Masterarbeit

WIDERSTANDSPUNKTSCHWEISSVERFAHREN FÜR ALUMINIUMLEGIERUNGEN IN DER FAHRZEUGPRODUKTION

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang Automatisierungstechnik-Wirtschaft

> von Ing. Peter Harrer, BSc 1610322020

betreut und begutachtet von Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn. Vinzenz Sattinger

.....

Graz, im Dezember 2017

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Me bare

Unterschrift

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich für die fachlich umfangreiche Unterstützung während meiner Masterarbeit bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn. Vinzenz Sattinger bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Ing. Bruno Götzinger und Herrn Werner Karner für die Möglichkeit, diese Masterarbeit im Unternehmen MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG zu schreiben sowie für die intensive begleitende Betreuung.

Mein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern Brigitte und Peter Harrer sowie meiner Schwester Anja für die Hilfe und das Verständnis während der Masterarbeit und meines gesamten Studiums.

KURZFASSUNG

In den letzten Jahren hat der Leichtbau im Automobilbau zunehmend an Bedeutung gewonnen. Neue Fügetechnologien in der Fahrzeugproduktion, der wachsende Einsatz von Leichtbauwerkstoffen und die Wettbewerbsfähigkeit sind für den Automobilzulieferer MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG klare Herausforderungen für die Zukunft. Das Verfahren des Widerstandspunktschweißens bei Aluminiumlegierungen erfordert daher gegenüber der konventionellen Anwendung von Stahllegierungen eine gründlichere Betrachtung.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, mehrere Widerstandspunktschweißverfahren von Aluminiumlegierungen auf ihre Eignung und Effizienz zu überprüfen. Nach der Erarbeitung von konzeptionellen Anforderungen und einer intensiven Marktrecherche, werden verschiedene Technologien mithilfe von Prüfverfahren untersucht. Abschließend ist eine wirtschaftliche Betrachtung zwischen dem Verfahren des Widerstandspunktschweißens und einem ausgewählten mechanischen Kaltfügeverfahren zu erstellen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren DeltaCon 320 in einer ersten Absicherungsphase die Kriterien für den Einsatz in der Fahrzeugproduktion erfüllt und die Kosten-Bewertung vielversprechende Resultate liefert. Außerdem kann die effiziente Anwendung von Widerstandspunktschweißen gegenüber Stanznieten mittels praktischen Versuchen bestätigt werden.

Die Erkenntnisse der Masterarbeit bilden eine wesentliche Grundlage dafür, dass zukünftig Widerstandspunktschweißverfahren von Aluminiumlegierungen in der Fahrzeugproduktion bei MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG eingesetzt werden können. Zur Überprüfung für den prozesssicheren und serientauglichen Einsatz sind weitere Untersuchungen geplant.

ABSTRACT

In recent years the topic of lightweight design has become increasingly important in the automotive industry. New joining technologies in vehicle production, the growing use of lightweight materials and ongoing competition all pose upcoming challenges for the automotive supplier MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG. Accordingly, resistance spot welding technology for aluminium alloys requires more thorough consideration than the conventional use of steel alloys.

The aim of this Master's thesis is to examine several resistance spot welding technologies for aluminium alloys to establish their suitability and efficiency. Following in-depth market research and the development of conceptual requirements, different technologies are analysed. Finally, economic considerations of resistance spot welding and a preferred mechanical joining technology are presented.

The results indicate that DeltaCon 320 technology meets the requirements for use in the first testing phase for vehicle production, and the cost assessment delivers a reliable outcome. Furthermore, the results of practical tests confirm the efficient application of resistance spot welding compared to rivet connection.

The implications of this thesis suggest that resistance spot welding of aluminium is possible in the future at MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG. Therefore, further investigations are planned to verify process-safe and serial-ready application.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einl	Einleitung1		
	1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	2	
	1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	2	
2	Alur	niniumlegierungen	3	
	2.1	Aluminium-Knetlegierungen	4	
	2.1.	1 AIMg(Mn)-Legierungen	4	
	2.1.	2 AIMgSi-Legierungen	4	
	2.1.	3 AIZnMg(Cu)-Legierungen	5	
	2.1.	4 Zustandsbezeichnung	5	
	2.2	Besonderheiten beim Aluminium- gegenüber Stahlpunktschweißen	6	
3	Wid	lerstandspunktschweissen	7	
	3.1	Allgemeines	8	
	3.2	Prinzip des Verfahrens	9	
	3.3	Physikalische Grundlagen	10	
	3.4	Schweißeignung der Werkstoffe	11	
	3.5	Schweißmaschine	12	
	3.6	Schweißparameter	13	
	3.6.	1 Schweißstrom 1	15	
	3.6.	2 Strom- und Kraftprogramme	16	
	3.6.	3 Nachsetzverhalten	17	
	3.7	Elektroden und Elektrodenstandmenge	18	
	3.8	Zustand der Werkstückoberfläche	21	
	3.9	Festigkeitsverhalten von Aluminium-Punktschweißverbindungen	23	
	3.10	Punktschweißkleben	24	
	3.11	Schweißbewertung	25	
	3.11	1.1 Schweißeignungsprüfungsverfahren	25	
	3.11	1.2 Schweißprüfverfahren	26	
	3.11	1.3 Anforderungen an die Schweißqualität	29	
4	Unte	ersuchungskonzept für die praktische Umsetzung	31	
5	Mög	gliche Industriepartner für die praktische Umsetzung	32	
	5.1	Spezifische Anforderungen an die Technologie	32	
	5.2	Marktrecherche	33	
	5.2.	1 Fronius – DeltaSpot [®]	34	
	5.2.	2 Fronius – DeltaCon C320	36	
	5.2.	3 Elmatech – Prototypanlage	36	
	5.2.	4 NIMAK – MagneticDrive	37	
	5.3	Bewertungsmatrix zur Auswahl der relevanten Technologien	38	
6	Exp	erimentelle Untersuchungen	39	
	6.1	Auswahl der Versuchslegierungen	10	

6.2	Flachprobenvorbereitung	40
6.3	Durchführung der angewandten Prüfungen	41
6.3.1	1 Sichtprüfung	41
6.3.2	2 Schälprüfung	41
6.3.3	3 Scherzugprüfung	42
6.3.4	4 Metallographische Prüfung	43
6.3.5	5 Schwingfestigkeitsprüfung	43
6.4	Versuchsanlage 1 – DeltaSpot [®]	46
6.4.′	1 Parametereinstellung	47
6.4.2	2 Sichtprüfung der ersten Schweißpunktversuche	48
6.4.3	3 Scherzugprüfung	49
6.4.4	Elektrodenstandzeitversuch	49
6.4.8	5 Metallographische Untersuchung	50
6.4.6	S Schwingfestigkeitsprüfung	52
6.4.7	7 Beurteilung des Gesamtergebnisses	52
6.5	Versuchsanlage 2 – DeltaCon C320	53
6.5.1	1 Parametereinstellung	53
6.5.2	2 Sichtprüfung der ersten Schweißpunktversuche	54
6.5.3	3 Scherzugprüfung	55
6.5.4	Elektrodenstandzeitversuch	56
6.5.5	5 Metallographische Untersuchung	57
6.5.6	S Schwingfestigkeitsprüfung	59
6.5.7	7 Beurteilung des Gesamtergebnisses	61
6.6	Versuchsanlage 3 – Elmatech Prototypanlage	61
6.6.′	1 Parametereinstellung	62
6.6.2	2 Sichtprüfung der ersten Schweißpunktversuche	63
6.6.3	3 Scherzugprüfung	63
6.6.4	Metallographische Untersuchung	63
6.6.5	5 Beurteilung des Gesamtergebnisses	64
6.7	Untersuchung von Punktschweißkleben mit dem DeltaSpot®-Verfahren	64
6.7.1	1 Parametereinstellung	65
6.7.2	2 Sichtprüfung	65
6.7.3	3 Scherzugprüfung	66
6.7.4	Gesamtbeurteilung der Untersuchung Punktschweißkleben	66
6.8	Beschreibung relevanter Kaltfügeverfahren	67
6.8.′	1 Stanznietverbindung – DIN 8593-5	68
6.8.2	2 Durchsetzfügen – DIN 8593-5	69
6.8.3	3 Fließlochschraubverbindung – DIN 8593-3	70
6.8.4	Beschreibung der Nutzwertanalyse	71
6.8.5	5 Nutzwertanalyse zur Auswahl des Kaltfügeverfahrens	72
6.8.6	5 Untersuchung des Punktschweißens im Vergleich mit dem Stanznieten	73
6.9	Kostenbewertung Punktschweißen gegenüber Stanznieten	75

	6.9.1	Beschreibung der praktischen Anwendung	75
	6.9.2	Kalkulation der Varianten	76
7	Bewertu	ng der relevanten Verfahren	78
8	Zusamm	enfassung und Ausblick	80
Lite	raturverz	eichnis	82
Abb	ildungsve	erzeichnis	85
Tab	ellenverz	eichnis	90
Anh	ang 1: Al	uminiumlegierungen der Gruppe EN-AW6xxx	91
Anh	ang 2: So	chweisseignung von Werkstoffen	92
Anh	ang 3: Ai	nhaltswerte – Punktschweissen von Aluminium	93
Anh	ang 4: Na	achsetzverhalten	94
Anh	ang 5: Ai	uswahl geeigneter Beizmittel	95
Anh	ang 6: So	chweissbrucharten	96
Anh	ang 7: Da	atenblätter	97
Anh	ang 8: So	chwingfestigkeitsüberprüfung – Begriffe	99
Anh	ang 9: So	chweissanlage DeltaSpot [®]	100
Anh	ang 10: S	Schweissanlage Delta Con 320	105
Anh	ang 11: S	Schweissanlage Elmatech – Prototypanlage	111

1 EINLEITUNG

Das Thema des Leichtbaus im Karosserierohbau ist aufgrund von verschärften CO₂-Richtlinien und verbesserter Fahrdynamik ein klarer Trend in der Automobilindustrie. Das Unternehmen MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG arbeitet aktuell an der schnellen Integration von flexiblen, kosteneffizienten und prozesssicheren Verbindungstechnologien für Stahl und Aluminium bzw. Multimaterialen im Karosserierohbau. Im Rahmen eines internen Projektes unter der Bezeichnung JoinTec (Joining-Technologie) werden in Kooperation diese Themen mit dem internen Fügetechnikzentrum, externen Forschungseinrichtungen und Industriepartnern behandelt. Die Evaluierung von möglichen Fügeverfahren für Aluminium/Aluminium und Stahl/Aluminium – insbesondere mit den Technologien CMT-Schweißen, Laserpunktschweißen sowie Widerstandspunktschweißen – sind Kernpunkte des Projektes. Das CMT-Schweißen (Cold Metal Transfer) ist ein geeignetes Metall-Schutzgas-Schweißverfahren, um Stahl mit Aluminium zu verbinden. Das Laserpunktschweißen kann Metalle berührungslos verbinden. Das Widerstandspunktschweißen kann Metalle berührungslos verbinden. Das meisteingesetzte Verbindungsverfahren in der Automobilindustrie.

In Zukunft werden unterschiedliche Anwendungen von Fügetechnologien im Automobilbau zunehmend relevanter werden. Die Abb. 1 zeigt am Beispiel des neuen Audi A8-Karosserierohbaus viele Fügetechnologien im Automobilleichtbau.



Abb. 1: Fügetechnologien am Beispiel des Audi A8 - Karosserierohbau, Quelle: SAE International, Online-Quelle [02.12.2017].

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

In den vergangenen Jahren ist die Widerstandspunktschweißtechnik für Aluminiumlegierungen immer mehr in den Vordergrund gerückt. Aluminiumlegierungen sind für den Leichtbau sehr gut geeignet. Zudem ist die Widerstandspunktschweißtechnik das bedeutendste Fügeverfahren bei Blechschalenbauweisen im Automobilbau. Grundsätzlich liegt das Hauptproblem bei konventionellen Punktschweißverfahren in der Anlegierungsneigung des Grundwerkstoffes bzw. der starken Verunreinigung der einzelnen Kupferelektroden. Außerdem sind die physikalischen und chemischen Materialeigenschaften von Stahlund Aluminiumlegierungen grundverschieden, und schließlich sind die Schweißprozesse mit den geforderten Schweißpunktqualitäten problematischer bei Aluminium. Die MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG hat bereits versucht, ein bestehendes Verfahren für Aluminiumanwendungen namens DeltaSpot[®] für den seriellen Einsatz zu erproben. Doch Aufwand und Kosten für die Instandhaltung des Verfahrens verhindern bisher die Anwendung in der Fahrzeugproduktion.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Masterarbeit ist es, mehrere Widerstandspunktschweißverfahren auf ihre Eignung für Aluminiumlegierungen in einer ersten Absicherung zu untersuchen (vgl. Kapitel 4), um in Zukunft den serientauglichen Einsatz in der Fahrzeugproduktion von MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG zu ermöglichen. Dabei sind die Elektrodenstandmenge, die Gesamtanzahl der Schweißpunkte vor der Nacharbeit (Reproduzierbarkeit) und die Einstellung der Schweißparameter die entscheidenden Faktoren.

Der theoretische Teil dieser Arbeit behandelt die Verwendung von Aluminiumlegierungen im Karosserierohbau und die Grundlagen des Widerstandspunktschweißens, um dann im Anschluss die Herausforderungen beim Schweißen von Aluminium und beim Punktschweißkleben sowie die Bewertungen der Schweißpunkte zu diskutieren. Punktschweißen bei den Werkstoffen Stahl und Aluminium werden miteinander verglichen, um das Verhalten von Aluminium beurteilen können.

Der praktische Teil beinhaltet die Konzepterstellung der Technologieuntersuchung mit einer umfassenden Marktrecherche für vorhandene Widerstandspunktschweißverfahren für Aluminium. Potenzielle von Industriepartnern angebotene Verfahren sind zu bewerten und für die weitere praktische Umsetzung auszuwählen. Die favorisierten Widerstandspunktschweißverfahren sind anschließend in Bezug auf ihre Eignung mithilfe von Schweißprüfverfahren wie der Sicht-, der Scherzug-, der metallographischen und der Schwingfestigkeitsprüfung zu untersuchen, um zu beurteilen, ob die Anforderungen erfüllt werden. Außerdem ist das Punktschweißen unter Berücksichtigung eines Klebestoffes im Fügespalt und unter dem Einfluss mit oder ohne Ofenlagerung bzw. mit dem internen Lackierprozess zu analysieren. Weitere wichtige Punkte sind. mechanische Eigenschaften und wirtschaftliche Aspekte von Punktschweißverbindungen mit einem ausgewählten Kaltfügeverfahren zu vergleichen. Am Schluss steht Bewertung der für das Unternehmen empfehlenswerten Punktschweißverfahren die für Aluminiumlegierungen. Die Ergebnisse aus den Versuchen sind zu dokumentieren. Sie werden im Rahmen des internen Projektes JoinTec weiterverfolgt und genutzt.

2 ALUMINIUMLEGIERUNGEN

Die Automobilindustrie ist in den Anwendungen von Aluminiumlegierungen ein sehr bedeutender Markt und bietet auch künftig große Entwicklungsmöglichkeiten. Die wesentliche Herausforderung ist hier, die richtige Kombination einer wettbewerbsfähigen Fügetechnologie zu günstigen Materialpreisen und mit geringem Energieverbrauch zu finden.¹

Vorteile für den Einsatz von Aluminium sind neben dessen Werkstoffeigenschaften die Möglichkeiten, unterschiedliche Bearbeitungsverfahren anzuwenden und zudem die kosten- und energieeffiziente Recyclingfähigkeit. Hervorzuheben sind weiterhin die Anwendbarkeit im Karosserierohbau für einen Multi-Material-Mix (z.B. Aluminium/Stahl) und die Möglichkeit von Fügeverbindungen mit unterschiedlichen metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen. Außerdem haben die Aluminiumlegierungen weitere vielfältig nutzbare Eigenschaften (z.B. Festigkeit bei geringem Gewicht, Umformbarkeit und Schweißbarkeit).²

Aluminium wird in Reinst- und Reinaluminium unterteilt, und zudem wird hinsichtlich der Art der Bearbeitung zwischen Knet- und Gusslegierungen (Abb. 2) unterschieden. Als Schwerpunkt behandelt diese Arbeit die aushärtbaren Knetlegierungen im Karosserierohbau. Grundsätzlich werden die verschiedenen Legierungen mithilfe eines numerischen 4-stelligen Bezeichnungssystems für Knetlegierungen (AW-Aluminium Wrought Alloys) geordnet.³



Abb. 2: Unterschiedliche Knet- und Gusslegierungen, Quelle: Henning/Moeller (2011), S. 226.

¹ Vgl. Ostermann (2014), S. 10.

² Vgl. Friedrich (Hrsg.) (2013), S. 266.

³ Vgl. Ruge/Wohlfahrt (2013), S. 155.

2.1 Aluminium-Knetlegierungen

Aluminium-Knetlegierungen sind wiederum in ausscheidungshärtbare und nicht ausscheidungshärtbare (naturharte) Legierungen eingeteilt. Die Umformverfahren des Walzens und Strangpressens ermöglichen es, Aluminium-Knethalbzeuge wie etwa Bleche, Stangen und Rohre sowie sehr unterschiedliche Voll- und Hohlprofile herzustellen. Zu den ausscheidungshärtbaren Werkstoffen zählen die Legierungstypen AICu, AICuMg, AIMgSi, AIZnMg(Cu) und AISi. Bei diesen lässt sich die Festigkeit durch eine Wärmebehandlung steigern (vgl. Kapitel 2.1.4.). Zu den naturharten Legierungen zählen neben Rein-Aluminium die Legierungssysteme AIMg, AIMn, AIMgMn und AIFeSi. Diese beruhen ausschließlich auf Mischkristallbildung und werden durch Kaltumformung Umständen durch sowie unter Rekristallisationsglühen in ihren Eigenschaften verändert.⁴

2.1.1 AIMg(Mn)-Legierungen

AlMg-Legierungen vom Typ EN AW-5xxx haben mittlere bis hohe Festigkeiten (bis ca. 450 MPa), gute Ermüdungseigenschaften, hohe Kaltverformbarkeit und Korrosionsbeständigkeit. Sie sind sehr gut schweißbar und zählen zu den konventionellen Konstruktionswerkstoffen. EN AW-5xxx-Legierungen werden vor allem zu Walzprodukten bzw. Blechen weiterverarbeitet. Zusätze von Scandium und Zirkon in AlMg-Legierungen können die mechanischen Eigenschaften besonders von Schweißverbindungen verbessern. Dank ihrer Korrosionsbeständigkeit, Duktilität und Schweißbarkeit sind sie für Außen-, Innenblechteile und Strukturteile besonders gut geeignet. Im Karosserierohbau sind durch das gute Verhalten von Festigkeit und Umformbarkeit die Legierungen EN AW-5754 (AlMg3), EN AW-5042 (AlMg3,5mMn) sowie die EN AW-5182 (AlMg4,5Mn0,4) bevorzugt im Einsatz.⁵

2.1.2 AIMgSi-Legierungen

AlMgSi-Legierungen vom Typ EN AW-6xxx wie etwa EN AW-6016 T4 zählen zu den wichtigsten Werkstoffen im Leichtbau und werden im Automobilbau besonders für Außen-, Innenblech- und Strukturteile verwendet. Sie zeichnen sich durch gute Umformbarkeit, hohe Bruchzähigkeiten, mittlere bis hohe Festigkeiten, Beschichtungsfähigkeit sowie Korrosionsbeständigkeit aus und neigen nicht dazu, Fließfiguren (Oberflächenfehler) zu bilden. Aufgrund der guten Strangpressbarkeit eignet sich diese Legierungsgruppe ausgezeichnet für komplexe geometrische Formen. Bei Blechen sollte je nach Legierung und Umformgrad der Zustand "kalt ausgehärtet" (T4) verwendet und dann mit Warmaushärtung behandelt werden. Eigene Entwicklungen von Aluminiumlegierungen für die Automobilindustrie ermöglichen die Kombination von erforderlicher Festigkeit und maximaler Umformbarkeit. Zur Optimierung der Lagerfähigkeit des Bleches und zur Erhöhung der Aushärtung von Einbrennlacken werden daher besonders T6-Zustände bevorzugt. Ein Auszug von möglichen Aluminiumlegierungen im Automobilbau der Gruppe EN AW-6xxx findet sich in Anhang 1.⁶

⁴ Vgl. Friedrich (Hrsg.) (2013), S. 268-269.

⁵ Vgl. Ostermann (2014), S. 102.

⁶ Vgl. Henning/Moeller (2011), S. 233-235.

2.1.3 AIZnMg(Cu)-Legierungen

Zu den Eigenschaften von AlZnMg-Legierungen vom Typ EN AW-7xxx zählen mittlere bis hohe Festigkeit bis über 700 MPa bei gleichzeitig guter Schweißbarkeit. Strukturelle Anwendungen sind besonders im Flugzeugbau zu finden. Sie zeichnen sich durch sehr gute Zerspanbarkeit aus. Besonders bei thermischmechanischen Fügeverfahren, rein mechanischen und Klebstoffverbindungen werden AlZnMg-Legierungen eingesetzt. Die Legierungen EN AW-7020 und EN AW-7075 werden auch wegen ihrer guten Energieabsorption bei crash-relevanten Bauteilen für den Schutz der Insassen im Fahrzeug zunehmend auch im Automobilbau eingesetzt. Häufiger sind diese hoch- und höchstfesten Legierungen schon in Luftund Raumfahrzeugen zu finden. Aufgrund der hohen Anforderungen an Materialqualitäten, Konstruktion und Verarbeitung sind EN AW-7xxx-Legierungen jedoch teuer.⁷

2.1.4 Zustandsbezeichnung

Zur Erreichung eines bestimmten Festigkeitsniveaus benötigen aushärtbare Legierungen eine Wärmebehandlung. Diese besteht aus Lösungsglühen und Abschrecken mit darauffolgender Kalt- oder Warmauslagerung. Beim Lösungsglühen werden die Legierungselemente unter hoher Temperatur (ca. 450°C bis 550°C) im Aluminiumkristall gelöst. Durch rasches Abkühlen werden die gelösten Legierungselemente "eingefroren". Das Kalt- oder Warmauslagern (Ausscheidungshärten) danach unterstützt die Bildung feiner, gleichmäßig verteilter Ausscheidungen, und diese feinverteilten Legierungsbausteine steigern die Festigkeit.⁸ Die Abb. 3 zeigt laut Norm DIN EN 515 die Zustandsbezeichnung am Beispiel T6. Eine maximale Aushärtung bei gleichzeitig hoher Festigkeit wird mit diesem Zustand erreicht.⁹



Bezeichnung	Bedeutung
Т3	lösungsgeglüht, kalt umgeformt und kalt ausgelagert
T4	lösungsgeglüht und kalt ausgelagert
T5	abgeschreckt aus der Warmumformungstemperatur und warm ausgelagert
Т6	lösungsgeglüht und warm ausgelagert
Τ7	lösungsgeglüht und überhärtet; verbessert Spannungsriss- und Schichtkorrosionsverhalten
Т8	lösungsgeglüht, kalt umgeformt und warm ausgelagert

Abb. 3: Zustandsbezeichnungen, Quelle: Henning/Moeller (2011), S. 228 (leicht modifiziert).

⁷ Vgl. Henning/Moeller (2011), S. 235-236.

⁸ Vgl. Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2016), Online-Quelle [02.12.2017]

⁹ Vgl. Henning/Moeller (2011), S. 228.

2.2 Besonderheiten beim Aluminium- gegenüber Stahlpunktschweißen

Die Eigenschaften von Aluminium unterscheiden sich markant von denen der Stähle. Um an die Erfahrungen mit Eisenwerkstoffen anknüpfen zu können, ist zunächst zu betrachten, in welchen Eigenschaften beide Werkstoffe voneinander abweichen. Die Tab. 1 nennt deren wichtigste Eigenschaften für den Widerstandsschweißprozess. Die Schmelztemperatur von Aluminium liegt deutlich unter derjenigen von Stahl (abhängig von der Legierung). Bei Aluminiumlegierungen sind trotz höheren Wärmeleitfähigkeiten 3-mal kürzere Schweißzeiten (70 – 120 ms) möglich und ein schnelles Nachsetzen der Elektroden erforderlich. Ebenfalls besitzt Aluminium eine höhere spezifische elektrische Leitfähigkeit. Aus diesem Grund sind bei Aluminiumwerkstoffen 3-fach höhere Ströme (25 – 50 kA) notwendig, und es ist der Nebenschlusseffekt zu berücksichtigen. Außerdem ist die spezifische Wärmeleitfähigkeit größer als die von Stahl, was den Prozess der Kühlung deutlich beeinflusst. Zusätzlich ist der Schmelzpunkt von Aluminiumoxiden deutlich höher, wodurch die Oberflächenvorbehandlung von Aluminiumblechteilen wichtig wird. Schließlich hat Aluminium einen doppelt so hohen Ausdehnungskoeffizienten wie Stahl, was die Risiken für Materialverzug durch den Schweißprozess, Rissbildung und die Maßhaltigkeit von Schweißkonstruktionen erhöht.¹⁰

Material	Stahl	Aluminium
spez. elektrische Leitfähigkeit	10	$17 \cdot 10^6 - 36 \cdot 10^6 \frac{s}{m}$
spez. Wärmeleitfähigkeit	67 W /mK	120 – 235 W mK
Dichte	7,87 $\frac{g}{cm^3}$	2,7 $\frac{g}{cm^3}$
E-Modul	211 MPa	70 MPa
Schmelztemperatur	1539 °C	658 °C
Schmelztemperatur Oxide	-	2050 °C
Elektrodenkraft	2 – 3 kN	3 – 8 kN
Schweißzeit	250 – 600 ms	60 – 120 ms
Schweißstrom	6 – 12 kA	25 – 50 kA
Fräsintervall	300 – 400	20 – 50

Tab. 1: Besonderheiten beim Punktschweißen von Aluminiumlegierungen, Quelle: Bosch Rexroth (2017), S. 11 (leicht modifiziert).

Wegen diesen Eigenschaften werden für das Punktschweißen von Aluminiumlegierungen höhere Kräfte, höhere Ströme und andere Elektrodengeometrien als beim Widerstandspunktschweißen von Stahl benötigt. Im Vergleich der zeitlichen Verläufe bei der Widerstandsschweißung von Stahl zu Aluminium, werden die Unterschiede dieser Werkstoffe klar erkennbar. Die folgenden Kapitel stellen diese Punkte vor.

¹⁰ Vgl. Harms+Wende (2017), S. 3.

3 WIDERSTANDSPUNKTSCHWEISSEN

Im Allgemeinen sind die Fertigungsverfahren je nach Art und Zusammenhalt (Kraft-, Form-, Stoffschluss) sowie deren Funktionsweise nach DIN 8580 bestimmt. Fügen durch Schweißen (DIN 8580-6) zählt hier zur Hauptgruppe 4 der Fertigungsverfahren. Die Schweißeignung, -möglichkeit und -sicherheit sind für jeden Schweißprozess und ebenso für die Beschreibung der Schweißbarkeit eines Bauteiles wesentlich. Die Schweißeignung hängt ab von den Eigenschaften eines Werkstoffes, die Schweißmöglichkeit von der Eigenschaft der Fertigung und die Schweißsicherheit schließlich von der konstruktiven Umsetzung.¹¹

Das Widerstandsschweißen, also Schweißen mit Widerstandserwärmung, ist in DIN EN 14610 detailliert festgelegt. Die zum Schweißen notwendige Wärme wird durch den Stromfluss über den elektrischen Widerstand der Schweißzone bzw. eines Hilfsstoffes erzielt. Zum einen wird mit oder ohne Kraft und zum anderen ohne Hilfsstoffe oder mit diesen geschweißt. Die konzentrierte Wärmeeinbringung führt zu lokalen Veränderungen der Mikrostruktur und dadurch auch zu Veränderungen der Materialeigenschaften im Bereich der Fügestelle. Die hierdurch entstehenden Gefügezonen werden als Schweißlinse (SL), Wärmeeinflusszone (WEZ) und Grundwerkstoff (GW) bezeichnet.





Abb. 4: Einteilung der Widerstandspunktschweißverfahren, Quelle: Fahrenwaldt/Schuler/Twrdek (2014), S. 100.

Die Verfahren des Buckel-, Rollennaht-, Pressstrumpf- und des Abbrennstrumpfschweißens unterscheiden sich durch die Elektrodenform, Gestaltung des Werkstückes und Steuerung des Schweißablaufes. Ein wichtiges Verfahren der Blechverarbeitung in der Automobilindustrie ist das Widerstandspunktschweißen.¹²

Neue Entwicklungen in Bezug auf Stromquellen, Steuerungen und Elektrodenbearbeitungsgeräte werden für künftige Formen der Punktschweißanwendungen von Aluminium erwartet.

¹¹ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 322.

¹² Vgl. Ostermann (2014), S. 632 ff.

3.1 Allgemeines

Das Widerstandspunktschweißen ist heute in der Automobilindustrie unverzichtbar, da es schnelle Prozess-Zykluszeiten ermöglicht, sich einfach automatisieren lässt, nur geringe Komplexität aufweist und deutlich geringere Kosten gegenüber ähnlich vergleichbaren Verfahren verursacht. Weitere Vorteile sind kurze Schweißzeiten, der Entfall von Nahtvorbereitungen und die Anwendbarkeit in verschiedenen Schweißpositionen. Schließlich müssen die Bauteile nicht nachbearbeitet werden. Nachteile hingegen sind der nicht-vermeidbare Elektrodenverschleiß und die Nicht-Prüfbarkeit der Verbindung während der Erzeugung der Schweißpunkte. Es lassen sich grundsätzlich alle Stahllegierungen und eine größere Anzahl von Nichteisenmetallen (z.B. Aluminium, Nickel, Kupfer) mit diesem Verfahren verbinden. Zum Punktschweißen von Werkstoffen mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, wie etwa bei Aluminium, eignet sich Gleichstrom besonders. Hauptsächlich werden artgleiche Bleche miteinander verschweißt und Verbindungen bevorzugt, bei denen der größte Linsendurchmesser symmetrisch in der Berührungsebene beider Bleche liegt. Für die notwendige Festigkeit beim Punktschweißen sind Abstand und Größe der Schweißpunkte entsprechend zu dimensionieren.¹³

Werkstoff	Schweißmaschine	Elektroden	Werkstückoberfläche
elektrische Leitfähigkeit	Stromform	Elektrodenwerkstoff 1)	Aluminiumoxidschicht 2)
Wärmeleitfähigkeit	Schweißstrom ¹⁾	Elektrodenform 1)	Oberflächenrauheit ²⁾
Schmelzbereich	Elektrodenkraft 1)	Elektrodenkühlung	
Wärmeausdehnungs-	Nachsetzverhalten		
koeffizient	Aufsetzverhalten		
	Starrheit		
1) Variabel bei vorhandener Einrichtung 2) Abhängig von der Vorbehandlung			

Die Abb. 5 zeigt die wichtigsten Einflussgrößen beim Aluminiumpunktschweißen:¹⁴

Abb. 5: Einflussgrößen beim Punktschweißen, Quelle: Kammer (2014), S. 222 (leicht modifiziert).

Das Schweißergebnis hängt zudem von Sauberkeit, Fettfreiheit und Oberflächenrauheit wie auch von Materialstärke, Werkstoff-Zusammensetzung, elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Aluminiumoxidschicht ab.

¹³ Vgl. Dilthey (2006), S. 146.

¹⁴ Vgl. Kammer (2014), S. 222.

3.2 Prinzip des Verfahrens

Beim Widerstandspunktschweißen von Aluminium müssen keine Hilfsstoffe (z.B. Schutzgas) zugeführt werden. Bei diesem Prozess werden zuerst die zu verbindenden Blechteile zueinander in der Schweißfläche ausgerichtet. Daraufhin pressen zwei stabförmige Kupferelektroden die beiden Blechteile zusammen und festigen so die zu verschweißenden Werkstücke. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung wird ein Stromfluss zwischen beiden Elektroden erzeugt, wobei die beiden Blechteile als Widerstand für den fließenden Strom wirken. Deshalb erhitzt sich der metallische Werkstoff punktuell und verflüssigt sich in der Schmelzzone. Abschließend verschmelzen durch den Druck der Elektroden beide Werkstücke an diesen Punkten linsenförmig miteinander und sind nach dem Abkühlen untrennbar miteinander verbunden.¹⁵

Im Karosserierohbau kommen häufig 2-Blechverbindungen mit Blechdicken von 1,0 bis 2,5 mm und die Verbindungsart "Überlappenstoß" zum Einsatz. Beim Widerstandspunktschweißen von Aluminium werden Elektrodenkräfte von bis zu 8 kN angewandt. Der Schweißstrom kann je nach Aufgabe bis zu 50 kA betragen. Schweißzeiten liegen im Bereich von 60 bis 200 ms und sind je nach Anwendung sowie Schweißmaschinenhersteller verschieden.

Die Abb. 6 veranschaulicht das Prinzip des zweiseitigen Widerstands-Punktschweißverfahrens, einer 2-Blechverbindung mit der Verbindungsart "Überlappenstoß".¹⁶



Abb. 6: Prinzip des Widerstandspunktschweißens, Quelle: Kammer (2014), S. 221.

¹⁵ Vgl. Rime GmbH (2017), Online-Quelle [02.12.2017]

¹⁶ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 331.

3.3 Physikalische Grundlagen

Abhängig von den Prozessparametern Schweißstrom, Elektrodenkraft und Schweißzeit wird die erforderliche Wärmemenge zwischen den Fügepartnern erzeugt. Außerdem ist zwischen Kontakt- und Stoffwiderständen zu unterscheiden. Während Kontaktwiderstände über die Elektrodenkraft beeinflussbar sind, hängen die Stoffwiderstände von den verschweißten Werkstoffen ab.

Die Grundlage für die zugeführte Wärmemenge Q_{zu} liefert das Joulesche Gesetz (3.1), unter der Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit von R_{Ges} :¹⁷

		Q _{zu} / J	Wärmemenge
		<i>I_s</i> / A	Schweißstrom
$Q_{zu} = c \cdot I_s^2 \cdot R_{Ges} \cdot t_s$	3.1	R_{Ges} / Ω	Gesamtwiderstand
		t _s / s	Schweißzeit
		c/1 K	onstante (= Wärmeäquivalent)

Für die Herstellung der Schweißlinse ist vor allem die Wirkwärmemenge Q_w ausschlaggebend, also die zugeführte Wärmemenge Q_{zu} abzüglich der Verlustwärmemenge Q_{verl} , die wiederum von der Schweißzeit, der Wärmeleitfähigkeit, der Blechstärke, der Geometrie, der Nachpresszeit und Kühlung der Elektroden abhängt. Die Abb. 7 zeigt die Wärmebilanz beim Punktschweißen.



Q_W ... Wirkwärmemenge (erzeugt Schweißlinse)

- Q_{zu} ... Zugeführte Wärmemenge
- Q_{verl} ... Verlustwärmemenge
- QVE ... Verlustwärmemenge durch Ableitung in die Elektrode

Q_{VB} ... Verlustwärmemenge durch Ableitung in die Bleche

Q_{VS} ... Verlustwärmemenge durch Wärmestrahlung

Abb. 7: Wärmebilanz beim Punktschweißen, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 324.

Der Gesamtwiderstand R_{Ges} entsteht an der Schweißstelle aus den Kontakt- und Stoffwiderständen der Elektroden sowie der zu verschweißenden Bauteile. Die Stoffwiderstände der Elektroden müssen gering sein, da die entstehende Wärme selbst ohne Einfluss auf den Schweißvorgang ist. Auch sollten die Kontaktwiderstände gering gehalten werden, da andernfalls hohe Erwärmung und dadurch erhöhter Elektrodenverschleiß drohen, ein typisches Problem bei Aluminium.¹⁸

In Abb. 8 sind die Kontakt- und Stoffwiderstände beim Widerstandspunktschweißen dargestellt.

¹⁷ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 323.

¹⁸ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 333.



Abb. 8: Kontakt- und Materialwiderstände beim Punktschweißen, Quelle: Ostermann (2014), S. 633.

3.4 Schweißeignung der Werkstoffe

Die Schweißeignung ist ein Oberbegriff für Eigenschaften von Werkstoffen in Bezug auf das Schweißen. Diese besteht, wenn die chemischen, metallurgischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften ein Fügen der Werkstoffe erlauben. Die geeignete chemische Zusammensetzung soll verhindern, dass der Werkstoff aufhärtet oder Risse bildet. Die physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe werden durch die Festigkeit, Zähigkeit, Schmelzpunkt, Wämeleitfähigkeit und Ausdehnung bestimmt. Schlussendlich werden die metallurgischen Eigenschaften durch die Erschmelzungsart und Wärmebehandlungszustand festgelegt (Korngröße, Gefügeausbildung). Zur Bewertung der Schweißeignung für das Widerstandspunktschweißen wird der Schweißfaktor S empfohlen. Liegt der Wert nach der Formel (3.2) unter 0,75, ist der Werkstoff weniger gut zum Schweißen geeignet. Des Weiteren hängt die Schweißeignung von der Rauigkeit der Oberfläche und den Eigenschaften etwaiger metallischer bzw. organischer Beschichtungen ab. Die metallurgischen und chemischen Eigenschaften sind bei Aluminiumlegierungen wegen der Heißrissneigung und des Schmelzverhaltens beim Erstarren besonders wichtig.¹⁹

		$\gamma / \frac{\mathrm{m}}{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}$	elektr. Leitfähigkeit
$S = 4,2 \cdot 10^6 / (\gamma \cdot \lambda \cdot T_S)$	3.2	$\lambda / \frac{W}{cm} \cdot K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
		$T_{s}/°c$	Schmelztemperatur

Die im Anhang 2 genannten Legierungen liegen laut der angegebenen Formel (3.2) im Bereich der guten Schweißbarkeit und können für die Überprüfung der praktischen Versuche eingesetzt werden.

¹⁹ Vgl. Fahrenwaldt/Schuler/Twrdek (2014), S. 103.

3.5 Schweißmaschine

Die Schweißmaschine stellt beim Schweißen die Energie an der Verbindungstelle zur Verfügung. Die Hauptkomponenten einer Schweißmaschine sind neben den elektrischen Komponenten (Stromquelle und schweißtechnisches Zubehör), das mechanische System (stationäre Einrichtungen und Schweißzangen) und die Schweißsteuerung (Leistungsstufe, Steuerstufe, Kontroll- und Regeleinrichtungen). Im Vergleich zu Stahl benötigen Aluminiumlegierungen beim Punktschweißen mehrere maschinelle Anpassungen:²⁰

- höhere Schweißströme (zwei- bis vierfach),
- kürzere Schweißzeiten,
- höhere Elektrodenkräfte,
- schnellere Stromregelung,
- Strom-Kraft-Programme und
- Nachsetzverhalten und hohe Zangensteifigkeit.

Grundsätzlich wird zwischen Ständermaschinen und Punktschweißzangen (Abb. 9) unterschieden. Die stationären Einrichtungen bzw. ortsfesten Ständermaschinen ermöglichen eine mechanisch steife Konstruktion, wodurch mit großen Elektrodenkräften und hohen Strömen gearbeitet werden kann. Hier ist das Werkstück beweglich und die Bauteile sind in der Maschine zugänglich.



Abb. 9: Roboterschweißzange powerGUN für Aluminiumanwendungen, Quelle: NIMAK GmbH (2017), Online-Quelle [02.12.2017].

Sogenannte Punktschweißzangen (C- oder X-Zangenausführung) sind hingegen bewegliche Maschinen und werden über ein sekundärseitiges Kabel mit dem Transformator oder Gleichrichter verbunden, der sich auch direkt in die Zange integrieren lässt. Die Schweißzangen werden in einer Schweißanlage zum Werkstück geführt und positioniert. Die Elektrodenkräfte sind kleiner als bei ortsfesten Maschinen. Häufig kommen robotergeführte Punktschweißzangen im industriellen Bereich zum Einsatz. Die Elektroden werden häufig direkt in der Schweißanlage nach einem bestimmten Fräsintervall (z.B. 50 Punkt bei Aluminium) durch sogenannte "Kappenfräser" (Abb. 16) nachbearbeitet bzw. gereinigt.²¹

²⁰ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 325.

²¹ Vgl. Dilthey (2006), S. 140 f.

3.6 Schweißparameter

Zu den wichtigsten Schweißparametern zählen neben dem Schweißstrom vor allem die Schweißzeit und die Elektrodenkraft. Sie sind allesamt der Werkstofflegierung und der Materialstärke anzupassen. Der Schweißstrom hat großen Einfluss auf die gelieferte Wärmemenge. Hohe Schweißströme können durch Spritzer zu Lunkern in der Schweißlinse führen, die wiederum den Verschleiß der Elektroden erhöhen. Als Schweißzeit t_s gilt der unmittelbare Prozess des Schweißvorganges (Abb. 10). Sie wird an der Steuerung der Maschine eingestellt, und ihre Dauer beeinflusst die Ausbildung der Schweißlinse. Die Vorhaltezeit (Vorkonditionierung) ist notwendig, um die Bauteile zwischen den Elektroden mit einer bestimmten Kraft zusammenzudrücken. Zudem bleiben während der Nachhaltezeit (Nachkonditionierung) die Elektroden zusammengepresst. Die Vor- und die Nachkonditionierung werden in Abschnitt 3.6.2 näher beschrieben.²²

Die Abb. 10 stellt schematisch den Verlauf von Elektrodenkraft, Schweißstrom und Schweißzeit beim Widerstandspunktschweißen dar.



Abb. 10: Schematischer Verlauf von Elektrodenkraft, Schweißstrom und Schweißzeit, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 344.

²² Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 344f.

Die Elektrodenkraft hat wesentliche Funktionen. Sie soll etwa die Kontaktwiderstände verringern, um die Elektrodenstandmenge zu erhöhen. Andererseits beeinflusst ihre Höhe die Wärmeleitung an der Schweißstelle zwischen Schweißelektroden und Fügepartner. Zu hohe Elektrodenkräfte verursachen eine zu große Eindringtiefe, und zu niedrige führen zu stärkerer Porenbildung.²³ Die Elektrodenkraft wird bei modernen Schweißanlagen über einen servomotorischen Antrieb erzeugt (Elektrodenbewegung), der ein sanftes Aufsetzen auf der Werkstückoberfläche, schnelles Nachsetzen und eine Steuerung der Elektrodenkraft während des Schweißens ermöglicht, um Risse sowie Schweißporen zu vermeiden.²⁴

Während des Schweißprozesses wird die Temperatur an der Verbindungstelle gesteuert. Sie und ebenso der Schweißstrom sind wiederum abhängig vom Stoff- bzw. Materialwiderstand.

Die Schweißparameter können unter Vorbehalt nach Annäherungsformeln (3.3) berechnet, nach Richtwerten der Maschinenhersteller oder nach Empfehlungen der DVS-Merkblätter (DVS = Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.) bestimmt werden. Um die Parameter auszuwählen, gibt es allgemein die folgenden empirischen Zusammenhänge:

		//kA	Schweißstrom
$I = 9.5 \cdot \sqrt{s}$		<i>s</i> / mm	Blechstärke
$t_s = 8 \cdot s$	3.3	<i>t</i> s / ms	Schweißzeit
$F = 2.000 \cdot s$		F/N	Elektrodenkraft

Anhang 3 liefert Anhaltswerte für die Einstellparameter für Schweißanlagen beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen. Diese Daten für die Parameter Schweißstrom, Schweißzeit und Elektrodenkraft helfen zwar, die Auswahl zu vereinfachen. Doch schon geringe Abweichungen können bereits zu einem anderen Schweißergebnis führen. In der Praxis empfiehlt es sich deshalb, die Prozessparameter für die einzelnen Schweißaufgaben nach dem geforderten mind. Schweißpunktdurchmesser endgültig einzustellen, wie in Abschnitt 3.11.3 näher erläutert.²⁵

²³ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 346.

²⁴ Vgl. Fahrenwaldt/Schuler/Twrdek (2014), S. 105.

²⁵ Vgl. Kammer (2014), S. 230.

3.6.1 Schweißstrom

Die erforderliche hohe Energie beim Schweißen wird durch den elektrischen Strom bzw. den Schweißstrom bereitgestellt. Er muss der Schweißaufgabe angepasst sein und beeinflusst maßgeblich die Wärmeeinwirkung an der Schweißstelle. Außerdem sind beim Schweißstrom die Schwankungen des Stromes durch Netzänderungen, Impedanzen (durch magnetisierbare Bauteile) und die Abhängigkeit des Elektrodenverschleißes zu berücksichtigen.²⁶

Bei Aluminium ist Gleichstromschweißen demjenigen mit Wechselstrom vorzuziehen. Denn bei Wechselstrom drohen Risiken wie hohe Blind- und Anschlussleistung, unsymmetrische Netzbelastung, höherer Energiebedarf und schlechtere Schweißpunktqualität. Beim Gleichstrom lässt sich zwischen gängigen Gleichstromanlagen und Mittelfrequenzanlagen (1000 Hz) unterscheiden. Die Mittelfrequenzoder Invertertechnik ist beim Punktschweißen von Stahl/Aluminium in der Industrie eine Standard-Anwendung. Ihre Vorteile sind schneller Stromanstieg, geringere Spritzerbildung, gute Schweißpunktqualität, geringes Transformatorgewicht und ein größerer Schweißbereich.²⁷

Beim Gleichstromschweißen können sich durch den sogenannten Peltier-Effekt (Abb. 11) die Schweißlinsen nicht symmetrisch verlagern, was den Elektrodenverschleiß an der Seite der Anode (positive Elektrode) erhöht. Dieser Effekt basiert auf den großen Potenzialdifferenzen zwischen Aluminium und Kupfer. Es wird beim Übergang der Schweißkupfer-Kathode auf das Aluminiumblech Energie verbraucht und beim Übergang vom Aluminiumblech zur Schweißkupfer-Anode wieder Energie in Form von Wärme freigesetzt. Dadurch verändert sich beim Gleichstromschweißen von Aluminium die Schweißlinse in Richtung der positiven Schweißelektrode. Dieser Effekt ist ein Nachteil des Gleichstroms gegenüber Wechselstrom, doch die Vorteile gegenüber Wechselstrom überwiegen.



Abb. 11: Peltier-Effekt beim Gleichstromschweißen von Aluminiumlegierungen, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 637.

²⁶ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 345.

²⁷ Vgl. Ostermann (2014), S. 637.

3.6.2 Strom- und Kraftprogramme

In der Praxis kommen für aushärtungsempfindliche Stähle sowie Aluminiumlegierungen sogenannte Strom- und Kraftprogramme (kurz: Strom-Kraftprofile) zum Einsatz. Eine Programmsteuerung erlaubt es, den Strom zu verändern bzw. verschiedene Elektrodenkräfte während des Schweißprozesses anzuwenden – beispielsweise Vorwärmen und Nachwärmen.

Grundsätzlich ist ein Strom- und Kraftprogramm in drei Phasen unterteilt: Vorkonditionierung (Vorwärmen), Hauptstrom-Phase und Nachkonditionierung (Nachwärmen). Die Vorkonditionierung sorgt für gleichbleibende Widerstandsverhältnisse in der Ausgangssituation bei jeder einzelnen Schweißung und somit für eine angemessene Reproduzierbarkeit der Schweißlinse, indem durch die Einwirkung der Elektrodenkraft die Aluminiumoxidschicht aufgebrochen, Kontaktbrücken hergestellt und mittels Vorimpuls entfernt werden. Dieser Vorgang ist ebenso beim Punktschweißkleben durch die Verdrängung der Klebstoffschicht unterstützend wirksam. Die Hauptstromphase dient zur Ausbildung der Schweißlinse mittels entsprechender Stromstärke zur Erreichung des mind. Punktdurchmessers und ermöglicht eine maximale Stromstärke zum prozesssicheren Fügen (Schweißbereich). Die Nachkonditionierung soll das Risiko von Poren- und Rissbildung durch ein kontrolliertes Abkühlen und Nachdrucken vermindern.²⁸

Die Abb. 12 zeigt ein Beispiel eines Strom-Kraftprogrammes beim Widerstandspunktschweißen, wobei die Parameter Elektrodenkraft, Schweißstrom und Schweißzeit dargestellt sind.



Abb. 12: Beispiel eines Strom-Kraftprogrammes, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 347 (leicht modifiziert).

²⁸ Vgl. Ostermann (2014), S. 639.

3.6.3 Nachsetzverhalten

Durch Nachsetzen beim Punktschweißen wird das Werkstück beim Abkühlen zusammengepresst. Maßstab für das Nachsetzverhalten ist die Zeit in ms bis zum Erreichen bzw. Wiederreichen der vollen Elektrodenkraft bei Eindringen der Elektroden in die Werkstückoberfläche. Ist das Nachsetzen zu träge, erstarrt die Schweißlinse unter zu geringer Elektrodenpresskraft, was Lunker im Linsenkern verursacht. Schnelles Nachsetzen vermindert die Gefahr der Spritzerbildung. Ein negativer Einfluss auf die Elektrodenstandmenge ist hier aber nicht bekannt.²⁹

Nebenschlussverluste können durch fertigungsbedingte Fehler entstehen oder bei zu geringen Schweißpunktabständen oder durch ungünstige Profilgestaltung sich als konstruktive Fehler zeigen. In der folgenden Abb. 13 sind beide Fälle dargestellt.



Abb. 13: Fertigungsbedingte- und konstruktive Fehler, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 346 (leicht modifiziert).

Der fertigungsbedingte Fehler tritt auf, wenn zwei Schweißpunkte zu nahe beieinanderliegen oder ein Schweißpunkt nahe am Blechrand ist. Das heißt beim Schweißen des nächsten Punktes fließt ein Teil des Stromes über den vorhandenen Punkt hinaus. Der Stromanteil fehlt beim Schweißen des zweiten Punktes, sodass dieser zu klein wird. Der hier gezeigte konstruktive Fehler entsteht, wenn durch eine ungünstige Profilform an der Schweißstelle zu wenig Schweißstrom verfügbar ist.³⁰

Da bei Aluminiumlegierungen wegen der höheren elektrischen Leitfähigkeit der Nebenschluss eher ein Risiko ist als bei Stahl, sind im Anhang 4 nach Norm DIN EN ISO 18595-12 empfohlene Abstände am Werkstück bei jeder Schweißung dargestellt. Es zeigt die Werte des Randabstandes von 1,25 *d* und des Schweißpunktabstandes von 6 *d*, die jeweils nicht unter diesem Wert liegen dürfen. Eine Unterschreitung der Mindestabstände führt definitiv zu einer schlechten Schweißpunktqualität.³¹

²⁹ Vgl. Kammer (2014), S. 230.

³⁰ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 346.

³¹ Vgl. DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 8-9.

3.7 Elektroden und Elektrodenstandmenge

Die Elektroden übertragen beim Widerstandspunktschweißen Kraft und Strom. Ein erhebliches Problem bei konventionellen Widerstandspunktschweißungen sind wie erwähnt das Anlegieren der Elektrode (Abb. 14) bzw. die geringe Elektrodenstandmenge. Die Elektrodenstandmenge ist die Anzahl der möglichen Schweißpunkte der Elektroden bis zum Abfall der Qualität auf einen Mindestwert des vereinbarten Merkmales (vgl. Abschnitt 3.11.3). Dieses Qualitätsmerkmal kann am einfachsten durch das erste Anhaften der Elektrode am Werkstück oder Oberflächengüte der verschweißten Fügeteile festgestellt werden.³²



Abb. 14: Anlegierung von Aluminium an der Kupferelektrode, Quelle: Fronius International GmbH (2017), S. 9.

Die wesentlichen Anforderungen an die Elektrode sind zusammengefasst:33

- hohe Elektrodenstandmenge,
- große elektrische und thermische Leitfähigkeit,
- hohe Festigkeit und Wärmehärte,
- einfache Bearbeitungsmöglichkeiten,
- hohe Anlassbeständigkeit (Widerstand gegen Anlassen) und
- eine hohe Erweichungs- und Rekristallisationstemperatur.

Um die notwendigen Elektrodenstandmengen zu erreichen, werden in der Fahrzeugproduktion vor allem Kupferlegierungen eingesetzt. Die Werkstoffe für Elektroden sind in der DIN EN ISO 5182 sowie im Merkblatt DVS 2903 festgelegt. Für CuCr- CuCrZr- und CuCoBe-Elektroden zeigen Untersuchungen die höchsten Elektrodenstandmengen. Die daraus abzuleitende zunehmende Abnutzung der Elektrodenfläche verringert die Stromdichte und erhöht damit das Risiko für Schweißfehler. Beschichtungen der Elektrodenflächen (z.B. mit Ni, Mo, Rh, Mo+Rh) bringen keine höhere Elektrodenstandmenge.³⁴

Elektroden sind nach Form und Art in einteilige Massivelektroden oder zweiteilige Elektroden unterteilt. In der industriellen Produktion werden häufig gerade, zweiteilige, zentrische und wassergekühlte Elektroden

³² Vgl. Ostermann (1992), S. 82.

³³ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 334f.

³⁴ Vgl. Kammer (2014), S. 228 f.

verwendet. Beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen wird eine ballige Form der flachen Elektrode vorgezogen. Eine ballige Form erhöht zu Beginn den Druck in der Elektrodenmitte, wodurch die Oxidschicht durchbrochen wird. Für das Schweißen werden Ballenradien von 40 bis 150 mm bei Blechstärken von 1,0 bis 2,5 mm und Elektrodendurchmessern von 16 bis 20 mm je nach Anwendung verwendet. Somit ist die Elektrodenform wesentlich für das Schweißergebnis, für die Elektrodenstandmenge und für die Wirtschaftlichkeit. Auch die Elektrodendurchmesser tragen entscheidend zum Schweißergebnis bei.³⁵

Außerdem werden die Bleche beim Punktschweißen durch den hohen Elektrodendruck punktförmig stark belastet und umgeformt, wodurch ebenso die Elektrodenstandmenge sinkt. Es entsteht durch die hohen Temperaturen eine lokale Diffusion (Durchmischen) zwischen Aluminium und Kupfer an der Kontaktstelle von Elektrode und Blech. Das lässt sich vermeiden, wenn die Elektroden durch Bürsten, Fräsen oder Polieren nach einer bestimmten Anzahl von Schweißpunkten gereinigt werden (Abb. 15). Um eine Ablagerung von Kupferpartikeln zu unterbinden, lassen sich diese Reinigungen auch als Roboteroperationen automatisieren. Hier ist eine Anzahl von 30 bis 50 Punkten vor Nachbearbeitung (z.B. Kappenfräsen) vorzusehen. Daher wird beim Widerstandsschweißen mit Robotereinsatz meist beim Werkstückwechsel eine Reinigungsstation platziert. Zudem kann ein schnelles Aufsetzen der Elektrode auf das Fügeteil die Elektrodenstandmenge beeinträchtigen. Eine zu instabile Konstruktion (Starrheit) der Schweißmaschine kann schließlich zur Abweichung der Fluchtung zwischen der Ober- und Unterelektrode führen (Elektrodenschieben).³⁶



nach 4000 Punkten

Abb. 15: Zwischenreinigung der Elektroden mittels Bürsten, Quelle: Ostermann (2014), S. 635.

Ebenfalls trägt die intensive Elektroden-Wasserkühlung bei Aluminium wesentlich zu hohen Elektrodenstandmengen bei. Aufgrund der höheren Schweißströme gegenüber Stahl ist neben der Anlegierungsneigung der Elektroden, eine frühzeitige Elektrodenverformung zu verhindern. Empfehlungen aus der EN ISO 18595 sind bei der Eingangstemperatur von 20 °C und der Ausgangstemperatur von 30°C nicht zu unterschreiten. Als Wasserdurchfluss ist ein Wert von 5 I/min je Elektrode empfohlen (bei Blechstärken bis 3 mm).

³⁵ Vgl. Ostermann (2014), S. 639.

³⁶ Vgl. Ostermann (2014), S. 635.

Eine Erhöhung der Elektrodenstandmenge ist grundsätzlich mit der entsprechenden Schweißtechnologie umsetzbar. Durch ein umlaufendes Prozessband (z.B. DeltaSpot®) zwischen Bauteil und Elektrode lässt sich das Anlegieren bzw. die Verschmutzung der einzelnen Elektroden verhindern. Der elektrische Widerstand des Prozessbandes ist sinnvoll zu wählen, um die Wärmeentwicklung in den Fügeteilen beim Schweißen zu beeinflussen. Dieses Verfahren wird in Abschnitt 5.2.1 näher beschrieben. Die Standzeit der Elektroden lässt sich ebenso durch eine rotierende Schwingbewegung der Elektroden steigern. Voraussetzung dafür sind eine gute Zugänglichkeit des Werkstückes und der erhebliche Bewegungsfreiraum für den Schweißroboter in der Fahrzeugproduktion (z.B. KUKA RoboSpin).³⁷

Die Abb. 16 zeigt einen automatischen Kappenfräser für eine mögliche Anwendung in einer Schweißroboteranlage.



Abb. 16: Automatische Kappenfräser, Quelle: KYOKUTOH Europe GmbH (2017), Online-Quelle: [02.12.2017].

³⁷ Vgl. Ostermann (2014), S. 635.

3.8 Zustand der Werkstückoberfläche

Der Zustand der Bauteiloberfläche beeinflusst maßgeblich den Oberflächenwiderstand und somit das Schweißergebnis. Neben der grundlegenden Oberflächenbeschaffenheit ist bei Aluminium zudem die nicht vermeidbare und fest haftende Oxidschicht an der Bauteiloberfläche ausschlaggebend. Diese dünne, dichte Schicht schützt die Legierung nicht nur vor der Atmosphäre, sondern wirkt elektrisch isolierend und ist sehr temperaturbeständig. Der Oberflächenwiderstand hängt von der Legierungszusammensetzung, den Lagerungszuständen und Glühprozessen und der Stärke dieser Oxidschicht ab.

Formel 3.4 und Abb.17 erläutern das Prinzip des Wachstums einer Aluminiumoxidschicht (AI_2O_3) näher. Die Bildung der Schicht und ihre Stärke hängen von Faktoren wie Anfangsdicke des Aluminiums, der Sauerstoffkonzentration, dem Umgebungsdruck, Temperatur und Zeit ab. Um das Bauteil für eine gewünschte Anwendung vorzubereiten, ist die optimale Oberflächenbehandlung, wenn nötig, ein wichtiger Faktor. Durch die Behandlung wird der Kontaktwiderstand reduziert und konstant gehalten.³⁸

$$d / mm$$
Dicke der Oxidschicht
$$L_0 / mm$$
Anfangsdicke
$$A / / \frac{g}{mol}$$
Aluminium
$$d = f (L_0, O_2, P_0, T, t)$$
3.4
$$O_2 / \frac{g}{mol}$$
Sauerstoffkonzentration
$$A /_2 O_3 / \frac{g}{mol}$$
Aluminiumoxidschicht
$$P_0 / bar$$
Umgebungsdruck
$$T / C^\circ$$
Temperatur
$$t / h$$
Zeit



Abb. 17: Wachstum Oxidschicht, Quelle: Rathert (2017), Online-Quelle [02.12.2017] (leicht modifiziert).

³⁸ Vgl. Rathert (2017), Online-Quelle [13.09.2017], S. 7.

Bei der Fahrzeugproduktion sind mechanische oder chemische Vorbehandlungen der Bauteiloberflächen vor dem Schweißprozess möglich, die grundsätzlich in dafür vorgesehenen Bandveredelungsanlagen vom Hersteller durchgeführt werden. Hierzu können die Kontaktwiderstände je nach Legierungstyp und Parameter auf bis zu 3 bis 50 μΩ herabgesetzt werden. Häufige Beizmittel sind alkalische Lösungen wie etwa 10 - 20% ige Natronlauge und Mischsäure. Die Abb. 18 zeigt ein Beispiel des Einflusses von Oberflächenvorbehandlungen mechanischen und chemischen auf die Scherzugkraft einer Punktschweißverbindung. Es zeigt die Auswirkung der Oberflächenvorbehandlung auf die Punktfestigkeit in Abhängigkeit von der Elektrodenstandmenge, in gebeizter und gebürsteter Ausführung. Die in der Automobilindustrie von Werkstofflieferanten verwendete TiZr-Passivierung (Schutzschicht) ist eine gängige Vorbehandlungsmethode, die in Kombination mit Trockenschmierstoffen eine zeitliche Stabilität (ca. 48 Stunden) der Widerstandsverhältnisse ermöglicht. Sie ist auch für das Punktschweißkleben einsetzbar und erhöht klar die Prozesssicherheit beim Punktschweißen.³⁹

Des Weiteren zeigt der Anhang 5 den Einfluss von Entfettung, verschiedenen Beizmitteln, Konstanz bei Lagerung auf die Oberflächenvorbehandlung und die Abhängigkeit verschiedener Vorbehandlungen auf das Schweißergebnis beim Punktschweißen.⁴⁰



Abb. 18: Einfluss von mechanischen und chemischen Oberflächenvorbehandlungen auf die Scherzugkraft – Legierung AlSi1MgMn- T6, Blechdicke 2 mm, Elektrodenkraft 8 kN und Elektrodenradius 300 mm, Quelle: Ostermann (2014), S. 634.

Allgemein führen beim Widerstandspunktschweißen von Aluminium die Elektrodenkräfte bzw. das Eindrücken der Elektroden zum Aufreißen der Oxidschicht und zum Zusammenfall der Oberflächenspitzen, was den Kontaktwiderstand effektiv senkt. Es bilden sich zunächst kleine lokale Kontaktbrücken, bevor Stromfluss möglich ist. Durch die weitere Erwärmung, Eindrückung der Elektroden und das Wegdrängen der Oxidpartikel vergrößern sich die Kontaktbrücken und die Schweißlinse kann sich formen.⁴¹

³⁹ Vgl. Ostermann (2014), S. 634.

⁴⁰ Vgl. Kammer (2014), S. 225.

⁴¹ Vgl. Kammer (2014), S. 220.

3.9 Festigkeitsverhalten von Aluminium-Punktschweißverbindungen

Die Beanspruchungsarten bei Punktschweißverbindungen sind je nach Art der Verbindung verschieden. Punktschweißverbindungen werden demnach durch Scherzug, Kopfzug, Schälzug oder Torsion beansprucht (Abb. 19). Hier ist besonders der Scherzug in der Auslegung der Konstruktion zu berücksichtigen. Die Kopfzugbeanspruchung ist sehr ungünstig, da die Punktschweißverbindung in der Praxis nur ca. 1/3 der Last gegenüber dem Scherzug übertragen kann. Zu vermeiden sind ebenfalls das Schälen und die Torsion bei Einzelpunkten. In Abb. 19 sind verschiedene Beanspruchungsarten beim Punktschweißen dargestellt. Die statische und dynamische Tragfähigkeit lassen sich bei Punktschweißverbindungen beispielsweise durch das Punktschweißkleben erhöhen, das im folgenden Abschnitt beschrieben wird.⁴²

Scherzug	Kopfzug	Schälen	Torsion bei Einzelpunkt
(anzustreben)	(ungünstig)	(vermeiden)	(vermeiden)
		F F	$T = F \cdot I$

Abb. 19: Beanspruchungsarten beim Punktschweißen, Quelle: Muhs/Wittel/Jannasch/Voßiek (2007), S. 145 (leicht modifiziert).

Die Scherzugfestigkeit von Widerstandspunktschweißungen bei Aluminium steigt mit der Festigkeit des Werkstoffes, der Materialdicke und dem Schweißpunktdurchmesser. Die Abb. 20 veranschaulicht die Wechselbeziehung zwischen Scherzugkraft und Schweißpunktdurchmesser am Beispiel von EN AW-5182-0 (naturhart) AIMg4,5Mn0,4-0 und von EN AW-6061-T4 (aushärtbar) AISi1,2Mg0,4-T4. Um also ähnliche Scherzugkräfte bei gleicher Materialdicke zu erreichen, ist bei der aushärtbaren Variante ein größerer Punktdurchmesser notwendig.⁴³



Abb. 20: Beispiel für den Einfluss des Punktdurchmessers auf die Scherzugfestigkeit, Quelle: Ostermann (2014), S. 640.

⁴² Vgl. Muhs/Wittel/Jannasch/Voßiek (2007), S. 144-146.

⁴³ Vgl. Ostermann (2014), S. 640.

3.10 Punktschweißkleben

Das Punktschweißkleben kombiniert die separaten Fügeverfahren des Widerstandspunktschweißens und des Klebens. Vorteile sind vor allem die Erhöhung der Steifigkeit, zudem die Optimierung der akustischen Anforderungen im Fahrzeug bei Blechschalenbauweisen, die mögliche Potenzialtrennung verschiedener Werkstofflegierungen bei Multi-Materialien und der Korrosionsschutz. Es lassen sich speziell entwickelte Epoxy-Klebstoffe verwenden, die sich besonders für dynamische und durch Korrosion belastete Karosseriestrukturbauteile eignen. Das Punktschweißkleben ermöglicht somit eine signifikante Festigkeitssteigerung gegenüber dem normalen Widerstandspunktschweißen bei Stahl- und Aluminiumanwendungen.⁴⁴

Klebstoffe für hochbelastete Strukturbauteile müssen ausgewogene Eigenschaften in Bezug auf Festigkeit, Kriechen, Stoß und Korrosion haben und sich manuell oder maschinell gut auftragen lassen. Zudem dürfen sie nicht vor dem Aushärten aus dem Fügespalt (mind. 1 mm) heraustropfen. Ebenfalls muss der Stromfluss durch Vorimpuls den Klebstoff beim Schweißen leicht verdrängen können.

Die Vorbehandlung der Aluminiumoberfläche ist für Punktschweißklebungen eine Voraussetzung, um Verunreinigungen vorhergehender Prozesse oder Aluminiumoxide zu entfernen. Sie kann bereits auf dem Halbzeug (z.B. Blech oder Strangpressprofil) aufgebracht oder aber auch unmittelbar vor dem Schweißprozess durchgeführt werden. Mögliche Vorbehandlungen auf Halbzeugen sind das Auftragen von chromhaltigen oder auch chromfreien Substanzen. Für die Vorbehandlung vor dem Schweißen müssen die Bauteiloberflächen gereinigt, gebeizt und mit Chemikalien behandelt werden. Zudem ist darauf zu achten, dass anschließend eine gleichwertige Güte an der gesamten Verbindungsfläche herrscht, um den Oberflächenwiderstand überall gleichmäßig zu verringern.

Wegen der unterschiedlichen Varianten gibt es keine einheitliche Einstellung der Schweißparameter beim Punktschweißkleben. Eine Anforderung ist die Empfehlung, größere Elektrodenkräfte zu nutzen, um Schweißspritzern vorzubeugen. Weiter wird geraten, Mittelfrequenz-Maschinen mit steifen Schweißzangen zu verwenden. Zudem sind die Schweißströme wegen der größeren Widerstände zwischen den zu verschweißenden Oberflächen gegenüber gebeizten Oberflächen um ca. 15 bis 20 % geringen. Die Abb. 21 nennt verfügbare Anhaltswerte für Schweißstrom und Elektrodenkraft beim Punktschweißkleben für eine EN AW-5754-Legierung.

Blechstärke mm	Schweißstrom kA	Elektrodenkraft kN
1,0	22,0	5,1
1,3	23,0	5,1
1,6	24,0	6,0
2,0	26,0	7,4
2,3	28,0	7,4
2,6	28,0	7,4
3,0	31,0	8,0

Abb. 21: Strom und Elektrodenkraft für eine vorbehandelte (EN AW-5754) Oberfläche, Quelle: Kammer (2014), S. 235.

⁴⁴ Vgl. Kammer (2014), S. 232-235.

3.11 Schweißbewertung

Zur Ermittlung der geforderten Qualitätsmerkmale stehen beim Widerstandspunktschweißen mehrere Schweißprüfverfahren zur Verfügung. Relevante Merkmale sind u.a. die optische Betrachtung des Schweißpunktes, minimaler Punktdurchmesser, Elektrodeneindruck, Festigkeit des Schweißpunktes und geringe Unregelmäßigkeiten in der Schweißlinse. Die wesentlichen Prüfverfahren werden nun erläutert.⁴⁵

3.11.1 Schweißeignungsprüfungsverfahren

Die Schweißeignungsprüfung soll durch Schweißbereichsdiagramme die Schweißeignung des Werkstoffes bewerten. Hierzu wird die Verfahrensanweisung laut DIN ISO 14327 herangezogen, um die durchgängige Schweißqualität oder Elektrodenstandmenge festzuhalten. Die Schweißbereichsdiagramme lassen sich für die Bestimmung der Schweißparameter nutzen und dienen zudem zur Festlegung, ob die jeweiligen Schweißeinrichtungen für die Herstellung des Fügeteiles angewandt werden können. Die Abb. 22 definiert im Diagramm den Schweißbereich durch Schweißstrom und Schweißzeit bei konstanter Elektrodenkraft. Linie 1 zeigt die untere Grenze für eine unvollständige Schweißung. Die eingeschlossene Fläche entspricht einer guten Schweißlinse, wobei Linie 4 auf Grenzflächenspritzer hinweist, d.h. ab diesem Zeitpunkt können Schweißpunkt von $4 \cdot \sqrt{s}$ und die Linie 3 die obere Grenze, bei welche die Schweißbedingungen zu einem Schweißpunkt von $6 \cdot \sqrt{s}$ führen. Eine weitere Variante ist die Betrachtung des Schweißbereiches über Schweißstrom und Elektrodenkraft bei konstanter Schweißzeit.⁴⁶



Abb. 22: Typische Schweißbarkeitskurven, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 13. (leicht modifiziert).

Bei der Parametereinstellung (Definition der Grenzwerte) werden schrittweise durch die Erhöhung des Schweißstromes die Oberflächen im Hinblick auf Risse und Spritzer kontrolliert. Des Weiteren wird auf den Elektrodeneindruck, Asymmetrien in der Schweißlinsenausbildung und auf Oberflächenanhaftungen des Elektrodenwerkstoffes geachtet.

⁴⁵ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 351.

⁴⁶ Vgl. DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 12.

3.11.2 Schweißprüfverfahren

Diese Verfahren nennt die Norm DIN EN ISO 18595-12. Sie müssen in Übereinstimmung mit DIN EN ISO 15614-12 durchgeführt werden. Diese sind wie folgt:⁴⁷

- Schäl- und Meißelprüfung,
- Sichtprüfung,
- Scherzugprüfung,
- metallographische Prüfung,
- Kopfzugversuch,
- Härteprüfung und
- Schwingfestigkeitsprüfung.

Für eine erste Beurteilung der Eigenschaften von Punktschweißverbindungen können sogenannte Werkstattprüfungen dienen. Hierzu zählt etwa die Schäl- und Meißelprüfung. Die Sicht-, Scherzug- und metallographische Prüfung sind wesentlich für eine gründliche Analyse der einzelnen Schweißpunkte. Für zusätzliche Auswertungen lassen sich der Kopfzugversuch, Härteprüfung und Prüfungen mit dynamischer Belastung durchführen. Es existieren zerstörungsfreie und zerstörende Verfahren.

Schäl- und Meißelprüfung – DIN EN ISO 10447-05: Diese Prüfung soll Punktdurchmesser, Bruchart, Schweißqualität und/oder Schweißparametereinstellung bestimmen helfen. Die Meißelprüfung (Abb. 23) ist die zerstörende Prüfung durch Belastung der Schweißverbindung mit einer Zugkraft. Der Meißel wird zum Trennen der Verbindung beider Bleche verwendet. Bei der Schälprüfung (Abb. 24) wird die Schweißverbindung durch eine Schälkraft belastet. Hier werden die Bleche voneinander abgerollt und die zu prüfenden Schweißverbindungen zerstört. Als Werkzeuge eignen sich etwa Abrolldorn, Drahtzange, Schraubstock oder mechanisierte Vorrichtungen. Beide Prüfungen erlauben die Messung des Punktdurchmessers und die Festlegung der Bruchart nach ISO 17677-1. Die Bruchkraft kann bei einer mechanischen Anwendung nach ISO 14270 gemessen werden.⁴⁸



Abb. 23: Meißelprüfung an Punktschweißverbindungen, Quelle: DIN EN ISO 10447-05 (2015), S. 6.

⁴⁷ Vgl. DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 12 f.

⁴⁸ Vgl. DIN EN ISO 10447-05 (2015), S. 5-9.



Abb. 24: Manuelle und mechanisierte Schälprüfung an Punktschweißverbindungen, Quelle: DIN EN ISO 10447-05 (2015), S. 6.

Sichtprüfung – EN 13018-07: Die Sichtprüfung, ein zerstörungsfreies Verfahren, kann direkt oder indirekt durchgeführt werden. Bei jener handelt es sich um eine Prüfung mit nicht unterbrochenem Strahlengang zwischen dem Auge des Prüfers und der zu prüfenden Fläche. Sie wird mit Hilfsmitteln wie z.B. Spiegel, Vergrößerungslinse oder Endoskop oder auch ohne diese durchgeführt. Die indirekte Sichtprüfung, eine Prüfung mit unterbrochenem Strahlengang, etwa durch Foto- oder Videoequipment, wird angewandt, wenn die direkte Prüfung nicht möglich ist.⁴⁹

Scherzugprüfung – EN ISO 14273-03: Ziel dieser Prüfung ist die Bestimmung der Scherzugkraft an den Materialproben. Hier erfolgt der Bruch der Schweißverbindung zwischen den Fügepartnern in der Verbindungsebene. Unter der Scherzugfestigkeit ist die höchste Kraft zu verstehen, die bei der Prüfung erreicht wird. Die Probengrößen (Abb. 25) werden in der Norm EN ISO 14273 definiert und in Abhängigkeit vom Punktdurchmesser festgehalten.⁵⁰





⁴⁹ Vgl. DIN EN ISO 13018-07 (2001), S. 4-6.

⁵⁰ Vgl. DIN EN ISO 14273-03 (2016), S. 6-8.

Materialproben lassen sich als Reihenpunkt- oder als Einzelpunktprobe durchführen. Hierzu wird die Probe in eine Zugprüfmaschine gespannt und bei Raumtemperatur zerstört und das Ergebnis in einem Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet.

Metallographische Prüfung – DIN EN ISO 17639-12: Dieses Verfahren dient der Festlegung der Abmessungen von Schweißlinsen und der Bewertung von Unregelmäßigkeiten im Gefüge. Sie kann Schweißparameter zur Herstellung von Schweißverbindungen in geforderter Schweißqualität verbessern helfen. Merkblatt DVS 2916-4 beschreibt das Herstellen von Makroschliffen (Abb. 26) und deren Auswertung, das Herstellen von Mikroschliffen für Gefügeuntersuchungen sowie die Durchführung von Härteprüfungen.⁵¹



Abb. 26: Makroschliffbild einer Schweißlinse ohne Unregelmäßigkeiten im Gefüge, Quelle: Harms & Wende, S. 5.

Bei Widerstandsschweißverfahren wird der Werkstoff auf die Schmelztemperatur erhitzt und wieder rasch abgekühlt. Diese Temperaturwechsel verändern die Festigkeit und auch die Härte der Schweißlinse und der Wärmeeinflusszone. So kann, abhängig von der Legierung, die Härte zu- oder abnehmen. Die Härteprüfung von Punktverbindungen wird nach dem Verfahren von Vikers durchgeführt. Es lässt sich für alle metallischen Werkstoffe einsetzen. Anhaltswerte nennt das erwähnte Merkblatt DVS 2916-4.⁵²

Schwingfestigkeitsprüfung – DVS 2916-2: Dieses Verfahren analysiert Ermüdungsbrüche von Punktschweißverbindungen bei dynamischer Belastung. Zu den Zielen der Untersuchung gehören die Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von Verbindungen und die Bestimmung von Kennwerten für die Berechnung. Des Weiteren dient sie der Festlegung des Einflusses unterschiedlicher Parameter wie z.B. Überlappenlänge, Linsendurchmesser und Fügeverfahren. Je nach Beanspruchung und Anwendungsbereich wird zwischen Flach-, KS2-, H- und Doppelhutprobe unterschieden. Die Probengeometrie und Abmessungen der einzelnen Proben finden sich im Merkblatt DVS 2916-2.⁵³

⁵¹ Vgl. DIN EN ISO 17639-12 (2013), S. 4-5.

⁵² Vgl. DVS 2916-4 (2009), S. 4.

⁵³ Vgl. DVS 2916-2 (2009), S. 1-2.

3.11.3 Anforderungen an die Schweißqualität

Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen an die Punktdurchmesser, Schweißmaße, Schweißbruchart, Schweißfestigkeit und das Schweißerscheinungsbild erläutert.⁵⁴

Punktdurchmesser: Der Punktdurchmesser ist der mittlere Durchmesser der Bruchfläche, der in der Verbindungsebene ohne die Haftzone gemessen wird. Für die Entwicklung des Schweißbereiches wird der minimale Punktdurchmesser $d_{Lmin} = 5 \cdot \sqrt{s_{min}}$ bei Materialdicken ab 0,8 mm festgelegt. Wenn dieser Durchmesser unterschritten wird, ist die Elektrode zu ersetzen oder zu reinigen. Die Abb. 27 zeigt das Messen des Punktdurchmessers am Beispiel eines Ausknöpf- und eines Scherbruches.⁵⁵



Abb. 27: Messen des Punktdurchmessers, Quelle: DIN EN ISO 10447-05 (2015), S. 13. (leicht modifiziert)

Schweißmaße: Beim Widerstandspunktschweißen von zwei Werkstücken sollte der Elektrodeneindruck bezogen auf das Einzelblech weniger als 20% der Blechdicke betragen. Abhängig von der Bauteilanforderung dürfen niedrigere Eindrückwerte festgelegt werden. Hier sind Elektroden mit größeren Ballenradien notwendig. Die Schweißlinse sollte in jedem Blech zwischen 20 bis 80% der Materialdicke liegen und die Blechabtrennung mit 15% der Einzelblechdicke nicht überschreiten.⁵⁶

⁵⁴ Vgl. DIN EN ISO 18595-12 (2007)

⁵⁵ Vgl. Kammer (2014), S. 230.

⁵⁶ Vgl. DIN EN ISO 18595-12 (2007)
Schweißbruch: Die Art des Bruches und die Größe des Punktdurchmessers sind Beurteilungsmöglichkeiten für die Tragfähigkeiten der Punktschweißverbindungen. Der Ausknöpfbruch verläuft ausgehend vom Schweißpunktrand aus der Fügeebene heraus zur Blechoberfläche. Beim Scherbruch wird die Schweißlinse längs der Fügeebene zerstört. Der Mischbruch verbindet Scher- und Ausknöpfbruch. Der Ausknöpfbruch (anzustreben) weißt im mechanischen Versuch die höchste Plastizität vor. Scher- oder Mischbrüche sind auch zu akzeptieren und typisch für kleinere Schweißgrößen in dickeren Werkstoffen. Die verschiedenen Schweißbrucharten beim Ausknöpfbruch sind im Anhang 6 dargestellt.⁵⁷

Schweißfestigkeit: Die Schweißfestigkeit hängt von der Materialdicke, der Schweißgröße und der Festigkeit der Werkstofflegierung ab. Typische minimale Anhaltswerte für Bauteilauslegungen nennt Abb. 28. Diese Werte können für die Berechnung von statisch belasteten Bauteilen herangezogen werden und sind vom Anwendungsfall abhängig. Die Sicherheitsklasse A und B beschreibt die Ausführungsbedingungen bei Schweißverbindungen nach Merkblatt DVS 2915-1.

Blechdicke	Punktdurchmesser für Klasse A	Mittlere Scherfestigkeit Aluminiumlegie	von Schweißungen aus erungen, in kN
t	d mm	Nennfestigkeit für Probematerial mit einer Zugfestigkeit von 100 MPa ^a	
mm		Klasse A	Klasse B
0,6	4,5	0,58	0,47
0,8	5,5	0,78	0,63
1,0	6,0	0,96	0,79
1,2	6,5	1,16	0,93
1,5	7,5	1,44	1,17
1,8	8,0	1,74	1,40
2,0	8,5	1,92	1,56
2,5	9,0	2,40	1,95
3,0	9,5	2,89	2,34
3,5	10,0	3,37	2,73
4,0	11,0	3,85	3,12
4,5	11,5	4,34	3,51
5,0	12,0	4,82	3,90
5,5	12,5	5,30	4,30
6,0	13,0	5,80	4,70
^a Diese Werte können für Konstruktionsberechnungen verwendet werden. Sollte die Zugfestigkeit des Probe- materials nicht 100 MPa entsprechen, kann die erforderliche Scherfestigkeit von Schweißungen mit der folgenden Gleichung berechnet werden:			
Erforderliche Scherfestigkeit = (Mindestscherfestigkeit der Probe × die in dieser Tabelle beschriebene Festigkeit)/10			

Abb. 28: Schweißfestigkeit - Anhaltswerte für Bauteilauslegungen, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 11.

Schweißerscheinungsbild: Die Oberfläche sollte ohne Risse und Poren sein. Schweißspritzer weisen auf schlechte Schweißpunktqualität, falsche Schweißeinstellungen, unzureichende Haltezeit, zu geringe Elektrodenkraft oder zu hohen Schweißstrom hin. Nur ein geringfügiger Materialverzug der verschweißten Bauteile ist zu akzeptieren.

⁵⁷ Vgl. DVS 2916-1 (2014), S. 6.

4 UNTERSUCHUNGSKONZEPT FÜR DIE PRAKTISCHE UMSETZUNG

Dieses Kapitel stellt das Untersuchungskonzept für die praktische Umsetzung vor. Die Abb. 29 veranschaulicht das Vorgehen der vierstufigen Machbarkeitsuntersuchung. Stufe 1 umfasst eine Marktrecherche und die Vorauswahl von möglichen Widerstandspunktverfahren für Aluminiumlegierungen in der Automobilindustrie. In Stufe 2 erfolgt die Technologieabsicherung im internen Fügetechnikzentrum. Erste kritische Untersuchungen von drei ausgewählten Verfahren werden durchgeführt und mithilfe von praktischen Prüfverfahren (Sicht-, Scherzug-, metallographische und Schwingfestigkeitsprüfung) evaluiert. Außerdem werden das Kaltfügeverfahren mit dem Punktschweißen verglichen, eine wirtschaftliche Betrachtung durchgeführt und Klebstoff im Fügespalt analysiert. In Stufe 3 werden weitere praktische Untersuchungen (Korrosionsbeständigkeit, Legierungskombinationen, Härteverlauf etc.) und kombinierte Technologien wie etwa die Schweißzange MagneticDrive von Nimak mit der Schweißsteuerung von Harms & Wende angewandt. Schließlich werden in Stufe 4 die Technologien im Hinblick auf ihre Serientauglichkeit (z.B. Taktzeit, Störgrößenermittlung) evaluiert sowie im Prototypenbau getestet.

Diese Arbeit stellt die Stufen 1 und 2 vor, die konzeptionelle Absicherung des Punktschweißens und auch die wirtschaftliche Bewertung von Aluminiumlegierungen in der Fahrzeugproduktion.



Abb. 29: "Roadmap" für die Technologieuntersuchung, Quelle: Eigene Darstellung.

5 MÖGLICHE INDUSTRIEPARTNER FÜR DIE PRAKTISCHE UMSETZUNG

Dieses Kapitel betrachtet die spezifischen Anforderungen an das System und skizziert die Marktrecherche. Diese werden zunächst nach Priorität eingeteilt, um ihre jeweilige Relevanz zu erkennen. Im Mittelpunkt der Recherche stehen einsetzbare Schweißzangen bzw. Komplettsysteme für Aluminiumanwendungen von potenziellen Industriepartnern. Zudem werden adaptive Schweißsteuerungen und spezielle Elektrodenkappen kurz genannt.

5.1 Spezifische Anforderungen an die Technologie

Die Anforderungen an die Technologie lassen sich grundsätzlich von den konventionellen Punktschweißverfahren für Stahllegierungen im Automobilbau ableiten. Weder soll eine Anlegierung der Elektroden während des Schweißens (Grundlage) noch aufwendige Nachbearbeitung der Elektroden erforderlich sein. Es ist für die Fahrzeugproduktion eine minimale Punkteanzahl von 30 bis 50 Schweißpunkten vor Kappenfräsen (Reproduzierbarkeit) in der Robotorstation vorzusehen. Zudem wird ein umlaufendes Prozessband der Elektroden aufgrund der bzw. intensiven Wartungs-Bandwechselungszeiten in der Serienfertigung ausgeschlossen. Außerdem müssen sich die Aluminiumlegierungsgruppen EN AW-5xxx, EN AW-6xxx und EN AW-7xxx verarbeiten lassen. Die Auslegung der Elektrodenbreite für Flanschbreiten am Bauteil von 15 mm ist zu berücksichtigen, und der Elektrodenwerkstoff darf wegen möglicher Gesundheitsrisiken kein Beryllium enthalten. Ebenfalls muss die Kombination mit Kleben möglich sein. Auch ist ein adaptives System zur Erkennung von Materialdicke und mit bzw. ohne Klebstoff (optional) im späteren Serienprozess erforderlich. Schließlich sind Wärmeausdehnungen bzw. Verzug von Bauteilen und Spritzer durch das Schweißen unbedingt zu vermeiden.

Die Tab. 2 gibt eine Übersicht über die Anforderungen nach Ranking für die Absicherung im Fügetechnikzentrum bzw. für die konzeptionelle Auslegung. Für das Aluminiumpunktschweißen sind dies die Grundanforderungen an das System.

Priorität	Anforderung
1	Grundlage: Keine Anlegierung der Elektroden
2	Anzahl der Schweißpunkte vor Nacharbeit (Kappenfräsen) min. 30 – 50 Punkt
3	Kein Prozessband
4	Fügbarkeit von Aluminiumlegierungsgruppen EN AW-5xxx, 6xxx und 7xxx
5	Schweißpunktqualität (Werkstückoberfläche, Festigkeit, Unregelmäßigkeit etc.)
6	Elektrodenkappen Form-A nach DIN EN ISO 5182 (ohne Beryllium)
7	Kombination mit Klebstoff
8	Umsetzbarkeit Flanschbreiten < 15mm
9	Investitionskosten / Kosten der Fügeverbindung
10	Optional: Einsatz eines adaptiven Systems (Materialdicken- und Klebstofferkennung)

Tab. 2: Übersicht der Anforderungen an die Technologie in Bezug auf die Priorität, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2 Marktrecherche

Die hier recherchierten Anbieter fasst Tab. 3 zusammen. Es werden Komplettsysteme (Schweißzange inkl. Steuerung) und ebenso Teilsysteme (Schweißzangen, Steuerung, spezielle Elektrodenkappen etc.) berücksichtigt, da diese Verfahren der Widerstandspunktschweißtechnik für Aluminiumlegierungen aktuell in der Automobilindustrie vorherrschen. Rot eingerahmte Hersteller werden in dieser Arbeit näher betrachtet.

Herstellername	Systemtyp	Systemname
Fronius International GmbH	Komplettsystem/Teilsysteme	DeltaSpot [®]
Matuschek Meßtechnik GmbH	Komplettsystem	AluSpatz+
Elmatech GmbH	Komplettsystem	-
Harms & Wende GmbH & Co KG	Schweißsteuerung	Aluminium Mode Classic
Bosch Rexroth	Schweißsteuerung	-
Düring Schweißtechnik GmbH	Schweißzangenhersteller	-
Nimak GmbH	Schweißzangenhersteller	MagneticDrive
Huys Industries Ltd.	Spezielle Elektrodenkappen	TiCaps™
KUKA AG	Applikationssoftware	KUKA.RoboSpin
SILA Ges.m.b.H	Stationäres Komplettsystem	-
ARO Welding Technologies GmbH	Komplettsystem	-
Dalex Schweißmaschinen GmbH & Co KG	Komplettsystem	-
Resistronic AG	Komplettsystem	-

Tab. 3: Vorauswahl der Anbieter und Technologien, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Firma Fronius International GmbH ist seit vielen Jahren ein führender Anbieter von Punktschweißtechnologien und bekannt für das Verfahren DeltaSpot®, ein Widerstandspunktschweißen mit einem Prozessband. In der seriellen Fertigung wird das Verfahren beim Fahrzeughersteller Tesla verwendet. Ein weiteres Komplettsystem ist AluSpatz+ der Firma Matuschek Meßtechnik GmbH, das beim Fahrzeughersteller Jaguar für die Verbindungtechnik von Türenverstärkungsrahmen sowie bei BMW im Produktionsbetrieb eingesetzt wird. Die Elmatech GmbH bietet hochwertige Schweißzangen und adaptive Systeme im Bereich der Widerstandspunktschweißtechnik für Stahl an. Erste manuelle Handschweißzangen für Aluminiumpunktschweißen sind bereits auf dem Markt. Die Firmen Harms & Wende GmbH und Bosch Rexroth sind besonders in Bezug auf Teilsysteme der adaptiven Schweißsteuerung in der Widerstandschweißpunkttechnik spezialisiert. Von der Düring Schweißtechnik GmbH werden für die Automobilindustrie hauptsächlich Schweißzangen für Stahl-Anwendungen produziert. Die kanadische Firma Huys Industries Ltd. hat speziell beschichtete Elektrodenkappen entwickelt. Diese, bis dato, sich am europäischen Markt wegen eines ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses nicht etablieren konnte. Eine Softwarelösung bietet die Firma KUKA AG für die rotierenden Bewegungen von Elektroden bzw. Roboterarmen an. Die Nimak GmbH, ein führender Schweißzangenhersteller, hat das patentierte spezielle Antriebssystem MagneticDrive für Aluminiumanwendungen auf den Markt gebracht.

Es werden nun vertieft die Systeme DeltaSpot[®], Delta Con320, Elmatech und MagneticDrive näher betrachtet, da diese Verfahren von Besonderheit für das Unternehmen sind (vgl. Abschnitt 5.3).

5.2.1 Fronius – DeltaSpot®

Die DeltaSpot[®]-Technologie von Fronius International GmbH ist ein Komplettsystem für das Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen, das seit 2008 in verschiedenen seriellen Produktionen am Markt eingesetzt wird. Ein wesentliches Merkmal des Verfahrens ist ein sogenanntes umlaufendes Prozessband aus Metall (z.B. Typ PT1407), das mit unterschiedlichen Widerständen in unterschiedlichen Materialien und Beschichtungen für verschiedene Anwendungszwecke erhältlich ist. Es verhindert direkten Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück, indem es den Schweißstrom überträgt und gleichzeitig die Kontaktflächen gegen Anlegierung der Elektroden schützt (Verschmutzung). Damit werden Vorteile wie hohe Elektrodenstandmenge, Reproduzierbarkeit, Prozesssicherheit und geringe Oberflächenspritzer erzielt. Die im konventionellen Prozess erforderliche Nacharbeit bzw. das Elektrodenfräsen entfällt hier und die Elektrodenkraft wird durch einen servomotorischen Antrieb erzeugt.⁵⁸

Die Abb. 30 zeigt das Prinzip des Verfahrens, wobei der Schweißablauf mit Prozessband im ersten Schritt mit dem Aufbau der Elektrodenkraft der zu verschweißenden Fügebleche beginnt. Darauf folgen die Widerstandserwärmung und das durch den Schweißstrom erzeugte Aufschmelzen der Grundwerkstoffe. Dabei isoliert das Prozessband im Gegensatz zur Elektrodenkühlung und bringt zusätzliche Wärme in die Verbindungstelle ein und schützt so vor Verunreinigung der Elektroden. Des Weiteren hebt ein Federelement das Prozessband ab und das Prozessband wird um ein definiertes Maß weitergefördert. Schließlich erfolgt eine reproduzierte Schweißung mit gereinigter Kontaktsituation.

Der zusätzliche Wärmeeintrag durch Verwendung des Prozessbandes ist im Diagramm durch die rote Linie angezeigt, während die schwarze Linie den Temperaturverlauf im konventionellen Widerstandspunktschweißverfahren abbildet.⁵⁹



Abb. 30: Prinzip – Kontakt- und Stoffwiderstände des DeltaSpot®-Verfahrens, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 337.

⁵⁸ Vgl. AluReport (2013)

⁵⁹ Vgl. Matthes/Schneider (2016), S. 337.

Dieses System hat folgende Vor- und Nachteile: 60

Vorteile des Verfahrens DeltaSpot[®]

- Wärmeeintrag in der Fügestelle regel- bzw. optimierbar,
- wiederholgenaue Punktschweißverbindungen (gute Prozessstabilität),
- nur geringer Elektrodeneindruck erkennbar,
- hohe erprobte Lebensdauer,
- Schweißen von Aluminiumwerkstoffen und beschichteten Werkstücken möglich,
- geringe mechanische Krafteinwirkung,
- keine mechanischen Hilfsstoffe notwendig,
- Aluminium und Stahl separat sowie in Kombination schweißbar und
- Zugänglichkeit.

Nachteile des Verfahrens DeltaSpot®

- Umlaufendes Prozessband,
- regelmäßiger Wechsel des Prozessbandes für die Instandhaltung erforderlich,
- geringe Prozesssicherheit des Prozessbandes für den seriellen Fertigungseinsatz,
- hohe Anschaffungskosten für das Unternehmen (ca. 110.000€ pro Anlage) und
- Elektrodenbreite / Flanschbreite von mind. 20 mm erforderlich.

Die Abb. 31 zeigt eine C-Robotorschweißzange von Fronius International GmbH mit umlaufendem Prozessband für den industriellen Robotereinsatz in der Automobilindustrie.



Abb. 31: DeltaSpot® – Roboterschweißzange, Quelle: Fronius International GmbH (2017), Online-Quelle [02.12.2017].

⁶⁰ Vgl. Pfeiffer (2012), Online-Quelle [02.12.2017]

5.2.2 Fronius – DeltaCon C320

DeltaCon C320 ist eine konventionelle Schweißpunktanlage von Fronius International GmbH. Während die Schweißzange als Teilkomponente gegenwärtig auf dem Markt schon erhältlich ist, wird das Komplettsystem bzw. die adaptive Schweißsteuerung noch in Zusammenarbeit mit MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG entwickelt. Diese Schweißanlage soll die konventionelle Widerstandspunktschweißtechnik für Aluminiumlegierungen in der Automobilindustrie vorantreiben. Die Zangensteuerung ist aus dem eben diskutierten Verfahren DeltaSpot[®] übernommen. Doch soll DeltaCon C320 nahezu ähnliche Schweißpunktqualitäten ohne das Prozessband erreichen. Erhältlich sind C- oder X-Zangenausführungen mit einem Doppeltrafo und Standard-Cu-Cr-Zr-Elektroden nach DIN EN ISO 5821. Erkenntnisse aus Versuchen bei Fronius International GmbH haben als Randbedingung einen Elektrodendurchmesser von 20 mm ergeben, das sich damit höhere Elektrodenkräfte bis 8 kN übertragen und größere Schweißströme verwenden lassen. Denn mit diesen Kräften wird die Elektrodenstandmenge wesentlich verbessert. Die Abb. 32 zeigt eine C-Schweißzange, die für Versuchszwecke an eine stationäre Schweißmaschine montiert ist. Ein Vorteil gegenüber dem erwähnten DeltaSpot®-Verfahren ist, dass spezielle Anforderungen von MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG in die Zusammenarbeit mit Fronius International GmbH für die Weiterentwicklung einfließen können. Als Nachteil kann die bisher nicht voll ausgereifte Technologie gesehen werden.



Abb. 32: Fronius – DeltaCon C320 Schweißzange, Quelle: Fronius International GmbH (2017), Online-Quelle [02.12.2017].

5.2.3 Elmatech – Prototypanlage

Die Prototypenanlage der Elmatech GmbH ist in der ersten Entwicklungsphase. Auch diese Anlage soll auf dem künftig wachsenden Markt für Widerstandspunktschweißverfahren mit Aluminium bestehen. Aktuell wird ein 16 mm-Elektrodendurchmesser mit dem Standard-Elektrodenwerkstoff Cu-Cr-Zr-Elektroden nach DIN EN ISO 5182 verwendet. Die Schweißsteuerung für die Anlage wurde in Kooperation mit der Firma Harms & Wende entwickelt. Der Schweißprozess wird gegenwärtig noch optisch mit einem gewöhnlichen Oszilloskop überwacht. In Zukunft werden 50 Schweißpunkte in guter Schweißpunktqualität nach Auskunft des Herstellers erwartet. Chancen und Risiken dieser Prototypanlage ähneln den vorgestellten Vor- und Nachteilen der DeltaCon 320. Die Abb. 33 zeigt den ersten Versuchsaufbau der Prototypenzange.



Abb. 33: Elmatech - Prototypenzange in einem ersten Versuchsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.4 NIMAK – MagneticDrive

Die Nimak GmbH produziert Widerstandsschweißpunktzangen für die Automobilindustrie. Das System MagneticDrive ist seit vier Jahren auf dem Markt und wurde in Kooperation mit dem Fahrzeughersteller Audi und dem Schweißsteuerungsspezialisten Harms & Wende speziell für das Aluminiumpunktschweißen entwickelt. Es handelt sich um eine spezielle Antriebsart bzw. einen Ausgleich, der mit zwei gegenläufigen Magneten betrieben wird, um die Präzision im Fügeprozess zu erhöhen und das Material schonend zu bearbeiten. Dieses System basiert darauf, dass die Schweißzeiten beim Punktschweißen von Aluminium im Verhältnis zu Stahl sehr gering sein müssen und eine genaue Steuer- und Regelungstechnik erforderlich ist. Außerdem lassen sich auch Probleme wie Trägheit der Motoren und die Elektrodenstandmenge reduzieren. Das System wird bei Porsche und Audi verwendet. Die Abb. 34 zeigt das Prinzip des MagneticDrive.



- 1. Sanftes Aufsetzen der Elektrode (Schont Elektroden und Anlagen)
- 2. Schneller Kraftanstieg (Presst die Bauteile formschlüssig zusammen)
- 3. Kraftreduktion während Stromzufuhr (Erhöht den Widerstand zwischen den Bauteilen)
 - Kraftschlüssiges Nachsetzen
 (Presst das Blech während der Aushärtung zusammen, reduziert die Spritzerbildung und optimiert die Schweißpunktqualität)

Abb. 34: Prinzip - Nimak Technologie MagneticDrive, Quelle: Nimak GmbH (leicht modifiziert).

5.3 Bewertungsmatrix zur Auswahl der relevanten Technologien

Die Tab. 4 nennt die durch die Marktrecherche für die Untersuchungen ermittelten potenziellen Technologien. Sie werden in einer Bewertungsmatrix nach Technologie, Systemaufbau, bedeutenden Eigenschaften und Verfügbarkeit der Anlage für einen Testbetrieb eingeteilt. Hieraus ergeben sich die Gesamtbeurteilungen bzw. Auswahl der einzelnen Technologien, für die praktischen Untersuchungen.

Technologie	Systemaufbau	Eigenschaften	Verfügbarkeit
DeltaSpot [®]	Komplettsystem	hohe Investitionskosten hohe Erfahrungswerte Industriepartner	Ja
AluSpatz +	Komplettsystem	Referenzen hohe Investitionskosten	Nein
Harms & Wende	Schweißsteuerung	Teilsystem	Nein
Bosch Rexroth	Schweißsteuerung	Teilsystem	Nein
KUKA RoboSpin	Komplettsystem bzw. Software	erfordert viel Maschinenplatz in der Serienfertigung (rotierende Bewegungen der Roboterarme)	Nein
Elmatech	Schweißzange (Komplettsystem)	Entwicklungszustand Industriepartner	Ja
DeltaCon C320	Schweißzange (Komplettsystem)	Industriepartner	Ja
Nimak	Schweißzange	spezielle Antriebstechnik Industriepartner	Nein
HuysAlCaps	Spezielle Elektrodenkappe	Schwaches Kosten-Nutzen-Verhältnis	Nein

Tab. 4: Auswahl relevanter Technologien für die Untersuchungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Bewertungsmatrix zeigt, dass die Verfahren DeltaSpot[®], Elmatech und DeltaCon C320 aufgrund der notwendigen Eigenschaften und Verfügbarkeit der Anlage für eine weitere detaillierte Untersuchung in Betracht kommen. Nun werden in Kapitel 6 diese Technologien experimentell untersucht.

6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Dieser Teil der Arbeit erörtert die mechanischen Untersuchungen der ausgewählten Verfahren DeltaSpot[®], DeltaCon 320 und Elmatech an erstellten Materialproben. Die praktischen Versuche umfassen Schäl-, Sicht-, Scherzug-, metallographische und Schwingfestigkeitsprüfungen. Diese Verfahren liefern wesentliche Ergebnisse zu dem Erscheinungsbild (Spritzerbildung, Materialverzug etc.), den minimalen Punktdurchmessern, der Beurteilung der gültigen Schweißparametereinstellung, Elektrodenstandmenge, Unregelmäßigkeiten im Gefüge (Riss-, Lunker- und Porenbildung), Festigkeit des Schweißpunktes, Schweißmaß (Elektrodeneindruck) und dem Schweißbruch (z.B. Ausknöpf-, Scher- und Mischbruch). Des Weiteren wird das Verhalten eines Strukturklebstoffes, hier an einem warmausgelagerten 1-Komponenten-Strukturkleber, im Fügespalt einer hochfesten EN AW-7xxx-Aluminiumlegierung im DeltaSpot[®]-Verfahren untersucht. Außerdem wird das Stanznieten als ein im Automobilleichtbau genutztes Kaltfügeverfahren in einer Nutzwertanalyse ausgewählt, um es mit dem Punktschweißen in Bezug auf die Scherzugprüfung zu vergleichen. Dann folgt eine Kostenbewertung der Technologien DeltaSpot[®], DeltaCon 320 und Stanznieten. Dies bringt wesentliche Informationen zum wirtschaftlichen Nutzen und für die abschließende Beurteilung der Verfahren für Widerstandspunktschweißverfahren mit Aluminium.

Die Abb. 35 zeigt den Karosserierohbau in konventioneller Stahl-Blechschalenbauweise in einer Fahrzeugproduktion mit Roboterschweißzangen.



Abb. 35: Roboterschweißzangen in der Fahrzeugproduktion, Quelle: oelcheck (2017), Online-Quelle [02.12.2017].

6.1 Auswahl der Versuchslegierungen

Es werden als Vertreter aus der Aluminiumgruppe die Typen EN AW-6xxx und EN AW-7xxx praktisch untersucht. Zunächst wird die Aluminiumlegierung EN AW-6082 (AlSi1MgMn) mit dem Werkstoffzustand T6, also im Oberflächenzustand lösungsgeglüht und warm ausgelagert, analysiert. Diese Legierung ist besonders interessant für hochbelastete Bauteile im Automobilleichtbau und, wie erforderlich, auf dem Werkstoffmarkt verfügbar. Des Weiteren wird die hochfeste Aluminiumlegierung EN AW-7075 T6 (AlZn5,5MgCu) für die Untersuchung "Klebstoff im Fügespalt" betrachtet. Für einen Vergleich zwischen Stanznieten und Punktschweißen wird die Legierung EN AW-6016 T4 (AlSi1.2Mg0.4) verwendet. Die chemischen Zusammensetzungen und die mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffproben nennt Anhang 7. Alle hier verwendeten Legierungen wurden von der Firma Zultner Metall GmbH für Versuchszwecke gekauft, erfüllen die in Kapitel 3.4 diskutierten Anforderungen für das Punktschweißen und sind nicht Oberflächenvorbehandelt.

6.2 Flachprobenvorbereitung

Die Schweißproben werden nach Vorgabe eines internen Firmenstandards hergestellt, welche die Anforderungen in DVS Merkblatt 2916-2 erfüllen. Für die hier genannten Versuche werden Flachproben mit der Probengeometrie "2-Blechverbindung" mit den in Abb. 36 dargestellten Abmessungen verwendet. Davon ausgenommen sind die Scherzugproben. Hier wird anstelle der abgebildeten 2-Blechverbindungen nur eine 1-Blechverbindung (Schweißpunkt mittig) erzeugt. Die Flachprobe gegen Nebenschlussverluste wird im Sinn der Überlegungen von Abschnitt 3.6.3 angefertigt.

Flachproben lassen sich einfach herstellen und liefern die notwendige Aussagekraft. Sie besitzen im beschnittenen Zustand, eine Abmessung von 150 mm x 60 mm, und die Blechdicken des gewählten EN AW-6082 sind mit s = 1,5 mm sowie s = 2,0 mm festgelegt. Das sind die gängigsten Bauteilstärken im Automobilleichtbau. Um die Aussagekraft der Versuche zu garantieren, müssen die Maße jeder Probe dieser Vorgabe entsprechen.



Abb. 36: Flachprobe in Anlehnung nach Merkblatt DVS 2916-2, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3 Durchführung der angewandten Prüfungen

Die einzelnen Prüfungen werden mithilfe einer Universalprüfmaschine, einer Hydropulsanlage und einem Messmikroskop durchgeführt. Aus diesem Grund werden die Prozesse der Sichtprüfung (Bewertung des Punktbildes), Scherzugprüfung, metallographische und Schwingfestigkeitsprüfung vorgestellt und für alle drei Verfahren DeltaSpot[®], DeltaCon 320 sowie Elmatech durchgeführt, um aussagekräftige Erkenntnisse für eine endgültige Entscheidung zu erhalten.

6.3.1 Sichtprüfung

Die direkte Sichtprüfung wird grundsätzlich an Ort und Stelle durchgeführt. Erforderlich dafür ist eine ausreichende Zugänglichkeit. Die Prüffläche muss mit dem bloßen Auge einzusehen und der Prüfgegenstand beleuchtet werden, um unerwünschte Oberflächenerscheinungen wie etwa Anlegierung der Elektroden am Grundwerkstoff der Schweißelektrode, Spritzerbildung, Rissbildung und Porosität erkennen zu können.⁶¹

6.3.2 Schälprüfung

Neben der Meißelprüfung ist die Schälprüfung ein wichtiges Werkstattprüfverfahren, um Schweißverbindungen zu beurteilen. An der zerstörten Materialprobe lassen sich Bruchart (Ausknöpf-, Scher-, Mischbruch) und Punktdurchmesser ermitteln. Eine Aussage über Verbindungfestigkeit ist jedoch nicht möglich. Bei der Schälprüfung (auch Abrollversuch genannt) wird die Schweißverbindung mit einem geeigneten Werkzeug so beansprucht, dass eines der Blechteile abrollend bzw. die Probe schälend beansprucht wird. Zur Vereinheitlichung der Aussagekraft einzelner Ergebnisse wird in sämtlichen Versuchen in dieser Arbeit ein Abrolldorn mit Durchmesser 30 mm verwendet.⁶²



Abb. 37: Anwendung des Abrolldorns (DIN EN ISO 10447), Quelle: DVS 2916-1 (2014), S. 2.

⁶¹ Vgl. Werkstofftechnik (2012)

⁶² Vgl. DVS 2916-1 (2014), S. 2.

6.3.3 Scherzugprüfung

Zur Beurteilung der Festigkeit der einzelnen Punktschweißungen wird die Scherzugprüfung (quasistatisch) angewandt. Hierzu wird eine Universalprüfmaschine Zwick-BZ250/SN5A mit einer Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min und einer maximal möglichen Prüfkraft von 250 N eingesetzt. Es werden die freien Enden der einzelnen Proben in diese eingespannt und rasant bis zum Bruch belastet. An den Flachproben tritt neben der Scherzugbeanspruchung zunehmend eine Kopfzugbeanspruchung der Schweißverbindung auf. Diese entsteht durch Verformung der Probe im Bereich der Überlappung. Die Abb. 38 zeigt am Beispiel einer Flachprobe mit 1-Blechverbindung die Kopfzug- und die Scherzugkräfte bei zunehmender Belastung ($F > F_1$) sowie das Kraft-Verlängerungsdiagramm aus dem Scherzugversuch.⁶³



Abb. 38: Beanspruchung im Scherzug (links) und Kraft-Verlängerungsdiagramm (rechts), Quelle: DVS 2916-1 (2014), S. 6.

Es werden bei der Höchstkraft keine reinen Scherzugkräfte ermittelt. Somit treten zu Beginn der Beanspruchung der Punktschweißverbindung zunächst elastische und danach plastische Verformungen auf. In einem Kraft-Verlängerungsdiagramm lassen sich die Höchstkraft, Streckkraft und Verlängerung im Scherzugversuch als Ergebnisse darstellen. Die an den Scherzugproben auftretenden Versagensarten (Abb. 39) hängen unter anderem von Werkstofffestigkeit, Blechdicke, Schweißlinsen- bzw. Schweißpunktdurchmesser, Probenbreite, Randabstand und Überlappungslänge ab.



Abb. 39: Versagensarten bei Scherzugproben, Quelle: DVS 2916-1 (2014), S. 6.

6.3.4 Metallographische Prüfung

Die metallographische Untersuchung dient hier zur Bestimmung der Abmessungen und Ausbildung von Schweißlinsen (Makroschliffe) und zur Beurteilung des Gefüges (Mikroschliff) sowie der Unregelmäßigkeiten. Bei Makroschliffen wird auf einer ausgeschnittenen, eingebetteten, geschliffenen und polierten Probe mit einem Ätzmittel eine Ebene präpariert. Das Ätzverfahren wird nach DVS 2916-4 für Aluminiumlegierungen durchgeführt. Dabei wird durch die Mitte eines Schweißpunktes senkrecht zur Blechoberfläche ein Schnitt gelegt. Der Zuschnitt des Schliffes erfolgt durch einen nassen Sägeschnitt. Dann werden die Proben in einer Halterung bzw. einer Einbettmasse fixiert, in diesem Fall durch Warmeinbetten. Dann wird die Probe mit einer groben Körnung vor- und mit stets feinerer Körnung fertig geschliffen und durch Polieren weiterbearbeitet (kratzerfreie Oberfläche). Um die Schweißlinse sichtbar zu machen, ist die Schliffebene zu ätzen und dann durch Spülen unter einem Wasserstrahl zu trocknen (Vergrößerung Gefügeausschnitt).

Für die makroskopische Untersuchung reicht eine Lupe mit 5 – 30-facher Vergrößerung. Mit einem digitalen Bilderfassungssystem wird der Durchmesser der Schweißlinse bestimmt. Dafür sind folgende Abmessungen (Abb. 40) wesentlich.⁶⁴



Abb. 40: Größe zum Erfassen von Form und Ausdehnung einer Punktschweißverbindung, Quelle: DVS 2916-4 (2009), S. 2.

Die Mikroschliffe werden mithilfe eines Mikroskops mit 50 – 1000-facher Vergrößerung für Gefügeuntersuchungen untersucht. Es werden dafür die Makroschliffe herangezogen und weiter auf Nassband bis Körnung P500/P800 geschliffen. Wichtig ist die gründliche Reinigung dieser feinen Körnung.

6.3.5 Schwingfestigkeitsprüfung

Bei der Schwingfestigkeitsprüfung wird die Flachprobe in der Längsrichtung unter Zugbeanspruchung belastet, um an der Verbindungstelle eine Mischbeanspruchung aus Scherzug und Kopfzug herzustellen. Das Verhältnis der Mischbeanspruchung hängt von der Steifigkeit (Blechstärke, Werkstoff/ E-Modul, Probenbreite und Überlappung) und der Höhe der Last ab. Per Flachprobe lässt sich das

⁶⁴ Vgl. DVS 2916-4 (2009), S. 1ff.

Ermüdungsverhalten von Verbindungen beurteilen, das wiederum von Werkstoff, Blechstärke, Punktdurchmesser, Punktabstand und Randabstand beeinflusst wird. Die Abb. 41 zeigt den im Folgenden genutzten Versuchsaufbau für die Schwingfestigkeitsprüfung.⁶⁵



Abb. 41: Hydropulsmaschine ZWICK HB 50 kN, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die dynamischen Erprobungen werden die einzelnen Flachproben, auch Schwingproben genannt (2 Punkt-Verbindung), wie Abb. 42 zeigt, in den Spannbacken der Hydropulsmaschine ZWICK HB 50 kN (Zug-Druck-Pulsatoren) zentrisch positioniert. Hier ist erkennbar, dass die Schwingprobe zwischen der oberen und der unteren Spannbacke bzw. Probenanschlag zentrisch eingespannt ist und über die Stellschrauben fixiert wird. Die Einspannung der Backen ist mit einer Überdeckung von 70 mm definiert.

⁶⁵ Vgl. DVS 2916-2 (2009), S. 2.

Die Prüfungsart der dynamischen Materialprüfmaschine HB 50 KN ist mit schwellender und sinusförmiger Zugbelastung (kraftgesteuert) eingestellt. Die Frequenz beträgt 50 Hz bei einem R-Wert (Spannungsverhältnis) von 0,1. Das Abbruchkriterium wird mit n = 2.000.000 Lastwechseln und 0,5 mm Dehnungsgrenze im Zug festgelegt. Die Ergebnisse dieser Versuche lassen sich in einer sogenannten Wöhlerlinie wiedergeben.

In Anhang 8 sind zudem die verwendeten Begrifflichkeiten für den Versuch näher erläutert. Die einzelnen Amplituden- und Kraftbereiche der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten dynamischen Prüfungen, sind im Anhang 9 und 10 ersichtlich.



Abb. 42: Schwingfestigkeitsprüfung - Prüfaufbau in Detailansicht, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4 Versuchsanlage 1 – DeltaSpot®

Nun wird das Verfahren DeltaSpot[®] betrachtet und dafür die Sicht-, Scherzug-, metallographische- und Schwingfestigkeitsprüfung angewandt. Die Parametereinstellung erfolgt in Vorversuchen für die Blechpaarungen s = 1,5 mm und s = 2,0 mm. Die ersten Schweißpunkte werden zur Nachkontrolle der Schweißparameter erzeugt und zudem für die Analyse der Prozessstabilität/Reproduzierbarkeit ein Elektrodenstandzeitversuch (Sicht-, Schäl-, und Scherzugprüfung) sowie abschließend eine Schwingfestigkeitsprüfung durchgeführt. Dazu wird eine C-Zange mit zwei Prozessbändern vom Typ PT1407 (Anode/Kathode) verwendet. Diese Bänder sind neue Spezialentwicklungen der Fronius International GmbH für Aluminiumanwendungen. An einem stationären Versuchsaufbau ist die Schweißzange mit neuen Elektroden ø 20 mm nach DIN EN ISO 5182 mit Kappenradius von 100 mm ausgestattet. Es werden für beide Blechpaarungen je 35 Schweißproben erstellt bzw. die Schweißpunkte ohne Unterbrechung in Reihenfolge mit fortlaufender Kennzeichnung geschweißt.

In speziellen Untersuchungen hat die Fronius International GmbH bereits verschiedene Oberflächenzustände (gebeizt/passiviert/ohne Vorbehandlung) bei konventionellen Punktschweißungen evaluiert. Es zeigte sich, dass eine unbehandelte Fügeoberfläche weder das Schweißergebnis noch die Ausbildung der Schweißlinse wesentlich beeinflusst. Dies widerspricht grundsätzlich der allgemeinen Literaturmeinung für konventionelle Widerstandspunktschweißungen. Die Ursachen dafür sind hier womöglich der verwendete Vorimpuls, wodurch die Oberflächen ähnliche Anfangsbedingungen aufweisen. Zudem begünstigt der Einsatz eines Prozessbandes durch die von außen zusätzlich eingebrachte Wärme ebenso diesen Zustand. Deshalb werden die hierfür verwendeten Schweißproben ohne Oberflächenvorbehandlung zur Evaluierung gebracht. Das Prinzip von Widerstandspunktschweißen mit Prozessband – DeltaSpot[®] ist in Abb. 43 ersichtlich.



Abb. 43: Widerstandspunktschweißen mit Prozessband – DeltaSpot®, Quelle: ams (2017), Online-Quelle [02.12.2017].

6.4.1 Parametereinstellung

In Zusammenarbeit mit der Fronius International GmbH werden mit neuen Elektroden ø 20 mm nach DIN EN ISO 5182 die Parametereinstellungen für das Punktschweißen der Blechpaarungen s = 1,5 und s = 2,0 mm bzw. der geeignete Schweißbereich ermittelt. Es sollen schrittweise Parameter (abhängig von Werkstoff, Elektrodenkraft, Schweißzeit und Schweißstrom) entwickelt werden, um einen Mindest-Schweißpunktdurchmesser (Ausknöpfdurchmesser) d_p zu erzeugen. In der Regel sind diese ca. um 15% größer als der Schweißlinsendurchmesser.

Nach der Durchführung der Vorversuche und der Schweißbereichsprüfung hat sich bei s = 1,5 mm ein Schweißpunktdurchmesser d_p geringfügig $\geq d_{pmin} = 6,12$ mm und bei der Blechpaarung s = 2,0 mm ein Schweißpunktdurchmesser d_p geringfügig $\geq d_{pmin} = 7,07$ mm eingestellt. In Abb. 44 sind die gültigen Einstellungen der Parameter für die Erzeugung der nachfolgenden Flachproben ersichtlich. Am Beispiel des Strom-Kraftprofils mit der Blechpaarung 1,5 mm wird der Schweißverlauf hier näher erläutert. Allgemein soll beim Schweißprozess in einer ersten Phase die Aluminiumoxidschicht bei einem Schweißstrom von 20,0 kA und einer Schweißzeit von 50 ms durchdrungen werden. Ein niedriger Strom soll eine geringe Wärmeeinbringung erzielen. Danach ist eine kurze Schweißpause von 70 ms einaesteuert. Im Hauptstromimpuls kommt es schließlich zum Schweißprozess und der Schweißlinsenausbildung bei einer Schweißzeit von 120 ms, einem Schweißstrom von 24,5 kA sowie einer Elektrodenkraft von 3,5 kN. Im Strom-Kraftprofil verläuft die Nachkonditionierung zwischen der Schweißzeit von 310 bis 720 ms bei einem Schweißstrom von 16 kA. Die Elektrodenkraft liegt hier wiederum bei 6,5 kN. Die Blechpaarung 2,0 mm unterscheidet sich nur geringfügig beim Hauptstromimpuls durch einen höheren Schweißstrom von 26,5 kA anstelle 24,5 kA wegen der geringen Blechdickenabweichung.



Abb. 44: Strom-Kraftprofil der Blechpaarung s = 1,5 mm – DeltaSpot[®], Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.2 Sichtprüfung der ersten Schweißpunktversuche

Anhang 9 zeigt ein Übersichtbild der erstellten Schweißproben. Durch Sichtprüfung ließen sich an den Flachprobenoberflächen keine Unregelmäßigkeiten (Risse, Porosität, Spritzerbildung etc.) feststellen. Die ersten Schweißpunktversuche sind in Abb. 45 eindeutig zu erkennen. Nirgendwo zeigen sich negative Einflüsse an der Werkstückoberfläche an der positiven Elektrodenseite (Anode) und auch nicht an der negativen Elektrodenseite (Kathode) aller weiteren erstellten Flachproben.



Abb. 45: Sichtprüfung an der Flachprobe Nr. 1 – DeltaSpot®, Quelle: Eigene Darstellung.

Im Anschluss wurden Schälprüfungen mit einem Abrolldorn (Abschnitt 6.3.2) durchgeführt. Die Abb. 46 zeigt vollständig ausgeknöpfte Schweißbutzen. Die Butzenabmessungen der Schweißpunkte Nr. 1 bis Nr. 3 (Blechpaarung 1,5mm) hatten einen Mittelwert von 8,09 bis 8,46 mm und die Schweißpunkte Nr. 4 bis Nr. 6 (Blechpaarung 2,0mm) einen von 7,66 bis 8,64 mm. Die eingestellten Parameter erfüllen also die Anforderungen für den Schweißpunktdurchmesser $d_{Lmin} = 5 \cdot \sqrt{s_{min}}$ für die Erzeugung von aussagekräftigen Flachproben bzw. weiteren Untersuchungen, wie bereits im theoretischen Teil behandelt.



Abb. 46: Schälprüfung der Blechpaarungen *s* = 1,5 mm (links) und *s* = 2,0 mm (rechts) – DeltaSpot[®], Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.3 Scherzugprüfung

Die Scherzugprüfung (quasistatisch) wurde mit der Universalprüfmaschine Zwick-BZ250/SN5A bei 20 mm/min bis zum Bruch, wie in Abschnitt 6.3.3 skizziert, durchgeführt. Für die Blechpaarung 1,5 mm werden aus der Schweißreihenfolge letztere Schweißpunkte Nr. 51, Nr. 52, Nr. 65 und Nr. 66 herangezogen. Zudem sind bei der Blechpaarung 2,0 mm die Schweißpunkte Nr. 27, Nr. 28, Nr. 65 und Nr. 66 in Verwendung. Die Abb. 47 veranschaulicht die Ergebnisse für beide Blechpaarungen. Es wurden maximale Kräfte von 4,4 bis 6,7 kN jeweils beim Scherbruch in der Fügeebene festgestellt. Nach Erfahrung erfüllen die einzelnen Ergebnisse den Sollwert und sind als i.O. Prüfungen zu bezeichnen. Außerdem dienen die hier ermittelten minimalen Grenzwerte der Blechpaarungen 1,5 und 2,5 mm, als Referenz zu den weiteren durchgeführten Scherzugprüfungen der Systeme DeltaCon 320 und Elmatech.

Blechpaarung 1,5 mm:



Abb. 47: Scherzugprüfung – Blechpaarung 1,5 mm und 2,0 mm – DeltaSpot®, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.4 Elektrodenstandzeitversuch

Der Elektrodenstandzeitversuch wird anhand der in Reihenfolge durchgeführten Widerstandspunktschweißungen am Beispiel der Blechpaarung *s* = 2,0 mm und der metallographischen Untersuchung näher evaluiert. Das umlaufende Prozessband des DeltaSpot[®]-Verfahrens hat wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Schweißpunktverfahren. Diese Erkenntnisse dienen in dieser Arbeit als Anhaltswert für die folgenden Versuchsanlagen, die DeltaCon 320 und die Elmatech-Prototypanlage. Die einzelnen Schweißpunkte sind in der folgenden metallographischen Auswertung detailliert dargestellt.

6.4.5 Metallographische Untersuchung

Dieser Abschnitt diskutiert die Resultate der metallographischen Untersuchung der Schweißpunkte, in der die Gefüge und die Linsendurchmesser für den Elektrodenstandzeitversuch analysiert wurden. In Tab. 5 sind die Analyseergebnisse von einzelnen Schweißpunkten hervorgehoben. Die Bezeichnung "Schliff-Nr." nennt die betrachtete Schnittebene an einem Schweißpunkt und die Bezeichnung "Schweißpunkt Nr." die Reihenfolge der Ausführung. Die Linsendurchmesser und die Elektrodeneindrucktiefe (Blechdickenminderung) wurden mikroskopisch gemessen.

Schliff- Nr.	Schweiß- punkt Nr.	Linsen- durchmesser mm	Elektroden- eindrucktiefe %	Anmerkung
S4	18	6.96	6.0	Vermehrt Poren und Risse in der
	10	0,00	0,0	Schweißlinsenmitte
9E	25	6.00	2.0	Vermehrt Poren und Risse in der
		0,22	2,0	Schweißlinsenmitte
92	36	6.01	2.0	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der
	50	0,91	2,0	Schweißlinsenmitte
\$ 7	53	6 50	1.0	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der
57	55	0,00	1,0	Schweißlinsenmitte
68	54	6.00	2,7	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der
30	54	0,00		Schweißlinsenmitte
6 2	69	6 85	5 4,0	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der
	03	0,00		Schweißlinsenmitte
S10	70	7,42	-1,0	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der
				Schweißlinsenmitte
Q11	1	7.07	4,3	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der
511	I	7,97		Schweißlinsenmitte
S1 2	2	2 7,90 3,5	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der	
U I E	2		3,5	Schweißlinsenmitte
S 12	17	7.00 0.0	2.8	Vermehrt Poren, Lunker und Risse in der
013	17	7,35	2,8	Schweißlinsenmitte
S14	18	7,78	4,2	Poren in der Schweißlinsenmitte
S20	70	7,10	2,0	Poren in der Schweißlinsenmitte

Tab. 5: Metallographische Ergebnisse – DeltaSpot®, Quelle: Eigene Darstellung.

Es sind klar überwiegend Unregelmäßigkeiten wie Risse, Lunker und Poren in der Schweißlinsenmitte aufgetreten. Laut Erfahrungen haben diese im Zentrum jedoch keinen erheblichen negativen Einfluss auf die Schweißpunktqualität, wenn sie nur Ausmaße von 10 bis 15% bezogen auf den Schweißlinsendurchmesser vorweisen. Am Beispiel der Schliffe Nr. 1 und Nr. 2, entsprechend der Schnittebene S1 und S2 aus Abb. 45, zeigt Abb. 48 zwei metallographische Prüfungen mit den Imperfektionen. Weitere mikroskopische Ergebnisse zeigt Anhang 9, anhand Abb. 87 und Abb. 88.



Abb. 48: Schliff Nr. 1 (links) und Nr. 2 (rechts) der Blechpaarung s = 1,5 mm – DeltaSpot®, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abb. 49 sind die einzelnen Schweißlinsendurchmesser über den Elektrodenstandzeitversuch im Vergleich mit dem Mindestlinsendurchmesser dargestellt. Die Anforderung entspricht hier $d_{Lmin} = 5 \cdot \sqrt{s_{min}} = 7,07$ mm. Schliffkennzeichnung Nr. 35 und Nr. 53 (Unregelmäßigkeiten im Gefüge) ausgenommen, erfüllen alle Proben den Mindestlinsendurchmesser bei der Blechpaarung s = 2 mm.



Schweißlinsendurchmesser über Elektrodenstandzeit

Abb. 49: Schweißlinsendurchmesser über Standzeitversuch – Blechpaarung 2 mm – DeltaSpot®, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.6 Schwingfestigkeitsprüfung

Die Abb. 50 und Anhang 9 (Abb. 89 bis Abb. 90) zeigen die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfung der beiden Blechpaarungen s = 1,5 mm und s = 2,0 mm. Bei den Schwingproben Nr. 3, Nr. 18 (s = 1,5 mm) und Nr. 1, Nr. 2 (s = 2,0 mm) traten bei geringer bis mittlerer Belastung vollständige Brüche über die gesamte Probenbreite auf. Hingegen erreichten Proben Nr. 8, Nr. 20 (s = 1,5 mm) und Nr. 7, Nr. 13 (s = 2,0 mm) unter hoher Belastung das Abschaltkriterium "0,5 mm Dehngrenze", bevor die Flachproben vollständig versagten. Hier wurden jeweils Risse im Bereich der Schweißlinsen festgestellt. Die Streuung der einzelnen Schwingproben beider Flachprobenreihen ist gering. Der sehr gut reproduzierbare Schweißlinsendurchmesser und die konstante Stabilität des Schweißprozesses bestätigen die Reife und die Einsetzbarkeit des DeltaSpot[®]-Verfahrens.



Abb. 50: Schwingfestigkeitsprüfung (Wöhlerkurve) – Vergleich der Blechpaarungen 1,5 und 2,0 mm – DeltaSpot[®], Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.7 Beurteilung des Gesamtergebnisses

Das Erscheinungsbild der einzelnen Schweißpunkte der verschweißten Flachproben zeigte durchgehend sehr gute Schweißpunktqualität und diente als Referenz für die nun evaluierten anderen potenziellen Schweißanlagen. Die Scherzugkräfte lagen im minimalen Wertebereich bei 4,4 kN und bei 6,6 kN im maximalen. Diese wurden laut Erfahrungswerten für i.O. gewertet. Die Elektrodenstandzeit war, wie bereits theoretisch festgehalten, für dieses Verfahren hinsichtlich der Anlegierungsneigung des Grundwerkstoffes an der Punktschweißelektrode kein Problem. Das liegt an dem umlaufenden Prozessband an der einzelnen Kupferelektrode. Die Schwingfestigkeitsüberprüfung offenbarte zudem stabile Prozesse und die sehr gute Reproduzierbarkeit des Verfahrens.

6.5 Versuchsanlage 2 – DeltaCon C320

Nun wird das Verfahren DeltaCon C320 der Fronius International GmbH analysiert. Es wurden zuerst die Parameter für die zwei genannten Blechpaarungen (s = 1,5 und 2,0 mm) eingestellt, dann erste Schweißpunkte erzeugt und schließlich nach Optimierung der Elektroden ein Elektrodenstandzeitversuch (Sicht- und Scherzugprüfung) sowie abschließend eine Schweißproben wurden für die Vergleichbarkeit wie beim DeltaSpot[®] die Oberflächen nicht vorbehandelt. Die Abb. 51 zeigt das Prinzip Widerstandspunktschweißen ohne Prozessband – DeltaCon 320. In Verwendung sind 30 Flachproben je Blechpaarung.



Abb. 51: Widerstandspunktschweißen ohne Prozessband, Quelle: harms-wende (2017), Online-Quelle [02.12.2017].

6.5.1 Parametereinstellung

Die Einstellung der Parameter geschah wie beim vorangegangenen Verfahren DeltaSpot[®] stufenweise. Dafür wurden neue Elektroden ø 20 mm nach DIN EN ISO 5182 und Blechpaarungen s = 1,5 mm und s = 2,0 mm eingesetzt. Nach der Durchführung von Vorversuchen und Schweißbereichsermittlung stellte sich bei s = 1,5 mm ein Schweißpunktdurchmesser d_p geringfügig $\geq d_{pmin} = 6,12$ mm und bei der Blechpaarung s = 2,0 mm ein Schweißpunktdurchmesser d_p geringfügig $\geq d_{pmin} = 7,07$ mm ein. Die Abb. 52 visualisiert die Strom-Kraftprofile am Beispiel der Blechpaarung s = 2,0 mm. Nach der Vorkonditionierung wurde eine geringe Schweißpause von 20 ms eingesteuert. Der Hauptstromimpuls betrug 39,5 kA mit einer Schweißzeit von 80 ms. Im Strom-Kraftprofil wurde auf Nachkonditionierung verzichtet, da das Augenmerk auf der Umsetzbarkeit der Punktschweißung lag, was kurze Schweißzeiten erfordert.

Die Einstellung der Parameter unterschied sich bei der Blechpaarung s = 1,5 mm (35,5 kA) gegenüber s = 2,0 mm (39,5 kA) ausschließlich in der Höhe des Schweißstromes.



Abb. 52: 2,0 mm Blechpaarung – Parametereinstellung Strom/Kraft – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.2 Sichtprüfung der ersten Schweißpunktversuche

Um die Oberflächenpunktqualität der Schweißanlage nach der Parametereinstellung zu ermitteln, werden die ersten Schweißpunktversuche näher betrachtet. Anhang 10 (Abb. 91) enthält ein Übersichtsbild der Schweißproben. Hier sind bei sämtlichen Flachproben von beiden Blechpaarungen (s = 1,5 mm und s = 2,0 mm) reliefartige Oberflächenstrukturen an der Elektrodeneindrückung zu sehen. Die Abb. 53 zeigt die Flachprobe Nr. 1 bzw. den ersten durchgeführten Schweißversuch. An der positiven Elektrodenseite (Anode) ist diese Oberflächenstruktur erkennbar, während die Schweißqualität an der negativen Elektrodenseite (Kathode) sehr gut ist. Das liegt unter anderem am schon erwähnten Peltier-Effekt beim Gleichstromschweißen (vgl. Abschnitt 3.6.1).



Abb. 53: Elektrodeneindruck der Flachprobe Nr. 1 – Blechpaarung 2 mm – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.3 Scherzugprüfung

Die Scherzugprüfung wurde mit der Universalprüfmaschine Zwick-BZ250/SN5A bei 20 mm/min bis zum Bruch durchgeführt. Die Abb. 54 veranschaulicht die Einzelergebnisse von insgesamt 8 Flachproben (1 Punkt-Verbindung). Die Flachproben Nr. 1 bis Nr. 4 mit der Blechpaarung von 2,0 mm versagten bei der Zugprüfung bei einer Kraft von 5,7 bis 5,9 kN und die Flachproben Nr. 5 bis Nr. 8 mit der Blechpaarung von 1,5 mm bei 5,3 bis 5,5 kN. Es handelte sich jeweils um Scherbrüche in der Fügeebene. Eine Ermittlung der Bruchflächen ergab für die Flachproben Nr. 4 (51,2 mm²) und Nr. 6 (49,9 mm²) die größten Werte. Das Ergebnis wird in Bezug zu den minimal Grenzwerten vom DeltaSpot[®] als i.O. gewertet.



Abb. 54: Ergebnis Scherzugprüfung – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abb. 55 zeigt die Bruchlagen und -flächen der Flachproben Nr. 3 und Nr. 4 im Detail. Es ist ein Unterschied der Ausformung der Schweißlinse erkennbar. Die Flachprobe Nr. 3 hat eine optimale Bruchfläche, hingegen ist diese in Flachprobe Nr. 4 ungleichförmig in der Fügeebene. Auch die weiteren analysierten Bruchflächen der Flachproben (Anhang 10) sind ungleichförmig, da die Bedingungen der einzelnen Schweißungen unterschiedlich waren. Hier sollte also eine adaptive Schweißsteuerung (Prozessüberwachung) eingesetzt werden.



Abb. 55: Bruchfläche der Flachproben Nr. 3 und Nr. 4 – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.4 Elektrodenstandzeitversuch

Im nächsten Schritt wurde die Standzeitmenge der Elektroden überprüft. Zu Beginn war ein Anschleifen (Schleifpapier 240er Körnung) der einzelnen Elektrodenkappen an der positiven und negativen Elektrodenseite vorgesehen, um die Schweißbedingungen gegenüber der zuvor genannten Flachprobe Nr. 1 zu optimieren. Außerdem wurde beim Schweißpunkt Nr. 5 mittels Schälprüfung der Schweißpunktdurchmesser kontrolliert. In Abb. 56 ist deutlich ein Ausknöpfbutzen mit d_{pmin} = 6,12 mm bei diesem Schweißpunkt erkennbar, was eine gute Schweißparameterbedingung bestätigt.



Abb. 56: Ausknöpfbutzen am Beispiel des Schweißpunktes Nr. 5 - DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Tab. 6 verzeichnet die einzelnen Schweißpunkte in stufenförmigen Schritten. Hier zeigen sich an den Flachproben ab Schweißpunkt Nr. 15 reliefartige Oberflächenstrukturen. Vereinzelt wurden bei den Schweißpunktversuchen Spritzer beobachtet, die bei den Schweißpunkten Nr. 25, Nr. 30 und Nr. 40 stärker und bei den Schweißpunkten Nr. 15, Nr. 20, Nr. 35, Nr. 45 und Nr. 50 weniger ausgeprägt waren. Spritzer sind ein wesentliches Merkmal von zu hohem Stromfluss beim Schweißen. Des Weiteren hervorzuheben ist, dass die einzelnen Schweißproben an der negativen Elektrodenseite nirgendwo Unregelmäßigkeiten hatten. Unterschiede zwischen Anode und Kathode entstehen durch den Peltier-Effekt.

Anhang 10 (Abb. 92 bis Abb. 93) enthält hierzu den Vergleich von Schweißpunkt Nr. 1 und Schweißpunkt Nr. 30.

Schweißpunkt Nr.	Beurteilungskriterium - Pluselektrode	Beurteilungskriterium - Minuselektrode
1	Keine Unregelmäßigkeiten Keine Unregelmäßigkeite	
5	Keine Unregelmäßigkeiten Keine Unregelmäßigkeiten	
10	Keine Unregelmäßigkeiten	Keine Unregelmäßigkeiten
15	Leicht reliefartige Oberflächenstruktur	Keine Unregelmäßigkeiten
20	Leicht reliefartige Oberflächenstruktur Keine Unregelmäßigkeiter	
25	Reliefartige Oberflächenstruktur Keine Unregelmäßigkeiter	
30	Reliefartige Oberflächenstruktur Keine Unregelmäßigkeiten	
35	Leicht reliefartige Oberflächenstruktur Keine Unregelmäßigkeiten	
40	Reliefartige Oberflächenstruktur Keine Unregelmäßigkeiten	
45	Leicht reliefartige Oberflächenstruktur Keine Unregelmäßigkeiten	
50	Leicht reliefartige Oberflächenstruktur Keine Unregelmäßigkeiten	

Tab. 6: Elektrodenstandzeitversuch – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.5 Metallographische Untersuchung

Es folgte die metallographische Untersuchung der Schweißpunkte, bei der das Gefüge und die Linsendurchmesser für den Elektrodenstandzeitversuch näher analysiert wurden. Die Betrachtung unter dem Mikroskop zeigte bei Flachprobe Nr. 1 (Abb. 57) einen ca. 1 mm langen Oberflächenriss in der Mitte des Elektrodeneindruckes. Diese Heißrisse sind häufig ein Hinweis für zu hohen Stromfluss und eine zu geringe Nachwärmezeit beim Schweißprozess. Sie entstehen durch den Verzicht auf Nachkonditionierung im erwähnten Strom-Kraftprofil bzw. durch rasches Öffnen der Schweißzangen nach der Hauptstromphase.



Abb. 57: Rissbildung (rot eingerahmt) an der Flachprobe Nr. 1 – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Tab. 7 nennt die Schliff-Kennzeichnung (Schnittebene), Punktanzahl, Linsendurchmesser, Elektrodeneindrucktiefe und die Unregelmäßigkeiten der einzelnen Proben. Anhang 10 (Abb. 95) zeigt im Detail die einzelnen analysierten Flachproben.

Schliff Nr.	Schweiß- punkt Nr.	Linsen- durchmesser mm	Elektroden- eindrucktiefe %	Anmerkung
S3	1	6,73	0,0	Geringer Porenanteil in der Schweißlinsenmitte
S4	4	7,04	1,3	Lunker und Risse in der Schweißlinsenmitte
S5	10	6,92	0,5	Poren und Risse in der Schweißlinsenmitte
S6	15	6,27	0,8	Poren und Risse in der Schweißlinsenmitte
S7	20	6,94	0,0	Poren, Lunker und Risse in der Schweißlinsenmitte
S8	25	7,59	2,0	geringer Porenanteil in der Schweißlinsenmitte
S9	30	7,19	1,0	Poren, Lunker und Risse in der Schweißlinsenmitte; auflegiertes Elektrodenmaterial
S10	35	6,95	-0,3	geringe Poren und Risse in der Schweißlinsenmitte
S11	40	7,27	-0,5	geringe Poren und Risse in der Schweißlinsenmitte
S12	45	7,10	1,5	Poren und Risse in der Schweißlinsenmitte
S13	50	6,68	-0,8	geringe Poren und Risse in der Schweißlinsenmitte; auflegiertes Elektrodenmaterial
S14	54	6,89	0,5	Poren und Risse in der Schweißlinsenmitte; auflegiertes Elektrodenmaterial

Tab. 7: Ergebnisse der metallographischen Prüfung – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abb. 58 stellt die einzelnen Schweißlinsendurchmesser beim Elektrodenstandzeitversuch im Vergleich mit dem Mindestlinsendurchmesser dar. Die Anforderung beträgt hier, wie bereits erwähnt, $d_{Lmin} = 5 \cdot \sqrt{s_{min}} = 7,07$ mm. Sie wurde von den Schliffkennzeichnung Nr. 25, Nr. 30, Nr. 40 und Nr. 45 erfüllt, während die anderen den Mindestlinsendurchmesser verfehlten. Da die einzelnen Punkte aber innerhalb der Schwankungsbreite lagen, kann das dennoch als gutes Ergebnis für die Elektrodenstandzeit gelten.



Abb. 58: Schweißlinsendurchmesser über Standzeitversuch – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.6 Schwingfestigkeitsprüfung

Anhang 10 (Tab. 21 bis Tab. 22) bringt die einzelnen Ergebnisse der Schwingprüfung. Diese wurde mit 23 Flachproben an der 1,5 mm-Blechpaarung und 25 Flachproben an der 2,0 mm-Blechpaarung durchgeführt. Bei der 1,5 mm-Blechpaarung erzielten Schwingproben Nr. 9 und Nr. 16 die höchsten Lastwechsel beim Abschaltkriterium (=Durchläufer) und die Schwingproben Nr. 21 und Nr. 22 die niedrigsten Lastwechsel. Bei den Proben der 2 mm-Blechpaarung wurden die höchsten Lastwechsel mit Schwingproben Nr. 13, 19 und Nr. 27 erreicht und bei den Nr. 19 und Nr. 28 die geringsten. Die Gesamtstreuung aller Schwingproben bzw. beider Blechpaarungen lag bei 1,27 bis 4,73 kN Maximalkraft. Die beiden Wöhlerlinien (Abb. 59) zeigen diese Streuungen. Es erwies sich somit eine nicht konstante Reproduzierbarkeit der Schweißbedingungen bzw. eine geringere Stabilität des Schweißprozesses im Vergleich zu DeltaSpot[®].



Abb. 59: Schwingfestigkeitsprüfung – Vergleich der Blechpaarungen 1,5 und 2mm – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

An den Schwingungsproben wurde eine erweiterte Sichtprüfung durchgeführt. Die Abb. 60 und Anhang 10 (Abb. 96 bis Abb. 97) zeigen die Schwingproben Nr. 11 und Nr. 13 nach der Schwingfestigkeitsprüfung. Bei sämtlichen Schwingproben entstand im niedrigen Belastungsbereich ein vollständiger Bruch entlang der Fügeebene. Zudem entstanden bei hoher Belastung nach Erreichen des definierten Abschaltkriteriums Risse im Bereich der Schweißlinse.



Abb. 60: Detailansicht Schwingprobe Nr. 11 (links) und Nr. 13 (rechts) - 1,5mm – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.7 Beurteilung des Gesamtergebnisses

Die mit dem konventionellen Verfahren DeltaCon320 erstellten Scherzugproben versagten bei einer Prüfzugkraft zwischen 5,3 bis 5,9 kN bis zum Scherbruch. Das sind ähnliche Werte wie beim Verfahren DeltaSpot[®]. Nach dem Elektrodenstandzeitversuch zeigten sich grundsätzlich zwar Risse, Lunker bzw. Poren im Zentrum der Schweißlinse, doch erfahrungsgemäß beeinträchtigen diese Phänomene im Linsenzentrum (ca. 10 – 15%) die Festigkeit des Schweißpunktes nur unwesentlich. Die Sichtprüfung ergab bei einzelnen Schweißproben auflegiertes Elektrodenmaterial am Blecheindruck der positiven Elektrodenseite, das führte an einigen Flachproben zu reliefartigen Oberflächen. Deswegen wurden zur Optimierung die positive und die negative Schweißelektrode mit Schleifpapier vorbehandelt. Die Abb. 61 zeigt die Elektrodenoberflächen vor und nach dem Schweißprozess, wodurch sich die Elektrodenstandmenge deutlich erhöhen ließ. Bei den ersten Schweißversuchen ohne Vorbehandlung der Elektroden konnten nur 5 Schweißproben erstellt werden. Die Optimierung durch Schleifvorbehandlung erhöhte die Effektivität deutlich auf 25 bis 30 Schweißpunkte ohne Kappenfräsen in der erforderlichen Schweißpunktqualität. Die Schwingproben hatten eine breite Streuung, was auf die fehlende adaptive Schweißsteuerung (Prozessüberwachung) und den Verzicht auf Nachkonditionierung im Strom-Kraftprofil zurückzuführen ist. Das Bruchverhalten bei der Schwingfestigkeitsprüfung entsprach demjenigen in der Untersuchung vom DeltaSpot[®].



Abb. 61: Elektrodenoberflächen vor (links) und nach dem Schweißprozess (rechts) – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

6.6 Versuchsanlage 3 – Elmatech Prototypanlage

Diese Protoypenanlage der Elmatech GmbH wurde für das Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen konstruiert. Während es sich bei DeltaCon 320 und DeltaSpot um bereits etablierte bzw. fortgeschrittene Verfahren handelt, sind dies die ersten Punktschweißungen, die zudem vom Maschinenhersteller Elmatech GmbH auch selbst durchgeführt werden. Es wurden Flachproben der Aluminiumlegierung AW 6082-T6 mit einer Blechpaarung von s = 1,5mm untersucht. Wie bei den bisherigen Verfahren waren auch hier Sicht-, Scherzug- und metallographische Prüfung vorgesehen. In Vorversuchen wurden die per Oszilloskop eingestellten bzw. überwachten Schweißparameter bzw. Schweißbereiche ermittelt. Im Einsatz befanden sich neue Elektroden ø 16 mm nach DIN EN ISO 5182 und einem Kappenradius von 150 mm, die zur Optimierung wie beim Verfahren DeltaCon 320 mit Schleifpapier (240er Körnung) zuerst vorbehandelt wurden. Die Abb. 62 zeigt die Elektrode (Kathode) vor der Schweißung nach der Schleifvorbehandlung.



Abb. 62: Elektrode (Kathode) vor der Schweißung - Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung.

6.6.1 Parametereinstellung

Nach der Durchführung der Parameterentwicklung wurde sukzessive das Strom-Kraftprofil laut Abb. 63 eingestellt. Es wurden im ersten Schritt die Oberflächenerscheinung, Asymmetrien in der Schweißlinsenausbildung und Oberflächenanhaftungen des Elektrodenwerkstoffes sowie zusätzlich die Schweißlinsenausbildung bzw. der mind. Schweißpunktdurchmesser berücksichtigt. Dabei wurden neue Elektroden 16 mm nach DIN EN ISO und die Blechpaarung s = 1,5 mm eingesetzt. Im Vergleich mit den vorangegangenen Verfahren wurden nur geringere Elektrodenkräfte und Schweißströme angewandt. Die Vorkonditionierung bildet sich durch einen Schweißstrom von 5,5 kA und einer Elektrodenkraft von 2,5 kN, danach ist eine kurze Schweißpause von 20 ms eingeleitet. In der Hauptstrom-Phase steigt dann zu Beginn der Schweißstrom auf 26 kA an, wird von 220 ms bis 370 ms gehalten und fällt wieder herab auf 5,5 kA.



Abb. 63: 2,0 mm Blechpaarung - Parametereinstellung Strom/Kraft - Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung.

6.6.2 Sichtprüfung der ersten Schweißpunktversuche

Die Sichtprüfung der ersten Flachproben offenbarten erhebliche Spritzer und Unregelmäßigkeiten an den Probenoberflächen. Außerdem war häufig Abrieb des Elektrodenmaterials erkennbar, wie Abb. 64 für Flachprobe Nr. 1 zeigt. Hier ist zudem der Elektrodeneindruck an der positiven und an der negativen Elektrodenseite zu sehen. Das galt besonders für die negative Elektrodenseite der einzelnen Flachproben mit einer Aufstülpung bzw. einer Elektrodeneindrucktiefe von 20% der Nennblechdicke. Im Anhang 11 (Abb. 98 bis Abb. 99) ist ein Übersichtbild der Flachproben dargestellt.



Abb. 64: Flachprobe Nr. 1 – Kathode (links) und Anode (rechts) – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung.

6.6.3 Scherzugprüfung

Die Prüfungen wurden an der Universalprüfmaschine Zwick-BZ250/SN5A mit einer Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min durchgeführt. In Abb. 65 sind die Prüfergebnisse der Flachproben Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3 dargestellt. Die Flachproben versagten bei einer Kraft von 3,0 bis 4,4 kN jeweils durch Scherbrüche in der Fügeebene. Das Ergebnis ist in Bezug auf das DeltaSpot[®] als nicht bestanden zu bewerten.



Abb. 65: Scherzugprüfung – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung.

6.6.4 Metallographische Untersuchung

Die Flachproben Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3 wurden mikroskopisch untersucht. Die mind. Schweißlinsendurchmesser betragen 6,24 bis 6,91 mm und die Elektrodeneindrucktiefen liegen mit 13 bis 20% im Grenzbereich. Die Abb. 66 zeigt Lunker und Porennester in Flachprobe Nr. 3. Der Anhang 11 (Abb. 100) zeigt weitere Resultate.



Abb. 66: Schliff S3 – Detailansicht der "Probennester" – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse sind aufgrund der Tatsache, dass es bei Widerstandspunktschweißungen im Linsenzentrum grundsätzlich verstärkt zu Unregelmäßigkeiten kommt, als i.O. zu werten.

6.6.5 Beurteilung des Gesamtergebnisses

Die Prototypenanlage produzierte bei den ersten Schweißpunktversuchen unerwünschte Ausstülpungen und Oberflächenstrukturen in den Flachproben. In der Scherzugprüfung erzielten die Flachproben Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3 mit 6,24 bis 6,98 mm die mind. Schweißpunktdurchmesser für s = 1,5mm. Die Schweißpunktfestigkeit betrug 3,0 bis 4,4 kN. Die Werte liegen deutlich unter denen von DeltaSpot[®] und DeltaCon 320. Zudem offenbarte die metallographische Untersuchung wie bei den vorrangegangen Verfahren, deutliche Risse und Lunker bzw. Poren im Zentrum der Schweißlinse. Das lässt sich ebenso auf die noch nicht voll entwickelte Schweißsteuerung zurückführen. Wegen dieser unzureichenden Ergebnisse im Vergleich zu DeltaSpot[®] und DeltaCon 320 verzichtet diese Arbeit auf weitere Untersuchungen der Blechpaarung s = 2,0 mm, den Elektrodenstandzeitversuch und die Schweißsteitsprüfung. Wesentliche Kriterien – wie etwa keine Anlegierung, mind. Punkteanzahl 30 – 50 vor Kappenfräsen und die Schweißpunktqualität – wurden verfehlt. Das System muss noch verbessert werden, bevor es einsetzbar ist.

6.7 Untersuchung von Punktschweißkleben mit dem DeltaSpot[®]-Verfahren

In dieser Untersuchung geht es um die allgemeine Überprüfung von hochfesten Aluminiumlegierungen mit einem Klebstoff im Fügespalt. Punktschweißkleben wird besonders zur Steifigkeitserhöhung im Automobilleichtbau eingesetzt. Über die Auswirkungen der Kombination von hochfesten Aluminiumlegierungen (EN AW-7xxx) und einem 1K-Epoxid-Klebstoff hat die MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG am Standort Graz bisher kaum Erfahrungen. Deswegen wird hier die crashrelevante Aluminiumlegierung EN AW-7075 mit einer Blechpaarung von 1,5 mm überprüft. Als Verfahren wird das DeltaSpot[®] verwendet, da bisherige Erfahrungen belegen, dass dabei die notwendige Prozessstabilität herrscht. Um den Lackierprozess in einer Fertigungsanlage nachzubilden, werden in dieser Untersuchung die Flachproben ohne bzw. mit Vorbehandlung (warmausgelagert) analysiert. Als Strukturklebstoff wird nach Empfehlung des Klebstofflieferanten Betamate 4601 (1K – warmaushärtend) gewählt. Die Anforderungen im Lackierprozess bei MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG sind für die kathodische Tauchlackierung (KTL) max. 190 C° bei 25 Minuten, der Füller max. 175° C bei 20 Minuten und Decklack max. 150 C° bei 22 Minuten. Die Aushärtung des Klebstoffes erfolgt grundsätzlich beim KTL-Durchlauf und ist wesentlich für Punktschweißklebungen im Automobilbau. Diese KTL-Wärmebehandlung bzw. der oben angeführte Lackierprozess wurden im internen Versuchslaborofen mit Proben ohne Oberflächenvorbehandlung (beizen/passiviert) durchgeführt und manuell verklebt.

6.7.1 Parametereinstellung

Bei Punktschweißverbindungen mit Klebstoff, so lehren bisherige Erfahrungen, unterschied sich die Parametereinstellung erheblich von derjenigen für konventionelle Widerstandschweißpunktverbindungen. Diese Aussage beruht auf den Recherchen aus dem theoretischen Teil und vorangegangenen Erfahrungswerten im Unternehmen. Die Parameterentwicklung ist hier wesentlich und wurde bereits im Vorfeld gemeinsam mit der Fronius International GmbH in mehreren Testreihen ermittelt. Die Abb. 67 visualisiert die Einstellung der Parameter für die erstellen Schweißproben.



Abb. 67: Parametereinstellung - EN AW-7075 T6, Quelle: Eigene Darstellung.

6.7.2 Sichtprüfung

An den Widerstandspunktschweißungen zeigten sich ein geringer, gleichmäßiger Elektrodeneindruck und eine örtlich oxidierte Oberfläche. Die Abb. 68 zeigt die Schweißproben EN AW-7075 T6 mit dem Klebstoff Betamate 4601. Der bei den Schweißproben durch die Punktschweißung verdrängte Klebstoff ist klar erkennbar. Die Analyse dieser Widerstandspunktschweißungen offenbarte teilweise einseitige Oberflächenausstülpungen und vereinzelt einen "geschobenen" Elektrodeneindruck.


Abb. 68: Sichtprüfung – Schweißproben EN AW-7075 T6 (ohne Warmlagerung) mit Betamate 4601, Quelle: Eigene Darstellung.

6.7.3 Scherzugprüfung

Die DeltaSpot[®]-Widerstandspunktschweißungen der EN AW-7075 T6 (s = 1,5 mm) mit Klebstoff Betamate 4601 brachten max. Zugkräfte bei Proben mit Ofenlagerung von 30,8 bis 35,5 kN und bei den Flachproben ohne Ofenlagerung von 8,8 bis 9,8 kN mit Scher-, Misch- und Ausknöpfbrüchen. Resultate zeigt Tab. 8.

Schweißproben Nr.	Blechwerkstoff	Klebstoff	Vorbehandlung	Scherzugkraft
11	EN AW-7075 T6	BM 4601	warmausgelagert	35497,5
12	EN AW-7075 T6	BM 4601	warmausgelagert	30801,9
13	EN AW-7075 T6	BM 4601	warmausgelagert	33169,1
14	EN AW-7075 T6	BM 4601	warmausgelagert	32446,1
15	EN AW-7075 T6	BM 4601	-	9840,5
16	EN AW-7075 T6	BM 4601	-	9046,4
17	EN AW-7075 T6	BM 4601	-	8807,1
18	EN AW-7075 T6	BM 4601	-	8956,3

Tab. 8: Punktschweißkleben EN AW-7075 T6 mit Betamate 4601, Quelle: Eigene Darstellung.

6.7.4 Gesamtbeurteilung der Untersuchung Punktschweißkleben

Diese Widerstandspunktschweißungen mit Betamate 4601 zeigten in der Schweißlinse häufig Risse und mit Klebstoff gefüllte Poren. Die Flachproben ergaben signifikante Unterschiede bei der Zugprüfung zwischen ofengelagerten und nicht-ofengelagerten Proben. Die Festigkeitswerte besaßen eine signifikante Steigerung um den Faktor 3 von 9,2 auf 33,0 kN bei der Aluminiumlegierung EN AW-7075 T6 und die Blechpaarung 1,5 mm. Diese Kombination ergab zuverlässige Werte, und der serientaugliche Einsatz von Punktschweißkleben wurde grundsätzlich bestätigt. Außerdem zeigte hier der Einsatz eines Strom-Kraftprofils, dass der Klebstoff durch die Elektrodenkraft verdrängt und durch einen Vorimpuls die Fügeoberfläche gereinigt wurde. Weitere Optimierungen hinsichtlich Parametereinstellung, Oberflächenvorbehandlungen, Klebstoffauswahl und Klebstoffverhalten sind zu erarbeiten.

6.8 Beschreibung relevanter Kaltfügeverfahren

Kaltfügeverfahren bzw. mechanische Verfahren haben im Automobilleichtbau große Bedeutung als Alternative zum Punkt- sowie Schmelzschweißen bzw. bei nicht-schweißbaren Werkstoffen. Diese Verbindungstechniken sind wegen der hohen Ansprüche (Wirtschaftlichkeit, Prozesssicherheit) bei Aluminiumwerkstoffen in der Großserienfertigung schon seit einiger Zeit interessant im Vergleich mit thermischen Fügeverfahren (z.B. Widerstandspunktschweißen). Als Vorteil lässt sich vor allem die einfache Realisierbarkeit von Mischbauweisen wie etwa das Kombinieren von Stahl und Aluminium nennen. Das Prinzip von mechanischen Fügeverfahren beruht auf Form- und/oder Kraftschluss. Im Vergleich zum Punktschweißen sind die notwendigen Kräfte für den Fügevorgang mit beidseitiger Zugänglichkeit höher als die für das Punktschweißen erforderlichen Elektrodenkräfte. Jedoch bestehen die Hilfsfügeelemente (Schrauben, Nieten, etc.) bei Kaltfügeverfahren von Aluminiumlegierungen meistens nicht aus artgleichem Werkstoff. Dadurch wird die Korrosionsbeständigkeit der Hilfsfügeteile ein Problem und macht eine Beschichtung der Oberflächen erforderlich.⁶⁶

Dieser Abschnitt diskutiert alternative Kaltfügeverfahren zum Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen samt deren Vor- und Nachteilen. Es soll die optimale Alternative zum Widerstandspunktschweißen im Automobilbau bestimmt und mit dem DeltaSpot[®]-Verfahren verglichen werden. Abschließend ist eine Kosten-Nutzen-Berechnung zu erstellen.

Die Abb. 69 zeigt Alternativen zum Aluminiumpunktschweißen. Es werden nun die Verfahren Stanznieten, Fließlochschrauben und Durchsetzfügen näher betrachtet.



Abb. 69: Kaltfügeverfahren im Automobilkarosseriebau, Quelle: Fronius International GmbH (2017), S. 2.

⁶⁶ Vgl. Ostermann (2014), S. 647.

6.8.1 Stanznietverbindung – DIN 8593-5

Allgemein sind Nietverbindungen nicht wieder lösbar, und der Formschluss wird durch Umformen erzielt. Im Automobilleichtbau wird das Stanznieten häufig verwendet. Hier werden Werkstücke mit einem Hilfsfügeteil verbunden, und dann wird mit Werkzeugen (Stempel und Matrize) die Niete durch die zu verbindenden Werkstücke gedrückt. Es gibt hierbei zwei Arten von Verbindungselementen, die Voll- und die Halbhohlniete. Anders als bei der Vollstanzniete wird bei der Hohlstanzniete der ausgestanzte Stanzbutzen eingeschlossen. Er bleibt im Inneren der Niete. Hohlnieten ermöglichen die Herstellung von gas- und wasserdichten Fügeverbindungen. Gegenüber Schweißverfahren hat das Stanznieten allgemein den Vorteil, dass dünne Bleche verzugsarm mit verschiedenen Materialien verbunden werden können.⁶⁷



Abb. 70: Arbeitsablauf beim Halbhohl-Stanznieten, Quelle: Ostermann (2014), S. 657.

Nachstehend sind die wesentlichen Vor- und Nachteile der Stanznietverbindung angeführt:

Vorteile der Stanznietverbindung

- Form- und kraftschlüssige Verbindung,
- keine thermische Belastung,
- hohe Prozesssicherheit,
- Kombination mit Kleben möglich und ebenso
- Fügen von beschichteten Werkstoffen.

Nachteile der Stanznietverbindung

- Zusätzlicher Hilfsstoff erforderlich (Kosten, Gewicht),
- PVC (Polyvinylchlorid)-Nahtabdichtung erforderlich,
- mittlere Prozessgeschwindigkeit,
- Hilfsstoffe können korrodieren und
- Materialverzug infolge mechanischer Belastung ist nicht auszuschließen.

⁶⁷ Vgl. Werkstoff-Forschung (2017), Online-Quelle [02.12.2017]

6.8.2 Durchsetzfügen – DIN 8593-5

Das Durchsetzfügen ist auch als "Clinchen" bekannt. Es werden hierbei zwei oder noch mehr Bleche mittels einer lokalen Kaltumformung unlösbar und somit dauerhaft miteinander verbunden. Besonders beliebt ist das Verfahren bei Verbindungen mit unterschiedlichen Blechstärken, bei verschieden beschichteten Blechen oder bei grundverschiedenen Blechwerkstoffen. Im Vergleich zum Stanznieten wird beim Clinchen kein zusätzliches Fügeelement benötigt. Besonders Aluminium eignet sich hierfür. Die Abb. 71 veranschaulicht das Verfahren.⁶⁸



Abb. 71: Verfahrensablauf Durchsetzfügen, Quelle: Ostermann (2014), S. 653.

Die wesentlichen Vor- und Nachteile des Durchsetzfügens sind nachfolgend dargestellt:

Vorteile von Durchsetzfügen:

- Form- und kraftschlüssige Verbindung,
- keine thermische Belastung,
- hohe Prozesssicherheit,
- Kombination mit Kleben möglich,
- Fügen von beschichteten Werkstoffen möglich und
- Hilfsstoffe werden nicht benötigt.

Nachteile von Durchsetzfügen:

- PVC (Polyvinylchlorid)-Nahtabdichtung erforderlich,
- mittlere Prozessgeschwindigkeit,
- Kontaktkorrosion möglich,
- geringe dynamische Steifigkeit und
- Einschränkungen bei Blechstärken.

⁶⁸ Vgl. Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2016), Online-Quelle [02.12.2017]

6.8.3 Fließlochschraubverbindung – DIN 8593-3

Die Fließlochverschraubung (kurz FLS: Fließlochformende Schraube) ist eine direkte Verbindung mit zwei Fügepartnern: Zwei Bleche werden ohne Vorlochen bzw. Vorbehandlung miteinander verbunden. Eine einseitige Zugänglichkeit ist ausreichend, wodurch die Zeiten für die Herstellung der Verbindung und also Fertigungskosten reduziert werden. Deswegen wird das Verfahren besonders bei profilintensiven Bauweisen verwendet. Grundsätzlich beruht es auf dem Prinzip der Fließlochbildung, da es hohe Reibwärme durch hohe Schraubkraft sowie Drehzahl benötigt. Die Schraube drückt sich dabei in das Werkstück ein, wodurch ein Gewinde entsteht und die Direktverschraubung stattfindet. Das Anziehen erfolgt mit einem vorgegebenen Drehmoment. Diese zerstörungsfreie Verbindung ist besonders bei Reparaturen und für das Recycling der Werkstücke vorteilhaft.⁶⁹



Abb. 72: Prinzip des Verfahrensablaufes einer FDS – Verbindung, Quelle: arnold-fastening (2017), Online-Quelle [02.12.2017].

Nachfolgend sind Vor- und Nachteile der Fließlochschraubverbindung dargestellt:

Vorteile der Fließlochschraubverbindung:

- Form- und kraftschlüssige Verbindung,
- hohe Prozesssicherheit,
- Kombination mit Kleben möglich,
- Fügen von beschichteten und verschiedenen Werkstoffen möglich und
- hohe Recyclingfähigkeit.

Nachteile der Fließlochschraubverbindung:

- PVC (Polyvinylchlorid)-Nahtabdichtung erforderlich,
- niedrige Prozessgeschwindigkeit,
- geringe dynamische Steifigkeit,
- hohe Andruckkräfte erforderlich und
- Einfluss des Bauraumes im Rohbau (Länge der Fließlochschraube).

⁶⁹ Vgl. arnold-fastening (2017), Online-Quelle [24.09.2017]

6.8.4 Beschreibung der Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein Punktbewertungsschema, das dank seiner einfachen Anwendbarkeit und seines Aufbaus häufig in der Praxis eingesetzt wird, um die qualitative Beurteilung verschiedener, einander ausschließender Handlungsalternativen (z.B. Entscheidungen über Lieferanten, Investitionen oder Technologien) in eine vereinheitlichte quantitative Nutzenskala zu übertragen.⁷⁰

Dabei wird in folgenden Schritten vorgegangen:

- 1. Zuerst werden die für die Auswahl relevanten Kriterien (z.B. Standortfaktoren) aufgelistet.
- 2. Dann werden die einzelnen Gewichtsanteile definiert, deren Summe grundsätzlich 1 ergibt.
- 3. Des Weiteren wird jede Alternative in Bezug auf die jeweiligen Kriterien bewertet. Dies erfolgt auf einer normierten, aber individuell definierbaren Skala, etwa 1 = sehr ungünstig und 5 = sehr gut.
- 4. Der Gesamtnutzen wird durch Addition der einzelnen Teilnutzenwerte berechnet. Hierzu müssen letztere mit dem jeweiligen Gewichtsanteil multipliziert werden.
- 5. Die Endauswahl erfolgt hinsichtlich der Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzen.

Die Tab. 9 zeigt eine Nutzwertanalyse für eine Produktauswahl, indem ein alternatives Produkt in Bezug auf Kosten, Qualität, Technologie, Verfügbarkeit und Kompatibilität mit dem bestehenden System verglichen wird.

Kritorium	Cowiektung	Produkt 1		Produkt 2	
Kntenum	Gewichtung	Bewertung	Teilnutzen	Bewertung	Teilnutzen
Kosten	0,25	2	0,5	3	0,75
Qualität	0,35	5	1,75	4	1,4
Technologie	0,20	3	0,6	2	1,2
Verfügbarkeit	0,10	2	0,2	3	0,6
Kompatibilität	0,10	2	0,2	2	0,4
Gesamtnutzen	1		3,25		4,35
	Beurteilungsskala:	5 = sehr gut; 4 = gut; 3	= mittel; 2 = schlecht;	1 = sehr ungünstig.	•

Tab. 9: Nutzwertanalyse, Quelle: Eigene Darstellung.

In diesem genannten Beispiel wäre Produkt 2 dem Produkt 1 vorzuziehen.

⁷⁰ Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S. 71.

6.8.5 Nutzwertanalyse zur Auswahl des Kaltfügeverfahrens

Die Nutzwertanalyse soll die Auswahl des Kaltfügeverfahrens unterstützen, hier am Beispiel einer PKW-Karosserie. Zuerst werden die Kriterien zum Kaltfügeverfahren benannt und ihre jeweilige Gewichtung festgelegt. Dann sind die einzelnen Kriterien für die Alternativen zu beurteilen. Die Tab. 10 zeigt das Ergebnis.

		Stanznieten		Durchsetzfügen		Fließlochverschraubung	
Kriterien	Gewichtung	Bewertung	Teilnutzen	Bewertung	Teilnutzen	Bewertung	Teilnutzen
Kosten (MK, FK)	0,20	3	0,6	3	0,6	2	0,4
Zusätzliche Hilfsstoffe	0,20	2	0,4	3	0,6	2	0,4
Werkstückwelligkeit nach Fügeprozess	0,15	2	0,3	2	0,3	2	0,3
Dynamische Belastung	0,13	3	0,39	1	0,13	3	0,39
Prozessgeschwindigkeit	0,11	2	0,22	2	0,22	1	0,11
Erfahrungen im Rohbau	0,08	4	0,32	3	0,24	1	0,08
Einfluss im Bauraum	0,06	4	0,24	4	0,24	1	0,06
Zugänglichkeit	0,04	2	0,08	2	0,08	3	0,12
Reparatur- u. Recyclingfähigkeit	0,03	2	0,06	2	0,06	4	0,12
Gesamtnutzen	1		2,61		2,47		1,98
Beurt	eilungsskala: 5 :	= sehr aut: 4 =	aut: 3 = mitte	l; 2 = schlecht;	1 = sehr ungü	nstia.	

Tab. 10: Nutzwertanalyse von Kaltfügeverfahren am Beispiel einer PKW-Karosserie im Rohbau, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Nutzwertanalyse ergibt, dass das Stanznieten den größten Gesamtnutzen aufweist und nun weiter untersucht wird. Vorteile von Stanznieten gegenüber dem Durchsetzfügen und der Fließlochverschraubung sind die Erfahrung im Karosserierohbau, der geringe Einfluss für den Bauraum und der Einsatz bei dynamischer Belastung. Stanznieten sind bereits im herkömmlichen Karosserierohbau häufig als Alternative zum Punktschweißen gebräuchlich. Aber auch das Durchsetzfügen ist als möglicher Ersatz zum Punktschweißen bekannt. Daher liegen die beiden Varianten im Gesamtnutzen sehr nahe beieinander.

Die Legierung EN-AW 6016 mit dem Werkstoffzustand T4 wird häufig im Karosserierohbau angewandt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Es sollen nun im praktischen Versuch Punktschweißen und Stanznieten analysiert werden. Dabei ist das DeltaSpot[®]-Verfahren einzusetzen, da hier die meisten Erfahrungswerte existieren.

6.8.6 Untersuchung des Punktschweißens im Vergleich mit dem Stanznieten

Nun werden das Fügeverfahren des Punktschweißens und das des Stanznietens (Abb. 73) mit Halbhohlnieten von Aluminiumlegierungen verglichen. Gegenstand ist die Werkstofflegierung EN-AW 6016 T4 mit einer Blechstärke von 1,5 mm. Zu Analysezwecken wird eine Scherzugprüfung durchgeführt, und die 5 Flachproben werden mit dem DeltaSpot[®]-Verfahren für die Scherzugprüfung mit 1-Punktverbindung erzeugt. Des Weiteren werden 5 Flachproben mit dem manuellen Stanznietsystem, einer C-Halbholniete (Durchmesser 3,5mm) und der entsprechenden Matrize der Firma Stanley Bostitch GmbH hergestellt. Die Abmessungen der Stanznietproben entsprechen denen der Flachproben mit 1-Punktverbindung. In der folgenden Abb. 74 und Tab. 11 sind die Ergebnisse ersichtlich.



Abb. 73: Tucker-Anlagentechnik für mechanisches Fügen (Stanznieten), Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. 74: Kraft-Weg-Diagramm – Stanznieten mit Halbhohlnieten im Vergleich zu Punktschweißen - DeltaSpot, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Stanznietverbindungen mit Halbholnieten besaßen im Mittelwert eine maximale Zugkraft von 3,48 kN. Bei der Zugprüfung fiel bei allen Stanznietverbindungen auf, dass die einzelnen Nieten aus dem Blechunterteil getrennt waren und im Bereich von Fuß und Kopf Risse hatten. Die Widerstandspunktschweißungen hingegen hatten einen höheren Mittelwert der maximalen Abzugskraft von 4,21 kN. Bei der Zugprüfung wurde bei allen Punktschweißverbindungen ein Ausknöpfen des Punktes festgestellt – also ein zuverlässiges Ergebnis.

Verbindung	Probe	Fmax kN	Mittelwert Fmax kN	Bruchverhalten
Stanznieten mit Halbholniet	1	3,36		Ausreißen des Nietfußes aus dem Unterblech
	2	3,48		Ausreißen des Nietfußes aus dem Unterblech
	3	3,49	3,48	Ausreißen des Nietfußes aus dem Unterblech
	4	3,20		Ausreißen des Nietfußes aus dem Unterblech
	5	3,88		Ausreißen des Nietfußes aus dem Unterblech
Punktschweißen	1	4,15		Ausgeknöpft
	2	4,27		Ausgeknöpft
	3	4,02	4,21	Ausgeknöpft
	4	4,35	,	Ausgeknöpft
	5	4,27		Ausgeknöpft

Tab. 11: Ergebnisse der Zugprüfung – Stanznietverbindung und Widerstandspunktschweißung im Vergleich, Quelle: Eigene Darstellung.

6.9 Kostenbewertung Punktschweißen gegenüber Stanznieten

Dieses Kapitel vergleicht und bewertet die Kosten von Punktschweißen für Aluminiumlegierungen nach den Verfahren DeltaSpot[®] und DeltaCon 320 mit dem Kaltfügen von Stanznieten. Ausgangssituation ist ein Fahrzeugfertigungsprojekt der MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG, bei dem nur die Fügetechnologie ohne sonstige Produktionseinflüsse (z.B. Taktzeiten, Personalaufwand, Werkzeugwechsel etc.) betrachtet wird.



Abb. 75: Jaguar Modell E-PACE, Quelle: Jaguar, Online-Quelle [02.12.2017].

6.9.1 Beschreibung der praktischen Anwendung

Die Kostenbewertung basiert auf einer praktischen Anwendung. Als Beispiel dient ein Oberklasse-SUV eines europäischen OEM (Original Equipment Manufacturer), das künftig in einem Volumen von 35.000 Einheiten pro Jahr bei MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG in Graz gefertigt werden soll. Der betrachtete Umfang ist ein klassischer Karosserierohbau mit dem Hauptanteil Aluminiumlegierung in den zu fügenden Bauteilen. Geplant ist die Verwendung von 2401 Vollstanznieten, während laut Angaben des Kunden 4489 Schweißpunkte im Vergleich dazu benötigt werden. Die Kosten für ein Nietelement wird mit 0,04 € pro Stück kalkuliert und das Gewicht beträgt 0,001 kg pro Niete laut Zeichnungsangabe des Herstellers. Als Energiekosten gelten nach Angaben eines Forschungsinstitutes 2,2 kWh pro 1000 Nieten. Für das Punktschweißen mit dem DeltaSpot[®]-Verfahren sind zusätzliche Prozessbänder (Typ PT1407) erforderlich. Deswegen steigen die Kosten bei der Anwendung dieses Verfahrens deutlich – 69,50 € kostet ein Band. Es sind insgesamt zwei Prozessbänder (Anode/Kathode) notwendig für einen Schweißzyklus der Schweißanlage DeltaSpot®. Laut Erfahrungswerten bzw. den mechanischen Versuchen lassen sich mit einem Prozessband (ca. 75m Länge) 2500 Schweißpunkte in gewünschter Qualität erzeugen. Der Energieverbrauch hierfür wird vom Forschungsinstitut auf 20 kWh pro 1000 Schweißpunkte beziffert.⁷¹ Die speziellen Elektroden werden mit Einzelkosten von 0,28 € pro Stück angegeben. Die Energiekosten betragen 0,07 € pro Schweißpunkt und Nietpunkt. Für die Variante DeltaCon 320 (Punktschweißen ohne Prozessband) sind pro Schweißpunkt Einzelkosten von 0,23€ berücksichtigt.

⁷¹ Vgl. L. Han (2006), Online-Quelle [02.12.2017]

6.9.2 Kalkulation der Varianten

Es werden die Daten für die Variante 1 (DeltaCon 320), Variante 2 (DeltaSpot[®]) und Variante 3 (Stanznieten) herangezogen. Daraus ergeben sich folgende Berechnungen:

• Variante 1 – DeltaCon 320:

Variante 1 (DeltaCon 320) ist ein konventionelles Widerstandspunktverfahren ohne Prozessband. Als Energiekosten werden zunächst 0,02 kWh pro Schweißpunkt eruiert, was also 0,0014 € Energiekosten pro Schweißpunkt ergibt. Die Energiekosten pro Rohbau betragen dann 6,28 €. Wesentlich ist bei dieser Variante die erforderliche Elektrodenkappe pro Schweißzyklus bzw. Schweißpunkt zu berücksichtigen. Erfahrungsgemäß sind in der Fahrzeugproduktion beim Punktschweißen einer Stahllegierung nach 18-mal Kappenfräsen die Elektrodenkappen durch neue zu ersetzen. Eine Elektrodenkappe kostet 0,23 € im Einkauf. Unter der Annahme von 50 hochwertigen Schweißpunktqualitäten bei Aluminium, wird ein Elektrodenwechsel der positiven sowie negativen Elektrode nach 1000 Schweißpunkten erforderlich. Das ergibt insgesamt 10 Elektroden für 4485 Schweißpunkte am Karosserierohbau, die dann 2,30 € kosten. Die Gesamtkosten pro Rohbau der Fügetechnik betragen 8,58 €, wie Tab. 12 aufschlüsselt.

Berechnung der Variante 1:	
kWh pro Schweißpunkt	0,02 kWh
Energiekosten pro Schweißpunkt	0,0014 €
Energiekosten pro Karosserierohbau	+ 6,28 €
Einzelkosten Elektroden pro Schweißung	0,23€
Anzahl der Elektroden pro Schweißung	10
Elektrodenkosten pro Karosserierohbau	+ 2,30 €
Gesamtkosten pro Karosserierohbau	= 8,58 €

Tab. 12: Variante 1 – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

• Variante 2 – DeltaSpot[®]:

Die Variante ist in Anlehnung zu Variante 1. Die Energiekosten pro Schweißpunkt und Energiekosten pro Rohbau sind hier wie beim konventionellen Punktschweißverfahren von Aluminiumlegierungen angenommen. Die einzelnen Elektroden kosten allerdings 0,28 €. Bedeutend schlagen beim DeltaSpot die zwei Prozessbänder (69,50€) zu Buche. Pro Schweißanlage werden zwei Stück benötigt. Es errechnet sich aus 4489 Gesamtschweißpunkten und 2500 Schweißpunkten je Prozessband, ein Faktor von 1,79. Werden 2 Prozessbänder berücksichtigt pro Schweißung, ergibt sich die Zwischensumme von 248,81 €. Pro Karosserierohbau fallen 255,57 € Gesamtkosten an. Diese Variante wird in Tab. 13 detailliert.

Berechnung der Variante 2:	
kWh pro Schweißpunkt	0,02 kWh
Energiekosten pro Schweißpunkt	0,0014 €
Energiekosten pro Karosserierohbau	+ 6,28 €
Kosten der Prozessbänder pro Schweißung	139 €
Faktor – Schweißpunkte pro Karosserierohbau der Prozessbänder	1,79
Kosten mit Prozessband pro Karosserierohbau	+ 248,81 €
Einzelkosten Elektroden pro Schweißung	0,28 €
Anzahl der Elektroden pro Schweißung	2
Elektrodenkosten pro Karosserierohbau	+ 0,48 €
Gesamtkosten pro Karosserierohbau	= 255,57 €

Tab. 13: Variante 2 – DeltaSpot®, Quelle: Eigene Darstellung.

• Variante 3 – Stanznieten:

Wie Tab. 14 zeigt, wurde zunächst die Energie pro Niete kalkuliert. Die Energiekosten pro Niete betragen 0,000154 €. Die Energiekosten pro Rohbau sind dann 0,385 €. Zudem fallen die Kosten für Nieten von 100 € pro Karosserierohbau an. Das ergibt Gesamtkosten pro Karosserierohbau von 100,39 €.

Berechnung der Variante 3:	
kWh pro Nietung	0,002 kWh
Energiekosten pro Nietung	0,000154 €
Energiekosten pro Karosserierohbau	+ 0,385 €
Kosten für Nieten pro Karosserierohbau	+ 100 €
Gesamtkosten pro Karosserierohbau	= 100,39 €

Tab. 14: Variante 3 – Stanznieten, Quelle: Eigene Darstellung.

• Gesamtbeurteilung der 3 Varianten:

Die Variante DeltaSpot[®] kostet also 255,57 € pro Karosserierohbau für das Fügeverfahren. Das Stanznieten liegt im Vergleich bei 100,39 € im mittleren Beurteilungsfeld. Das konventionelle Verfahren DeltaCon 320 ist mit 8,58 € deutlich am günstigsten, wobei gegenüber dem DeltaSpot[®] die Fügekosten um etwa das 29-fache und beim Stanznieten das 12-fache eingespart werden können.

7 BEWERTUNG DER RELEVANTEN VERFAHREN

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Verfahren DeltaSpot[®] und DeltaCon 320 nach speziellen Anforderungen experimentell überprüft und, sofern relevant, einer Kostenbewertung unterworfen. Das Verfahren von Elmatech GmbH wurde aufgrund der schwachen Performance vorab ausgeschieden.

Die folgenden Resultate dienen der finalen Auswahl des relevanten Verfahrens für das Unternehmen. Die Tab. 15 zeigt zunächst eine Übersicht über die Gesamtbeurteilung. Hier wurden die Kriterien vom Kapitel 5.1 herangezogen. Einzelne Beurteilungen sind je nach Kriterium mit Sehr gut (100 - 90%), Gut (89 - 70%), Befriedigend (69 - 50%), Genügend (49 - 20%) und Nicht genügend (19 - 0%) gewertet.

Kriterien	DeltaSpot [®]	DeltaCon 320
Keine Anlegierung der Elektroden	100%	100%
Anzahl der Schweißpunkte	100%	100%
Kein Prozessband	0%	100%
Fügbarkeit von Aluminium	100%	100%
Schweißpunktqualität	90%	80%
Elektrodenkappen – DIN EN ISO 5182	100%	100%
Kombination mit Klebstoff	90%	90%
Umsetzbarkeit Flanschbreiten < 15mm	50%	50%
Investitionskosten u. Kosten der Fügeverbindung	0%	100%
GESAMTBEURTEILUNG:	Gut	Sehr gut

Tab. 15: Gesamtbeurteilung der Verfahren DeltaSpot® und DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Verfahren DeltaSpot[®] ist ein etabliertes Komplettsystem für Alumininiumpunktschweißen, das zunächst in Bezug auf Schweißpunktqualität (mind. Punktdurchmesser, Schweißpunktfestigkeit, geringe Unregelmäßigkeiten im Werkstoffgefüge und Schweißprozessstabilität) technologische Vorteile gegenüber den anderen beiden Verfahren vorweisen konnte. Doch wegen des umlaufenden Prozessbandes und der hohen Investitionskosten sowie der hohen Kosten für Fügeverbindungen ist es für den seriellen Fertigungseinsatz ungeeignet. In Bezug auf Klebstoff im Fügespalt wurden Versuche mit dem DeltaSpot[®] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Punktschweißen in Kombination mit Klebstoff für Aluminiumlegierung grundsätzlich sich für den Einsatz in der Fahrzeugproduktion eignet. Doch sind unterschiedliche Legierungen, Parametereinstellungen und Oberflächenvorbehandlungen (z.B. TiZr-Passivierung) noch vor einer abschließenden Entscheidung zu untersuchen.

Das Verfahren DeltaCon 320, eine neue Entwicklung der Fronius International GmbH, ist speziell für konventionelle Punktschweißanwendung ohne Prozessband entwickelt. In den praktischen Versuchen ließ sich nach einer Optimierung der Elektrodenkappen durch Anschleifen mittels Schleifpapier die geforderte Zielvorgabe von 30 bis 50 Schweißpunkten vor Kappenfräsen erreichen, weil in dieser Zeit signifikante Anlegierungen der Elektroden beim Schweißen unterblieben. Die Abweichung der Schweißpunktqualität

(Werkstoffoberfläche, Festigkeit, Unregelmäßigkeiten, etc.) gegenüber dem DeltaSpot[®] lässt sich mit der fehlenden adaptiven Schweißsteuerung hinsichtlich Prozessüberwachung und Nachkonditionierung im Storm-Kraftprofil begründen. Hier zeigt sich, dass die Parametereinstellungen beim Punktschweißen von Aluminiumlegierungen wesentlich zur Reproduzierbarkeit der einzelnen Schweißpunkte beitragen. Die Kostenbewertung ergab für das DeltaCon 320 deutliche Vorteile gegenüber dem DeltaSpot[®].

Beide Verfahren – DeltaSpot[®] und DeltaCon 320 – haben die Anforderungen für Standardelektroden (DIN EN ISO 5182) erfüllt. Ebenso wurde die mögliche Fügbarkeit der einzelnen Verfahren von Aluminiumlegierungen EN AW-6xxx in dieser Masterarbeit bestätigt. Die Umsetzbarkeit von mind. Flanschbreiten 15 mm ließ sich hingegen mit keinem der hier gezeigten Verfahren erreichen. Das liegt an den erforderlichen hohen Elektrodenkräften und Schweißströmen. Hier wird eine Kompromisslösung für zukünftige Fahrzeugprojekte zu entwickeln sein.

Insgesamt ist das Verfahren DeltaCon 320 in konzeptioneller Hinsicht für den Einsatz in der Fahrzeugproduktion zu empfehlen. Eine Absicherung im Technikum hinsichtlich Taktzeit und Störgrößenermittlung ist in den nächsten Schritten erforderlich.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Masterarbeit prüfte die Eignung mehrerer Widerstandspunktschweißverfahren für Aluminiumlegierungen. Die Betrachtung des Punktschweißens erforderte zunächst die Kenntnisnahme der einschlägigen Fachliteratur. Deshalb schildert der theoretische Teil die relevanten Grundlagen der Widerstandspunktschweißtechnik von Aluminiumlegierungen. Zudem wurden wesentliche Aspekte für die praktische Umsetzung ausgearbeitet. Beim Widerstandspunktschweißen sind die Anforderungen in Bezug auf Werkstoffeigenschaften, Elektrodenstandmenge, Schweißparameter und die Schweißbewertung zu erfüllen.

Im praktischen Teil wurden zunächst die vorhandenen Technologien für das Punktschweißen von Aluminium ermittelt. Die Umsetzung erfolgte nach Diskussion der potenziellen und am Markt verfügbaren Verfahren für die industrielle Anwendung. Anschließend ergab die Analyse mittels einer Bewertungsmatrix, dass die Technologien DeltaSpot[®], DeltaCon 320 und die Prototypenzange von Elmatech in einer weiteren Phase im Fügetechnikzentrum untersucht werden sollten. Die wesentlichen visuellen und mechanischen Prüfungen wurden praktisch durchgeführt. Das DeltaCon 320-Verfahren brachte dabei gute mechanische Ergebnisse und erfüllte die notwendigen Anforderungen wie etwa geringe Anlegierungsneigung am Grundwerkstoff ohne Prozessband. Obwohl das DeltaSpot[®] technologische Vorteile erzielte, fiel es wegen des umlaufenden Prozessbandes und der hohen Investitionskosten hier durch. Die Prototypenzange von Elmatech muss noch hinsichtlich Punktschweißqualität optimiert werden. Deshalb wird der Einsatz des DeltaCon 320 der Fronius International GmbH in der Fahrzeugproduktion für das Unternehmen empfohlen.

Zudem wurden alternative Kaltfügeverfahren im Karosserierohbau gesucht. Eine Nutzwertanalyse bewertete drei mögliche mechanische Verfahren. Das Stanznieten erwies sich dabei als das am besten geeignete. Eine Scherzugprüfung (quasistatisch) ermöglichte es, das Punktschweißen mit dem Stanznieten zu vergleichen. Sie ergab, dass die maximalen Zugkräfte der Schweißpunkte den Nietpunkten in puncto Festigkeit überlegen sind.

Ebenfalls hat die Arbeit eine ausgewählte hochfeste Aluminiumlegierung (EN AW-7025) mit Punktschweißklebungen durch einen wärmeaushärtenden Epoxid-Klebstoff analysiert. Danach wurden die Materialproben nach dem Lackierprozess von MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG betrachtet. Ein Vergleich der Ergebnisse mit der bisher angewandten Sichtprüfung und dem Scherzugversuch zeigte, dass die Legierung EN AW-7025 mit Betamate 4601 zuverlässige Werte liefert und ein Strom-Kraftprofil (Vorimpuls) wesentlich für den Klebstoff im Fügespalt ist.

Im letzten Teil der Arbeit wurden die Verfahren DeltaSpot[®], DeltaCon 320 und Stanznieten verglichen. Es zeigte sich, dass das DeltaCon 320 im seriellen Einsatz in der Fahrzeugproduktion wirtschaftlich eingesetzt und die Fügekosten gegenüber DeltaSpot[®] um das 29-fache gesenkt werden können.

In Zukunft ist eine weitere Untersuchung im Technikum (Störgrößenermittlung, Taktzeit, etc.) am potenziellen Verfahren DeltaCon 320 notwendig, um die Prozesssicherheit in der Fahrzeugproduktion weiter zu überprüfen. Darüber hinaus sind zusätzliche anwendungsnahe Materialdickenkombinationen, unterschiedliche Legierungstypen und Klebstoffvarianten für den Einsatz in Serie zu evaluieren. Außerdem wird eine geplante Integration einer adaptiven Schweißsteuerung in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Fronius International GmbH fokussiert. Alternativ wird eine kombinierte Schweißanlage

mittels der Schweißzange von Nimak GmbH (MagneticDrive) und der adaptiven Schweißsteuerung von Harms & Wende GmbH & Co KG im Projekt Join Tec geplant.

Diese Masterarbeit liefert wesentliche Erkenntnisse für das Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen in der Fahrzeugproduktion bei der MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG und trägt so auch zum künftigen technologischen und wirtschaftlichen Erfolg sowie der Wettbewerbsfähigkeit dieses Unternehmens bei. Zudem ist das Widerstandspunktschweißverfahren von Aluminiumlegierungen als Schlüsseltechnologie zur Realisierung neuer Fahrzeugkonzepte in der Automobilindustrie bestätigt worden.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (14)

Bosch Rexroth (2017): Bosch Rexroth Schweißsteuerungssysteme, Elchingen

Dilthey, Ulrich (2006): Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, 3. Auflage, Deutschland, Aachen

Fahrenwaldt, Hans; Schuler, Volkmar; Twrdek, Jürgen (2014): *Praxiswissen Schweißtechnik*, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland

Friedrich, Horst (Hrsg.) (2013): *Vgl. Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Stuttgart

Fronius International GmbH (2017): Fronius Aluminium Spot Welding, Fronius International GmbH, Wels

Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst (2005): *Produktion und Logistik*, 6. Auflage, Springer-Lehrbuch, Berlin

Harms+Wende (2017): Aluminiumpunktschweißen mit AluModeForce und Genius HWI, Hamburg

Henning, Frank; Moeller, Elvira (2011): *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Carl Hanser, München

Kammer, Dr. (2014): Aluminium Taschenbuch 3, 17 Auflage, Beuth, Berlin

Matthes, Klaus-Jürgen; Schneider, Werner (2016): *Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*, München

Muhs, Dieter; Wittel, Herbert; Jannasch, Dieter; Voßiek, Joachim (2007): *Roloff /Matek Maschinenelemente*, 18. Auflage, Vieweg, Braunschweig, Reutlingen, Augsburg

Ostermann, Friedrich (2014): *Anwendungstechnologie Aluminium*, 3. Auflage, Springer Vieweg, Meckenheim

Ostermann, Friedrich (1992): Aluminium-Werkstofftechnik für den Automobilbau: Anwendungstechnische Grundlagen und Fallbeispiele, expert Verlag, Meckenheim

Ruge, Jürgen; Wohlfahrt, Helmut (2013): *Technologie der Werkstoffe*, 9. Auflage, Springer Vieweg, Waldbronn, Deutschland

Online-Quellen (17)

AluReport (2017): *amag* https://www.amag.at/fileadmin/user_upload/amag/Downloads/AluReport/DE/AR-2013-1-DE-AluReport_1_13_DE_S16---19.pdf [Stand: 02.12.2017]

ams (2017): *automotivemanufacturingsolutions* https://automotivemanufacturingsolutions.com/technology/cooling-the-cost-of-welding [Stand: 02.12.2017] arnold-fastening (2017): arnold-fastening https://www.arnold-fastening.com/de/fasteners/fuegen-von-blechen/fliesslochformen.html [Stand: 02.12.2017] Birch, Stuart (2017): SAE International http://articles.sae.org/15364/ [Stand: 02.12.2017] Fronius International GmbH (2017): Fronius International GmbH https://www.fronius.com/dech/switzerland/schweisstechnik/produkte/roboterschwei%C3%9Fen/widerstandspunktschwei%C3%9Fen/ deltacon/deltacon [Stand: 02.12.2017] Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2016): Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V http://www.aluinfo.de/ [Stand: 02.12.2017] Günther+Schramm (2017): Günther+Schramm http://www.gs-stahl.de/files/datasheets [Stand: 02.12.2017] harms-wende (2017): harms-wende https://www.harms-wende.de/wissen/widerstandsschweissen/ [Stand: 02.12.2017] Jaguar (2017): Jaguar https://www.jaguar.com/about-jaguar/concept-cars/index.html [Stand: 02.12.2017] KYOKUTOH Europe GmBH (2017): KYOKUTOH Europe GmBH https://www.youtube.com/watch?v=920o-IWR1n4 [Stand: 02.12.2017] L. Han (2006): researchgate https://www.researchgate.net/publication/228691768 [Stand: 02.12.2017] NIMAK GmbH (2017): NIMAK GmbH https://www.nimak.de/de/innovationen/magneticdrive/ [Stand: 02.12.2017] oelcheck (2017): oelcheck https://de.oelcheck.com/fileadmin/user_upload/img/stories_of_oil/industrieanlagen/KUKA_-_All_that_moves_in_automation/kuka-alles-was-sich-in-der-automatisierung-bewegt.jpg [Stand: 02.12.2017] Pfeiffer, Juliana (2012): konstruktionspraxis http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/aluminium-ist-mit-konventionellem-widerstandspunktschweissen-nur-eingeschraenkt-fuegbar-georg-fischer-automotive-hat-in-deltaspot-eine-alternativegefunden-a-364372/index2.html [Stand: 02.12.2017] Rathert, Jörg (2017): RWTH AACHEN UNIVERSITY http://slideplayer.org/slide/10207792/ [Stand: 02.12.2017] Rime GmbH (2017): Rime https://www.rime.de/schweissen/punktschweissen/ [Stand: 02.12.2017] Werkstoff-Forschung, DLF (2017): http://www.dlr.de/wf/Desktopdefault.aspx/tabid-2132/2294 read-3738/ [Stand: 02.12.2017]

Normen (9)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2015): DIN EN ISO 10447-05: Widerstandsschweißen -Prüfung von Schweißverbindungen - Schäl- und Meißelprüfung von Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2001): *DIN EN ISO 13018-07: Zerstörungsfreie Prüfung - Sichtprüfung - Allgemeine Grundlagen*

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2016): DIN EN ISO 14273-03: Widerstandsschweißen -Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen - Probenmaße und Verfahren für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2013): DIN EN ISO 17639-12: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen - Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen von

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2007): DIN EN ISO 18595-12: Widerstandsschweißen -Punktschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen - Schweißeignung, Schweißen und Prüfungen

VERFAHREN, DVS (Hrsg.) (2014): DVS 2916-1: , Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen;

DVS – DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEISSEN UND VERWANDTE VERFAHREN (Hrsg.) (2009): DVS 2916-2: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen Schwingfestigkeitsprüfung,;

DVS – DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEISSEN UND VERWANDTE VERFAHREN (Hrsg.) (2009): DVS 2916-4: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen Metallografische Prüfung

MAGNA Werkstofftechnik (Hrsg.) (2012): Werkstofftechnik: Arbeitsanweisung - Sichtprüfung

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Fügetechnologien am Beispiel des Audi A8 – Karosserierohbau, Quelle: SAE International, Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 2: Unterschiedliche Knet- und Gusslegierungen, Quelle: Henning/Moeller (2011), S. 226 3
Abb. 3: Zustandsbezeichnungen, Quelle: Henning/Moeller (2011), S. 228 (leicht modifiziert) 5
Abb. 4: Einteilung der Widerstandspunktschweißverfahren, Quelle: Fahrenwaldt/Schuler/Twrdek (2014), S. 100
Abb. 5: Einflussgrößen beim Punktschweißen, Quelle: Kammer (2014), S. 222 (leicht modifiziert) 8
Abb. 6: Prinzip des Widerstandspunktschweißens, Quelle: Kammer (2014), S. 221
Abb. 7: Wärmebilanz beim Punktschweißen, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 324 10
Abb. 8: Kontakt- und Materialwiderstände beim Punktschweißen, Quelle: Ostermann (2014), S. 633 11
Abb. 9: Roboterschweißzange powerGUN für Aluminiumanwendungen, Quelle: NIMAK GmbH (2017), Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 10: Schematischer Verlauf von Elektrodenkraft, Schweißstrom und Schweißzeit, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 344
Abb. 11: Peltier-Effekt beim Gleichstromschweißen von Aluminiumlegierungen, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 637
Abb. 12: Beispiel eines Strom-Kraftprogrammes, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 347 (leicht modifiziert)
Abb. 13: Fertigungsbedingte- und konstruktive Fehler, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 346 (leicht modifiziert)
Abb. 14: Anlegierung von Aluminium an der Kupferelektrode, Quelle: Fronius International GmbH (2017), S. 9
Abb. 15: Zwischenreinigung der Elektroden mittels Bürsten, Quelle: Ostermann (2014), S. 635 19
Abb. 16: Automatische Kappenfräser, Quelle: KYOKUTOH Europe GmbH (2017), Online-Quelle: [02.12.2017]
Abb. 17: Wachstum Oxidschicht, Quelle: Rathert (2017), Online-Quelle [02.12.2017] (leicht modifiziert).21
Abb. 18: Einfluss von mechanischen und chemischen Oberflächenvorbehandlungen auf die Scherzugkraft – Legierung AlSi1MgMn- T6, Blechdicke 2 mm, Elektrodenkraft 8 kN und Elektrodenradius 300 mm, Quelle: Ostermann (2014), S. 634
Abb. 19: Beanspruchungsarten beim Punktschweißen, Quelle: Muhs/Wittel/Jannasch/Voßiek (2007), S. 145 (leicht modifiziert)

Abb. 20: Beispiel für den Einfluss des Punktdurchmessers auf die Scherzugfestigkeit, Quelle: Ostermann (2014), S. 640.
Abb. 21: Strom und Elektrodenkraft für eine vorbehandelte (EN AW-5754) Oberfläche, Quelle: Kammer (2014), S. 235
Abb. 22: Typische Schweißbarkeitskurven, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 13. (leicht modifiziert)
Abb. 23: Meißelprüfung an Punktschweißverbindungen, Quelle: DIN EN ISO 10447-05 (2015), S. 6 26
Abb. 24: Manuelle und mechanisierte Schälprüfung an Punktschweißverbindungen, Quelle: DIN EN ISO 10447-05 (2015), S. 6
Abb. 25: Beispiel einer Einzelpunktprobe bei der Scherzugprüfung, Quelle: DIN EN ISO 14273-03 (2016), S. 7. (leicht modifiziert)
Abb. 26: Makroschliffbild einer Schweißlinse ohne Unregelmäßigkeiten im Gefüge, Quelle: Harms & Wende, S. 5
Abb. 27: Messen des Punktdurchmessers, Quelle: DIN EN ISO 10447-05 (2015), S. 13. (leicht modifiziert)
Abb. 28: Schweißfestigkeit – Anhaltswerte für Bauteilauslegungen, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 11
Abb. 29: "Roadmap" für die Technologieuntersuchung, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 30: Prinzip – Kontakt- und Stoffwiderstände des DeltaSpot [®] -Verfahrens, Quelle: Matthes/Schneider (2016), S. 337
Abb. 31: DeltaSpot [®] – Roboterschweißzange, Quelle: Fronius International GmbH (2017), Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 32: Fronius – DeltaCon C320 Schweißzange, Quelle: Fronius International GmbH (2017), Online- Quelle [02.12.2017]
Abb. 33: Elmatech – Prototypenzange in einem ersten Versuchsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung 37
Abb. 34: Prinzip – Nimak Technologie MagneticDrive, Quelle: Nimak GmbH (leicht modifiziert)
Abb. 35: Roboterschweißzangen in der Fahrzeugproduktion, Quelle: oelcheck (2017), Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 36: Flachprobe in Anlehnung nach Merkblatt DVS 2916-2, Quelle: Eigene Darstellung 40
Abb. 37: Anwendung des Abrolldorns (DIN EN ISO 10447), Quelle: DVS 2916-1 (2014), S. 2 41
Abb. 38: Beanspruchung im Scherzug (links) und Kraft-Verlängerungsdiagramm (rechts), Quelle: DVS 2916-1 (2014), S. 6
Abb. 39: Versagensarten bei Scherzugproben, Quelle: DVS 2916-1 (2014), S. 6

Abb. 40: Größe zum Erfassen von Form und Ausdehnung einer Punktschweißverbindung, Quelle: DVS 2916-4 (2009), S. 2
Abb. 41: Hydropulsmaschine ZWICK HB 50 kN, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 42: Schwingfestigkeitsprüfung – Prüfaufbau in Detailansicht, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 43: Widerstandspunktschweißen mit Prozessband – DeltaSpot [®] , Quelle: ams (2017), Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 44: Strom-Kraftprofil der Blechpaarung <i>s</i> = 1,5 mm – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung 47
Abb. 45: Sichtprüfung an der Flachprobe Nr. 1 – DeltaSpot®, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 46: Schälprüfung der Blechpaarungen <i>s</i> = 1,5 mm (links) und <i>s</i> = 2,0 mm (rechts) – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 47: Scherzugprüfung – Blechpaarung 1,5 mm und 2,0 mm – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 48: Schliff Nr. 1 (links) und Nr. 2 (rechts) der Blechpaarung s = 1,5 mm – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 49: Schweißlinsendurchmesser über Standzeitversuch – Blechpaarung 2 mm – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 50: Schwingfestigkeitsprüfung (Wöhlerkurve) – Vergleich der Blechpaarungen 1,5 und 2,0 mm – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 51: Widerstandspunktschweißen ohne Prozessband, Quelle: harms-wende (2017), Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 52: 2,0 mm Blechpaarung – Parametereinstellung Strom/Kraft – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 53: Elektrodeneindruck der Flachprobe Nr. 1 – Blechpaarung 2 mm – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 54: Ergebnis Scherzugprüfung – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 55: Bruchfläche der Flachproben Nr. 3 und Nr. 4 – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung 55
Abb. 56: Ausknöpfbutzen am Beispiel des Schweißpunktes Nr. 5 – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 57: Rissbildung (rot eingerahmt) an der Flachprobe Nr. 1 – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 58: Schweißlinsendurchmesser über Standzeitversuch – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung. 59
Abb. 59: Schwingfestigkeitsprüfung – Vergleich der Blechpaarungen 1,5 und 2mm – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 60: Detailansicht Schwingprobe Nr. 11 (links) und Nr. 13 (rechts) - 1,5mm – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 61: Elektrodenoberflächen vor (links) und nach dem Schweißprozess (rechts) – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 62: Elektrode (Kathode) vor der Schweißung – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung 62
Abb. 63: 2,0 mm Blechpaarung – Parametereinstellung Strom/Kraft – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 64: Flachprobe Nr. 1 – Kathode (links) und Anode (rechts) – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung. 63
Abb. 65: Scherzugprüfung – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 66: Schliff S3 – Detailansicht der "Probennester" – Elmatech, Quelle: Eigene Darstellung 64
Abb. 67: Parametereinstellung – EN AW-7075 T6, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 68: Sichtprüfung – Schweißproben EN AW-7075 T6 (ohne Warmlagerung) mit Betamate 4601, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 69: Kaltfügeverfahren im Automobilkarosseriebau, Quelle: Fronius International GmbH (2017), S. 2.
Abb. 70: Arbeitsablauf beim Halbhohl-Stanznieten, Quelle: Ostermann (2014), S. 657
Abb. 71: Verfahrensablauf Durchsetzfügen, Quelle: Ostermann (2014), S. 653
Abb. 72: Prinzip des Verfahrensablaufes einer FDS – Verbindung, Quelle: arnold-fastening (2017), Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 73: Tucker-Anlagentechnik für mechanisches Fügen (Stanznieten), Quelle: Eigene Darstellung 73
Abb. 74: Kraft-Weg-Diagramm – Stanznieten mit Halbhohlnieten im Vergleich zu Punktschweißen - DeltaSpot, Quelle: Eigene Darstellung
Abb. 75: Jaguar Modell E-PACE, Quelle: Jaguar, Online-Quelle [02.12.2017]
Abb. 76: Aluminiumlegierungen für den Automobilbau der Gruppe EN AW-6xxx, Quelle: Henning/Moeller (2011), S. 235
Abb. 77: Physikalische Eigenschaften von Aluminium – Teil 1, Quelle: Kammer (2014), S. 223
Abb. 78: Physikalische Eigenschaften von Aluminium – Teil 2, Quelle: Kammer (2014), S. 224
Abb. 79: Nachsetzverhalten – empfohlene Abstände am Werkstück, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 9
Abb. 80: Auswahl geeigneter Beizmittel, Quelle: Kammer (2014), S. 226
Abb. 81: Schweißbrucharten beim Ausknöpfen, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 7
Abb. 82: Datenblatt EN AW-6016 T4 – Teil 1, Quelle: Friedrich (Hrsg.) (2013), S. 280

Abb. 83: Datenblatt EN AW-6016 T4 – Teil 2, Quelle: Friedrich (Hrsg.) (2013), S. 281	8
Abb. 84: Erklärung zu den verwendeten Schwingungsbegriffen, Quelle: Eigene Darstellung	9
Abb. 85: EN AW-6082 T6 – 1,5mm Blechpaarung – Übersicht aller 35 Schweißproben, Quelle: Eigene Darstellung	00
Abb. 86: EN AW-6082 T6 – 2,0 mm Blechpaarung – Übersicht aller 35 Schweißproben, Quelle: Eigene Darstellung	00
Abb. 87: Metallografische Untersuchungen – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung 10)1
Abb. 88: Metallografische Untersuchungen – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung 10)1
Abb. 89: Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung 10)4
Abb. 90: Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung 10)4
Abb. 91: Übersicht der Schweißproben, Quelle: Eigene Darstellung)5
Abb. 92: Elektrodenstandzeitversuch nach Optimierung – Flachprobe Nr. 1, Quelle: Eigene Darstellung.)5
Abb. 93: Elektrodenstandzeitversuch nach Optimierung – Flachprobe Nr. 30, Quelle: Eigene Darstellung. 10)5
Abb. 94: Bruchflächen der einzelnen Flachproben, Quelle: Eigene Darstellung)6
Abb. 95: Metallographische Untersuchungen, Quelle: Eigene Darstellung)7
Abb. 96: Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung	0
Abb. 97: Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung	0
Abb. 98: Übersicht der Schweißproben der EN AW-6082 T6 – 1,5 mm Blechpaarung, Quelle: Eigene Darstellung	1
Abb. 99: Sichtprüfung nach ersten Schweißversuchen - Blechparrung 1,5mm, Quelle: Eigene Darstellung	g. 1
Abb. 100: Metallographische Untersuchungen nach ersten Schweißversuchen, Quelle: Eigene Darstellung	2

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Besonderheiten beim Punktschweißen von Aluminiumlegierungen, Quelle: Bosch Rexroth (2017),S. 11 (leicht modifiziert).6
Tab. 2: Übersicht der Anforderungen an die Technologie in Bezug auf die Priorität, Quelle: Eigene Darstellung. 32
Tab. 3: Vorauswahl der Anbieter und Technologien, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 4: Auswahl relevanter Technologien für die Untersuchungen, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 5: Metallographische Ergebnisse – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung. 50
Tab. 6: Elektrodenstandzeitversuch – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 7: Ergebnisse der metallographischen Prüfung – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung 58
Tab. 8: Punktschweißkleben EN AW-7075 T6 mit Betamate 4601, Quelle: Eigene Darstellung 66
Tab. 9: Nutzwertanalyse, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 10: Nutzwertanalyse von Kaltfügeverfahren am Beispiel einer PKW-Karosserie im Rohbau, Quelle:Eigene Darstellung.72
Tab. 11: Ergebnisse der Zugprüfung – Stanznietverbindung und Widerstandspunktschweißung im Vergleich, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 12: Variante 1 – DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 13: Variante 2 – DeltaSpot [®] , Quelle: Eigene Darstellung. 77
Tab. 14: Variante 3 – Stanznieten, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 15: Gesamtbeurteilung der Verfahren DeltaSpot® und DeltaCon 320, Quelle: Eigene Darstellung 78
Tab. 16: Anhaltswerte – Punktschweißen von Aluminiumlegierungen, Quelle: DIN EN ISO 18595-12(2007), S. 19.93
Tab. 17: Datenblatt EN AW-6082 T6, Quelle: Günther+Schramm (2017), Online-Quelle [02.12.2017] 97
Tab. 18: Datenblatt EN AW-7075 T6, Quelle: Günther+Schramm (2017), Online-Quelle [02.12.2017] 97
Tab. 19: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 20: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 21: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung
Tab. 22: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung. 109

ANHANG 1: ALUMINIUMLEGIERUNGEN DER GRUPPE EN-AW6XXX

Legierungsbezeichnung	Zustand	Blech	Profil	Schmiede-	Anwendung
				telle	
EN AW-6016 [AI Si 1,2Mg0,4]	T4 (T6)	Х			Außenblech
AA 6014 [(AI MgSiV)]	T4 (T6)	Х			Außenblech
EN AW-6106 [AI MgSiMn]	T4 (T6)	Х			Außenblech
EN AW-6181A [AI Si1Mg0,8(A)]	T4 (T6)	Х			Innenblech
AA 6009 [Al Si0,8Mg0,6CuMn] a)	T4 (T6)	Х			Innenblech
AA 6022 [AI Si 1,3Mg0,6CuMn] a)	T4 (T6)	Х			Außenblech
AA 6111 [AI Si0,9Mg0,7CuMn] a)	T4 (T6)	Х			Außenblech
EN AW-6060 [AI MgSi]	T4/T6		Х		Strukturteile
AA 6014 [(AI MgSiV)]	T4/T6/T7		Х		Strukturteile
EN AW-6106 [Al MgSiMn]	T4/T6		Х		Strukturteile
EN AW-6005A [AI SiMg(A)]	T6		Х		Strukturteile
EN AW-6082 [Al Si1MgMn]	T6		Х	Х	Strukturteile,
					Fahrwerksteile,
					PKW-Räder
a) Karosseriebleche ausländischer Hersteller					

Abb. 76: Aluminiumlegierungen für den Automobilbau der Gruppe EN AW-6xxx, Quelle: Henning/Moeller (2011), S. 235.

Werkstoff	numerisch EN AW-	chemisch EN AW-	Elektrische Leitfähig- keit ¹⁾²⁾ m/Ω · mm ²	Wärmeleit- fähigkeit ¹⁾ W/cm · K	Mittlere spez. Wärme ¹⁾³⁾ J/g · K	Schmelz- wärme ³⁾ J/g	Schmelz- bereich/ -temp. °C	Wärmeaus- dehnungs- zahl ¹⁾ 10 ⁻⁶ /K
Aluminium			37,5	2,3	0,908	396	660	23,5
Eisen			10	0,87	0,465	272	1530	11,9
Kupfer			57	3,9	0,389	205	1083	17
Magnesium			25,6	1,7	1,034	209	650	26
Mangan			-	-	0,498	251	1250	-
Nickel			11	0,58	0,452	293	1455	13
Silizium		8	-	0,83	0,758	-	1420	-
Zink			16,5	1,08	0,389	112	419	29,0
Al99,5	1050A	Al 99,5	34 - 36	2,1 - 2,3	0,908	396	658	23,5
AlMn1	3103	Al Mn1	22 - 28	1,6 - 1,9	0,909	395	645 - 655	23,5
AlMg1	5005A	Al Mg1(C)	23 - 31	1,7 – 1,9	0,905	395	630 - 650	23,6
AlMg3	5754	Al Mg3	20 - 23	1,3 - 1,7	0,922	390	610 - 640	23,7
AlMg5	5019	Al Mg5	15 – 19	1,1 – 1,5	0,923	387	575 - 630	23,7
AlMg2Mn0,3	5251	Al Mg2	23 - 26	1,3 - 1,7	0,922	392	620 - 650	23,6
AlMg2Mn0,8	5049	Al Mg2Mn0,8	20 - 25	1,4 - 1,5	0,921	391	620 - 650	23,7
AlMg4,5Mn	5083	Al Mg4,5Mn0,7	16 - 19	1,1 - 1,2	0,922	386	575 - 640	23,7
AlMgSi0,5	6060	Al MgSi	28 - 34	1,9 - 2,1	0,908	395	585 - 650	23,4
						Forts	etzung auf der	nächsten Seite

Abb. 77: Physikalische Eigenschaften von Aluminium - Teil 1, Quelle: Kammer (2014), S. 223.

Fortsetzung Tabelle	3.28							
Werkstoff	numerisch EN AW-	chemisch EN AW-	Elektrische Leitfähig- keit ¹⁾²⁾ m/Ω · mm ²	Wärmeleit- fähigkeit ¹⁾ W/cm · K	Mittlere spez. Wärme ¹⁾³⁾ J/g · K	Schmelz- wärme ³⁾ J/g	Schmelz- bereich/ -temp. °C	Wärmeaus- dehnungs- zahl ¹⁾ 10 ⁻⁶ /K
AlMgSi1	6082	Al Si1MgMn	24 - 32	1,5 – 1,9	0,908	395	585 - 650	23,4
AlCuMg1	2017A	Al Cu4MgSi(A)	18 – 28	1,3 – 1,7	0,883	385	512 - 650	22,8
AlCuMg2	2024	Al Cu4Mg1	18 – 21	1,3 – 1,7	0,883	383	505 - 640	22,8
AlZn4,5Mg1	7020	Al Zn4,5Mg1	18 – 23	1,2 - 1,6	0,886	381	480 - 650	23,0
AlZnMgCu0,5	7022	Al Zn5Mg3Cu	18 – 22	1,3 – 1,6	0,883	375	485 - 640	23,6
AlZnMgCu1,5	7075	Al Zn5,5MgCu	18 – 22	1,3 – 1,6	0,874	372	480 - 640	23,3
Cr-Ni-Stahl 18–10			1 – 1,4	0,12 - 0,17	0,502	278	1350 – 1480	16,5
Stahl, unl.			2 - 7	0,3 - 0,6	0,482	270	1300 – 1520	11,5
Bronze (CuSn)			9	0,5 - 0,7	0,370	188	880 - 1040	17,8
Messing (CuZn)			8 – 20	0,5 - 1,5	0,389	171	880 - 1020	18,3

¹⁾ Für Temperaturbereich 20 – 100 °C. Wärmeausdehnungszahl und spezifische Wärme werden mit steigender Temperatur erhöht, die elektrische Leitfähigkeit sinkt, die Wärmeleitfähigkeit verändert sich zwischen 20 °C und Schmelztemperatur verhältnismäßig gering.

²⁾ Die Einzelwerte f
ür reine Metalle beziehen sich auf den Zustand "weichgegl
üht", bei Legierungen werden die h
öchsten Werte in weichgegl
ühten, die niedrigsten in kaltverfestigten oder ausgeh
ärteten Zust
änden erzielt.

3) Werte für Legierungen errechnet für mittlere Gehalte an Legierungsbestandteil

Abb. 78: Physikalische Eigenschaften von Aluminium - Teil 2, Quelle: Kammer (2014), S. 224.

ANHANG 3: ANHALTSWERTE – PUNKTSCHWEISSEN VON ALUMINIUM

Einzelblechdicke	Linsendurchmesser	Elekt	rode	Sch	weißparam	eter
t	dn	D un	d R	Kraft, Sc	hweißzeit u	nd Strom
mm	mm	mr	n	kN, ms und kA		
0,50	3,6	16	75	1,8	40	26
0,75	4,5	16	75	2,2	60	31
1,00	5,0	16	75	3,0	60	34
1,25	5,5	20	100	3,5	80	36
1,50	6,0	20	100	4,0	100	39
2,00	7,0	20	100	5,0	12	44
2,50	8,0	20	100	6,5	140	50
3,00	8,5	25	100	8,0	160	52

Tab. 16: Anhaltswerte – Punktschweißen von Aluminiumlegierungen, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 19.

ANHANG 4: NACHSETZVERHALTEN



Legende *d* Punktdurchmesser

Abb. 79: Nachsetzverhalten – empfohlene Abstände am Werkstück, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 9.

ANHANG 5: AUSWAHL GEEIGNETER BEIZMITTEL

Werkstoff/ Beizbehandlung ²⁾		1.1	1.4	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3	5	6.1	6.2	7	8	9
Beiztemperatur, °C	RT	RT	RT	RT	RT	RT	BT	RT	55	60	RT	25	90	
AlMgMn	R _{EB}	4,3	5,2	9,1	4,04	4,8	4,4	2,7	5,1	7,2	5,6	4,4	11,7	5,4
[-] ³⁾	tB	5	5	2	8	1	4	1	1	2	з	6	20	5
AlMgSi1	REB	4,5	5,2	4,5	4,3	3,1	2,5	3,2	2,6	8,6	6,3	5,1	7,3	3,4
[~ 6082; AlSi1MgMn] ⁴⁾ t _B	5	5	2	8	1	2	4	3	10	3	8	5	5	
AlZnMg1	R _{EB}	4,5	4,1	6,4	3,1	2,5	2,1	4,2	6,0	3,6	2,8	3,7	3,7	3,0
[-] ³⁾	t _B	5	5	4	2	6	6	4	1	5	8	10	10	3
1) REB = Widerstand Elek	ktrode –	Blech;	Balligkei	itsradius	300 m	m, Blech	ndicke 2	mm						
²⁾ Beizmittel, Konzentratio 100 g/l + NaF, 50 g/l; 4 4.3 = HNO ₃ (66 %), 91	 ¹⁷ HEB = Widerstand Elektrode – Blech; Balligkeitsradius 300 mm, Blechdicke 2 mm ²¹ Beizmittel, Konzentration: 1.1 = NaOH, 50 g/l; 1.4 = NaOH, 200 g/l; 3.1 = H₂SO₄ (95 %), 100 g/l; + NaF, 15 g/l; 3.2 = H₂SO₄ (95 %), 100 g/l + NaF, 50 g/l; 4.1 = HNO₃ (66 %), 1050 g/l + HF (40 %), 280 g/l; 4.2 = HNO₃ (66 %), 1350 g/l + HF (40 %), 23 g/l; 4.3 = HNO₂ (66 %), 91 g/l + HF (40 %), 0.5 g/l; 5 = H2SiF6 (23.5 %), 38.7 g/l; 6.1 = H₂SO₄ (95 %), 148 g/l + CrO₂ 148 g/l; 													

 $6.2 = H_2SO_4 (95\%), 100 g/l + CrO_3, 5 g/l; 7 = H_3PO_4 (85\%), 171 g/l + Butanol, 324 g/l + Propanol, 234 g/l; 8 = H_3PO_4 (85\%), 40 g/l + K_2Cr_2O_7, 0.4 g/l; 9 = H_3PO_4 (85\%), 1360 g/l + HNO_3 (66\%), 49 g/l$

3) nicht in DIN EN 573.3

4) nach DIN EN 573.3

Abb. 80: Auswahl geeigneter Beizmittel, Quelle: Kammer (2014), S. 226.

ANHANG 6: SCHWEISSBRUCHARTEN



Abb. 81: Schweißbrucharten beim Ausknöpfen, Quelle: DIN EN ISO 18595-12 (2007), S. 7.

ANHANG 7: DATENBLÄTTER

• EN AW-6082 T6:

Chemische Zusammensetzung (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb
0,7-1,3	0,50	0,10	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,20	0,10	-

-

Mechanische Eigenschaften

	Durchmesser Schlüsselweite	Zugfestigkeit Rm (N/mm²)	Streckgrenze Rp 0,2 (N/mm²)	Bruchdehnung A5 (%)	Härte (HB)
Τ 6	< 80	Min. 310	Min. 255	10	95
Τ6	< 20 20-150 150-200 200-250	Min. 295 Min. 310 Min. 280 Min. 270	250 260 240 200	8 8 6 6	95 95 95 95

Tab. 17: Datenblatt EN AW-6082 T6, Quelle: Günther+Schramm (2017), Online-Quelle [02.12.2017]

• EN AW-7075 T6:

Chemische Zusammensetzung (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ті	Pb
0,40	0,50	1,2-2,0	0,30	2,1-2,9	0,18-0,28	-	5,1-6,1	0,20	-

—

Mechanische Eigenschaften

	Durchmesser Schlüsselweite	Zugfestigkeit Rm (N/mm²)	Streckgrenze Rp 0,2 (N/mm²)	Bruchdehnung A5 (%)	Härte (HB)
Τ6	< 80	Min. 540	Min. 485	7	150
T 6510	< 25 25 - 100 100-150 150 - 200	Min. 540 Min. 560 Min. 530 Min. 470	Min. 480 Min. 500 Min, 470 Min. 400	7 7 6 5	150 150 150 150

Tab. 18: Datenblatt EN AW-7075 T6, Quelle: Günther+Schramm (2017), Online-Quelle [02.12.2017]

• EN AW-6016 T4:

Legierung	Novelis-Marken- name	Si	Fe max.	Cu max.	Mn	Mg
EN AW- 6016	Anticorodal®-121	1.0-1.5	0.5	0.2	max. 0.2	0.25-0.6

Abb. 82: Datenblatt EN AW-6016 T4 - Teil 1, Quelle: Friedrich (Hrsg.) (2013), S. 280.

Legierung	Novelis-Marken-	<i>Rp</i> _{0.2}	R _m	A ₈₀	$\begin{array}{c} Rp_{0.2} [\mathrm{MPa}] \\ \mathrm{nach} \ 2 \ \% \\ \mathrm{Kaltverfor-} \\ \mathrm{mung} + 185 \\ ^{\circ}\mathrm{C} \times 20 \ \mathrm{min} \end{array}$	Biege-
+ Zustand	name	[MPa]	[MPa]	[%]		faktor <i>f</i>
EN AW-6016 T4	Anticorodal®-121	95	205	26	140	0.5

Abb. 83: Datenblatt EN AW-6016 T4 - Teil 2, Quelle: Friedrich (Hrsg.) (2013), S. 281.

ANHANG 8: SCHWINGFESTIGKEITSÜBERPRÜFUNG – BEGRIFFE



Abb. 84: Erklärung zu den verwendeten Schwingungsbegriffen, Quelle: Eigene Darstellung.

ANHANG 9: SCHWEISSANLAGE DELTASPOT®

• Übersicht (Sichtprüfung) der Schweißproben der EN AW-6082 T6 – 1,5mm Blechpaarung:



Abb. 85: EN AW-6082 T6 – 1,5mm Blechpaarung – Übersicht aller 35 Schweißproben, Quelle: Eigene Darstellung.

- Übersicht (Sichtprüfung) der Schweißproben der EN AW-6082 T6 2,0 mm Blechpaarung:

Abb. 86: EN AW-6082 T6 – 2,0 mm Blechpaarung – Übersicht aller 35 Schweißproben, Quelle: Eigene Darstellung.

• Metallographische Untersuchungen – Blechpaarung 1,5 mm:



Abb. 87: Metallografische Untersuchungen – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung.



• Metallographische Untersuchungen – Blechpaarung 2,0 mm:

Abb. 88: Metallografische Untersuchungen – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung.
Proben Nr.	<i>F</i> _m kN	F₄kN	F _{sum} kN	Lastwechsel n
4	0,5	0,41	0,91	2.000.000
9	0,6	0,49	1,09	2.000.000
11	0,65	0,53	1,18	1.699.027
18	0,65	0,53	1,18	1.494.128
3	0,7	0,57	1,27	1.135.444
10	0,7	0,57	1,27	1.164.238
6	0,8	0,65	1,45	589.635
16	0,8	0,65	1,45	581.886
2	0,9	0,74	1,64	338.743
17	0,9	0,74	1,64	388.593
12	1,0	0,82	1,82	287.114
19	1,0	0,82	1,82	239.969
1	1,3	1,06	2,36	99.847
20	1,3	1,06	2,36	116.124
5	1,4	1,15	2,55	36.325
15	1,4	1,15	2,55	66.301
21	1,4	1,15	2,55	43.672
7	1,5	1,23	2,73	32.528
14	1,5	1,23	2,73	40.089
8	1,7	1,39	3,09	23.249
13	1,7	1,39	3,09	19.242
F _m Mittelkraft; F _a Amplitude; F _{sum} max. Kraft; nLastpielzahl				

• Schwingfestigkeitüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm:

Tab. 19: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung.

Proben Nr.	<i>F</i> _m kN	F₄kN	F _{sum} kN	Lastwechsel <i>n</i>
6	0,8	0,65	1,45	2.000.000
15	0,8	0,65	1,45	2.000.000
12	0,9	0,74	1,64	2.000.000
3	0,9	0,74	1,64	2.000.000
1	1,0	0,82	1,82	1.755.522
20	1,0	0,82	1,82	1.589.614
10	1,2	0,98	2,18	712.419
19	1,2	0,98	2,18	845.951
9	1,3	1,06	2,36	582.139
18	1,3	1,06	2,36	545.077
8	1,4	1,15	2,55	346.417
17	1,4	1,15	2,55	393.095
11	1,5	1,23	2,73	272.405
2	1,5	1,23	2,73	328.449
4	1,7	1,39	3,09	143.573
13	1,7	1,39	3,09	135.473
7	2,0	1,64	3,64	72.571
16	2,0	1,64	3,64	59.063
5	2,6	2,13	4,73	16.141
14	2,6	2,13	4,73	16.125
5 14 <i>F</i> _m	2,6 2,6 Mittelkraft: FaAmplit.	2,13 2,13 ude: F _{sum} max. F	4,73 4,73 Kraft: n…Lastpiel2	16.141 16.125 zahl

• Schwingfestigkeitüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm:

Tab. 20: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung.

• Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm:



Abb. 89: Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung.



• Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm:

Abb. 90: Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung.

ANHANG 10: SCHWEISSANLAGE DELTA CON 320

• Übersicht (Sichtprüfung) der Schweißproben der EN AW-6082 T6 – 1,5 und 2,0 mm Blechpaarung:



Abb. 91: Übersicht der Schweißproben, Quelle: Eigene Darstellung.

• Elektrodenstandzeitversuch nach Optimierung – Flachprobe Nr. 1:



Abb. 92: Elektrodenstandzeitversuch nach Optimierung – Flachprobe Nr. 1, Quelle: Eigene Darstellung.



• Elektrodenstandzeitversuch nach Optimierung – Flachprobe Nr. 30:

Abb. 93: Elektrodenstandzeitversuch nach Optimierung - Flachprobe Nr. 30, Quelle: Eigene Darstellung.

• Übersicht der einzelnen Brüchflächen:



Abb. 94: Bruchflächen der einzelnen Flachproben, Quelle: Eigene Darstellung.

• Metallographische Untersuchungen:



Abb. 95: Metallographische Untersuchungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Proben Nr.	<i>F</i> _m kN	<i>F</i> a kN	F _{sum} kN	Lastwechsel n
9	0,7	0,57	1,27	2.000.000
15	0,8	0,65	1,45	1.515.844
16	0,8	0,65	1,45	2.000.000
12	0,9	0,74	1,64	1.234.694
17	0,9	0,74	1,64	536.361
20	0,9	0,74	1,64	922.418
13	0,95	0,78	1,73	619.577
6	1	0,82	1,82	321.866
10	1	0,82	1,82	377.053
11	1,2	0,98	2,18	183.293
30	1,2	0,98	2,18	238.464
24	1,3	1,06	2,36	216.364
27	1,3	1,06	2,36	130.819
8	1,4	1,15	2,55	125.233
19	1,4	1,15	2,55	102.000
25	1,5	1,23	2,73	103.147
28	1,5	1,23	2,73	50.139
7	1,6	1,31	2,91	41.749
18	1,6	1,31	2,91	93.645
23	1,7	1,39	3,09	47.854
29	1,7	1,39	3,09	35.791
21	1,8	1,47	3,27	27.590
22	1,8	1,47	3,27	30.436
F _m Mittelkraft; F _a Amplitude; F _{sum} max. Kraft; nLastpielzahl				

• Schwingfestigkeitüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm:

Tab. 21: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung.

Proben Nr.	<i>F</i> _m kN	F₄kN	F _{sum} kN	Lastwechsel n
13	0,9	0,74	1,64	2.000.000
27	0,9	0,74	1,64	2.000.000
19	0,95	0,78	1,73	2.000.000
7	1	0,82	1,82	1.372.250
12	1	0,82	1,82	1.681.983
26	1	0,82	1,82	1.516.632
8	1,2	0,98	2,18	1.603.085
15	1,3	1,06	2,36	1.476.339
25	1,3	1,06	2,36	899.488
16	1,4	1,15	2,55	997.481
17	1,4	1,15	2,55	570.041
14	1,5	1,23	2,73	494.538
24	1,5	1,23	2,73	500.073
18	1,7	1,39	3,09	488.089
20	1,7	1,39	3,09	289.993
32	1,7	1,39	3,09	193.280
9	2	1,64	3,64	101.821
23	2	1,64	3,64	197.338
30	2	1,64	3,64	91.720
10	2,2	1,80	4,00	74.482
22	2,2	1,80	4,00	89.248
11	2,4	1,96	4,36	52.060
21	2,4	1,96	4,36	43.557
28	2,6	2,13	4,73	28.886
29	2,6	2,13	4,73	28.316
F _m Mittelkraft; F _a Amplitude; F _{sum} max. Kraft; nLastpielzahl				

• Schwingfestigkeitüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm:

Tab. 22: Ergebnis der Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung.

• Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm:





Abb. 96: Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 1,5 mm, Quelle: Eigene Darstellung.



• Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm:

Abb. 97: Sichtprüfung nach Schwingfestigkeitsüberprüfung – Blechpaarung 2,0 mm, Quelle: Eigene Darstellung.

ANHANG 11: SCHWEISSANLAGE ELMATECH – PROTOTYPANLAGE

• Übersicht (Sichtprüfung) der Schweißproben der EN AW-6082 T6 – 1,5 mm Blechpaarung:



Abb. 98: Übersicht der Schweißproben der EN AW-6082 T6 – 1,5 mm Blechpaarung, Quelle: Eigene Darstellung.

• Sichtprüfung nach erste Schweißversuche – Blechpaarung 1,5 mm:



Abb. 99: Sichtprüfung nach ersten Schweißversuchen - Blechparrung 1,5mm, Quelle: Eigene Darstellung.

- S1 1.51 mm 2.54 mm 1.51 mm 1.51 mm 1.51 mm 1.51 mm 1.51 mm 2.54 mm 1.51 mm 1.51 mm 1.51 mm 2.54 mm 1.51 mm 1.51 mm 2.54 mm 1.51 mm
- Metallographische Untersuchung nach erste Schweißversuche Blechpaarung 1,5 mm:

Abb. 100: Metallographische Untersuchungen nach ersten Schweißversuchen, Quelle: Eigene Darstellung.