

Bericht 5132/2004

AiF-Nr. 13.362 N

DVS-Nr. 5.028

Bolzenschweißen an beschichteten Blechen im Vergleich

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der SLV München, NL der GSI mbH, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München.

Der Bericht enthält 104 Seiten.

November 2004

SLV München,

/ IV

Niederlassung der GSI mbH

Name der Forschungsstelle(n)

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

13.362

01.08.2002 bis 31.07.2004

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum: 01.08.2002 bis 31.07.2004

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema: Bolzenschweißen an beschichteten Blechen im Vergleich

München, 30.11.2004

Ort, Datum

Dr.-Ing. Heidi Cramer

Unterschrift des Projektleiters

Zusammenfassung

Die zunehmende Verwendung beschichteter Stahlbleche setzt die weitere wirtschaftliche Nutzung etablierter Fügeverfahren wie das Bolzenschweißen voraus. Wachsende Anforderungen an die Beschichtungstechnik betreffen den klassischen Korrosionsschutz eines unlegierten Stahlbleches, aber auch oberflächenveredelte Endprodukte, die ohne sekundäre Nachbehandlung eingesetzt werden. Als Befestigungsverfahren bieten sich vor allem das Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung und das Spitzenzündungsbolzenschweißen sowie alternativ das Reibbolzenschweißen an. Die Vielfalt der Beschichtungen führt bei der praktischen Anwendung dieser Verfahren häufig zu Qualitätseinbußen durch erhebliche Schweißfehler.

In dieser Arbeit werden die Anwendungsmöglichkeiten und die Verfahrensgrenzen der Bolzenschweißtechnik beim Einsatz an z.B. verzinkten Blechen der Dicke 0,8 bis 3,3 mm ohne vorhergehende mechanische Entfernung der Zinkschicht ermittelt. Dazu werden Bolzen aus S235 mit Durchmesser M6 und M8 an gebräuchlichen unlegierten Stahlblechen (DCO4, DX54, DX55, S235) mit variierenden Beschichtungen der Qualitäten Z, ZE, AS und OC sowie an primerbeschichteten Blechen angeschweißt. Die dünneren Bleche (bis 2 mm) weisen eine dünne Beschichtung (Z, ZE, AS, OC) bis maximal 20 µm Schichtdicke auf. An dickeren Blechen wird eine dickere Beschichtung Z bis 100 µm untersucht.

Mit allen untersuchten Bolzenschweißverfahren lassen sich nach einer beschichtungsspezifischen Optimierung der Schweißparameter sehr fehlerarme, hoch belastbare Schweißungen mit Bruchlage außerhalb der Schweißzone an den erprobten Beschichtungssystemen erstellen. Die Schweißungen erfüllen die baurechtliche Vorgaben der DIN EN ISO 14555 für Bolzenschweißungen z.B. im Rahmen von Verfahrensprüfungen. Das Verschweißen des Bolzens mit dem Blech setzt die örtliche Beseitigung der Beschichtung durch die jeweils verwendete Wärmequelle Lichtbogen oder Reibungskraft an der Schweißstelle voraus. Dies führt bei den Lichtbogenverfahren zu zusätzliche Emissionen in Form von Schweißrauch und Spritzern.

Das Kurzzeitbolzenschweißen ist an feuerverzinkten Blechen mit Schichtdicken bis 100 µm schweißzeitabhängig möglich. Beim Spitzenzündungsverfahren werden mit der Kontaktvariante an beschichteten Blechen bis maximal 20 µm Schichtdicke sehr gute Schweißergebnisse erzielt. Beim Reibbolzenschweißen zeigte sich keine Verfahrensgrenze für Beschichtungen aller Art über 100 µm hinaus.

Gefüge-, REM und EMA-Untersuchungen der Schweiß- und Wärmeeinflußzonen zeigen keine Besonderheiten, die auf einen Einfluss von Zink oder anderer Beschichtungselemente bei optimierten Schweißungen hinweisen. Mit diesen Untersuchungen wurde der Nachweis der vollständigen Beseitigung unterschiedlicher Beschichtungen nach Art und Dicke bei Anwendung von kurzzeitigen Bolzenschweißverfahren mittels Lichtbogen oder Reibung erbracht.

Eine sehr gute Wiederholbarkeit aller Bolzenschweißverfahren ist anhand von Serienschweißungen ermittelt. Die Mittelwerte der erreichten Bruchlasten variieren verfahrensabhängig bei Variationskoeffizienten von ca. 5 %.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Bolzenschweißen an beschichteten Blechen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorgehensweise	3
3	Stand der Technik / Theorie	4
3.1	Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung /11 bis 23/.....	4
3.2	Bolzenschweißen mit Spitzenzündung /24 bis 29/	5
3.3	Reibbolzenschweißen /30 bis 36/	6
4	Experimentelle Randbedingungen	7
4.1	Gerätetechnik.....	7
4.1.1	Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung.....	7
4.1.2	Bolzenschweißen mit Spitzenzündung	7
4.1.3	Reibbolzenschweißen	7
4.2	Versuchsdurchführung.....	8
4.2.1	Lichtbogenbolzenschweißen	8
4.2.2	Reibschweißen	8
4.3	Werkstoffe und Probenabmessungen.....	8
4.4	Messtechnik.....	9
4.4.1	Kurzzeitbolzenschweißen.....	9
4.4.2	Bolzenschweißen mit Spitzenzündung	9
4.4.3	Reibschweißen	9
4.5	Prüfung der Verbindungen	10
5	Ergebnisse	12
5.1	Analyse der Schweißprozesse.....	12
5.1.1	Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung (DS, ISO 4063 - 784)	12
5.1.2	Bolzenschweißen mit Spitzenzündung (TS, ISO 4063 - 786).....	14
5.1.3	Reibbolzenschweißen (ISO 4063 - 788).....	15
5.1.4	Zusammenfassung	16

5.2	Verfahrenstechnische Optimierung der Schweiß- und Randbedingungen.....	17
5.2.1	Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung (DS, ISO 4063 - 784)	17
5.2.2	Bolzenschweißen mit Spitzenzündung (TS, ISO 4063 - 786).....	20
5.2.3	Reibbolzenschweißen (ISO 4063 - 788).....	21
5.2.4	Optimierte Schweißparameter - Zusammenfassung	23
5.3	Schweißnahtqualität optimierter Bolzenschweißverbindungen	24
5.3.1	Torsionsversuch	25
5.3.2	Zugversuch.....	25
5.3.3	Durchstrahlungsprüfung	26
5.3.4	Metallographie	27
5.3.5	Zusammenfassung	27
5.4	Einfluss Beschichtungsart und Schichtdicke	28
5.4.1	Kurzzeitbolzenschweißen.....	28
5.4.2	Spitzenzündung Kontakt.....	29
5.4.3	Reibbolzenschweißen	31
5.4.4	Werkstoffkundliche Untersuchungen	32
5.4.5	Schichtdicke - Verfahrensgrenzen.....	35
5.5	Ermittelte Schweißfehler und Maßnahmen zur Fehlervermeidung	37
5.5.1	Lichtbogenbolzenschweißen	37
5.5.2	Reibbolzenschweißen	39
5.6	Wiederholbarkeit	41
6	Zusammenfassung.....	42
7	Literatur.....	45
8	Anhang.....	48
8.1	Tabellen.....	48
8.2	Bilder.....	51

1 Einleitung

Eine rationelle Befestigung meist stiftförmiger Fügeelemente senkrecht an Blechoberflächen erfolgt auf sehr wirtschaftliche Weise mittels Bolzenschweißen. Man verbindet damit meist das in der Praxis sehr weit verbreitete Lichtbogenbolzenschweißen mit Hub- oder Spitzenzündung. Weniger bekannt, aber von zunehmender Bedeutung ist das Reibbolzenschweißen. Die Verfahren sind aufgrund sehr kurzer Schweißzeiten (1 ms bis 3 s) für eine Serienfertigung geeignet. Gebräuchliche Anwendungen dieser Verfahren erfolgen an unlegierten und legierten Stahlwerkstoffen sowie Aluminiumwerkstoffen. Zu diesen Werkstoffgruppen liegen umfangreiche Empfehlungen (Normen und Merkblätter) /01 bis 10/ und Erfahrungen von Anwendern und Forschungsinstituten vor /12 bis 32/ vor. Ein Großteil dieser Erfahrungen ist in einem Fachbuch /11/ zusammengefasst.

Dünnere beschichtete Stahlbleche der Dicke 0,8 bis 4 mm werden in großer Vielfalt und Menge in der metallverarbeitenden Industrie eingesetzt. Die Beschichtungen werden nach unterschiedlichen Methoden meist zur Verbesserung des Korrosionsschutzes an unlegierten Blechen aufgebracht. Bei der Anwendung etablierter thermischer Fügeverfahren wie dem Bolzenschweißen werden z.B. an verzinkten Blechen häufig Qualitätsminderungen beobachtet. An diesen Blechen werden meist Bolzen zwischen 5 und 10 mm Durchmesser mit hohen Qualitätsanforderungen angeschweißt. Große Anwendungsbereiche sind der Fassadenbau, der Haushaltgerätebau, der Gehäusebau und der Fahrzeugbau.

Der Einsatz von Blechen unterschiedlicher metallischer oder organischer Beschichtungen stellt an die Bolzenschweißtechnik besondere Anforderungen. Insbesondere bei Kurzzeitschweißverfahren können Beschichtungsart und Schichtdicke qualitätsentscheidenden Einfluss nehmen. Neben feuerverzinkten Feinblechen mit Schichtdicken bis 100 µm werden immer häufiger schweißfähige dünnfilmbeschichtete Bleche eingesetzt, die einen weitestgehenden Verzicht auf sekundäre Korrosionsschutzmaßnahmen möglich machen. Eine dünne organische Beschichtung (2 – 4 µm) basiert auf zinkpigmentierten Epoxidharzsystemen, die bereits vom Stahlhersteller auf die vorbehandelte Zinkoberfläche aufgebracht wird.

In dieser Arbeit wird die Anwendbarkeit der Bolzenschweißverfahren an unterschiedlich beschichteten Blechen und die Verfahrensgrenzen der einzelnen Bolzenschweißverfahren ermittelt. Beim Lichtbogenbolzenschweißen (Kurzzeitbolzenschweißen, Bolzenschweißen mit Spitzenzündung) werden die Blechoberflächen durch die kurze Schweißzeit nur gering angeschmolzen. Die Blechrückseite und damit der Korrosionsschutz bleiben weitgehend erhalten. Gegenüber Schweißungen an unbeschichteten Blechen werden bisher höhere Anteile an festigkeitsmindernder Schweißfehlern festgestellt. Die Schweißausführung kann dabei sehr stark streuen.

In der Praxis lassen sich baurechtliche Anforderungen häufig nur nach umfangreichen Optimierungsaufwendungen durch Anwender oder Hersteller erfüllen. Die Qualitätsanforderungen der DIN EN ISO 14555 lassen sich dann nur schwer erfüllen.

Die metallischen Beschichtungen Z (Feuerverzinkt) und ZE (Elektrolytisch verzinkt) sowie die organische Beschichtung OC (Zink + Epoxidharz) basieren auf der korrosionshemmenden Wirkung des Elementes Zink. Eine andere metallische Beschichtungsart ist das Feueraluminieren AS. Eine dünne Schicht aus Aluminiumoxid verhindert hierbei den Korrosionsangriff. Das Bolzenschweißen an typischen Vertretern

dieser Beschichtungen sowie an lackierten Blechen (Schweißprimer) werden näher untersucht.

Die Beschichtung ist bei Anwendung eines thermischen Fügeverfahren prozessintegriert zu entfernen, wenn man nicht aufwendige mechanische Vorarbeiten zur Beseitigung der Schicht in Kauf nehmen möchte.

Beim Lichtbogenbolzenschweißen ist die Zinkschicht auf der Schweißseite anzuschmelzen und zu verdampfen. Verbleibende Zinkanteile können das entstehende Schweißgut erheblich schädigen und den Fehlstellenanteil im Schweißgut weiter erhöhen.

Beim Reibbolzenschweißen ist die Zinkschicht wie auch andere Beschichtungen mechanisch durch den unter axialer Kraft auf dem Blech drehenden Bolzen zu beseitigen. Dies ist vorwiegend von der Art der Beschichtung, der Schichtdicke und der Reibzeit abhängig. Erst nach Entfernung der Schicht können die Grundwerkstoffe reibgeschweißt werden. Die Fehlermöglichkeiten sind bei diesem Verfahren erfahrungsgemäß geringer als beim Lichtbogenbolzenschweißen, da keine schmelzflüssigen Phasen entstehen. Die Beschichtung reduziert quasi als „Schmierschicht“ das Reibmoment deutlich und bedingt somit längere Schweißzeiten. Gegenüber dem Lichtbogenbolzenschweißen ist mit einem höheren Wärmeeintrag zu rechnen.

Der Verwendung beschichteter Bleche in der Praxis erfordert derzeit entsprechend aufwendige Versuche der Industrie vor Fertigungsbeginn zur prozesssicheren Integration der Verfahren.

In diesem Bericht werden zudem Möglichkeiten der Qualitätsverbesserung der Bolzenschweißungen aufgezeigt. Dabei werden Schweiß- und Randbedingungen gezielt optimiert. Für das Kurzzeitbolzenschweißen sind dies Schweißstrom, Schweißzeit und die Bewegungsparameter, für das Bolzenschweißen mit Spitzenzündung die Ladespannung, Bolzengeschwindigkeit, Federkraft und für das Reibbolzenschweißen Drehzahl, Reibzeiten und Axialkräfte.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen betrifft die erreichbare Schweißqualität in Abhängigkeit relevanter Rand- und Einflussfaktoren für die 3 Verfahrensvarianten

- Kurzzeitbolzenschweißen,
- Spitzenzündung (Spalt und Kontaktvariante) und
- Reibbolzenschweißen.

Für jedes Verfahren werden die energiebestimmenden Schweißparameter optimiert und anhand von Biegeprüfungen, Zugprüfungen, Durchstrahlungsprüfungen sowie Schliffuntersuchungen gemäß den Anforderungen der DIN EN ISO 14555 untersucht. Für optimierte Schweißungen wird der Beschichtungseinfluss auf die Gefüge- bzw. Bruchausbildung ermittelt. Anhand statistischer Methoden wird abschließend die Wiederholbarkeit der Verfahren dargestellt.

Die Untersuchungen wurden mit Unterstützung des Gemeinschaftsausschusses 2.2 / DIN NAS AA 16.1 „Bolzenschweißen“ durchgeführt.

2 Vorgehensweise

Zu untersuchen sind Bolzenschweißverbindungen an unlegierten, metallisch und organisch beschichteten Stahlblechen (Dicke 0,8 bis 4 mm) mit den zuvor genannten Bolzenschweißverfahren. Maßgabe der Optimierung ist die Ermittlung von Gütewerten der Schweißverbindungen gemäß DIN EN ISO 14555 /1/ im Rahmen der geräte-technisch einstellbaren Schweißbedingungen,

Die Schweißungen werden an unterschiedlich verzinkten Blechen mit Beschichtungsarten Z, ZE, OC und Schichtdicken zwischen 5 und 100 µm ausgeführt. Zudem werden Schweißungen an feueraluminierten Blechen (Beschichtungstyp AS) sowie Blechen mit schweißfähigen Schutzanstrichen (Primer) durchgeführt. Zum Einsatz kommen handelsübliche Schweißbolzen der Durchmesser M6 bis M10 aus dem Werkstoff S235.

Die Schweißungen werden anhand von Sichtprüfungen und mechanischen Prüfungen zur Ermittlung der statischen Tragfähigkeit wie Biege- und Zugversuch beurteilt. Metallkundliche Untersuchungsmethoden wie Schliiffbeurteilung, Bruchflächenuntersuchung und Durchstrahlungsprüfung werden zur Fehlerermittlung eingesetzt.

Arbeitsplan

Die Versuchsdurchführung erfolgt unter definierten und protokollierten Randbedingungen. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Materialien ist bekannt.

Der Arbeitsplan enthält folgende Schwerpunkte für die drei Schweißvarianten:

- 1) **Analyse des Schweißprozesses** beim Schweißen an beschichteten Bleche im Vergleich zum Schweißen an unbeschichteten Blechen, Schweißparameterermittlung. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.
- 2) **Verfahrenstechnische Optimierung** der Schweiß- und Randbedingungen wie z.B. Wärmeeinbringung, Schweißbadschutz. ie Variationen der Schweißparameter sind je nach Verfahren unterschiedlich.
- 3) **Ermittlung der erreichbaren Schweißqualität** in Abhängigkeit der relevanten Schweißbedingungen anhand von mechanischen und metallografischen Prüfungen, vor allem Beurteilung der Einbrandform, der Porosität, der Rißanfälligkeit und des Beschichtungseinflusses.
- 4) **Ermittlung des statischen Tragverhaltens** in Abhängigkeit der Fehleranteile im Schweißgut, anhand von Zugversuchen, Biegeprüfungen und Drehmomentprüfungen. Daraus werden Hinweise (Prüfkriterien) zur Qualitätssicherung für die bauaufsichtliche Praxis abgeleitet.
- 5) **Untersuchungen zur Fehleranfälligkeit** bei ungünstigen Schweißbedingungen. Der Einfluss fehlerreduzierender Maßnahmen wie z.B. durch Schutzgas wird erprobt. Aktive Gase (z.B. CO₂) und Mischgase (Ar+18%CO₂) tragen zur Lichtbogenstabilisierung bei. Die Neigung zur Blaswirkung wird in Abhängigkeit der Blechbeschichtung ermittelt.
- 6) **Erprobung optimierter Schweißbedingungen** unter seriennahen Einsatzbedingungen anhand einer größeren Stückzahl (ca. 200 je Variante).

Die Ergebnisse der Prüfungen werden den Fügeprozessdaten gegenübergestellt und Zusammenhänge erarbeitet.

3 Stand der Technik / Theorie

Allgemeine Informationen zum Bolzenschweißen sind u.a. in /1, 4 bis 7, 11/ zu finden. Spezielle Informationen zum Bolzenschweißen an beschichteten Blechen gehen aus /11, 12, 21 bis 23, 26, 30/ hervor. Das Bolzenschweißen dient vorwiegend dem Aufschweißen stiftförmiger, metallischer Teile auf metallische Werkstoffe. Es zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- Reduzierung der Arbeitszeit durch kurze Schweißzeiten,
- gute Mechanisierbarkeit der Verfahren,
- geringe Anforderung an die Handfertigkeit des Bediener,
- keine Bohrungen notwendig,
- geringe Wärmeeinbringung, dadurch kaum Verzug,
- Schweißen auf dünne Bleche (kleiner 1 mm) möglich,
- einseitige Zugänglichkeit der Bleche genügt,
- gute statische Belastungsfähigkeit der Verbindung.

3.1 Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung /11 bis 23/

Die Kurzzeitbolzenschweißtechnik hat ein erhebliches Anwendungsspektrum in der metallverarbeitenden Industrie. Ein Keramikring als Schweißbadschutz, wie beim normalen Bolzenschweißen üblich, ist bei dieser Variante nicht erforderlich. Der Verfahrensablauf ist in Bild 1 dargestellt. Dabei wird durch Abheben des Bolzens ein Lichtbogen zwischen Bolzen und Blech gezündet. Beide Fügepartner werden in sehr kurzer Zeit angeschmolzen und anschließend durch Eintauchen des Bolzens in das Schmelzbad zusammengeführt. Als Stromquellen stehen Gleichstromschweißmaschinen (3 Phasen, Inverter) mit Stromstärken bis ca. 1500 A (je nach Anwendungsfall) zur Verfügung. Die Wärmeeinbringung ist bei Schweißzeiten zwischen 10 und 100 ms im Vergleich zum Spitzenzündungsverfahren hoch, sodass bei dünneren Blechen unter 2 bis 3 mm Blechdicke auf der Blechrückseite ein deutlich sichtbarer Wärmeeinfluss festzustellen ist. In vielen Fällen ist die Blechrückseite aber nicht Sichtseite, bzw. die Rückseiten werden z.B. mit Farbe beschichtet, sodaß der sichtbare Wärmeeinfluss nicht störend wirkt. Hier kann das Kurzzeitbolzenschweißen eingesetzt werden.

Zum Einsatz kommen sowohl manuelle Verfahren mit Handschweißpistolen bei vergleichsweise geringen Bolzenstückzahlen als auch automatisierte Verfahren in der Serien- und Massenfertigung mit bis zu 20000 verschweißten Bolzen pro Schweißkopf und Tag. Besonders die hohen Stückzahlen verlangen nach gleich bleibender Verbindungsgüte über einen möglichst großen Zeitraum bei minimalem Ausfall der Bolzenschweißverbindung infolge verminderter Belastbarkeit.

Die Bedienung der Anlagen ist sehr anwenderfreundlich, jedoch ist auf große Sorgfalt bei der Parametereinstellungen zu achten. Im Vergleich zum Bolzenschweißen mit Spitzenzündung ergeben sich Vorteile durch ein geringeres Geräuschniveau und ein verbessertes Qualitätsniveau im Durchmesserbereich 6 bis 10 mm.

Beim Kurzzeitbolzenschweißen an verzinkten Blechen sind nach bisherigen Stand die Fehlerflächen in der Schweißverbindung teilweise deutlich höher als bei

unbeschichteten Blechen /21/. Dies kann soweit führen, dass bei unzureichender Parametereinstellung im Belastungsfall ein Bruch in der Fügeebene auftritt. Die niedrige Verdampfungstemperatur des Zinks (906 °C) wirkt sich zumeist sehr ungünstig auf den Schweißprozess aus. Die entstehenden Zinkdämpfe und Oxid fördern die Porenbildung, Bindefehler, Rissbildung und beeinflussen das Lichtbogenbrennverhalten. Eine Möglichkeit die Fehler zu Reduzieren ist der Einsatz von Schutzgas was in /11, 12/ empfohlen wird. Weitere Erfahrungswerte resultieren aus industriellen Anwendererfahrungen, die jedoch aufgabenspezifisch gelöst und häufig nicht veröffentlicht sind.

3.2 Bolzenschweißen mit Spitzenzündung /24 bis 29/

Das Bolzenschweißen mit Spitzenzündung erfolgt bei Schweißzeiten zwischen 1 und 3 ms mit einer sehr geringen Wärmeeinbringung. Nur dadurch ist es möglich, auch auf sehr dünne Bleche (ab 0,5 mm) ohne sichtbare Wärmebeeinflussung der Blechrückseite zu schweißen.

Beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung wird der Lichtbogen durch Anschmelzen und Verdampfen einer definierten kleinen Zündspitze an der Bolzenstirnseite gezündet. Die dazu erforderliche hohe Stromstärke wird einer Kondensatorbatterie entnommen, die unabhängig vom Schweißprozeß langsam aufgeladen wird. Die entstandenen Schmelzbäder an Bolzen und Blech werden durch Bewegung des Bolzens zum Blech hin verbunden. Der Energieinhalt des Kondensators $= 0,5 C \times U^2$ bestimmen die Kapazität C [F = Farad] und die Ladespannung U [V] den Energieinhalt E [J = Joule] der Kondensatorbatterie. Bild 2 zeigt den Verfahrensablauf beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. Das Spitzenzündungsverfahren wird in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit beim Zünden des Lichtbogen in die Varianten Kontaktschweißen und Spaltschweißen unterschieden /6/.

Bei beiden Varianten gliedert sich der Schweißvorgang nach Kontaktierung der Zündspitze mit dem Blech in die folgenden Arbeitsschritte:

1. Anschmelzen der Zündspitze und Zündung des Lichtbogens,
2. Bewegung des Bolzens in Richtung des Bleches,
3. Anschmelzen von Bolzenstirnfläche und Grundmaterial,
4. Verbinden der Schmelzbäder von Bolzen und Blech,
5. Erstarren der Schmelze.

Das Spaltschweißen unterscheidet sich vom Kontaktschweißen durch die Auftreffgeschwindigkeit des Bolzens beim Zünden des Lichtbogens. Das Zünden des Lichtbogens stört die Bewegung des Bolzens beim Auftreffen auf das Blech kaum. Beim Spaltschweißen wird die Lichtbogenstrecke in deutlich kürzerer Zeit als beim Kontaktschweißen zurückgelegt. Die Schweißzeit ist deutlich kürzer und die Energieeinbringung geringer. Beim Kontaktschweißen wird der Bolzen auf der Werkstückoberfläche einfach aufgesetzt und durch eine Federkraft zwischen 100 bis 150 N auf das Blech gedrückt. Diese höhere Federkraft als beim Spaltschweißen wird zum Erreichen der erforderlichen Eintauchgeschwindigkeit oder Auftreffgeschwindigkeit des Bolzens auf dem Blech benötigt. Die Schweißzeit beträgt bis zu 3 ms und ist somit deutlich länger als beim Spaltschweißen. Dadurch wird mehr Schweißenergie in die Verbindung eingebracht mit dem Effekt einer besseren Reinigungswirkung bei leicht verölten oder auch verzinkten Werkstücken. Bei den Schweißpistolen bzw. Schweiß-

köpfen sind die mechanischen Parameter (Federvorspannung, Federkonstante, Luftspalt, Masse, Reibung) für das Schweißergebnis von Bedeutung, da diese Einfluss auf die Auftreffgeschwindigkeit des Bolzens nehmen. Zudem spielt der Schweißstromkreis (Übergangswiderstände, Kabelführung, Masseanschluss, Induktivitäten, Zündspitze, Blechoberfläche) eine ebenso große Rolle. Zur Einstellung dieser Faktoren sind Hinweise zur Anwendung des Spitzenzündungsverfahrens in /6, 7/ zu beachten. Trotz Beachtung dieser Regeln ist die Einhaltung konstanter Schweißbedingungen sowohl bei manueller Ausführung als auch in der Serienfertigung nicht immer zu gewährleisten.

3.3 Reibbolzenschweißen /30 bis 36/

Das Reibschweißen – Bild 3 zeigt den Verfahrensablauf - ist seit über 30 Jahren zum Fügen von Metallen in der Fertigung eingeführt und hat sich einen guten Namen als zuverlässiges und schnelles Schweißverfahren erworben. Es werden meist rotations-symmetrische Voll- und Hohlquerschnitte stumpf gefügt. Die Schweißmaschinen sind ausgelegt zum Verbinden von Vollquerschnitten ab 1 mm Durchmesser bis weit über 300 mm bzw. für Hohlquerschnitte mit entsprechenden Flächen. Serienteile werden u.a. im Maschinenbau, Kraftfahrzeugbau, Werkzeugbau, Apparatebau und in der Elektroindustrie geschweißt.

Aufgrund der niedrigen Fügetemperatur ($T < T_S$), der kurzen Schweißzeit und dem Fügen unter Kraft bietet das Reibschweißen die Möglichkeit, auch artfremde Werkstoffkombinationen wie Stahl/Aluminium, Aluminium/Kupfer, u.v.m. bis hin zu Metall/Keramik, sowie pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe mit hoher Qualität zu verbinden. Diese Werkstoffkombinationen können mit Schmelzschweißverfahren nicht oder nur mit erheblichen Einschränkungen an die Verbindungseigenschaften gefügt werden. Ein weiteres Merkmal ist die über dem Schweißquerschnitt symmetrische Wärmeeinbringung und Abkühlung (bzw. Schrumpfung), die das verzugs- und eigenspannungsarme Schweißen fertig bearbeiteter Teile ermöglicht. Es werden keine Schweißzusatzwerkstoffe und Schutzgase benötigt, weil die Fügeflächen form- und stoffschlüssig in Kontakt stehen und damit vor der umgebenden Atmosphäre geschützt sind.

Zum Reibschweißen liegen vielfältige Erfahrungen aus Forschung und Industrie vor. Das Schweißen auf lackierte Bleche ist im Gegensatz zum Lichtbogenbolzenschweißen möglich /34/. Die Fügeparameter können an handelsübliche dünnere metallische und organische Überzüge angepasst werden. Eine gezielte Anhebung der Reibdrücke kann Schmierungsvorgängen, die durch beschichteten Oberflächen hervorgerufen werden, während des Reibprozesses entgegenwirken. Die Grenzen dieser Verfahrenstechnik sind aber nicht weiter ermittelt. Insbesondere zu den heute eingesetzten Beschichtungssystemen und neuen Schweißergenerationen sind keine Untersuchungen verfügbar.

Das Reibbolzenschweißen wird heute mit neuen Antriebstechniken, die gegenüber den bisher erprobten Maschinen höhere Drehzahlen bis ca. 23000 U/min zulassen, am Markt angeboten /31/.

Informationen zur Qualitätssicherung enthalten die Veröffentlichungen /37 bis 39/. Auch aus dem Ausland wird über Anwendungserfahrungen berichtet /40 bis 44/.

Die Bilder 4 bis 6 zeigen typische Anwendungsbeispiele der untersuchten Bolzenschweißverfahren.

4 Experimentelle Randbedingungen

Im folgenden werden die Geräte, die Messeinrichtungen, die verwendeten Werkstoffe und die Prüfmethode näher beschrieben.

4.1 Gerätetechnik

4.1.1 Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung

Die Untersuchungen werden mit folgenden handelsüblichen Stromquellen und Schweißpistolen zum Kurzzeitbolzenschweißen ausgeführt (Bild 7):

Stromquelle Typ BMH 16 und Pistole PH-3
der Fa. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH.

Dieses Gerät, thyristorgesteuerter Gleichrichter mit Konstantstromcharakteristik, weist eine typische Welligkeit des Stromverlaufes entsprechend der Netzfrequenz auf. Die max. einstellbare Stromstärke beträgt 1000 A. Zusätzlich ist ein Prozesskontrolle integriert die für jede Schweißung u.a. die Messwerte, Stromstärke, Lichtbogen Spannung ausgibt.

4.1.2 Bolzenschweißen mit Spitzenzündung

Die Untersuchungen werden mit folgenden handelsüblichen Stromquellen und Schweißpistolen zum Bolzenschweißen mit Spitzenzündung ausgeführt (Bild 8):

Stromquelle Typ BMS 800-120 und Pistole PS-3K
der Fa. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH

Der Kondensator hat eine Kapazität von 120 mF. Die Ladespannungen können zwischen 60 und 190 V variiert werden.

4.1.3 Reibbolzenschweißen

Mit der Reibschweißmaschine H&W RSM200 (max. 15 kN, Bild 9) werden Bolzen/Blech Verbindungen, mit Bolzen M6 (\varnothing 5,8 mm) und Bolzen M8 (\varnothing 7,8 mm) bei Drehzahlen von 10.000 bis 23.000 1/min reibgeschweißt. Die Energieeinbringung erfolgt über hohe Drehzahlen bei niedrigen Prozesskräften. Die Spindeldrehzahl kann stufenlos zwischen 6.000 und 23.400 1/min eingestellt werden. Die maximal mögliche Axialkraft beträgt 15 kN (bei 8 bar). Die Axialbewegung (maximal 50 mm) und Axialkraft wird pneumatisch erzeugt. Der Schweißprozeß läßt sich über eine vorgegebene Reibzeit (Zeitreiben) steuern. Die Schweißdaten und Maschinensteuerbefehle werden in den „Controller“ eingegeben. Gleichzeitig werden die Prozeßgrößen Drehzahl, Kraft, Zeit und Verkürzung während des Prozeßablaufs durch RQ-Fuzzy überwacht.

Mit dem System RQ-Fuzzy kann eine sehr gute Überwachung des Reibschweißprozesses erreicht werden. Durch Fuzzy-Pattern-Klassifikation mit unscharfen Hüllkurven ist eine Produktionsüberwachung auf hohem Niveau gewährleistet.

Die Reibschweißmaschine RSM200 baut sehr kompakt trotz hoher Leistungsfähigkeit von 1,85 kW. Damit kann ein unlegierter Stahl bis 14 mm Durchmesser geschweißt werden. Die Maschine ist ausgelegt für hohe Lebensdauer und Belastung und eignet sich besonders für flexible Anwendungen in Anlagen oder am Roboter. Durch die Möglichkeit, pneumatisch betätigte Spannfutter zu verwenden, ist sie vorbereitet für vollautomatisierte Anwendungen. Dem wird durch entsprechende Dimen-

6 Zusammenfassung

Das Bolzenschweißen als äußerst wirtschaftliches Befestigungsverfahren der metallverarbeitenden Industrie wird gerne u.a. an beschichteten bzw. oberflächenveredelten, unlegierten Blechwerkstoffen angewendet. Die Verfahrensgrenzen der Bolzenschweißtechnik an z.B. verzinkten Blechen sind nicht eindeutig definiert. Anhand dieser Untersuchungen werden gebräuchliche Bolzenschweißverfahren an unterschiedlich beschichteten Blechen verglichen. Dazu zählen die Lichtbogenbolzenschweißverfahren Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung (DS) sowie Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung (TS) und das Reibbolzenschweißen (RS).

Der Hauptanwendungsbereich betrifft das Bolzenschweißen an meist dünneren unlegierten Blechen zwischen 0,8 und 4 mm Blechdicke, an denen meist Bolzen zwischen M5 und M10 Durchmesser aus dem Werkstoff S235 angebracht werden. Der Schwerpunkt gilt dem Einfluss gebräuchlicher Blechbeschichtungen der Qualitäten Z, ZE, AS, OC und Primerbeschichtung auf das Schweißverhalten und die erreichbare Schweißqualität. Die Bleche werden hinsichtlich Blechdicke und Beschichtungsdicke unterschieden. Die verwendeten dünneren Bleche bis ca. 2 mm weisen eine dünne Beschichtung (Z, ZE, AS, OC) bis maximal 20 µm Schichtdicke auf. An dickeren Blechen wird eine dickere Beschichtung Z bis 100 µm untersucht.

Das Lichtbogenbolzenschweißen wird an bewährten handelsüblichen Stromquellen und Schweißpistolen unterschiedlicher Gerätehersteller mit manueller Bedienung erprobt. Zum Reibbolzenschweißen steht ein hochdrehender Reibschweißantrieb RSM 200 der Fa. Harms & Wende in einem stationären Versuchsstand mit integrierter Prozessüberwachung zur Verfügung.

Die verfahrenstechnische Analyse der Verfahren Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung, Bolzenschweißen mit Spitzenzündung sowie Reibbolzenschweißen zeigt eine gute Schweißausführung der verfahrensspezifischen Kenngrößen beim Bolzenschweißen kleinerer Durchmesser M6 bis M8 an unlegierten beschichteten Blechen auf. Beeinflussende Störgrößen, wie z.B. Kurzschlüsse beim Lichtbogenbolzenschweißen sind bei allen Verfahren anhand von Messaufzeichnungen nicht zu erkennen.

Alle Verfahren erfordern eine beschichtungsspezifische Anpassung der Schweißausführung zur Durchdringung der Beschichtung in der Fügezone. Störende Elemente wie z.B. Zink werden entweder im Lichtbogen verdampft oder durch mechanische Verdrängung des unter axialer Kraft reibenden Bolzens beseitigt. Die Beseitigung erfolgt durch Zugabe von Schweißenergie wie z.B. Stromstärke, Schweißzeit, Drehzahl, Reibdruck gegenüber einer Einstellung an unbeschichtetem Blech. Die Lichtbogenverfahren sind durch größere Emissionen in Form von Schweißrauch und Spritzern in Abhängigkeit von der Schichtdicke gekennzeichnet. Das Reibbolzenschweißen erfolgt dagegen weitgehend emissionsfrei.

Die schweißtechnische Optimierung erfolgt mit der Maßgabe eines hohen Tragverhaltens bei statischer Belastung in Anlehnung an baurechtliche Vorgaben der DIN EN ISO 14555 für Bolzenschweißungen. Anhand vielfältiger Untersuchungsreihen sind für jedes Schweißverfahren geeignete Einstellwerte für die meisten Kombinationen aus Blechdicke, Beschichtungsart und Schichtdicke ermittelt und hoch belastbare Verbindungen erstellt worden. Der Prüfumfang der DIN EN ISO 14555 wird für diese Verbindungen an M6 und M8 Bolzen aus S235 in vollem Umfang erfüllt:

- Sichtprüfung mit geeigneter Wulstausbildung
- Biegeprüfung bis über 60° Biegewinkel ohne Anrisse oder Bruch in der Schweißzone
- (Scher-) Zugversuch mit Bruchlage im Grundwerkstoff, d.h. Blech oder Bolzen je nach Blechdicke
- Makroschliff mit guter Einbrandform bzw. fehlerfreier Verbindungszone

Für optimierte Lichtbogenschweißungen wird die Anschmelzung des Bleches durch die Beschichtung (geringere Austrittsarbeit der Lichtbogenansatzstelle) verbessert. Der Lichtbogen schmilzt eine größere Fläche an und brennt weniger tief in das Blech ein. Dies ist besonders bei den feueraluminierten AS-Beschichtungen gut zu beobachten und führt zu fehlerarmen Schweißverbindungen. Aber auch die anderen erprobten Beschichtungen zeigen ein hohes Qualitätsniveau auf. Ein weiterer Einfluss der Art der Beschichtung (Ausnahme Primer) auf die Schweißqualität ist nicht gegeben. Der Spritzereinfluss kann durch Verwendung von Schutzgas reduziert werden. Beim Kurzzeitbolzenschweißen werden anhand von Durchstrahlungsaufnahmen Fehleranteile unter 10 % in der Schweißzone ermittelt. Beim Spitzenzündungsverfahren zeigt sich das Kontaktverfahren mit Schweißzeiten bis ca. 4 ms gegenüber der Spaltvariante (ca. 1 ms) deutlich überlegen.

Beim Reibbolzenschweißen ergeben sich bei ausreichendem Wärmeeintrag zur Beseitigung der Schmierschicht an der Blechoberfläche hervorragende fehlerfreie Schweißergebnisse. Die weiteren Vorteile des Verfahrens sind: eine einfache Bauteilvorbereitung, keine Zusatzwerkstoffe erforderlich und eine sehr gute Wiederholbarkeit der Schweißausführung.

Anhand der Untersuchungen sind folgende Verfahrensgrenzen und Einschränkungen bei der Anwendung der Bolzenschweißverfahren ermittelt:

- Das Kurzzeitbolzenschweißen ist an feuerverzinkten Blechen mit Schichtdicken bis 100 µm durch genaue Anpassung der Schweißzeit möglich. An dicken Blechen ist dabei eine Schweißzeit von mindestens 80 ms einzustellen. Bei der Verwendung kurzer Schweißzeiten kleiner als 80 ms z.B. an dünnen Blechen sollte die Schichtdicke ca. 40 µm nicht überschreiten. Das Schweißen an geprimerten Blechen (bis 40 µm) ist möglich. An dickeren Primerschichten muss mit eingeschränkter Wiederholbarkeit gerechnet werden.
- Beim Spitzenzündungsverfahren werden an beschichteten Blechen bis maximal 20 µm ebenfalls sehr gute Schweißergebnisse erzielt. Allerdings ist aufgrund der längeren Schweißzeit von ca. 4 ms die Kontaktvariante zu verwenden. Innerhalb dieser Schweißzeit kann eine metallische Beschichtung Z, ZE, AS oder OC bis 20 µm weitgehend beseitigt werden. Die Spaltvariante kann bei Schweißzeiten von ca. 1 ms maximal an Beschichtungen bis 10 µm eingesetzt werden. Die Kontaktvariante führt an beschichteten Blechen generell zu besseren und wiederholbareren Schweißergebnissen als das Spaltverfahren.
- Beim Reibbolzenschweißen zeigte sich im Rahmen dieser Untersuchungen keine Verfahrensgrenze. Dieses Verfahren kann auch an Beschichtungen weit über 100 µm hinaus angewendet werden. Das Schweißen auf lackierte Bleche ist im Gegensatz zum Lichtbogenbolzenschweißen uneingeschränkt möglich.

Werkstofftechnische Untersuchungen der entstehenden Gefüge in den Schweiß- und Wärmeeinflußzonen zeigen keine Besonderheiten, die auf einen Einfluss von Zink

oder anderer Beschichtungselemente bei optimierten Schweißungen hinweisen. Es entstehen fehlerarme bainitisch-ferritische Schweißgefüge vergleichbar zum unbeschichteten Blech. Auch an Bruchflächenuntersuchungen in Kombination mit EMA – Analysen an dick verzinkten Blechen konnte kein Einfluss von Zink ermittelt werden.

Mit diesen Untersuchungen wurde daher der Nachweis der vollständigen Beseitigung unterschiedlicher Beschichtungen nach Art und Dicke bei Anwendung von kurzzeitigen Bolzenschweißverfahren mittels Lichtbogen oder Reibung erbracht. Die Schweißungen sind bei allen Verfahren unter Berücksichtigung der ermittelten Verfahrensgrenzen sehr gut wiederholbar. Die Variationskoeffizienten von Serienschweißungen mit manueller Bedienung betragen ca. 5 %.

Dem Anwender- vielen Klein- und Mittelbetrieben - werden daher zukünftig gezielte Antworten zur Lösung ihrer Probleme gegeben werden können. Die Versuchsergebnisse werden wesentlich dazu beitragen, den Arbeitsbereich von Bolzenschweißeinrichtungen und ihre Flexibilität zu erhöhen. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit können direkt in die Praxis übertragen werden. Neue Impulse in der Fertigung, verbunden mit Kostenreduzierung bei Konstruktion und Fertigung, können die Wettbewerbsfähigkeit der Produkte und damit auch der Firmen steigern.

Die Ergebnisse werden dem Gemeinschaftsausschuss AG V2.2/DIN NAS AA16.1 „Bolzenschweißen“ präsentiert. Notwendige Änderungen der Normen werden in dieser Arbeitsgruppe diskutiert und in die Normen integriert. Die guten Ergebnisse dieser Arbeit erfordern voraussichtlich keine nennenswerte Änderung der Fehlergrenzen. Bei statischer Belastung kann auch der bisherige Prüfumfang weiter angewendet werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF-Nr. 13.362 N) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlußbericht zu dem Forschungsvorhaben ist von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS in Düsseldorf bzw. von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München, Niederlassung der GSI mbH zu beziehen.

Unser Dank richtet sich auch an folgende Firmen für die Unterstützung der Forschungsarbeit: Fa. BTH-Tech GmbH (Dachau), Harms und Wende GmbH & Co. KG (Hamburg), Fa. Köster & Co. GmbH (Ennepetal), Fa. Nelson Bolzenschweißtechnik GmbH (Gevelsberg), Fa. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH (Ettersschlag) und an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

München, den 30.11.2004


Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. D. Böhme