahl und Aluminium an möglichst

kurzen Flanschverbindungen herstellbar wird, ohne dass Bauteile sowie der Klebstoff maßgeblich thermisch oder mechanisch beeinträchtigt werden.

Dabei sind die folgenden Anforderungen an die neue Technologie zu berücksichtigen:

- Die neue Technologie muss für das Schweißen von höchstfesten formgehärteten Bauteilen aus 22MnB5 mit unterschiedlichen Schichtsystemen mit Blechdicken bis 3,0 mm geeignet sein.
- Die Fügestelle soll äußerlich nicht sichtbar sein. Weder ein Kopf noch ein Fußüberstand wie beim Stanznieten wird sichtbar.
- Es ist eine dichte Verbindung zu gewährleisten, ohne Durchtrennung der Füge-teile.
- Die Flanschlänge ist zu minimieren (< 10 mm).
- Der Wärmeeintrag muss den Einsatz von Klebstoff erlauben, ohne den Klebstoff während oder nach dem Fügen zu schädigen.
- Die Technologie soll auf bestehender Anlagentechnik basieren und auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) leicht anwendbar sein.
- Es müssen günstige Fügeelemente verwendet werden, d.h. die Elemente müssen ohne aufwendige Präparation hergestellt und vorbereitet werden.

1.4 Lösungsansatz / Solution approach

Die neuartige Füge-technologie basiert auf einem zweistufigen Widerstandsschweißprozess. Bei der ersten Prozessstufe wird ein Drahtelement aus Stahl auf dem Aluminiumblech fixiert. Das so vorbereitete Al-Bauteil wird dann mit einem pressgehärteten Stahlblech in einer zweiten Prozessstufe widerstandspunktgeschweißt. Der zweistufige Ablauf des Verfahrens und die so erzeugte Stahl-Aluminium-Flanschverbindung können Abbildung 2 entnommen werden.

Zur Herstellung einer qualitätssicheren Flanschverbindung aus Stahl und Aluminium wird ein möglichst kurzer und geringer Wärmeeintrag angestrebt. Da das Zusatzelement, wie beim Widerstandsbuckelschweißen den Strompfad bestimmt, ist durch Minimierung der Kontaktfläche eine deutlich kürzere Schweißprozesszeit (< 30 ms) zur Erzeugung der Verbindung möglich. Bei der zweistufigen Füge-technologie wird beim Fixieren des Drahtelements auf dem Aluminiumblech – Fügestelle 1, eine minimale Deformation des drahtförmigen Fügeelementes angestrebt. Als Folge soll beim zweiten Prozessschritt (Fügestelle 2) die Kontaktfläche zwischen dem drahtförmigen Fügeelement und dem Stahlblech eine Linie darstellen. Zu berücksichtigen ist hier, dass aufgrund der extrem kurzen Schweißzeit keine Entstehung einer Schweißlinse zu beobachten ist, die üblicherweise zur Erfassung von Schweißbereichsdiagrammen benötigt wird. Dadurch ist es wichtig, geeignete Qualitätskriterien für solche Schweißverbindungen analog zum Mindestlinsendurchmesser abzuleiten (vgl. AP2).

Im Gegensatz zu bestehenden Verfahren, die in der Tabelle 1 aufgelistet sind, weist die neue Technologie folgende Merkmale bzw. Vorteile auf:

- gute Eignung für das Schweißen höchstfester Stähle wie 22MnB5 (unbeschichtet; mit AlSi; ZnFe-Schicht) in unbegrenzter Blechdicke mit Aluminium;
- die Verwendung eines sehr einfachen, günstigen und geometrisch bzw. werkstofflich flexibel anpassbaren Fügeelementes (z. B. üblicher Schweißdraht);
- durch die Größe und Geometrie des Fügeelementes wird eine minimale Kontaktfläche beim Schweißen erreicht (Buckelschweißen). So können die Schweißzeit und die Flanschlänge extrem verkürzt werden;

- durch extrem kurze Schweißzeit (< 30 ms), entsteht kein signifikanter Wärmeeintrag beim Widerstandspunktschweißen und der Klebstoff wird nicht beschädigt. Die intermetallischen Phasen bilden nur eine sehr dünne Schicht und ermöglichen eine mechanisch tragfähige Verbindung;
- die Verwendung marktüblicher Widerstandsschweißanlagen ist möglich;
- geringere Korrosionsanfälligkeit, da das Deckblech nicht durchgeschnitten wird. Vorhandener Klebstoff wird nicht geschädigt und der Spalt bleibt dicht;
- die Verbindung ist äußerlich nicht zu erkennen, sowohl von Stahl- als auch von Aluminiumseite.

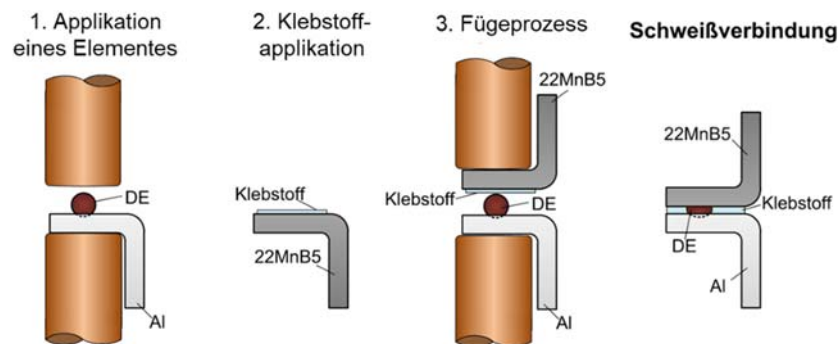


Abbildung 2: Ablauf der neuartigen Füge-technologie basierend auf dem Widerstandsschweißen

Figure 2: Two stages of a hybrid projection welding process with the insert element: securing of element on aluminum sheet; application of adhesive, if required; and manufacturing of entire joint

Zur Zuführung des Zusatzelementes in Form eines Schweißdrahtabschnittes kann eine Drahtfördereinrichtung ähnlich der MAG-Schweißanlage verwendet werden, mit der eine präzise Zuführung des Elementes erreicht werden kann (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Zuführungsvariante des Drahtelementes für die neuartige Füge-technologie

Figure 3: Feeder device for the wire element for the novel joining technology

Dabei verschweißt eine industrieeübliche Punktschweißmaschine den Draht auf dem Al-Blech mit einem kurzen Stromimpuls. Durch gleichzeitige Rückwärtsbewegung des Drahtfördermotors wird ein Drahtstück mit definierter Länge abgetrennt und auf dem Al-Blech transport sicher befestigt. Diese Schritte wiederholen sich für alle aufgeschweißten Elemente. Die Komplexität des Systems ist vergleichbar mit einer Stanznieteinrichtung mit Nietzufuhr.

2 Stand der Technik / State of the art

Kurzfassung

Der Stand der Technik bietet einen Überblick über Herausforderungen beim Schweißen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen und die zurzeit existierenden Lösungen. Zahlreiche und vielversprechende Möglichkeiten liefern hybride Fügeverfahren mit Zusatzelementen. Es wurde eine Patentrecherche durchgeführt.

Abstract

State of the art provides an overview of the difficulties encountered by welding steel-aluminum composite joints and the solutions that currently exist. Hybrid joining processes with additional elements provide numerous and promising possibilities. A patent search was carried out.

2.1 Grundlagen zum Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen/ Basics of steel-aluminum joining technologies

Das Widerstandspunktschweißen stellt aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit für Fahrzeugstrukturen aus Stahl im Karosseriebau das am häufigsten eingesetzte Verfahren dar und bietet eine Reihe von technologischen und wirtschaftlichen Vorteilen [1]. Im Falle der Mischverbindungen zwischen pressgehärteten Stählen und Aluminium haben sich bisher Kombinationsverfahren aus mechanischen und thermischen Fügen etabliert, die mit einem zusätzlichen Fügeelement arbeiten, z. B. das Widerstandselementschweißen (WES), sowie Reibelement-Widerstandspunktschweißen und Ultraschall-Widerstandspunktschweißen [2, 20]. Zwar sind einige Lösungswege mit diesen Verfahren entwickelt worden, sie haben jedoch viele Nachteile, die in [3, 6] beschrieben sind.

Das Fügen von formgehärtetem Stahl mit Aluminiumblechen ist durch konventionelles Widerstandspunktschweißen ohne zusätzliche Bearbeitung nicht möglich. Eine Möglichkeit zum Verbinden dieser Materialkombination bietet das Widerstandselementschweißen (WES). Das WES gehört zu den thermisch-mechanischen Fügeverfahren und ermöglicht das Verbinden zweier ungleichartiger Werkstoffe. Der Hauptunterschied dieses Verfahrens zum klassischen Widerstandspunktschweißen besteht darin, dass zusätzlich ein nietähnliches Element (sogenanntes Fügehilfselement) zum Einsatz kommt. Das Element wird üblicherweise aus einem artgleichen Werkstoff wie das Basisblech gewählt, um die schweißmetallurgische Verträglichkeit zu gewährleisten. Beim WES wird das Element zunächst in das zu fügende Blech mechanisch eingepreßt und anschließend mithilfe konventioneller Widerstandspunktschweißtechnik stoffschlüssig verbunden [20], siehe Abbildung 4 a.

Eine weitere Variante zum Aufbringen der Fügehilfselemente ist das Ultraschallschweißen. Hierbei wird ein Metallplättchen (Fügehilfselement) auf ein Blech mit Hilfe der Ultraschalltechnik geschweißt. Anschließend erfolgt, analog zum WES, das konventionelle Widerstandsschweißen [20], siehe Abbildung 4 b. Während des Ultraschallschweißens werden

die Werkstoffe nicht aufgeschmolzen. Als Folge treten keine Kornvergrößerungen, Schweißspannungen oder intermetallischen Phasen auf [21].

Wie schon erwähnt, kommt bei derartigen Verbindungen häufig Klebstoff zum Einsatz. Eine Kombination aus Punktschweißen und Kleben wird Widerstandskleben genannt und als hybrides Fügeverfahren klassifiziert. Der Schweißpunkt wird durch den vorher aufgetragenen Klebstoff hindurch gesetzt. Dabei befindet sich der Klebstoff in noch nicht ausgehärtetem Zustand, das Abbinden des Klebstoffs erfolgt während der kathodischen Tauchlackierung.

Die Verbindungssteifigkeit der punktgeschweißten Verbindungen wird durch eine zusätzliche Verklebung erhöht und der Schweißpunkt wird bei schwingender oder schlagartiger Beanspruchung entlastet. Als Folge wird eine höhere Belastbarkeit als bei reinen Punktschweißverbindungen erreicht [16]. Das Besondere beim Punktschweißkleben ist, dass die Tragfähigkeit der Verbindungen mit größeren Schweißpunkten sinkt, während beim klassischen Widerstandspunktschweißen das Tragverhalten durch größere Schweißpunkte zunimmt. Ursache dafür ist, dass bei großen Schweißpunkten die eingebrachte Schweißwärme größere Klebstoffmengen zersetzt.

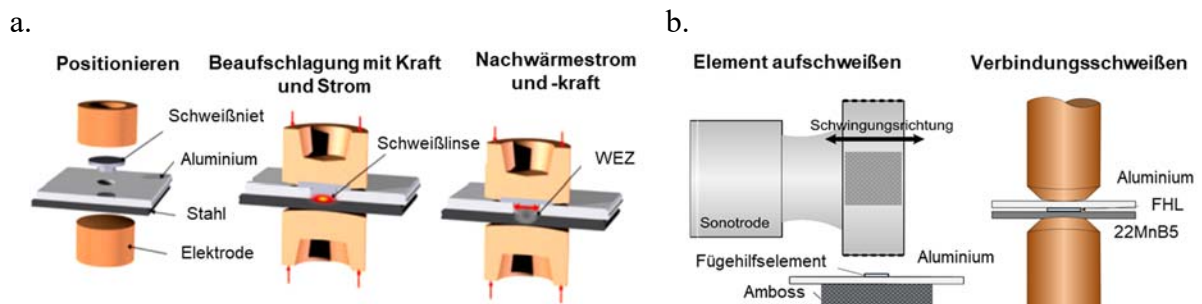


Abbildung 4: Verfahrensablauf des Widerstandselementschweißens nach [22] (a) und des Ultraschall-Widerstandspunktschweißens mit dem Fügehilfselement, nach [20] (b)

Figure 4: Resistance element welding process (a) and ultrasonic resistance spot welding with insert element (b)

In der Tabelle 1 sind die Verfahren aufgelistet, die zum Stand der Technik gehören und ihre Nachteile in Bezug auf die Anforderungen an die neue Technologie.

Tabelle 1: Übersicht zu bestehenden Fügeverfahren für Stahl-Aluminium-Verbindungen

Table 1: Overview of existing joining processes for steel-aluminum connections

Methode mit Vorgehensweise	Nachteile in Bezug auf die Anforderungen an die neue Technologie
<p>Mechanisches Fügen (z. B. Stanznieten, Vollstanznieten mittels Vollstanznietelementen [23, 24] usw.):</p> <p>Beim Stanznieten werden die zu verbindenden Teile ohne Vorloch mittels Nietelement verbunden. Die Niete sind hinsichtlich des Werkstoffs, der Geometrie und der Oberfläche speziell auf die Anwendung angepasst.</p>	<p>kostenintensive Fügeelemente erforderlich;</p> <p>für formgehärtete Stähle nur begrenzt einsetzbar;</p> <p>große Fügekräfte deformieren den Fügebereich;</p> <p>starker Werkzeugverschleiß bei hochfesten Stählen;</p> <p>sichtbares Element mit Blechdurchdringung;</p> <p>größere Flanschlänge (> 16 mm) ist nötig;</p>

	<p>korrosionsanfällige Spaltbildung im Durchdringungsbereich zwischen Elementkopf und Deckblech</p>
<p>WES mit Vorkonfektionierung [1, 6, 25, 26]: Beim Widerstandselementschweißen mit Vorkonfektionierung wird als erstes ein Hilfsfügeelement in das Aluminium-Blech gestanzt und danach die vorkonfektionierte Komponente durch konventionelles Widerstandspunktschweißen mit Stahl stoffschlüssig verbunden [6].</p>	<p>kostenintensive Fügeelemente erforderlich; zwei Fügetechnologien und zwei Anlagen erforderlich; größere Flanschlänge (> 16 mm) ist nötig; empfindlich auf Positions- und Lageabweichungen, exakte Positionierung erforderlich; korrosionsanfällige Spaltbildung im Durchdringungsbereich zwischen Elementkopf und Deckblech; durch hohen Wärmeeintrag beim Widerstandspunktschweißen wird Klebstoff verbrannt und dadurch weniger effektiv; unerwünschte Härtegradienten in der Wärmeeinflusszone [3]</p>
<p>Kombiniertes Ultraschall- und Widerstandsschweißen [27]: Füge-technologie für das Verbinden ungleichartiger Werkstoffe mit Fügeelement in Form von runden Plättchen. Wie 2) Verwendung von zwei nacheinander ausgeführten Verfahren. Zunächst wird ein Fügeelement durch Ultraschallschweißen mit dem Aluminiumblech verbunden. Danach erfolgt das Fügen dieses Verbundes mit einem Stahlblech durch das konventionelle Widerstandsschweißen.</p>	<p>zusätzliche geometrisch ungünstige Fügeelemente erforderlich; zwei separate Schweißanlagen erforderlich; größere Flanschlänge ist nötig; starker Verschleiß der Arbeitsfläche der Sonotrode; hoher Wärmeeintrag beim konventionellen Widerstandspunktschweißen führt zu Verbrennungen des Klebstoffs; Entstehung von intermetallischen Phasen</p>
<p>Elementreibschweißen [28]: Einstufiger Prozess mit einem speziellen Fügeelement. Das Fügeelement wird durch rotatorische und translatorische Bewegungen durch das obere Werkstück gedrückt und auf das zweite darunterliegende Werkstück durch Reibung verschweißt. Die beim Fügevorgang entstehende Wulst gelangt zur Ausbildung einer stofflichen</p>	<p>kostenintensive Fügeelemente erforderlich; größere Flanschlänge ist nötig; Gegenhalter ist nötig; hohe Maschinenanschaffungskosten; hohe Korrosionsanfälligkeit; Einschweißtiefe muss exakt auf die Blechdicke abgestimmt werden und muss bei tiefgezogenen Blechen angepasst werden; Zum Werkzeugverschleiß liegen noch keine Erfahrungen vor.</p>

Schweißverbindung zwischen beide Werkstücke in den Spalt.	
Fügeverfahren mit Lotdepot [29–31]: Verfahren bei dem ein Lotdepot durch einen Lichtbogen- oder Laserprozess transportsicher auf einem der Blechbauteile fixiert wird, und die Bauteile anschließend durch Anlegen eines elektrischen Stromes oder durch induktive Erwärmung und Aufbringen einer Druckkraft gefügt werden.	zweiter komplexer Prozess zur Lotapplikation erforderlich; größere Flanschlänge ist nötig; rasanter Wärmeeinfluss schon beim ersten Schweißprozess; Einsatz eines Klebstoffes kaum möglich; Entstehung von intermetallischen Phasen

In der Tabelle 2 ist die aktuelle Patentsituation dargestellt und die Abgrenzung der existierenden Methoden von der neuen Technologie beschrieben.

Tabelle 2: Abgrenzung der neuen Technologie von bestehenden Patenten

Table 2: Differentiation of the new technology from existing patents

Patent- / Offenlegungsschriften	Abgrenzung von bestehenden Patenten
DE 1615031 B (Patentschrift, 1972) Verfahren zum elektrischen Widerstandspunktschweißen einer Stromzuführung mit einem Heizdraht [32]	Verbindung mit Zusatzdraht zwischen zwei Blechen; andere Anwendung; Patentschutz ist ausgelaufen; keine Abgrenzung erforderlich.
DE19913436 C1 (Patentschrift, 2000) Schweißverbindung von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen [33]	Verschweißen durch die Auffüllung mit Zusatzwerkstoff der im oberen Blech befindenden Bohrung unter Anwendung der Elektroschweißung, Laserschweißung oder dergleichen; Patentschrift ist für neue Technologie nicht relevant.
EP 2052802 A1 (Offenlegungsschrift, 2009) Verfahren zum Verbinden zweier oder mehrerer metallischer Bleche oder Profilteile, insbesondere eines Karoseriesegments [25]	Verbindung wird zuerst mit einem metallischen Verbindungsstück durch mechanisches Fügen verbunden. Danach wird die erzeugte Verbindung dem elektrischen Widerstandsschweißen unterworfen; Hierbei durchschneidet der Stanzniet das obere Blech und verspreizt sich im darunter liegenden Blech. Die Widerstandsschweißverbindung erfolgt zwischen Nitelement und unterem Blech; keine weitere Abgrenzung erforderlich
EP 2328707 B1 (Patentschrift, 2015) und WO 2010022709 A1	Verbindung mit auf einem Blech durch Lichtbogen- oder Laserprozess fixierten Lotdepot, und anschließendes Verschweißen durch Anlegen eines

<p>(Offenlegungsschrift, 2010) Verfahren zur Herstellung einer Fügeverbindung zwischen einem Blechbauteil aus Stahl und einem Blechbauteil aus einem Aluminiumwerkstoff [29, 30]</p>	<p>elektrischen Stromes und Aufbringen einer die Blechbauteile zusammenpressenden Druckkraft oder durch induktive Erwärmung; keine weitere Abgrenzung erforderlich</p>
<p>EP 2679328 A1 (Offenlegungsschrift, 2014) Fügen von zwei Fügepartnern mittels einer Kombination des elektrischen Widerstandsschweißens und des Reibschweißens [34]</p>	<p>Verbindung mit Schweißeinlage zwischen zwei Blechen mittels Reib- und Widerstandspunktschweißens; Schweißeinlage ist plättchenförmig ausgeführt und wird mittels Reibschweißens fixiert; keine weitere Abgrenzung erforderlich</p>
<p>DE 10251414 B4 (Patentschrift, 2012) Verfahren und Fügehilfselement zum Punktschweißen oder –löten [35]</p>	<p>Verbindung mit Fügeelement zwischen zwei Blechen wird mittels Widerstandspunktschweißens hergestellt, wobei die Wärmeinleitung durch Veränderung von Strom und Fügekraft in Abhängigkeit der Querschnittkontur des Fügeelements gesteuert wird; keine weitere Abgrenzung erforderlich</p>
<p>DE 102009020226 A1 oder US 20090294411 A1 (Offenlegungsschrift, 2009) System und Verfahren zum Buckelschweißkleben von Werkstücken [36, 37]</p>	<p>Verfahren zum Buckelschweißkleben. Die Verbindung erfolgt mit einer Vielzahl von kugelförmigen oder zylindrischen Buckeln und einer Klebeschicht zwischen den zu fügenden Blechen mittels Widerstandsschweißens; Patentschrift ist erloschen</p>
<p>DE 3303244 C2 (Patentschrift, 1987) Verfahren zum Verbinden eines Aluminiumbleches mit einem Stahlblech [38]</p>	<p>Verbindung mit Zusatzdraht zwischen zwei Blechen mittels Widerstandspunktschweißung; infolge des Durchschmelzens des Aluminiumbauteiles werden zwei Stahlteile miteinander verschweißt; Patentschutz ist ausgelaufen; keine Abgrenzung erforderlich</p>
<p>DE 19512089 C1 (Patentschrift, 1996) Verfahren zur Verbindung von umformbaren Blechbauteilen, vorzugsweise Feinblechen durch Löten [39]</p>	<p>Verbindung mit einem Lotteil in einem Hohlraum, der vorher in einem zu fügenden Blech umgeformt wird; Verschweißen der Bleche mit Lotteil mittels Widerstandspunktschweißens und Hohlraum wird zurück umgeformt; keine weitere Abgrenzung erforderlich</p>

DE 103 23 719 B3 (Patentschrift, 2004) Verfahren zum Verbinden eines Hohlprofils mit einem flächig anliegenden Bauteil [40]	Verbinden mit einem Lot zwischen Hohlprofil und dem Bauteil mittels Widerstandspunktschweißens; am Bauteil wird eine Mulde ausgebildet, in der Lot deponiert wird; Verschweißen erfolgt im Muldenbereich; keine weitere Abgrenzung erforderlich
---	--

Die Auswertung der Patentrecherche zeigt, dass die geplante Technologie durch keine Schutzanmeldung abgedeckt wird und damit frei verfügbar ist. Auf die Anmeldung eigener Schutzrechte wurde verzichtet.

2.2 Bildung intermetallischer Phasen / Formation of intermetallic phases

Das Problem besteht darin, dass diese beiden unterschiedlichen Werkstoffe im festen Zustand untereinander durch nahezu komplette Unlöslichkeit gekennzeichnet sind. Dieser Aspekt ist für die Ausbildung intermetallischer Phasen verantwortlich. Diese bestehen im beschriebenen Fall aus chemischen Verbindungen der Elemente Eisen und Aluminium [3, 41].

Das Auftreten von intermetallischen Phasen ist kritisch zu betrachten, weil sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von denen der Grundwerkstoffe unterscheiden [42]. Die nachfolgende Tabelle zeigt mögliche intermetallische Phasen und deren charakteristischen Eigenschaften auf.

Tabelle 3: Eigenschaften der intermetallischen Phasen des Typs Fe_xAl_y [3] [43]

Table 3: Properties of the intermetallic phases of the Fe_xAl_y type

Verbindung	Al-Gehalt [%]	Aufbau	Mikrohärte [HV]	Dichte [g/cm ³]
Fe_3Al	25	geordnete krz-Struktur	250-350	6,67
$FeAl$	50	geordnete krz-Struktur	400-520	5,37
Fe_2Al_7	63	komplexe krz-Struktur	650-680	nicht bekannt
$FeAl_2$	66-67	komplexe rhombohedrale Struktur	1000-1050	4,36
Fe_2Al_5	69,7-73,2	krz- orthorhombische Struktur	1000-1100	4,11
$FeAl_3$	74-76	sehr komplexe monokline krz-Struktur	820-980	3,95

Allgemein kann festgestellt werden, dass intermetallische Phasen eine hohe Härte und damit einhergehend eine geringe Zähigkeit sowie eine spröde Struktur aufweisen. Dies hat eine Verringerung der Festigkeitseigenschaften der Verbindung zur Folge, wodurch eine

Rissausbreitung begünstigt wird und es bereits bei geringen Belastungsintensitäten zu einem schlagartigen Bauteilversagen kommen kann [41].

Untersuchungen von [44], der sich mit dem Widerstandselementschweißen von elektrolytisch verzinktem DP780 Stahl und Al 6061-T6 beschäftigte, zeigen, dass die Schichtdicke der intermetallischen Phasen einen signifikanten Einfluss auf die Verbindungsqualität besitzt. Gute mechanische Eigenschaften können noch für Schichtdicken zwischen 5 bis 10 μm gewährleistet werden.

Für das Widerstandspunktschweißen sind die Sprödphasen FeAl_3 (aluminiumseitig) und Fe_2Al_5 (stahlseitig) von entscheidender Bedeutung. Diese bilden sich hauptsächlich bei kurzzeitiger Wärmebeeinflussung, wie es beim RP-Schweißen der Fall ist [3].

3 Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments

Kurzfassung

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes gliederten sich in neun Abschnitte. Zunächst wurde eine Materialcharakterisierung durchgeführt. Anschließend erfolgten die experimentellen Versuche. Der Versuchsplan hierfür wurde kontinuierlich in enger Rücksprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses an die Bedürfnisse der Wirtschaft angepasst. Darüber hinaus beinhaltet dieses Kapitel die Ergebnisse der Materialcharakterisierung und die Beschreibung der Anlagentechnik.

Abstract

In this project, the investigations can be structured in nine sections. First of all, the material characterizations were made. Afterwards the experimental tests were carried out. The scope of these studies was adapted continuously by consultation with the project partners to the needs of economy. Furthermore, this chapter contains the results of the material characterization and description of experimental equipment.

3.1 Versuchsplan / Experimental Approach

Der geplante Projektablauf besteht aus neun Arbeitsschritten (siehe Abbildung 5).

AP 1: Festlegung der Anwendungsbereiche und Materialcharakterisierung

Auf Grundlage der Vorarbeiten werden zunächst Anwendungsbereiche ermittelt und daraus Vorschläge für die geeigneten Grund-, Elementwerkstoffe, -Geometrien und Klebstoffe sowie die Geometrie der Schweißproben bzw. Abmessungen der Flanschlänge abgeleitet. Vorgesehen sind Untersuchungen an Blechen aus 22MnB5 mit unterschiedlichen Schichtsystemen und Aluminium (EN AW 6016 o. ä.) mit Einsatz von zwei verschiedenen Drahtwerkstoffen. Weitere Werkstoffe bzw. Dickenkombinationen sowie die Zusatzwerkstoffe und der Klebstoff wurden in der ersten PbA-Sitzung festgelegt.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Festlegung und Analyse der Anwendungsbereiche der zu fügenden	Vorschläge für die geeigneten Grund-, Elementwerkstoffe und Klebstoffe
Werkstoffkombination	Auswahl der Geometrie der Schweißproben bzw. Abmessungen der Flanschlänge

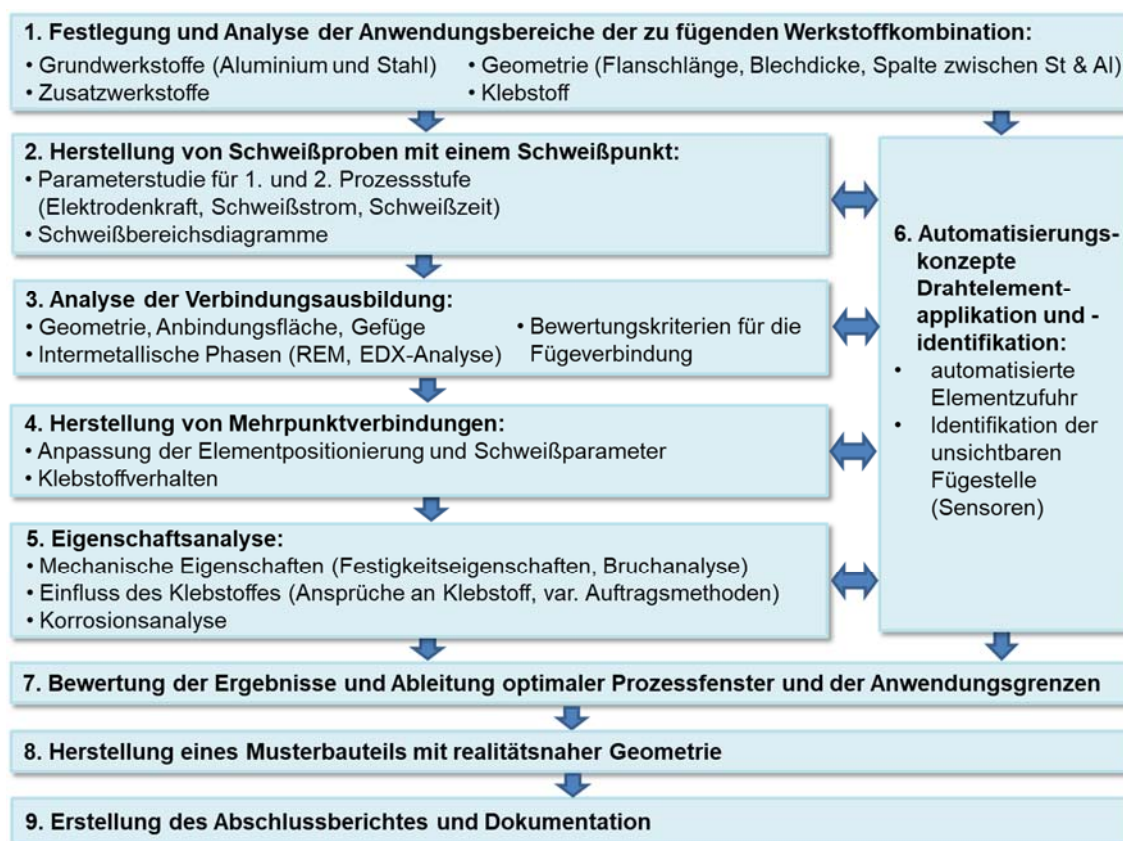


Abbildung 5: Projektablaufplan

Figure 5: Project schedule

Im Rahmen des AP 1 wurden die Vorschläge für die geeigneten Grund-, Elementwerkstoffe, - und Klebstoffe sowie die Geometrie der Schweißproben bzw. Abmessungen der Flanschlänge erarbeitet. In Rücksprache mit den PA-Mitgliedern (Sitzung vom 23.05.2018) erfolgte eine Präzisierung der Auswahl der Grund- und Zusatzwerkstoffe. Anhand einer Literaturrecherche wurden drei geeignete unterschiedliche Drahtelementwerkstoffe mit variablen Durchmessern zur Erprobung ausgewählt: ein Cu-Basis-Draht, ein Ni-Basis-Draht und ein Schweißzusatz aus hochlegiertem Stahl.

AP 2: Herstellung von Schweißproben mit einem Schweißpunkt

Anhand der in AP 1 festgelegten Werkstoffe und deren Abmessungen werden Schweißversuche für ausgewählte Kombinationen durchgeführt. Zunächst erfolgen die Untersuchungen zur Fixierung der Zusatzelemente in verschiedenen Ausführungen mit dem Aluminiumblech. Danach werden diese mit dem formgehärteten Stahlblech mit / ohne Klebstoff verschweißt. Für beide Prozessstufen werden Schweißstrom, Elektrodenkraft, Elektrodenweg und Schweißzeit gemessen und ausgewertet. Anschließend werden für alle Materialkombinationen Schweißbereichsdiagramme erstellt. Geplant war, dass Vorschläge für Qualitätskriterien analog dem am IWF bearbeiteten Projekt IGF-Nr. 19.878 BR erarbeitet werden und daraus ein Prozessfenster abgeleitet und dessen Größe bestimmt wird.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Herstellung der Schweißproben mit einem Schweißpunkt	Fixierung der Drahtelemente auf Al-Blech und Prüfen der Verbindungseigenschaften
	Bestimmung der Parameterfenster für Drahtelementapplikation
	Auswahl von zwei Drahtelementwerkstoffen für weitere Untersuchungen
	Herstellung der Gesamtverbindungen mit variierten Drahtelementen (DE)
	Erstellung der Schweißbereichsdiagramme für St-Al-Gesamtverbindungen
	Herstellung der Schweißverbindungen mit Klebstoffschicht

Anhand der in AP 1 festgelegten Werkstoffe und -kombinationen wurden Schweißversuche für ausgewählte Kombinationen durchgeführt. Zunächst erfolgten die Untersuchungen zur Fixierung der Zusatzelemente in verschiedenen Ausführungen mit dem Aluminiumblech. Danach wurden diese mit dem formgehärteten Stahlblech ohne Klebstoff verschweißt. Für beide Prozessstufen wurden Schweißstrom, Elektrodenkraft und Schweißzeit variiert und gemessen. Anschließend wurden für alle Materialkombinationen Parameterfenster erstellt, bei denen der Prozess stabil läuft und die Verbindungen den gewünschten Kriterien entsprechen. Für die ausgewählten Kombinationen sind noch die Verbindungen mit Klebstoffschicht herzustellen.

AP 3: Analyse der Verbindungsbildung

Ziel des AP 3 ist die Analyse der Verbindungszone, mittels metallographischer Charakterisierung hinsichtlich Gefüge und Geometrie der Verbindungszone. Neben optischer Mikroskopie erfolgen REM-Analysen mit zugehöriger Elementanalyse über den Verbindungsquerschnitt. Außerdem werden hier die Bewertungskriterien für Widerstandsschweißverbindungen ohne übliche Schweißlinse ausgearbeitet und vorgeschlagen. Das Ziel des AP 3 ist die Analyse der Verbindungszone, mittels metallographischer Charakterisierung hinsichtlich Gefüge und Geometrie. Die Verbindungszonen für Verbindungen mit den im AP 2 ermittelten Schweißparametern der unteren und oberen Q-Grenzen wurden analysiert. Außerdem sollen hier die Bewertungskriterien für die Widerstandsschweißverbindungen ohne übliche Schweißlinse ausgearbeitet und vorgeschlagen werden. Zusätzlich wurde bei der 3. PbA-Sitzung die Durchführung von Zugversuchen mit Opferblechen eingeplant, um den Wärmeeintrag und die dadurch entstehende Erweichung des gehärteten Stahls 22MnB5 zu bewerten.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Analyse der Verbindungsausbildung	Analyse der Verbindungszone mittels metallographischer Charakterisierung
	REM-Analysen der Verbindungszonen
	Analyse des Wärmeeintrags in 22MnB5
	Ausarbeitung der Bewertungskriterien für Widerstandsschweißverbindungen ohne übliche Schweißlinse → Bruchflächenanalyse

AP 4: Herstellung von Mehrpunktverbindungen

Basierend auf den Ergebnissen der AP 2 und AP 3 werden Mehrpunktverbindungen hergestellt, um die Beeinflussung des Prozesses durch das Nachsetzen beim Schweißen zu ermitteln und den Einfluss des Klebstoffs auf den Prozess zu analysieren. Hier werden ausgewählte Schweißparameter (Schweißstrom, Elektrodenkraft und Schweißzeit) der Einpunktproben genutzt und die Anpassung der Elementpositionierung sowie die Mehrpunktprobengestalt optimiert. Der Klebstoff wird in unterschiedlichen Geometrien aufgetragen und das Verhalten beim Schweißen analysiert. Die Proben werden mit Industriepartnern des PbA geometrisch ausgelegt und mit geeigneter Belastungsart geprüft.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Herstellung der Mehrpunktverbindungen	Erstellung der Schweißbereichsdiagramme für St-Al-Mehrpunktverbindungen
	Herstellung der Mehrpunktverbindungen mit Klebstoffschicht
	Ermittlung der Spaltgeometrie
	Auswirkungen KTL-Trockner auf Verbindung
	Herstellung der 3-Blech-Verbindungen
	Vorschläge für optimale Abstände zwischen Schweißpunkten

Zunächst wurden hier die Parametersätze aus AP 2 für Verbindungen mit drei Fügepunkten ohne Klebstoffeinsatz verwendet und angepasst. Die Abstände zwischen den Drahtelementen wurden variiert und die Spalte gemessen. Alle gefügten Proben wurden einem KTL-Prozess in einem Ofen unterzogen, um ausdehnungsinduzierte Brüche aufgrund der sehr unterschiedlichen Wärmeausdehnung der zu verschweißenden Werkstoffe auszuschließen. Zusätzlich wurden auch die Proben mit Klebstoffeinsatz hergestellt und im Ofen ausgehärtet.

Darüber hinaus wurde während der 1. PbA-Sitzung die Herstellung von 3-Blech-Verbindungen von den PbA-Mitgliedern gewünscht. Aufgrund des fehlenden Werkstoffs konnten diese Untersuchungen bisher nicht abgeschlossen werden.

AP 5: Eigenschaftsanalyse

Nach der Optimierung der schweißtechnischen Anbindung erfolgt die Weiterentwicklung des Fügeverfahrens hinsichtlich der mechanischen Festigkeit bzw. der optimierten Kraftübertragung an Mehrpunktproben. Die technologische Beurteilung dieser Maßnahmen erfolgt durch Festigkeitsuntersuchungen (quasistatische und schlagartige Versuche mit / ohne Klebstoff) und Bruchanalysen. Der Wärmebehandlungszustand der Grundwerkstoffe und die Klebstoffapplikation werden dabei berücksichtigt. Weiter erfolgen Korrosionsversuche nach üblichen Prüfkonzepten (z. B. Klimawechseltest VDA 233-102) im Vergleich zu üblichen Fügeverfahren wie dem Stanznieten in Absprache mit dem PbA.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Festigkeitsversuche	Zugversuch auf 22MnB5 mit Opferblech
	Verbindungsfestigkeit für Verbindungen mit einem Schweißpunkt (ohne / mit Klebstoff)
	Verbindungsfestigkeit für Mehrpunktproben ohne Klebstoff
	Verbindungsfestigkeit für 3-Blech-Verbindungen
	Vergleich mit Nieten
	Analyse der Bruchfläche
	Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Bruchfläche und Verbindungsfestigkeit
	Durchführung der Korrosionsversuche (Klimawechseltest)

AP 6: Automatisierungskonzepte Drahtelementapplikation und –Identifikation

Zeitgleich mit AP 2-AP 5 kann AP 6 bearbeitet werden. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit werden Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation erarbeitet und bewertet, siehe Abb. 3. Weiter ist eine Methode zur automatisierten Erkennung der Elementposition von der Blechaußenseite nach der Applikation basierend auf der Wirbelstromtechnik zu erproben. Auch die Messung des Elektrodenabstandes vor dem Schweißprozess zur Erkennung der Elemente soll als Qualitätskriterium erprobt werden. Die Methoden zur Applikation und Erkennung der Fügeelemente werden hinsichtlich einer industriellen Umsetzung bewertet.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Automatisierungskonzepte der Drahtelementapplikation und – Identifikation für die unsichtbaren Fügestellen	Erarbeitung und Bewertung der Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation
	Erprobung einer Methode basierend auf der Wirbelstromtechnik zur automatisierten Erkennung der Drahtelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Lagebestimmung nach der DE-Applikation ○ Lagebestimmung für Gesamtverbindung

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sollen Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation und zur Wiederfindung der Elemente erarbeitet und bewertet werden. Die Erarbeitung der Konzepte zur automatisierten Elementapplikation ist noch in Bearbeitung. Die Methode zur automatisierten Erkennung der Elementposition von der Blechaußenseite nach der Applikation basierend auf der Wirbelstromtechnik wurde erprobt und hat sich als gut geeignet erwiesen.

AP 7: Bewertung der Ergebnisse sowie Ableitung optimaler Prozessfenster und der Anwendungsgrenzen

Die ermittelten Prozessparameterfenster aus AP 3-AP 5 sollen hinsichtlich möglicher Störeinflüsse wie Elektrodenverschleiß oder Positionsabweichungen beim Schweißen verifiziert werden. Die Sensitivität auf die Prozesssicherheit und die mechanischen Eigenschaften der Verbindungen wird ermittelt. Hier werden auch Möglichkeiten zur Qualitätssicherung und zu Nacharbeitslösungen vorgeschlagen.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Ableitung optimaler Prozessfenster und der Anwendungsgrenzen	Verifizierung der ermittelten Prozessparameterfenster hinsichtlich möglicher Störeinflüsse (z. B. Positionsabweichungen)
	Bestimmung der Längentoleranzen für Drahtelemente
	Stromanstiegsgeschwindigkeit
	Vorschläge zu Bewertungskriterien für Widerstandsschweißverbindungen ohne übliche Schweißlinse
	Schweißungen mit der Anlagentechnik ohne magnetische Nachsetzeinheit

AP 8: Herstellung eines Musterbauteils mit realitätsnaher Geometrie

Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der neuen Technologie werden Musterbauteile mit realitätsnaher Geometrie geschweißt und anschließend geprüft. Hierbei werden

Mindestabstände der Fügstellen sowie die Einflüsse aus nachfolgenden Prozessschritten wie der Lackierung ermittelt, bei denen thermisch bedingte Spannungen auf die Fügstelle wirken. Weiter erfolgt die Erprobung der Methoden zur Fehlerermittlung (Drahteil nicht vorhanden) sowie von den vorgeschlagenen Nacharbeitsvarianten.

Arbeitsschritt	Durchgeführte Arbeit
Herstellung eines Musterbauteils	Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der neuen Technologie Anhang der Herstellung von Musterbauteilen mit realitätsnaher Geometrie

AP 9: Erstellung des Abschlussberichtes

Zum Abschluss des Forschungsvorhabens wird eine zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse im Rahmen eines Abschlussberichtes erstellt.

3.2 Verwendete Werkstoffe und Anlagentechnik / Test materials and experimental equipment

3.2.1 Materialcharakterisierung / Material characterisation

Grundwerkstoff 1: Aluminiumlegierungen der 6000-Serie

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei schnell aushärtbare Aluminiumlegierungen der 6000-Serie verwendet. Durch Aushärtung lassen sich mittlere bis hohe Festigkeiten erzielen. Für die aushärtbaren Aluminiumlegierungen der 6000-Serie sind zwei Zustände von Bedeutung: der T4- und der T6-Zustand.

EN AW-6016 (EN AW-Al Si1,2Mg0,4)

Eine Anwendung der EN AW-6016 T4-Legierung ist typischerweise die Karosserieaußenhaut, da die Legierung eine hohe Oberflächengüte aufweist und die Festigkeiten durch Warmaushärtung gesteigert werden können. Die Legierung EN AW-6016 wurde mit einer Blechdicke von 1,0 mm im Ausgangszustand T4 untersucht und im T6-Zustand nach dem Fügen und Klebstoffaushärten zerstörend geprüft.

EN AW-6014 (EN AW-Al Mg0,6Si0,6V)

Die thermisch aushärtbare Knetlegierung EN AW-6014 wurde für Strukturanwendungen im Automobilbereich entwickelt und stellt eine Alternative zu den herkömmlichen AlMg-Werkstoffen dar. Die Legierung besitzt eine hohe Festigkeit, eine gute Umformbarkeit sowie eine gute Korrosionsbeständigkeit und erreicht eine um 20 % höhere Dehngrenze als die Standardlegierung EN AW-6016, so dass durch Wanddickenreduzierung ein höherer Leichtbaugrad erzielt wird [16]. Die Legierung EN AW-6014 wurde mit einer Blechdicke von 1,2 mm genauso wie EN AW-6016 im Ausgangszustand T4 sowie in T6-Zustand nach dem Fügen und Klebstoffaushärten für zerstörende Prüfung verwendet.

In Tabelle 4 sind die chemischen Zusammensetzungen der in dieser Arbeit verwendeten Chargen der Werkstoffe EN AW-6016 und EN AW-6014 angegeben (geprüft im kaltausgelagerten Zustand T4).

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzungen der Aluminiumbleche (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES)

Table 4: Chemical compositions of the aluminium sheets (in wt.-%) according to own analyses (OES)

	Mn	Cu	Cr	Mg	Si	Ti	Fe	Al
EN AW-6016 –T4	0,13	0,07	0,18	0,39	1,27	0,03	0,26	Basis
EN AW-6014 –T4	0,08	0,06	0,009	0,49	0,51	0,025	0,189	Basis

Zur Charakterisierung der Materialien wurden Zugversuche gemäß DIN EN ISO 6892-1 bzw. DIN 50125:2004 auf einer Zugmaschine Typ Z250 der Firma Zwick / Roell durchgeführt. In Zugversuchen an Längsproben aus EN AW-6016 wurde im Ausgangszustand eine Zugfestigkeit von 260 N/mm², eine Fließgrenze von 147 N/mm² sowie eine Bruchdehnung A_g von 21 % ermittelt.

In Zugversuchen an Längsproben aus EN AW-6014 wurde im Ausgangszustand eine Zugfestigkeit von 237 N/mm², eine Fließgrenze von 145 N/mm² sowie eine Bruchdehnung A_g von 20 % ermittelt.

Grundwerkstoff 2: 22MnB5

Für die Untersuchungen wurden Stahlbleche aus formgehärtetem Vergütungsstahl 22MnB5, beschichtet mit Aluminium-Silizium mit 150 g/m² – AS150 und einer Blechdicke von 1,5 mm verwendet. Die chemische Zusammensetzung des verwendeten Versuchswerkstoffes ist in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des 22MnB5 (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES)

Table 5: Chemical composition of 22MnB5 (in wt.-%) according to own analyses (OES)

	C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	B	Fe
22MnB5+AS150	0,23	1,18	0,010	<0,001	0,254	0,04	0,04	0,003	Basis

Die Vergütung wurde bei 930°C mit 6 Minuten Haltezeit und anschließendem Abkühlen im Presswerkzeug durchgeführt. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Mechanisch-technologische Eigenschaften des 22MnB5

Table 6: Mechanical-technological properties of 22MnB5

Material	Zugfestigkeit R _m [MPa]	Bruchdehnung A _g [%]
Ausgangszustand 22MnB5+AS150	565 ± 8	15,3±0,2
Gehärtet 22MnB5+AS150	1502,7 ± 24	3,9±0,3

HX220

Weiterhin wurde der kaltgewalzte hochfeste niedriglegierte Stahl HX220 mit einer Mindeststreckgrenze von 220 MPa verwendet. Dieser wurde feuerverzinkt (beidseitig 100 g/m²). Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 7 aufgelistet und die mechanisch-technologischen Eigenschaften in Tabelle 8.

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung des HX220 (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES).

Table 7: Chemical composition of HX220 (in wt.-%) according to own analyses (OES).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Nb	Fe
HX220	0,04	0,002	0,23	0,014	0,006	0,02	0,013	0,06	0,01	0,002	Basis

Tabelle 8: Mechanisch-technologische Eigenschaften des HX220

Table 8: Mechanical-technological properties of HX220

Material	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Bruchdehnung Ag [%]
HX220	376±10	22 %

Drahtelemente

Zum Einsatz gelangten zylindrische Drahtelemente (DE) aus Schweißdrahtelektroden bzw. Schweißstäben auf Cu-, Ni- und Fe-Basis mit einem Durchmesser von jeweils 1,6 mm. Alle Drähte wurden auf die Länge von 10,0 ± 0,2 mm manuell zugeschnitten. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Drahtelemente ist in der Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Chemische Zusammensetzungen der Drahtelemente (in Gew.-%) gemäß eigenen Analysen (OES).

Table 9: Chemical compositions of the wire elements (in wt.-%) according to own analyses (OES).

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Sn	Cu	Nb	Fe	Al
Cu-Basis 1	-	0,28	0,27	-	-	<0,005	4,97	Basis	-	<0,005	-
Cu-Basis 2 [45]	-	2,95	0,95	-	-	-	-	Basis	-	-	-
Fe-Basis	0,02	0,88	1,84	20,0	0,11	9,95	0,01	0,1	0,01	Basis	0,004
Ni-Basis	0,2	0,09	0,07	25,7	0,06	Basis	<0,001	<0,01	0,02	9,4	1,75

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Drähte sind in der Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Mechanisch-technologische Eigenschaften der Drähte

Table 10: Mechanical-technological properties of the welding wires

Material	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Bruchdehnung Ag [%]
Cu-Basis 1	1054,2 ± 29	1,12
Cu-Basis 2	732,8 ± 6	1,8 ± 0,5
Fe-Basis	984,5 ± 64	7,8 ± 3
Ni-Basis	1270,8 ± 1	1,25 ± 0,3

Klebstoff

BETAMATE™ 1630

BETAMATE™ 1630 wird zum Fügen von Karosseriebauteilen eingesetzt.

Der Klebstoff wird angewendet, um die Betriebsfestigkeit, die Crashstabilität und die Steifigkeit des Fahrzeugs zu erhöhen. Dieser Klebstoff eignet sich zum Verbinden von Materialien im Karosseriebau einschließlich beschichteter Stähle und vorbehandeltem Aluminium und weist eine gute Verträglichkeit mit Ölen und Trockenschmierstoffen auf. Außerdem eignet sich dieser Klebstoff zur Abdichtung und zum Schutz sowohl des Metalls als auch der Schweißpunkte vor Korrosion. Der Klebstoff ist niedrigviskos und kann bei Raumtemperatur verarbeitet werden. Die Verwendung von beheizten Dosiereinrichtungen wird allerdings empfohlen. Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgt der Auftrag des Klebstoffes nach dem Aufwärmen in einem Ofen für 10 Minuten bei 50 °C. Die Aushärtung des Klebstoffes erfolgt in einem Ofen bei 180 °C und einer Ofenzeit von 30 Minuten.

Laut Herstellerangaben zeichnet sich BETAMATE™ 1630 durch bessere Crashfestigkeit, Haltbarkeit und Vibrationsdämpfung aus.

Tabelle 11: Technische Daten des Klebstoffes BETAMATE™ 1630 [46]

Table 11: Technical data of the adhesive BETAMATE™ 1630 [46]

1K Epoxidharz Klebstoff	
Farbe	rot
Dichte 23°C (DIN 52451)	1,23 g/ml
Anteil nichtflüchtiger Bestandteile	> 99 %
Viskosität / Fließgrenze (45°C, Bohlin, Casson)	30 Pas / 120 Pa
Aushärtebedingung	>140°C / 30 Minuten
Standardaushärtung	180°C / 30 Minuten
Zugfestigkeit (DIN EN ISO 527-1)	29 MPa
Bruchdehnung (DIN EN ISO 527-1)	ca. 11%
E-Modul (DIN EN ISO 527-1)	1500 MPa
Zugscherfestigkeit (DIN EN 1465) (CRS 1403, 1.5 mm) (Verklebte Fläche: 25mm x 10mm, Klebschichtdicke: 0.2mm)	29 MPa
T-Peel Festigkeit (DIN 53282) (DX56 D Z100 MC, 0.8 mm) (Verklebte Fläche: 25mm x 100mm, Klebschichtdicke: 0.2mm)	11 N/mm
Schlagschälfestigkeit (ISO 11343) (CRS 1403, 1.0mm, 23°C, 2m/s) (Verklebte Fläche: 20mm x 30mm, Klebschichtdicke: 0.2mm)	47 N/mm

3.2.2 Probengeometrien und Probenvorbereitung/ Specimen geometries and preparation

Die Blechabmessungen für die Fügeproben mit einer Fügestelle können der Abbildung 6 entnommen werden.

Der Zuschnitt der Blechwerkstoffe erfolgte mittels Laserstrahlschneiden. Für die Bestimmung der Parameterfenster bei der Drahtelementapplikation und zur Herstellung der Gesamtverbindung kamen die Bleche mit den Abmessungen 35 mm × 35 mm zum Einsatz (Abbildung 6, Blechgeometrie A). Die gleiche Probengeometrie wurde für die Meißelprüfung, die makro- und mikroskopischen Analysen und die metallografischen Untersuchungen in Anlehnung an DIN EN ISO 10447 verwendet.

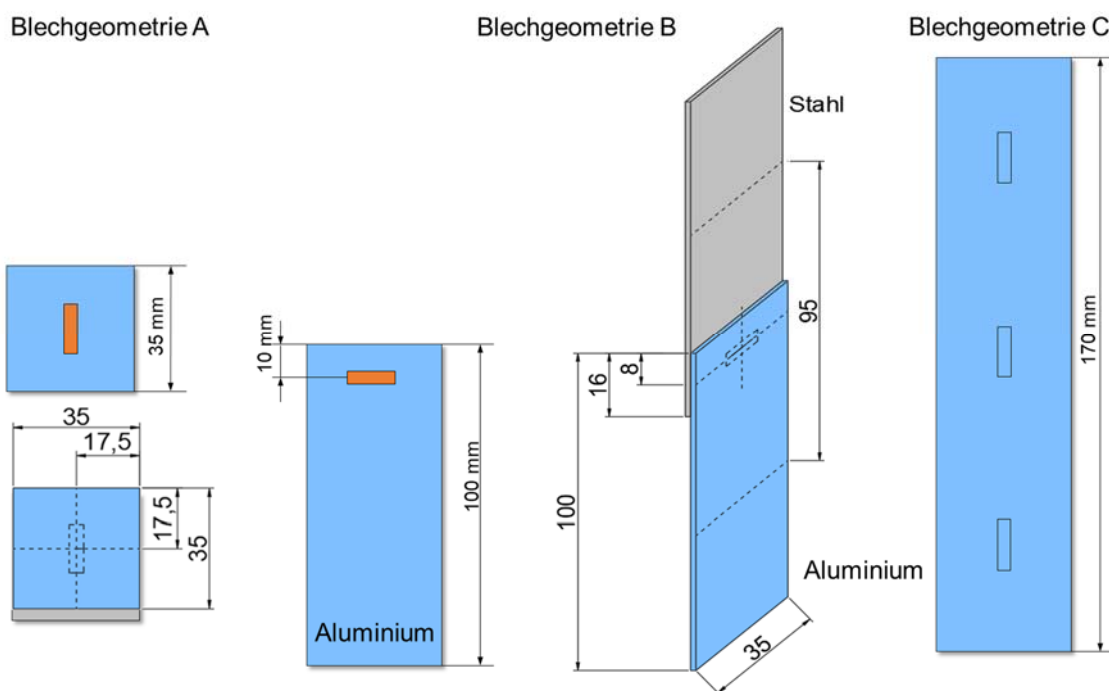


Abbildung 6: Technische Zeichnungen der verwendeten Schweißprobengeometrien

Figure 6: Technical Drawings of the sample geometries

Für die mechanisch-technologischen Analysen wurden Bleche mit den Abmessungen 100 mm × 35 mm in Anlehnung an DIN EN ISO 14273 verwendet, um eine Einspannung in der Messvorrichtung zu ermöglichen. Diese Probengeometrie wurde auch für die Dreiblechverbindungen und die Verbindungen mit Klebstoff verwendet.

Die Proben mit der Blechgeometrie C dienten zunächst zur Schweißbereichsermittlung für Mehrpunktschweißverbindungen, für die Abstandvariation zwischen den Drahtelementen und zur Auffindung der Drahtenden mittels Wirbelstromprüfung.

Tabelle 12: Abmessungen der Probengeometrien

Table 12: Dimensions of the sample geometries

Werkstück Anwendung	Stahlblech [mm]	Aluminiumblech [mm]
Makro-/mikroskopische Analyse	35 × 35 × 1,5	35 × 35 × 1
Mechanisch-technologische Analysen: <ul style="list-style-type: none"> • Abscherversuch • Scherzugversuche für Proben mit DE • Genietete Proben • Dreiblechverbindungen 	100 × 35 × 1,5	100 × 35 × 1
Mehrpunktproben	170 × 35 × 1,5	170 × 35 × 1,0
Mechanisch-technologische Analyse für Mehrpunktproben	140 × 100 × 1,5	140 × 100 × 1,5
Dreiblechverbindungen	100 × 35 × 1,5	100 × 35 × 1
Korrosionsversuche	300 × 100 × 1,5	300 × 100 × 1,5
Proben mit Opferblech	225 × 25 × 1,5	35 × 35 × 1

Die Zusatzelemente haben einen Durchmesser von 1,6 mm. Mittels Hebelschneider erfolgte der manuelle Zuschnitt der Zusatzelemente auf eine Länge von etwa 10 mm. Anschließend wurden sie auf eine Länge von $10 \pm 0,02$ mm geschliffen.

Die Spaltbreite zwischen Stahlblech und Aluminiumblech ist für den weiteren Klebstoffeinsatz relevant, da die Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke abhängig ist.

Die höchste Klebfestigkeit kann laut [47] bei der Klebschichtdicke von 0,05 bis 0,2 mm erreicht werden. Deswegen wurde der Durchmesser der Drahtelemente im Bereich von 1-2 mm empfohlen.

Da die DE mit einem Durchmesser von 1,0 mm eine zu geringe Überhöhung hatten, bestand die Gefahr, dass nach der Herstellung der Gesamtverbindung kein Spalt zwischen Aluminium und Stahl bleibt. Dadurch kann der Zweck des Zusatzelementes nicht erfüllt werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Drahtelementauswahl im Nachfolgenden einzuschränken. Es wurde nur noch ein Durchmesser von 1,6 mm für zwei unterschiedliche Drahtelementwerkstoffe genutzt

Aus industrierelevanten Gründen wurde im Rahmen des Projektes eine Flanschlänge von 16 mm festgelegt. Aus Voruntersuchungen ist allerdings bekannt, dass sich eine Flanschlänge von 6-10 mm gut realisieren lässt [48].

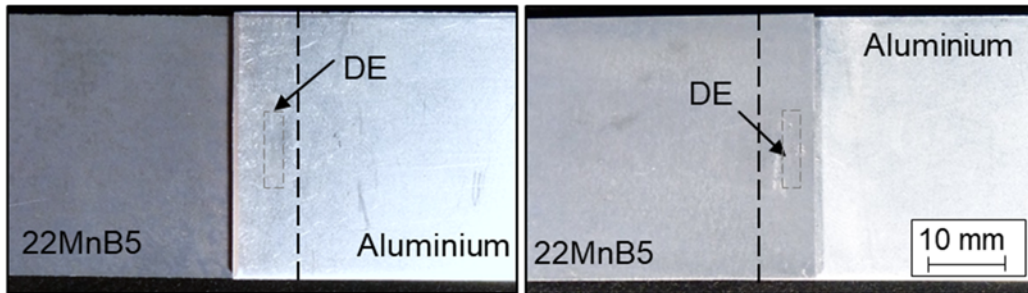


Abbildung 7: Verbindung mit einer Flanschlänge von 6 mm aluminiumseitig (links) und stahlseitig (rechts)

Figure 7: The joint after stage II from aluminum side (left) and steel side (right) with the 6 mm flange length

3.2.3 Anlagentechnik zum Fügen / Welding system

Geschweißt wurde an einer ortsfesten MFDC-Schweißanlage in C-Bauweise der Firma Nimak mit einer magnetischen Nachsetzeinheit "magneticDrive" und einem 1 kHz Mittelfrequenzinverter. Die Regelung der Kraft während des Schweißprozesses erfolgte durch einen Elektromagneten und wurde beim Schweißprozess konstant gehalten, wie in [14] ausführlich beschrieben. Alle Schweißungen erfolgten mit flachen CuCr1Zr-Elektrodekappen C0 nach DIN EN ISO 5821 mit einem Durchmesser von 16 mm.

a)



b)

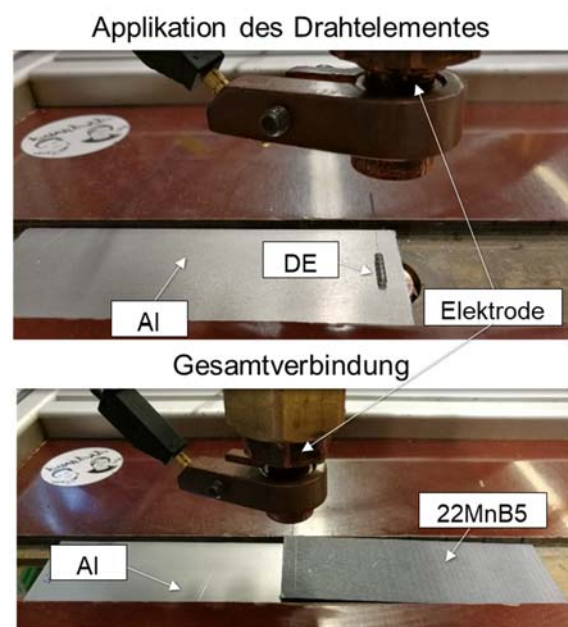


Abbildung 8: Schweißanlage (a) und Versuchsaufbau (b)

Figure 8: Welding system (a) and test setup (b)

Durch die Kombination von hohem Schweißstrom mit extrem hoher Stromanstiegsgeschwindigkeit sowie kleiner Kontaktfläche zwischen Blech und Drahtelement konnte eine sehr hohe Stromflussdichte in der Fügeebene erreicht werden. Unterstützt durch die

magnetische Nachsetzeinheit ermöglichte dies extrem kurze Schweißzeiten zwischen 10 und 50 ms. Die Messsignale des Schweißstromes, Elektrodenweges und der Elektrodenkraft werden direkt von der Schweißanlage ausgegeben. An den Elektroden wird die Schweißspannung abgegriffen. Die Datenerfassung von Schweißstrom, Spannungsabfall zwischen den Elektroden, Elektrodenkraft und -weg bei jeder Schweißung wird durch das externe WeldQAS System der Firma HKS Prozesstechnik GmbH (Deutschland) mit einer Messfrequenz von 25,6 kHz realisiert.

3.2.4 Prüftechnik zur werkstofflichen Charakterisierung/ Testing equipment for material characterization

Zur Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe und Schweißproben hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, Gefügeausbildung, innerer und äußerer Unregelmäßigkeiten sowie zur Bewertung der mechanisch-technologischen Eigenschaften wurden die in Tabelle 9 erläuterten Prüftechniken verwendet. Da ein Großteil der verwendeten Prüfungen und Methoden standardisiert ist, sei auf die entsprechenden Normen verwiesen. Die nicht standardisierten und weniger gebräuchlichen Untersuchungsmethoden werden an der entsprechenden Stelle im Ergebnisteil kurz erläutert.

Tabelle 13: Übersicht der eingesetzten Prüftechnik zur Werkstoffcharakterisierung

Table 13: Overview of the testing equipment used for material characterization

Prüfung	Prüfziel / Prüfgrößen	Prüfmittel / Gerätetechnik
Lichtmikroskopie / Metallographie (DIN EN ISO 6520-1:2007, DIN EN ISO 17781:2017)	Untersuchung der Verbindungsausbildung, Nachweis von Unregelmäßigkeiten	Inverses Auflichtmikroskop Leica MeF4A (Fa. Leica)
Optische Emissionsspektrometrie (OES, Funkenspektroskopie)	Bestimmung der chemischen Zusammensetzung	Spectrolab LAVWA 18A (Fa. SPECTRO Analytical Instruments)
Rasterelektronenmikroskopie (REM)	qualitative Gefügeanalyse Darstellung der Gefügebestandteile z. B. intermetallische Phasen, Analyse der Bruchflächen	XL 30 ESEM FEG (Fa. Philips)
EDX-Analyse (Energiedispersive Röntgenanalyse)	Analyse der chemischen Zusammensetzungen, Seigerungen und Ausscheidungen	EDAX XL Series
Zugversuch (DIN EN ISO 6892-1:2009, DIN 50125:2016)	Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung A , Streckgrenze R_e bzw. 0,2 %- Dehngrenze $R_{p0,2}$	Materialprüfmaschine Z250 (Fa. Zwick)

4 Ergebnisse Results

Kurzfassung

Hier werden die Einzelheiten zur Durchführung der Versuche in jedem Arbeitspaket und entsprechende Ergebnisse dazu dargestellt.

Abstract

Here the details for the experimental approach for each part of the project and corresponding results are presented.

4.1 Herstellung von Schweißproben mit einem Schweißpunkt/ Joints with one insert element

4.1.1 Prozessablauf des neuen Fügeprozesses / Procedure of the new joining process

Die neuartige Technologie mit einem zusätzlichen Fügelementeinsatz besteht aus einem zweistufigen Widerstandsschweißprozess. Der Ablauf des Verfahrens kann der Abbildung 9 entnommen werden.

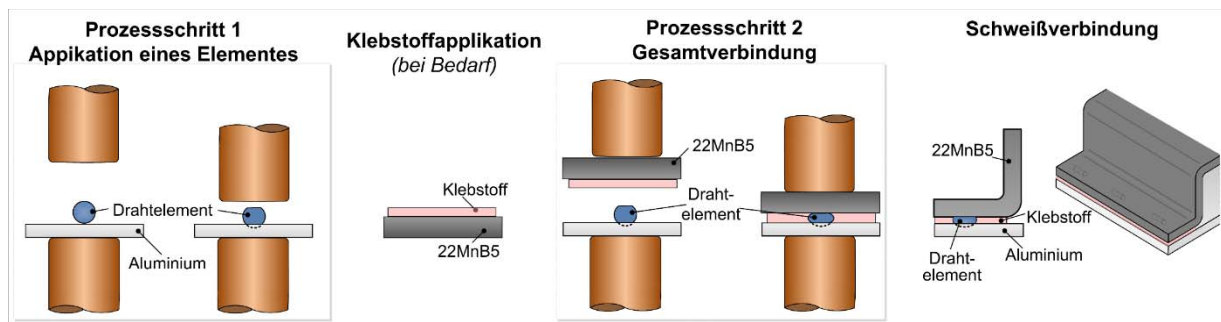


Abbildung 9: Ablauf der neuartigen Füge-technologie basierend auf dem Widerstandsschweißen

Figure 9: Two stages of a hybrid projection welding process with the insert element: securing of element on aluminum sheet; application of adhesive, if required; and manufacturing of entire joint

Verwendet werden eine konventionelle Widerstandsschweißanlage und Drahtelemente aus konventionellem Schweißdraht. Im ersten Prozessschritt (PS I) wird ein Drahtelement mittels Buckelschweißens auf einem Aluminiumblech fixiert. Im zweiten Prozessschritt (PS II) wird das Aluminiumblech mit dem aufgeschweißten Drahtelement mit einem Stahlblech verbunden, so dass beide Bleche durch das Drahtelement abhängig vom verwendeten Drahtelementwerkstoff diffusionsgelötet bzw. diffusionsgeschweißt werden. Da die genaue Entstehung der Verbindungsbildung noch zu klären ist, wird zur Vereinfachung im Folgenden nur der Begriff Schweißen verwendet. Zusätzlich kann Klebstoff nach dem ersten Prozessschritt auf das Stahlblech aufgetragen werden.

Das beschriebene Fügeverfahren wird als Buckelschweißen kategorisiert, da die zylindrischen Drahtelemente einen linienförmigen Kontakt zwischen dem Blech und dem Drahtelement mit einer relativ kleinen Kontaktfläche bilden. Der Stromfluss wird nicht durch die Kontaktfläche der Elektrode, sondern durch die Kontaktfläche zwischen Drahtelement und Stahlblech

bestimmt. Die kleine Kontaktfläche ermöglicht Schweißungen mit Schweißzeiten von wenigen Millisekunden, was zu einem extrem niedrigen Gesamtwärmeeintrag führt.

4.1.2 Parameterfenster für die DE-Applikation und Auswahl der Werkstoffe für die Drahtelemente / Welding parameters for insert element application and selection of materials for insert elements

Da im Rahmen des Projektes die Versuchsdurchführung an zwei unterschiedlichen Drahtelementwerkstoffen erfolgen sollte, wurde aus vier zur Auswahl vorliegenden Drahtelementwerkstoffen nach einer Bewertung auf zwei eingeschränkt. Alle vier Drahtelementwerkstoffe haben vergleichbare werkstoffliche Verträglichkeit zu Stahl-Aluminium-Mischverbindungen gezeigt und konnten zur Herstellung von Fügeverbindungen grundsätzlich verwendet werden. Zur Auswahl der zwei Drahtelementwerkstoffe wurden folgende Anforderungen formuliert.

- großes Parameterfenster bei der DE-Applikation
- hohe ertragbare Kräfte beim Abscherversuch
- möglichst geringe Deformation bei der Drahtelementapplikation sowohl für I_{\max} als auch für I_{\min} .

Großes Parameterfenster bei der DE-Applikation

Die Drahtelemente aus vier Drahtelementwerkstoffen wurden mit zwei Elektrodenkräften (1 kN und 2 kN) und vier Schweißzeiten (10, 12, 14 und 16 ms) geschweißt. Der Schweißstrom wurde in 1 kA-Schritt variiert.

Hohe ertragbare Kräfte beim Abscherversuch

Zur Gewährleistung der Transportsicherheit müssen die Drahtelemente sicher auf dem Aluminiumblech fixiert werden. Das kann manuell durch einen Schälzugversuch und das Rauschieben des DE mit dem Finger aus der Fügestelle geprüft werden. Um die Transportsicherheit der applizierten Drahtelemente quantitativ zu bewerten, wurde ein Druckversuch in der Zugmaschine durchgeführt. Hier fährt ein massives Gegenblech in angegebener Richtung über das Aluminiumblech und schiebt das Drahtelement mit eingestellter Geschwindigkeit aus der Fügestelle raus, siehe Abbildung 11 (a). Dabei wird die Kraft gemessen, die notwendig ist, um das Drahtelement vom Aluminiumblech zu lösen.

Geringe Deformation der Drahtelemente sowohl bei I_{\max} als auch bei I_{\min}

Die Verformung (Deformation) der Drahtelemente wird bestimmt durch den Eindruck im Aluminiumblech als auch durch die plastische Verformung des Drahtelementes. Um die Verbindungsverformung zu definieren, wurde die Höhe mit einem Messschieber gemessen.

Werkstoffliche Verträglichkeit zur Stahl-Aluminium-Mischverbindung

Die werkstoffliche Verträglichkeit der Drahtelementwerkstoffe wurde durch Testschweißungen der Gesamtverbindungen erprobt. Das Kriterium wurde für alle erprobten Drahtelemente erfüllt. Um erste Anforderungen an die DE-Werkstoffe zu bewerten, wurden Parameterfenster für alle vier Drahtelementwerkstoffe ermittelt.

Die Drahtelemente wurden auf Aluminiumbleche (Abbildung 6, Geometrie A) mit variierendem Schweißstrom in Schritten von 1 kA aufgeschweißt.

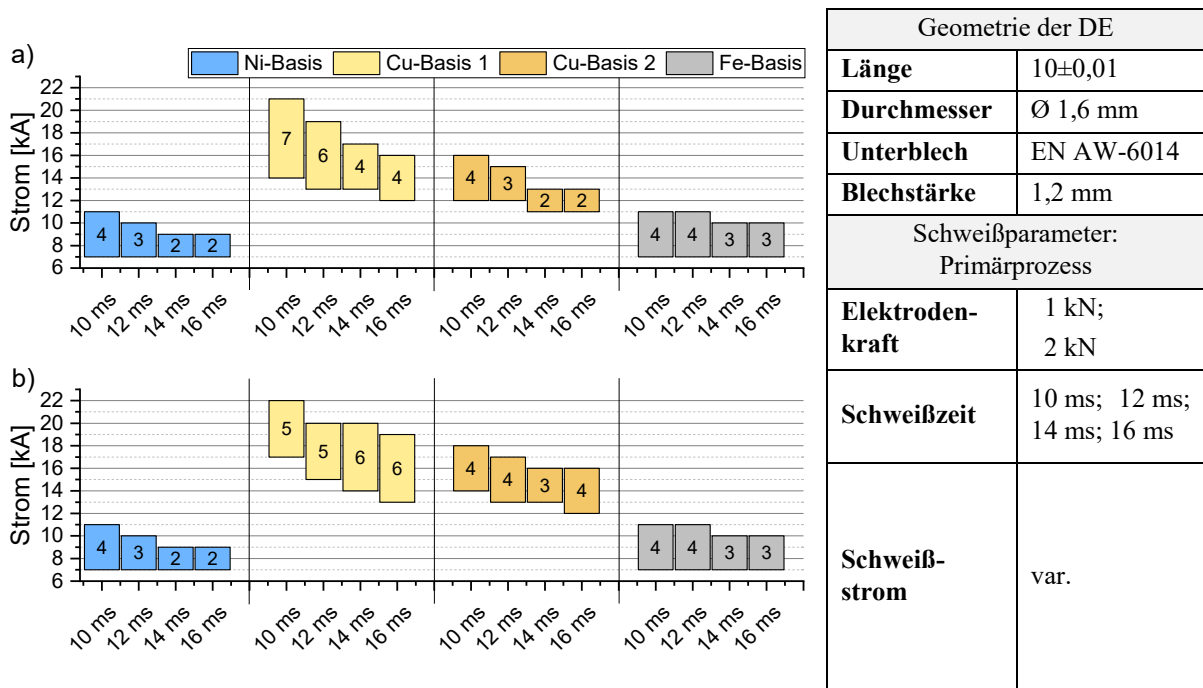


Abbildung 10: Parameterfenster für die Drahtelementapplikation (PS I); mit Elektrodenkraft von 1 kN (a) und 2 kN (b)

Figure 10: Welding current ranges for the insert element application (PS I); with electrode force of 1 kN (a) and 2 kN (b)

Alle DE-Werkstoffe weisen große Parameterfenster auf. Die Schweißbereiche für Cu-Basis-DE liegen höher, was durch den geringeren elektrischen Widerstand des Kupfers erklärt werden kann.

Um die Zuverlässigkeit des Applikationsprozesses nachzuweisen, wurden ertragbare Kräfte für Verbindungen, die mit I_{\min} geschweißt wurden, ermittelt. Zur Prüfung der hohen ertragbaren Kräfte wurde ein Abscherversuch vorgeschlagen. Hierfür wurde das Drahtelement auf ein Aluminiumblech mit den Abmessungen 100 x 35 mm (Abbildung 6, Geometrie B) aufgeschweißt, so dass die längste Achse des Drahtelementes 10 mm von der Blechkante entfernt lag.

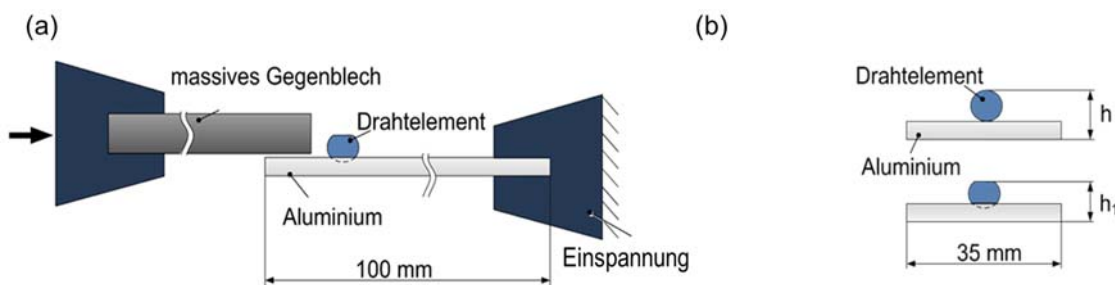


Abbildung 11: Bestimmung der Prozessgrenzen anhand der mechanischen Eigenschaften von Verbindungen nach Prozessschritt I (PS I) – a) untere Q-Grenze I_{\min} Abscherversuch des Drahtelementes; b) obere Q-Grenze I_{\max} anhand der Geometrie

Figure 11: Definition of lower (a) and upper (b) boundary of welding current ranges for PS I of the joining process

Das Drahtelement wurde dann mit einer massiven Stahlplatte mittels einer Prüfmaschine abgeschert, siehe Abbildung 11 (a). Die maximale Kraft, gemessen bei der Abscherung des Drahtelements vom Aluminiumblech, wurde dokumentiert. Das Drahtelement wurde auf ein Aluminiumblech mit den Abmessungen 100 x 35 mm aufgeschweißt und in der Zugmaschine mit einem massiven Gegenblech abgeschert. Dabei wurden die maximalen Kräfte ermittelt und aus jeweils drei Proben ein Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse sind der Abbildung 12 zu entnehmen.

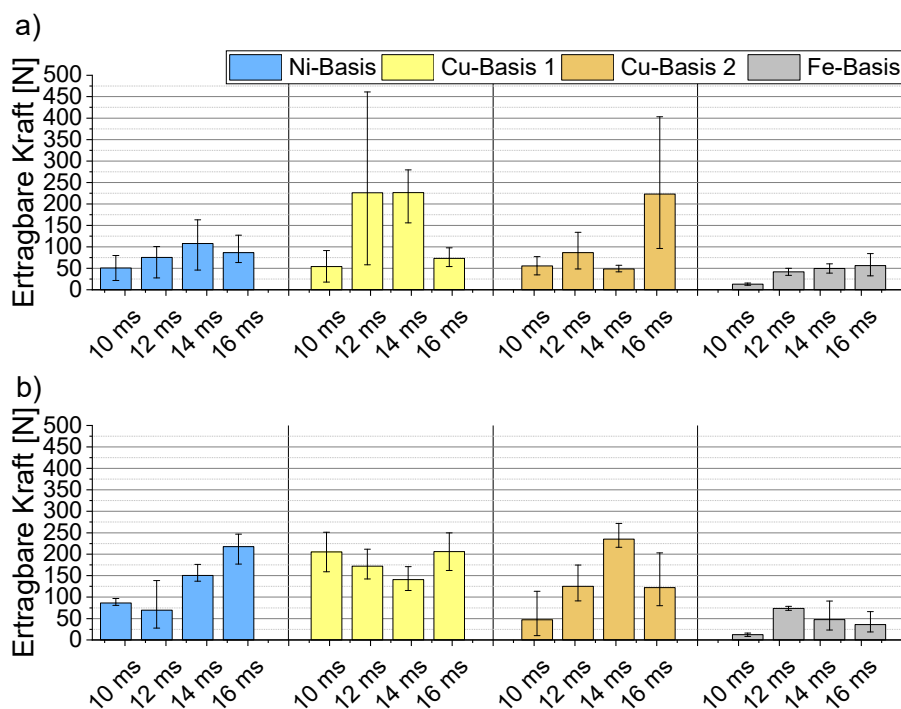


Abbildung 12: Ergebnisse der Abscherversuche für die Proben, die im PS I mit I_{\min} geschweißt sind

Figure 12: Maximum tensile loads for joints prepared with I_{\min} on the PS I

Auffällig ist, dass bei den Verbindungen, die mit einer Elektrodenkraft von 1 kN gefügt wurden, große Schwankungen beobachtet werden können. Die Verbindungen, die mit 2 kN Elektrodenkraft hergestellt sind, liefern deutlich stabilere Ergebnisse im Abscherversuch und wurden daher für weitere Untersuchungen empfohlen.

Des Weiteren erfolgte die Vermessung der Höhe aus Drahtelement und Aluminiumblech nach der Drahtelementapplikation mit einem digitalen Messschieber, siehe Abbildung 11 (b). Die Höhe wurde an drei Stellen gemessen (mittig sowie 3 mm links und rechts von der Elementmitte). Anschließend wurde eine Höhe h_1 als Mittelwert aller drei Messungen berechnet und die gesamte Verformung (D) für jede der beiden untersuchten Proben mit Gleichung (1) bestimmt. Die Größe h ($h = 2,6$ mm) ist die Höhe der Verbindung, die sich aus einer Blechdicke von 1,0 mm und einem Drahtelementdurchmesser von 1,6 mm ergibt.

$$D = \frac{(h - h_1)}{h} \cdot 100\% \quad (1)$$

Die errechneten Höhen nach der DE-Applikation für Verbindungen, die mit I_{\min} und I_{\max} aus Abbildung 10 hergestellt wurden, sind der Abbildung 13 in Prozent zu entnehmen.

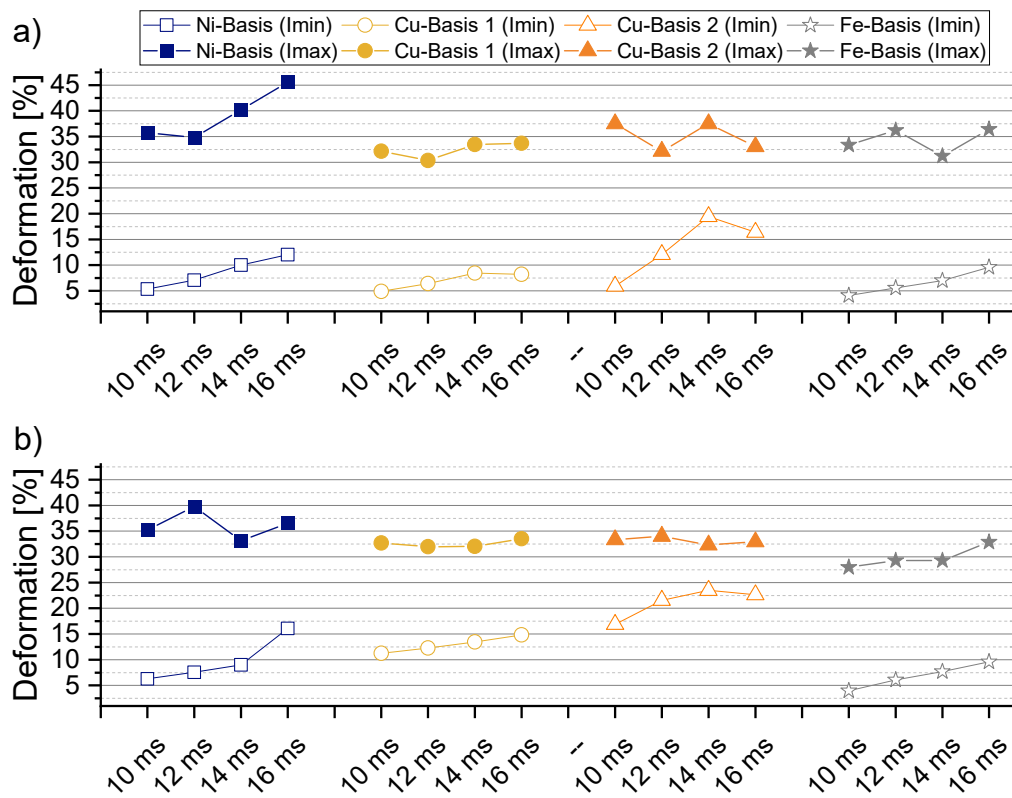


Abbildung 13: Deformation der Drahtelemente bei der DE-Applikation

Figure 13: Deformation of the insert elements during DE-application

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Verbindungen mit Ni-Basis-Drahtelementen, geschweißt mit I_{max} stärker verformt wurden. Außerdem sind beide Cu-Basis-Drahtelemente weicher und die Elemente der Cu-Basis 2 werden schon beim Schweißstrom I_{min} stärker verformt. Die Deformation der Fe-Basis-Drahtelemente ist allgemein geringer, was von Vorteil ist.

Tabelle 14: Auswahl der Werkstoffe für die Drahtelemente

Table 14: Selection of materials for insert elements

DE-Werkstoff	Parameterfenster bei der DE-Applikation	Abscherkraft	Deformation	Scherzugkraft
Ni-Basis	+	+	+	++
Cu-Basis 1	++	++	++	+
Cu-Basis 2	+	+	++	+
Fe-Basis	+	++	++	++

+ - die Anforderung ist erfüllt

++ - die Anforderung ist sehr gut erfüllt

Aus der Tabelle 14 kann abgeleitet werden, dass für die nachfolgenden Untersuchungen zwei Drahtelementwerkstoffe bevorzugt werden können: Cu-Basis 1 und Fe-Basis-Drahtelement. Außerdem können auf Basis der dargestellten Ergebnisse und gesammelten Erfahrungen im Kapitel 4.1.3 die Kriterien zur Bestimmung der Parameterfenster vorgeschlagen werden.

4.1.3 Kriterien zur Bestimmung der Q-Grenzen für die Applikation der Drahtelemente und die Gesamtverbindung/ Criteria for the boundary definition for application of the insert elements and the steel-aluminum joints

Zunächst war es wichtig, die Einflussgrößen sowie die Zielgrößen zu bestimmen, die dem in Abbildung 14 dargestellten Prozessmodell entnommen werden können. Die verwendeten Zusatzwerkstoffe spielen hierbei eine wichtige Rolle für den Prozess, denn durch sie können zahlreiche unterschiedliche Verbindungseigenschaften erreicht und beeinflusst werden. Neben der Werkstoffgüte hat die Geometrie, d.h. die Länge und der Durchmesser der Drahtelemente, ebenso Einfluss auf die Fügeverbindung. Durch eine Reduzierung des Querschnitts der Drahtelemente kann eine Minimierung der Flanschlänge erzielt werden, was dem Ziel, einer Gewichtsreduktion der geschweißten Konstruktion, zu Gute kommt.

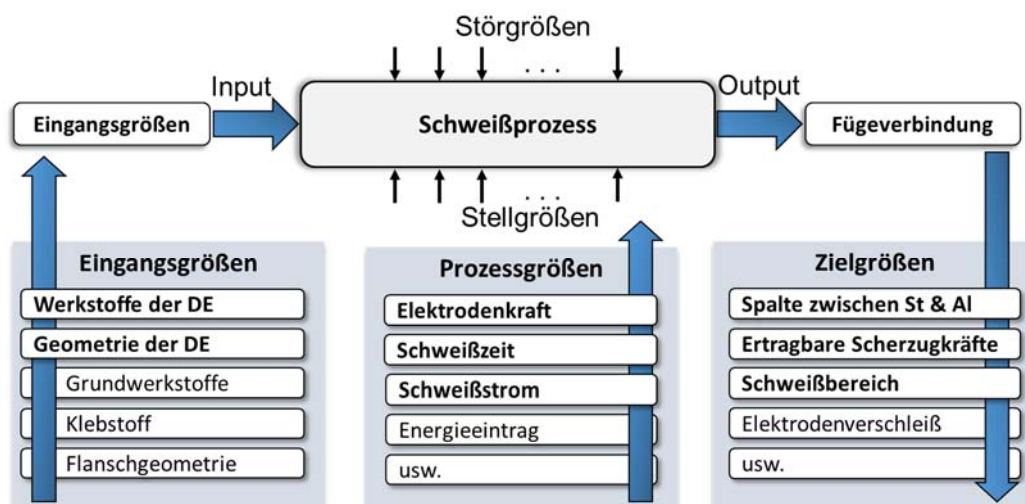


Abbildung 14: Prozessmodell der neuartigen Widerstandsschweißtechnologie

Figure 14: Process model of the novel resistance welding technology

Da es sich um einen zweistufigen Widerstandsschweißprozess handelt, müssen für beide Prozessstufen die Schweißparameter Elektrodenkraft, Schweißstrom und Schweißzeit angepasst werden. Ziel ist das Schweißen im Kurzzeitbereich, beidem die Schweißzeit unterhalb von 50 ms liegt.

Zu den Zielgrößen gehört unter anderem die Dicke der Endspalte zwischen Aluminium- und Stahlblech, welche durch die Geometrie des Drahtelementes als auch die Schweißparameter beeinflusst werden kann. Die ertragbaren Scherzugkräfte sind ebenfalls durch die Spaltdicke, insbesondere bei Verbindungen mit Klebstoff beeinflussbar. Zu guter Letzt muss der Elektrodenverschleiß ebenfalls mitberücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Schweißbereiche auf der Grundlage allgemeiner Richtlinien, bei denen die untere Schweißbereichsgrenze durch den Mindestpunktdurchmesser definiert ist, wie bei SEP

1220-2, ist wegen der fehlenden Schweißlinse nicht möglich. Da die untersuchte Fügetechnologie aus zwei Prozessschritten besteht, müssen zunächst die Schweißparameter für den ersten und danach die Parameter für den zweiten Prozessschritt ermittelt werden. Auch die ursprünglich geplante Verwendung der angepassten Kriterien aus dem Projekt IGF-Nr. 19.878 BR, spezifisch für Schweißmuttern (wie z. B. Gewindegängigkeit), können hier nicht direkt auf die verwendete Elementgeometrie übertragen werden. Deswegen wurden im Rahmen dieser Untersuchungen die mechanischen Eigenschaften zur Bestimmung der unteren Grenze des Schweißbereiches für beide Prozessschritte verwendet, wie in Abbildung 11 (a) dargestellt.

Der erste Prozessschritt wurde mittels Abscherversuch des Drahtelements bewertet. Auf Basis der Ergebnisse in der Abbildung 12 wurde vorgeschlagen, dass das Drahtelement auf Aluminiumblech als transportsicher fixiert gilt, wenn die Abscherkraft mindestens 100 N erreicht. Die entsprechende Stromstärke wurde als untere Qualitätsgrenze I_{\min} definiert.

Danach wurde der Schweißstrom in 1 kA-Schritten erhöht, bis die obere Grenze erreicht war. Die entsprechenden Probenabmessungen betragen 35 x 35 mm. Die Geometrie der Drahtelemente ist nicht verändert worden. Die obere Grenze für den ersten Prozessschritt wurde durch die maximale Verformung des Drahtelements und seinen Eindruck in das Aluminiumblech definiert, vgl. Abbildung 11 (b).

Für den zweiten Prozessschritt wurde ein Scherzugversuch mit der gleichen Probengeometrie und einer Überlappung von 16 mm (wie in [4]) durchgeführt. Die minimale Scherzugkraft zur Definition der unteren Q-Grenze I_{\min} wurde auf 1 kN festgelegt. Danach wurde der Schweißstrom in 1 kA-Schritten erhöht, bis die obere Grenze erreicht war. Die entsprechenden Probenabmessungen betragen 35 x 35 mm. Die Geometrie der Drahtelemente ist nicht verändert worden. Die obere Grenze für den ersten Prozessschritt wurde durch die maximale Verformung des Drahtelements und seinen Eindruck in das Aluminiumblech definiert. Für den zweiten Prozessschritt wurde zu diesem Zweck eine definierte Spalthöhe (s) zwischen Stahl- und Aluminiumblech verwendet. Um die Verbindungsverformung D zu definieren, wurden zwei Proben mit dem gleichen Schweißstrom hergestellt. Basierend auf früheren empirischen Beobachtungen sollte die gesamte Verformung in dem ersten Prozessschritt 40 % nicht überschreiten. Der höchste Schweißstrom, der diese Bedingung für beide geschweißten Proben erfüllte, wurde als obere Grenze des Schweißbereiches I_{\max} bestimmt, siehe Abbildung 11 (b).

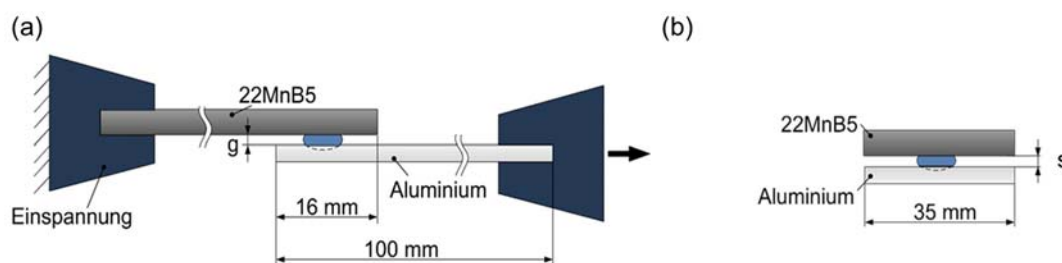


Abbildung 15: Bestimmung der Prozessgrenzen anhand der mechanischen Eigenschaften von Verbindungen nach dem Prozessschritt II. a) unterer Q-Grenze mittels Scherzugversuch; b) obere Q-Grenze anhand der Geometrie

Figure 15: Determination of mechanical properties of joints for determination of lower (a) and upper (b) boundary of welding current ranges after processing stage II

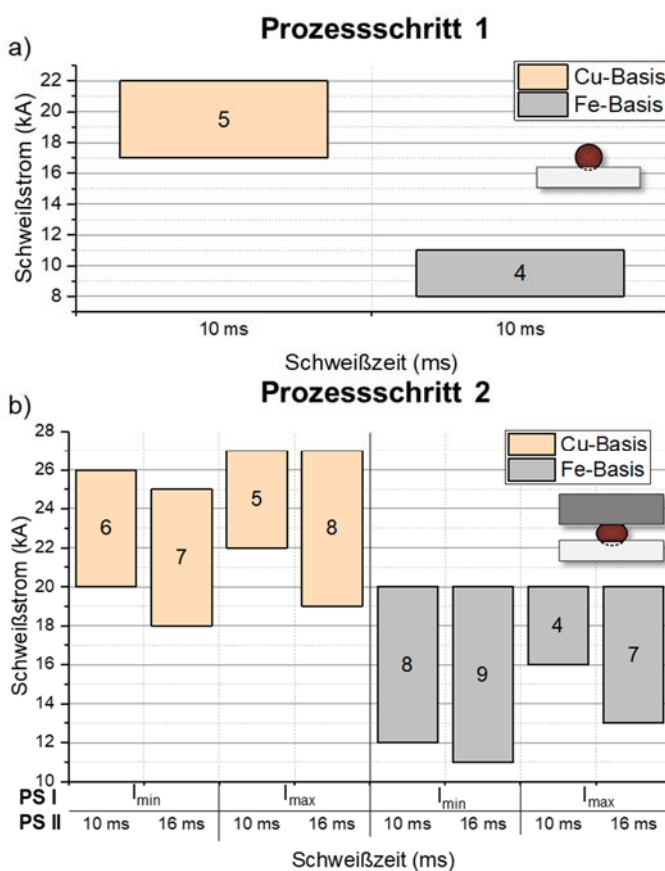
Für den zweiten Prozessschritt sind die identische Probengeometrie und -menge zur Bestimmung der oberen Q-Grenze verwendet worden, jedoch wurde die Spalthöhe s zwischen

den gefügten Blechen als Kriterium für die Grenzbestimmung herangezogen. Die Spalthöhe (Abbildung 15 (b)) wurde mit einem Messschieber ermittelt. Die Messung erfolgte auf beiden Seiten des Drahtelements parallel zu seiner längeren Seite. Aus beiden Messungen ist für jede Probe der Mittelwert berechnet worden.

Der höchste Schweißstrom, bei dem die mittlere Spalthöhe (s) für beide Proben mindestens 0,1 mm betrug und kein sichtbares Rausdrücken des Drahtelements vorlag, bildete die obere Grenze des Schweißbereiches I_{max} . Dieser Wert resultiert aus einem möglichen Klebstoffeinsatz.

4.1.4 Bestimmung der Q-Grenzen für DE-Applikation und die Gesamtverbindung / Welding parameters for insert element application and steel-aluminum joints

Der Abbildung 16 (a) sind die Schweißbereiche für den Prozessschritt I für die Drahtelemente auf Cu- und Fe-Basis zu entnehmen.



Geometrie der DE	
Länge	10±0,01
Durchmesser	Ø 1,6 mm
Grundwerkstoffe	
Aluminium	EN AW-6016; 1,0 mm
Stahl	22MnB5; 1,5 mm
Schweißparameter: Primärprozess	
Elektrodenkraft	2 kN
Schweißzeit	10 ms; 16 ms
Schweißstrom	var. → I_{min} , I_{max}
Schweißparameter: Gesamtprozess	
Elektrodenkraft	4 kN
Schweißzeit	10 ms; 16 ms
Schweißstrom	var. → I_{min} , I_{max}

Abbildung 16: Schweißbereichsdiagramme für PS I (a) und PS II (b)

Figure 16: Welding current ranges for stage I (a) and for stage II (b)

4.2 Analyse der Verbindungsbildung / analysis of bonded zones

4.2.1 Geometrie der Verbindungzone / Geometry of bonded zones

Für die mit I_{\min} und I_{\max} im Prozessschritt I geschweißten Verbindungen wurden Aufnahmen von Querschliffen angefertigt.

Dabei galt es, zunächst die Schweißproben mittig quer zur Längsachse des Drahtelements mittels Nasstrennschleifmaschine zu trennen. Damit der Querschliff möglichst mittig der Längsachse positioniert liegt, wurde der Materialabtrag infolge der Probenpräparation durch einen außermittigen Überstand von 0,05 mm berücksichtigt, siehe Abbildung 17. Die Proben wurden in einem Zweikomponentenharz kalt eingebettet, geschliffen und poliert.

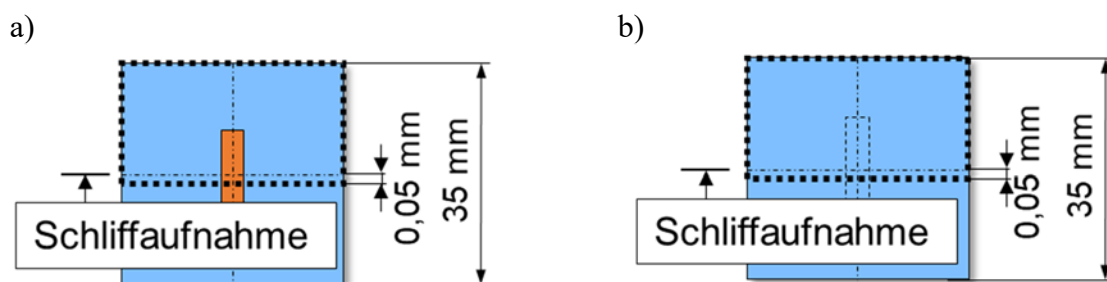


Abbildung 17: Zuschnitt der Proben für die Schliffaufnahmen für PS I (a) und PS II (b)

Figure 17: Preparation of spacemter for metallographic examinations for PS I (a) and PS II (b)

Abbildung 18 zeigt die Querschnittsaufnahme der Drahtelemente nach dem Prozessschritt I, die an der unteren und oberen Grenze mit 2 kN und 10 ms mit Drahtelementen auf Cu- und Fe-Basis geschweißt wurden.

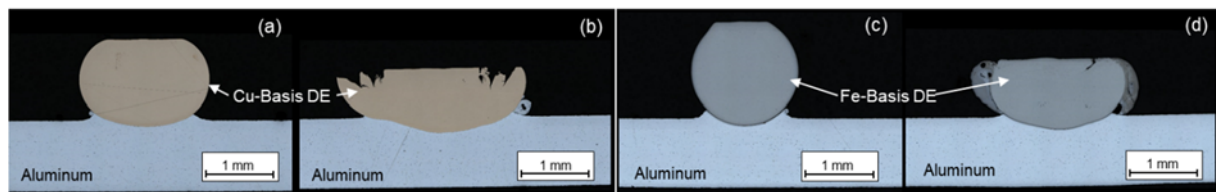


Abbildung 18: Querschliffe der auf Aluminiumblech während des Prozessschrittes I aufgeschweißten Cu- und Fe-Basis-Drahtelemente mit 2 kN Elektrodenkraft und 10 ms Schweißzeit bei minimalem Schweißstrom (a, c) und maximalem Schweißstrom (b, d)

Figure 18: Cross sections of Cu-based and Fe-based insert elements (IE) welded on aluminum sheet on the stage I with 2 kN welding force and 10 ms welding time with lower limit for welding current (I_{\min}) (a, c) and upper limit for welding current (I_{\max}) (b, d)

Ein steigender Schweißstrom führt zu einem höheren Wärmeeintrag und infolgedessen zu einer stärkeren Verformung der Drahtelemente sowie einer größeren Verbindungsfläche zwischen Aluminium und Drahtelement.

Die Querschliffe aller Verbindungen mit Drahtelementen zwischen Stahl- und Aluminiumblechen sind in Abbildung 19 (a - h) dargestellt. Die Verbindungen (a) und (b) mit Kupferdrahtelementen sowie (e) und (f) mit Stahldrahtelementen wurden im Prozessschritt I mit

einer Elektrodenkraft von 2 kN, 10 ms Schweißzeit und einem Schweißstrom I_{\min} geschweißt. Die Verbindungen (c), (d), (g) und (h) wurden im PS I mit dem Schweißstrom I_{\max} geschweißt.

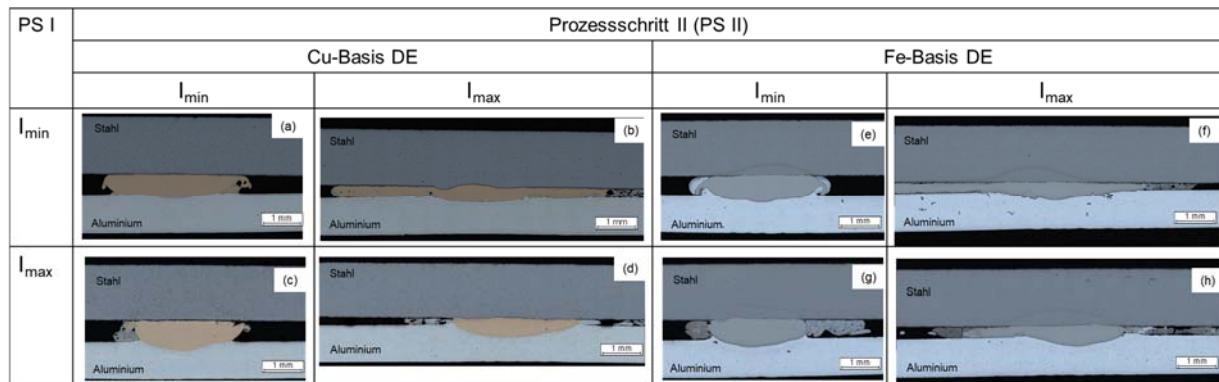


Abbildung 19: Querschnitte nach dem Prozessschritt II, geschweißt mit Drahtelementen (DE) auf Cu- und Fe-Basis mit 4 kN Elektrodenkraft und 16 ms Schweißzeit mit (a, c, e, g) minimalem Schweißstrom I_{\min} und (b, d, f, h) mit maximalem Schweißstrom I_{\max} ; (a, b, e, f) wurden im ersten Prozessschritt mit I_{\min} und (c, d, g, h) mit I_{\max} geschweißt.

Figure 19: Cross sections of joints after stage II welded with 4 kN welding force and 16 ms welding time with lower limit for welding current I_{\min} (a, c, e, g) and upper limit for welding current I_{\max} (b, d, f, h) by using Cu-based and Fe-based insert elements (IE)

Beim Kurzzeitschweißprozess bildete sich keine Schweißlinse aus. Die Erhöhung des Schweißstroms führte zu einer größeren plastischen Verformung der Drahtelemente und als Folge zu einer höheren Scherzugfestigkeit aufgrund der größeren Verbindungsfläche. Die Drahtelemente in den Verbindungen, die mit minimalem Schweißstrom (I_{\min}) geschweißt wurden, sind weniger verformt gegenüber denen mit maximalem Schweißstrom (I_{\max}). Dennoch ist es schwierig, Unterschiede bei den Gesamtverbindungen herauszufinden, die im Prozessschritt I mit I_{\min} und I_{\max} gefertigt wurden.

4.2.2 REM-Analysen der Verbindungszonen / SEM analysis of bonded zones

Alle dargestellten Querschnittstellen wurden mittels Rasterelektronenmikroskop (siehe Kapitel 3.2.4) sorgfältig untersucht. Im Gegensatz zu Drahtelementen auf Cu-Basis ist für Verbindungen mit Drahtelementen auf Fe-Basis die Grenze zwischen Drahtelement und Aluminium sehr klar sichtbar, ohne Diffusionsschicht oder Phasensaum, siehe Abbildung 20.

Mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX-Analyse) wurde die Zusammensetzung der Markierung EDX 1 mit 50 wt.-% Al, 35 wt.-% Fe, 10 wt.-% Cr und 5 wt.-% Ni ermittelt. Dabei ist die Bildung von Al-Fe-Cr-Ni-Phasen (EDX 1) nur an den Stellen zu erwarten, an denen Drahtelement und Aluminium stark mechanisch deformiert sind.

Für Verbindungen mit Cu-Basis-DE ist dagegen ein Phasensaum zu beobachten, der mit der Schweißstromstärke zunahm. Die chemische Zusammensetzung des Phasensaums konnte für Verbindungen mit I_{\min} aufgrund der verschwindend kleinen Dicke nicht ermittelt werden. Für Verbindungen mit I_{\max} wurde mittels EDX-Analyse (EDX 2, Abbildung 21) eine Zusammensetzung von 59,5 wt.-% Al und 40,5 wt.-% Cu ermittelt.

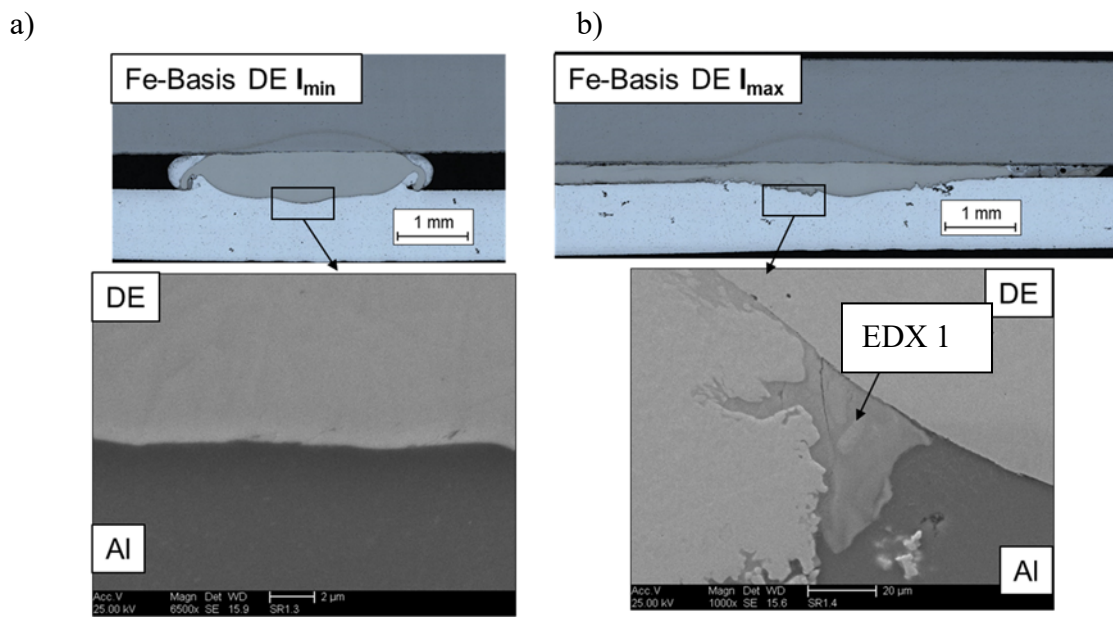


Abbildung 20: REM Aufnahme der Zone zwischen Aluminium und Drahtelement für Verbindungen mit Fe-Basis-DE, wobei die Verbindungen mit I_{\min} (a) bzw. mit I_{\max} (b) gefügt sind

Figure 20: SEM micrographs of bonded zones between IE and aluminum in joints with Fe-based IE, prepared with I_{\min} (a) and I_{\max} (b)

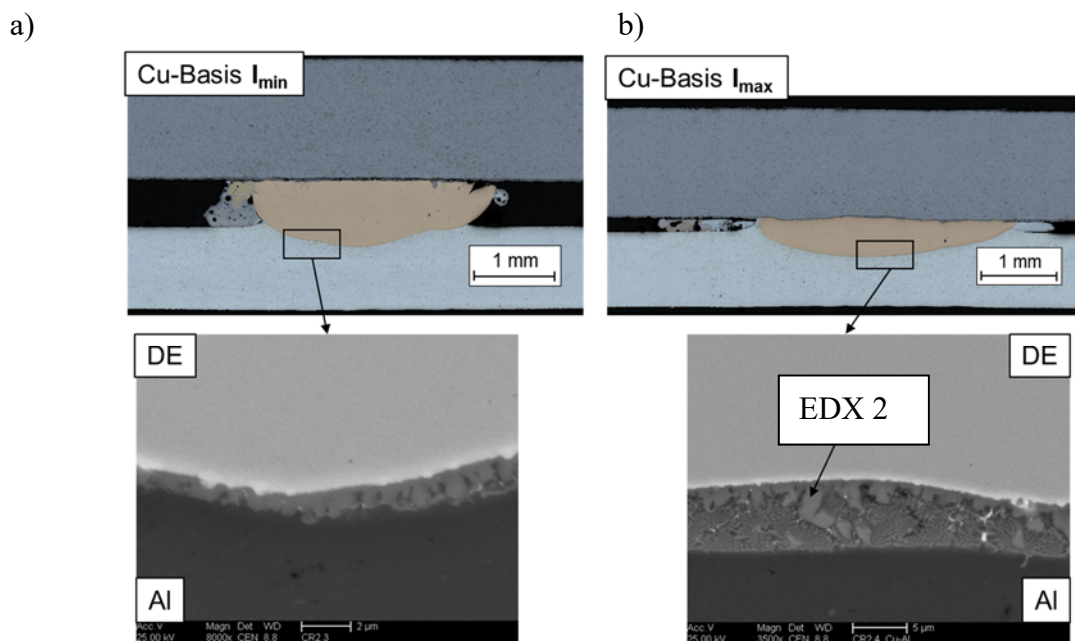


Abbildung 21: Schlibfbilder der Gesamtverbindungen mit Cu-Basis-DE mit dem entsprechenden REM-Aufnahmen und typischen Merkmalen für beide Drahtelementwerkstoffe, wobei die Verbindungen mit I_{\min} (a) bzw. mit I_{\max} (b) gefügt sind

Figure 21: SEM micrographs of bonded zones between IE and aluminum in joints with Cu-based insert element welded with I_{\min} (a) and I_{\max} (b)

Der Vergleich zwischen Cu-Basis- und Fe-Basis-DE entsprechend der REM-Analysen ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Vergleich zwischen Cu- und Fe-Basis-DE entsprechend der REM-Analysen

Table 15: Comparison between Cu-based and Fe-based IE based on SEM analyses

Cu-Basis-DE	Fe-Basis-DE
<ul style="list-style-type: none"> • untere Q-Grenze: Es bildet sich ein Saum aus $\alpha+\theta$ Phase mit einer Dicke von ca. 1-2 μm. • obere Q-Grenze: Der Saum wächst und es treten zunehmend Cu-reiche Phasen auf. Bis ca. 5 μm Saumdicke ist eine gute Festigkeit vorhanden. • Eine erhöhte Schweißzeit führt zum Wachstum des Saumes. Bei einem Saum von 20 μm ist die Festigkeit ungenügend. 	<ul style="list-style-type: none"> • untere Q-Grenze: Die Grenze zwischen Drahtelement und Aluminium ist deutlich zu erkennen. • obere Q-Grenze: Bildung von Al-Fe-Cr-Ni-Phasen ist an den Stellen möglich, wo Drahtelement und Aluminium stark mechanisch deformiert sind. • Der Phasensaum in der Verbindungszone wurde nicht nachgewiesen. Die Festigkeit wird vermutlich durch die Deformation der DE und des Al-Blechs beim Schweißen bestimmt.

4.2.3 Wärmeeintrag in das Stahlblech / Heat input into the steel sheet

Durch eine verkürzte Schweißzeit, kombiniert mit einer kleinen Fügekontaktfläche, die die Energiekonzentration erhöht und damit den Wärmeeintrag in der WEZ reduziert, wird die Klebstoffschädigung minimiert.

Zusätzlich wurden die gleichen Querschnitte mit Nital-Ätzung vorbereitet, um den Einfluss des Wärmeeintrags in die Fügezone nachzuweisen, siehe Abbildung 22 für Cu-Basis-Drahtelemente und Abbildung 23 für Fe-Basis-DE.

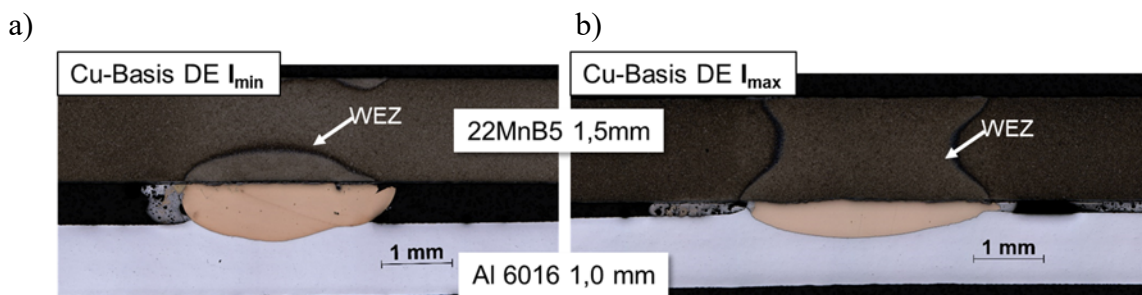


Abbildung 22: Querschliffe der Verbindungen nach dem PS II (mit Nital-Ätzung) für Cu-Basis-Drahtelemente, gefügt mit Schweißstrom I_{\min} (a) und I_{\max} (b)

Figure 22: Cross sections of joints after stage II (nital-etched) welded with 4 kN welding force and 16 ms welding time with I_{\min} (a) and I_{\max} (b) for Cu-based IE

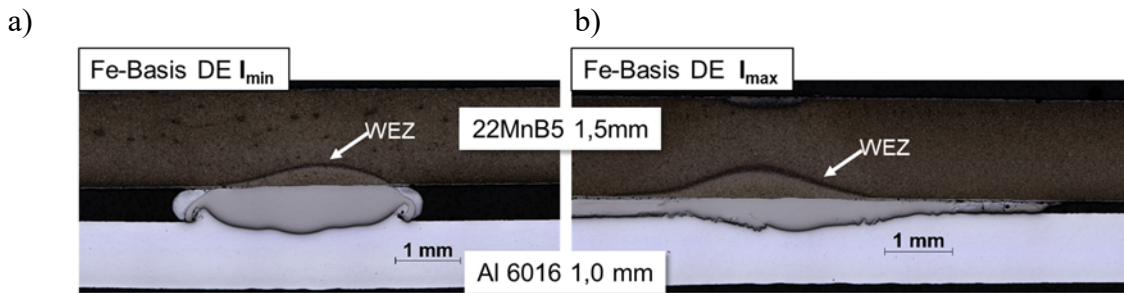


Abbildung 23: Querschliffe der Verbindungen nach dem PS II (mit Nital-Ätzung) für Fe-Basis-Drahtelemente, gefügt mit Schweißstrom I_{min} (a) und I_{max} (b)

Figure 23: Cross sections of joints after stage II (nital-etched) welded with 4 kN welding force and 16 ms welding time with I_{min} (a) and I_{max} (b) for Fe-based IE

Im Vergleich zu ungeätzten Proben kann hier die Wärmebeeinträchtigung (WEZ) im Stahlblech beobachtet werden. Für beide Drahtelemente, sowohl auf Cu-Basis als auch auf Fe-Basis, ist mit Erhöhung des Schweißstroms ein Wachstum der Wärmebeeinträchtigung zu beobachten.

Die Verbindungen mit Cu-Basis-DE haben eine etwas ausgeprägtere WEZ aufgrund der höheren Schweißstromeinstellungen.

Um einen Einfluss der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der WEZ in 22MnB5 zu untersuchen, wurden Zugversuche an Proben bei einseitiger Belastung mit einem Opferblech in Anlehnung an das Forschungsprojekt IGF-Nr. 18.939 angefertigt. Die Versuche wurden an „schmalen“ Proben mit einer Breite von 25 mm und einer Länge von 235 mm durchgeführt. Das Opferblech mit den Abmessungen 35×35 mm wurde in der Mitte aufgeschweißt. Es wurden 5 Proben im Ausgangszustand sowie jeweils 5 Proben mit Drahtelementwerkstoff (I_{min} und I_{max}) vorbereitet und mit der Zugmaschine Zwick Z250 geprüft. Dabei wurde die maximale erreichte Kraft gemessen und die gesamte Energieaufnahme aus dem gemessenen Traversenweg bestimmt. Diese Werte wurden mit denen aus dem Forschungsprojekt IGF-Nr. 18.939 verglichen, siehe Abbildung 24.

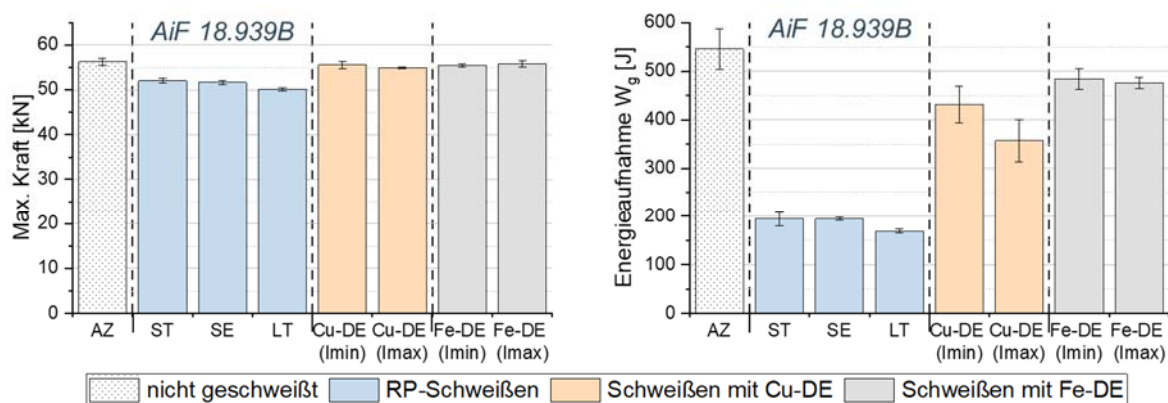


Abbildung 24: Maximale Zugbelastung (a) und Bruchenergie (b) für 22MnB5 bei einseitiger Belastung mit und ohne Drahtelemente (Cu-Basis und Fe-Basis)

Figure 24: Maximum tensile load (a) and fracture energy (b) for 22MnB5 with one-sided loading with and without welds for two types of insert elements

4.3 Herstellung der Mehrpunktverbindungen / Manufacturing of joints with several insert elements

4.3.1 Schweißbereichsdiagramme für St-Al- Mehrpunktverbindungen / Welding current ranges for joints with several insert elements

Basierend auf den Ergebnissen aus den vorherigen Arbeitspaketen wurden die Mehrpunktverbindungen hergestellt.

Hier wurden die Schweißparameter der Einpunktproben genutzt, um die Fügeverbindungen mit drei Punkten herstellen zu können. Die Parameter wurden angepasst.

So wurden die Proben mit der Geometrie C (Abbildung 14) verwendet und jeweils drei Drahtelemente auf Cu-Basis sowie Fe-Basis aufgeschweißt, wie der Abbildung 25 (a) zu entnehmen ist.

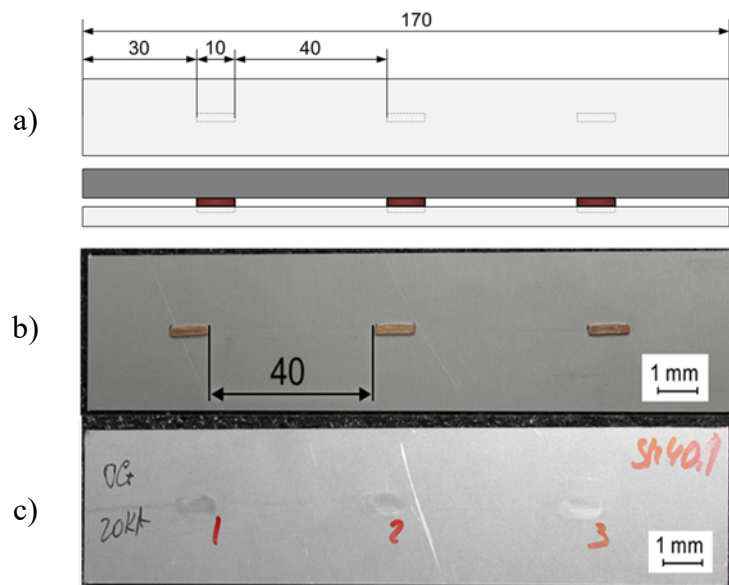


Abbildung 25: Probengeometrie für die Mehrpunktverbindungen mit 40 mm Abstand zwischen Drahtelementen: Skizze (a), reale Probe nach PS I (b) und Probe nach PS II (c)

Figure 25: Specimen geometry for joints with three insert elements with 40 mm distance between them; sketch (a), real sample after PS I (b) and sample after PS II (c)

Es wurden bei der DE-Applikation die gleichen Parametersätze für die Mehrpunktproben wie für die Verbindungen mit einem Punkt verwendet. Allerdings mussten die Schweißströme für die Gesamtverbindungen erhöht werden, damit die Verbindungen zusammenhielten, ohne dass eines der Drahtelemente versagte. Der Schweißstrom wurde solange erhöht, bis es möglich war die Mehrpunktproben mittels Meißelprüfung zu zerstören, ähnlich wie bei Einpunktproben. So wurden für beide Drahtelemente (Cu-Basis und Fe-Basis) die Schweißströme für I_{\min} erhöht, I_{\max} (obere Q-Grenze) blieb unverändert, da sich das DE zu stark verformte. Die Schweißbereichsdiagramme für Mehrpunktproben sind in der Abbildung 26 dargestellt.

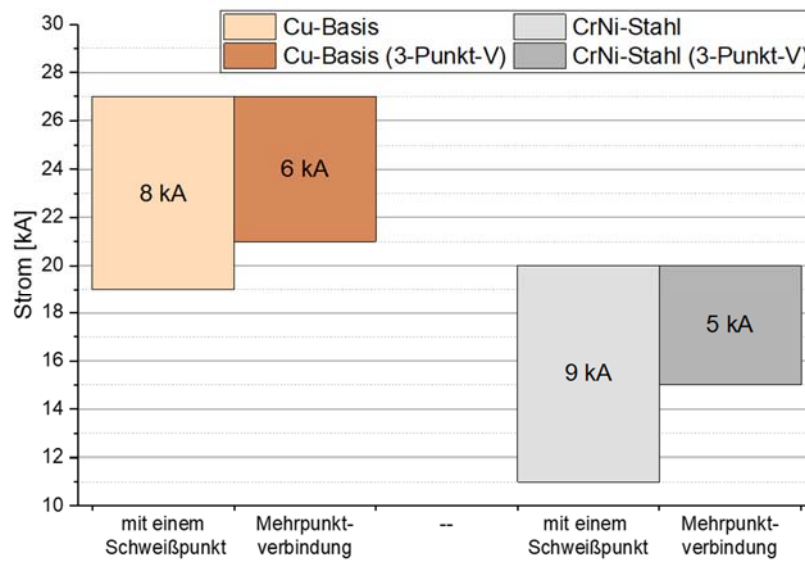


Abbildung 26: Parameterfenster für die Mehrpunktverbindungen im Vergleich zu Einpunktverbindungen

Figure 26: Welding current ranges for joints with three insert elements for stage II

4.3.2 Vorschläge für optimale Abstände zwischen den Schweißpunkten/ Suggestions for optimal distance between insert elements

Des Weiteren bestand die Fragestellung, welche Abstände zwischen den Drahtelementen als optimal betrachtet werden können. Die Abstände zwischen den Drahtelementen wurden zwischen 20 – 50 mm variiert und der Abstand von 40 mm als bestgeeignet eingestuft. Für weitere Präzisierungen der Aussagen wurden Proben mit Abständen von 30 mm und 40 mm vorbereitet und im Zugversuch geprüft. Es wurden Proben mit Abmessungen von 140 mm × 100 mm verwendet, und analog der Einpunktverbindungen hergestellt. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in der Abbildung 27 dargestellt.

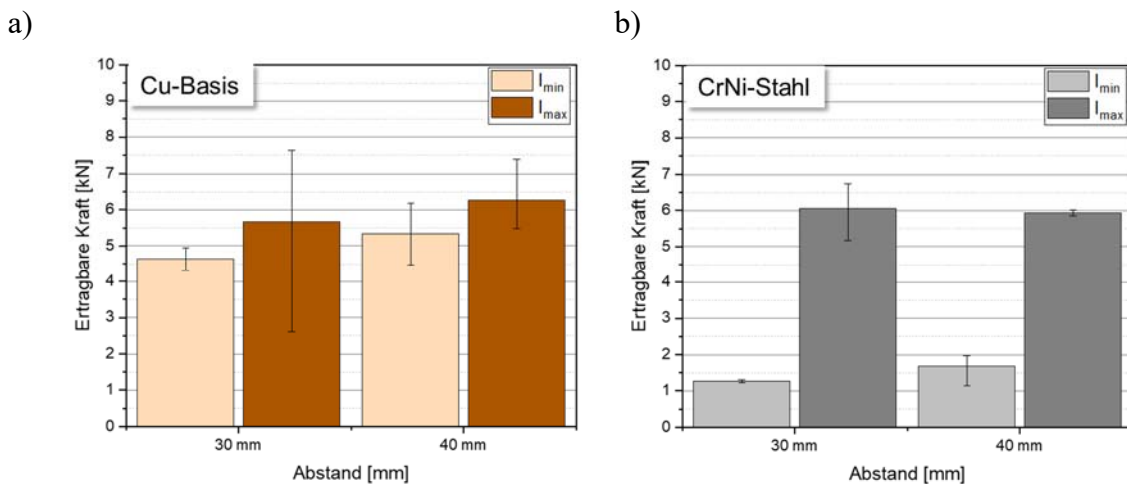


Abbildung 27: Ergebnisse der Zugversuche für Mehrpunktproben mit variablen Abständen von 30 mm und 40 mm für Cu-Basis-DE (a) und für Fe-Basis-DE (b)

Figure 27: Tensile shear load for samples with three insert elements and variable distances 30 mm and 40 mm for Cu-based IE (a) and for Fe-based IE (b)

Beim Schweißen mit einem Abstand von 40 mm sind die Scherzugkräfte sowohl für Cu-DE als auch für Fe-DE etwas höher und stabiler.

4.3.3 Herstellung der Mehrpunktverbindungen mit Klebstoffschicht / Manufacturing of joints with several insert elements with adhesive layer

Alle Mehrpunktproben, sowohl mit Klebstoffschicht als auch ohne wurden nach dem Schweißen im Ofen bei einer Temperatur von 180°C für 30 Minuten ausgehärtet. Alle geschweißten Proben haben den Temperaturtest im Ofen, der ähnlich dem KTL-Prozess ist, bestanden.

Der Klebstoff wurde in zwei Varianten aufgetragen. Zum einen wurde er gleichmäßig mit einem Spachtel auf dem 22MnB5-Blech verteilt und zum anderen wurden zwei Raupen seitlich vom Drahtelement aufgetragen.

4.3.4 Ermittlung der Spaltgeometrie / Determination of the gap geometry

Die Spaltgeometrie wurde für alle geschweißten Mehrpunktproben mittig zwischen den Drahtelementen mittels Fühlerlehre ermittelt. In der Abbildung 28 ist beispielhaft dargestellt, wo die Messungen erfolgten. Für die Verbindungen mit variablen Abständen, die mit I_{max} geschweißt wurden, wurden Spalthöhen zwischen 0,1 bis 0,5 mm ermittelt. Dies entspricht den gewünschten Kriterien für den Spalt ($0,1 \text{ mm} < \text{Spalt} < 1 \text{ mm}$).

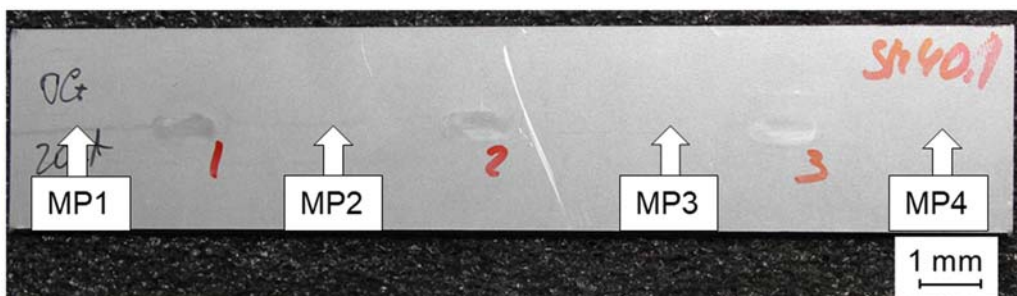


Abbildung 28: Vermessung der Spaltgeometrie zwischen Drahtelementen (mittig) für Verbindungen mit drei DE

Figure 28: Measurement of the gap geometry between insert elements (in the middle) for joints with three IE

Die Spaltgeometrien für die Verbindungen mit 40 mm Abstand, die mit I_{min} und I_{max} geschweißt wurden, sind in der Abbildung 29 dargestellt.

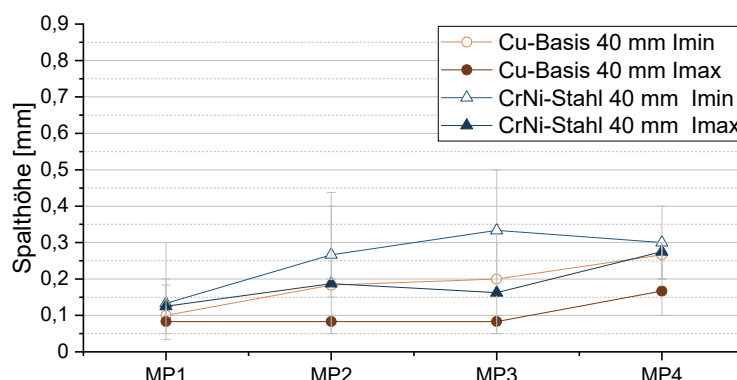


Abbildung 29: Spaltgeometrie der Verbindungen mit 40 mm Abstand für Cu-Basis-DE und Fe-Basis-DE

Figure 29: Gap geometry of the joints with 40 mm distance for Cu-based IE and Fe-based IE

Gelegentlich wurde eine Spalthöhe von 0,05 mm für Verbindungen, die mit I_{max} geschweißt sind, ausgemessen. Obwohl diese Spalthöhe unter den gewünschten Kriterien für den Spalt liegt, ist es nicht auszuschließen, dass die Geometrie der Proben großen Einfluss auf die Messungen hat, bzw. es ist nicht auszuschließen, dass bei den Proben eine minimale Schiefstellung vorkam. Um die Spalthöhe zu vergrößern reicht es aus, den Schweißstrom zu verringern.

4.3.5 Herstellung der 3-Blech-Verbindungen / Manufacturing of three sheet joints

Dreiblechverbindungen mit zwei Blechen aus 22MnB5 und einem Aluminiumblech wurden mittels DE verschweißt und im Zugversuch stichprobenweise geprüft. Es wurden Bleche mit der Geometrie B (Abbildung 6) verwendet, wobei statt eines Bleches aus 22MnB5 entweder zwei Bleche aus 22MnB5 oder 22MnB5 mit HX220 durch zwei Schweißpunkte mittels Widerstandspunktschweißen verbunden wurden. Die Proben wurden mit einer Überlappung von 16 mm vorbereitet. Die Verbindungen mit Klebstoff wurden in ausgehärtetem Zustand geprüft.

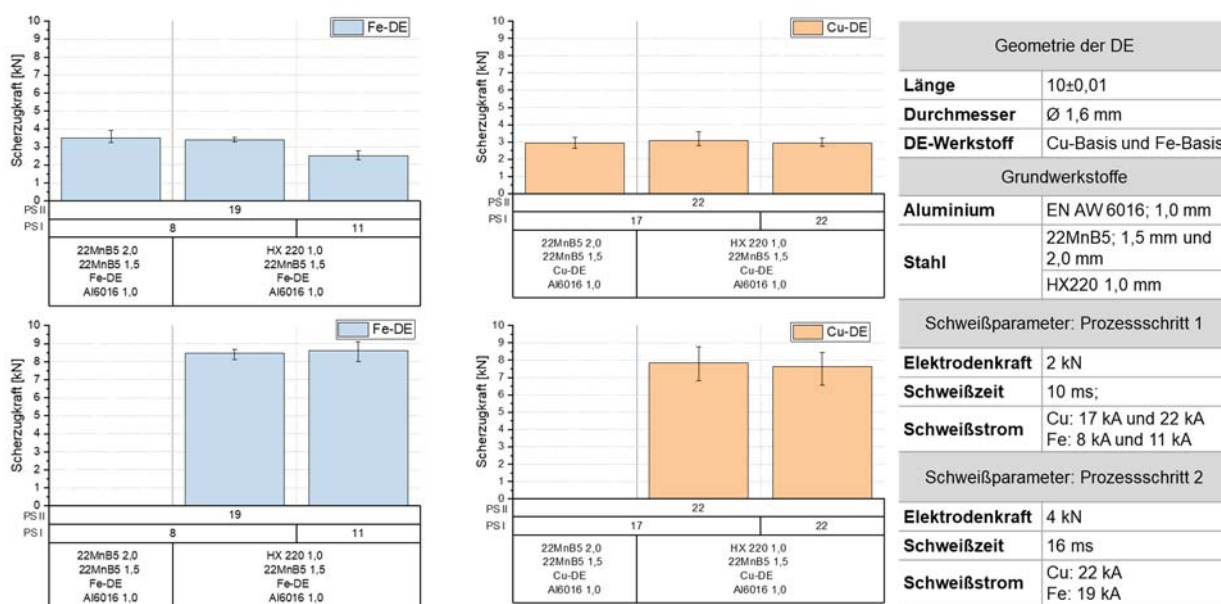


Abbildung 30: Ergebnisse der Scherzugversuche für die 3-Blech-Verbindungen

Figure 30: Tensile shear load for three sheet joints with insert element

Die Werte liegen auf einem erwarteten Niveau. Genauso wie für die Zweiblechverbindungen wurde hier die Erhöhung der Scherzugkräfte bei dem Einsatz des Klebstoffs nachgewiesen.

4.4 Festigkeitsversuche / Investigations of joint strength

4.4.1 Verbindungsfestigkeit für Verbindungen mit einem Schweißpunkt ohne Klebstoff / Joint strength for joints with one insert element without adhesive

Für die in Kapitel 4.1.4 dargestellten Parameterfenster wurden die Scherzugversuche an der unteren und oberen Qualitätsgrenze durchgeführt. Die Proben wurden wie in Abbildung 15 a)

hergestellt und geprüft. Der Vergleich zwischen den Scherzugfestigkeiten für Verbindungen mit Cu- und Fe-Basis-Drahtelementen ist in der Abbildung 31 dargestellt.

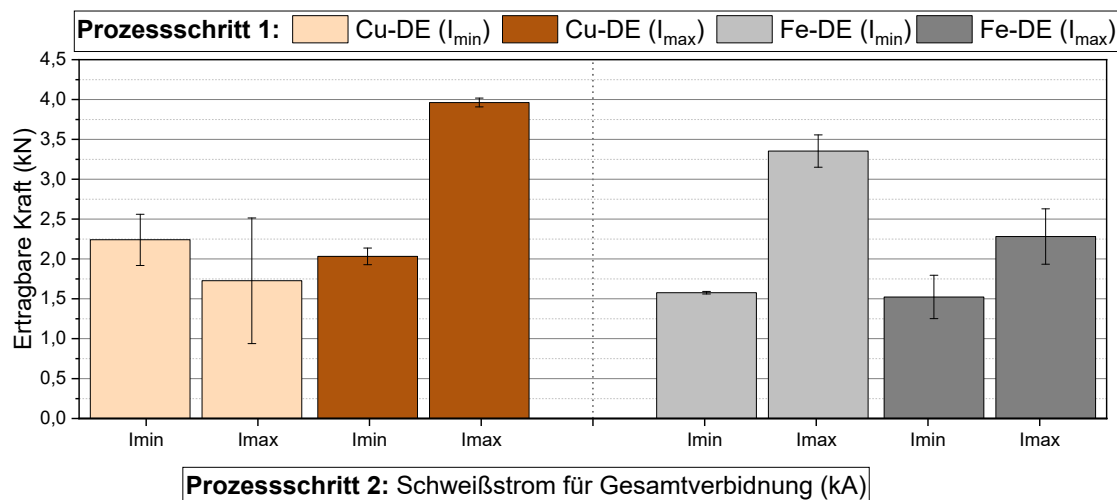


Abbildung 31: Scherzugfestigkeiten von Verbindungen mit Drahtelementen auf Cu- und Fe-Basis bei verschiedenen Parametervariation.

Figure 31: Tensile shear load of joints with insert element (Cu- and Fe-based)

Bei beiden Drahtelementwerkstoffen führte die Erhöhung des Schweißstroms zu höheren Scherzugfestigkeiten. Der Anstieg der Scherzugkräfte von Verbindungen, die mit Parametern an der oberen Grenze vorbereitet wurden, war sowohl für Drahtelemente auf Cu- als auch auf Fe-Basis für alle Parameterkombinationen ähnlich. Ein anderes Ergebnis zeigte sich hingegen beim Cu-Basis-Drahtelement, welches mit I_{min} im Prozessschritt I aufgeschweißt wurde. Da das Drahtelement mit I_{min} im Prozessschritt I zwar aufgeschweißt, aber nur wenig verformt wurde, kommt es zu einer sehr kleinen Kontaktfläche und somit zu einem hohen Wärmeeintrag bei I_{max} im Prozessschritt II. Dies kann zur Bildung einer kritischen Schichtdicke der intermetallischen Phasen führen. Das typische Versagensverhalten für Verbindungen mit DE auf Cu- und Fe-Basis verdeutlichen die Aufnahmen der Bruchflächen in der Abbildung 32.

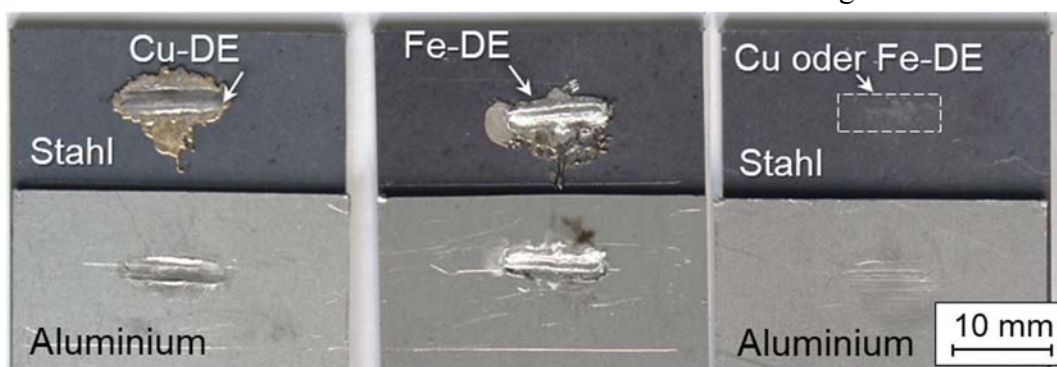


Abbildung 32: Die typischen Bruchflächen der Verbindungen mit Drahtelementen

Figure 32: Occurring failure modes by tensile shear load for welds with Cu-based and Fe-based IE and riveted joint

Alle Drahtelemente wurden während des Schweißprozesses signifikant verformt und es kam zum Bruch zwischen dem Aluminiumblech und dem Drahtelement. Dieses Bruchverhalten trat

bei allen geschweißten Proben mit Drahtelementen unabhängig von den Schweißparametern und den Drahtelementwerkstoffen auf.

4.4.2 Verbindungsfestigkeit für Verbindungen mit einem Schweißpunkt mit Klebstoff und Vergleich mit Nietverbindungen/ Joint strength for joints with one insert element with adhesive and comparing with riveted joints

Für die Herstellung der Nietverbindungen wurde eine Nietzange RIVSET® Gen² von Böllhoff verwendet. Das hydraulische System kann eine maximale Setzkraft von 78 kN und eine Niederhalterkraft von 8 kN aufbringen. Der C-Rahmen besitzt eine Bügelöffnung von 300 mm. Die Nietzufuhr erfolgte per Hand. Eingesetzt wurden von Hornbostel speziell zum Verbinden von hoch- und ultrahochfestem Stahl mit Aluminium entwickelte Nieten HDX 6,5×6,0 (Härte: 555 ± 30 HV, Beschichtung ZnNi+B18E) [49]. Für die verwendete Werkstoffkombination der Verbindungen wird eine Überlappung von 18 mm empfohlen. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde diese auf 16 mm reduziert. Es wurde eine Fügekraft von 77 kN und eine Niederhalterkraft von 6 kN eingestellt.

Die Werkstoffkombination ist besonders kritisch, weil das Aluminiumblech zu dünn ist. Die Ergebnisse der Scherzugversuche sind der Abbildung 33 zu entnehmen.

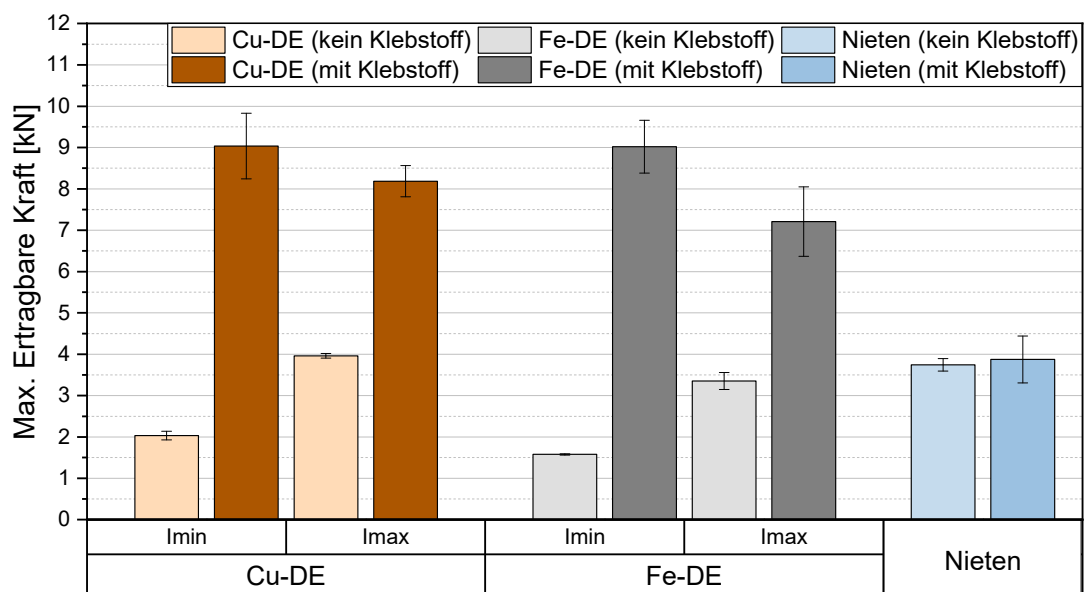


Abbildung 33: Maximal ertragbare Kräfte der Verbindungen mit Cu-Basis- bzw. Fe-Basis-Drahtelementen (abhängig von der Stromhöhe I_{min} bzw. I_{max}) und der genieteten Proben ohne und mit Klebstoffeinsatz

Figure 33: Tensile shear load of joints with insert element (Cu- and Fe- based) with and without additional adhesive layer and compared to riveting process with and without adhesive.

Eine Erhöhung des Schweißstroms bei der Herstellung der Gesamtverbindung führt zu einer höheren Zugfestigkeit. Die maximalen Scherfestigkeiten an den oberen Grenzen können mit genieteten Verbindungen verglichen werden. Bei Verwendung des Klebstoffs nimmt die Festigkeit der mit DE geschweißten Verbindungen massiv zu. Dennoch ist für Nietverbindungen mit Klebstoff kaum eine Erhöhung der Festigkeit zu erkennen. Allerdings sinkt mit zunehmendem Schweißstrom die Festigkeit der Verbindungen mit DE und Klebstoff, im Gegensatz zu den Verbindungen ohne Klebstoff.

Um das Klebstoffverhalten im Querschnitt anzuschauen, wurden Makroaufnahmen vorbereitet, siehe Abbildung 34. Es ist deutlich zu sehen, dass in beiden Fällen, beim Schweißen mit geringerem Schweißstrom und maximalem Schweißstrom, der Spalt vollständig mit Klebstoff gefüllt ist. Für I_{\min} ist keine Klebstoffbeschädigung durch den Wärmeeintrag während des Schweißprozesses zu erkennen. Mit zunehmendem Schweißstrom ist jedoch eine stärkere Verformung des DE und eine lokale Schädigung des Klebstoffs zu beobachten.

Im Querschnitt der Nietverbindungen ist nur eine sehr dünne Klebstoffschicht zwischen Stahl und Aluminium zu erkennen. Aufgrund der hohen Fügekraft wurde der Klebstoff während des Fügeprozesses nahezu vollständig verdrängt. Dies führte zu Fehlstellen ohne Klebstoff und dadurch zu den niedrigen ertragbaren Scherzugkräften für Nietverbindungen mit Klebstoff.

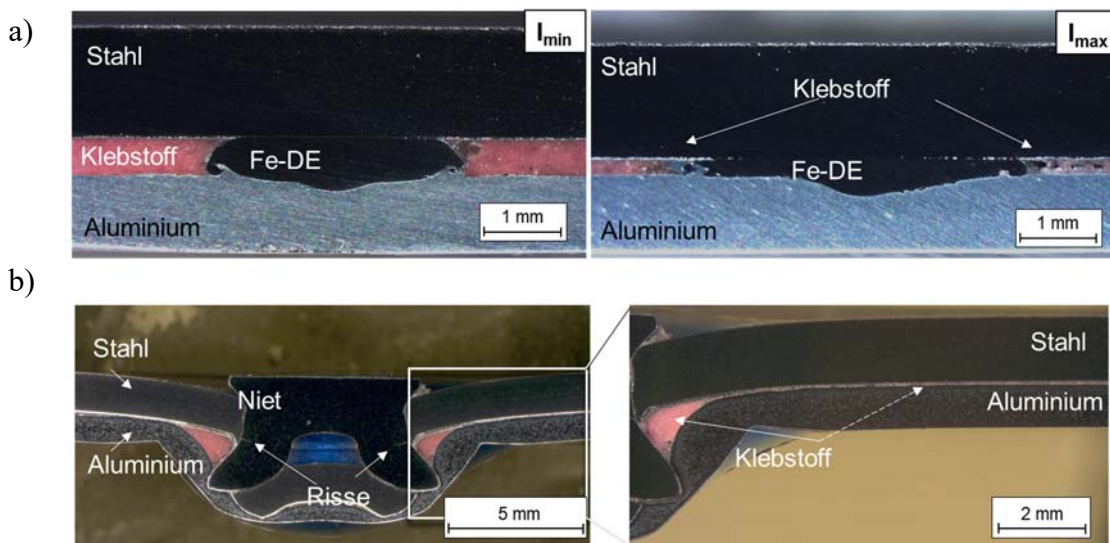


Abbildung 34: Makroaufnahmen der Querschnitte der Proben mit einem DE geschweißt mit I_{\min} und I_{\max} (a) im Vergleich zum Niet (b)

Figure 34: Cross sections of joints with adhesive bonding: with Fe-based IE and welded with I_{\min} and I_{\max} (a) and riveted steel-aluminum (b).

4.4.3 Analyse der Bruchfläche und Zusammenhänge zwischen Bruchfläche und Verbindungsfestigkeit / Analysis of the fracture surface and the correlation between fracture surface and joint strength

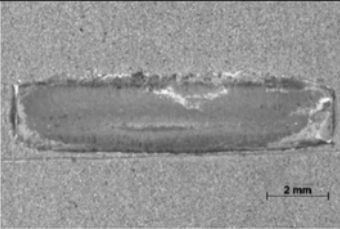

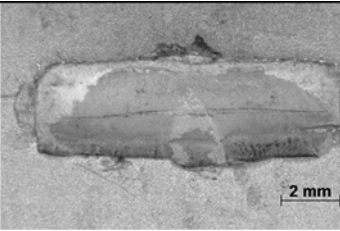

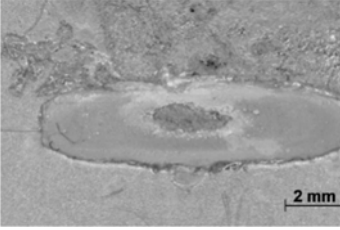
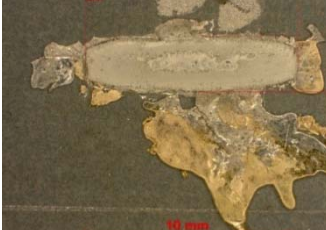
Aus allen definierten Bruchflächen für Cu-Basis-DE können 3 typische Bruchverhalten unterschieden werden. Dabei wurden die Größe der Bruchfläche, farbliche Unterschiede und die Ergebnisse aus den Zugversuchen berücksichtigt. Es konnten drei typische Bruchverhalten differenziert werden, siehe Tabelle 16:

- Typ 1 erreicht eine Zugkraft von 1-3 kN. Optisch sind einige farbliche Unterschiede in der Bruchfläche des Al-Blechs erkennbar. Mit zunehmendem Anteil der helleren Bereiche erhöht sich die erreichte Zugkraft.
- Zu Typ 2 gehören Verbindungen mit maximaler Gesamtbruchfläche, wobei das Versagen auf der Aluminiumseite stattfindet.

- Zum Typ 3 gehören Verbindungen, die ähnlich dem Typ 2 eine maximale Bruchfläche besitzen. Allerdings fällt hier die erreichbare Zugkraft deutlich ab. Auffällig sind eine typische Pore in der Mitte sowie große Spritzer.

Tabelle 16: Typisches Bruchverhalten von Verbindungen mit Cu-Basis-Drahtelement

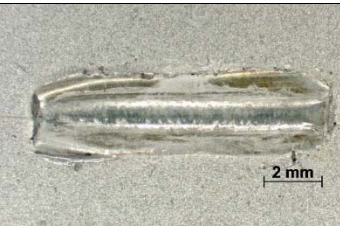
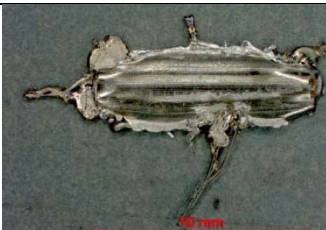
Table 16: Typical fractured surfaces for joints with Cu-based IE

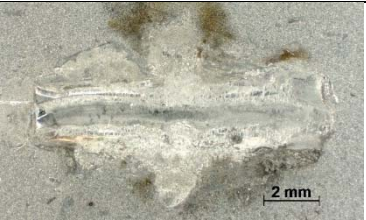
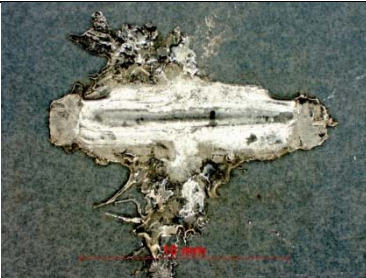
Typ	Aluminiumseitig	Stahlseitig	Merkmale
1			Bruchfläche ca. 19...25 mm ² Scherzugkraft: 1,5...3 kN <i>Mit Wachstum der helleren Bereiche steigt die Scherzugkraft</i>
2			Bruchfläche ca. 30...37 mm ² Scherzugkraft: 3 kN
3			Bruchfläche ca. 27...34 mm ² Scherzugkraft: weniger als 1 kN <i>Pore in der Mitte der Bruchfläche</i>

Für die Verbindungen mit Fe-Basis-DE konnten nur zwei typische Bruchverhalten unterscheiden werden: einerseits mit glänzender und andererseits mit matter Bruchoberfläche auf der Al-Blechseite, siehe Tabelle 17. Je größer die Bruchfläche ist, desto höher waren die erreichten Verbindungskräfte im Scherzugversuch.

Tabelle 17: Typisches Bruchverhalten von Verbindungen mit Fe-Basis-Drahtelement

Table 17: Typical fractured surfaces for joints with Fe based IE

Typ	Aluminiumseitig	Stahlseitig	Merkmale
1			Bruchfläche ca. 18...32 mm ² Scherzugkraft: 1...2 kN

2			<p>Bruchfläche ca. 25...32 mm² Scherzugkraft: ca. 3 kN</p>
---	---	--	---

Der Zusammenhang zwischen helleren Bereichen und zunehmender Scherzugkraft bei Cu-Drahtelementen wurde noch weiter untersucht. Um die optischen Unterschiede besser zu erklären und zuzuordnen, erfolgten für die Proben Element-Mappings. Dafür wurde erneut die EDX-Analyse (Energie Dispersive Röntgenspektroskopie) verwendet, indem der Elektronenstrahl Punkt für Punkt ausgewählte Bereiche rasterterte. In der Abbildung 35 ist ein Element-Mapping für die aluminiumseitige Bruchfläche vom Typ 2 für Cu-Basis-Drahtelemente dargestellt. Die helleren Bereiche entsprechen einem Bruch im Aluminium, der Rest sind Cu-reiche Bereiche.

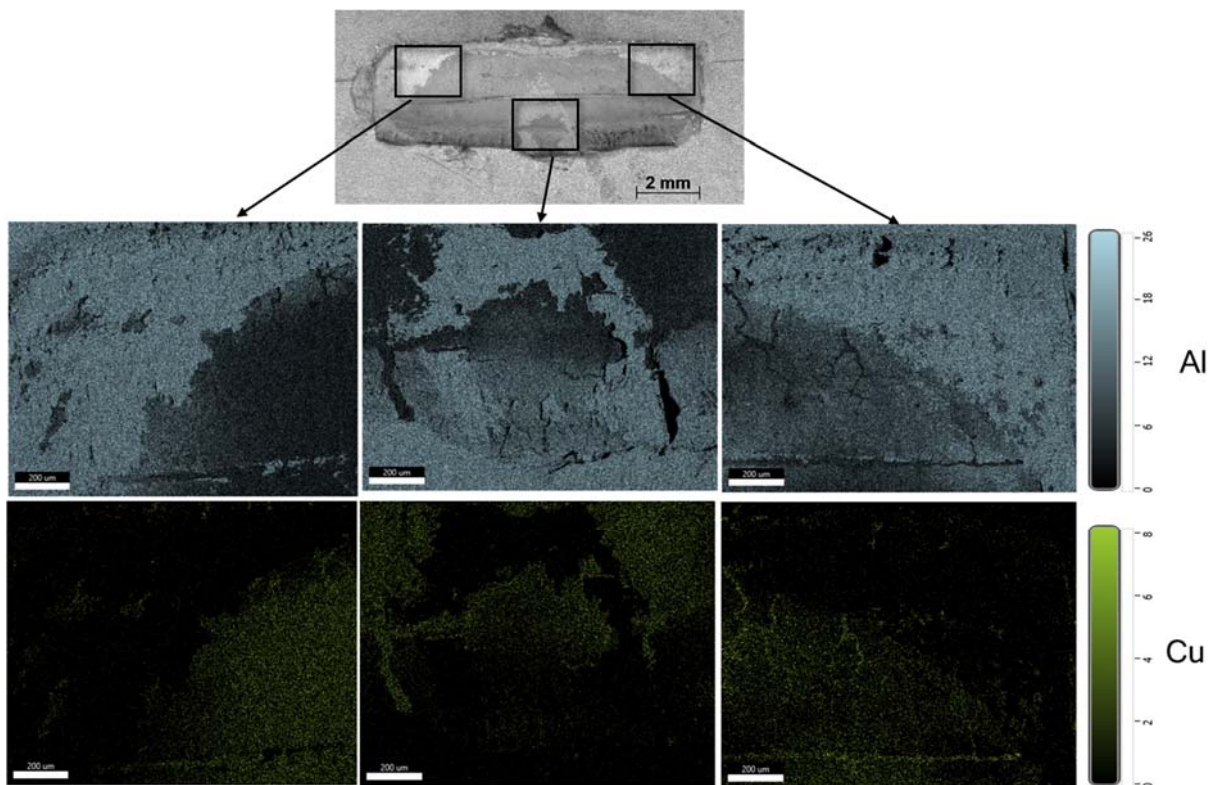


Abbildung 35: Element-Mapping für die Bruchfläche vom Typ 2 für Cu-Basis-Drahtelemente (aluminiumseitig)

Figure 35: Element mapping for the fracture surface of type 2 for Cu-based insert element (aluminum side)

Auch für die Verbindungen mit Fe-Basis-DE wurde ein entsprechendes Mapping durchgeführt, siehe Abbildung 36.

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass keine IMP in der Verbindungszone vorhanden sind. Es ist eine starke Verformung an den Rändern zu sehen sowie die höhere Konzentration an Fe in den Bereichen mit starker Verformung. Das bestätigt auch die Annahme, dass die Bildung von Al-

Fe-Cr-Ni-Phase nur an den Stellen möglich ist, wo Drahtelemente und Aluminium stark deformiert sind (Kapitel 4.2.2).

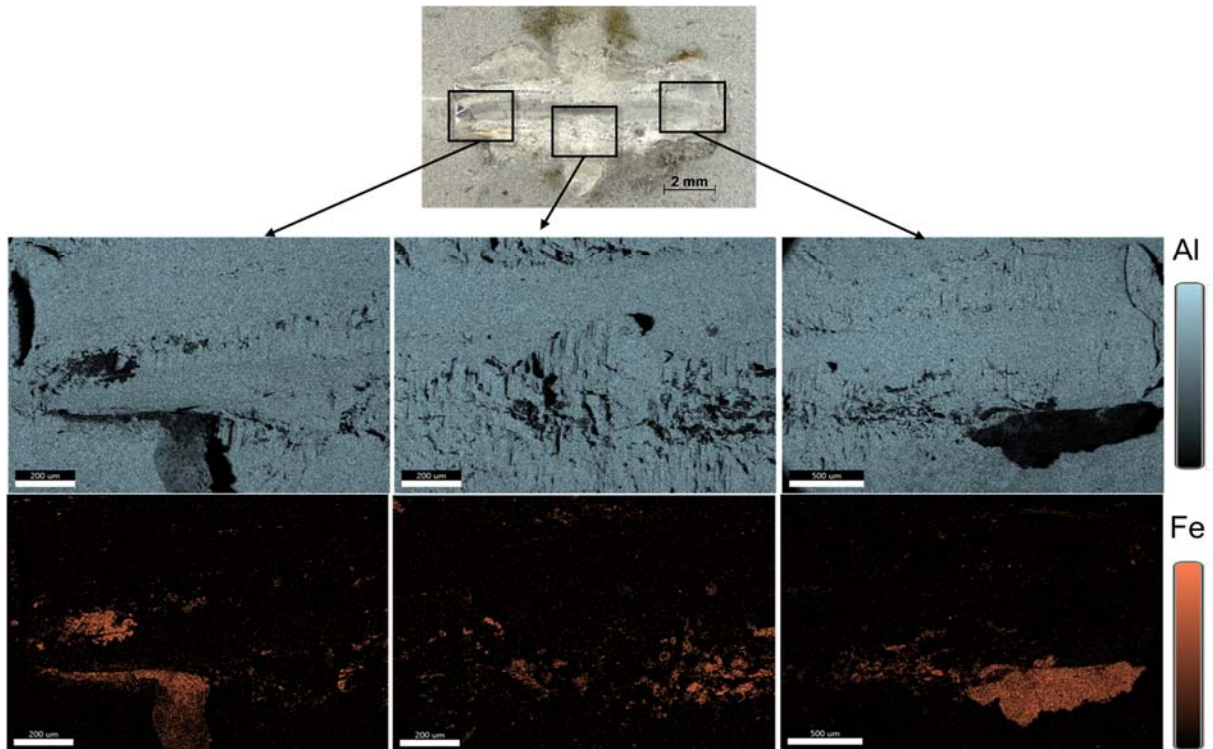


Abbildung 36: Element-Mapping für die Bruchfläche vom Typ 2 für Fe-Basis-Drahtelemente (aluminiumseitig)

Figure 36: Element mapping for the fracture surface of type 2 for Fe-based insert element (aluminum side)

4.4.4 Durchführung des Korrosionsversuchs / Corrosion test

Die Korrosionsversuche wurden an einer größeren Probengeometrie mit 5 Drahtelementen durchgeführt. Eine beispielhafte Darstellung der Probengeometrie mit den Abmessungen 300 mm x 185 mm ist der Abbildung 37 zu entnehmen. Stahlseitig wurden die Proben mit Bohrungen versehen, um sie während der Beschichtung im KTL-Durchlauf aufzuhängen.

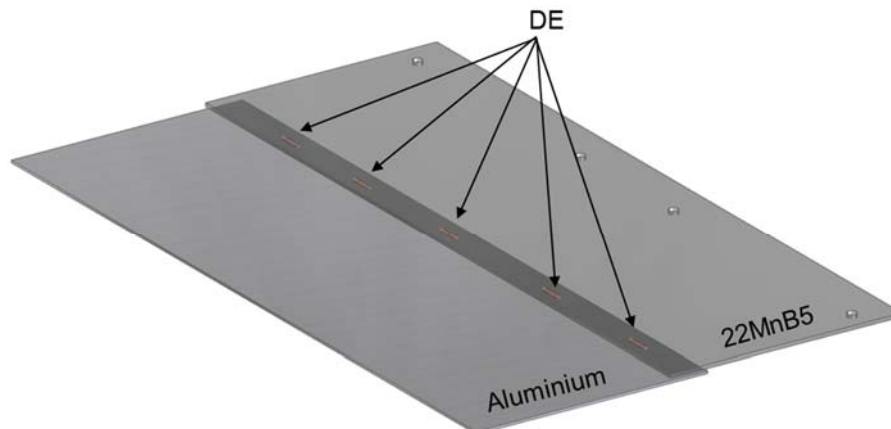


Abbildung 37: Darstellung der Probe für die Korrosionsversuche

Figure 37: Representation of the sample for the corrosion tests

Zunächst erfolgte die Beschichtung mittels KTL. Anschließend waren Korrosionsversuche in der Prüfkammer nach VDA 233-102 vorgesehen. Die Ergebnisse liegen aktuell noch nicht vor.

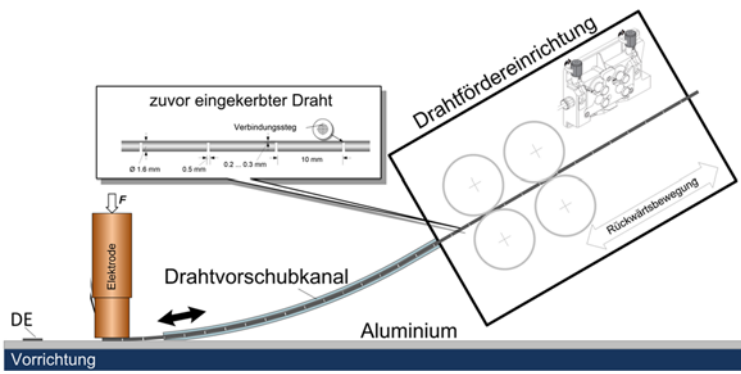
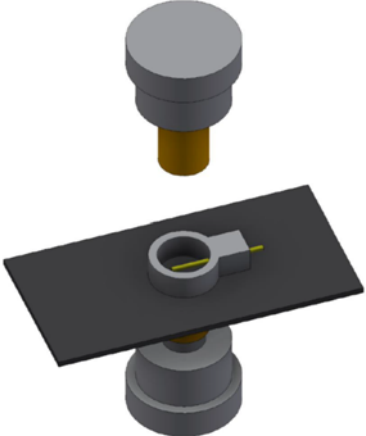
4.5 Automatisierungskonzepte für die Drahtelementapplikation und -identifikation / Automation concepts for insert element application and identification

4.5.1 Automatisierungskonzepte zur Drahtelementapplikation / Automation concepts for insert element application

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der untersuchten Technologie wurden zwei Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation erarbeitet und bewertet, siehe Tabelle 18. Es können zwei Lösungswege vorgeschlagen werden. Konzept 1 basiert auf dem Zurückziehen oder Abscheren des Drahtelementes, um das Drahtelement auf dem Al-Blech zu fixieren. Eine Möglichkeit besteht darin, eine Drahtfördereinrichtung mit reversierender Bewegung analog dem CMT-Prozess zu verwenden. Dabei wird das Drahtelement zwischen Elektrodenkappe und einem Blech eingespannt und gezogen. Konzept 2 besteht darin, dass die Beweglichkeit des DE durch eine Vorrichtung begrenzt wird und das Drahtelement mittels Elektrodenkappe abgesichert werden kann. Auch der Einbau eines Messers in der Vorrichtung ist denkbar. Beide Konzepte sind in der Tabelle 19 miteinander verglichen.

Tabelle 18: Zwei Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation

Table 18: Two automation concepts for element application

Konzept 1	Konzept 2
	
<ul style="list-style-type: none"> • Gekerbter Zusatzdraht notwendig • Vorhandene Anlagentechnik kann leicht umgebaut werden • Fördereinrichtung mit platzbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Kerbe sinnvoll zur Reduzierung der Abscherkraft • einfacher Aufbau • Verschleiß der Elektrode

Um diese beiden Prinzipien quantitativ zu vergleichen wurden die Drähte manuell mittels Säge vorgekerbt, siehe Abbildung 38.

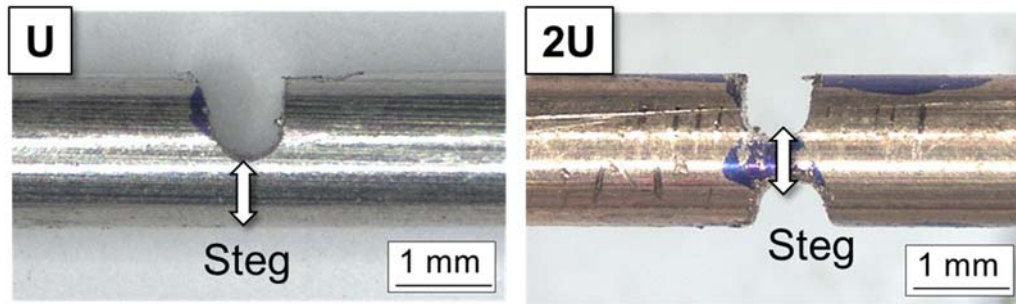


Abbildung 38: Vorgekerbte Drähte auf Fe-Basis mit U-Kerbe und auf Cu-Basis mit 2U-Kerbe

Figure 38: Pre-notched Fe-based wires with U-notch and Cu-based wires with 2U-notch

Tabelle 19: Vergleich der zwei Automatisierungskonzepte zur Elementapplikation

Table 19: Comparison of the two automation concepts for element application

	Konzept 1 (zurückziehen)	Konzept 2 (abscheren)
Zusätzliche Vorrichtung	Drahtfördereinrichtung; analog MSG-CMT- Schweißanlage	klein; kann flexibel aufgebaut und modifiziert werden
Drahtzufuhr	Drahtfördereinrichtung gibt eine definierte Drahtlänge vor, danach folgt reversierende Bewegung	Zusätzliche einfache Drahtfördereinrichtung notwendig, keine reversierende Bewegung notwendig
Präparation des Drahtes		
Zuschnitt vor der Drahtzuführung	Aufwendiges Transportieren des DE Sollbruchstelle mit Steg ist bevorzugt	Positionierungsgenauigkeiten Sollbruchstelle mit Steg ist bevorzugt
Unmittelbar an der Fügestelle	z. B. Sollbruchstelle mittels Zahnräder oder Ringsägen möglich	z. B. in der Vorrichtung eingebaute Messer
Benötigte Kräfte		
Ohne Kerbe	Sehr hoch; kompliziert	Kompliziert; z. B. mit Messer an der Fügestelle möglich
Mit Kerbe	Cu: beim Zug etwas höhere Kräfte notwendig als bei Scherung Fe: ungefähr gleich hohe Kräfte sowohl für Zug als auch für Scherung notwendig	

Die vorbereiteten Drähte wurden dann in der Zugmaschine auf Zugbelastung (vergleichbar mit Konzept 1) und mit einer Vorrichtung mit Abscherbelastung (vergleichbar mit Konzept 2) geprüft. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 39 dargestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass die Kerbe einen positiven Einfluss hat. Mit Zugbelastung sind für Cu-Basis-Drähte etwas höhere Kräfte als mit Scherbelastung notwendig. Für Fe-Basis-Drähte sind ungefähr gleich hohe Kräfte sowohl für Zugbelastung als auch für Scherbelastung notwendig.

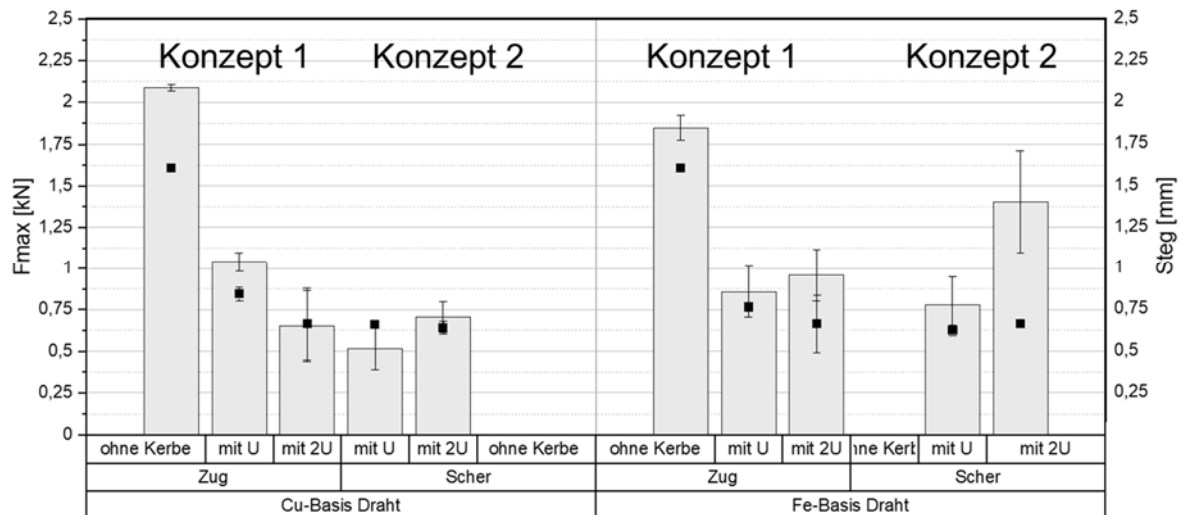


Abbildung 39: Vergleich der Drähte für Konzept 1 und Konzept 2 in Bezug auf den verbleibenden Steg

Figure 39: Tensile load of the pre-notched wires for concept 1 and concept 2

4.5.2 Drahtelementidentifikation/ Identification of insert element

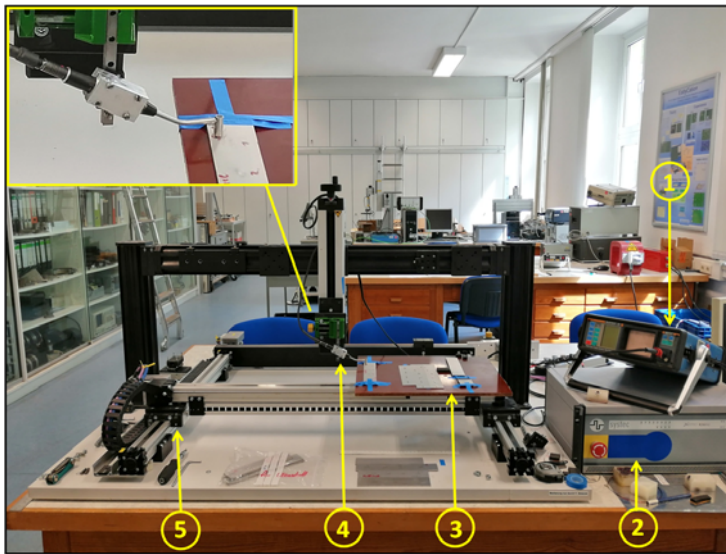
Weiter wurde eine Methode zur automatisierten Erkennung der Elementposition von der Blechaußenseite nach der Applikation basierend auf der Wirbelstromtechnik erprobt.

Die Wirbelstromprüfung zeichnet sich durch ihre vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten aus und wird beispielsweise zur Detektion von Materialfehlern an der Oberfläche bzw. in oberflächennahen Bereichen leitfähiger Prüfobjekte eingesetzt. Das Verfahren wird zudem auch zur Materialunterscheidung, Schichtdickenmessung, sowie zur Bestimmung von Materialeigenschaften (z. B. elektrische Leitfähigkeit) verwendet [50].

Mit der Wirbelstromprüfung wurden die vorbereiteten Schweißverbindungen dann jeweils nach der Drahtelementapplikation (PS I) und der Gesamtverbindung (PS II) untersucht. Hierbei wurden verschiedene Mehrpunktverbindungen für die zerstörungsfreie Prüfung hergestellt.

Der Versuchsaufbau für die Wirbelstromprüfung ist in Abbildung 40 dargestellt. Die einzelnen Komponenten der Anlage sind durch Nummern gekennzeichnet.

Als Wirbelstromsensor wurde der kompensierte Absolutsensor PKA27H1359 der Firma Rohmann verwendet. Die Steuerung der Anlage und Auswertung der Messsignale werden an einem externen PC vorgenommen.



- 1) Wirbelstromprüfgerät vom Typ ELOTEST B1 der Firma Rohmann
- 2) Xemo R260U Schrittmotorsteuerung der Firma Systemc (zur Manipulation des verfahrbaren Probenisches)
- 3) Probenisch
- 4) Wirbelstromsensor
- 5) CNC-Anlage

Abbildung 40: Versuchsstand Wirbelstromprüfung

Figure 40: Eddy current test setup

Die Versuche wurden am Institut für Werkstoff- und Füge­technik mit Unterstützung von Prof. Gerhard Mook durchgeführt. Die Studenten Verena von Hintzenstern, Tina Haase, Anne Goldammer und Sven Andres von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Studiengang Computervisualistik mit Anwendungsfach Werkstofftechnik) haben das halbquantitative 3D-Simulationstool fxEddy geschrieben, das die einzelnen Effekte am Computer nachvollziehbar macht, ohne eine aufwändige, teure und relativ langsame numerische Modellierung zu bemühen. Die Auswerte-Software stellt automatisch die X und Y Anteile in jeweiligen X- und Y-Scans des Wirbelstrombildes nach, siehe Abbildung 41.

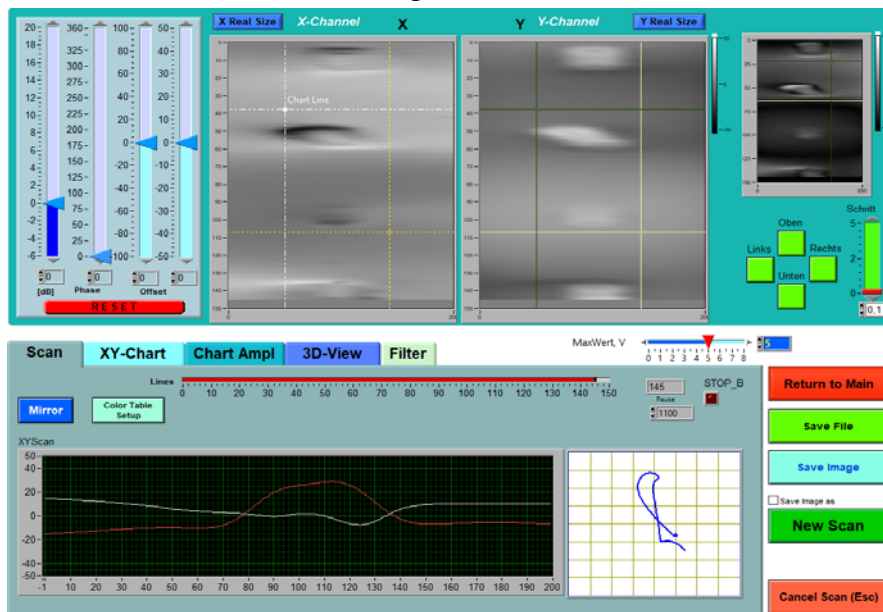


Abbildung 41: Bildschirmausschnitt der Auswertesoftware Afterscan während einer Wirbelstromprüfung an einer Widerstandselementverbindung mit Fügeelement

Figure 41: Screenshot of the software Afterscan during an eddy current testing on the joint with insert element

Daher eignet es sich zur Bestimmung der Drahtelementgröße und -position sowie möglicher Fehler. Zur Beurteilung der Verfahrenseignung wurden Proben im PS I mit variablen Fehlern (Winkelversatz, seitlicher Versatz zur Blechmittellinie oder falscher Abstand zwischen den Drahtelementen) hergestellt, siehe Abbildung 42.

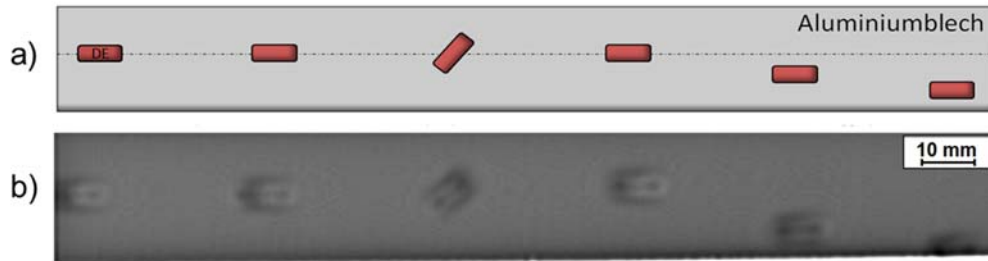


Abbildung 42: Formen der DE-Fehler schematisch (a) und Aufnahme nach der Wirbelstromprüfung (b)

Figure 42: Forms of IE defects schematically (a) and picture after eddy current testing (b)

Die möglichen Varianten von Brüchen an einer Al-St-Gesamtverbindung sind in Abbildung 43 schematisch anhand einer Skizze (a), X-Anteile (b) und Y-Anteile (c) dargestellt.

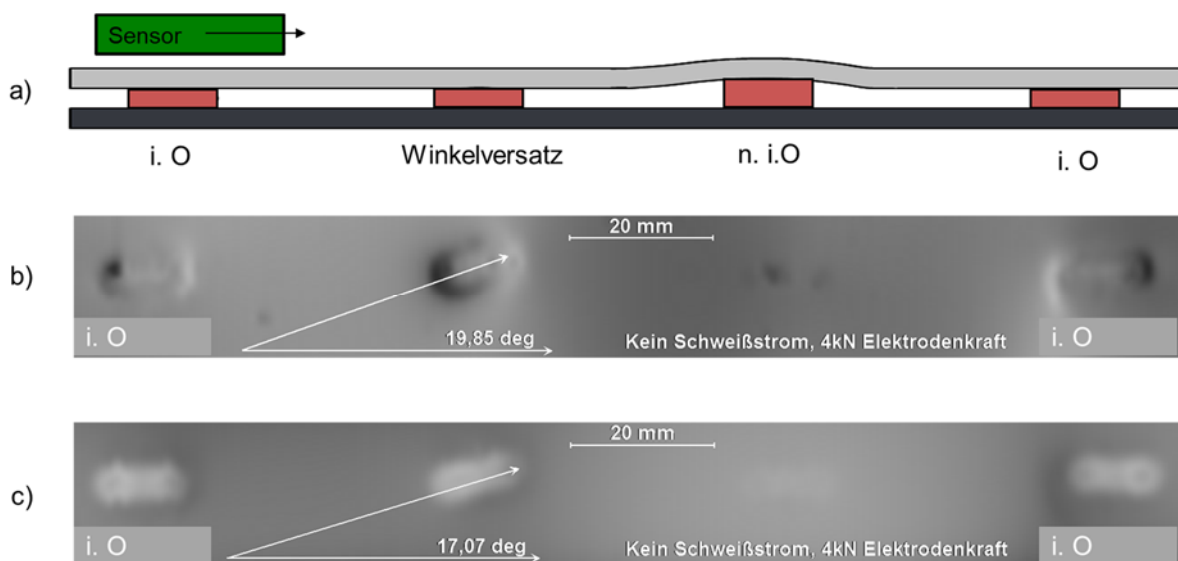


Abbildung 43: Mehrpunktverbindung mit nicht verschweißtem Fe-Basis-DE und Winkelversatz; schematisch (a), X-Anteil (b) und Y-Anteil (c) mit 14 kHz Prüffrequenz und 39 dB Verstärkung

Figure 43: Joint with 4 IE with not welded Fe-based IE and angular offset; schematic (a), X-picture (b) and Y-picture (c) with test frequency 14 kHz and amplification 39 dB

Es konnte nachgewiesen werden, dass sowohl für Kupfer- als auch für Stahldrahtelemente bei allen untersuchten Schweißproben die Rückwände der angeschweißten Drahtelemente, anhand eines verlängerten Schalllaufweges im Vergleich zum verschweißten Blechbereich, ausfindig gemacht werden konnten. Auch ein fehlendes Drahtelement kann mittels Wirbelstromprüfung nachgewiesen werden. Ein Defekt der Aluminium-Drahtelement-Verbindung, in Form eines herausgebrochenen Drahtelementes, konnte bei allen fehlerbehafteten Testblechen, unabhängig vom DE-Werkstoff und der Al-Blechdicke, durch die Messung kürzerer Schalllaufwege nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Visualisierung der Verbindungen mit Drahtelementen, nach dem PS I möglich ist. Dabei

konnten die Abstände zwischen den einzelnen Drahtelementen bestimmt werden. Der Vergleich mit den mittels AxioVision (Bildauswertungssoftware) vermessenen Probenblechen lieferte eine gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 44. Dabei konnte mit Hilfe der Vergleichsuntersuchungen festgestellt werden, dass die Bruchfläche des herausgebrochenen Drahtelementes im Aluminiumblech am besten mit den vermessenen Drahtelementlängen im Wirbelstrom Y-Bild übereinstimmt.

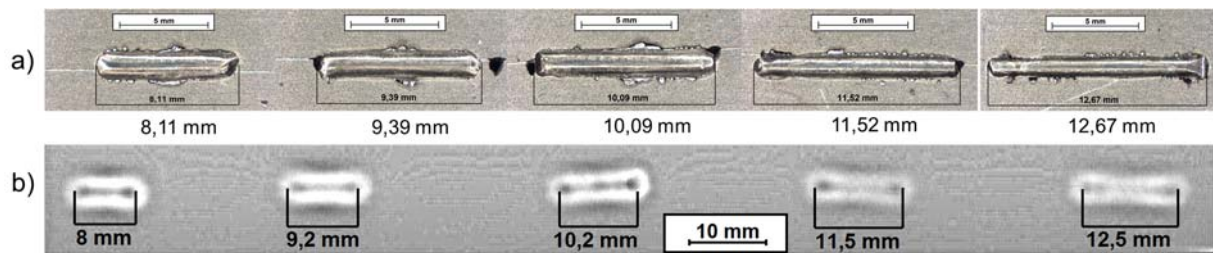


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Wirbelstromprüfergebnisse zur Größenbestimmung: mittels AxioVision bearbeitetes und vermessenes Y-Bild (b) und Vergleichsuntersuchungen mittels Mikroskops (a).

Figure 44: Comparison of the eddy current test results for size determination of IE: Y image processed and measured using AxioVision (b) and the comparative tests using a microscope (a)

Die Größenbestimmung konnte sowohl für Fe-Basis- als auch für Cu-Basis-Drahtelemente durchgeführt werden und lieferte bei der Längenbestimmung gute Übereinstimmungen mit den Vergleichsuntersuchungen.

4.6 Ableitung optimaler Prozessfenster und der Anwendungsgrenzen/ Determination of the process limits

4.6.1 Bestimmung der zulässigen Längentoleranzen für Drahtelemente / Determination of the permissible length tolerances for insert elements

Die ermittelten Prozessparameterfenster wurden hinsichtlich möglicher Störeinflüsse wie Positionsabweichungen und Längentoleranzen für Drahtelemente beim Schweißen verifiziert. Hierbei wurden die Drahtelemente mit unterschiedlichen Längen von 9 bis 13 mm vorbereitet und auf das Aluminiumblech aufgeschweißt. Diese Proben wurden dann mit dem Abscher-Versuch geprüft, die Ergebnisse sind in der Abbildung 45 dargestellt. Es ist zu sehen, dass mit zunehmender Länge des Drahtelementes die ertragbare Kraft sinkt. Eine Verlängerung des Elementes um 3 mm ist für Cu-Basis-Drahtelemente kritisch.

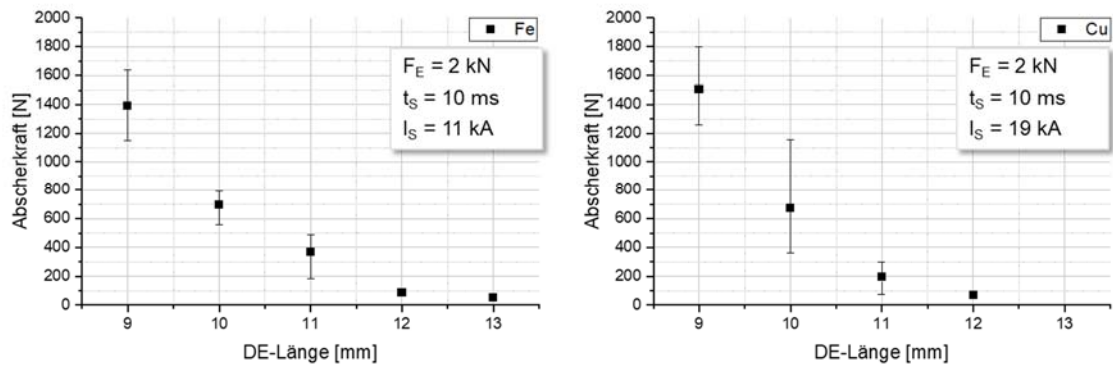


Abbildung 45: Abhängigkeit der Abscherkraft von der Länge des Elementes

Figure 45: Dependence of the shear force to the length of the insert element

Im Weiteren wurden die Drahtelemente mit 13 mm Länge nur teilweise (10 mm) verschweißt. Das restliche Element befand sich außerhalb der Elektrodenkappe. Diese Verbindungen wurden ebenfalls im Abscherversuch geprüft, siehe Abbildung 46. Das partielle Aufschweißen des DE führt selbst bei einer Länge von 13 mm zu einer Steigerung der ertragbaren Kraft.

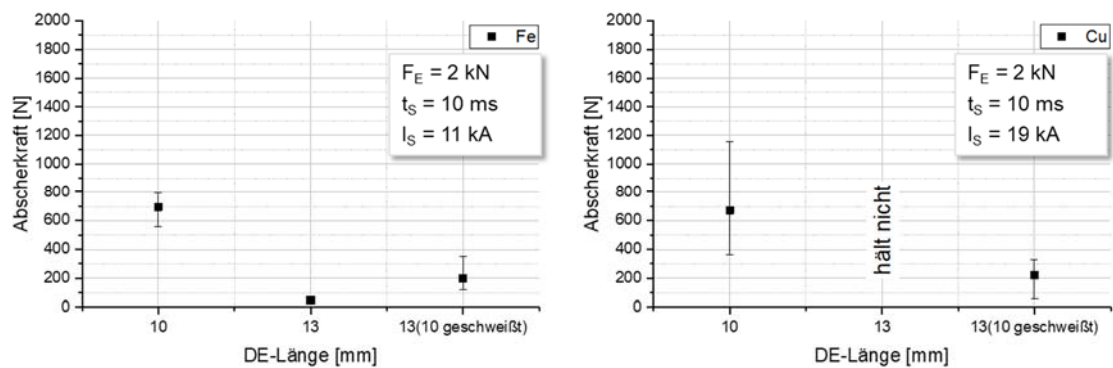


Abbildung 46: Abscherkräfte der Verbindungen mit nur teilweise aufgeschweißtem Drahtelement

Figure 46: Shear forces of the partially welded insert elements

4.6.2 Bewertungskriterien für Widerstandsschweißverbindungen ohne übliche Schweißlinse / Evaluation criteria for joints without common welding nugget

Als nächstes stellte sich die Frage, nach welchen Kriterien Verbindungen ohne Schweißlinse bewertet werden können. Die Gegenüberstellung der Bewertungskriterien kann der Abbildung 47 entnommen werden. Zum einen stehen die metallographischen Analysen zur Verfügung. Zwar liefern sie einige Erkenntnisse über die Verbindung, allerdings sind sie für die Bewertung der Verbindung nicht aussagekräftig, da es sich nur um eine Momentaufnahme handelt. Zum anderen kann der Zugversuch durchgeführt werden. Dieser liefert eine Aussage über die ertragbare Kraft, ist aber ziemlich aufwändig.

Die beim Widerstandspunktschweißen anerkannte Meißelprüfung ist für diese Verbindungen bisher nicht anwendbar. Aus Sicht der Forschungseinrichtung besteht die Möglichkeit die

Aussagekraft der Meißelprüfung durch eine Bruchflächenanalyse (siehe Kapitel 4.4.3) zu erhöhen. Allerdings ist die Belastungsart unterschiedlich.

Verfahren	Schwierigkeitsgrad	Aussagekraft	Durchgeführt
Metallographische Analyse			
Querschliff	mittel	mittel	✓ (AP3)
Längsschliff	aufwändig	mittel	✓ (AP3)
Messen der Anbindungsfläche	aufwändig	gering	✓ (AP3)
Quasistatische Zugversuch			
Scherzugversuch	aufwändig	hoch	✓ (AP5)
Bruchflächenanalyse			
Messen der Bruchfläche	einfach	mittel	✓ (AP5)
Analyse der Bruchfläche	aufwändig	mittel	✓ (AP5)
Prozessdaten Analyse	keine Vergleichswerte vorhanden		nicht geplant

Abbildung 47: Bewertungskriterien für Verbindungen mit Drahtelementen

Figure 47: Evaluation criteria for connections with insert elements

4.6.3 Schweißungen mit der Anlagentechnik ohne magnetische Nachsetzeinheit / Investigations on the welding system without magnetic follow-up unit

Um die Schweißungen mit der Anlagentechnik ohne magnetische Nachsetzeinheit durchzuführen, wurden im PS I Drahtelemente auf Aluminiumbleche aufgeschweißt und danach bei der Firma Harms & Wende GmbH & Co. KG im PS II zusammen mit Stahlblechen verschweißt. Es wurde eine servoelektrische C-Zange aus der Serienproduktion mit einem 1kHz MFDC Inverter verwendet, siehe Abbildung 48.



Abbildung 48: Servoelektrische Schweißzange der Firma Düring mit 1kHz MFDC Inverter und Genius Schweißsteuerung der Firma Harms & Wende

Figure 48: Servo-electric welding gun of the company Düring with 1kHz MFDC inverter and Genius welding control system of the company Harms & Wende

Die Proben wurden für die Scherzugversuche mit ähnlichen Schweißparametern vorbereitet und mit der Zugmaschine geprüft. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 49 dargestellt.

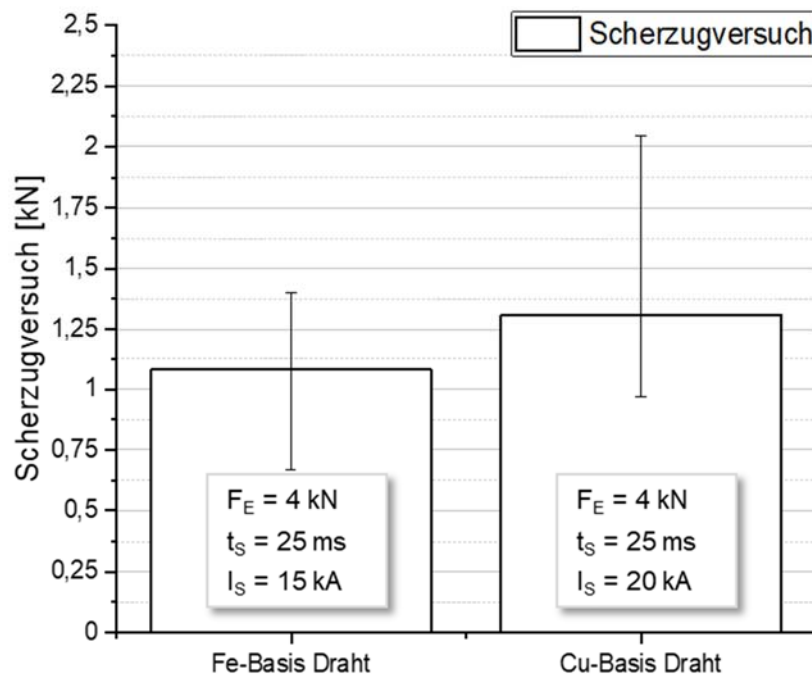


Abbildung 49: Ergebnisse der Scherzugversuche für die Verbindungen mit Cu-Basis- und Fe-Basis-Drahtelement sowie verwendete Schweißparameter

Figure 49: Tensile shear load of joints with insert element Cu- and Fe- based and the welding parameters

Es wurden große Schwankungen im Scherzugversuch beobachtet und die Werte liegen etwas tiefer als für die Verbindungen, die mit magnetischer Nachsetzeinheit geschweißt sind. Die Ursache dafür kann eine zu lange Schweißzeit sein, die zum Verschmelzen des Drahtelementes und dadurch zur Porenbildung im Aluminiumblech führt, wie in der Abbildung 50 dargestellt ist.

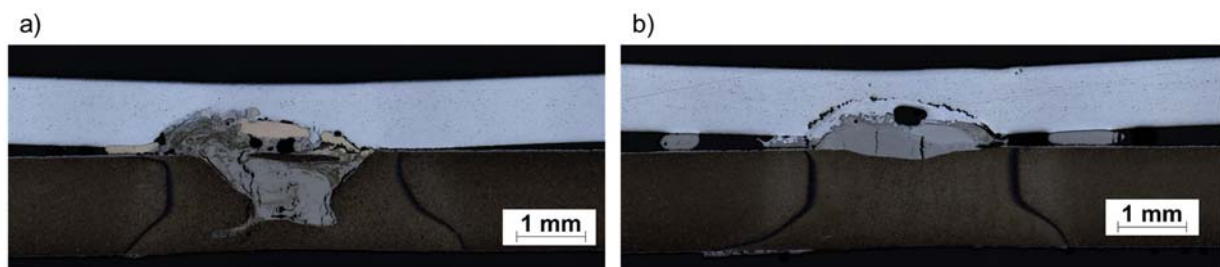


Abbildung 50: Querschliffe der Verbindungen nach dem PS II (mit Nital-Ätzung) für Cu-Basis- (a) und Fe-Basis-Drahtelement (b)

Figure 50: Cross sections of joints after stage II (nital-etched) for Cu-based (a) and Fe-based IE (b)

4.7 Herstellung eines Musterbauteils mit realitätsnaher Geometrie/ Manufacturing of joints on structural component with realistic geometry

Um die Reproduzierbarkeit und Funktionsfähigkeit der neuen Technologie sicher zu stellen, erfolgte die Herstellung von Musterbauteilen mit realitätsnaher Geometrie.

Zu diesem Zweck wurden Aluminiumbleche und Hutprofile aus 22MnB5 aus der Produktion verwendet und mit Einsatz von Klebstoff und Drahtelementen Musterbauteile hergestellt, wie in der Abbildung 51 zu sehen ist.

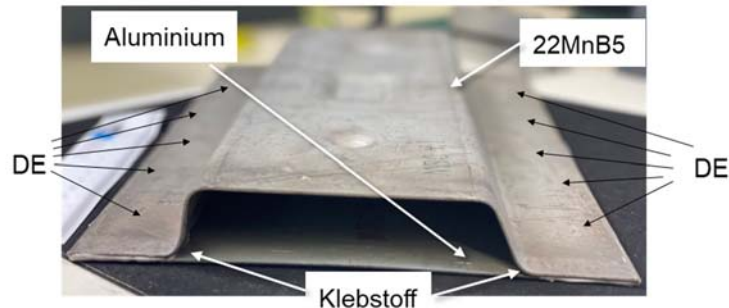
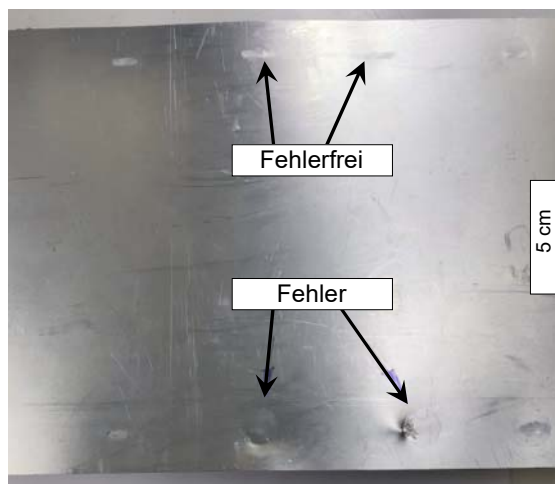


Abbildung 51: Musterbauteil mit realitätsnaher Geometrie

Figure 51: Joints on structural component with realistic geometry

Aufgrund der begrenzten Anzahl an Hutprofilen wurde auf die Variation des Abstands zwischen den Drahtelementen verzichtet und der kritische Abstand von 40 mm verwendet. Alle Proben wurden zusätzlich geklebt und nach dem Schweißen im Ofen bei 180 °C für 20 min ausgehärtet. Bei einigen Proben wurden zusätzlich Positionsfehler der Schweißelektroden eingebracht, da die Wiederfindung des Drahtelementes für die unsichtbaren Fügestellen mit Drahtelementen erschwert ist. Ein Lösungsweg, um diese Problematik in einem automatisierten Vorgang zu vermeiden, wurde bereits in AP 6 auf Basis der Wirbelstromprüfung vorgeschlagen. In Abbildung 2 (a) ist ein Musterbauteil mit zwei Positionsfehlern sowie die Fügestellen ohne Fehlpositionierung der Schweißelektroden dargestellt. Die Abbildung 2 (b) stellt eine detaillierte Darstellung der seitlichen Ansicht für die Fälle mit und ohne Fehlpositionierung dar. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass beim Aushärten der Verbindungen mit Positionsfehler die Klebung aufgrund der Wärmeausdehnung aufgeht, die Fügeverbindung ist dann fehlerhaft. Für die Proben ohne Positionsfehler ist die Klebstoffschicht in der Verbindung sehr gleichmäßig verteilt und weist keine Unregelmäßigkeiten auf.

a)



b)

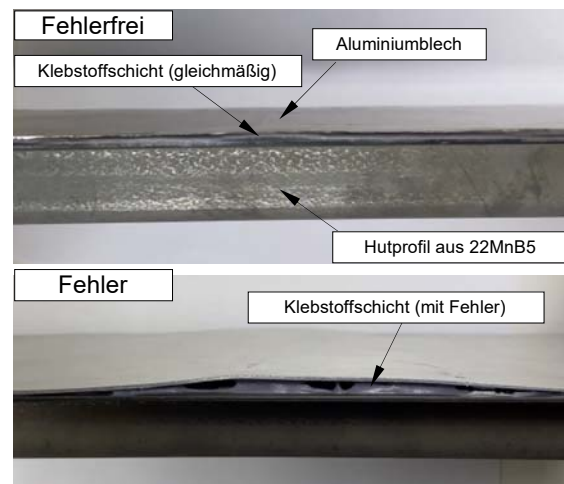


Abbildung 2: Musterbauteil mit und ohne Positionsfehler (a), detaillierte Darstellung (b)

Figure 2: Structural component with and without position error (a), detailed representation (b)

5 Zusammenfassung / Summary

Untersucht wurde ein neuartiges Fügeverfahren zur Herstellung von Aluminium-Stahl-Verbindungen durch Buckelschweißen unter Verwendung von Drahtelementen durch einen zweistufigen Schweißprozess mit einer konventionellen MFDC-Schweißanlage. Ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen lassen sich folgende Aussagen bzw. Festlegungen ableiten:

Resümee AP 1-2:

Gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde für die Drahtelemente ein Durchmesser von 1,6 mm festgelegt, da Drahtelemente mit einem kleineren Durchmesser einen zu geringen Spalt ergeben, um einen entsprechenden Klebstoffeinsatz zu gewährleisten.

Des Weiteren wurden die drei unterschiedlichen Drahtelementwerkstoffe (zwei Cu-Basis-, ein Fe-Basis- und ein Ni-Basis-Draht) miteinander verglichen. Obwohl alle DE-Werkstoffe große Parameterfenster bei der DE-Applikation auf Al-Blech aufzeigten, waren die Abscherkräfte und die Deformation der Verbindungen nach PS I unterschiedlich. Außerdem sind Ni-Basis-Drahtelemente sowohl aus finanziellen als auch aus gesundheitlichen Gründen ungünstig in der Produktion. Deswegen wurden nur zwei DE-Varianten für weitere Untersuchungen ausgewählt: eine Cu-Basis- und eine Fe-Basis-Legierung.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Schweißbereichsdiagramme für die Verbindungen mit zwei bevorzugten Drahtelementwerkstoffen erstellt. Die Schweißbereiche sowohl für die Gesamtverbindungen mit Drahtelementen auf Fe-Basis als auch auf Cu-Basis zeigten sehr große Prozessfenster, die von Vorteil für die weitere industrielle Verwendung sind.

Es wurden Auswertungskriterien zur Bestimmung des Parameterfensters vorgeschlagen, die es erlauben, das Parameterfenster in Abhängigkeit vom Drahtelementwerkstoff bzw. die Deformation vom Drahtelement zu bestimmen.

Die Schweißungen wurden mit zusätzlichem Einsatz von Klebstoff hergestellt. Zur Herstellung konnten dieselben Schweißparameter verwendet werden, die sich auch ohne Klebstoffeinsatz als geeignet gezeigt haben.

Resümee AP 3:

Die Analyse der Verbindungszone mittels metallographischer Charakterisierung zeigte, dass durch eine so kurze Schweißzeit keine Bildung der Schweißlinse in der Verbindungsebene beobachtet werden kann. Die Grenze zwischen Drahtelement und Grundwerkstoffen war deutlich zu erkennen. Ein zunehmender Schweißstrom führte zu einem höheren Wärmeeintrag und damit zu einer stärkeren Verformung der Drahtelemente und einer größeren Verbindungsfläche.

Die Geometrie der Verbindungszone wurde ausgemessen und mit der Festigkeit korreliert. Der Zusammenhang zeigte sich allerdings als komplex.

Anhand der REM-Analysen wurde festgestellt, dass sich für Cu-Basis-Drahtelemente mit minimalem Schweißstrom ein Saum mit einer Dicke von ca. 1 - 2 μm bildet. Mit zunehmendem Schweißstrom wuchs der Saum und es traten zunehmend Cu-reiche Phasen auf, wobei bis ca. 5 μm Saumdicke eine gute Festigkeit erreicht wurde. Oberhalb einer Saumdicke von 20 μm ist die Verbindungsfestigkeit ungenügend, um die Transportsicherheit zu gewährleisten. Für Verbindungen mit Fe-Basis-Drahtelement war die Verbindungsfestigkeit nicht durch einen

Phasensaum, sondern durch die Deformation der Drahtelemente beim Schweißen bestimmt. Diese Verbindung kann als Lötung bezeichnet werden.

Es wurde nachgewiesen, dass der Wärmeeintrag in die Fügezone beim Schweißen mit kurzer Zeit und hoher Energiekonzentration deutlich geringer ist, als beim konventionellen Schweißen. Die Ausarbeitung von Bewertungskriterien für die Widerstandsschweißverbindungen ohne übliche Schweißlinse ist dadurch erschwert, dass die Zusammenhänge zwischen der Festigkeit der Verbindungen und der Geometrie der Verbindungszone sehr komplex sind und so im Moment nicht eindeutig interpretiert werden können. Dadurch scheint die Ausmessung der Geometrie der Verbindungszone nicht zielführend. Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen der Geometrie der Verbindungszone und der Verbindungsfestigkeit lieferte die Bruchflächenanalyse. Die Durchführung der Bruchflächenanalyse erfolgte in AP 5.

Resümee AP 4:

Es wurden Mehrpunktproben mit variabler Anzahl der Drahtelemente hergestellt. Die Abstände zwischen den Drahtelementen wurden zwischen 20 - 50 mm variiert. Der Abstand von 40 mm wurde als bestgeeignet eingestuft und durch den Scherzugversuch geprüft.

Für die Cu-Basis- und die Fe-Basis-Drahtelemente wurden die Parameterfenster für die Mehrpunktproben angepasst. Alle geschweißten Proben haben den Temperaturtest im Ofen ähnlich dem KTL-Prozess bestanden. Für die Mehrpunktproben wurde eine Spaltmessung durchgeführt und ein Spalt zwischen 0,1 bis 0,5 mm ermittelt. Dies entspricht den gewünschten Kriterien für einen klebgerechten Spalt.

Die Machbarkeit für 3-Blechverbindungen wurde nachgewiesen und die Proben wurden sowohl mit als auch ohne Klebstoff im Zugversuch geprüft.

Resümee AP 5:

Es wurden für Verbindungen nach PS I Abscherversuche und für Verbindungen nach PS II Zugversuche durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Erhöhung des Schweißstroms zu höheren Festigkeiten der Verbindungen führte. Die mit I_{\max} (obere Q-Grenze) geschweißten Verbindungen erreichten höhere Kräfte als die mit I_{\min} (untere Q-Grenze) geschweißten. Mit zusätzlicher Verklebung erhöhen sich die ertragbaren Kräfte für Verbindungen mit Cu-Basis-DE von 2 kN (ohne Klebstoff, untere Q-Grenze I_{\min}) bis auf 9 kN (mit Klebstoff, untere Q-Grenze I_{\min}). Für Verbindungen, die mit I_{\max} (obere Q-Grenze) geschweißt wurden, liegen die Werte mit Klebstoffeinsatz genauso hoch. Die gleiche Tendenz ist auch beim Einsatz von Fe-Basis-DE zu beobachten.

Zum Vergleich wurden Proben mit gleicher Geometrie genietet. Es stellte sich heraus, dass die maximalen Verbindungsfestigkeiten der Verbindungen ohne Klebstoff mit Drahtelementen an den oberen Grenzen (I_{\max}) mit genieteten Verbindungen verglichen werden können. Bei Verwendung des Klebstoffs nimmt die Festigkeit der mit DE geschweißten Verbindungen massiv zu. Ursächlich war die Verdrängung des Klebstoffs bei den Nietverbindungen, so dass kaum eine Erhöhung der Festigkeit erreichbar war.

Die Bruchflächen sowohl ohne als auch mit Klebstoff wurden analysiert. Das Versagen fand immer zwischen dem Aluminiumblech und dem Drahtelement statt. Es wurden typische Bruchflächen für Verbindungen mit Fe-Basis-DE und Cu-Basis-DE identifiziert (drei Gruppen für Cu-Basis-DE und zwei Gruppen für Fe-Basis-DE). Für Verbindungen mit Klebstoff ist kein

signifikanter Unterschied zwischen Cu-Basis- und Fe-Basis-DE zu erkennen. So konnte durch den geringen Wärmeeintrag eine Schädigung des Klebstoffs nahezu ausgeschlossen und ein Kohäsionsbruch schon unmittelbar neben dem verschweißten DE erzielt werden. Zum Teil konnte ein lokales Versagen der Al-Si-Beschichtung erreicht werden, da die Adhäsion des Klebstoffs höher als die Adhäsion der Beschichtung war.

Resümee AP 6:

Des Weiteren wurden Möglichkeiten für die Zuführung und das Zuschneiden des Zusatzelements untersucht. Es wurden zwei mögliche Konzepte für die Drahtelementapplikation vorgeschlagen und verglichen. Das erste Konzept basiert auf einer Drahtfördereinrichtung analog der MSG-CMT-Drahtvorschubeinheit mit reversierender Bewegung des Drahtes. Das zweite Konzept basiert auf einer lokal an der Schweißelektrode befestigten Einheit. Durch die Begrenzung der Beweglichkeit des Drahtelementes wird ein Drahtabschnitt mit der Elektrodenkappe abgeschert.

Zur Erprobung einer Methode zur automatisierten Erkennung der bereits applizierten Drahtelemente wurde die Wirbelstromprüfung genutzt. Dazu wurden geschweißte Gesamtverbindungen mit DE auf Cu-Basis und Fe-Basis mit einem Wirbelstromscanner vermessen. Es konnte sowohl das vorhandene Element als auch dessen Position hinsichtlich Längenabweichungen, Winkelversatz usw.) nachgewiesen werden. Die Erkennung der Elementposition von der Blechaußenseite nach der Applikation für den zweiten Prozessschritt zeigt ein gutes Potenzial und kann weiterhin für die industrielle Anwendung verbessert werden. Die Methode ist somit gut geeignet, das Drahtelement aufzufinden um ggf. die Position der Schweißelektroden zu korrigieren. Weiterhin kann sie als Qualitätssicherungsverfahren nach dem Schweißen verwendet werden, um beispielsweise eine nicht verschweißte Verbindung zu identifizieren.

Resümee AP 7:

Es wurde nachgewiesen, dass die vorgeschlagenen Parameterfenster sowohl eine sichere Fixierung des Drahtelementes auf dem Aluminiumblech, als auch die Herstellung der Gesamtverbindungen erlauben. Bei Abweichungen von 2 mm in der Länge des Drahtelementes wurde nur ein geringer Abfall der Verbindungsfestigkeit bei gleichzeitig gewährleisteter Transportsicherheit ermittelt. Die Referenzschweißungen mit einer Anlagentechnik ohne magnetischer Nachsetzeinheit waren erfolgreich. Die Ergebnisse zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, ohne magnetische Nachsetzeinheit zu arbeiten. Es wurden Kriterien für die Bewertung der Verbindungen vorgeschlagen.

Resümee AP 8:

Um die Prozessfähigkeit an einem komplexen Bauteil sicher zu stellen, erfolgten Untersuchungen an einem bauteilähnlichen Probekörper. Die Musterbauteile mit realitätsnaher Geometrie, bestehend aus einem Hutprofil aus 22MnB5 und einem Aluminiumblech EN AW-6016, konnten mit Klebstoffeinsatz und Drahtelementen erfolgreich hergestellt werden. Auch nach dem Ofendurchlauf analog einem KTL-Durchlauf waren alle Fügstellen intakt.

6 Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

Zvorykina, Anastasiia; Mitzschke, Niels; Jüttner, Sven;

Herstellung von Hybridverbindungen aus Stahl und Aluminium mittels neuartiger Füge-technologie

13. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2017: autonom - vernetzt - nachhaltig, 27. und 28. September 2017: Tagungsband - Magdeburg: Universitätsbibliothek, S. 400-408; [Konferenz: MMT2017]

Mitzschke, Niels; Wohner, Maximilian; Sherepenko, Oleksii; Zvorykina, Anastasiia; Jüttner, Sven;

Gemeinsame Forschung in der mechanischen Füge-technologie - Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. - EFB, S. 123-132, 2018 - (EFB-Tagungsband; T 47); [Tagung: 8. Füge-technisches Gemeinschaftskolloquium, Paderborn, 2018]

Zvorykina, Anastasiia; Jüttner, Sven;

Widerstandspunktschweißen mittels Fügeelementen am Beispiel von Stahl-Aluminium-Verbindungen

39. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik - Düsseldorf: DVS Media GmbH; Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik (39.:2018), S. 1-7, 2019 - (DVS-Berichte; Band 356); [Seminar: 39. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik, Eupen, 12. bis 14. September 2018]

Zvorykina, A., Sherepenko, O. & Jüttner, S. Novel projection welding technology for joining of steel-aluminum hybrid components—part 1: technology and its potential for industrial use. *Weld World* 64, 317–326 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00833-x>

Zvorykina, A., Sherepenko, O., Neubauer, M., Jüttner, S. Dissimilar metal joining of aluminum to steel by hybrid process of adhesive bonding and projection welding using a novel insert element. *Journal of Materials Processing Tech.* 282C (2020) 116680, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116680>

7 Literaturverzeichnis / Bibliography

- [1] Meschut, G.; Hahn, O.; Janzen, V.: Untersuchungen zum Fügen artverschiedener Werkstoffkombinationen durch das Widerstandselementschweißen (WES). Duisburg 2013.
- [2] Kotschote, C.; Korte, M.; Neudel, C.; Bergmann, J. P.; Rudolf, H.: Bewertung der Verbindungscharakteristik beim Widerstandspunktschweißen mit Stanzelement. Nürnberg 2015.
- [3] Jank, N.; Staufer, H.; Bruckner, J.: Schweißverbindungen von Stahl mit Aluminium – eine Perspektive für die Zukunft. In: BHM 153 (2008) 5, S. 189–192.
- [4] Eichleiter, F.: Fertigungs- und prozessbedingte Eigenschaften von Klebverbindungen im Karosseriebau, Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2011. Aachen 2012.
- [5] Prange, W.; Schneider, C.: Werkstoff Stahl-Automobile Leichtbauinitiativen der internationalen Stahlindustrie. In: Stahl und Eisen 121 (2001) 7, S. 23-29.
- [6] Meschut, G.; Janzen, V.; Olfermann, T.: Optimierung der Prozesskette und der Verbindungseigenschaften beim Widerstandselementschweißen von Mischbauverbindungen für Leichtbaukarosseriestrukturen. Duisburg 2016.
- [7] Szczepaniak, A.; Fan, J.; Kostka, A.; Raabe, D.: On the Correlation Between Thermal Cycle and Formation of Intermetallic Phases at the Interface of Laser-Welded Aluminum-Steel Overlap Joints. In: Advanced Engineering Materials (2012), S. 464–472.
- [8] Radschiet, C. R.: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl, Dissertation. Bremen 1996.
- [9] Achar, D.R.G.; Ruge, J.; Sundaresan, S.: Verbinden von Aluminium mit Stahl, besonders durch Schweißen, Aluminium-Monographie 1981.
- [10] URL: <http://www.technik-welten.de/ingenieur-welt/ingenieurberufe/werkstofftechnik/werkstofftechnik/neue-werkstoffe-und-konstruktionstechniken/leichtbau.html>. Abrufdatum 16.01.2017.
- [11] Wiese, E.: Kleb- und prozesstechnische Bewertung des Falzklebens, Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2014. Aachen 2015.
- [12] Hüsgen, B.: Beitrag zum Einfluß der Fertigung auf ausgewählte Eigenschaften von Klebverbindungen mit warmaushärtenden Klebstoffen, Dissertation 1993.
- [13] Ewerszumrode, A.: Einfluss der Abbindebedingungen auf das Eigenschaftsprofil geklebter Verbindungen aus Fügebauteilen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten, Forschungsbericht des LWF Paderborn 1997.
- [14] Georgi, W.: Beitrag zum mechanischen Fügen von Metall-Kunststoff-Mischverbindungen, Dissertation 2014.
- [15] Bangel, M.: Die Karosserie des neuen Audi TT – intelligenter Mischbau erfordert innovative Fügeverfahren, Vortragspräsentation zum 13. Paderborner Symposium Fügetechnik 2006.

- [16] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, 2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg 2007.
- [17] Matsumura, Y. e. a.: Weight Reduction Technology for Improved Handling Performance of Lancer Evolution 2004.
- [18] Matsumura, Y. e. a.: Development of Application Technology of Aluminium Roof. 2006.
- [19] Black, S.; Ladgard, B. (Hrsg.): Innovative Materialien bei Jaguar Land Rover - Einsatz im neuen Range Rover Evoque 2011.
- [20] Heiko, R., Yang, Y, Broda, T., Koltshote C.: Neuartige Widerstandspunktschweißverfahren für den automobilen Aluminium-Stahl-Mischbau. Duisburg 2013.
- [21] Adam, T.: Ultraschallschweißen ausgewählter Aluminiumlegierungen mit erhöhter Festigkeit, Dissertation 1999.
- [22] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden, s.l. 2013.
- [23] Vollstanznieten von höchstfesten Stahlwerkstoffen in Mischbaustrukturen mittels selbstschließendem Vollstanznietelement. IWF, Paderborn 2017.
- [24] Meschut, G.; Sartisson, V.: Vollstanznieten von höchstfesten Stahlwerkstoffen in Mischbaustrukturen mittels selbstschließendem Vollstanznietelement. Hannover 2016.
- [25] Eberlein, W.: Verfahren zum Verbinden zweier oder mehrerer metallischer Bleche oder Profile, insbesondere eines Karoseriesegments, sowie Karoseriesegment (2009) EP2052802 A1.
- [26] Vorlochfreies Fügen stahlintensiver Leichtbaustrukturen durch Widerstandselementschweißen mit Vorkonfektionierung. IWF, Paderborn 2017.
- [27] Yang, Y.; Rudolf, H.; Köthen; Broda, T.: Ultraschall-Widerstandspunktschweißen – Ein neues Schweißverfahren für Aluminium-Stahl-Blechverbindungen. Duisburg 2013.
- [28] Mauer, D.: Mehrkörperverbund und Reibschweißverfahren zu seiner Herstellung (1997) DE 19620814 A1.
- [29] Jüttner, S.; Graul, M.; Staubach, M.; Noack, T.: Verfahren zur Herstellung einer Fügeverbindung zwischen einem Blechbauteil aus Stahl und einem Blechbauteil aus einem Aluminiumwerkstoff (2010) WO 2010022709 A1.
- [30] Jüttner, S.; Graul, M.: Verfahren zur Herstellung einer Fügeverbindung zwischen einem Blechbauteil aus Stahl und einem Blechbauteil aus einem Aluminiumwerkstoff (2015) EP 2328707 B1.
- [31] Springer, H.: Offenlegungsschrift: Verfahren zur Herstellung eines Stahl-/Aluminium-Verbundbauteils (2006) DE102006056489A1.
- [32] Sandforth, H.: Verfahren zum elektrischen Widerstandspunktschweißen einer Stromzuführung mit einem Hitzdraht (1966) DE 1615031 B.
- [33] Warburg, D.: Schweißverbindung von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen (2000) DE 19913436 C1.
- [34] Rudolf, H.; Broda, T.: Fügen von zwei Fügepartnern mittels einer Kombination eines elektrischen Widerstandsschweißens und eines Reibschweißens - European Patent Office - EP 2679328 A1 (2014) EP 2679328 A1.

- [35] Graul, M.; Jüttner, S.; Rudolf, H.: Verfahren und Fügehilfselement zum Punktschweißen oder -löten (2012) DE 10251414 B4.
- [36] Khakhalev, A. D.: System for and method of projection weld-bonding workpieces (2009) US 20090294411 A1.
- [37] Khakhalev, A. D.: System und Verfahren zum Buckelschweißkleben von Werkstücken (2009) DE 102009020226 A1.
- [38] Maike, K.: Verfahren zum Verbinden eines Aluminiumbleches mit einem Stahlblech (1987) DE 3303244 C2.
- [39] Koppe, K.; Heitz, S.: Verfahren zur Verbindung von umformbaren Blechbauteilen, vorzugsweise Feinblechen durch Löten (1996) DE19512089 C1.
- [40] Brübel, A.; Dudziak, K.-U.; Langwaldt, S.; Müller, M.; Siring, A.: Verfahren zum Verbinden eines Hohlprofiles mit einem flächig anliegenden Bauteil DE 10323719 B3.
- [41] Angerhausen, M.; Geffers, C.; Pipinikas, A.; Twiehaus, T.: Thermisches Fügen von Stahl und Aluminium. In: VDI-Z Integrierte Produktion 159 (11) (2017), S. 54–56.
- [42] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg 2007.
- [43] Zhanxiang Ling, Yang Li, Zhen Luo, Sansan Ao, Zhanghua Yin: Microstructure and fatigue behavior of resistance element welded dissimilar joints of DP780 dual-phase steel to 6061-T6 aluminum alloy 2017.
- [44] Zhanxiang Ling, Yang Li, Zhen Luo, Sansan Ao, Zhanghua Yin: Microstructure and fatigue behavior of resistance element welded dissimilar joints of DP780 dual-phase steel to 6061-T6 aluminum alloy. In: International journal of precision engineering and manufacturing (2017) 92, S. 1923–31.
- [45] Bedra intelligent wires: Technische Datenblatt für Draht bercoweld S3 CuSi3Mn1.
- [46] Dow Automotive Systems: Technische Datenblatt Betamate Body Structure Adhesives BETAMATE 1630 (2012).
- [47] Habenicht, G.: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen, 6. Aufl., VDI-Buch, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2009.
- [48] Zvorykina, A.; Sherepenko, O.; Jüttner, S.: Novel projection welding technology for joining of steel-aluminum hybrid components—part 1: technology and its potential for industrial use. In: Weld. World 64 (2020), S. 317–26.
- [49] Hornbostel, N.: DE 102009050342: Halbhohlstanzniet (2009).
- [50] Yashan, A.: Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren. In: Forschungsbericht, IZFP Saarbrücken (2008).