

# Bericht 5146/2008

AiF-Nr. 14.881N

DVS-Nr. 5.035

## **Qualitätsbeurteilung von Bolzenschweißverbindungen mit Hubzündung durch Prozessüberwachung**

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 121 Seiten.

September 2008

## Zusammenfassung

Bei der Anwendung von Bolzenschweißverbindungen fordert die DIN EN ISO 14555 - verbindlich für den baurechtlichen Bereich – Nachweise zur fehlerarmen Schweißausführung anhand zerstörender Prüfmethoden. Die betrieblichen Überwachungsmaßnahmen bestehen aus Stichprobenuntersuchungen anhand von (vereinfachten) Arbeitsprüfungen sowie der laufenden Fertigungsüberwachung (Sichtprüfung). Die Schweißqualität der einzelnen ausgeführten Bolzenschweißung kann bisher nicht überprüft werden.

Das Ziel dieser Untersuchung zum Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung ist es, der weiteren Entwicklung von Prozessüberwachungssystemen zur Verbesserung und Sicherstellung der Schweißqualität Vorschub zu leisten. Dazu werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Bolzenschweißqualität durch Erfassung und Analyse der Prozessgrößen Stromstärke, Lichtbogen Spannung und Bolzenbewegung für Bolzen zwischen 6 und 22 mm Durchmesser ermittelt. Erprobt wird dabei das Überwachungssystem PQS-Weld der Fa. Harms&Wende sowie STUD-DI\_H der Fa. Dr. Gödde Schweißüberwachung. Beide Systeme haben sich bei der industriellen Serienüberwachung anderer Schweißverfahren sehr bewährt.

Verglichen werden Referenzschweißungen mit dem Merkmal umfassender Qualitätsanforderungen nach ISO 3438-2 mit fehlerbehafteten Keramikringbolzenschweißungen sowie Kurzzeitbolzenschweißungen (Schutzgas) der Werkstoffe S235, X5CrNi18-10 sowie AlMg3. Neben den Schweißparametern werden vor allem häufig beeinträchtigende Störgrößen wie feuchter Keramikring, Öl- oder Wasserbenetzung des Bleches, einseitiger Masseanschluss und verschiedene Schutzgase variiert.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass beinahe jede untersuchte Störung des Bolzenschweißprozesses zu einer signifikanten Merkmalsänderung einer Prozessgröße gegenüber den Referenzschweißungen oder dem Referenzband im Falle von Serienschweißungen führt. Entscheidend ist vor allem die Bewertung des Bewegungs- und des Spannungssignals anhand der ermittelten charakteristischen Merkmale einer Hubzündungsbolzenschweißung.

Beim Keramikringbolzenschweißen (10 bis 22 mm Durchmesser) sind fehlerhafte Schweißungen mit Fehleranteilen größer 25 % vor allem durch kombinierte Störung mehrerer Schweiß- oder Randbedingungen zu erzielen. Abweichungen eines Parameters gegenüber Referenzbedingungen werden durch Prozessüberwachung erkannt, haben aber oft nur geringe Auswirkungen auf die Schweißqualität. Schädlichen Einfluss nehmen eine Schweißausführung mit feuchten Keramikringen oder an wasserbenetzten Blechoberflächen, detektierbar an einem höheren Spannungsniveau (plus 5 – 6 V) gegenüber der Referenzschweißung. Beim Kurzzeitbolzenschweißen zeigt sich dagegen ein Einfluss auf die Schweißqualität bei Variation eines Parameters.

Bei einer Erprobung des Systems PQS-Weld bei Serienschweißungen wird ein instabiler Prozess z.B. aufgrund unregelmäßig arbeitender Schweißpistolen erkannt.

Beim Keramikringbolzenschweißen führt eine vollständige Bewertung der charakteristischen Merkmale durch die Prozessüberwachung zu einer hinreichenden Aussage über die Schweißqualität der einzelnen Schweißung. Die Überwachung von Kurzzeitbolzenschweißungen erfordert dagegen weitere Erfahrungen des Serieneinsatzes mit seinen spezifischen Randbedingungen.

Die Ergebnisse sind in einer Datenbank hinterlegt und stehen interessierten Nutzern zur Verfügung.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

## Inhaltsverzeichnis

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung.....   | 3  |
| 2     | Vorgehensweise.....   | 4  |
| 2.1   | Aufgabenstellung.....   | 4  |
| 2.2   | Versuchsprogramm.....   | 4  |
| 3     | Stand der Technik / Theorie.....  | 6  |
| 3.1   | Keramikringbolzenschweißen.....   | 6  |
| 3.2   | Kurzzeitbolbolzenschweißen.....   | 7  |
| 3.3   | Einstellparameter.....  | 7  |
| 3.3.1 | Stromquelle.....  | 7  |
| 3.3.2 | Schweißpistole/Schweißkopf.....   | 7  |
| 3.3.3 | Stromkreis.....   | 7  |
| 3.4   | Stand der Forschung.....  | 8  |
| 4     | Experimentelle Randbedingungen.....   | 9  |
| 4.1   | Versuchsdurchführung.....   | 9  |
| 4.1.1 | Schweißanlagen.....   | 9  |
| 4.1.2 | Versuchsdurchführung.....   | 9  |
| 4.1.3 | Schweiß- und Randbedingungen.....   | 10 |
| 4.2   | Meßeinrichtungen.....   | 10 |
| 4.2.1 | PQS-Weld.....   | 10 |
| 4.2.2 | Stud-Di_H.....  | 11 |
| 4.3   | Werkstoffe und Probenabmessungen.....   | 12 |
| 4.4   | Prüfmethoden.....   | 12 |
| 5     | Ergebnisse.....   | 14 |
| 5.1   | Grundlegende Ergebnisse.....  | 14 |
| 5.1.1 | Stromverlauf.....   | 15 |
| 5.1.2 | Spannungsverlauf.....   | 17 |
| 5.1.3 | Bewegungsverlauf.....   | 18 |
| 5.1.4 | Ermittelte Kenngrößen.....  | 18 |
| 5.1.5 | Signalverarbeitung.....   | 18 |
| 5.2   | Schweißparametervariation beim Keramikringbolzenschweißen<br>mit Handschweißpistole an unlegiertem Stahl..... | 19 |
| 5.2.1 | Referenzschweißungen mit Fehlern kleiner als 5 %.....   | 19 |
| 5.2.2 | Bolzenschweißungen der Bewertungsgruppe 3.....  | 20 |
| 5.2.3 | Bolzenschweißungen der Bewertungsgruppen 4 und 5.....   | 20 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.2.4 | Bildbeispiele .....   | 21 |
| 5.3   | Variation der Randbedingungen beim Keramikringbolzenschweißen mit Handschweißpistole an unlegiertem Stahl .....               | 23 |
| 5.3.1 | Einseitiger Masseanschluss .....  | 23 |
| 5.3.2 | Feuchter Keramikring .....  | 24 |
| 5.3.3 | Wasserbenetzte Blechoberfläche .....  | 26 |
| 5.3.4 | Ölbenetzte Blechoberfläche .....  | 27 |
| 5.3.5 | Fazit.....  | 28 |
| 5.4   | Schweißparametervariation beim Kurzzeitbolzenschweißen mit stationärem Schweißkopf an unlegiertem Stahl .....                 | 28 |
| 5.5   | Variation der Randbedingungen beim Kurzzeitbolzenschweißen mit stationärem Schweißkopf an unlegiertem Stahl .....             | 29 |
| 5.5.1 | Schutzgaseinfluss.....  | 29 |
| 5.5.2 | Blechoberfläche.....  | 30 |
| 5.5.3 | Verzinktes Blech (25 µm), Abhub 2 mm .....  | 31 |
| 5.6   | Werkstoffeinfluss .....   | 31 |
| 5.6.1 | Keramikringbolzenschweißen BH 100 an legiertem Stahl.....   | 32 |
| 5.6.2 | Kurzzeitbolzenschweißen BH 10 an unlegiertem Stahl .....  | 32 |
| 5.6.3 | Kurzzeitbolzenschweißen BH 10 an Aluminium .....  | 33 |
| 5.7   | Serienerprobung der Prozessüberwachung .....  | 34 |
| 5.8   | Weitere Fehlererkennungsmethoden .....  | 35 |
| 6     | Diskussion .....  | 36 |
| 7     | Darstellung: Forschungsziel - angestrebte Forschungsergebnisse - erzielte Forschungsergebnisse, Verwendung der Zuwendung..... | 37 |
| 8     | Zusammenfassung.....  | 38 |
| 9     | Schrifttum .....  | 42 |
| 10    | Anhang.....   | 44 |
| 10.1  | Tabellen.....   | 44 |
| 10.2  | Bilder .....  | 62 |

## 1 Einleitung

Beim Lichtbogenbolzenschweißen handelt es sich um einen sehr kurzzeitig ablaufenden Fügeprozess zwischen wenigen ms und 1 s mit dem Kennzeichen einer erheblichen Einflussnahme der jeweiligen Schweiß- und Randbedingungen auf die erzielbare Schweißqualität. Die Realisierung von Qualitätsanforderungen nach DIN EN ISO 3834, Teil 2 bis Teil 4 /1 bis 3/ wird für das Lichtbogenbolzenschweißen anhand der DIN EN ISO 14555 /4/ umgesetzt. Danach liegt das Hauptaugenmerk von bauaufsichtlich verbindlichen Verfahrensprüfungen in einem einmaligen Nachweis der Schweißausführung gemäß Stand der Technik. Die weitere Qualitätsüberwachung wird dem Hersteller von Bolzenschweißungen - vielen Klein- und Mittelbetrieben - selbst überlassen. Da beim Lichtbogenbolzenschweißen aufgrund der mechanisierten Ausführung keine Handfertigkeit eines Schweißers erforderlich ist, können auch Bediener ohne nennenswerte Erfahrungen erfolgreich Bolzen senkrecht an Bleche schweißen.

Eine äußerliche Beurteilung einer Bolzenschweißung von Fachleuten führt zu keiner hinreichenden Qualitätsaussage. Auch bei vollständiger Wulstausbildung kann ein Versagen in der Schweißzone erfolgen, wenn innere Fehlstellen wie Poren und Bindefehler den tragenden Schweißquerschnitt schwächen. Für die bisherige Qualitätsüberwachung gilt bis auf einige Ausnahmen in der Serienfertigung das Prinzip von gelegentlichen Stichprobenkontrollen mit mechanischen, zerstörenden Prüfmethoden. Die Masse der genutzten Bolzenschweißverbindungen - z.B. im Brücken- und Fassadenbau bis 25 mm Durchmesser - wird sozusagen im guten Glauben an die Schweißverbindung eingesetzt. Bei sorgfältiger Schweißausführung weisen Bolzenschweißverbindungen sowohl bei Hubzündung, wie auch bei Spitzenzündung, ein hohes Qualitätsniveau auf, bei der die Schweißverbindung bei statischer Belastung mehr Last ertragen kann als das verwendete bolzenschweißgeeignete Grundmaterial von Bolzen und Blech.

In diesem Forschungsprojekt werden ausgehend von vielen Anfragen von Anwendern und Geräteherstellern die Möglichkeiten der Qualitätsüberwachung beim Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung näher untersucht. Dabei werden charakteristische Merkmale für die Verfahrensvarianten Keramikringbolzenschweißen mit manueller Gerätehandhabung und Kurzzeitbolzenschweißen mit stationärer Schweißanlage durch Vergleich der Prozessverläufe von Stromstärke, Lichtbogen spannung und Bolzenbewegung mit der erzielten Schweißqualität ermittelt. Die Fügequalität wird in Abhängigkeit einer Vielzahl von Rand- und Einflussfaktoren unter Berücksichtigung der Vorgaben der DIN EN ISO 14555 bestimmt.

Die Messungen erfolgen mittels des Prozessüberwachungssystems PQS-Weld der Fa. Harms&Wende. Für das zur Hubzündung gänzlich unterschiedliche Spitzenzündungsverfahren (Kondensatorentladung) existiert das Überwachungssystem STUD-DI von Dr. Gödde seit nunmehr 15 Jahren am Markt. Die Ergebnisse dieses Projektes lieferten den Anstoß zur Weiterentwicklung von STUD\_DI und zur Erprobung eines zweiten, handlichen Systems als Prototyp STUD-DI\_H bereits während der Projektlaufzeit.

## 2 Vorgehensweise

### 2.1 Aufgabenstellung

Das Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung ist mit einem handelsüblichen Prozeßüberwachungssystem im Hinblick auf die Aussagefähigkeit des Systems bei einfacher Handhabung näher zu untersuchen. Eine Bewertung der Einzelschweißung unmittelbar nach dem Schweißen soll helfen, fehlerhaft ausgeführte Schweißungen auszusortieren und nicht anzuwenden. Ermittelt werden charakteristische Merkmale der Kurvenverläufe wichtiger Prozeßgrößen wie Stromstärke, Lichtbogen Spannung und Bolzenbewegung.

Zu untersuchen sind einige typische Anwendungsfälle beim Hubzündungsbolzenschweißen hinsichtlich Fehleranfälligkeit und Belastbarkeit. Für diese Fälle werden die charakteristischen Merkmale in einer Datenbank abgelegt, die die weitere Entwicklung von QS-Systemen unterstützen.

Folgende Arbeitsschwerpunkte werden näher untersucht:

- Untersuchungen an Keramikringbolzenschweißungen unterschiedlicher Durchmesser und Werkstoffe,
- Untersuchungen an Kurzzeitbolzenschweißungen unterschiedlicher Durchmesser und Werkstoffe,
- Variationen der Randbedingungen von Schweißbadschutz, Masseanschluss und Blechoberfläche für beide Schweißvarianten.
- Überprüfung der Prozessüberwachung anhand von Serienschweißungen mit gezielt eingebrachten Störungen des Schweißprozesses.

Eingesetzt wird das System PQS-Weld zur Überwachung der unterschiedlich ausgeführten Bolzenschweißungen sowie ein Prototyp von STUD-DI\_H. Die weitere Entwicklung dieses oder eines anderen Systems erfordert schweißtechnische Detailkenntnisse des Bolzenschweißprozesses in Abhängigkeit von der erzielten Schweißqualität.

Mit dieser Untersuchung wird verifiziert, inwieweit die ausgeführte Schweißqualität anhand der Messgrößen beurteilt werden kann. Dieser Nachweis ist Voraussetzung für die Anwendbarkeit von Prozessüberwachungssystemen und daher für alle Gerätehersteller von technischem Interesse. Gleichzeitig werden die Einsatzgrenzen des Systems aufgezeigt.

### 2.2 Versuchsprogramm

Die Schweißungen werden an einer stationären Schweißanlage mit guter Wiederholpräzision sowie mit unterschiedlichen Handschweißgeräten unter Nutzung des Prozessüberwachungssystem PQS-Weld der Fa. Harms+Wende ausgeführt. Die Schweißungen werden mittels üblicher zerstörender Prüfmethode untersucht. Somit steht für die einzelnen Schweißungen ein exakter Belastungs- bzw. Fehlerstatus zur Verfügung. Somit ergibt sich eine Gut-Schlecht-Bewertung der Schweißungen als Basis weiterer Analysen.

Das Versuchsprogramm in der Übersicht:

1. Schweißparametervariation beim Keramikringbolzenschweißen mit Handschweißpistole an unlegiertem Stahl

Die Untersuchungen werden an Bolzenschweißungen der Durchmesser 10, 16 und 22 mm durchgeführt. Die Schweißparameter werden in weiten Grenzen variiert: Schweißstrom: 300 - 2000 A, Schweißzeit: 200 - 1000 ms, Abhub: 1,5 bis 5 mm, Überstand: 1 bis 6 mm,

Durch gezielte Variation werden Bolzenschweißungen mit unterschiedlich hohen Fehleranteilen erzeugt. Jede Variation wird durch mindestens 5 Schweißungen abgesichert.

2. Variation der Randbedingungen beim Keramikringbolzenschweißen mit Handschweißpistole an unlegiertem Stahl

Bei diesen Variationen werden häufige praxisnahe Einflussfaktoren wie der Masseanschluss (symmetrisch oder einseitig), der Keramikring (trocken, unterschiedlich befeuchtet) sowie die Blechoberfläche (entfettet, beölt, wasserbenetzt) näher untersucht.

3. Schweißparametervariation beim Kurzzeitbolzenschweißen mit stationärem Schweißkopf an unlegiertem Stahl

Die Untersuchungen werden an Bolzenschweißungen der Durchmesser 6 mm durchgeführt. Die Variation der Schweißparameter erfolgt analog Punkt 2 jedoch mit geringerer Schweißenergie (Schweißzeit < 100 ms).

4. Variation der Randbedingungen beim Kurzzeitbolzenschweißen mit stationärem Schweißkopf

Verglichen werden die Wirkungen unterschiedlicher Schutzgase (Ar+18%CO<sub>2</sub>, Ar+10%CO<sub>2</sub>, Ar+2,5%CO<sub>2</sub>, Ar+50%He+2%CO<sub>2</sub>) auf das Schweißergebnis gegenüber dem Schweißen ohne Gas. Daneben sind die Oberflächenzustände (entfettet, beölt, wasserbenetzt und verzinkt) sowie der Masseanschluss (symmetrisch oder einseitig) der Bleche von Interesse.

In Abhängigkeit der Randbedingungen werden fehlerhafte Schweißungen erzeugt.

5. Werkstoffeinfluss

Es werden vergleichende Untersuchungen artgleicher Bolzenschweißungen an CrNi-Stahl (BH 100 und BH 10) sowie Aluminium (BH 10) unter Schutzgas. Je Variante sind ausgehend von bisherigen Erfahrungen mindestens drei Versuchsreihen erforderlich.

6. Serienerprobung der Prozessüberwachung

Die Prozessüberwachung wird im Serieneinsatz, z.B. bei Baustellenfertigung, bei Hilfestellung bei Verfahrensprüfungen oder in der Industriefertigung erprobt.

Zur Kontrolle der Schweißqualität werden an ausgewählten Schweißungen mechanische Prüfungen durchgeführt.

## 8 Zusammenfassung

Für das Lichtbogenbolzenschweißen enthält die DIN EN ISO 14555 /4/ qualitätssichernde Vorschriften. Bei Anwendung der Hubzündungsverfahren sind z.B. bei Verbundbrücken aber auch bei anderen ermüdungsbeanspruchten Bauteilen des Bauwesens die umfassenden Qualitätsanforderungen nach ISO 3834-2 einzuhalten. Aber auch bei Standard-Qualitätsanforderungen nach ISO 3834-3 ist die erreichte Schweißqualität der Bolzenschweißungen in einer Fertigung zu überwachen. Dies bedeutet den Nachweis fehlerarm ausgeführter Bolzenschweißungen mit u.a. Fehleranteilen kleiner als 5 % bzw. 10% vom verschweißten Bolzenquerschnitt sowie die Erfüllung von Biegeversuchen und Zugversuchen. Die betrieblichen Überwachungsmaßnahmen bestehen aus Stichprobenuntersuchungen anhand von Arbeitsprüfungen und vereinfachten Arbeitsprüfungen sowie einer laufenden Fertigungsüberwachung, bei der im Allgemeinen die Sichtprüfung genügt.

Ein aussagefähiges Prozessüberwachungssystem steht den Anwendern – vielen Klein- und Mittelbetrieben - für das Hubzündungsverfahren bisher nicht zur Verfügung. Einfache Überwachungsgeräte berücksichtigen zwar Schweißparameter wie Stromstärke, Lichtbogen Spannung und Schweißzeit. Wichtige Bewegungsgrößen wie Abhub, Eintauchtiefe und Eintauchgeschwindigkeit bleiben aber unberücksichtigt.

In dieser Untersuchung an Hubzündungsbolzenschweißungen zwischen 6 und 22 mm Durchmesser werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Bolzenschweißqualität durch Erfassung der Prozessgrößen Stromstärke, Lichtbogen Spannung und Bolzenweg ermittelt. Genutzt wird dabei das Überwachungssystem PQS-Weld der Fa. Harms&Wende, das sich bei der Serienüberwachung von Widerstandsschweißungen bewährt hat. Bei diesem System werden einzelne Fertigungsbolzenschweißungen anhand des gesamten Kurvenverlaufs durch Vergleich mit einem vorab erstellten Referenzband verglichen und bewertet. Angeregt durch die Erfahrungen mit diesem System hat die Fa. Dr. Gödde Schweißüberwachung die Weiterentwicklung des bewährten Systems STUD-DI für die Spitzenzündung zu einem Überwachungssystem STUD-DI\_H für die Hubzündung vollzogen und während der Laufzeit dieses Projektes ein zweites Überwachungssystem zur Verfügung gestellt. Beide Systeme zeichnen die benötigten Kurven in geeigneter Signalqualität auf.

Der Schwerpunkt des Projektes ist die Erkennbarkeit qualitätsmindernder Einflüsse durch die Prozessüberwachung, um somit das Schweißergebnis auch ohne zerstörende Prüfungen sicher beurteilen zu können. Ausgehend von einer guten Schweißqualität (Referenzschweißungen) werden verfahrenstechnische Variationen relevanter Schweiß- und Randbedingungen wie feuchter Keramikring, öl- und wasserbenetzte Blechoberflächen, einseitiger Masseanschluss und verschiedene Schutzgase an gebräuchlichen artgleichen Bolzenschweißverbindungen aus unlegierten und voll-austenitischen Stählen sowie Aluminium vorgenommen. Die Schweißungen werden unter praxisnahen Randbedingungen in Wannennlage (Grundblech horizontal) ausgeführt. Alle Versuche werden mit der gebräuchlichen Minuspolarung des Bolzens ausgeführt.

Die Qualitätsminderungen werden anhand von Sichtprüfungen, Biegeprüfungen, Durchstrahlungsprüfungen, Zugprüfungen sowie Schliiffuntersuchungen ermittelt. Der Schweißbadschutz erfolgt durch Keramikringe beim normalen Bolzenschweißen mit Hubzündung. Beim Kurzzeitbolzenschweißen werden Schweißungen mit den Schutzgasen Ar+18%CO<sub>2</sub>, Ar+10%CO<sub>2</sub>, Ar+2,5%CO<sub>2</sub>, Ar+50%He+2%CO<sub>2</sub> und Ar+15%He sowie ohne Schutzgas ausgeführt. Die Messaufzeichnungen erfolgen beim Keramikringbolzenschweißen weitgehend durch das System PQS-Weld und beim Kurzzeitbolzenschweißen durch das System STUD-DI\_H.

Anhand der Untersuchungen sind Abweichungen der Schweißparameter Stromstärke, Schweißzeit, Abhub, Eintauchtiefe, Eintauchgeschwindigkeit im Vergleich zu den Referenzschweißungen in den Messkurven erkennbar. Durch Übereinanderlegung mehrerer Referenzschweißungen einer Variante ergibt sich ein Streuband einer Prozessgröße. Die Breite des Streubandes ist ein Maß für die Prozessstabilität. Fällt eine Schweißung außerhalb des Streubandes, wird dies im Messprotokoll vermerkt.

Auch die Variationen der Randbedingungen wie feuchter Keramikring, wasser- oder ölbenetzte Blechoberfläche, verzinktes Blech, einseitiger Masseanschluss sowie unterschiedliche Schutzgase lassen sich gegenüber der Referenzschweißung in den Messkurven erkennen. Die Referenzschweißung wurde unter den Bedingungen entfettetes (trockenes) Blech, trockener Keramikring und symmetrischer Masseanschluss ausgeführt.

#### Analysen der Messkurven

Die Analysen des Stromstärkeverlaufes führen zu den nachfolgenden charakteristischen Merkmalen sowohl bei Nutzung von thyristorgesteuerten Gleichrichtergeräten wie auch bei Inverterstromquellen:

- der Beginn der Hauptstromphase = Beginn der Schweißzeit,
- der Effektivwert der Stromstärke,
- die Nachbrennzeit (kein Lichtbogen) beim Eintauchen nach dem Kurzschluss.

Der Stromverlauf enthält aufgrund der Konstantstromcharakteristik der Stromquelle keine weitere Information über die Variation der Randbedingungen.

Die Lichtbogenspannung gibt Hinweise zur Störgröße anhand folgender Merkmale:

- der Effektivwert der Spannung in der Hauptstromphase,
- der Spannungsabfall beim Eintauchen = Ende der Schweißzeit,
- die Neigung (oder Krümmung) des Spannungsverlaufes (absteigend, aufsteigend),
- evtl. Kurzschlüsse während der Hauptstromphase,
- die Welligkeit.

Der Spannungsverlauf ist die am deutlichsten variierende Messgröße beim Hubzündungsbolzenschweißen. Neben der Abhängigkeit von der Lichtbogenlänge (Abhub) sind die Einflüsse der Randbedingungen gut erkennbar.

Der Verlauf der Bolzenbewegung enthält folgende Informationen:

- Abhub (konstanter Wert),
- Eintauchgeschwindigkeit,
- Eintauchtiefe.

Die Abhubgeschwindigkeit hat keine qualitätsbestimmende Bedeutung. Aus den Daten werden die Kenngrößen Schweißzeit  $t$  und Schweißenergie ( $U \times I \times t$ ) berechnet.

#### Bewertung von Vergleichsschweißungen mit Störgrößen

Beim Hubzündungsbolzenschweißen an Stahlwerkstoffen gelingen fehlerhafte Schweißungen mit Fehleranteilen größer 25 % nur bei extremer Variation eines einzelnen Schweißparameters, z.B. bei Halbierung von Stromstärke oder Schweißzeit bei ansonsten Referenzbedingungen. Erst durch kombinierte fehlerhafte Einstellung mehrerer Schweißparameter oder in Kombination mit einer ungünstigen Randbedingung werden Schweißungen mit hohen Fehleranteilen größer als 30 % ausgeführt. Bei den Randbedingungen haben der feuchte Keramikring und das wasserbenetzte Blech einen besonders schädlichen Einfluss. In beiden Fällen ergibt sich ein deutlich höheres Spannungsniveau von im Mittel plus 5 – 6 V gegenüber der Referenzschweißung. Bei ölbenetzten Blechen stellt man ebenfalls eine vergleichbare Spannungserhöhung wie bei der Wasserbenetzung fest. Allerdings wirkt sich die Ölbenetzung mit einem selbstverflüchtigen Öl in keinem Fall negativ auf das Schweißergebnis aus. In diesem Fall erfolgt eine Unterscheidung anhand der Bewertung der Kurvenneigung. Darin besteht der nennenswerte Vorteil des Systems PQS-Weld.

Blaswirkung – ein häufiger Schweißfehler in der Praxis - kann dagegen kaum am Spannungsverlauf detektiert werden. Hier gibt die Eintauchtiefe die relevante Information. Etwa eine Halbierung der Eintauchtiefe (oder mehr) deutet im Vergleich zu den Referenzbedingungen auf Blaswirkung mit der Folge unvollständiger Wulstbildung hin. Die ausgeführten Schweißungen mit Blaswirkung weisen gute Belastungswerte auf. Erst durch Kombination fehlerhafter Einstellungen ergeben sich gering belastbare Schweißverbindungen mit hohen Fehleranteilen.

#### Serienerprobung

Die Serienerprobung mit dem PQS-Weld-System wurde an Keramikringbolzenschweißungen, an Kurzzeitbolzenschweißungen ohne Schutzgas sowie an Aluminiumbolzenschweißungen vorgenommen. Dabei werden je Versuchsreihe mindestens 200 Schweißungen ausgeführt. Nach Erstellung der Referenzbänder anhand von mehr als 30 Lernschweißungen werden die anschließenden Schweißungen durch das System bewertet. Die SchweißEinstellung bleibt konstant. Es werden gezielt Störgrößen wie öl- und wasserbenetzte Blechoberfläche, verzundertes Blech, einseitiger Masseanschluss, feuchter Keramikring und falscher Bolzenwerkstoff in die Schweißserie eingebracht. Die Untersuchungen haben eine sehr gute Trefferquote von über 90 % bei der Detektierung der Störgrößen ergeben. Allerdings wurden teilweise auch Gut-Schweißungen mit bestandener Biegeprüfung und unauffälligem Sichtbefund mit einem Anteil von ca. 5 % als fehlerhaft erkannt. Bei den Untersuchungen hat sich eine ältere Schweißpistole als prozessinstabil gezeigt.

Anhand einer Vielzahl an Bolzenschweißversuchen wird eine gute Detektierbarkeit gezielt eingebrachter Störgrößen (Randbedingungen) durch das untersuchte QS-System PQS-Weld nachgewiesen. Die Ergebnisse sind in einer Datenbank hinterlegt und stehen interessierten Nutzern zur Verfügung. Die Ergebnisse helfen somit bei der (Weiter-)Entwicklung der Überwachungssysteme, z.B. von STUD-DI\_H. Sie vereinfachen aber auch die Erkennung und Auslese fehlerbehafteter Hubzündungsbolzenschweißungen sowohl bei Fertigungsvorbereitung als auch während der laufenden Fertigung unmittelbar nach dem Schweißvorgang.

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.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF-Nr. 14.881 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: Harms & Wende GmbH (Hamburg), Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH (Wörthsee-Ettersschlag), Köster & Co GmbH (Ennepetal), Nelson Bolzenschweiß-Technik GmbH & Co. KG (Gevensberg) und BTH-Tech GmbH (Dachau) sowie an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

München, den 12.09.2008

Dipl.-Ing. F. Zech