

Integration des Lichtbogenbolzenschweißens mit Spitzenzündung in Stanz- und Umformwerkzeuge zur Blechteilfertigung

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Dominic Gruß
geboren am 18.03.1979 in Wolfsburg

2012

Tag der mündlichen Prüfung: 02.07.2012

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Friedrich-Wilhelm Bach

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens danke ich für die Betreuung dieser Arbeit sowie seine vertrauensvolle und wohlwollende Unterstützung während meiner Institutstätigkeit.

Zudem bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Friedrich-Wilhelm Bach für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates sowie bei Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Poll für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Integration und Überwachung des Schweißens von Normteilen in Blech-Umformwerkzeuge“ (IGF-Nr.14938N) erzielt. Dieses Kooperationsprojekt zwischen dem IPH – Hannover, der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München und unterstützenden Firmen wurde mit Mitteln des BMWi finanziell gefördert und durch die Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) fachlich begleitet. Den beteiligten Institutionen und Unternehmen danke ich für Ihre engagierte Unterstützung.

Besonderer Dank gilt Herrn Andreas Jenicek für viele Anregungen und die Unterstützung bei der Auswertung der Messergebnisse. Herrn Dr. Josef Gödde danke ich für die Unterstützung bei der Umsetzung der Schweißüberwachung. Weiterhin danke ich Herrn Dr. Thomas Reiter für die konstruktiven Diskussionen sowie Herrn Heinz Soyer jun. und Herrn Thomas Volborth für die Bereitstellung von Geräten und Materialien für die Versuche.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei allen Kollegen, studentischen Mitarbeitern und Diplomanden für die gute freundschaftliche Zusammenarbeit. Insbesondere danke ich den Kollegen Friedrich Breves, Dirk Faikosch, Tilmann Rütger und Dr. Malte Stonis für die geleistete Unterstützung und hilfreichen Anmerkungen. Dr. Thomas Hassel, Dr. Sven Hübner und Karsten Müller danke ich für die kritische Durchsicht und die hilfreichen Anmerkungen zu meiner Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie für die Ermöglichung des Studiums und die Unterstützung während dieser Zeit.

Hannover, im Juli 2012

Dominic Gruß

Kurzfassung

Blechteile verlangen zur Montage oftmals stiftförmige Fügeelemente wie Gewindebolzen welche bei hohen Anforderungen an die Dichtigkeit oder den elektrischen Kontakt schweißtechnisch gefügt werden. Wenn das Erscheinungsbild der Blechrückseite nicht beeinträchtigt werden soll oder bei nur einseitiger Zugänglichkeit der Schweißstelle an dünnwandigen Hohlstrukturen bieten sich Lichtbogenbolzenschweißverfahren an, die bisher separat an Schweißstationen ausgeführt werden. Diese mehrstufige Bearbeitung macht Handhabungsoperationen und Zwischenlagerungen von Teilen notwendig. Um die Prozesskette zu verkürzen sind Lösungen zur Integration des Lichtbogenbolzenschweißens in Blechbearbeitungswerkzeuge erforderlich.

In dieser Arbeit wird eine Lösung zum Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung innerhalb von Blechbearbeitungswerkzeugen dargestellt. Das entwickelte Schweißmodul wird in einem Werkzeug mit Hilfe einer Bandanlage automatisiert. In Versuchen im getakteten Betrieb werden die erreichbare Fügequalität sowie die Wechselwirkungen zwischen Schweißprozess und Werkzeug analysiert und die Prozessstabilität dargestellt. Anhand praxisorientierter Störeinflüsse wird die Robustheit des integrierten Schweißprozesses untersucht.

Schlagnworte: Blechverarbeitung, Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung, Folgeverbundwerkzeug, Prozessintegration, Automatisierung

Abstract

Sheet metal parts for fastening often require pin-shaped joining elements such as threaded studs. In case of high requirements on the tightness or the electrical contact these elements are joined by welding processes. If the appearance of the back side of thin-walled hollow structures should not be impaired or the welding area is accessible only one-sided arc stud welding processes are favoured. Arc stud welding processes up to now are executed on separate welding stations. For it handling operations and storage of parts are necessary. To shorten the process chain solutions for integrating the arc stud welding in sheet metal working tools are required.

In this thesis a solution for capacitor discharge (CD) arc stud welding with tip ignition in sheet metal working tools is presented. The developed welding module is automated in a tool using a metal strip conveyor system. In experiments the attainable joining quality, the interaction between tool and welding process and the process stability by automatic line operation are analyzed. On the basis of practice-orientated disturbances the robustness of the integrated welding process is examined.

Keywords: sheet metal working, capacitor discharge (CD) arc stud welding with tip ignition, follow-on tool, process integration, automation

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	III
Kurzfassung	IV
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Formelzeichen und Abkürzungen.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Werkzeugintegrierte Fertigungsverfahren.....	4
2.1.1 Einpressverfahren.....	5
2.1.2 Gewindeformen.....	5
2.1.3 Widerstandsschweißen.....	5
2.2 Lichtbogenbolzenschweißen	7
2.3 Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung	9
2.3.1 Anwendungsbereiche der Spitzenzündung.....	15
2.3.2 Automatisierung des Bolzenschweißens.....	15
2.3.3 Prozesseinflussgrößen beim Kontaktverfahren.....	16
2.3.4 Schweißüberwachung, Qualitätssicherung und -prüfung	23
2.3.5 Verarbeitbare Werkstoffe	27
2.3.6 Sonderanwendungen und aktuelle Entwicklungen.....	29
3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise.....	30
3.1 Motivation	30
3.2 Zielsetzung	32
3.3 Vorgehensweise	32
4 Prozesstechnik und Versuchsanlage	34
4.1 Anforderungen und Randbedingungen.....	34
4.2 Schematischer Anlagenaufbau.....	37
4.3 Schweißstufe.....	38
4.3.1 Bolzenzuführung	38
4.3.2 Schweißtechnische Komponenten	43
4.3.3 Schutz des Werkzeuges vor Schweißspritzer	47

4.4	Bandanlage und Versuchswerkzeug.....	49
4.5	Abmessungen des Versuchsteiles	52
4.6	Anlagensteuerung und Automatisierung	53
4.6.1	Pressensteuerung	53
4.6.2	Anlagensteuerung	54
4.6.3	Maßnahmen gegen Fehler und Folgeschäden.....	56
4.7	Überwachung des Schweißprozesses	58
5	Experimentelle Untersuchungen.....	61
5.1	Verwendete Werkstoffe.....	62
5.2	Beurteilung der Fügequalität	63
5.2.1	Sichtprüfung der Schweißzone.....	63
5.2.2	Biegeprüfung und Ausknöpfversuche.....	63
5.2.3	Schliffuntersuchungen	65
5.3	Analyse der Schweißmechanik.....	65
5.4	Einstellung der Prozessparameter	70
5.4.1	Kapazität.....	71
5.4.2	Ladespannung und Aufsetzkraft.....	72
5.4.3	Prozessanalyse	74
5.4.4	Festlegung der Prozesseinstellung für den Serienversuch.....	76
5.5	Prozessstabilität im Serienversuch	77
5.5.1	Tragfähigkeit und Bindequalität	77
5.5.2	Prozessverhalten im Serienversuch	79
5.5.3	Fehlzündungen.....	85
5.6	Prozessrobustheit gegen Störeinflüsse.....	86
5.6.1	Unterbrechung eines Massekontaktes	87
5.6.2	Mit Öl benetztes Blech.....	89
5.6.3	Mit Wasser benetztes Blech	92
5.6.4	Ausfall der Absaugung	93
5.6.5	Bolzen mit verkürzter Zündspitze	94
5.6.6	Permanente Absaugung.....	96
5.6.7	Mischverbindungen mit Bolzen aus austenitischem CrNi-Stahl.....	98
5.6.8	Vergleich der untersuchten Störeinflüsse	100

5.7	Verarbeitung von verzinktem Blech	103
5.8	Fügegenauigkeit	106
5.8.1	Positionsgenauigkeit	106
5.8.2	Orientierungsgenauigkeit	107
6	Auswirkungen der Prozessintegration auf das Werkzeug	109
6.1	Beherrschung der Spritzerbildung	109
6.2	Risiken bei der Bolzenzuführung	113
7	Zusammenfassung und Ausblick	117
8	Quellenverzeichnis	119
	Anhang	128
	Lebenslauf	132

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$[A_{ab}]$	mm ²	Strömungsquerschnitt, abfließend
$[A_S]$	mm ²	Schweißquerschnitt
$[A_{zu}]$	mm ²	Strömungsquerschnitt, zufließend
$[C]$	F	Kondensatorkapazität
$[c]$	N·mm ⁻¹	Federsteifigkeit
$[c_F]$	N·mm ⁻¹	Federsteifigkeit der Schweißfeder
$[d]$	mm	Durchmesser
$[d_{aus}]$	mm	mittlerer Ausknöpfdurchmesser
$[d_B]$	mm	Bolzenenddurchmesser
$[d_S]$	mm	Schweißdurchmesser
$[F]$	N	Kraft
$[F_{auf}]$	N	Aufsetzkraft
$[F_F]$	N	Federkraft
$[I]$	A	Strom
$[I_k]$	A	Kurzschlussstrom
$[I_{max}]$	A	maximaler Schweißstrom
$[I_S]$	A	Schweißstrom
$[I_Z]$	A	Zündstrom
$[L]$	H	Induktivität
$[l_0]$	mm	Federlänge, entspannt
$[l_{stat}]$	mm	Federlänge, statisch vorgespannt
$[l_{vor}]$	mm	Federlänge, statisch und dynamisch vorgespannt
$[l_Z]$	mm	Zündspitzenlänge
$[m]$	g	Masse
$[n_{vor}]$	1	Federvorspannstufe
$[R]$	Ω	Ohmscher Widerstand
$[r]$	mm	Radius

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$[s_0]$	mm	Blechdicke
$[s_{ein}]$	mm	Eintauchtiefe
$[s_{vor}]$	mm	Federvorspannweg
$[t]$	s	Zeit
$[t_B]$	s	Bindedauer
$[t_{l,max}]$	s	Dauer bis zum Strommaximum
$[t_s]$	s	Lichtbogenbrenndauer
$[t_z]$	s	Vorwärmdauer
$[U]$	V	Spannung
$[U_L]$	V	Ladespannung
$[U_{max}]$	V	maximale Lichtbogenspannung
$[U_S]$	V	Lichtbogenspannung
$[U_Z]$	V	Zündspannung
$[VarK]$	%	Variationskoeffizient
$[v_{auf}]$	$m \cdot s^{-1}$	Auftreffgeschwindigkeit
$[W]$	W·s	Energie
$[W_L]$	W·s	Ladeenergie
$[W_S]$	W·s	eingetragene Schweißenergie
$[z]$	mm	Stößelposition
$[\rho]$	$kg \cdot m^{-3}$	Massedichte

Abkürzungen

C	Kohlenstoff (-gehalt)
CAD	Computer-Aided Design
CD	Capacitor-Discharge (Kondensatorentladung)
CEV	Kohlenstoffäquivalent
CF	Keramikring (zum Schmelzbadschutz)
CNC	Computerised Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
EF	entfettet
Fa.	Firma
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
IPH	Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
KE	Kondensatorentladung
LZ	Lieferzustand
N. N.	Nomen nescio
OT	Oberer Totpunkt
PA	Schweißposition in Wannenlage
PC	Personalcomputer
PT	Schweißbolzen mit Außengewinde und normalem Flansch
PTFE	Polytetrafluorethylen
Ref.	Referenzeinstellung
SG	Schutzgas (zum Schmelzbadschutz)
SLV	Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STUD-DI	Software der Firma Dr. Josef Gödde Schweissüberwachungen
TwinCAT	SPS-Software der Firma Beckhoff
UT	Unterer Totpunkt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
WEZ	Wärmeeinflusszone

1 Einleitung

Blechteile werden in größeren Serien meist mit Hilfe von Folgeverbund- oder Transferwerkzeugen gefertigt. Die einzelnen Bearbeitungsschritte umfassen üblicherweise Trenn- und Umform- sowie Fügeoperationen.

Zur Montage von Blechteilen ist oftmals die Anbindung von Fügeelementen wie Muttern und Bolzen erforderlich. Diese Funktionselemente erfordern in vielen Fällen eine stoffschlüssige Anbindung wie beispielsweise Gewindebolzen zum Anschluss der Erdung bei Gehäuseteilen.

In der Blechteileherstellung spielt der Umfang der Automatisierung insbesondere von Fügeverfahren für die Wirtschaftlichkeit von Produktionsprozessen eine entscheidende Rolle. Zur Kostensenkung besteht weiterhin die Tendenz, die Wertschöpfungsprozesse immer komplexerer Bearbeitungsoperationen direkt in den Blechbearbeitungswerkzeugen auszuführen [Pau10, Neu03, Sum03, Ehm02]. Die Integration von z. B. Einpressverfahren sowie des Gewindeformens in jüngerer Vergangenheit belegen diesen Trend [STE10, RIF03] und beweisen Einsparpotentiale insbesondere von Handhabungsoperationen und bei der Logistik. Derartige Prozessintegrationen erfordern zwar technologisch anspruchsvolle Werkzeug- und Zuführsysteme, erreichen dennoch aufgrund der stabilen und gut reproduzierbaren Bedingungen im Werkzeug meist eine hohe Prozessstabilität und Fertigungsqualität.

Aus dem Bereich schweißtechnischer Fügeprozesse innerhalb automatisierter Umformwerkzeuge sind bisher lediglich Anwendungen von Widerstandsschweißverfahren wie Punkt- und Buckelschweißen von Fügeelementen wie Muttern bekannt [OCO10, UTM07, Pen02, Arb99]. Die dabei erforderlichen relativ langen Prozesszeiten sowie der hohe Energieeintrag beschränken die integrierte Anwendung dieser Verfahren. Zudem ist Widerstandsschweißen auf dünnwandigen Hohlstrukturen an denen die Fügestelle rückseitig nicht zugänglich ist aufgrund der erforderlichen Schweißkräfte nur eingeschränkt möglich [SLV02]. Darüber hinaus weisen Buckelschweißverbindungen i. d. R. Spalte auf, die das Korrosionsverhalten der Verbindung beeinträchtigen.

Für vollflächige stoffschlüssige Anbindungen von stiftförmigen Funktionselementen werden vielfach Lichtbogenbolzenschweißverfahren angewendet.

Diese Verfahren zeichnen sich insbesondere aus durch:

- nur einseitig erforderlichen Zugang zur Fügestelle bei geringer Fügekraft,
- geringe Beeinflussung der rückseitigen Blechoberfläche,
- hohe Prozessgeschwindigkeit,
- vollflächige Kontaktierung und
- hohe Dichtheit.

Viele Bauteile aus dünnen und oftmals bereits beschichteten Oberflächen erfordern gefügte Funktionselemente mit rückseitig makelloser Fügestelle. Um dies zu gewährleisten sind ein geringer Energieeintrag und kurze Schweißzeiten unter etwa 5 ms erforderlich [Tri98c]. Unter diesen Anforderungen wird meist das Bolzenschweißverfahren mit Spitzenzündung eingesetzt [Tri97].

Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung ist durch seine einfache Fügekinematik, kurze Prozesszeit und geringen Wärmeeintrag prädestiniert für dünnwandige Bauteile mit hohen Ansprüchen an Dichtheit, Verbindungsfestigkeit und Optik. Es ermöglicht sogar das Schweißen auf verschiedenartig beschichteten Blechen ohne zusätzliche Vor- und Nachbehandlung. Bild 1.1 zeigt einige beispielhafte Teile wie z. B. Gehäuseelemente, Rohrleitungen und Blenden die mit durch Spitzenzündungsverfahren aufgeschweißten Fügelementen versehen sind.



Bild 1.1: Beispielhafte Teile mit aufgeschweißten Gewindebolzen
[Bildquelle: Fa. Soyer]

Der verarbeitbare Durchmesser der Bolzen bewegt sich bei diesem Verfahren etwa zwischen 1 mm und 12 mm.

Lichtbogenbolzenschweißverfahren werden bisher stets außerhalb der Blechbearbeitungswerkzeuge auf separaten Stationen meist am einzelnen Blechteil manuell, teil- oder vollautomatisiert ausgeführt. Diese räumliche und zeitliche Trennung der Stanz- und Umformoperationen vom Fügeprozess zieht eine aufwendige Handhabung sowie eine komplizierte Logistik der Blechteile nach sich und wirkt sich nachteilig auf die erreichbare Fügequalität aus.

Untersuchungen oder gar Lösungen für in Blechverarbeitungswerkzeuge integrierte Bolzenschweißprozesse sind bisher nicht bekannt. Herausforderungen für deren Integration in Blechbearbeitungswerkzeuge sind u. a. die sichere Handhabung und Entfernung der entstehenden Schweißspritzer, ohne den Schweiß- und den Blechbearbeitungsprozess negativ zu beeinträchtigen. Darüber hinaus ist eine zuverlässige Prozessüberwachung wichtig, um Werkzeugschäden aufgrund fehlerhafter Schweißungen zu vermeiden.

2 Stand der Technik

Blechbauteile sind aufgrund Ihrer wirtschaftlichen Fertigung und des effizienten Materialeinsatzes in vielen Produkten des täglichen Lebens zu finden. Kleine Blechbauteile werden vielfach einstufig mit Folgeverbundwerkzeugen gefertigt. Dabei werden die erforderlichen Bearbeitungsschritte, wie Trenn- und Umformvorgänge, direkt hintereinander in einem Werkzeugsystem ausgeführt. Das vom Coil zugeführte Blechmaterial wird dabei schrittweise mit jedem Pressenhub automatisch zum nächsten Bearbeitungsschritt weitertransportiert. Die Bauteile bleiben während der Bearbeitung mit einem Trägerstreifen verbunden und werden erst am Ende des Prozesses vereinzelt. Die einzelnen Werkzeugstufen sind oftmals modular gestaltet. Vorteil der Fertigung im Folgeverbund ist der präzise Transport über den Trägerstreifen der meist nur ein Vorschubaggregat am Werkzeugeinlauf erfordert.

Um die Wirtschaftlichkeit sicherzustellen und die Qualität in der Blechteilefertigung weiter zu erhöhen, werden Hubzahlen gesteigert und zunehmend komplexere Fertigungsschritte in die Werkzeuge integriert [Gru02]. Durch Prozessintegration werden Handhabungsschritte eingespart, die Prozesskette verkürzt und die hohe Positionsgenauigkeit des Blechteiles im Werkzeug genutzt. In Bild 2.1 sind die konventionelle und die integrierte Prozesskette zum Vergleich schematisch dargestellt.

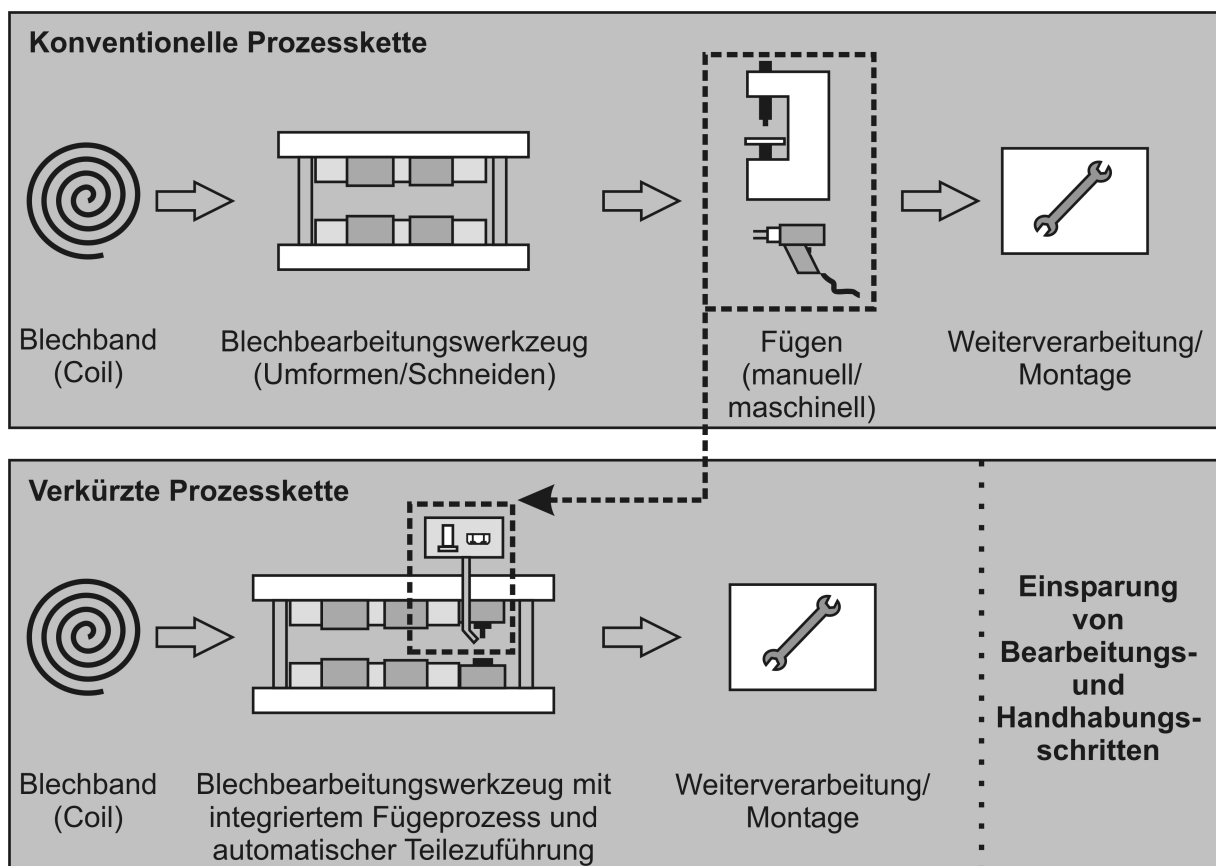


Bild 2.1: Konventionelle und integrierte Prozesskette im Vergleich

Größere Teile werden i. d. R. aus einzelnen Platinen im Transfersystem gefertigt. Die Blechteile werden dabei einzeln mit einem separaten Greifsystem von Stufe zu Stufe weiter befördert. Falls die Herstellung fertig fallender Teile erforderlich ist, werden auch Kombinationen aus Folgeverbund- und Transferbearbeitung eingesetzt, wobei die Blechteile vor Verlassen des Werkzeuges vom Trägerstreifen abgetrennt und vereinzelt weiter befördert werden.

In diesem Kapitel wird auf die existierenden werkzeugintegrierten Anbindungsverfahren von Fügeelementen eingegangen und der Kenntnisstand zum Lichtbogenbolzenschweißen dargestellt.

2.1 Werkzeugintegrierte Fertigungsverfahren

Um innerbetrieblichen Transport, Zwischenlagerung und Peripherieanlagen einzusparen sollen Blechteile nach Möglichkeit einbaufertig aus den Werkzeugen fallen. Zugleich erfordern viele Blechbauteile für eine lösbare Montagemöglichkeit die Anbindung von Funktionselementen wie Innengewinden oder Gewindebolzen. Dazu ist insbesondere die Integration von Fügeoperationen für Standardelemente wie Bolzen und Muttern erforderlich [Poh10, Bec85, Bra85].

Kraft- und formschlüssige Einpressverbindungen werden hingegen bereits umfangreich innerhalb von Blechbearbeitungswerkzeugen hergestellt. Um z. B. vollflächige spaltfreie Verbindungen mit hoher Tragfähigkeit oder Verbindungen mit geringem elektrischem Widerstand zu realisieren, werden vielfach stoffschlüssige Fügeverfahren gefordert. Werkzeugintegriert werden derartige Anbindungen bisher ausschließlich durch Widerstandsschweißverfahren realisiert. Viele Produkte erfordern jedoch, beispielsweise aufgrund einer nur einseitig möglichen Zugänglichkeit zur Fügestelle, die Anwendung von Lichtbogenbolzenschweißverfahren welche bisher auf separaten Schweißstationen am Einzelteil ausgeführt werden.

Die Verfügbarkeit geeigneter Zuführtechniken, die der Geometrie der Fügeelemente sowie den kinematischen Bedingungen und dem Bauraum im Werkzeug angepasst sind, ist eine wesentliche Bedingung zur wirtschaftlichen Integration von Fügeprozessen in Blechbearbeitungswerkzeuge [Neu03].

Aufgrund geringer Material- und Fertigungskosten, wird die Herstellung komplexer funktionsintegrierter Blechteile mit wachsenden Stückzahlen und kurzen Taktzeiten trotz hoher Werkzeugkosten schnell wirtschaftlich [RUE04]. Dies bedeutet, dass Fertigungsschritte, die nicht ins Werkzeug integriert oder entsprechend getaktet betrieben werden können, anteilig hohe Kosten verursachen.

EHL und BINDING weisen auf das erhebliche wirtschaftliche Potential zur Reduzierung des Umlaufvermögens aufgrund der Senkung von Durchlaufzeiten durch Prozessintegrationen hin [Ehl85]. Höhere Investitionskosten der Anlagen können durch die Einsparung von Kapitalbindungskosten zu einem Großteil ausgeglichen oder gar übertroffen werden.

2.1.1 Einpressverfahren

Zur werkzeugintegrierten Anbringung von Funktionselementen haben sich umformtechnische Fügeverfahren bewährt [Scl10, Idl08, Hel01, Hah99]. Sie sind wirtschaftlich, einfach in Umformwerkzeuge integrierbar und gut beherrschbar. Dabei ist in der Praxis überwiegend die Zuführtechnik der Fügeelemente für die Prozessstabilität ausschlaggebend. Als rein mechanische Verfahren sind sie nahezu frei von begleitenden Störeffekten [Rut03]. Durch die Integration in die Werkzeuge reduzieren sich die Kosten für Fügeoperation, Handhabung und Logistik deutlich.

Typische Dimensionen eingepresster Bolzen und Muttern bewegen sich zwischen den Gewindegrößen M5 und M12, eingesetzt bei Blechdicken zwischen 0,6 und 5,0 mm [ASG07]. Die Elemente können unabhängig vom Blechwerkstoff in zuvor hergestellte Lochungen mit hohen Taktraten eingepresst werden.

Nachteilig bei Einpressverfahren sind die erforderliche Lochung des Bleches und die damit verbundene Beeinträchtigung der Rückseite. Für Anwendungen, die hohe Anforderungen an die Dichtheit und Korrosionsbeständigkeit stellen, können Einpressverbindungen problematisch sein [Fue06, Wan06]. Nachträgliche Positionsänderungen der Fügeelemente erfordern das Versetzen der Lochung und damit eine umfangreiche Überarbeitung des Werkzeuges. Weiterhin erreichen Einpresselemente bei dünnen Blechen, die in Anbetracht von Materialeinsparung und Leichtbau tendenziell bevorzugt werden, nur noch eingeschränkte Tragfähigkeiten. Es besteht die Gefahr des Ausknöpfens der Fügeelemente. Die erforderliche beidseitige Zugänglichkeit beim Einpressvorgang schränkt die Anwendung weiter ein.

2.1.2 Gewindeformen

Muttergewinde werden auch häufig werkzeugintegriert direkt in Blechdurchzüge oder Lochungen eingeformt [Scm10]. Mechanisch oder elektronisch synchronisiert mit der Werkzeugbewegung können Innengewinde mit Taktraten bis zu 150 Hub/min geformt werden. Die Gewindeachse kann dabei in beliebiger Richtung zur Werkzeugbewegung orientiert sein.

Vorteilhaft bei diesem Verfahren sind die günstige Materialausnutzung und hohe Verdrehsicherheit sowie die Tatsache, dass die Gewinde keine äußeren Spalte aufweisen und damit unanfällig sind gegenüber Spaltkorrosion. Die Gewinde weisen eine hohe Oberflächengüte sowie hohe statische und dynamische Belastbarkeit auf und zeigen keinen thermischen Verzug [STE10]. Nachteile von ins Blech geformten Innengewinden sind die schwierig zu gewährleistende Dichtheit sowie die Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes der Rückseite.

2.1.3 Widerstandsschweißen

Bei Fügeverbindungen von Standardelementen können hohe Anforderungen an die Dichtheit, an den elektrischen Kontakt oder an das Erscheinungsbild der rückseitigen Oberfläche oftmals nur durch schweißtechnische Anbindung ausreichend erfüllt werden. Aus dem Bereich stoffschlüssiger, thermischer Fügemethoden die integriert in

Blechbearbeitungswerkzeugen oder Transferketten eingesetzt werden, sind bisher ausschließlich Widerstandsschweißverfahren bekannt.

Die Integration eines Schweißprozesses zum Fügen von Verbindungselementen in Blechbearbeitungswerkzeuge wurde erstmals von NEUBAUER wissenschaftlich untersucht. Dabei wurden Integrationskonzepte für Widerstandspressschweißverfahren entwickelt und realisiert, die sich gegen Störeinflüsse wie z. B. durch den für die Stanz- und Umformprozesse erforderlichen Schmierfilm robust erwiesen [Neu03]. Im getakteten automatisierten Betrieb stellten sich übliche Zuführsysteme für die mit Schweißbuckeln versehenen Fügeelemente als primäre Störquellen heraus.

Zum integrierten Widerstandsbuckelschweißen von Verbindungselementen in Folgeverbundwerkzeugen wurden von den Unternehmen OCON Automated Systems, GR Tool & Automation und Ultra Tool & Manufacturing einbaufertige Module entwickelt. Diese erreichen Taktraten bis zu 60 Hub/min und werden für Bolzen und Muttern der Dimension M5 bis M12 eingesetzt [OCO10, Pau10, Kre08, UTM07, FMA06, Pen02, Arb99]. Widerstandsschweißmodule für Stanz- Biegeautomaten der Firma Otto Bihler erreichen Taktungen bis zu 120 Muttern pro Minute [BIH08, BIH07].

Fügeelemente für das Widerstandsschweißen weisen meist eine charakteristische Buckelstruktur auf, die auf das Blech gepresst wird. Durch einen sehr hohen Stromfluss von bis zu 100 kA und die relativ kleine Kontaktfläche schmilzt das Material aufgrund der Widerstandserwärmung und die Fügeelemente werden unter der wirkenden Presskraft verschweißt. Die Anlagentechnik für dieses Verfahren erfordert nur eine geringe Investition, ist relativ prozesssicher und führt zu Verbindungen mit hoher Tragfähigkeit. Zudem ermöglicht Widerstandsschweißen eine direkte Verbindung mehrfacher Blechüberlappungen.

Nachteilig bei Widerstandsbolzenschweißverfahren sind die nur punktuellen, linsenförmigen Verschweißungen an den Stellen der Buckel, wodurch nur relativ geringe Dauerschwing- und Schälfestigkeiten erreicht und groß dimensionierte Kontaktflächen verlangt werden [Jen02, Kil97]. Zudem treten aufgrund des relativ hohen Wärmeeintrages mit zunehmender Energiezuführung verstärkt Anlaufverfärbungen, rückseitige Deformationen sowie Schweißspritzer auf [Wag07] und insbesondere bei Muttern besteht die Gefahr von Verzug. Aufgrund der relativ hohen Schweißkräfte ist das Buckelschweißen auf dünnwandigen Hohlstrukturen bei ausschließlich einseitiger Zugänglichkeit der Fügeelemente nur eingeschränkt nutzbar [SLV02].

Eine Weiterentwicklung des Widerstandsbuckelschweißens ist das so genannte Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen). Dieses Verfahren wird auch häufig als Capacitor-Discharge-Welding oder CD-Schweißen bezeichnet. Eine Kondensatorstromquelle ermöglicht dabei einen hohen Maximalstrom mit hoher Stromanstiegsgeschwindigkeit und damit kurze Schweißzeiten von 8 bis 25 ms bei geringem Energieeintrag. Dadurch können Anlaufverfärbungen und Verzug verhindert werden [CON10, Dor97].

2.2 Lichtbogenbolzenschweißen

Lichtbogenbolzenschweißprozesse dienen dem Aufschweißen stiftförmiger Elemente aus Metall auf metallische Werkstücke. Sie werden nach DIN EN ISO 4063 [DIN4063] in die Gruppe der Lichtbogenpressschweißverfahren eingeordnet und grundsätzlich nach der Art der Lichtbogenzündung in Hub- und Spitzenzündung unterschieden [DIN14555, DVS0901, KOE10a]. Bild 2.2 zeigt eine Übersicht der Lichtbogenbolzenschweißverfahren mit jeweils charakteristischen Anwendungsgebieten.

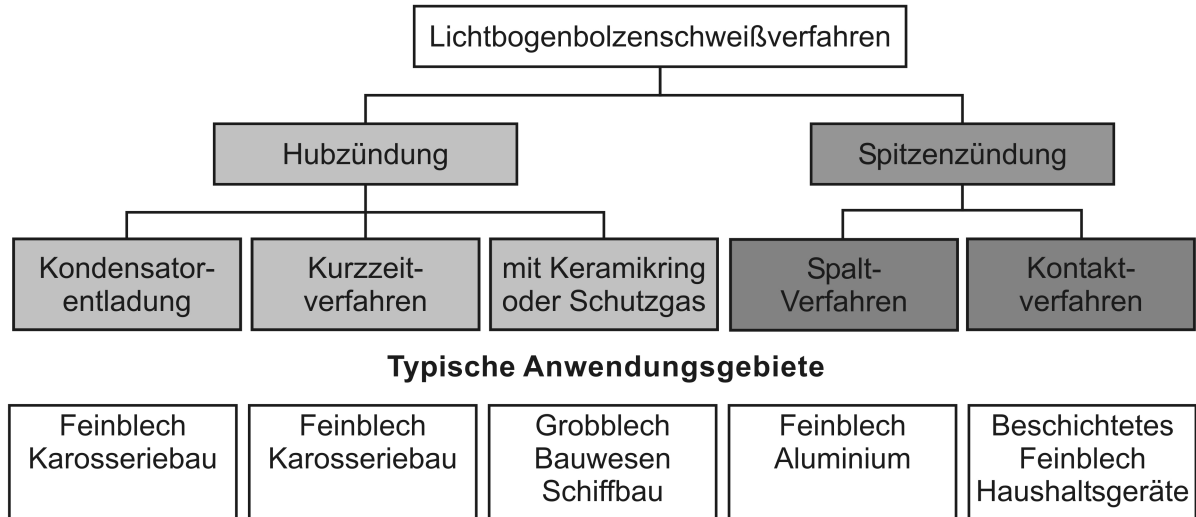


Bild 2.2: Übersicht der Lichtbogenbolzenschweißverfahren nach [DIN14555]

In Tabelle 2.1 sind die Werte wichtiger Prozessparameter der verschiedenen Verfahren zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Wichtige Prozessparameter der verschiedenen Bolzenschweißverfahren [DIN14555, SOY10]

Zündung	Bolzenschweißverfahren (nach DIN EN ISO 4063)	Lichtbogenbrenndauer [t_s] in ms	Schweiß-Ø [d_s] in mm	max. Stromstärke [I_{max}] in A	min. Blechdicke [s_0] in mm ($\sim d_B$)
Hubzündung	mit Keramikring (CF) (783)	100–1.500	3–25	300–3.000	1 ($0,25 \cdot d_B$)
	mit Schutzgas (SG) (783)	100–800	3–16	300–2.000	1 ($0,125 \cdot d_B$)
	Kurzzeitverfahren, ggf. mit Schutzgas (784)	10–100	3–12	bis 1.800	0,6 ($0,125 \cdot d_B$)
	Kondensatorentladung (785)	3–10	3–10	bis 4.000	0,5 ($0,1 \cdot d_B$)
Spitzenzündung	Kontaktverfahren (786)	1–3	0,8–12	bis 5.000	0,5 ($0,1 \cdot d_B$)
	Spaltverfahren (786)	0,5–2	0,8–10	bis 10.000	0,5 ($0,1 \cdot d_B$)

Die Spitzenzündungsverfahren werden abhängig von ihrer Fügekinematik eingeteilt in das Spalt- und das Kontaktverfahren. Neben dieser Differenzierung sind in der Literatur auch abweichende Verfahrensbezeichnungen nach der Art der Stromquelle, der Schweißzeit oder der Methode des Schmelzbadschutzes anzutreffen [Kli07a, Tri93a, Tri99].

Bei den Hubzündungsverfahren erfolgt die Zündung des Lichtbogens durch Abheben des Bolzens vom Werkstück unter Stromfluss und einer anliegenden Spannung. Die Bewegung des Bolzens erfolgt meist durch einen Elektromagneten, welches den Bolzenhalter gegen eine Druckfeder vorspannt und anschließend loslässt [Tri97]. Aufgrund der relativ langen Schweißdauer ist eine Regelung des Prozesses möglich. Aktuelle Entwicklungen nutzen gut regelbare Linearantriebe zur Bewegung des Bolzens [TUC10]. Durch Steuerung der Hubbewegung wird die Schweißdauer und über die Stromstärke die Schweißenergie eingestellt. Nach Eintauchen des Bolzens in das Schmelzbad erlischt der Lichtbogen und die Schmelze erstarrt. Erforderlich sind eine Stromquelle, eine Bewegungsvorrichtung sowie eine Steuerung zur Koordinierung der Bolzenbewegung, der Lichtbogenlänge und des Schweißstromes [Tri96, Tri94a]. Genutzt werden meistens Gleichrichter, Inverter oder bei kurzen Schweißzeiten Kondensatoren. Hubzündungsverfahren werden meist im Schiff-, Hoch- und Brückenbau bei größeren Bolzendurchmessern bis etwa 25 mm auf entsprechend dicken Werkstücken eingesetzt. Der Einsatz von Schutzgas oder eines Keramikringes dient dazu, das Schmelzbad und den Lichtbogen zu stabilisieren.

Moderne Invertertechnik ermöglicht das so genannte Kurzzeitbolzenschweißen mit höheren Regelgeschwindigkeiten und nahezu rechteckförmigen Verläufen hoher Ströme [Tri96, Tri93a] und damit kurze Prozesszeiten mit geringerem Energieeintrag und reduzierter Einbrandtiefe. Das Kurzzeitverfahren erreicht automatisiert Taktraten bis etwa 30 Schweißungen pro Minute und wird insbesondere in der Automobilindustrie zum Schweißen auf verzinkten Blechen eingesetzt [Hee02]. Aufgrund der kurzen Lichtbogenbrennzeit kann auf Schutzgasabschirmung verzichtet werden [Hah82]. Allerdings besteht dadurch tendenziell ein höheres Risiko der Porenbildung bei verschmutzter Schweißstelle [Kli07b]. In der Praxis wird meist auf eine vorherige Reinigung der Oberflächen verzichtet und eine längere Schweißzeit in Kauf genommen um Rost oder gar Primerschichten durch den Lichtbogen zu entfernen. Insbesondere zum Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit dem Kurzzeitverfahren werden zum besseren Aufbrechen der Oxidschicht seit kurzem Wechselstromquellen zusammen mit geregelten Linearantrieben verwendet [Sch08].

Um die Schweißdauer durch höhere Stromstärke und schnelleren Stromanstieg weiter zu verkürzen, werden auch bei der Hubzündung Kondensatorstromquellen eingesetzt [DIN14555, Kli07a].

2.3 Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung

Das Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung wurde Ende der 40er Jahre entwickelt und basiert auf einem Patent von GRAHAM [Gra53]. Es eignet sich aufgrund der kurzen Schweißzeiten und geringen Einbrandtiefen besonders zur Anbindung von Fügeelementen auf dünnen Blechen. Seit seiner Erfindung ist dieses Verfahren umfangreich analysiert, beschrieben und weiter entwickelt worden [Lau02, Sta98, Tri97, Sch83, Eic71, Wel64, DVS0903].

Das Spitzenzündungsverfahren ist charakterisiert durch die Lichtbogenzündung mit Hilfe einer kleinen Zündspitze an der Stirnseite des Fügeelementes. Ihre Aufgabe ist es, die Distanz zwischen Bolzen und Werkstück zu erzeugen, welche der Schweißstrom über einen Lichtbogen überbrücken muss. Die Zündspitze stellt durch ihre Geometrie eine stets gleich bleibende Lichtbogenlänge und -brenndauer sicher und damit einen reproduzierbaren Energieeintrag in die Schweißstelle [Wel64]. Aufgrund der kurzen Prozesszeit und des geringen Wärmeeintrages ist dieses Verfahren prädestiniert für dünnwandige Bauteile bei hohen Anforderungen an die Unversehrtheit der Blechrückseite, der Dichtheit sowie der Wirtschaftlichkeit des Fügeprozesses. Die Spitzenzündung wird üblicherweise bei Blechdicken von 0,5 bis 5 mm angewendet, wobei das Verhältnis von Blechdicke zu Bolzendurchmesser bis etwa 1:10 betragen kann [Dor97].

Der Durchmesser der verarbeitbaren Bolzen bewegt sich bei der Spitzenzündung etwa zwischen 0,8 und 12 mm [DIN14555, SOY10]. Je nach Anforderung werden Fügeelemente in Form von Grob- und Normgewindebolzen, Gewindebuchsen, Stiften, Nägeln und Nadeln eingesetzt. Von der zylindrischen Geometrie abweichend werden auch L- und U-förmige Steckverbinder erfolgreich verschweißt. Bild 2.3 zeigt das Spektrum von Fügeelementen für die Spitzenzündung. Die Abmaße genormter Elemente und insbesondere ihrer angespressten Zündspitze sind eng toleriert festgelegt [DIN13918, DVS0903]. Die Geometrie der Zündspitze beeinflusst die Schweißzeit wesentlich [Lau02, Sta98, Sch83]. Toleranzen der Zündspitzengeometrie haben deutliche Auswirkungen auf das Schweißergebnis und sind in dem gesteuerten, aber unregelmäßigen Prozess erst nach erfolgter Schweißung feststellbar [Lau02].



Bild 2.3: Fügeelemente für die Spitzenzündung etwa im Maßstab 1:1
[Bildquelle: Fa. Soyer]

Ein am Bolzenfuß mit der Zündspitze angepresster Flansch schützt das Fügeelement vor Übergreifen des Lichtbogens auf dessen Außenfläche [Tri97, Die78, Wel64] und vergrößert den Fügequerschnitt. Damit wird die Tragfähigkeit der Schweißverbindung auch bei geringen Bindefehlern gewährleistet [Arn80]. Es werden auch Bolzen ohne oder mit reduziertem Flansch verwendet, z. B. zur besseren Montierbarkeit.

Die Schweißenergie wird meist von einer Batterie mehrerer Impulskondensatoren geliefert und beträgt — abhängig vom Fügequerschnitt — zwischen 50 und 2.300 Ws. Die üblichen Kapazitäten der Kondensatoren liegen zwischen 44 und 132 mF, wobei die Ladespannungen zwischen 50 und 220 V betragen. Bei Stahlwerkstoffen wird i. d. R. der positive Pol über das so genannte Massekabel an das Werkstück angeschlossen (Bild 2.4). Aufgrund der anodenseitig höheren kinetischen Energie der Elektronen ist somit der werkstückseitige Energieeintrag erhöht. Damit kann die gegenüber dem Bolzen stärker ausgeprägte radiale Wärmeableitung im Blech kompensiert werden.

Die Entladung der Kondensatorbatterie wird beim Kontaktverfahren durch Schalten eines Thyristors ausgelöst, beim Spaltverfahren durch Berührung zwischen Zündspitze und Werkstück. Die mechanische Aufsetzkraft des Bolzens im Bereich zwischen 40 und 100 N wird meist über eine vorgespannte Schraubenfeder oder pneumatisch aufgebracht. Aufgrund des hohen Druckes der Metaldämpfe und der kurzen Lichtbogenbrenndauer ist der Einsatz von Schutzgas nicht erforderlich [Bak77].

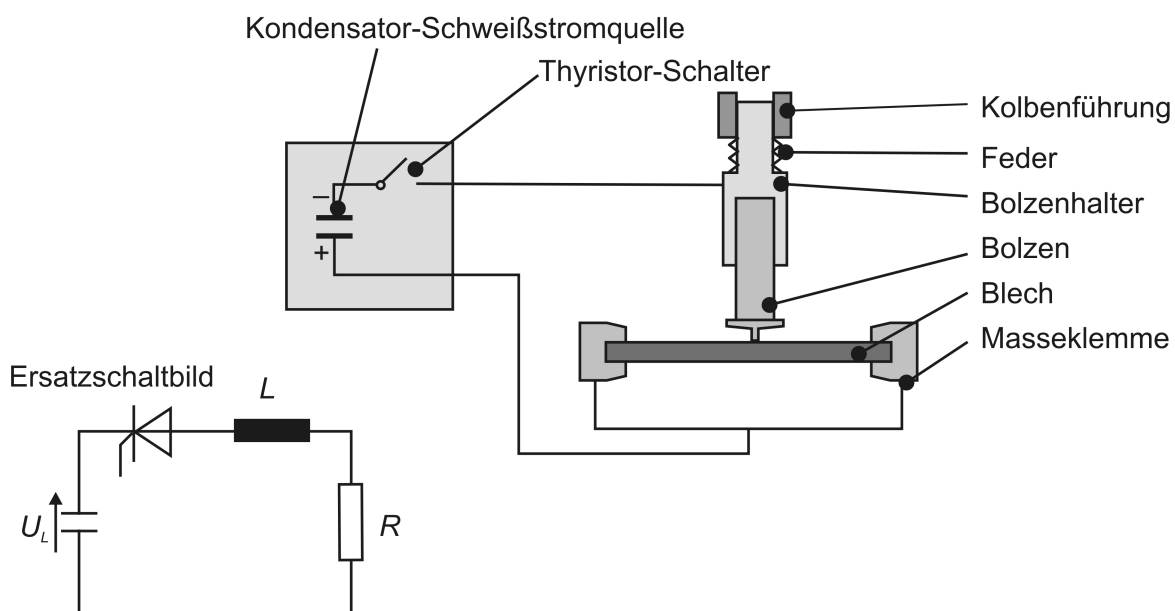


Bild 2.4: Ersatzschaltbild und Aufbau des Schweißstromkreises

In Abhängigkeit von der Bolzenbewegung beim Zünden des Lichtbogens werden beim Spitzenzündungsverfahren die Varianten Kontakt- und Spaltverfahren unterschieden (Tabelle 2.1) [DIN14555]. Die Differenzierung besteht darin, dass sich der Bolzen beim Kontaktverfahren vor Beginn der Zündphase in Ruhe befindet und über eine vergleichsweise hohe Federspannung (bis über 100 N) auf das Werkstück ge-

drückt wird. Beim Spaltverfahren hingegen wird der Bolzen entweder elektromagnetisch vom Werkstück abgehoben, gegen eine Feder vorgespannt und trifft zu Beginn der Zündphase beschleunigt auf das Werkstück oder der Bolzen wird pneumatisch auf das Werkstück zu bewegt. Durch die Zündung mit der Kontaktierung zwischen Bolzen und Werkstück besteht beim Spaltverfahren keine Gefahr von Verformungen der Zündspitze bei einem vorherigen Aufsetzen. Jedoch besteht das Risiko einer vorzeitigen so genannten Frühzündung, während der Bolzen noch einen zu großen Abstand zum Werkstück hat und verspätet nachgeführt wird.

Das Spaltverfahren ermöglicht durch besonders kurze Schweißzeiten einen geringen Energieeintrag und somit das Schweißen besonders dünner Bleche und insbesondere von Aluminiumwerkstoffen. Bedingt durch einen ungleichmäßigen Zündeinsatz lassen sich mit dem Spaltverfahren hohe reproduzierbare Fügequalitäten nicht gewährleisten [Lau02].

Die Spitzenzündung verläuft in drei sich klar voneinander abgrenzenden Prozessphasen: Die Zünd-, Lichtbogen- und Bindephase, Tabelle 2.2 [Lau02, Fra99, Sta98, Tri97, Sch83, Eic71]. In Bild 2.5 sind die Arbeitsphasen beim Kontaktverfahren dargestellt.

Tabelle 2.2: Prozessphasen beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung

Prozessphase	Ablauf
Zündphase	Beginn der Kondensatorentladung Verdampfung der Zündspitze durch Widerstandserwärmung Zünden des Lichtbogens
Lichtbogenphase	Ausbildung lokaler Schmelzbäder an Bolzen und Blech Entstehung von Kurzschlussbrücken mit Spritzerbildung Bewegung des Bolzens in Richtung des Werkstückes
Bindephase	Kontaktierung der Schmelzbäder Erlöschen des Lichtbogens und Ableitung der Wärme Erstarrung der Schmelze

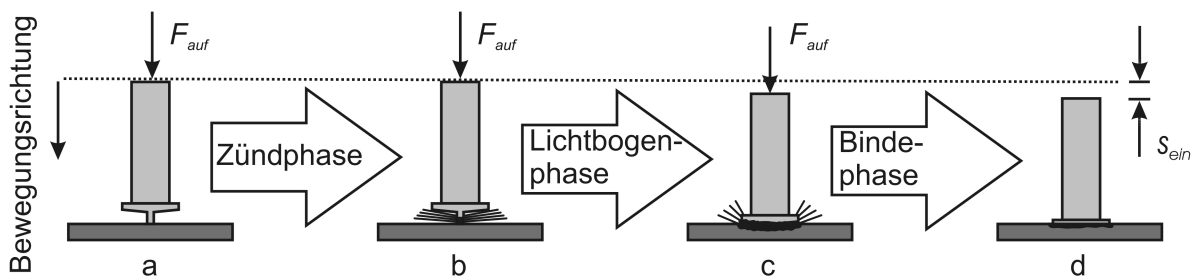


Bild 2.5: Prinzip der Spitzenzündung im Kontaktverfahren

Zündphase

Durch Schließen des Schweißstromkreises über einen Thyristor wird die Kondensatorentladung über eine Kurzschlusschaltung eingeleitet. In der in ihren Abmessungen auf den Fügequerschnitt und den Werkstoff angepassten Zündspitze tritt bei

Kontakt mit dem Werkstück aufgrund der hohen Stromdichte von bis zu 10^6 A/cm² [IEK87] eine starke Widerstandserwärmung auf. Die Stromstärke steigt dabei aufgrund des geringen Innenwiderstandes des Kondensators in der Größenordnung von mehreren MA/s an. Der Stromanstieg wird im Wesentlichen durch die Induktivität des Schweißkabels begrenzt [GOE10a]. Dies führt zum Anschmelzen und teilweiser explosionsartiger Verdampfung der Zündspitze, die mit einem Druckimpuls und einem hohen Schalldruckpegel bis 154 dB einhergeht [Fra99]. Aufgrund des nun unterbrochenen Kontaktes steigt die Spannung auf bis zu 60 V an und es zündet ein Lichtbogen in der Lücke zwischen der verschwindenden Zündspitze und dem Werkstück. Das Gas in dieser Lücke wird dabei ionisiert und bildet das Lichtbogenplasma. Zu Beginn der Lichtbogenzündung ist die Lichtbogen­spannung signifikant höher als im späteren Verlauf der anschließenden Lichtbogenphase, da die Ionendichte im Lichtbogenplasma noch nicht ihren Endwert erreicht. Die Dauer der Zündphase wird auch als Vorwärmdauer bezeichnet.

Lichtbogenphase

Die Lichtbogenphase beginnt mit der Ionisierung des Metaldampfes und dem Zünden des Lichtbogens beim Maximum der Spannungskurve nach einem deutlichen Spannungssprung. Dieser entsteht beim Aufreißen der schmelzflüssigen Kurzschlussbrücke an der Zündspitze. Die Ausprägung des Spannungssprunges im Bereich des Maximums ist signifikant für einen korrekten Zündvorgang und hängt u. a. von der Oberflächenbeschaffenheit des Werkstückes ab. Das Lichtbogenplasma im Schweißspalt bleibt bis zum Ende der Lichtbogenbrennzeit erhalten, wobei an den Lichtbogenansatzstellen ein hoher Energieeintrag erfolgt. Der Lichtbogen erhitzt die Metalloberflächen an beiden Oberflächen des Schweißspaltes bis über den Schmelzpunkt. Dabei strebt der Lichtbogen als masseloser elektrischer Leiter stetig nach energetisch günstigsten Brennbedingungen und bewegt sich dabei über den gesamten Schweißquerschnitt. Bereits bei Zündung des Lichtbogens herrscht in dem Spalt zwischen Bolzen und Werkstück eine hohe Temperatur. Dadurch bildet sich ein Lichtbogenplasma mit hoher Ionendichte, wodurch die Spannung des Lichtbogens mit einigen 10 V relativ gering bleibt. In kalter Luft wären zum Überschlag über einen typischen Spalt von 0,5 mm zu Lichtbogenzündung etwa 500 V erforderlich.

Während der Lichtbogenphase wird der Bolzen durch Beaufschlagung mit einer Federkraft — beim Spaltverfahren auch pneumatisch — axial in Richtung des Werkstückes bewegt, so dass die Länge des Lichtbogens und damit auch die Lichtbogen­spannung im Prozessverlauf abnehmen. Länge und Brennbauer des Lichtbogens werden durch die Abmessungen der Zündspitze, die insgesamt bewegte Masse und die Höhe der Federkraft bestimmt. Der Lichtbogen erlischt, sobald der Widerstand des metallischen Leiters durch Berührung der Schmelzen von Bolzen und Blech geringer ist als der des Lichtbogenplasmas. Dies ist bereits ab einer Kontaktfläche von 0,1 mm² gegeben [Lau02]. Somit erlischt der Lichtbogen, sobald sich die

Schmelzbäder punktuell an einer Stelle berühren. Zur Vermeidung von Bindefehlern muss der Bolzen in entsprechend kurzer Zeit auf das Blech treffen.

Die Lichtbogenbrenndauer nimmt linear mit der Ladespannung zu [Ros89]. Der Prozess ist dabei relativ tolerant gegenüber Veränderungen der Ladespannung und Kondensatorkapazität, da die Lichtbogenbrenndauer nur einen Bruchteil der gesamten Entladedauer beträgt [Tri97].

Bindephase

Mit Erlöschen des Lichtbogens und großflächigem Kontakt der Schmelzbäder sinken der elektrische Widerstand und damit die an der Schweißstelle abfallende Spannung auf vernachlässigbare Werte. Damit geht der weitere Energieeintrag gegen Null, obwohl durch Restentladung des Kondensators oft noch ein erheblicher Strom fließt. Folglich kühlt die Schweißung rasch ab. Die Abkühlung erfolgt so schnell, dass auch bei 0,5 mm dickem Blech rückseitig keine Anlauffarben auftreten [GOE10a, Lau02].

Die Bolzenbewegung lässt sich nach ausreichender Vermischung und Schweißgutverdrängung nicht positionsgenau abbremsen, so dass sich der Bolzen mit nahezu unverminderter Geschwindigkeit bewegt, bis er auf einen festen Bereich des Werkstückes trifft. Das Verdrängen der Schmelze erfordert dabei keinen großen Kraftaufwand. Die kinetische Energie des Bolzens wird beim impulsartigen Auftreffen auf das Blech in elastische Formänderungsarbeit überführt und führt schließlich zum Prellen des Systems. Dieses ist erkennbar an Schwingungen im Wegverlauf des Bolzens. Die Erstarrung der Schmelze sollte nicht in dieser Rückprallphase erfolgen. Ideal wäre eine zwar durch den Aufprall gedämpfte, aber monoton in Richtung Werkstück ausgeführte Bewegung des Bolzens. Das Verdrängen der Schmelze führt zu einem typischen Spritzerkranz um die Schweißstelle herum.

Auch mit den Spitzenzündungsverfahren sind rückseitige Markierungen, häufig in Form von so genannten Spiegelungen bei nichtrostenden Stählen und Aluminium bis 2 mm Blechdicke nicht vollständig zu vermeiden, aber abhängig von der Oberflächenstruktur meist akzeptabel. Thermische Markierungen oder Anlauffarben treten i. d. R. erst unter 0,5 mm Blechdicke auf [Tri98c, Dor97]. Rückseitige Markierungen und Spiegelungen können ab Blechdicken von 1,2 mm vermieden werden [Arn80]. Bild 2.6 zeigt die Gestalt der Deformation bei dicken und dünnen Blechen schematisch in deutlich übertriebener Form. Bei dicken Blechen tritt durch das Eintauchen des Bolzens meist eine Wölbung nach außen auf, bei dünnen Blechen dominiert eher die Schrumpfung bei der Erstarrung, so dass eine leichte Wölbung nach innen entsteht [Tri98b].

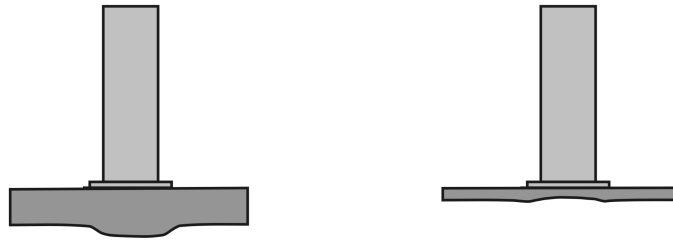


Bild 2.6: Rückseitige Markierungen bei verschiedenen Blechdicken, schematisch
Das Bolzenschweißen mit Spitzenzündung im Kontaktverfahren zeichnet sich gegenüber alternativen Bolzenschweißverfahren durch folgende Aspekte aus:

Technisch

- Hohe Reproduzierbarkeit
- Kein Schutzgas erforderlich
- Geringer Wärmeeintrag und Anlaufneigung, kein Verzug

Wirtschaftlich

- Hohe Prozessgeschwindigkeit
- Gute Mechanisier- und Automatisierbarkeit
- Vor- und Nacharbeiten können meist entfallen

Konstruktiv

- Geringe Einbrandtiefe
- Einseitige Zugänglichkeit ausreichend
- Kritische Materialkombinationen möglich
- Verarbeitung beidseitig beschichteter Bleche möglich [KOE10b]
- Geringe Beeinflussung der Blechrückseite
($s_0 > 0,5$ mm: keine Anlauffarben, $s_0 > 1,2$ mm: keine Markierungen [Dor97, Arn80])

Gegenüber dem Spaltverfahren weicht das Kontaktverfahren nach [SLV03] in folgenden Punkten ab:

- Die Lichtbogenbrenndauer ist länger, wodurch z. B. für die Verdampfung einer Zinkbeschichtung eine längere Zeit zur Verfügung steht.
- Die Auftreffgeschwindigkeit ist aufgrund der Beschleunigung aus der Ruhelage geringer und variiert weniger stark.
- Die Spritzerbildung ist geringer und die Randanbindung besser.
- Die Rückprellbewegungen sind aufgrund der stärkeren Feder geringer.
- Frühzündungen sind nicht möglich.

Für das Spitzenzündungsverfahren charakteristisch ist das im Vergleich zu anderen Schweißverfahren extrem geringe Schmelzvolumen in Relation zu seiner Oberfläche [GOE10a]. Dieses Verhältnis führt zu einer hohen Abkühlgeschwindigkeit, wobei die Gefahr einer Rissbildung aufgrund des absolut kleinen Volumens gering ist.

2.3.1 Anwendungsbereiche der Spitzenzündung

Das Bolzenschweißen mit Spitzenzündung im Kontaktverfahren zeichnet sich u. a. durch die Dichtheit der Verbindung, eine geringe Beeinflussung der Rückseite sowie eine hohe Verbindungsfestigkeit aus. Wichtige branchenspezifische Gründe für die Wahl dieses Fügeverfahrens in der Blechteilefertigung sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

Tabelle 2.3: Branchen in denen Verfahren mit Spitzenzündung angewendet werden und dabei entscheidende Anforderungen [SOY10, Tri97]

Branche	Charakteristische Anforderungen
Bauwesen (Fassadenelemente, Isolierung)	keine Beeinträchtigung der Rückseite Schweißen lackierter Teile einfache Handhabung (Baustellenfertigung)
Anlagenbau (Klimatechnik, Chemie- und Lebensmittelanlagen)	Dichtheit und gute Wärmeleitung einseitige Zugänglichkeit Flexibilität der Position
Elektroindustrie (Gehäuse, Schaltschränke, Teile mit dekorativen Anforderungen)	sicherer elektrischer Kontakt Flexibilität der Position keine Beeinträchtigung der Rückseite
Fahrzeugbau	einseitige Zugänglichkeit Flexibilität der Position hohe Fügegeschwindigkeit
Haushaltsgroß- und -kleingeräte (Weiße Ware, Küchengeräte, Töpfe)	keine Beeinträchtigung der Rückseite Flexibilität der Position sicherer elektrischer Kontakt

Typische Bauteile, die in Folgeverbundwerkzeugen gefertigt und mit Standard-elementen wie Gewindebolzen, -hülsen und Stiften per Spitzenzündungsverfahren versehen werden, sind z. B. Gehäuseteile für Haushaltsgeräte. Die Verarbeitung von Feinblech, etwa bei der Fertigung von Chemieapparaten [Ret98], Maschinen für die Lebensmittelverarbeitung, Fassadenplatten und Schaltschränken erfordert oftmals ausschließlich das Bolzenschweißverfahren mit Spitzenzündung, da die Rückseite mit keinem anderen Verfahren in so geringem Maße beeinträchtigt wird [Tri93a].

2.3.2 Automatisierung des Bolzenschweißens

Nachdem in den 1950er und 1960er Jahren der Fokus der Entwicklung auf der Erhöhung der Prozessstabilität des Bolzenschweißens lag, stand in den 1970er Jahren die Automatisierung im Vordergrund. In dieser Zeit entstanden einzelne oder in verketteten Transferstraßen integrierte mechanisierte Anlagen zur Spitzenzündung mit automatischer Bolzenzuführung [Arn80, Die78]. Aufgrund der bei der Kontaktvariante hohen Andruckkräfte werden Handschweißpistolen mit manueller oder automatischer

Bolzenzuführung primär für Einzelschweißungen und Kleinserien verwendet [Gra77]. Zur Bearbeitung von größeren und variantenreichen Werkstücken wie Gehäuseteilen werden üblicherweise NC-Schweißische, z. T. mit mehreren Köpfen, oder robotergeführte Schweißgeräte verwendet. Das Positionieren der Werkstücke erfolgt manuell oder durch Industrieroboter.

Die Fügeteilezuführung stellt eine der größten Herausforderungen bei der Automatisierung von Fügeprozessen und deren Integration in die Prozesskette der Blechteilefertigung dar [Neu03, Hil85]. Konstruktionen von Zuführmechaniken sind aufgrund der individuellen vom Fügeverfahren, der Fügeteilegeometrie und den Einbau- und Umgebungsbedingungen abhängigen Anforderungen meist Einzellösungen. Grundlegende Funktionsprinzipien bei der Kleinteilezuführung wurden von HESSE systematisch zusammengestellt [Hes00, Hes95].

Die Zuführtechnik beim automatisierten Bolzenschweißen bestimmt entscheidend die erreichbare Taktrate und die Zuverlässigkeit der Anlage. Die Fügeelemente werden dabei üblicherweise als Schüttgut verarbeitet und durch Vibrationseinrichtungen orientiert, vereinzelt und pneumatisch dem Schweißkopf zugeführt. Das Einstecken der Bolzen erfolgt mit der Fügeseite voran in den spannzangenartigen Bolzenhalter [CPL73]. Die Taktraten derartiger Systeme sind vor allem aufgrund der relativ langen Nebenzeiten zum Nachladen auf etwa 30 bis 40 Schweißungen pro Minute je Schweißkopf begrenzt [SOY10, NN91, Die78]. SCHMITT nennt entsprechend eine minimale Taktzeit für automatisierte Bolzenschweißprozesse von 1,5 s [Sch89]. Um das Nachladen des Schweißkopfes von der Bolzenvereinzelung und -zuführung zeitlich zu entkoppeln wurden Mechanismen zur fügeseitigen Bestückung des Bolzenhalters bspw. durch translatorische oder rotatorische Bewegung des Schweißkopfes entwickelt [SOY80]. Diese Systeme setzten sich in der Praxis aufgrund ihrer entsprechend komplizierten Mechaniken nicht durch.

Bekanntere Zuführsysteme, wie sie bspw. bei automatisierten Bolzenschweißstationen oder zur Verarbeitung von Einpresselementen innerhalb von Blechbearbeitungswerkzeugen eingesetzt werden, werden den Anforderungen eines werkzeugintegrierten Bolzenschweißprozesses u. a. bezüglich des Bauraumes und der Kinematik nicht gerecht.

2.3.3 Prozesseinflussgrößen beim Kontaktverfahren

Beim Bolzenschweißprozess mit Spitzenzündung resultieren die wichtigen Kenngrößen wie Lichtbogen Spannung, Schweißstrom, Lichtbogenbrenndauer, eingetragene Schweißenergie und Auftreffgeschwindigkeit aus komplexen Zusammenhängen elektrischer, mechanischer, metallurgischer und thermodynamischer Vorgänge [Fra99].

In der Praxis werden beim Spitzenzündungsverfahren in der Kontaktvariante lediglich die Prozessparameter Ladespannung an der Schweißstromquelle und Aufsetzkraft über die Federvorspannung eingestellt. Bei einigen Geräten kann zudem die Kapazität der Kondensatorbatterie in wenigen Stufen an den Schweißquerschnitt ange-

passt werden. Eine direkte Einstellung von Schweißstrom und Lichtbogenbrenndauer ist aufgrund der fehlenden Regelbarkeit des Prozesses bei der Kondensatorentladung nicht möglich [Tri98c].

Neben den Einstellparametern ist der Schweißprozess von weiteren Einflussgrößen und Randbedingungen abhängig (Tabelle 2.4). Diese bestimmen zusammen die für das Spitzenzündungsverfahren charakteristischen messbaren Kenngrößen.

Tabelle 2.4: Einstellparameter, Einflussgrößen und Kenngrößen beim Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung

Prozessparameter	Wertebereich
Einstellparameter	
Kapazität C	60–132 mF
Ladespannung U_L	50–200 V
Aufsetzkraft F_{auf}	60–100 N
Einflussgrößen	
Schweißquerschnitt A_S	0,2–12 mm
Geometrie der Zündspitze	nach [DIN13918]
Reibung in der Bewegungsvorrichtung	möglichst gering
Steifigkeit des Widerlagers	möglichst hoch
Werkstoffkombination	siehe Tabelle 2.6
Zustand der Werkstückoberfläche	diverse
Ohmscher Widerstand des Schweißstromkreises	möglichst gering
Induktivität des Schweißstromkreises	möglichst konstant
Kenngrößen	
max. Schweißstrom I_{max}	6 kA
max. Lichtbogenspannung U_{max}	60 V
Vorwärmdauer t_z	< 0,5 ms
Lichtbogenbrenndauer t_s	1–3 ms
Eingetragene Schweißenergie W_S	bis etwa 3 kW
Auftreffgeschwindigkeit v_{auf}	0,5–1 m/s

Die Kenngrößen werden anhand der überwachten Verläufe von Lichtbogenspannung, Schweißstrom und Bolzenbewegung ermittelt. Der Stromverlauf wird durch die Lichtbogenspannung kaum beeinflusst [Sta98]. Die für den Prozess maximal zur Verfügung stehende Ladeenergie W_L ist abhängig von der Kondensatorkapazität C und der Ladespannung U_L definiert durch:

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_L^2 \quad (2.1)$$

In Bild 2.7 ist anhand einer beispielhaften Aufzeichnung der Messdaten dargestellt, wie die Kenngrößen des Prozesses ermittelt werden.

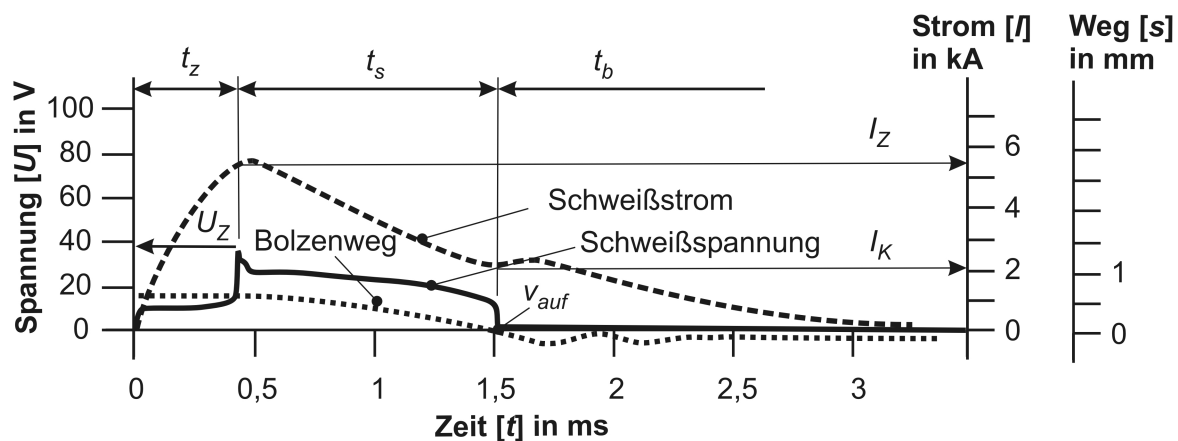


Bild 2.7: Ermittlung der Kenngrößen aus Strom- und Spannungsverlauf beim Spitzenzündungsverfahren in der Kontaktvariante

Da die Kontaktfläche in der Zündphase eine entscheidende Rolle spielt, darf die Aufsetzkraft des Bolzens zu keiner makroskopischen Deformation der Zündspitze führen. Bei der Verarbeitung von Stahlwerkstoffen tritt aufgrund der hohen Festigkeit i. d. R. keine wesentliche Deformation der Zündspitze auf, so dass die Lichtbogenzündung stets durch impulsartiges Verdampfen einer dünnen überhitzten Schmelzschicht in der Kontaktzone zwischen Blech und Bolzen, auch als „harte Zündung“ bezeichnet, eingeleitet wird [Lau02]. Toleranzbedingte Schwankungen wirken sich demnach kaum auf den Prozess aus. Die Toleranz des Durchmessers der Zündspitze beträgt etwa 20 % [DIN13918]. Damit ergibt sich eine Toleranz des vom Quadrat des Radius abhängigen Widerstandes sowie der Zündenergie entsprechend über 30 %. Die Federkraft ist nach unten durch die sich mit ihrer verringernden Bolzengeschwindigkeit begrenzt. Die Zündung sollte bei geringem Entladestrom nach Möglichkeit vor dem Maximum erfolgen, um möglichst viel Wärmeenergie über den Lichtbogen eintragen zu können [Fra99]. Die Zündung erfolgt in der Praxis meist in der Nähe des Strommaximums.

Die Brenndauer des Lichtbogens hängt beim Kontaktverfahren im Wesentlichen von der Weite des Schweißspaltes zu Beginn der Lichtbogenphase und der Bolzenbewegung ab. Das Spaltmaß ist dabei abhängig von der Geometrie und der Verformbarkeit der Zündspitze sowie der Oberflächenrauheit des Werkstückes. Die Bolzenbewegung wird überwiegend von der Federkraft, der beschleunigten Masse und Reibwiderständen der Bewegungsmechanik sowie der Schweißrichtung (Gravitation) bestimmt [GOE10a, Tri98c]. Bei leichten Schweißköpfen genügt eine entsprechend geringe Federkraft zum Erreichen einer ausreichend hohen Auftreffgeschwindigkeit. Mit Zunahme des Schweißstromes durch Erhöhung der Ladespannung oder der Kapazität steigt auch die Druckkraft der Gasexpansion wodurch bei geringen Federkräften die Lichtbogenbrenndauer signifikant verlängert werden kann.

Da die Geschwindigkeiten von Anstieg- und Abfall des Schweißstromes wesentlich durch die Kapazität und die Induktivität des Schweißstromkreises bestimmt werden,

beeinflussen diese Größen ebenfalls die Vorwärm- und Lichtbogenbrenndauer. Bei geringen Strömen kann das Abschmelzen der Zündspitze durch Widerstandserwärmung so langsam erfolgen, wie dessen Bewegung in Richtung Werkstück erfolgt, so dass kein Lichtbogen gezündet werden kann.

Die Lichtbogenbrenndauer, oft auch als Schweißzeit bezeichnet, ist bei Bolzenschweißprozessen definiert als die Zeit zwischen der Zündung des Lichtbogens beim Spannungsmaximum und seinem endgültigen Erlöschen mit dem Kurzschluss des Stromkreises [DIN14555]. Sie ist entscheidend für die Einbrandtiefe und die Entgasung. Die Einbrandtiefe liegt üblicherweise zwischen 0,1 und 0,3 mm und führt nach Aufsetzen des Bolzens und Verdrängung eines Teiles der Schmelze zu Schweißnahtdicken von etwa 0,1 mm [Arn80]. Je kürzer die Lichtbogenbrenndauer, desto höher sind die Anforderungen an die Sauberkeit der Oberfläche [Tri99]. Eine längere Lichtbogenbrenndauer kann durch Verringerung der Federkraft erreicht werden und erzielt ebenfalls hohe Fügequalitäten, wenn die Erstarrung der Schmelze erst nach dem Eintauchen beginnt. Um zu späterer Zeit noch einen genügend hohen Schweißstrom für einen ausreichenden Energieeintrag sicherzustellen, ist ein Stromkreis mit erhöhter Induktivität erforderlich [Lau02].

Bei geringer Lichtbogenbrenndauer tritt eine geringere Aufmischung der Schmelze auf, was das Verschweißen ungewöhnlicher Materialpaarungen gestattet [Tri99]. Dabei muss die Lichtbogenbrenndauer stets ausreichen, um beidseitig ein hinreichend großes Schmelzbad zu erzeugen. Um mit kurzer Lichtbogenbrenndauer ausreichend Energie eintragen zu können, ist ein Schweißstromkreis mit geringer Induktivität und eine hohe Ladespannung zu wählen [Lau02]. Dabei sind entsprechend höhere Federkräfte erforderlich, um den Beginn der Bindephase zu beschleunigen. Aufgrund der kurzen Lichtbogenbrenndauer ist die dabei abgeleitete Wärmemenge gering. Die Stromanstiegsgeschwindigkeit kann sich durch Schwankungen der Induktivität aufgrund Veränderungen der Kabelführung um über 50 % verändern [Lau02].

Voraussetzung zum Erreichen einer hohen Fügequalität ist, dass der Schmelzprozess endet, also der Lichtbogen erlischt und die Bindephase beginnt, bevor die Schmelzleistung negativ wird. Mit steigender Induktivität des Schweißstromkreises verschiebt sich der Schnittpunkt gleicher zu- und abfließender Wärmeströme, an dem die Schmelzleistung zu Null wird, in Richtung eines späteren Zeitpunktes. Dieser Punkt wird auch durch den Zündzeitpunkt des Lichtbogens beeinflusst. Je später im Verlauf der Kondensatorentladung die Zündung erfolgt, desto früher ist der Punkt erreicht, an dem sich das Schmelzvolumen aufgrund abnehmenden Schweißstromes nicht mehr erhöht [Lau02].

Neben den mechanischen Einflussgrößen bestimmt also auch die Induktivität des Schweißstromkreises den Zeitpunkt zu dem die Kristallisation beginnt, abhängig von der Masse und mittlerer Temperatur der Schmelze sowie der Höhe der zu- und abfließenden Wärmeströme [Lau02].

Wichtig in der Lichtbogenphase sind die schnelle Ausbildung eines stabilen Lichtbogens, die beidseitige Ausbildung einer ausreichenden Schmelze und die Vermeidung von Verspritzungen [Fra99]. Ein ungleichmäßig brennender Lichtbogen erzeugt Bindefehler und Schlackeeinschlüsse und starke asymmetrische Spritzerbildung [Ban89].

Als Ursachen für die Verspritzung der Schmelze werden in [Fra99] die Bildung von Kurzschlüssen durch Schmelzbrücken zum Ende der Lichtbogenphase genannt, deren Widerstand noch höher ist als der des Lichtbogens, so dass dieser noch nicht erlischt. Die Überhitzung und Zerstörung dieser Schmelzbrücken führt zu Schweißspritzern. Die Neigung zur Spritzerbildung nimmt dabei mit abnehmender Geschwindigkeit des Bolzens und höherer Oberflächenspannung der Schmelze zu. Bei einem Bolzen der Größe M8 können auf diese Weise bis zu 60 mg oder 65 % des Volumens der flüssigen Phase verspritzt [Fra99]. Das zur späteren Bindung vorhandene Schmelzvolumen kann durch diesen Effekt von Schweißung zu Schweißung so deutlich variieren, dass die Zeiten vom Erlöschen des Lichtbogens bis zum Prellen des Bolzens um über 100 μ s differieren [Lau02]. LAUENROTH ermittelte in seinen Arbeiten einen elektrischen Verspritzungsanteil von 50 % des Schmelzvolumens und einen weiteren Anteil von 60 % des verbleibenden Volumens, der beim Auftreffen des Bolzens mechanisch aus der Fügezone verdrängt wird [Lau02]. Der Einsatz eines Schutzgases mit hohem Argonanteil kann die Spritzerbildung reduzieren, führt jedoch tendenziell zu geringeren Einbrandtiefen [CLO02] und wird aufgrund hoher Kosten vermieden.

Häufige Probleme in der Praxis sind Verschmutzungen der Bewegungsvorrichtung, die die Bewegungsdynamik beeinträchtigen und den Beginn der Bindefase verzögern können. Eine aufgrund von Verschleiß nachlassende Spannkraft des Bolzenhalters kann aufgrund von erhöhtem Kontaktwiderstand zur Bildung von Nebenlichtbögen zwischen Bolzenhalter und Bolzen führen.

Das impulsartige Auftreffen des Bolzens auf dem Blech führt aufgrund der kinetischen Energie der bewegten Masse zu einer Prellung, wobei maximale Prellkräfte zwischen 400 und 800 N auftreten [Lau02]. Die Prelldauer nimmt dabei mit zunehmender Federkraft ab [Sch83]. Bild 2.8 zeigt schematisch das der Prellung zugrunde liegende Feder-Masse-System.

Bewegt sich der Bolzen während der Erstarrung der Metallschmelze gegenüber dem Werkstück, wird die Schweißung negativ beeinflusst. Übermäßige Prellbewegungen des Bolzens oder Federbewegungen des Werkstückes können daher Ursachen für Schweißungen mit verminderter Tragfähigkeit sein [GOE10a]. Zum Erreichen hochwertiger Schweißverbindungen sind zu Beginn der Bindefase ein ausreichendes Schmelzvolumen, eine kurze Verzögerungszeit zwischen Lichtbogenlöschung und Fixierung des Bolzens sowie eine ausreichend hohe und bis zur vollständigen Kristallisation der Schmelze gleichmäßig wirkende Druckkraft erforderlich [Fra99].

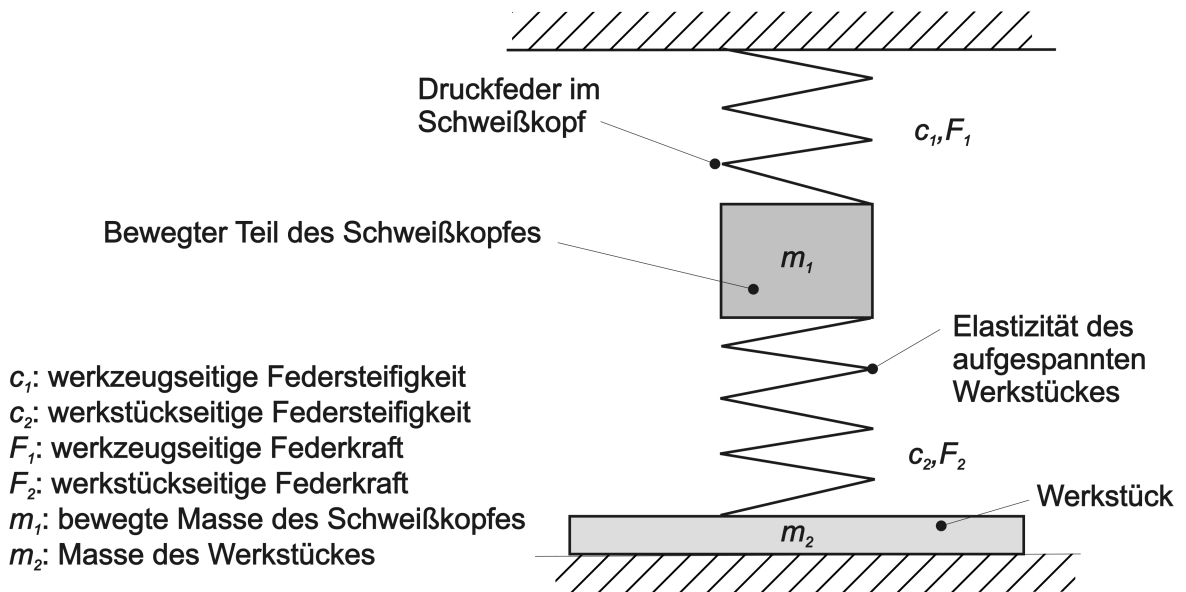


Bild 2.8: Ersatzmodell des Feder-Masse-Systems beim Bolzenschweißen

Bild 2.9 zeigt zusammenfassend schematisch die Wirkungen der einzelnen Einstell- und Einflussgrößen auf die Kenngrößen.

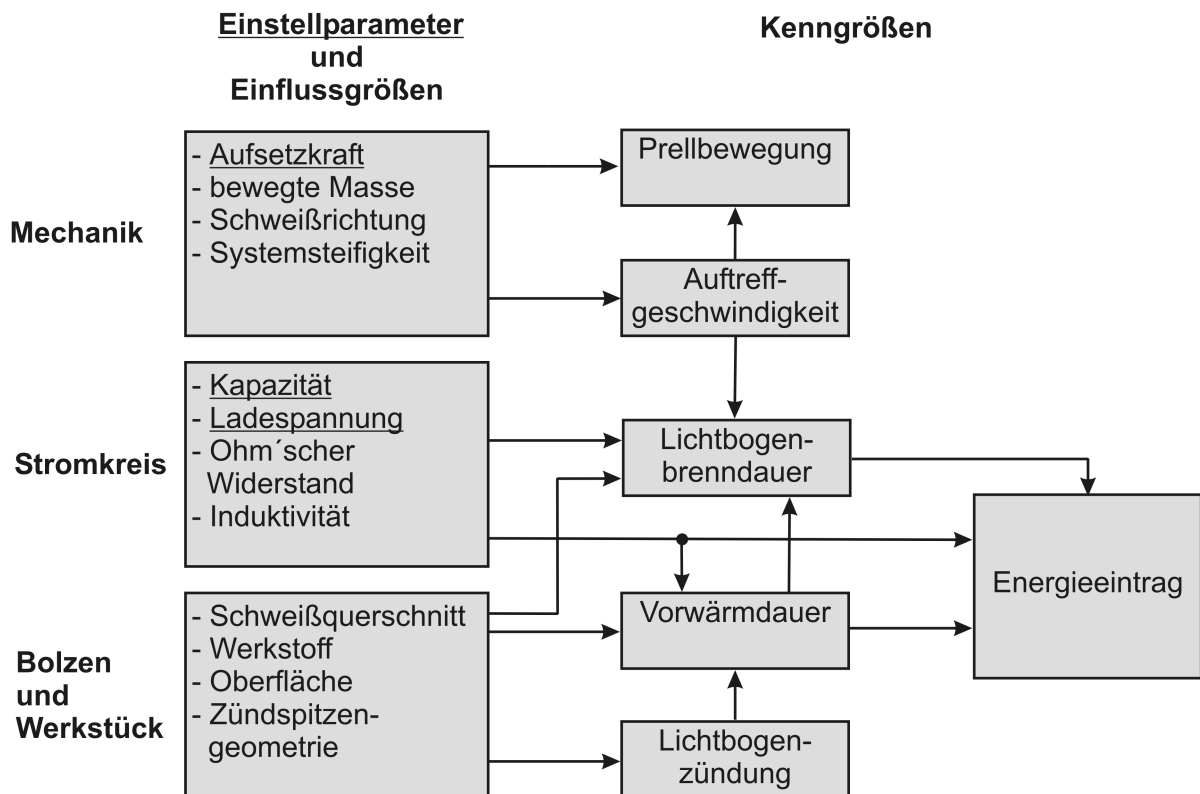


Bild 2.9: Wirkung der Einstellparameter und Einflussgrößen auf die Kenngrößen bei der Spitzenzündung im Kontaktverfahren nach SCHMITT [Sch83]

Einen weiteren Störeinfluss auf den Schweißprozess stellt die Ablenkung des Lichtbogens dar. Diese so genannte Blawirkung führt zu fehlerhaften Verbindungen mit ungleichmäßiger Schweißnaht. Ursachen für Blawirkungen sind meist asymmetrische

elektromagnetische Felder (Bild 2.10 a–f) oder Luftströmungen die zu Bewegungen des Lichtbogenplasmas führen. Der Lichtbogen wird vom positiv gepolten Masseanschluss abgestoßen (Bild 2.10 a) weshalb der Massekontakt stets punktsymmetrisch zur Schweißstelle erfolgen soll (Bild 2.10 b). Anhäufungen ferromagnetischer Masse z. B. bei asymmetrischen Werkstückgeometrien ziehen den Lichtbogen hingegen an (Bild 2.10 c und e). Daher sind ab unter 25 mm Randabstand Probleme mit magnetischer Blaswirkung zu erwarten [Wei66]. Beide Effekte können sich unter günstigen Umständen kompensieren (Bild 2.10 d und f). Die relativ hohen Ströme beim Bolzenschweißen führen auch zu starken magnetischen Feldern um die Stromführung herum, was u. a. bei der Gestaltung der Kabelführung sowie der Fügeitelezuführung zu beachten ist.

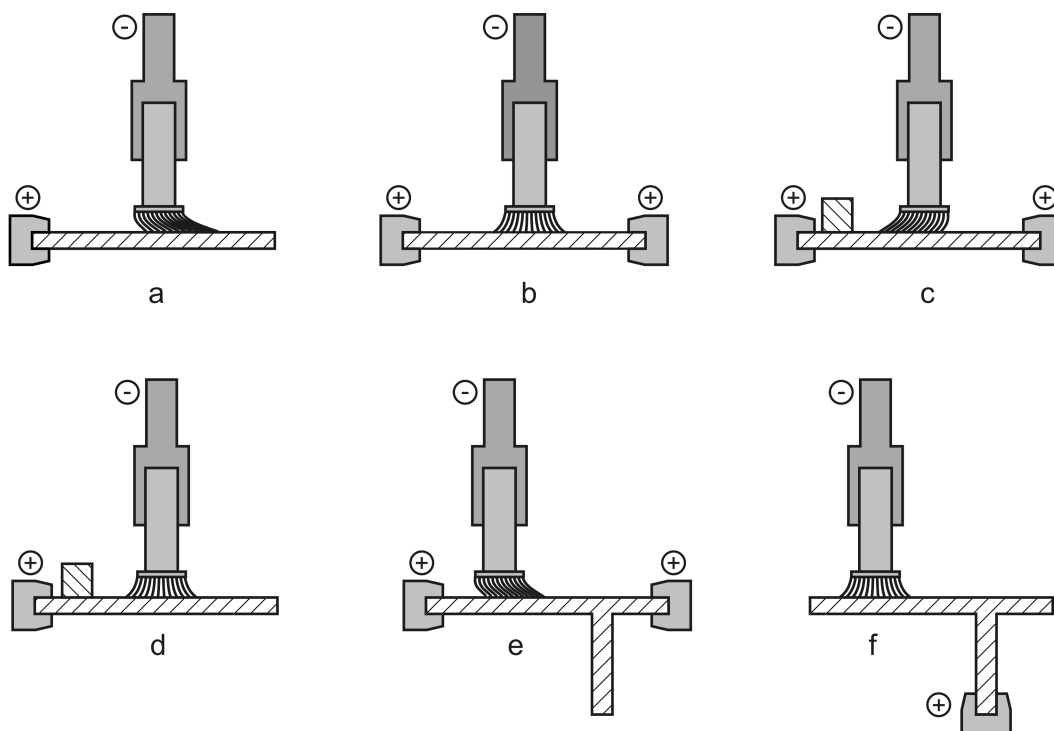


Bild 2.10: Ursachen magnetischer Blaswirkungen nach [DIN14555]

Benetzungen und Verschmutzungen des Werkstückes können den Schweißprozess stark beeinflussen. Eine Benetzung der Blechoberfläche mit entspanntem Wasser, dessen Oberflächenspannung z. B. durch Tenside reduziert ist, oder Öl kann die Größe des Spritzerkranzes reduzieren und Anhaftungen von Ruß und Oxidationsrückständen am Werkstück vermeiden, so dass sich die Werkstücke einfacher reinigen lassen [Tri98c]. Flüssigkeitsbenetzungen werden in der praktischen Anwendung ohne Einschränkungen hinsichtlich der Fügequalität insbesondere bei der Verarbeitung von nichtrostenden Stählen in der Lebensmittel- und Medizintechnik häufig eingesetzt. Dabei ist der Nacharbeitungsaufwand reduziert und Kerben an den Schweißstellen, die schwer zu reinigen wären und die Ansiedelung von Keimen begünstigen, können verhindert werden. Lange Zeit technisch umstritten, konnten die positiven Auswirkungen einer Wasserbenetzung auch metallografisch nachgewiesen werden [SLV03]. Weitgehend ungeklärt ist bisher die Gefahr einer möglichen

Wasserstoffversprödung. Beim Bolzenschweißen von Feinkornbaustählen können unter feuchten Bedingungen wasserstoffinduzierte Risse im Martensitgefüge entstehen. Gefährdet sind insbesondere großflächige Bolzenschweißungen an Tragstrukturen die unter ungünstigen Wetterbedingungen auf Baustellen angebracht werden. Abhilfe kann durch Trocknen und leichtes Erwärmen zur Verhinderung von Kondenswasserbildung geschafft werden [Tri93b]. Untersuchungen mit verschiedenen Benetzungen der Schweißfläche zeigten, dass die Anwesenheit von Kohlenstoff, wie z. B. bei einer leichten Beölung, zu einem verbesserten Zündverhalten des Lichtbogens führt [Arn95]. Stärkere Verschmutzungen erfordern jedoch längere Lichtbogenbrenndauern sowie einen höheren Energieeintrag zur Reinigung und beeinflussen das Ergebnis negativ.

2.3.4 Schweißüberwachung, Qualitätssicherung und -prüfung

Der Spitzenzündungsprozess ist trotz der hohen Geschwindigkeit und fehlender Regelmöglichkeit der elektrischen und mechanischen Parameter bei einer korrekt eingerichteten und stabil arbeitenden Bolzenschweißeinrichtung hochgradig reproduzierbar. Auf dieser Reproduzierbarkeit und dem Vergleich mit empirisch ermittelten Werten von Referenzschweißungen beruht die Funktionsweise von Überwachungssystemen die seit Mitte der 90er Jahre angewendet werden [Tri98c].

Die Messkurven des Strom- und Spannungsverlaufes machen unmittelbar nach dem Schweißprozess eine verhältnismäßig sichere Aussage über die erzielte Schweißqualität möglich. Potenziell fehlerhafte Teile können somit identifiziert und automatisch aussortiert werden. Zur Überwachung werden wegen ihrer guten Aussagefähigkeit primär folgende Parameter herangezogen [MAT92]:

- Vorwärmdauer t_z
- maximale Lichtbogen Spannung U_{max}
- Lichtbogenbrenndauer t_s

FRANZ ET AL. schlagen alternativ vor, die daraus abgeleiteten Größen Energie sowie den Widerstand zu überwachen. Beide Werte reflektieren sowohl Werkstoff und Geometrie als auch den Prozess und die Qualität [Fra99].

Auf Basis der Ergebnisse von HAHN UND SCHMITT [Hah88, Hah82], die die Abhängigkeit der Schweißqualität von der Auftreffgeschwindigkeit aufzeigten, wurde von der Firma OBO Bettermann ein Verfahren zur Überwachung der Bolzenbewegung patentiert [OBO92]. Dieses Verfahren setzt eine konstante Geschwindigkeit während des Fügeprozesses voraus und zielt damit auf das Spaltverfahren ab. Bisherige Entwicklungen bezüglich der Beeinflussung der Bolzenbewegung beim Kontaktverfahren, wie z. B. in [HBS95] beschrieben, hatten das Ziel, durch Dämpfung nach dem Aufprall Relativbewegungen der Fügepartner während der Erstarrung der Schmelze zu vermeiden.

HAHN und SCHMITT schlagen auch eine Überwachung der Schweißgeräusche in Verbindung mit der Lichtbogenbrenndauer vor [Hah81]. Dies hat sich in der Praxis bisher nicht durchgesetzt.

Auch ein Verfahren bei dem die Zündspitzenlänge jedes Bolzens gemessen und die Lichtbogenbrenndauer durch Nachstellung der Auftreffgeschwindigkeit angepasst wird, ist durch die Firma OBO Bettermann patentrechtlich geschützt [OBO01]. Umsetzungen dieser Überwachungskonzepte in der industriellen Praxis sind nicht bekannt.

Anhand der Strom- und Spannungsmesswerte kann die Qualität der Schweißungen durch Vergleich mit als einwandfrei geprüften Referenzschweißungen in der Praxis gut beurteilt werden, da die Kurvenverläufe u. a. auf folgende Einflussfaktoren empfindlich und charakteristisch reagieren [GOE10a]:

- die elektrische Einstellung des Schweißgerätes,
- die mechanische Einstellung der Bewegungsvorrichtung,
- Änderungen des Widerstandes im Schweißstromkreis,
- die Geometrie der Zündspitze,
- die zu fügenden Werkstoffe sowie
- die Oberflächenbeschaffenheit der Fügeflächen (Rauheit, Benetzung, Oxidation).

Eine moderne und umfangreiche Überwachung für Spitzenzündungsverfahren ist das Überwachungssystem STUD-DI der Firma Dr. Josef Gödde Schweissüberwachungen [GOE10a]. STUD-DI wertet etwa 30 Merkmale der Messkurven aus und ermittelt für jedes Merkmal automatisch den zulässigen Toleranzbereich. Zu den Merkmalen gehören die Vorwärmdauer, die Lichtbogenbrenndauer, der Maximalstrom und die Maximalspannung sowie der Spannungsverlauf im Bereich des Maximums. Ein einfaches Toleranzfeld um die Kurven ist nicht ausreichend, da z. B. eine Schweißung deren Lichtbogen früher zündet auch früher erlöschen kann. In diesem Fall wird nicht der Zeitpunkt des Erlöschens, sondern die Brenndauer des Lichtbogens bewertet [GOE10a]. Daher wurde insbesondere die Lichtbogenbrenndauer bereits von ROSTEK als relevante Größe zur Prozessüberwachung identifiziert [Ros89].

Für eine hinreichend gute Auswertung werden in einem Lernmodus die Daten einer Reihe einwandfreier Referenzschweißungen gespeichert. Die Treffsicherheit der erzeugten Grenzwerte sollte anhand von bewusst erzeugten Fehleinstellungen überprüft werden [GOE10a]. Schweißungen mit Überschreitung der errechneten Grenzwerte klassifiziert STUD-DI im Produktionsbetrieb als defekt, auch wenn sie objektiv den Anforderungen noch genügen. Dadurch kann frühzeitig auf schleichende Veränderungen der elektrischen oder mechanischen Einstellungen der Schweißvorrichtung reagiert werden.

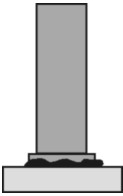
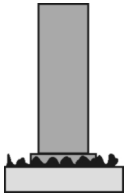
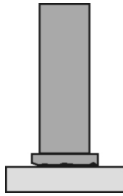
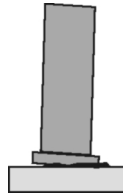
Einfachere Systeme, wie die im Schweißgerät BMS-10P der Firma Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik integrierte Qualitätskontrolle, bewerten die Schweißungen in ähnlicher Form durch Auswertung einer geringeren Anzahl an Kriterien des Strom- und Spannungsverlaufes im Vergleich mit gespeicherten Referenzschweißungen [SOY98].

Ergänzend zu den elektrischen Messwerten wurde in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten die Bolzenbewegung aufgezeichnet und analysiert [Lau02, Sta98, Sch89]. Bis dato sind zur Überwachung von Spitzenzündungsverfahren keine angebotenen Systeme bekannt, die diesen Parameter zusätzlich für die Bewertung des Prozesses heranziehen, so dass auf Fehler in der Bewegungsmechanik des Schweißkopfes nur indirekt geschlossen werden kann.

Um die Qualität der Schweißergebnisse und insbesondere der Referenzschweißungen sicherzustellen, sind für das Spitzenzündungsverfahren verschiedene zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen vorgesehen [DIN14555]. Im Rahmen der Sichtprüfung kann anhand des Erscheinungsbildes des Schweißbereiches sowie der Ausprägung des Spritzerkranzes auf die Qualität geschlossen werden. Verlangt werden dabei eine gleichmäßige Werkstoffverteilung im Schmelzbereich und eine geschlossene, strahlförmige Ausprägung des Spritzerkranzes mit glänzender Oberfläche. Der Durchmesser des Spritzerkranzes sollte 2 bis 3 mm größer als der Flanschdurchmesser sein, wobei der Flansch deutlich in das Schmelzbad eingetaucht und spaltfrei mit dem Blech verbunden sein sollte [Tri08, Tri99]. Ein deutlich breiterer Spritzerkranz deutet auf einen zu hohen Energieeintrag z. B. durch zu hohe Ladespannung oder zu große Kondensatorkapazität hin. Ist der Spritzerkranz hingegen kaum erkennbar, war die eingetragene Energie zu gering. Dies kann an einer zu geringen Ladespannung, aber auch in einer deformierten oder verkürzten Zündspitze begründet sein. Darüber hinaus werden die Lage- und Orientierungsgenauigkeit des gefügten Bolzens sowie die Oxidation und Deformation des Bleches beurteilt. Typische Fehler die bereits bei der Sichtprüfung auffallen können sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Zeigt eine Schweißung durch starke Spritzerbildung einen zu hohen Energieeintrag, sollte mit der Federkraft die Auftreffgeschwindigkeit erhöht oder die Ladespannung des Kondensators verringert werden. Erreicht eine Schweißung eine zu geringe Tragfähigkeit und zeigt auch eine Erhöhung der Ladespannung keine Verbesserung, sollte das Aussehen der Bruchflächen näher betrachtet werden. Sind diese glänzend und wurde die gesamte Fügefläche ohne Verschweißung angeschmolzen, ist über die Federkraft zunächst die Auftreffgeschwindigkeit und ggf. die Ladeenergie zu erhöhen. Reicht die am Gerät einstellbare Ladespannung nicht aus und ist der Energieeintrag zu gering, kann durch Verringerung des Ohmschen und induktiven Widerstandes im Schweißstromkreis geholfen werden [Wel64].

Tabelle 2.5: Durch Sichtprüfung erkennbare Fehlerbilder nach [DIN14555]

	Referenz-schweißung	Äußerlich erkennbare Fehlerbilder		
Ausprägung	Gleichmäßiger Spritzerkranz ohne äußere Bindefehler	Ausgeprägte Spritzerbildung	Spalt zw. Bolzen und Blech	Asymmetrischer Spritzerkranz
				
Ursache	Korrekte Einstellung	Schweißenergie zu hoch und/oder Auftreffgeschwindigkeit zu gering	Schweißenergie und/oder Auftreffgeschwindigkeit zu gering, ungenügende Abstützung	Blaswirkung
Abhilfe	Nicht erforderlich	Ladespannung verringern und/oder Federkraft erhöhen	Schweißenergie und/oder Federkraft erhöhen, Aufspannung versteifen	Massekontakt und Werkstück auf Symmetrie prüfen

Eine einfach auszuführende und aussagekräftige zerstörende mechanische Prüfung der Zähigkeit der Schweißverbindung stellt die Biegeprüfung nach DIN EN ISO 14555 dar [DIN14555]. Unregelmäßigkeiten der Fugestelle sind dabei in die Zone mit Zugbeanspruchung zu legen [Tri08]. Mit dem Spitzenzündungsverfahren gefügte Bolzen müssen mindestens einen Biegewinkel von 30° ohne Rissbildung in der Schweißnaht erreichen. Sollte vorher ein Bruch in der Schweißzone eintreten, ist dies ein Zeichen für einen Fehleranteil durch Poren und Bindefehler von über 20 % der Fügefläche [Tri08]. Bei Hubzündungsverfahren darf eine Rissbildung erst ab einem Biegewinkel von über 60° auftreten. LAUENROTH zeigt, dass die einfache statische 30°-Biegeprüfung bezüglich der Beurteilung der Fügequalität gegenüber der Zugprüfung weniger aussagekräftig ist und empfiehlt, verstärkt die Zugprüfung zur Qualitätsbeurteilung zu verwenden [Lau02].

Die Zugprüfung gilt als erfüllt, wenn der Bruch außerhalb der Schweiß- und Wärmeinflusszone auftritt oder die Nennfestigkeit des Bolzens erreicht wird. Bei dünnen Blechen schert üblicherweise das Blech entlang des Bolzenumfangs ab [Tri08]. Alternativ zur Zugprüfung werden Bolzenschweißverbindungen mit größeren Querschnitten und bei höheren Sicherheitsanforderungen auch mittels Durchstrahlungsprüfungen untersucht [Tri08, DIN14555]. Dabei werden insbesondere Bindefehler und Poren sichtbar gemacht, die meist Zeichen zu geringer Stromstärke oder zu langer Lichtbogenbrenndauer sind [Die78]. Üblicher Weise wird, je nach Qualitätsanforderung, eine Fehlerfläche von 5 bis 10 % toleriert [Tri08, Tri99].

Makroschliffe dienen zur Beurteilung der Einbrandform. Um Schrumpfrisse in der Mitte der Fügezone zu vermeiden, sollte die Schmelzzone in der Mitte dünner sein als am Rand. Makroschliffe können zwar auch Rückschlüsse auf den Anteil von Bindefehlern und Poren geben, lassen aber keine quantitativen Aussagen zur Anbindefläche zu [Tri08]. Härteprüfungen auf den Querschliffen geben Aufschluss über den Härteverlauf in der Schmelzzone.

Ziel sämtlicher Prüfungen ist die Sicherstellung, dass der Schwachpunkt der Verbindung im Bolzen oder, insbesondere bei dünnen Blechen, im Grundmaterial liegt und nicht in der Schweißzone. Für unterschiedliche Ziele der Prüfungen, wie z. B. eine Verfahrensabnahme, eine Arbeitsprüfung oder die laufende Fertigungsüberwachung, sind verschiedene Umfänge der o. g. Prüfverfahren vorgeschrieben [DIN14555].

Da aufgeschweißte Bolzen stets einen schroffen Querschnittsprung darstellen und durch die hohe Abkühlgeschwindigkeit Zugeigenspannung auftreten, liegt ein für hochdynamische Lastfälle ungünstiger Kerbfall vor [Tri94b]. Daher werden insbesondere Bolzenschweißverbindungen mit Spitzenzündung meist in Bereichen mit geringeren dynamischen Beanspruchungen eingesetzt, so dass die Einhaltung der elementaren Qualitätsanforderungen gemäß [DVS0712] i. d. R. ausreicht. Belastungen sollten auf mehrere Bolzen verteilt und sicherheitsrelevante Befestigungen an Einzelbolzen generell vermieden werden [Jen02].

2.3.5 Verarbeitbare Werkstoffe

Für Schweißbolzen häufig verwendete Werkstoffe sind: Aluminiumlegierungen, unlegierte Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt $C < 0,2\%$ sowie legierte austenitische nichtrostende CrNi-Stähle. Stähle mit Kohlenstoffgehalten über $0,6\%$ gelten als nicht mehr schweißbar. Die Beurteilung der Schweißbarkeit anhand des Kohlenstoffäquivalentes (CEV) ist in der Literatur über das Lichtbogenbolzenschweißen nicht gebräuchlich. Für Steckverbinder werden auch Kupferwerkstoffe und bleifreie Messinglegierungen verarbeitet (Tabelle 2.6). Übliche Bolzen aus Stahl sind i. d. R. galvanisch verkupfert. Diese Schicht bietet einen Korrosionsschutz, gewährt eine gute Leitfähigkeit mit geringem Kontaktwiderstand zum Bolzenhalter und hat keinen negativen Einfluss auf die Fügequalität.

Die hohe Fügegeschwindigkeit der Spitzenzündungsverfahren ermöglicht kritische Materialkombinationen mit fehlender Mischbarkeit der beteiligten Werkstoffe. Aufgrund der eng begrenzten Schmelzzone (etwa $0,1\text{ mm}$) ist auch das Fügen von Werkstoffkombinationen die zur Bildung spröder Phasen neigen möglich [Kli07a]. Ungünstige Gefügeveränderungen aufgrund der Wärmeeinwirkung verbunden mit der schnellen Abkühlung können insbesondere bei hochfesten Stählen zu starker Aufhärtung führen [Jen02]. Eine Härte von $350\text{ HV }5$ sollte nicht überschritten werden [Tri93b] und die Oberflächenrauheit sollte maximal $30\text{ }\mu\text{m}$ betragen [Arn80]. Da wegen der kurzen Lichtbogenbrenndauer kaum Aufmischungen der Schmelzbäder

stattfinden [Arn80, Die78], sind z. B. so genannte Schwarz-Weiß-Verbindungen zwischen ferritischen und nichtrostenden austenitischen Stählen möglich [Fah09].

Tabelle 2.6: Verarbeitbare Werkstoffkombinationen nach [DIN14555, SLV03]

Bolzenwerkstoff	Blechwerkstoff					
	Stahl C ≤ 0,3 %	Stahl C ≥ 0,3 % C ≤ 0,6 %	Stahl C ≤ 0,3 % verzinkt ≤ 25 µm	CrNi-Stahl, austenit.	Cu, CuZn37 bleifrei	EN AW-Al- 99,5 / AlMgMn / AlMgSi
S235 - 4.8	+	–	o	+	o	–
1.4301 und 1.4303	+	+	o	+	o	–
CuZn37	+	–	+	o	+	–
EN AW- Al99,5	–	–	–	–	–	+
EN AW- AlMg3	–	–	–	–	–	+
EN AW- AlSi12	–	–	–	–	–	o

+ : geeignet, o : bedingt geeignet, – : ungeeignet

Mit dem Kontaktverfahren ist selbst das Schweißen auf leitfähigem Lack (bis 12 µm Schichtdicke) [III70] oder verzinkten Blechen [Tri98a, Die79] sowie auf plattiertem Verbundblech [Wei66] mit guten Ergebnissen und ohne Beschädigung der Plattierung möglich. Rückseitige Lackschichten werden i. d. R. durch den geringen Wärmeintrag nicht beeinträchtigt. Das Kontaktverfahren ist bei Schweißungen auf bereits beidseitig lackierten Oberflächen bei denen die rückseitige Lackschicht nicht beeinträchtigt werden darf, meist alternativlos [III70]. Auch das Setzen von Bolzen auf rückseitig beschichteten Aluminiumblechen ist möglich. Dazu sollte an der Schweißstelle die Oxidschicht entfernt werden [III70]. Diese Anforderungen sind häufig für lackierte Fassadenelemente relevant, welche sichtseitig auch oft poliert, geschliffen oder strukturiert sind und deren Aussehen nicht beeinträchtigt werden darf [Wei66]. Hier zeigt sich zudem der Vorteil des Bolzenschweißens, dass es aufgrund der gut handhabbaren Gerätetechnik auch auf Baustellen gut beherrschbar ist. Auch kaschierte oder galvanisierte Rückseiten dünner Bleche werden aufgrund der geringen Tiefe der Schmelzzone beim Spitzenzündungsverfahren in den meisten Fällen nicht beeinträchtigt. Allgemein gibt es bei der Verarbeitung von Feinblechen keine wirtschaftlichen Alternativverfahren, die die Blechrückseite ebenso wenig beeinträchtigen [Mat08].

Schweißen von verzinkten Teilen erfordert aufgrund der höheren elektrischen Leitfähigkeit des Zinks eine deutlich höhere Lichtbogenenergie, was eine verstärkte Bildung von Emissionen und Schweißspritzern zur Folge hat [Fri81]. Die Verwendung von Messingbolzen ist bei verzinktem Blech oftmals vorteilhaft. In der Praxis werden

mit dem Kontaktverfahren verzinkte Blech mit Schichtdicken von bis zu 25 μm geschweißt [DIN14555, KOE10b], auch wenn in der Literatur teilweise Maximalwerte von nur 5 μm genannt werden [Tri98c]. Dickere Zinkschichten auf dünnen Blechen erfordern das Kurzzeitverfahren mit Hubzündung. In jedem Fall ist für Schutz des Personals vor den entstehenden Dämpfen und Zinkoxid-Stäuben zu sorgen.

2.3.6 Sonderanwendungen und aktuelle Entwicklungen

Zur Befestigung von Wärmekostenverteilern an Heizkörpern wurde das Spitzenzündungsschweißen im Kontaktverfahren mit zwei in Reihe geschalteten Bolzen entwickelt. Dabei ist kein separater Massekontakt am Werkstück (Heizkörper) erforderlich, so dass die Lackschicht ausschließlich an den Schweißstellen entfernt werden muss.

Eine neuere Entwicklung im Bereich der Hubzündungsverfahren ist das Schweißen von hülsenförmigen Elementen wie Muttern mit Hilfe eines magnetisch rotierenden Lichtbogens [Kli03]. Durch die damit reduzierte Blaswirkung weist dieses Verfahren eine geringe Spritzerneigung auf und ist gut automatisierbar [Kli07a].

Eine ebenfalls innovative Entwicklung ist das kantenseitige Schweißen kleiner Blechelemente bis etwa 30 mm Verbindungslänge [Kli07a, Nen97] zum Fügen sog. Anbauhalter im Karosseriebau, die meist aus L-förmig abgewinkelten Blechstücken bestehen. Vorteile gegenüber dem üblichen Widerstandspunktschweißverfahren sind eine Gewichtreduzierung um bis zu 75 % aufgrund fehlender Materialdopplungen und die nur einseitig erforderliche Zugänglichkeit. Zudem treten durch die flanschlose Verschweißung keine Schälkräfte auf und die Verbindung zeigt aufgrund des fehlenden Spaltes ein günstigeres Korrosionsverhalten [Kur08].

Aktuelle Entwicklungen nutzen Linearantriebe zur Regelung der Bolzenbewegung beim Hubzündungsverfahren [TUC10]. Aufgrund der wesentlich kürzeren Prozesszeiten schiedenerartige Lösungen für die Spitzenzündung bisher aus.

3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise

Die integrierte Ausführung von Fügeprozessen in automatisierten Blechbearbeitungswerkzeugen verkürzt die Prozesskette durch eine geringe Anzahl von Handhabungsschritten und vereinfacht die Logistik in der Fertigung. Die Positions- und Wiederholgenauigkeiten werden erhöht und die gut reproduzierbaren Bedingungen im Werkzeug wirken positiv auf die Prozessstabilität. Beispielsweise konnten bei einem repräsentativen Bauteil durch Werkzeugintegration des Widerstandsbuckelschweißens die Fertigungskosten um bis zu 58 % reduziert werden [UTM07]. Viele Anwendungen verlangen hingegen Lichtbogenbolzenschweißverfahren.

3.1 Motivation

Eine Vielzahl von Produkten aus Feinblech lassen zur Anbindung von Standard-elementen bei Forderungen an den Fügeprozess z. B. nach:

- hoher Oberflächenqualität der Rückseite,
- Verzicht auf Vor- und Nacharbeit
- einfacher Anlagentechnik,
- kurzer Prozesszeit,
- vollflächiger Verbindung oder
- geringer Fügekraft

keine Alternative zum Lichtbogenbolzenschweißverfahren mit Spitzenzündung wirtschaftlich zu. Durch die Möglichkeit der Verarbeitung bereits beschichteter oder vorlackierter Bleche [SLV04, Tri98a, Ill70] bietet die Integration der Spitzenzündung zusätzliches Potenzial die Prozesskette der Fertigung zu verkürzen. Darüber hinaus begünstigen die einfache Automatisierbarkeit, der geringe Wärmeeintrag und die möglichen Werkstoffkombinationen diese Variante des Bolzenschweißens. Eine Technik, die Lichtbogenbolzenschweißen innerhalb von Blechbearbeitungswerkzeugen ermöglicht, steht für die industrielle Anwendung aktuell nicht zur Verfügung.

Lichtbogenbolzenschweißverfahren mit Spitzenzündung sind durch den mechanisierten Schweißprozess einfach handhabbar, die Bolzenbewegung, die Lichtbogenbrenndauer sowie der Schweißstrom sind aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Prozesses nicht regelbar. Die Prozessstabilität hängt daher wesentlich von der Reproduzierbarkeit der Randbedingungen ab. Der Anteil von Fehlschweißungen bei automatisierten Spitzenzündungsprozessen wird von TRILLMICH in [Tri93a] mit 1 % angegeben. Die Ausschussrate moderner gut gewarteter automatisierter Anlagen liegt nach aktuellen Kenntnissen bei etwa 0,25 % [GOE10b], wobei Fehlschweißungen durch Abweichungen der Messwerte gut zu erkennen sind. Ein Grund weshalb die Anwendung von Spitzenzündungsverfahren häufig gemieden wird ist der laute Zündknall (bis 154 dB), der aus Sicht des Arbeitsschutzes ein Problem darstellt [TRLV1, Lau02, Fra99, Sch89].

Durch die Werkzeugintegration des Bolzenschweißens mit Spitzenzündung können viele Nachteile des Fügeprozesses kompensiert werden:

- Die hohe Steifigkeit der Werkstückfixierung im Werkzeug verhindert Prellbewegungen und sorgt für eine erhöhte Positionsgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Aufspannung.
- Durch eine günstige feste Kabelführung und einen gut reproduzierbaren Massekontakt können Induktivität und Ohmscher Widerstand des Schweißstromkreises angepasst und konstant gehalten werden.
- Das umgebende Werkzeug und die Schutzvorrichtung der Presse reduzieren den Schalldruckpegel erheblich und auf geringere Werte als durch Schnittschläge auftreten.
- Durch dem Schweißprozess folgende Stanz- und Schneidoperationen können direkt am Bauteilrand platzierte Verbindungen günstig realisiert werden, die aufgrund der Ablenkung des Lichtbogens durch Randeffekte am fertigen Blechteil meist nicht wirtschaftlich herstellbar sind.

Es ist davon auszugehen, dass ein ins Werkzeug integrierter Bolzenschweißprozess aufgrund stabilerer Randbedingungen eine erhöhte Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität des Fügeprozesses nach sich zieht. Andererseits gilt es bei der Integration zu beachten, dass Fehler einzelner Funktionen i. d. R. zur Unterbrechung des gesamten Prozesses führen und jede zusätzliche Funktion im Werkzeug dessen Ausfallwahrscheinlichkeit erhöht. Dies zieht die Forderung nach einer sicheren Prozesssteuerung und -überwachung nach sich.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Integration von Bolzenschweißprozessen in Blechbearbeitungswerkzeugen besteht u. a. im Umgang mit den Schweißspritzern und der damit verbundenen Werkzeugverschmutzung. Konzepte zur Entfernung der Spritzer im Prozess und unmittelbar an der Schweißstelle sind bisher nicht bekannt. Insbesondere muss dabei sichergestellt werden, dass die Stabilität des Lichtbogens nicht negativ beeinflusst wird und keine Blaswirkungen auftreten.

Fügeprozesse sind aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren gegenüber Stanz-Biegeoperationen wesentlich fehleranfälliger und der Einsatz einer hohen Anzahl von Fügestellen in einer Fertigungsanlage führt aufgrund der Multiplikation der einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten statistisch zu einer stark fallenden Anlagenverfügbarkeit. Daher sind wirtschaftliche Vorteile der Prozessintegration vor allem bei Blechteilen kleineren Abmaßes mit einer geringen Anzahl von Schweißelementen zu erwarten. Zudem führen gefügte Bolzen bei großflächigen Bauteilen oftmals zu Problemen beim Ab stapeln, so dass diese vorzugsweise erst kurz vor oder im Montageprozess angebracht werden [NN10]. Somit stellt die Integrationsmöglichkeit des Bolzenschweißens in Folgeverbundwerkzeuge mit eher geringer Bauhöhe eine wesentliche Anforderung dar.

3.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung einer Technik zum werkzeugintegrierten Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung. Dazu sollen durch Anpassung des Schweißprozesses an die Randbedingungen in Folgeverbundwerkzeugen die technischen und wissenschaftlichen Grundlagen erarbeitet werden. Mit einer entsprechenden Versuchsanlage soll anschließend die erreichbare Prozessstabilität untersucht werden. Mit dieser neuen Methode sollen die technischen Vorteile des Bolzenschweißens verbunden werden mit den wirtschaftlichen Vorteilen eines integrierten automatisierten Fertigungsprozesses. Erste Schritte in diese Richtung werden in dieser Arbeit vorgestellt.

Die erreichbare Stabilität des integrierten Prozesses soll in seriennahen Versuchen betrachtet werden. Mit Erkenntnissen über Wechselwirkungen zwischen dem Schweißprozess und dem Werkzeug mit den anderen Bearbeitungsoperationen sollen die Voraussetzung für eine prozesssichere Integration geschaffen werden. Darüber hinaus soll geklärt werden, welche Auswirkungen die werkzeugspezifischen Umgebungsbedingungen und Störeinflüssen auf den Schweißprozess und die erzielbaren Fügequalitäten haben.

Um negative Auswirkungen auf die Bauteilqualität und Werkzeugfunktion durch Verschmutzung zu verhindern soll eine Lösung für den sicheren Umgang mit den entstehenden Schweißspritzern entwickelt und deren Auswirkungen auf die erreichbaren Fügeergebnisse untersucht werden.

In den Versuchen sollen die überwachten Prozessparameter um die Bolzenbewegung ergänzt werden, um Möglichkeiten zur Verbesserung der Schweißüberwachung aufzuzeigen. Dazu werden Korrelationen zwischen der Fügekinematik, den elektrischen Prozessgrößen sowie der Schweißqualität untersucht.

3.3 Vorgehensweise

Ausgehend von den sich aus dem Stand der Technik ergebenden Fragestellungen und dem Ziel der Umsetzung der Prozessintegration leiten sich zur Entwicklung und Bewertung einer entsprechenden Prozesstechnik folgende Aufgaben ab:

Aufgabe 1: Konzeption einer werkzeugintegrierten Bolzenschweißstufe und Implementierung in eine automatisierte Bandanlage zur Blechteilefertigung. Dabei soll insbesondere die Bolzenzuführung den Anforderungen zum praxisorientierten Einsatz innerhalb von Blechbearbeitungswerkzeugen entsprechen.

Aufgabe 2: Analyse der erreichbaren Schweißqualität und Prozessstabilität in Serienversuchen sowie Untersuchung der Prozessrobustheit anhand praxisrelevanter Störeinflüsse auf das Schweißergebnis und Ableitung von Korrelationen zwischen den überwachten Parametern und der erreichten Schweißqualität.

Aufgabe 3: Untersuchung des Einflusses der Prozessintegration auf das Werkzeug unter besonderer Betrachtung der Auswirkungen von Schweißspritzern auf die Werkzeugfunktion.

Bei der Lösung dieser Aufgaben und vor allem bei der Gestaltung der Schweißstufe sollen Anforderungen, die sich aus der Zielsetzung einer industriellen Anwendung des neuen Verfahrens ergeben, besondere Beachtung finden. Neben den erreichbaren Ergebnissen neuer Prozesse sind in der Praxis Aspekte wie der erforderliche Bauraum der Komponenten, die erreichbare Taktrate sowie die Zuverlässigkeit und der Wartungsaufwand wichtige Bewertungskriterien bei der Entscheidung für eine Prozessintegration.

4 Prozesstechnik und Versuchsanlage

Gegenstand dieses Kapitels ist die Konzeption einer Versuchsanlage mit werkzeug-integrierter Schweißstufe beginnend mit der Ableitung der Anforderungen an die erforderlichen Anlagenkomponenten bis zu ihrer Gestaltung. Schwerpunkte der Entwicklungsarbeit bilden der Schweißkopf, die Zuführtechnik sowie die Steuerung der Anlage. Methodisch erfolgte die Entwicklung in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221, Pah05]. Die sichere Ausführung des Bolzenschweißprozesses in Blechbearbeitungswerkzeugen stellt dabei die Hauptaufgabe der Anlage dar. Für deren Umsetzung sind mehrere Nebenaufgaben für den Schweißprozess, zur Automatisierung und zum Entgegennehmen von Störeffekten zu erfüllen. In dem integrierten Prozess ist insbesondere Störeffekten, wie z. B. dem Auftreten von starken Magnetfeldern, und Wechselwirkungen zwischen den Bearbeitungsprozessen im Werkzeug durch geeignete Lösungen Rechnung zu tragen (Bild 4.1).

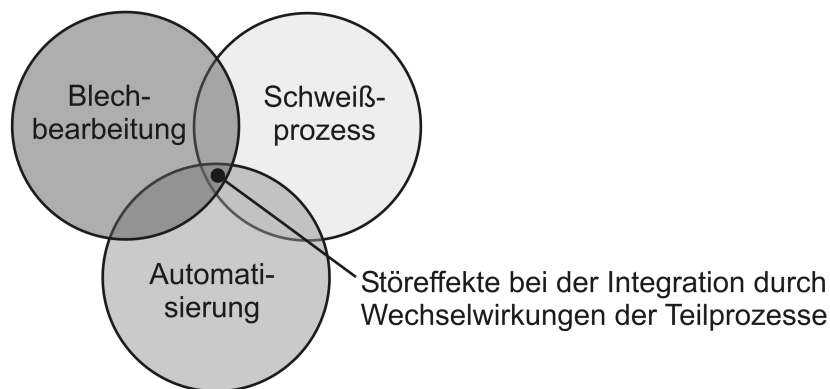


Bild 4.1: Einflussfaktoren auf den integrierten Schweißprozess

4.1 Anforderungen und Randbedingungen

Die Integration des Bolzenschweißprozesses in Blecherarbeitungswerkzeuge stellt umfangreiche Anforderungen an sämtliche Komponenten der Anlage. Grundlegende technische Voraussetzungen sind in Bild 4.2 dargestellt.

Wichtige Aspekte bei der Auswahl und Entwicklung der Anlagekomponenten im Hinblick auf einen industriellen Einsatz sind u. a. deren Bauraumbedarf im Werkzeug, die erreichbare Taktrate, ihre Zuverlässigkeit sowie ihr Wartungsbedarf. Die Prozessintegration erscheint aufgrund der in Kapitel 2.3.1 genannten Anwendungen und Eigenschaften des Fügeprozesses tendenziell für kleine bis mittelgroße Blechteile und somit für entsprechend kompakte Werkzeuge relevant. Ein Einsatz in kompakten Blechbearbeitungswerkzeugen verlangt zur konstruktiven Integration eine flache und schmale Bauform der Schweißstufe und einen modularen, einfach ins Werkzeug montierbaren Aufbau des Schweißkopfes sowie der Bolzenzuführung. Die Einbauhöhe der Module und die erforderliche Plattenstärke der Werkzeuge sowie die Stufenbreite sollen möglichst gering sein. Zudem sollen alle Komponenten bei geöffneter Presse ohne Ausbau des Werkzeuges frei zugänglich sein, um eine einfache Kontrolle z. B. der Verschmutzung und Wartung vornehmen zu können.

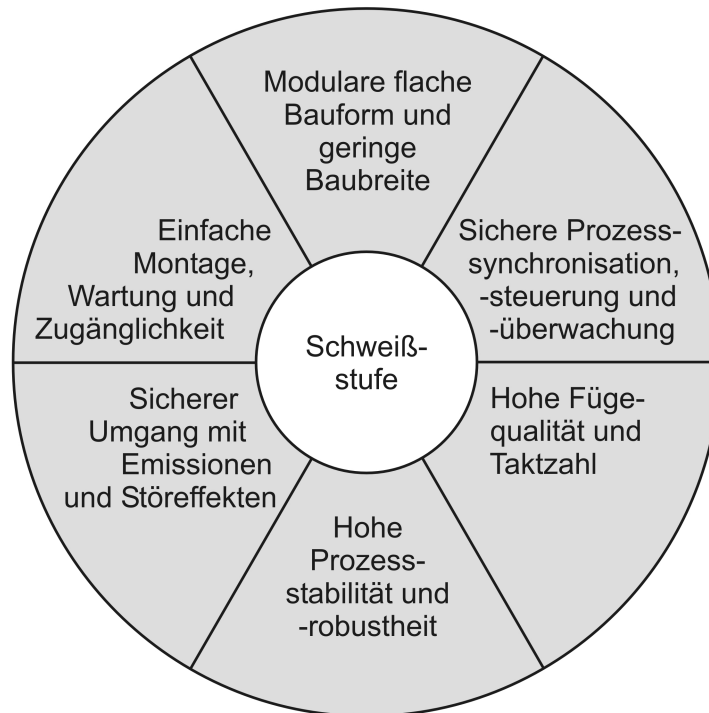


Bild 4.2: Technische Anforderungen an eine in Blechbearbeitungswerkzeugen integrierte Stufe zum Bolzenschweißen

Übliche Schweißstromquellen mit Kondensatorentladung limitieren aufgrund der erforderlichen Zeit zur Wiederaufladung die maximale Taktrate auf etwa 30 Hub/min. Da Blechbearbeitungswerkzeuge mit Taktraten in dieser Höhe oft auf mechanischen Pressen betrieben werden, soll der integrierte Schweißprozess grundsätzlich auf diesen Maschinen einsetzbar sein. Dies bedeutet, dass ein sinusförmiger Wegverlauf des Pressenstößels anwendbar und insbesondere kein Verweilen im unteren (UT) oder oberen (OT) Totpunkt notwendig sein sollen. Für die Versuche wird aufgrund der guten Steuerbarkeit bei der Prozesseinrichtung sowie der Verfügbarkeit auf eine hydraulische Presse zurückgegriffen.

Der Schweißprozess sowie die Zuführung der Fügeelemente und der Werkstücktransport müssen über eine geeignete Steuerung sicher mit der Werkzeugbewegung synchronisiert werden. Dabei sollen neben dem Einzelhub- und Zyklusbetrieb der Presse einzelne Teilfunktionen wie Aktorbewegungen bei der Fügeteilezuführung im Einrichtbetrieb der Anlage für Testzwecke auch unabhängig ausgeführt werden können.

Um das Werkzeug vor Verschmutzung und Beschädigungen zu bewahren ist ein sicherer Umgang mit den entstehenden Schweißspritzern im Werkzeug erforderlich. Die Fügequalität darf durch die gegenüber üblichen Schweißgeräten geänderte Gestaltung einzelner Komponenten nicht negativ beeinflusst werden.

Konkret ergeben sich aus den Anforderungen folgende konstruktive Randbedingungen für die werkzeugintegrierte Bolzenschweißstufe:

Randbedingung 1: Aufgrund der beengten Platzverhältnisse insbesondere in kleinen, flachen Werkzeugen müssen die Bolzen über den Blechniederhalter zugeführt werden.

Randbedingung 2: Bei Zündung des Lichtbogens darf der Bolzen ausschließlich Kontakt zum Werkstück und dem Bolzenhalter besitzen, um Nebenschlüsse und die Bildung von Nebenlichtbögen zu verhindern. Teile der Zuführmechanik müssen sich zu diesem Zeitpunkt in sicherem Abstand zur Schweißstelle befinden.

Randbedingung 3: Der Schnittschlag muss in ausreichendem zeitlichem Abstand zur Lichtbogenzündung erfolgen, um Schwingungen bei der Erstarrung während der Bindephase des Schweißprozesses zu vermeiden.

Randbedingung 4: Entstehende Schweißspritzer dürfen sich nicht unkontrolliert im Werkzeug verbreiten, um Beschädigungen des Werkzeuges sowie der Werkstückoberfläche zu vermeiden. Die Spritzer müssen möglichst vollständig während des Fertigungsprozesses aus dem Schweißbereich im Werkzeug entfernt werden.

Randbedingung 5: Um Reinigungs- und Wartungsarbeiten an der Schweißstufe einfach zu ermöglichen, müssen der Schweißkopf sowie die Zuführmechanik bei geöffnetem und in der Presse eingerichteten Werkzeug einfach demontierbar sein.

Beim integrierten Schweißprozess sind aufgrund der Bedingungen im Werkzeug durch Wechselwirkungen von Teilprozessen Störeffekte zu erwarten, die entsprechende Gegenmaßnahmen erfordern (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Störeffekte und abgeleitete Gegenmaßnahmen

Störeffekt	Gegenmaßnahmen
Entstehung von Emissionen (Schweißspritzer und Oxidationsrückstände)	Anpassung der Prozessparameter Abschirmung des Schweißbereiches Absaugung der Emissionen Verhindern der Anhaftung von Schweißspritzern
Entstehung von Magnetfeldern mit magnetischer Blaswirkung auf den Lichtbogen	Symmetrischer Verlauf des Stromflusses Symmetrische Gestaltung des Schweißbereiches Geeignete Auswahl und Positionierung von Sensoren Sicherer Abstand von Signalleitungen zum Stromkreis
Magnetisierung des Werkzeuges mit magnetischer Blaswirkung auf den Lichtbogen	Symmetrische Werkzeuggestaltung im Schweißbereich Sichere Führung der Fügeelemente Sichere Abführung von Stanzabfällen
Schwankungen der Induktivität	Günstige Kabelverlegung Sichere Fixierung der Strom- und Massekabel

Die Spritzerbildung lässt sich durch Wahl geeigneter Einstellparameter reduzieren, aber nicht vermeiden. Eine Abschirmung des Schweißbereiches soll verhindern, dass das Werkzeug unkontrolliert verschmutzt. Durch eine direkte Absaugung dieses Bereiches sollen die Schweißspritzer aus dem Werkzeug entfernt werden. Die Ablagerung von Spritzern an kontaminationsgefährdeten Bauteilen ist durch die Verwendung geeigneter Werkstoffe oder Beschichtungen zu verhindern.

Durch die hohen auftretenden Schweißströme treten starke Magnetfelder auf und ferromagnetische Werkzeugkomponenten können magnetisiert werden. Da dadurch Sensoren und Signalleitungen in Nähe des Stromkreises gestört werden können, müssen diese in ausreichendem Abstand positioniert und verlegt werden und sollten über eine geeignete Abschirmung verfügen. Zudem kann durch Magnetfelder die Induktivität des Schweißstromkreises verändert und die Geschwindigkeit des Stromanstieges bei der Kondensatorentladung beeinflusst werden.

Um ein Klemmen der Fügeelemente in der Zuführmechanik aufgrund der Magnetisierung zu verhindern, müssen diese zu jeder Zeit definiert orientiert und positioniert sein sowie sicher fixiert werden. Stanzstufen sollten ausreichend weit von der Schweißstelle entfernt sein, um ein Anziehen von Stanzabfällen durch das Magnetfeld zu vermeiden.

Sich durch die Werkzeugbewegung verändernde Verläufe des Stromkabels sowie der Massekabel können ebenfalls zu deutlichen Abweichungen der Induktivität des Stromkreises führen und sind durch eine geeignete Kabelverlegung zu vermeiden.

Blaswirkungen auf den Lichtbogen können durch Gewährleistung eines symmetrischen Stromflusses und Vermeidung asymmetrischer Magnetfelder, die z. B. durch Anhäufungen ferromagnetischer Massen bedingt sind, verhindert werden.

Übermäßige Erwärmung des Werkzeuges oder Verzunderung des Bleches sind aufgrund des geringen zu erwartenden Energieeintrages von 700 Ws nicht anzunehmen [DVS0904]. Aufgrund hoher Wärmeableitung durch das Werkzeug sowie das Werkstück ist nicht von einer relevanten Erwärmung als Störeinfluss auf den Prozess auszugehen, dem durch aktive Kühlung oder Schutzgasabschirmung begegnet werden müsste.

4.2 Schematischer Anlagenaufbau

Die Hauptfunktion der Anlage, das automatisierte werkzeugintegrierte Bolzenschweißen, wird vom Hauptsystem, der Schweißstufe, erfüllt. Darüber hinaus sind verschiedene Nebenfunktionen aus den Bereichen der Schweißtechnik, der Blechbearbeitung und der Prozesssteuerung sowie Funktionen gegen Störeffekte durch periphere, außerhalb des Werkzeuges befindliche Teilsysteme zu erfüllen.

Die Versuchsanlage für einen vollautomatisierten Betrieb besteht aus den für den Blechbearbeitungs- und den Schweißprozess erforderlichen Aggregaten sowie aus Systemen zur Steuerung, Überwachung und zur Entfernung der Emissionen. Der Aufbau der Gesamtanlage ist schematische in Bild 4.3 dargestellt.

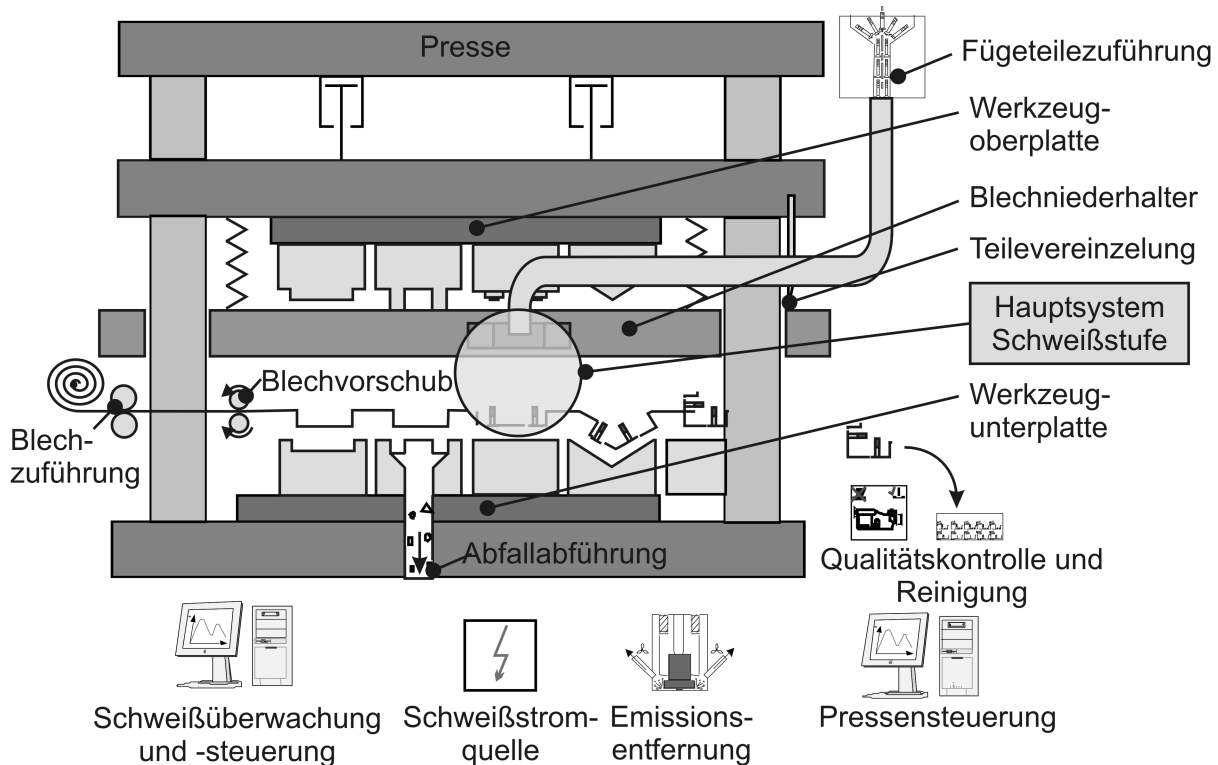


Bild 4.3: Schematische Darstellung der Teilsysteme der Versuchsanlage

Im Folgenden wird auf die einzelnen Komponenten der entwickelten integrierten Versuchsanlage eingegangen.

4.3 Schweißstufe

Die Schweißstufe wurde in Form von zwei separaten modular aufgebauten Baugruppen gestaltet. Der Schweißkopf mit dem Bolzenhalter ist dabei in der Oberplatte des Werkzeuges montiert, während sich das Zuführmodul im Blechniederhalter befindet. Eine Zuführung nach dem Pick-up Prinzip, wobei der Bolzen bei der Schließbewegung des Werkzeuges vom Schweißkopf aufgegriffen wird, ermöglicht eine geringe Bauhöhe und eine gute Zugänglichkeit zu sämtlichen Komponenten der Schweißstufe bei geöffnetem Werkzeug.

4.3.1 Bolzenzuführung

Die Baugröße und Funktionssicherheit der Bolzenzuführung bestimmen wesentlich die praktische Integrationsmöglichkeit des Schweißprozesses. Die Zuführung stellt somit eine Schlüsselfunktion für die Prozessintegration dar.

Das entwickelte Zuführsystem besteht aus

- einem Vibrationswendelförderer (UVR-250S, Fa. Soyer) zur Vereinzelung, Orientierung und zum Einschuss der Fügelemente in die Schweißstufe im Werkzeug und
- dem im Blechniederhalter integrierten Zuführmodul der Schweißstufe mit einer Mechanik zum Einstecken der Bolzen in den Schweißkopf.

Die als Schüttgut vorliegenden Bolzen werden vom Förderer pneumatisch in das Zuführmodul im Werkzeug eingeschossen. Das Zuführmodul (Bild 4.4) besteht aus zwei Bereichen. Im ersten Bereich werden die Bolzen nach dem Einschuss vom Zuführrohr entgegengenommen und axial zur Schweißstelle befördert. Dort werden die Bolzen an den zweiten Bereich der Mechanik übergeben, durch eine Drehung koaxial zum Bolzenhalter orientiert und während der Werkzeugschließbewegung in den Bolzenhalter eingesteckt. Um die gesamte Zuführung robust zu gestalten und zuverlässig steuern zu können, wird die Einsteckbewegung des Bolzens in den Bolzenhalter abhängig von der Stößelposition über ein Keilsystem mechanisch zwangsgeführt.

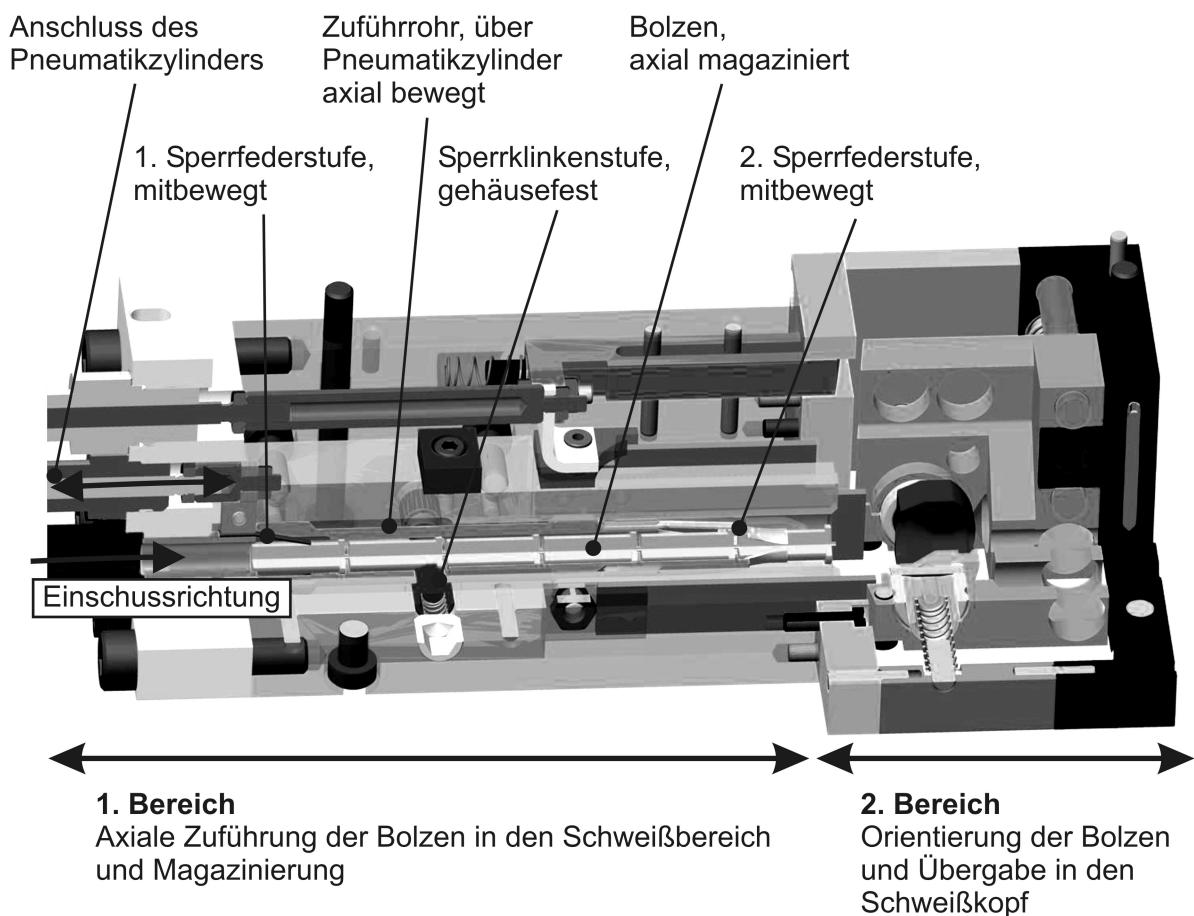


Bild 4.4: Zuführmodul

Das Zuführrohr (Bild 4.4, 1. Bereich) wird über einen Pneumatikzylinder axial vor und zurück bewegt und steckt die Bolzen in den Drehmechanismus (Bild 4.4, 2. Bereich) ein. Zum Vorschieben der Gewindebolzen (Typ PT) dient der an ihnen nach DIN EN ISO 13918 vorhandene Flansch [DIN13918].

Beim Einschuss mit der Zündspitze voraus überwinden die Bolzen mit ihrem Flansch zunächst eine erste elastische Sperrfederstufe, die relativ zum Zuführrohr fixiert ist. Diese Sperrfedern absorbieren einen großen Teil ihrer kinetischen Energie, so dass mit Energiereserve eingeschossen werden kann, ohne die Gefahr, die Zündspitze am vorherigen Bolzen zu deformieren. Das Zuführrohr befindet sich zum Zeitpunkt

des Einschusses am Anschlag jenseits der Schweißstelle. Die Einschussenergie wird über den Druck und die Ventilöffnungsdauer der Pneumatik des Förderers eingestellt.

Durch die axiale Bewegung des Zuführrohres in Richtung Schweißstelle wird der zuvor eingeschossene Bolzen mit Hilfe der ersten Sperrfederstufe über gehäuseseitig fixierte Sperrklinken gedrückt. Bei der Rückbewegung des Zuführrohres wird dieser Bolzen relativ zum Gehäuse festgehalten und drückt die sich vor ihm im Magazin befindlichen Fügeelemente relativ zum Zuführrohr in Richtung Schweißstelle. Der vorderste Bolzen wird dabei mit seinem Flansch über eine zweite Stufe von Sperrfedern gedrückt. Diese drücken den vordersten Bolzen bei erneuter Vorschubbewegung des Zuführrohres in die Aufnahme des Drehmechanismus (Bild 4.5) hinein.

Das 3-stufige System von Sperrungen verhindert eine Addition der Längentoleranzen der axial aufgereihten Bolzen. Darüber hinaus wird durch die axiale Bewegung des Zuführrohres ein freier Schweißbereich beim Zünden des Lichtbogens sichergestellt.

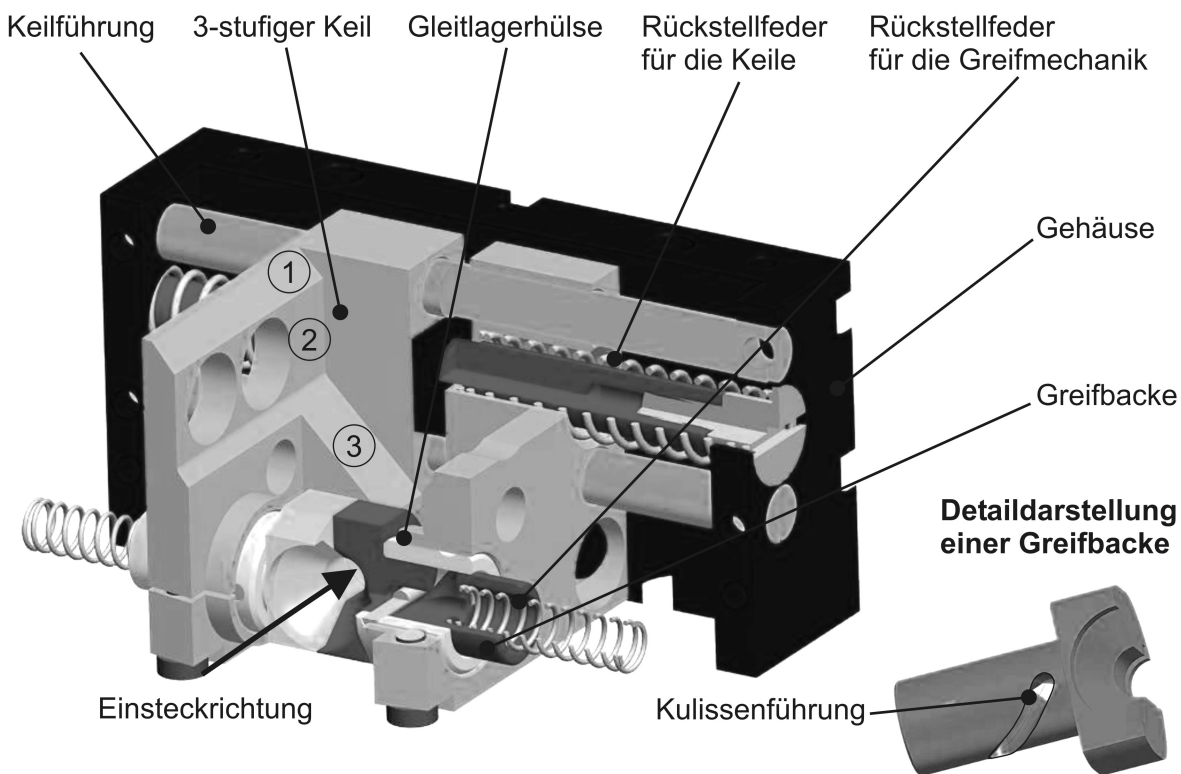


Bild 4.5: Drehmechanismus zur Orientierung und zum Einstecken der Bolzen in den Bolzenhalter des Schweißkopfes

Mit Hilfe der Drehmechanik wird der Bolzen sicher fixiert und koaxial unter dem Bolzenhalter orientiert. Die Drehmechanik wird über ein 3-stufiges Keilsystem durch im Schweißkopf integrierte Antriebskeile gesteuert [Gru11]. Die Auslegung des Keiltriebes und insbesondere die Sicherstellung, dass keine Selbsthemmung auftritt, erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3386 [VDI3386].

Sobald die Antriebskeile die erste Stufe (Bild 4.5, Stufe 1) der Abtriebskeile der Drehmechanik berühren, beginnen die Greifbacken den Bolzen zu drehen und richten diesen koaxial zum Bolzenhalter aus (Bild 4.6 I). Die Orientierung des Bolzens erfolgt mittels einer Kulissenführung, aufgrund der gewählten horizontalen Bolzenzuführung in Form einer 90°-Drehung in die Senkrechte.

Während sich die Antriebskeile auf Höhe der zweiten Stufe (Bild 4.5, Stufe 2) der Abtriebskeile befinden, wird der Bolzen durch die Relativbewegung zwischen Blechniederhalter und Oberwerkzeug in den Bolzenhalter gesteckt, unterdessen die Greifbacken der Zuführmechanik den Bolzen noch sicher fixieren (Bild 4.6 II).

Bei Auftreffen der Aktivkeile auf die dritte und unterste Stufe (Bild 4.5, Stufe 3) der Abtriebskeile öffnet sich die Mechanik und gibt den Bolzen frei (Bild 4.6 III). Dieser steckt zu diesem Zeitpunkt bereits in dem nicht dargestellten Bolzenhalter des sich mit den Aktivkeilen abwärts bewegenden Schweißkopfes.

Mit Hilfe von plattenförmigen Elementen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) wird der Schweißbereich kurz vor Beginn des Schweißprozesses von der Zuführmechanik abgeschirmt (Bild 4.6 IV). Diese Abschirmung wird pneumatisch bewegt.

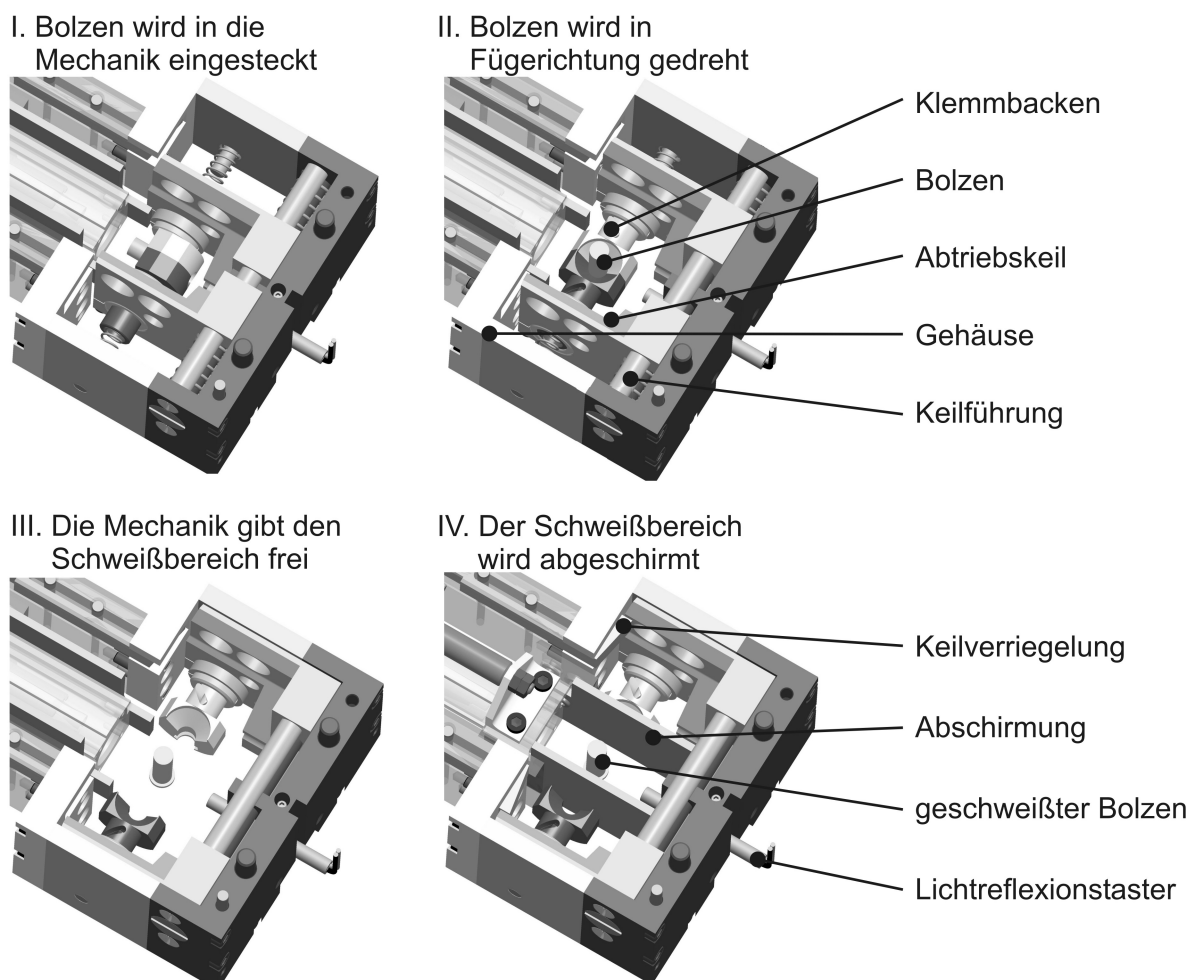


Bild 4.6: Prozessschritte bei der Drehbewegung der Zuführung

Um eine Blaswirkungen auf den Lichtbogen durch zu nah an der Schweißstelle angeordnete Komponenten zu verhindern, befinden sich alle Teile der Zuführmechanik zum Zeitpunkt der Lichtbogenzündung in etwa 20 mm Abstand zur Schweißstelle. Vorteil des entwickelten Zuführprinzips ist weiterhin, dass die Bolzen bei geringem zur Verfügung stehendem Bauraum durch entsprechende Anpassung der Kulissenführung in nahezu beliebigem Winkel zur Fügerichtung zugeführt werden können. Die maximale Einbaubreite des Zuführmoduls und damit der gesamten Schweißstufe beträgt 80 mm.

Damit sich der durch Schraubenfedern gespannte Drehmechanismus beim Öffnen des Werkzeuges nach dem Schweißprozess nicht sofort zurückstellt, wird er in geöffneter Stellung arretiert und erst wieder freigegeben, sobald sich der Niederhalter über den auf das Blech gefügten Bolzen erhoben hat. Gelöst wird diese Verriegelung mechanisch über außen am Zuführmodul angreifende Keile (Bild 4.7).

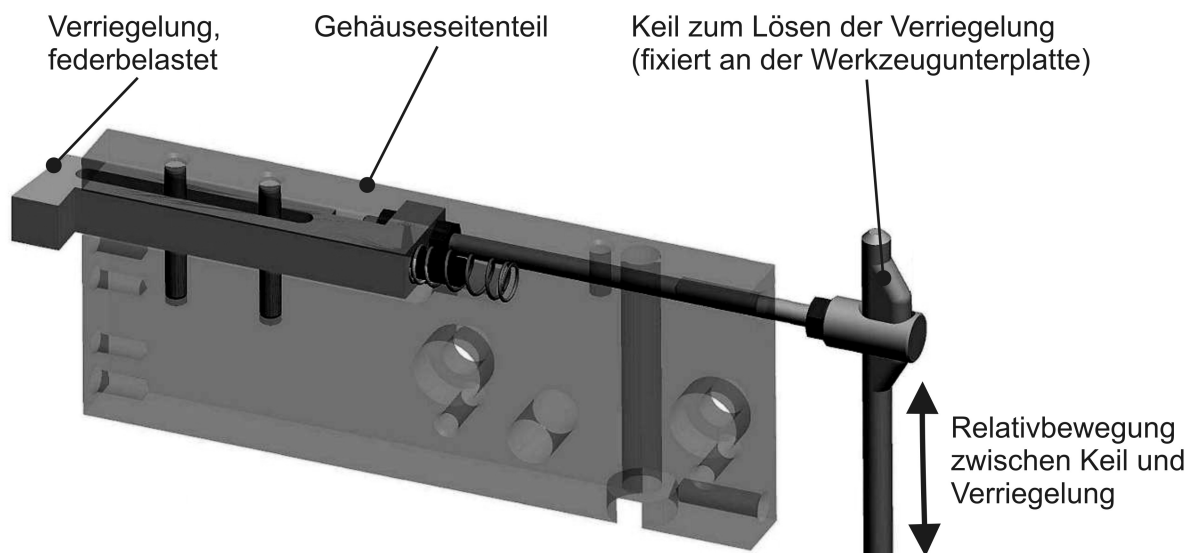


Bild 4.7: Verriegelung der Drehmechanik mit Lösemechanismus

Zusammenfassend zeichnet sich diese Art der Bolzenzuführung durch folgende Eigenschaften aus:

- Alle Teile der Zuführmechanik werden vor Zündung des Lichtbogens in einen sicheren Abstand zur Schweißstelle gebracht.
- Die Zuführung kann flach gestaltet werden und der Winkel der Zuführrichtung ist prinzipiell variabel (bei entsprechender Anpassung der Kulissenführung).
- Die Zuführmechanik ist im Blechniederhalter montiert und bei in der Presse eingerichteten und geöffnetem Werkzeug gut zugänglich.
- Die modulare Bauweise ermöglicht einen einfachen Wechsel der Baugruppen, z. B. zur Reinigung oder zur Änderung des Fügeelementtypes.
- Die Bewegung des Einschussschlauches ist aufgrund des gegenüber dem Stößel reduzierten Hubweges des Blechniederhalters gering.

4.3.2 Schweißtechnische Komponenten

Der Schweißstromkreis besteht aus:

- dem Schweißkopf,
- der Kondensatorstromquelle und
- zwei Massekontakten zum Werkstück sowie Strom- und Massekabeln.

Schweißkopf

Der Schweißkopf (Bild 4.8) besteht im Wesentlichen aus dem Bolzenhalter in Form einer elastischen Spannzange, die den Bolzen aufnimmt, einer Linearführung des Bolzenhalters, dem sog. Kolben der in der Kolbenhülse geführt wird, sowie einer Feder, die eine definierte Aufsetzkraft beim Schweißen sicherstellt. Der Bolzenhalter ist als Verschleißteil einfach austauschbar im Kolben montiert. Die Komponenten Kolben, Kolbenhülse und Bolzenhalter wurden von der kompakten Schweißpistole PS-0K der Firma Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik übernommen. Um die Übergabe der Bolzen von der Zuführmechanik in den Schweißkopf zu vereinfachen, wurden die verwendeten Bolzenhalter durch eine 90°-Senkung mit etwa 1,5 mm Tiefe von innen aufnahmeseitig mit einer Fase versehen. Der Kolben ist über ein feinflitziges flexibles Kabel mit der Stromquelle verbunden und gegenüber dem Werkzeug elektrisch isoliert. Die Isolationsfestigkeit wurde mittels einer Hochspannungsprüfung mit 2,2 kV sichergestellt. Der Schweißkopf ist so gestaltet, dass er bei geöffnetem Werkzeug als Einheit durch eine Aussparung im Blechniederhalter hindurch montiert werden kann.

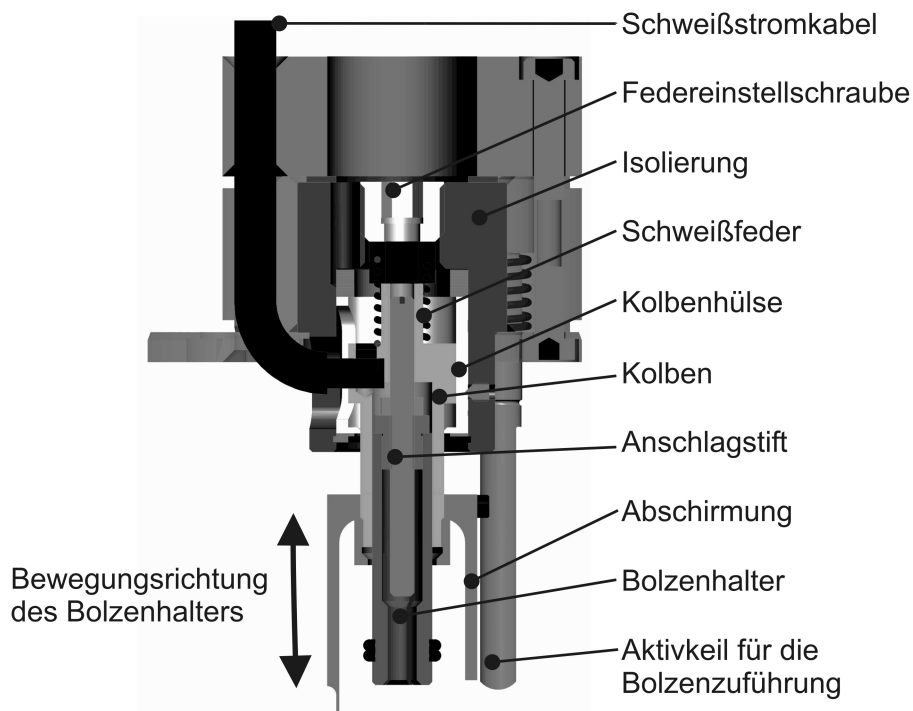


Bild 4.8: Schnittbild des Schweißkopfes

Die Lagerung des Kolbens wurde so gestaltet, dass der dynamische Anteil des Federweges gegenüber der Handpistole vergrößert ist. Die für den Schweißprozess erforderliche Federkraft wird bei relativ geringer statischer Vorspannung der Feder wesentlich durch die Einfederbewegung des Bolzenhalters beim Aufsetzen des Bolzens auf das Blech aufgebracht. Durch den entsprechend langen Rückfederweg des Bolzenhalters werden Relativbewegungen zwischen dem Bolzenhalter und dem Werkstück sowie Zugkräfte auf den Bolzen beim Öffnen des Werkzeuges während der Bindephase verhindert, so dass eine Verweildauer des Stößels im unteren Totpunkt der Werkzeugbewegung (UT) nicht erforderlich ist. Dadurch ist die Funktion der Schweißstufe auch auf mechanischen Pressen gegeben.

Resultat des hohen dynamischen Anteiles der Federauslenkung verbunden mit der Wahl einer relativ geringen Federsteifigkeit ist eine geringe Veränderung der Andruckkraft in einem weiten Bereich um die ideale Stößelposition zur Zündung im UT. So kann der Schweißprozess in einem relativ weiten Fenster der Stößelposition, bereits vor oder erst nach Durchlaufen des UT, ohne Beeinträchtigung ausgeführt werden. Bild 4.9 zeigt die Kinematik und die Relativbewegung des Bolzenhalters zum in der Oberplatte des Werkzeuges fixierten Schweißkopf.

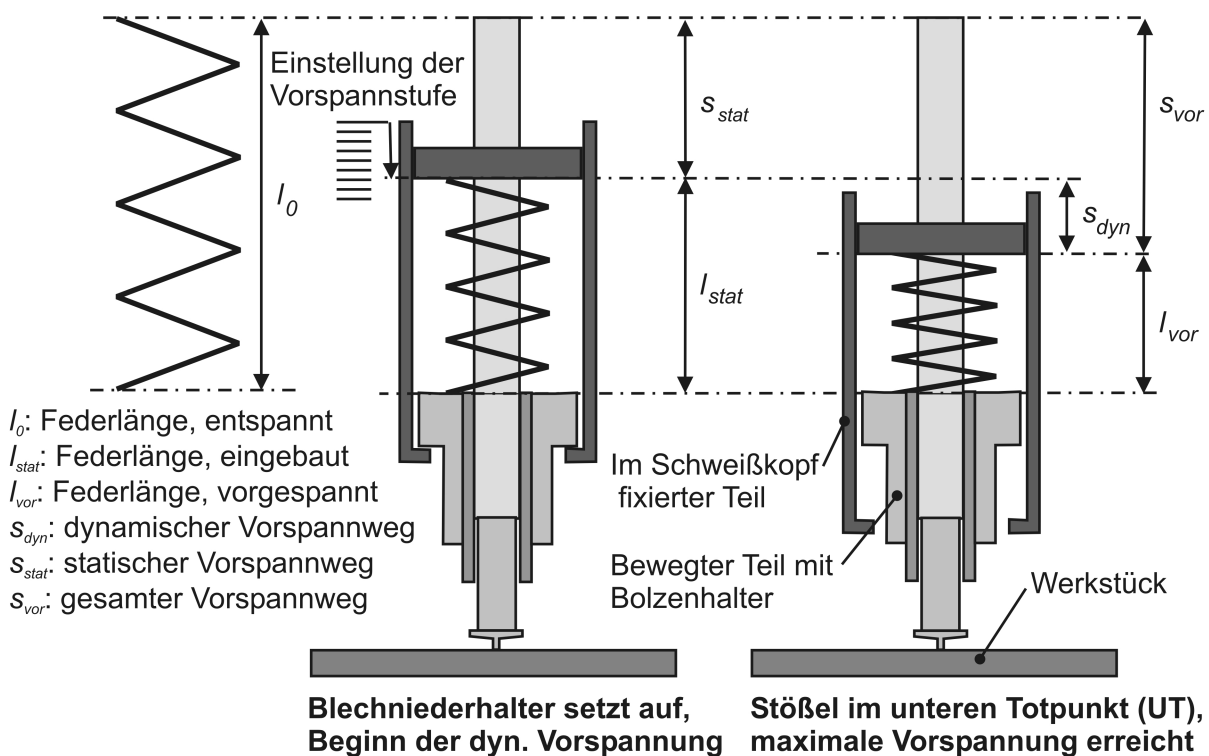


Bild 4.9: Statischer und dynamischer Vorspannanteil der Feder

Die vorgespannte Feder entspannt sich mit dem Schmelzen und Verdampfen der Zündspitze. In Abhängigkeit von der zu beschleunigenden Masse m und der Federkraft F_F erfährt der Bolzen eine Bewegung gemäß $F = m \cdot a$ und trifft mit der Geschwindigkeit v_{auf} auf dem Blech auf. Die Gesamtmasse der bewegten Komponenten im Versuchswerkzeug beträgt 96 g. Mit zunehmendem Verfahrensweg verringern sich die antreibende Federkraft und damit auch die Beschleunigung des Bolzens.

Gegenkräfte aufgrund von Reibwiderständen und elastischer Verformung des angeschlossenen Stromkabels sind vernachlässigbar. In der Anordnung in Wannelage (PA) gemäß DIN EN ISO 6947 mit normal zur Werkstückoberfläche und senkrecht nach unten gerichteter Bolzenbewegung wird die Federkraft durch die Gravitation unterstützt [DIN6947].

Wichtig für die Funktion des Schweißkopfes sind eine über die Federvorspannung einstellbare Aufsetzkraft sowie eine reibungs- und spielarme Linearführung, um eine günstige Auftreffgeschwindigkeit des Bolzens in das Schmelzbad sicher zu stellen. Die verwendete Schraubendruckfeder besitzt im relevanten oberen Bereich eine Federsteifigkeit c_F von etwa 4,7 N/mm und kann eine maximale Aufsetzkraft von 87,6 N aufbringen (Bild 4.10).

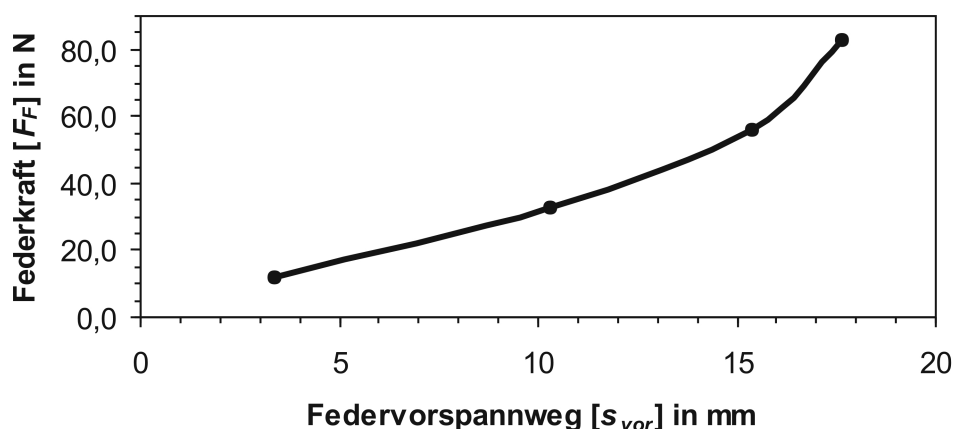


Bild 4.10: Gemessene Kennlinie der verwendeten Schraubendruckfeder

Die Federvorspannung wird mittels einer Schraube entsprechend der Anzahl der Umdrehungen in Stufen von 0 bis 6 eingestellt. Diese Vorspannstufen ergeben resultierende Aufsetzkraften von 44 bis 86 N in Schritten von je 7 N (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Aufsetzkraften entsprechend den Vorspannstufen

Vorspannstufe [n_{vor}] in Umdrehungen	Resultierende Aufsetzkraft [F_{auf}] in N
0	44
1	51
2	58
3	65
4	72
5	79
6	86

Bei der resultierenden Aufsetzkraft ist die zusätzlich aufgebrachte Kraft der Rückstellfeder des über den Schweißkopf installierten Wegmesstasters von 3 N berücksichtigt. Durch die Hubbewegung des Werkzeuges wird die Feder im UT um 5,7 mm komprimiert, was einem gleich bleibenden dynamischen Anteil der Aufsetzkraft von etwa 27 N entspricht.

Kondensatorstromquelle

Die verwendete Schweißstromquelle BTM-10P der Firma Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik gestattet Kondensatorkapazitäten von 33, 66 und 99 mF. Die Ladespannung ist stufenlos zwischen 50 und 200 V einstellbar. Die Stromquelle prüft vor der Entladung den Ladezustand und ob der Schweißstromkreis geschlossen ist. Die maximale Schweißfolge beträgt etwa 30 Bolzen pro Minute, abhängig von der benötigten Schweißenergie.

Schweißstromkreis

Für den Schweißstromkreis wurden feilitzige hochflexible Kupferkabel mit Silikonisolierung verwendet. Der Querschnitt des Stromkabels beträgt 10 mm², für die zwei Massekabel wurden zwei jeweils 16 mm² starke Leitungen verwendet. Die Kabellängen betragen jeweils 4 m. Sämtliche Kabelverbindungen erfolgten über geschraubte Klemmkontaktierungen, um die Kontaktwiderstände gering zu halten.

Zur Reduzierung der durch die hohen Ströme auftretenden Induktivitäten, wurden das Strom- und die Massekabel so weit wie möglich eng miteinander verdrillt. Die Kabelverlegung wurde für sämtliche Versuche unverändert beibehalten, um eine Veränderung der Induktivität des Stromkreises auszuschließen.

Schweißungen mit der Versuchsanlage erreichen mit einer Kondensatorkapazität von 66 mF und einer Ladespannung von 130 V einen maximalen Schweißstrom von 5,5 kA. Bei einem angenommenen Ohmschen Widerstand des Schweißstromkreises von 10 mΩ würde die Induktivität des Schweißstromkreises nach der Netztafel von SCHMITT (Bild 4.11) etwa 16 μH betragen [Sch83].

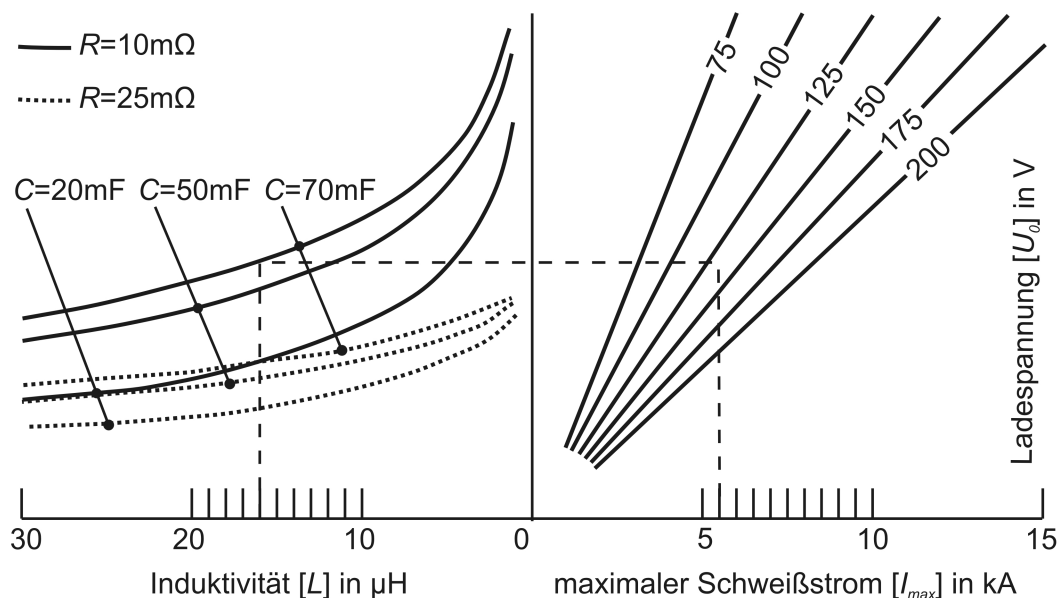


Bild 4.11: Netztafel zur Ermittlung des maximalen Schweißstromes nach SCHMITT [Sch83]

Für den aufgebauten Stromkreis wurden mit einer LCR-Messbrücke vom Typ HM 8118 der Firma Hameg ein Ohmscher Widerstand von $18,2 \text{ m}\Omega$ sowie eine Induktivität von $4,5 \text{ }\mu\text{H}$ ermittelt.

Der Bolzenhalter wurde mit dem negativen Pol der Kondensatorstromquelle verbunden, während das Werkstück positiv gepolt wurde. Das Werkstück wird im Werkzeug über zwei Stellen kontaktiert, die punktsymmetrisch mit einem radialen Abstand von $56,5 \text{ mm}$ zur Schweißstelle angeordnet wurden. Der Kontakt erfolgt über federnd gelagerte Messingstifte im Blechniederhalter, die bei geschlossenem Werkzeug mit je 35 N auf das Blechmaterial drücken. Der Anpressdruck der Kontakte beträgt bei einem Kontaktquerschnitt von je $1,75 \text{ mm}^2$ etwa 20 N/mm^2 . Dieser Kontaktdruck ist erforderlich, um die Bildung von Nebenlichtbögen an diesen Stellen auszuschließen.

Das Versuchswerkzeug wurde mit Hilfe von festen Kunststoffplatten gegenüber der Presse elektrisch isoliert.

4.3.3 Schutz des Werkzeuges vor Schweißspritzer

Der Schutz des Werkzeuges vor Beschädigungen und Störungen durch Schweißspritzer wird gewährleistet durch:

- enge Abschirmung des Schweißbereiches und
- direkte Absaugung der Emissionen.

Der Schweißraum wird nach unten durch das Blechmaterial und um die Schweißstelle herum durch aktiv bewegte Abschirmelemente quaderförmig begrenzt. Die entwickelte Abschirmung zum Schutz des Drehmechanismus und der Zuführmechanik besteht aus zwei Teilen:

- zwei seitlichen Elementen im Zuführmodul, die sich parallel zur Blechebene bewegen (Bild 4.6 IV) und
- einem am Bolzenhalter angebrachten Abschirmelement (Bild 4.8).

Somit ist die Zuführmechanik vor Spritzern und Schweißrauch geschützt, auch während sich der Bolzenhalter mit dem Stößel bereits wieder aufwärts bewegt. Für die Abschirmkomponenten wurde der Kunststoff PTFE verwendet. Dieser Werkstoff zeichnet sich insbesondere durch eine gute Trennwirkung gegenüber Anhaftungen von Verschmutzungen aus.

Nach oben gewährleistet eine kreisringförmige Öffnung mit einem Durchmesser von 32 mm um den Bolzenhalter herum einen ausreichend großen Querschnitt A_{zu} (Bild 4.12) für den zufließenden Luftstrom.

Zur Erzeugung der Luftströmung wurde ein handelsüblicher Industriesauger mit 2.300 W Aufnahmeleistung verwendet. Dieses Aggregat liefert einen maximalen Unterdruck von 23.000 Pa bei einem maximalen Volumenstrom von 3.600 l/min . Der Querschnitt der 3 m langen Saugleitung A_{Ab2} beträgt bis zum Werkzeug etwa 500 mm^2 und verjüngt sich beim Eintritt in das Werkzeug (A_{Ab1}) auf 80 mm^2 .

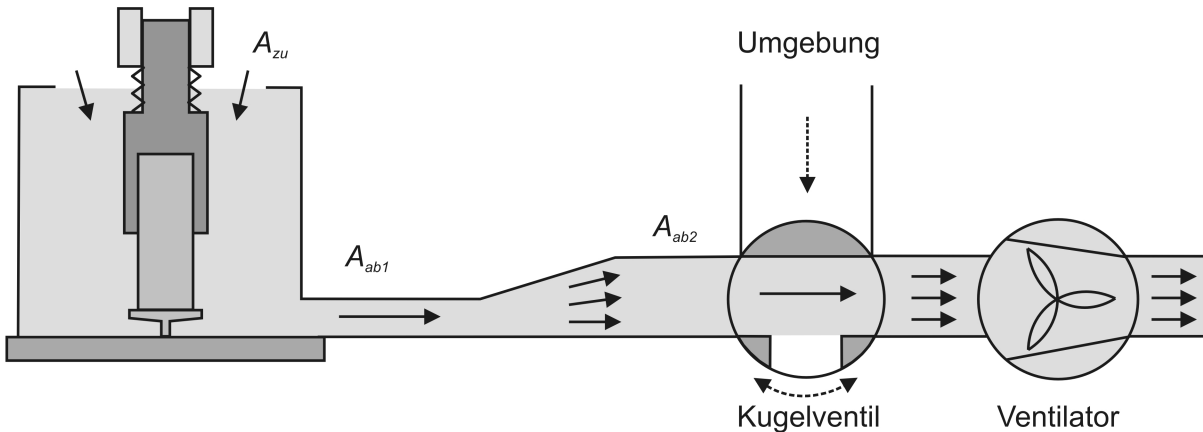


Bild 4.12: Schema der gesteuerten Absaugung des Schweißbereiches

Um sicherzustellen, dass die Zündung des Lichtbogens durch Luftbewegungen nicht negativ beeinflusst wird, wird der Saugstrom mit Hilfe eines Kugelventils und eines gesteuerten pneumatisch angetriebenen Drehzylinders getaktet in das Werkzeug gelenkt. Für die Schweißungen hat sich eine Zeitverzögerung der Ventilschaltung zum Zündsignal von 1 ms als günstig erwiesen. Diese Zeitdifferenz gewährt eine sichere und stabile Ausbildung des Lichtbogens und ermöglicht die Entfernung der Schweißspritzer sofort nach Erlöschen des Lichtbogens. Der überwiegende Teil der Spritzer wird in noch glühendem Zustand entfernt (Bild 4.13), wobei ihre Oxidation durch die Luftströmung verstärkt wird.

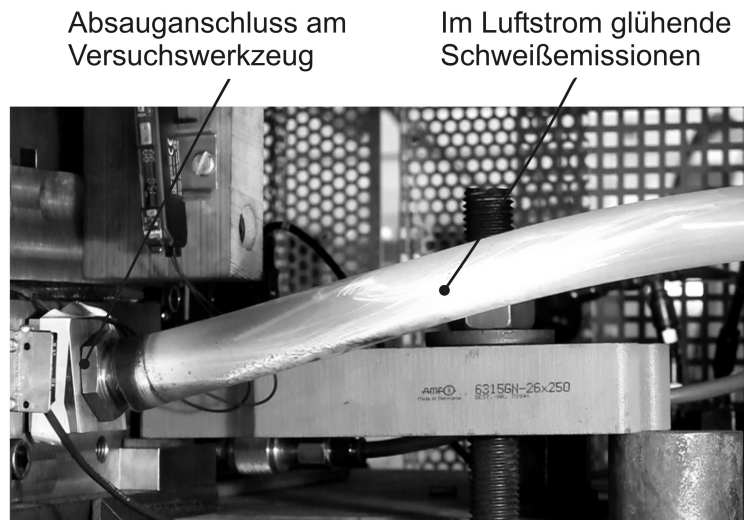


Bild 4.13: Absaugung der Emissionen beim integrierten Schweißprozess

Beim Öffnen des Werkzeuges wird mit Erreichen der Stößelposition bei der der Blechniederhalter den Kontakt zum Blech verliert der Saugstrom ins Werkzeug vom Kugelventil unterbrochen und an die Umgebung umgelenkt.

4.4 Bandanlage und Versuchswerkzeug

Zur automatisierten Zuführung des Blechmaterials in das Versuchswerkzeug wurde eine Bandanlage aufgebaut bestehend aus:

- einer autark gesteuerten Abwickelhaspel vom Typ E 250/190 SM USG der Firma PBK zur Zuführung des Blechbandes vom Coil und
- einem pneumatischen Zangenvorschub vom Typ POWAIR 303 der Firma PBK mit Zwischenlüftung zum Weitertransport des Blechbandes im Werkzeug.

Das Versuchswerkzeug wurde auf einer hydraulischen Doppelständerpresse vom Typ DZP-630 der Firma Walter NEFF (Baujahr 1994) mit einer maximalen Presskraft von 6.300 kN betrieben.

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen mit der entwickelten Schweißstufe wurde ein Versuchswerkzeug in Folgeverbundbauweise aufgebaut. Dabei folgt nach dem doppelten Lochen des Blechbandes eine bearbeitungsfreie Stufe, in der der Blechstreifen mittels Suchstiften und den Lochungen zentriert wird. Anschließend erfolgt der Bolzenschweißprozess. Nach einer weiteren bearbeitungsfreien Stufe zur Abfrage der korrekten Positionierung des Bolzens wird das Versuchsteil abgeschnitten und vereinzelt.

Als Grundwerkzeug dient ein Zweisäulengestell mit der Grundfläche von 290 mm x 290 mm, bestehend aus Unterplatte, Blechniederhalterplatte und Oberplatte (Bild 4.14 bis Bild 4.17). Auf der Unterplatte befinden sich neben den Führungssäulen vier Führungspilze für das Spaltband sowie Schneidbuchsen für die beiden Lochungen. Blechniederhalterplatte und Oberplatte sind mit Führungsbuchsen ausgestattet und federelastisch über vorgespannte Schraubenfedern miteinander verbunden.

Im Blechniederhalter befinden sich mittig das Zuführmodul sowie die Massekontakte zum Werkstück. In der Oberplatte ist neben den Schneidstempeln und dem Obermesser zum Abschneiden des Blechstreifens der Schweißkopf montiert. Zum Antrieb der mechanischen Aktivelemente für die Zuführung steht eine Relativbewegung zwischen Blechniederhalter und Oberwerkzeug von 33 mm zur Verfügung.

Je nach Randbedingungen des zu fertigenden Bauteiles kann diese Schweißvorrichtung prinzipiell in beliebiger Position eines Folgeverbundes eingesetzt werden.

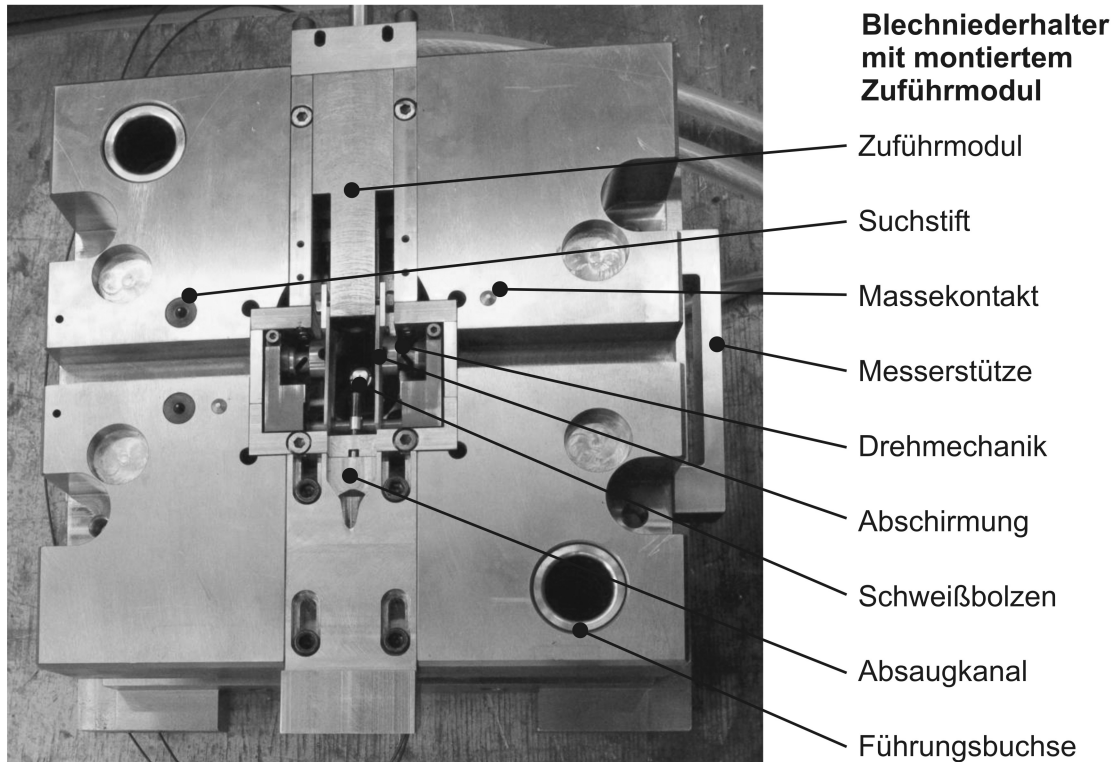


Bild 4.14: Unterseite des Blechniederhalters mit montiertem Zuführmodul

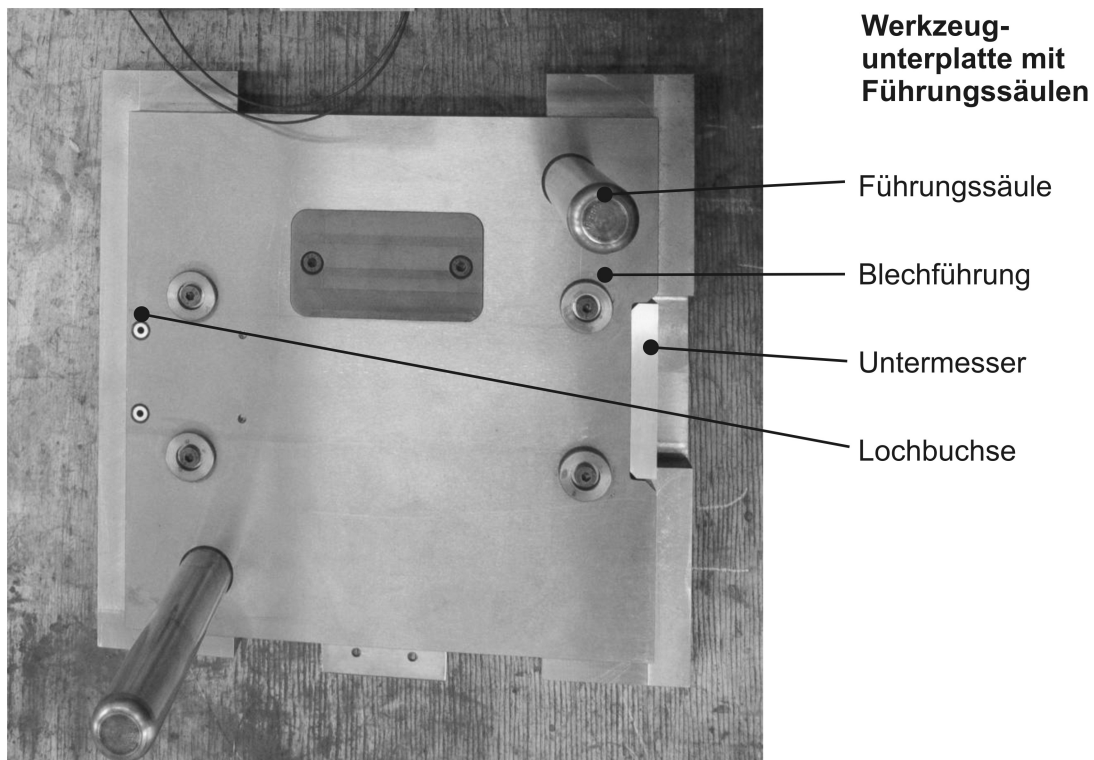


Bild 4.15: Unterplatte mit Führungssäulen

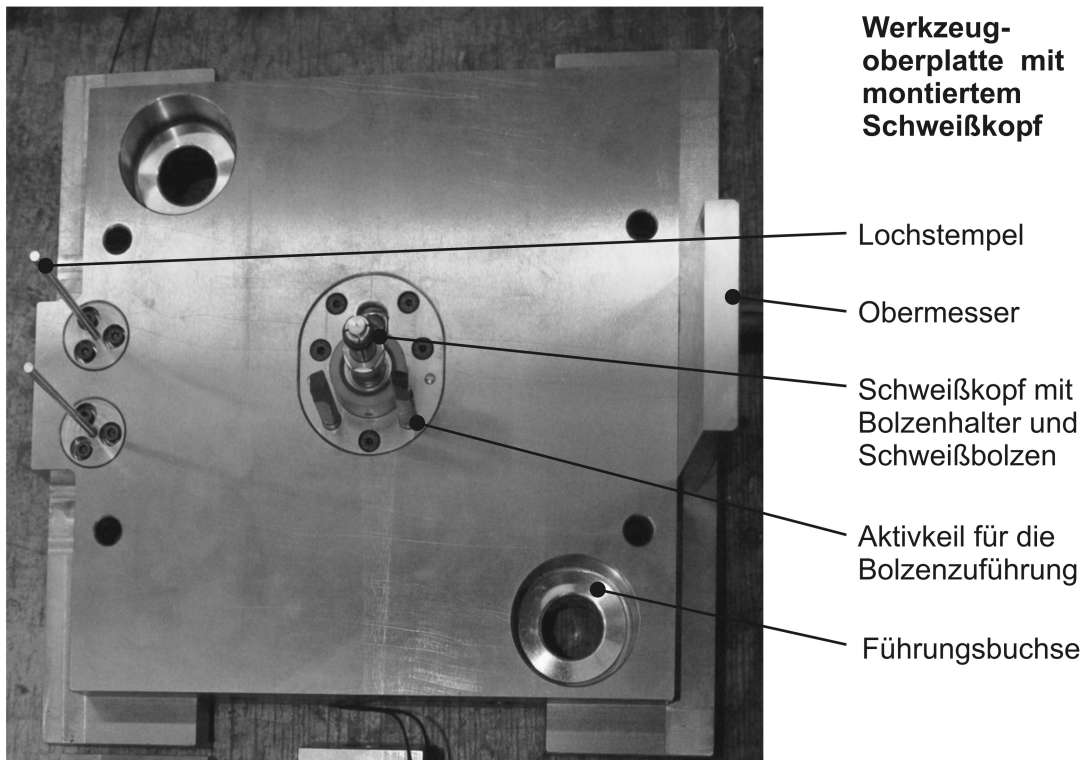


Bild 4.16: Oberplatte mit montiertem Schweißkopf

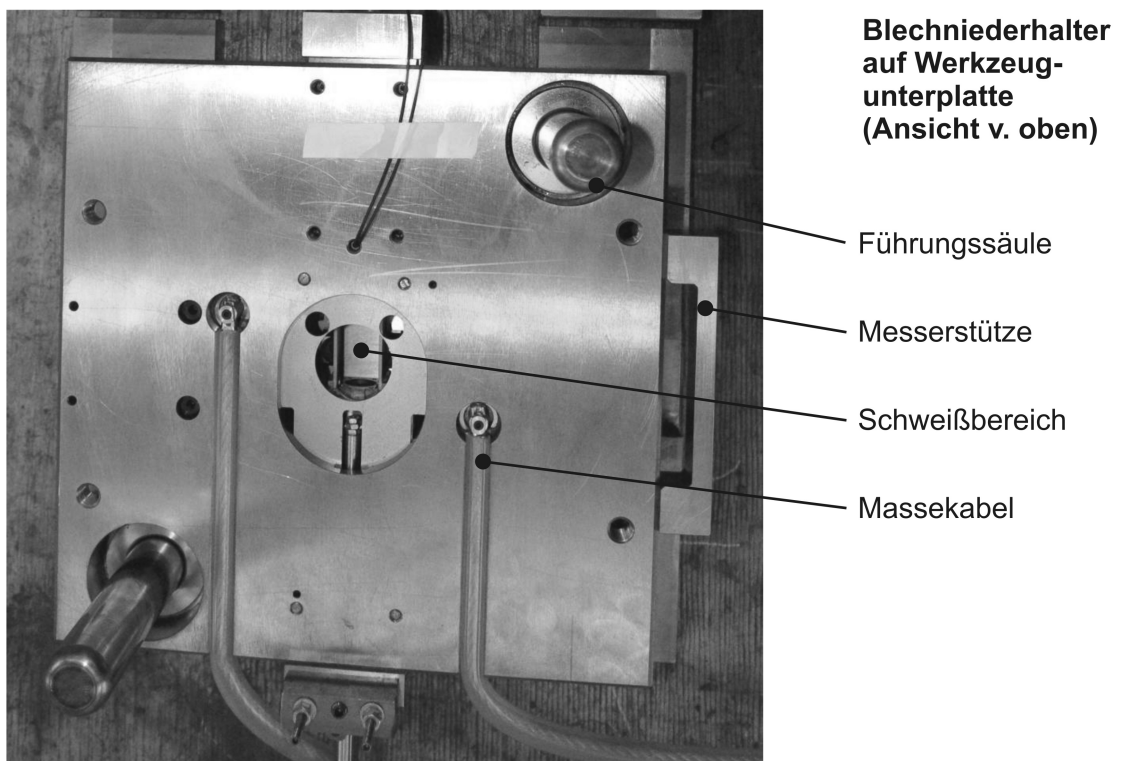


Bild 4.17: Oberseite des Blechniederhalters

Bild 4.18 zeigt das in der Presse eingerichtete und betriebsbereite Versuchswerkzeug. Die Distanzen zwischen der Oberplatte und dem Stößel sind erforderlich für den verwendeten mechanischen Wegtaster und um die Mindesteinbauhöhe zu erreichen.

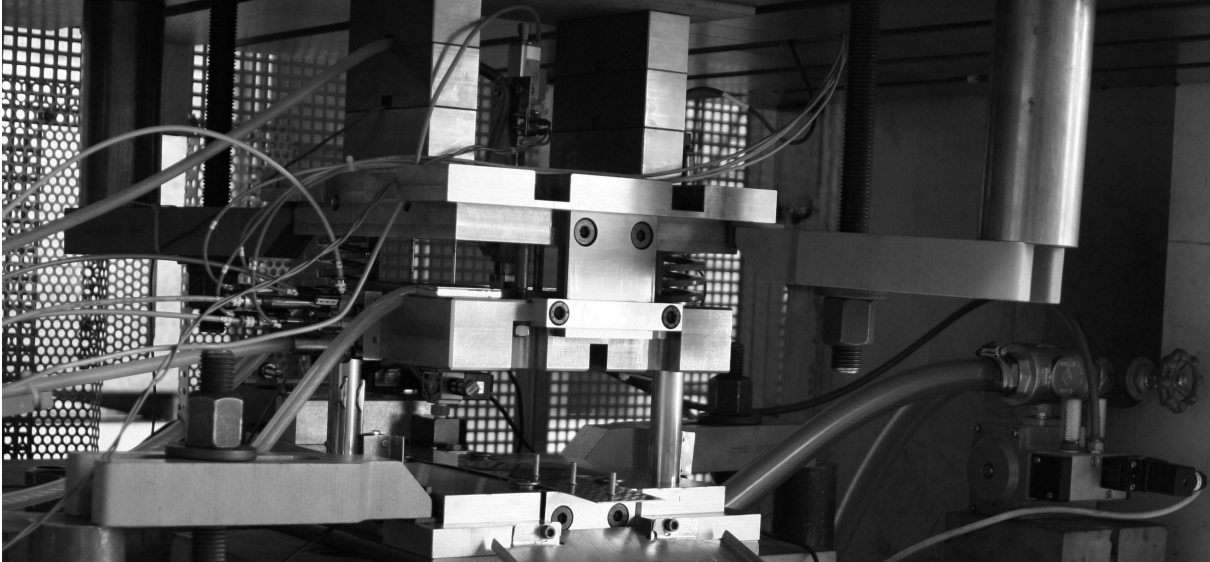


Bild 4.18: In der Presse eingerichtetes Versuchswerkzeug

Bild 4.19 zeigt die erforderlichen Anlagenaggregate in der Peripherie des Versuchswerkzeuges: links die Abwickelhaspel, im Hintergrund das Saugaggregat und auf dem Tisch die Schweißstromquelle und den Vibrationswendelförderer.

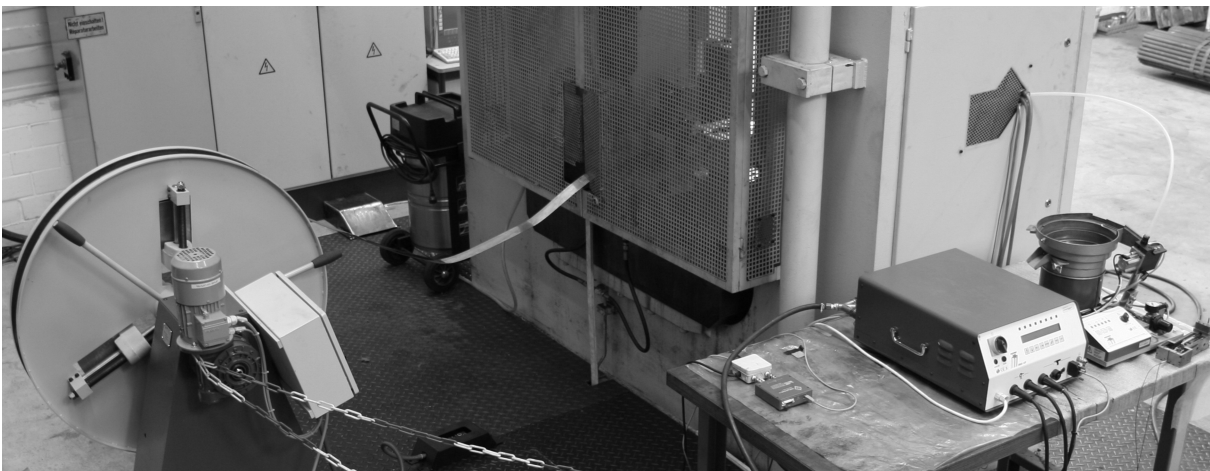


Bild 4.19: Peripherie Aggregate der Versuchsanlage

4.5 Abmessungen des Versuchsteiles

Das Versuchsteil stellt einen gelochten Blechabschnitt mit mittig aufgeschweißtem Bolzen dar. Bild 4.20 zeigt die Abmaße des Versuchsteiles und Fotografien des Teiles nach der Herstellung mit typischen Schmauchspuren vom im Schweißbereich verbrannten Öl sowie in gereinigtem Zustand. Die Breite des verwendeten Spaltbandes beträgt 60 mm. Die Stufenlänge im Folgeverbund und damit auch die Bauteillänge betragen 50 mm. Die zwei Lochungen haben einen Durchmesser von

3,5 mm und dienen zur Zentrierung des Blechstreifens im Werkzeug sowie als Referenzmarke bei der Vermessung der Positionsgenauigkeit des Bolzens. Der Soll-Abstand der Schweißstelle von den Lochungen (Mitte-Mitte) beträgt in Längsrichtung 18 mm und in Querrichtung jeweils 20 mm.

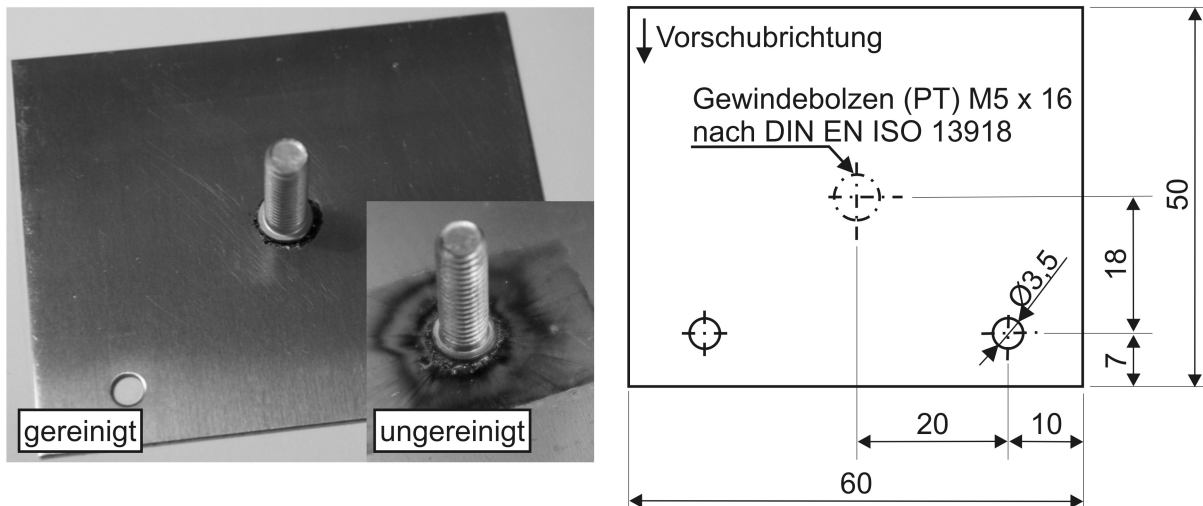


Bild 4.20: Gestalt und Abmaße des Versuchsteiles

4.6 Anlagensteuerung und Automatisierung

Die Steuerung für den automatischen Betrieb der Gesamtanlage besteht aus der Steuerung der Hydraulikpresse und der separaten, von der Stößelposition abhängigen Steuerung der Versuchsanlage.

4.6.1 Pressensteuerung

Der Pressensteuerung wird die Kinematik des Stößels während des Hubzyklus vorgegeben (Bild 4.21). Über die PC-basierte Steuerung können im Zyklusbetrieb bis zu drei Geschwindigkeitsstufen zum Schließen und zwei zum Öffnen vorgegeben werden. Der erste Teil der Schließbewegung (in negative z-Richtung) bis kurz vor dem Aufsetzen der Niederhalterplatte auf das Blech erfolgt im unregelmäßigen Eilgang mit 150 mm/s. Die Presse erreicht im geregelten Betrieb eine maximale Schließgeschwindigkeit von 28 mm/s, so dass die Versuche im getakteten Automatikbetrieb mit etwa 20 Hub/min ausgeführt wurden. Die Geschwindigkeit beim Öffnen wird dabei auf 50 mm/s festgelegt. Eine Verweildauer im UT ist für den Schweißprozess nicht erforderlich, da der Bolzenhalter durch die Federvorspannung das Fügeelement für eine ausreichend lange Zeit fixiert. Im Betrieb zeigt die verwendete Hydraulikpresse aufgrund von Verzögerungen beim Umschalten der Stößelbewegung eine kurze Verweildauer im UT. Diese Tatsache schließt die Übertragbarkeit der Prozessintegration auf mechanische Pressen nicht aus, da der Schweißprozess zum einen nur wenige Millisekunden dauert und auch mechanische Pressen beidseitig des UT nur minimale Stößelgeschwindigkeiten aufweisen.

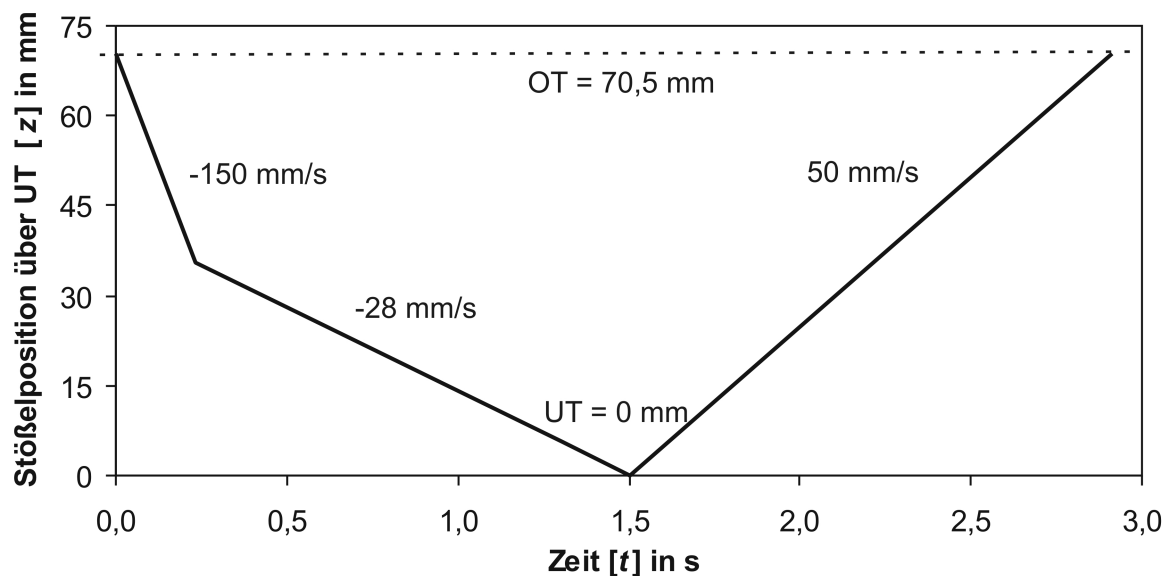


Bild 4.21: Kinematik des Pressenstößels während der Versuche

4.6.2 Anlagensteuerung

Aufgabe der Anlagensteuerung ist die sichere Synchronisation von:

- Schweißprozess,
- Emissionsabsaugung,
- Zuführung der Fügeelemente und
- Blechvorschub mit der
- Stößelbewegung.

Die Anlagensteuerung wird mit der integrierten PC-basierten speicherprogrammierbaren Steuerung (Soft-SPS) TwinCAT (Version 2.10) der Firma Beckhoff realisiert. Die verwendete Hardware besteht aus einem Profibus Klemmensystem mit Ethernetanschluss sowie einem PC. Zur einfachen Bedienung wurde die Steuerung mit Hilfe der Software visualisiert und über einen Touchscreen bedient. Dadurch können insbesondere im Einrichtbetrieb Aktoren einzeln angesteuert und Ursachen von Störungen im Automatikbetrieb schnell erkannt werden.

Die Anlagensteuerung wurde aufgrund der parallelen Abläufe der Pressenbewegung und der Blech- und Bolzenzuführung in Form einer Ablaufsteuerung mit logisch verknüpften Abfragen konzipiert, wobei alle zu steuernden Aggregate und Aktoren in Abhängigkeit zur Stößelposition als Hauptstellgröße stehen. Um unabhängig von der verwendeten Presse zu sein erfolgt die Erfassung der Stößelposition über einen am Werkzeug angebrachten magnetostriktiven Wegsensor. Die geforderte Prozessgenauigkeit von 0,1 mm erfordert eine Auflösung der Wegposition von mindestens 50 μm .

Der Referenzpunkt zur Bestimmung der Stößelposition ist der UT. Dieser Punkt ist abhängig von der Dicke des eingelegten Bleches und wird über ein Eingabefeld angepasst. Sämtliche anderen Stößelpositionen, an denen die positionsabhängigen Aktoren angesteuert werden, ergeben sich aus konstanten Differenzwerten, die aus den CAD-Daten des Versuchswerkzeuges ermittelt und beim Einrichten des Werkzeuges ggf. angepasst wurden.

Aus dem Aufbau der Schweißstufe und der Gesamtanlage ergeben sich folgende von der Anlagensteuerung zu verknüpfende Aktoren und Funktionen:

- Presse (Freigabesignal),
- Blechvorschub,
- Vibrationswendelförderer und Bolzeneinschuss,
- Pneumatikzylinder für das Zuführrohr,
- Pneumatikzylinder für die Abschirmung,
- Schweißstromquelle,
- Drehzylinder des Kugelventils der Absaugung und
- Automatikunterbrechung (Sicherheitsfunktion).

Folgende markante Stößelpositionen teilen den Hubweg in Intervalle für einzelne Teilprozesse, die zur verbalen Prozessbeschreibung genutzt wurden:

- Aufsetzen des Blechniederhalters,
- vollständige Öffnung der Greifmechanik,
- unterer Totpunkt (UT),
- Löseposition der Verriegelung des Drehmechanismus und
- Freigabe des Blechvorschubs.

Zur verbalen Beschreibung der Prozesssteuerung wurden folgende Bedingungen für die einzelnen Teilprozesse abgeleitet:

Bevor das Freigabesignal an die Presse erfolgt, muss

- das Zuführrohr am hinteren Anschlag sein,
- ein neuer Bolzen korrekt in den Klemmbacken fixiert sein,
- der Blechstreifen weitertransportiert worden sein und
- der vorherige Bolzen korrekt auf das Blech geschweißt worden sein.

Bevor der Blechvorschub ausgelöst wird, muss

- das Werkzeug ausreichend geöffnet sein.

Bevor der Bolzeneinschuss erfolgt, muss

- das Zuführrohr den hinteren Anschlag erreicht haben.

Bevor der Zylinder für das Zuführrohr nach vorn bewegt wird, muss

- ein neuer Bolzen zugeschossen worden sein und
- die Presse ausreichend geöffnet sein.

Bevor der Zylinder für das Zuführrohr zurück bewegt wird, muss

- er den vorderen Anschlag erreicht haben.

Bevor der Zylinder für die Abschirmung nach vorn bewegt wird, muss

- die Zuführmechanik geöffnet, d. h. eine definierte Stößelposition erreicht sein.

Bevor der Zylinder für die Abschirmung zurück bewegt wird, muss

- die Presse ausreichend geöffnet sein und
- darf die Verriegelung des Drehmechanismus noch nicht gelöst worden sein.

Bevor der Schweißstrom geschaltet wird, muss

- der Schweißstromkreis geschlossen sein (Kontaktbedingung Bolzen-Werkstück),
- der Kondensator ausreichend geladen sein und
- die Abschirmung in der vorderen Position sein.

Bevor die Absaugung zugeschaltet wird, muss

- die Zündung erfolgt sein.

Aus dieser verbalen Beschreibung wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3260 ein Funktionsdiagramm abgeleitet und die Logik des SPS-Programms entwickelt [VDI3260]. Ergänzt wurden dabei Sicherheitsfunktionen gemäß den aktuell geltenden Vorschriften.

4.6.3 Maßnahmen gegen Fehler und Folgeschäden

Über die Sicherstellung der geforderten Funktion hinaus, muss der Eintritt möglicher Fehler und Störungen in Betracht gezogen werden. Die Anforderungen an die Steuerung zur Vermeidung und Erkennung von Fehlern wurden mit Hilfe einer Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA) entsprechend DIN EN 60812 ermittelt [DIN60812]. Um die Anlage vor Beschädigungen zu bewahren, wurden Sicherheitsabfragen ergänzt und in das Steuerprogramm eingebunden. Bei kritischen Fehlern wird von der Anlagensteuerung ein Notaus-Signal an die Pressensteuerung übergeben.

Aus der FMEA ergeben sich zusammenfassend folgende Forderungen:

- Fehler beim Einstecken des Bolzens in den Bolzenhalter sind zu erkennen.
- Der Vorschub des Blechstreifens ist zu überwachen.
- Die Endstellungen der pneumatisch bewegten Komponenten sind zu erfassen.
- Die Positionierung des Bolzens im Drehmechanismus ist zu überprüfen.
- Die korrekten mechanischen Einstellungen und Verbindungen, insbesondere von Abschirmkomponenten und dem Bolzenhalter, sind sicherzustellen.

Fehler beim Einstecken des Bolzens in den Bolzenhalter werden durch einen mechanischen Endtaster erkannt, der die Stößelbewegung stoppt, sobald der Einfederweg des Bolzenhalters einen kritischen Wert überschreitet. Der Endtaster löst beispielsweise aus, wenn ein Bolzen nicht korrekt zugeführt wird und quer unter den Bolzenhalter gelangt oder sich bereits ein Bolzen im Bolzenhalter befindet. Damit wird vermieden, dass der Schweißkopf bei einem Übergabefehler oder durch eine Fehlbedienung beschädigt wird.

Um sicherzustellen, dass sowohl das Blech korrekt vorgeschoben wurde als auch, dass der geschweißte Bolzen korrekt positioniert und orientiert ist, wurde eine Lichtschranke ergänzt. Wird diese vom zuletzt geschweißten Bolzen nicht unterbrochen, liegt ein Fehler beim Vorschub oder der Schweißverbindung vor. Das Signal des Näherungstasters am Blechvorschub allein ist aufgrund der Schlupfmöglichkeit des Bleches und der hohen Kollisionsgefährdung zu unsicher.

Um die Stellung der Abschirmung und des Zuführrohres zu erkennen und Kollisionen zu vermeiden, werden die Pneumatikzylinder zur Bewegung dieser Elemente mit induktiven Näherungstastern zur Kontrolle der Endlagen ausgestattet. Die Ansteuerung der Zylinder erfolgt über bistabile Ventile, so dass sich die Zylinder im Regelfall stets in einer der beiden Endlagen befinden müssen. Erhöhte Reibwerte aufgrund von Verschmutzung werden durch verzögertes Erreichen der Endlagen festgestellt.

Die Schließbewegung der Presse darf nur ausgelöst werden, wenn sich ein Bolzen korrekt positioniert in der Drehmechanik befindet. Diese Abfrage erfolgt berührungslos durch einen Lichtreflexionstaster, der dem eng begrenzten Bauraum und dem erforderlichen Schaltabstand von 7 mm gerecht wird. Die Auswertung des Messsignals erfolgt dabei in einem Verstärker außerhalb des Werkzeuges. Der Verstärker arbeitet als Schalter und ändert die Stellung, sobald ein definierter Grenzwert der reflektierten Lichtmenge über- oder unterschritten wird.

Aus den zu steuernden Aktoren und den erforderlichen Sicherheitsabfragen leiten sich die Messgrößen ab für die entsprechende Sensoren erforderlich sind. In Tabelle 4.3 sind sämtliche für die Steuerung des Versuchswerkzeuges verwendeten Sensoren aufgeführt.

Tabelle 4.3: Zusammenstellung der verwendeten Sensoren

Messgröße	Messprinzip	Modell, Hersteller
Stößelposition	Magnetostruktiver Wegmesser, 100 mm Messweg	Temposonics E-Series, Fa. MTS Sensor Technologie
Anschlag des Blechvorschubs	Induktiver Näherungstaster	N. N.
Anschläge der Zylinder im Zuführmechanismus	Induktiver Näherungstaster	SMT-8-PS-K5-LED-24-B, Fa. Festo
Abfrage des Bolzeneinschusses	Induktiver Schlauchsensor	ISD 70 PSK-TSSL, Fa. Di-Soric
Abfrage der Bolzenposition im Zuführmechanismus	Lichtreflexionstaster, Schaltabstand 7 ± 2 mm	FU-35FZ mit Verstärker und Linse, Fa. Keyence
Abfrage der Bolzenposition auf dem Blech	Lichtschranke	FPZ-M51P, Fa. Keyence
Ladezustand des Kondensators	In Schweißstromquelle integriert	BMS-10P, Fa. Soyer
Kontaktbedingung zwischen Bolzen und Werkstück		
Anschlag des Bolzenhalters	Mechanischer Endtaster	N. N.

4.7 Überwachung des Schweißprozesses

Während des Betriebes der Versuchsanlage werden der Spannungs- und Stromverlauf sowie die Bolzenbewegung beim Schweißprozess mit Hilfe des PC-gestützten Messwerterfassungssystems STUD-DI der Firma Dr. Josef Gödde Schweissüberwachungen überwacht. Die aufgezeichneten Daten werden von der Software grafisch am PC dargestellt und ausgewertet. Zur Bewertung der erzielten Schweißqualität untersucht STUD-DI alle Schweißungen während des laufenden Prozesses auf signifikante Abweichungen der Strom- und Spannungskurven gegenüber den zuvor gespeicherten Kurven geprüfter Referenzschweißungen. Die Auswertungen beruhen dabei auf der Tatsache, dass sich die Kurvenverläufe bei einer korrekt eingerichteten, stabil arbeitenden Bolzenschweißeinrichtung von Schweißung zu Schweißung nur minimal unterscheiden. Zur Erkennung von defekten Schweißungen wertet das Programm eine Reihe von Grenzwerten und Merkmalen der Strom-, Spannungs- und Wegverläufe nach Bestimmung entsprechender Toleranzbereiche aus. Bei als defekt erkannten Schweißungen bestehen die Möglichkeiten die Anlage unverzüglich zu stoppen oder potentiell fehlerhafte Teile unmittelbar nach der Fertigung automatisiert auszusortieren.

Die Ausgabe der Analyseergebnisse erfolgt mit SPS-kompatiblen Signalen entsprechend einer guten oder einer fehlerhaften Schweißung. Um die Interpretation der Analyseergebnisse zu erleichtern, lassen sich die extrahierten Merkmale und ihre Grenzwertüberschreitungen in die Oszillogramme einblenden.

Die Messtechnik besteht aus zwei 2-Kanal-Transienten-Rekordern mit einer Abtastfrequenz von 100 kHz sowie einem PC zur Auswertung und Speicherung der Messwerte. Der Aufbau des Überwachungssystems ist in Bild 4.22 dargestellt.

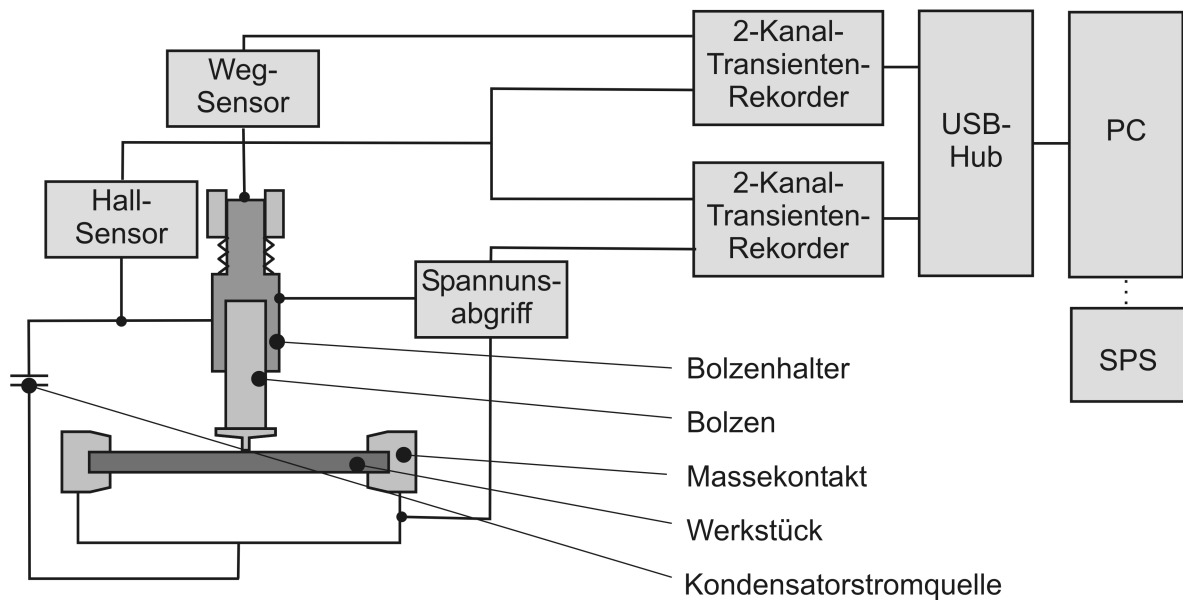


Bild 4.22: Aufbau der Schweißüberwachung

Das Spannungs- und Stromsignal werden in je einen Kanal eines der Rekorder eingespeist. Das Signal des Wegsensors wird mittels eines zweiten Rekorders gleichen Typs aufgezeichnet. Getriggert wird der Start der Messung durch Überschreiten eines relativ geringen Schwellwertes des Schweißstromes bei Beginn der Kondensatorentladung, so dass die Strom- und Spannungsverläufe sowie die Bolzenbewegung parallel über die Dauer des Schweißprozesses aufgezeichnet werden. Die aufgenommenen Daten werden mit Hilfe der Software STUD-DI von dem PC grafisch dargestellt und gespeichert. Alle Daten sind den einzelnen Schweißungen eindeutig zuordenbar.

Der Schweißstrom wird über einen Hall-Sensor, montiert am Schweißstromkabel nahe der Kondensatorstromquelle im Abstand von 10 mm zur Kabelmitte, berührungslos gemessen. Die Kalibrierung des Systems erfolgt durch Erfassung einer Kurzschlussentladung und Abgleich mit der aus Ladespannung und Kondensatorkapazität bekannten Ladeenergie. Messsysteme die mit einem Shunt arbeiten, zeigten in [Sta98] einen nicht realen Stromverlauf.

Die Spannungsmessung erfolgt nahe der Schweißstelle zwischen dem Schweißstromkabel und dem Blechniederhalter des Versuchswerkzeuges. Da der Spannungsabgriff aus funktionalen Gründen nicht genau am Schweißspalt erfolgen kann, erfasst die Messung den gesamten Spannungsabfall zwischen den Abgriffspunkten, welcher aus Ohmschen und induktiven Anteilen der Strom- und Messleitungen besteht. Aus diesem Grund beträgt die zu Beginn der Zündphase gemessene Spannung nicht 0 V [GOE10a]. Zudem kann der Schweißstrom im Stromkreis für die Spannungsmessung eine Spannung induzieren. Diese induzierte Spannung ist umso

größer, je weiter die beiden Adern für den Spannungsabgriff voneinander getrennt sind oder je länger sie mit den Schweißstromkabeln parallel verlaufen. Diese Effekte stören die Bewertungen der Schweißungen im Allgemeinen nicht, sofern die Auswertung auf dem Vergleich mit Referenzschweißungen beruht. Sie können im gewissen Rahmen vom Überwachungssystem STUD-DI berechnet und kompensiert werden [GOE10a].

Die Bolzenbewegung wird mechanisch mittels eines potentiometrischen Wegmess-tasters aufgenommen. Für diese Messungen wurde ein mechanischer Taster über dem Schweißkopf installiert und fest mit dem Bolzenhalter verbunden. Beim Aufsetzen wird der Bolzen durch die Federkraft gegen einen Anschlag im Bolzenhalter gedrückt, so dass die Ausgangs- sowie die Endlage des Bolzens eindeutig bestimmbar ist. Die Lage des bei Prozessbeginn mit voller Aufsetzkraft auf das Blech gedrückten Bolzens stellt die Nullposition zur Messung der Eintauchtiefe dar. Diese wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Länge der Zündspitze und die Tiefe des Schmelzbades. Da der Bolzen während der Fügebewegung nur durch die Spannkraft des Bolzenhalters fixiert ist, ist nach der Umkehr der Bewegungsrichtung bei der Prellbewegung ein Kontakt des Bolzens mit dem Anschlag im Bolzenhalter und damit eine korrekte Messung der Bolzenbewegung prinzipiell nicht sichergestellt. Die Endlage des Bolzens wird wieder eindeutig gemessen.

Die Messung der Aufsetzkraft erfolgt mittels eines Piezo-Kraftaufnehmers. Die Federkraft bei aufgesetztem Bolzen wird für die verschiedenen Federvorspannstufen im statischen Zustand bei stehendem Stößel bestimmt. Auf eine ständige Überwachung der Aufsetzkraft kann verzichtet werden, da Abweichungen der Kraft durch Veränderungen der Auftreffgeschwindigkeit aus der Bewegungsmessung zu erkennen sind.

Eine Übersicht der zur Überwachung des Schweißprozesses verwendeten Sensoren ist in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Tabelle 4.4: Verwendete Messtechnik zur Schweißüberwachung

Messgröße	Messprinzip	Modell, Hersteller
Schweißstrom	Hall-Sensor (Hall-Brücke mit integriertem Verstärker)	Typ SS49, Fa. Honeywell
Lichtbogenspannung	Spannungsteiler	Fa. Dr. Josef Gödde Schweissüberwachungen
Bolzenbewegung	Potentiometer	Typ 8713-10, Fa. Burster
Aufsetzkraft	Piezoelement	N. N., Fa. Kistler
Aufzeichnung der Messsignale	2-Kanal-Transienten-Rekorder	Mephisto Scope UM202, Fa. Meilhaus

5 Experimentelle Untersuchungen

Nach Inbetriebnahme der beschriebenen Versuchsanlage erfolgten experimentelle Untersuchungen des automatisierten Bolzenschweißprozesses mit folgenden Zielen:

- Ermittlung der mechanischen Kenngrößen des entwickelten Schweißkopfes
- Bestimmung einer für den Serienbetrieb geeigneten Einstellung
- Analyse der Prozessstabilität
- Analyse der Robustheit des Prozesses gegenüber Störeinflüssen sowie ihrer Erkennbarkeit durch die Schweißüberwachung

Nach Messung der im Prozess tatsächlich auf die Bolzen wirkenden Aufsetzkräfte wurden durch Variation der Federvorspannung (Tabelle 4.2) die mit dem entwickelten Schweißkopf entsprechend erreichbaren Auftreffgeschwindigkeiten analysiert. Anhand systematischer Variation wurde eine günstige Einstellung der Prozessparameter ermittelt. Diese Referenzeinstellung wurde für den anschließenden Serienversuch übernommen um die Prozessstabilität zu analysieren. In den automatischen Betrieb gezielt eingebrachte Störeinflüsse liefern Aussagen über die Robustheit des Prozesses sowie über die Fehlererkennung durch die Schweißüberwachung. Versuchsreihen mit verzinktem Stahlblech erlauben eine Beurteilung der Prozessfähigkeit dieser Beschichtung. Tabelle 5.1 zeigt den Umfang der im Folgenden beschriebenen Versuche.

Tabelle 5.1: Übersicht der ausgewerteten Versuchsreihen

Versuch	Ziel	Umfang
Analyse der Schweißmechanik	Messung der Aufsetzkraft und Auftreffgeschwindigkeit	6 Krafteinstellungen (Stufe 1–6) (Tabelle 4.2) bei zu- und abnehmender Kraft, je 5 Schweißungen (Kap. 5.3)
Einstellung der Prozessparameter	Prozessanalyse und Ermittlung der Referenzeinstellung	65 Parameterkombination, je 50 Schweißungen (Kap. 5.4)
Prozessstabilität im Serienversuch	Analyse der Prozessstabilität im automatisierten Betrieb	> 3.500 Schweißungen mit 7 Entnahmen (1–7) von je 20 Proben (Kap. 5.5)
Prozessrobustheit gegen Störeinflüsse	Aussagen zur Robustheit des Prozesses sowie zur Erkennbarkeit der Störungen durch die Schweißüberwachung	8 Störeinflüsse (A–H), je 20 Schweißungen (Kap. 5.6)
Verarbeitung von verzinktem Blech	Analyse der Auswirkungen einer Verzinkung auf den integrierten Prozess	2 Versuchsreihen, je 20 Schweißungen (Kap. 5.7)

5.1 Verwendete Werkstoffe

Für den überwiegenden Teil der Versuche wurde unlegiertes kaltgewalztes Stahlblech der Güte DC 04 in den Dicken 0,75 und 1 mm verwendet (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Verwendete Blechwerkstoffe

Werkstoff	Blechdicke	Chemische Zusammensetzung in %					
		C	Si	Mn	P	S	Al
1.0338 DC 04	0,75 mm	0,055	0,005	0,230	0,014	0,006	0,047
1.0338 DC 04	1,00 mm	0,045	0,001	0,221	0,010	0,014	0,049
1.0338: Lieferzustand (LZ) gem. EN 10139/10140, dünn befettet (etwa 5 g/m ²)							
		C	Mn	P	S	Ti	Nb
1.0306 DX54D+Z100	1,60 mm	< 0,12	< 0,60	< 0,045	< 0,045	< 0,30	< 0,30
1.0306: Lieferzustand (LZ), sendzimirverzinkt (etwa 7 µm)							

Bild 5.1 zeigt die Abmaße der verwendeten Normgewindebolzen nach DIN EN ISO 13918 [DIN13918]. Die anhand von 20 Bolzen der verwendeten Charge gemessene Zündspitzenlänge betrug im Mittel 0,75 mm mit maximalen Abweichungen von etwa $\pm 0,03$ mm und befand sich damit im unteren Ende des Toleranzbereiches.

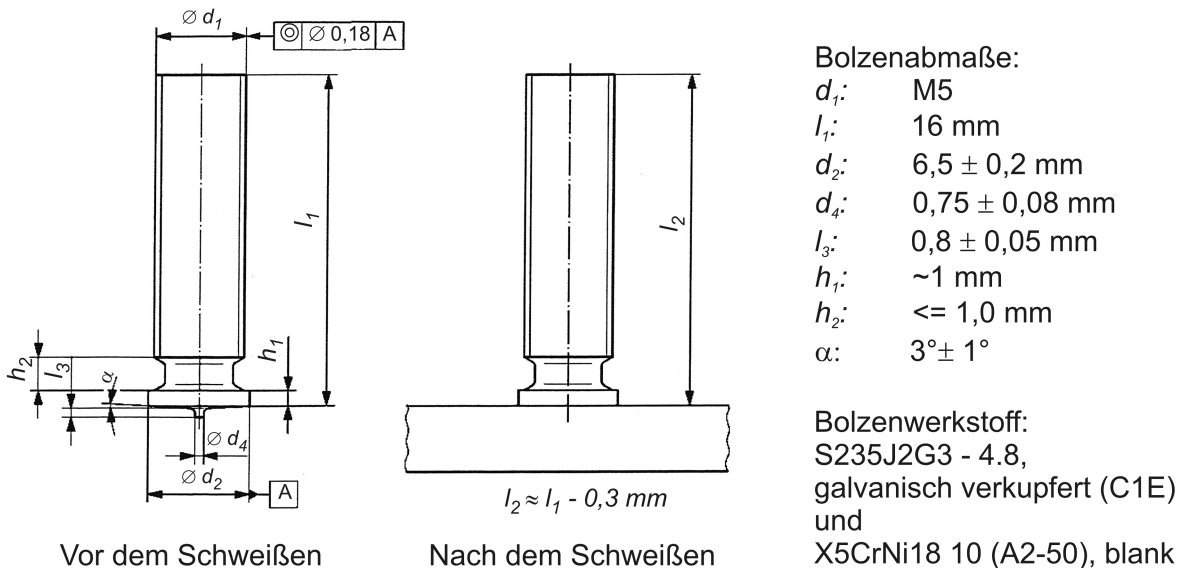


Bild 5.1: Verwendeter Gewindebolzen Typ PT M5 x 16 nach [DIN13918]

Zur Untersuchung der Prozessstabilität und -robustheit wurden — wenn nicht ausdrücklich anders bezeichnet — Bolzen aus unlegiertem ferritisch-perlitischem Stahl der Güte S235 auf entsprechend dem Lieferzustand (LZ) dünn befettetes 1 mm dickes Stahlblech der Güte DC 04 geschweißt. Versuche mit Blech- und Bolzenmaterial aus austenitischem CrNi-Stahl sowie mit verzinktem Blech zeigen die grundsätzliche Eignung dieser Werkstoffe für den entwickelten Prozess. Die unlegierten bzw. legierten Schweißbolzen entstammten jeweils ausschließlich einer Fertigungscharge.

Sämtliche Werkstoffe weisen einen Kohlenstoffgehalt von weit unter 0,3 % auf. Auch das jeweilige Kohlenstoffäquivalent (CEV) der unlegierten Stähle beträgt mit etwa 0,1 für die Bleche und 0,2 für die unlegierten Bolzen deutlich unter 0,3. Damit gelten die eingesetzten Werkstoffe als gut schweißbar.

5.2 Beurteilung der Fügequalität

Zur Beurteilung der Füge- und Prozessqualität werden die Schweißergebnisse neben der sofortigen Sichtprüfung einer mehrfach wechselseitigen Biegeprüfung unterzogen und Schliffbilder für metallografische Untersuchungen angefertigt. Die Positionsgenauigkeit wurde durch taktile Vermessung der Schweißproben ermittelt. Die einzelnen Untersuchungsmethoden werden im Folgenden näher beschrieben.

5.2.1 Sichtprüfung der Schweißzone

Anhand der Sichtprüfung ist ein zu geringer oder zu hoher Energieeintrag schnell festzustellen. Im ersten Fall wird keine vollflächige Verbindung erreicht und es treten Unterschneidungen auf, während im zweiten Fall die Spritzerbildung übermäßig erhöht ist. Auch können bei zu hoher Energie einseitige Materialauswerfungen infolge von Blaswirkungen provoziert werden. Beurteilt werden im Wesentlichen die Ausprägung des Spritzerkranzes um den Bolzen herum sowie die Beobachtungen der Spritzerbildung im Prozess. Darüber hinaus wird das Werkzeug im Serienversuch regelmäßig auf Verschmutzungen überprüft.

5.2.2 Biegeprüfung und Ausknöpfversuche

Um die Tragfähigkeit der Bolzenschweißverbindungen (Bild 5.2 a) beurteilen zu können, wird vorwiegend eine mehrfach wechselseitige Biegeprüfung (Bild 5.2 c) als zerstörende Prüfmethode angewendet. Die Durchführung erfolgte manuell mittels eines aufgesteckten Stahlrohres (Bild 5.2 b), das den Bolzen mit einem Spiel von 0,5 mm umschließt. Das untere Ende dieses Rohres ist außen verrundet, um eine Abstützung gegen das Blech zu vermeiden. Vorteile dieser Biegeprüfung gegenüber einer Zugprüfung sind bessere Aussagen bezüglich der Randanbindung sowie die einfache und schnelle Durchführbarkeit.

Bei mehrmaligem wechselseitigen Biegen mit $\pm 20^\circ$ Biegewinkel ist bei einwandfreien Schweißungen auf dünnem Material der Bruch im Blech durch Ausknöpfen über den gesamten Fügequerschnitt zu erwarten. Bei dickeren Blechen oder besonders günstigen Randanbindungen kann der Bruch auch im Bolzen auftreten. Brüche in der Schweißzone sind ein Hinweis auf eine ungenügende Schweißqualität z. B. durch ungünstig gewählte Parameter oder Prozessstörungen.

Die einfache Biegeprüfung mit 30° -Biegewinkel (Bild 5.2 d), wie sie nach DIN EN ISO 14555 beim Spitzenzündungsverfahren anzuwenden ist, oder mit 60° -Biegewinkel (Bild 5.2 e), wie für das Hubzündungsverfahren vorgesehen [DIN14555], erwiesen sich als nicht aussagekräftig, da nahezu alle Schweißungen diese Prüfungen bestanden und keine quantitativ auswertbaren Merkmale zur differenzierten Bewertung der Proben gegeben waren.

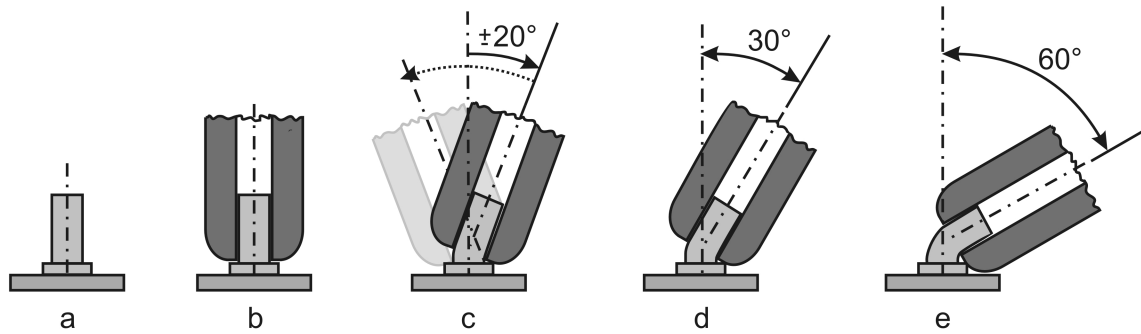
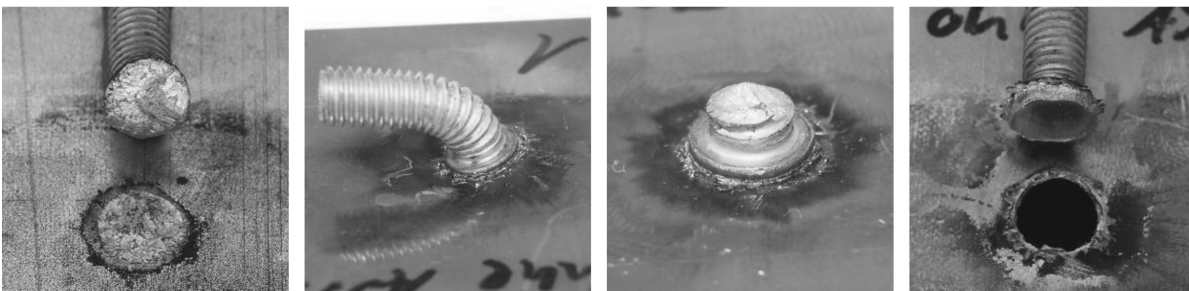


Bild 5.2: Varianten der Biegeprüfung

Bild 5.3 zeigt typische Bruchlagen nach verschiedenen Biegeprüfungen. Aufnahme Bild 5.3 a demonstriert einen Bruch in der Schweißzone bei einer Schweißung mit ungünstiger Einstellung und unzureichender Tragfähigkeit. Proben nach bestandener einfacher 60°-Biegeprüfung zeigen eine rissfreie Verformung (Bild 5.3 b). Eine aussagekräftigere und differenziertere Beurteilung der Tragfähigkeit der Schweißungen liefert die mehrfach wechselseitige Biegeprüfung. Bei stark ausgeprägtem Schweißwulst und großflächiger Verbindung erfolgt der Bruch der Schweißungen dabei im Bolzengewinde, deutlich oberhalb der Wärmeinflusszone (WEZ) (Bild 5.3 c). Bei normal und moderat ausgeprägtem Schweißwulst, der mit geringerer Spritzerbildung einhergeht, erfolgt ein Ausknöpfen des Bleches (Bild 5.3 d). Der Ausknöpfungsdurchmesser des Bleches, bestimmt aus dem Mittelwert des größten und kleinsten Messwertes, ist dabei ein Maß für die Schweißqualität und Tragfähigkeit der Verbindung. Gute Schweißungen knöpfen dabei vollflächig über den gesamten Flanschquerschnitt aus. Ein Wert ab 6 mm entspricht etwa dem Flanschdurchmesser und ist für einen M5-Bolzen als gut zu bezeichnen, da ab etwa diesem Wert die Scherfestigkeit der verwendeten Bleche die maximale Verbindungsfestigkeit limitiert.



a) Bruchlage in
Schweißzone:

nicht bestanden

b) Biegewinkel > 60°
nach einfacher
Biegeprüfung:
bestanden

c) Bruchlage im
Bolzengewinde nach Biege-
wechselprüfung:
bestanden

d) Bruchlage im Blech
nach Biege-
wechselprüfung:
bestanden

Bild 5.3: Beispielhafte Ergebnisse der Biegeprüfungen

5.2.3 Schliffuntersuchungen

Zur Beurteilung der Einbrandtiefe und der Bindequalität werden Querschliffe durch die Fügezone angefertigt. Die Proben werden auf rotierenden Nassschleifscheiben (Körnungen: 120-400-600-1200) geschliffen und ggf. poliert sowie mit dem Ätzverfahren nach ADLER zur makroskopischen Beurteilung der Schweißnähte behandelt.

5.3 Analyse der Schweißmechanik

Eine beim Spitzenzündungsverfahren wichtige mechanische Kenngröße ist die Auftreffgeschwindigkeit des Bolzens auf das Blech. Sie wird bestimmt durch die Federkraft, die beschleunigte Masse und die Reibwiderstände. Nur bei ausreichend hoher Auftreffgeschwindigkeit werden die mit dem Lichtbogen erzeugten Schmelzbäder an Bolzen und Blech in noch flüssigem Zustand vermischt. Bei konventionellen Schweißköpfen werden für das Kontaktverfahren Auftreffgeschwindigkeiten von mindestens 300 mm/s empfohlen [SLV03]. Bei Werten über 800 mm/s besteht aufgrund der kurzen Lichtbogenbrenndauer das Risiko eines zu geringen Energieeintrages. Durch eine höhere Ladespannung kann dieser Effekt zwar kompensiert werden, bei herkömmlichen Schweißköpfen ist dabei aufgrund des hohen Auftreffimpulses mit starken Schwingungen und Prellbewegungen der Fügeteile während der Erstarrung der Schmelze zu rechnen. Für eine hohe Fügequalität ist sicherzustellen, dass die erste Rückprellbewegung erst nach der Erstarrung im verschweißten Zustand erfolgt [Sch89]. Zudem ist bei höherer Ladespannung und Auftreffgeschwindigkeit mit verstärkter Spritzerbildung zu rechnen [SLV03]. Übliche Schweißgeräte besitzen eine etwa doppelt so hohe bewegte Masse wie der entwickelte Schweißkopf und setzen beim Auftreffimpuls eine entsprechend höhere Energie frei. Bei einer kleinen bewegten Masse sind die Rückprellbewegungen verringert und stärker gedämpft [SLV03].

Kraftmessungen am entwickelten Schweißkopf in vorgespannter Ausgangsposition bestätigten, dass die tatsächlich wirkenden Aufsetzkräfte im betriebswarmen Zustand den ausgelegten Werten entsprechen (Kapitel 4.3.2). Die Reibkräfte des Kolbens können beim verwendeten Schweißkopf vernachlässigt werden. Eine Messung des Kraftverlaufes während des Schweißprozesses war konzeptionell nicht vorgesehen.

Um die resultierenden Auftreffgeschwindigkeiten des entwickelten Schweißkopfes bei verschiedenen Federkräften zu ermitteln, wurden zunächst die erreichten Auftreffgeschwindigkeiten bei einer Ladespannung von 130 V und einer Kondensatorkapazität von 66 mF gemessen (Bild 5.4). Die Punkte des Diagramms stellen dabei jeweils die Mittelwerte aus je fünf Schweißungen dar. Die zwei Kurven zeigen die Ergebnisse je einer Messreihe mit zunehmender und abnehmender Aufsetzkraft. Differenzen dieser Kurven sind durch Veränderungen der Federkraft aufgrund der Drehrichtung der Einstellschraube zu erklären. Aufgrund von Reibkräften wird die Schraubendruckfeder bei der Einstellung tordiert und verändert ihre Druckkraft.

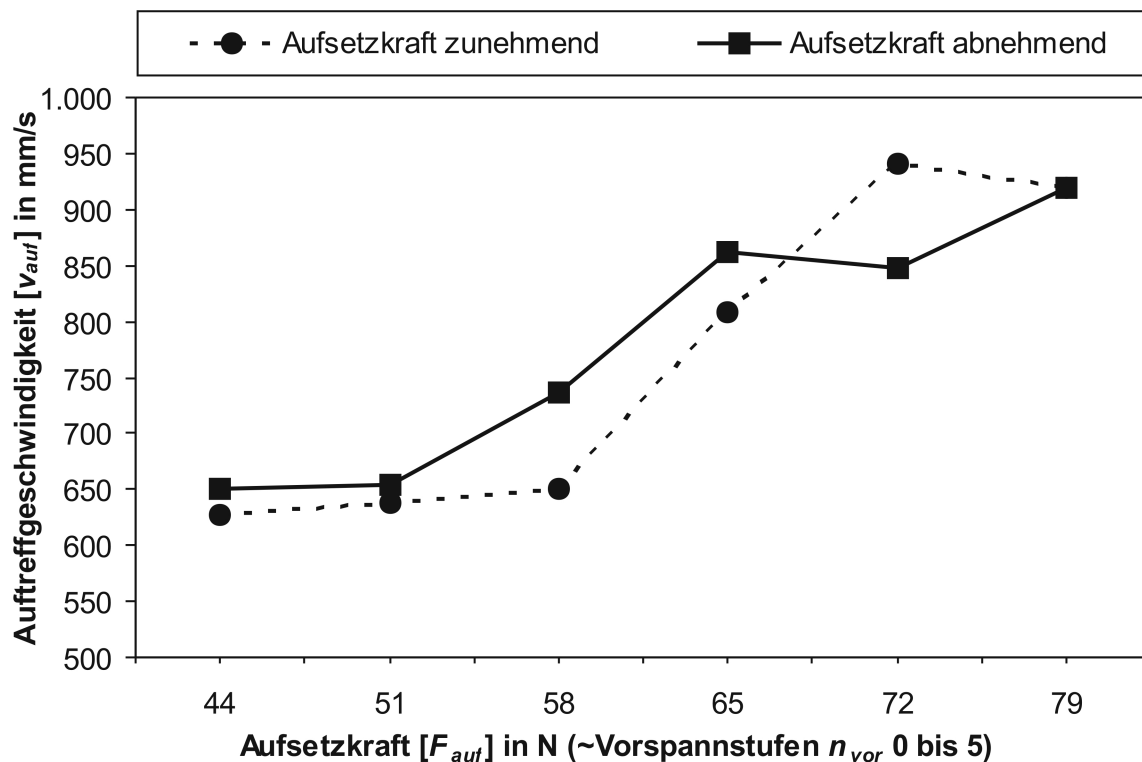


Bild 5.4: Auftreffgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Aufsetzkraft

Die Auftreffgeschwindigkeiten des entwickelten Schweißkopfes zeigen sich mit Werten zwischen 600 und 1.000 mm/s im Vergleich zu üblichen Schweißgeräten für das Kontaktverfahren, mit Auftreffgeschwindigkeiten von typischerweise unter 700 mm/s, auf hohem Niveau (Bild 5.5) [SLV03]. Die Federsteifigkeiten c_F der verschiedenen Schweißköpfe betragen:

- In dieser Arbeit entwickelter „IPH-Kopf“: 4,7 N/mm
- Pistole PS-1K (Fa. Soyer): 15 N/mm
- Pistole PMK C08 (Fa. HBS): 10 N/mm
- Automatikkopf KHA 200 (h) (Fa. BTH): 5 N/mm
(für Spaltverfahren und Hubzündung)

Bei einer Federkraft von 72 N (Stufe 4) wurde mit dem in dieser Arbeit entwickelten Schweißkopf eine Auftreffgeschwindigkeit von über 850 mm/s erreicht, wobei mit einer Ladespannung von 130 V die besten Schweißergebnisse erzielt wurden. Eine übermäßige Spritzerbildung war dabei nicht zu beobachten.

Auch bei Bolzen mit einem Zündspitzenquerschnitt an der unteren Toleranzgrenze ist erst ab einer Aufsetzkraft von über 82 N mit einem Überschreiten der Streckgrenze des Bolzenmaterials und wesentlicher plastischer Verformung zu rechnen.

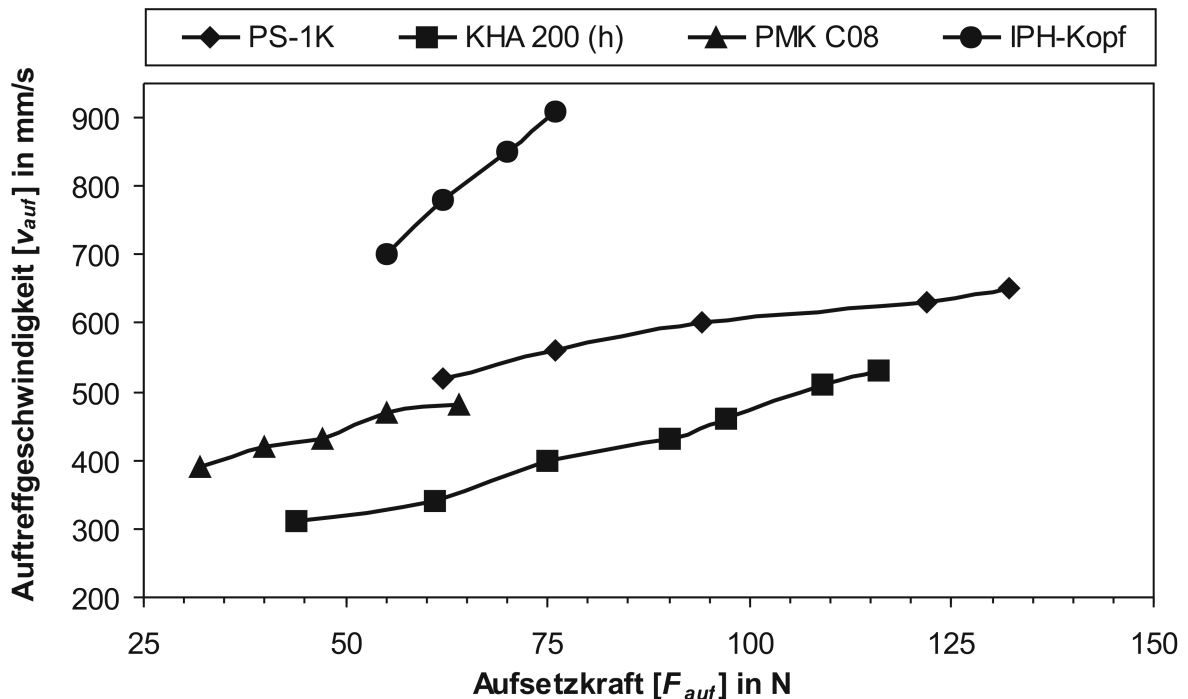


Bild 5.5: Auftreffgeschwindigkeiten verschiedener Schweißköpfe für das Kontaktverfahren in Abhängigkeit von der Aufsetzkraft [SLV03]

Nach den Ergebnissen in [SLV03] wurde angenommen, dass ideale Auftreffgeschwindigkeiten zwischen 300 und 550 mm/s liegen. Hochwertige Schweißergebnisse wurden bei stark beschleunigter Bewegung und einer signifikant kurzen Lichtbogenbrenndauer von deutlich unter 2 ms erreicht. Für die Spitzenzündung bei dem verwendeten Bolzenquerschnitt erwartet wurden Messwerte um 3 ms [SLV03].

Die Untersuchungen der Schweißmechanik ergeben neben der Geschwindigkeitskennlinie des entwickelten Schweißkopfes die Erkenntnis, dass der aufgebaute werkzeugintegrierte Prozess im Bereich relativ hoher Auftreffgeschwindigkeiten die besten Fügeergebnisse liefert.

Der Zusammenhang zwischen Lichtbogenbrenndauer und Auftreffgeschwindigkeit des Schweißkopfes ist in Bild 5.6 dargestellt. Dieses Diagramm wurde aus den Daten sämtlicher im Rahmen dieser Arbeit ausgeführten Schweißungen ermittelt und charakterisiert den Einsatzbereich des entwickelten Schweißkopfes.

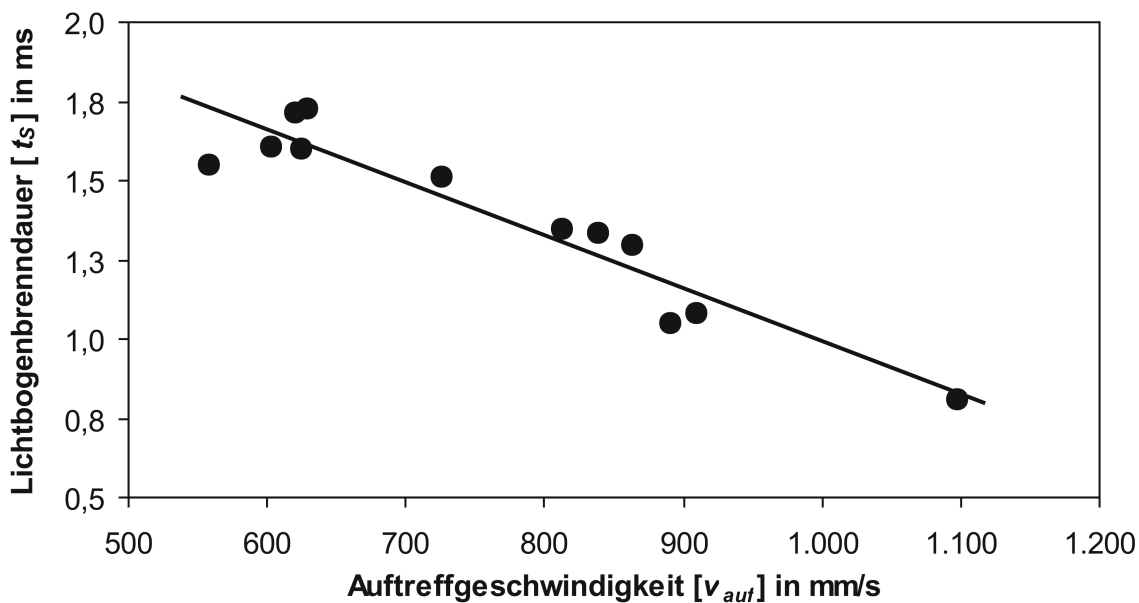


Bild 5.6: Zusammenhang zwischen Auftreffgeschwindigkeit und Lichtbogenbrenndauer (Trendlinie)

Der entwickelte Prozess erreichte selbst bei der maximalen Auftreffgeschwindigkeit von 1.100 mm/s gute Fügeergebnisse trotz entsprechend kurzer Lichtbogenbrenndauer von unter 1 ms. Die vergleichbaren Schweißergebnisse über einen vergleichsweise weiten Bereich der Lichtbogenbrenndauer deuten darauf hin, dass der Eintrag der mindest erforderlichen Schweißenergie nach etwa 1 ms erfolgt ist und die Wärmebilanz der Schweißstelle bei längeren Lichtbogenbrenndauern im späteren Prozessverlauf lange weitgehend ausgeglichen ist.

Damit zeigt sich, dass mit dem entwickelten Schweißmodul deutlich höhere Auftreffgeschwindigkeiten erreicht werden, als mit dem Kontaktverfahren bisher üblich. Die Kennwerte entsprechen dem schnelleren Spaltverfahren mit typischen Lichtbogenbrenndauern zwischen 0,5 bis 2 ms.

Ein Abgleich des entwickelten Prozesses mit einem von SCHMITT für das Spaltverfahren erstellten Nomogramm (Bild 5.7) ergibt eine zu erwartende Lichtbogenbrenndauer von etwa 1,4 ms [Sch83]. In den Versuchen beträgt die Lichtbogenbrenndauer mit dem entwickelten Schweißkopf für das Kontaktverfahren bei günstiger Einstellung zwischen 1,5 und 1,6 ms. Mit üblichen Schweißköpfen für das Kontaktverfahren wäre für Bolzen der verwendeten Dimension eine — gegenüber dem Spaltverfahren um mindestens 50 bis 100 % erhöhte — Lichtbogenbrenndauer von 2 bis 3 ms [KOE10b, SLV03] zu erwarten gewesen.

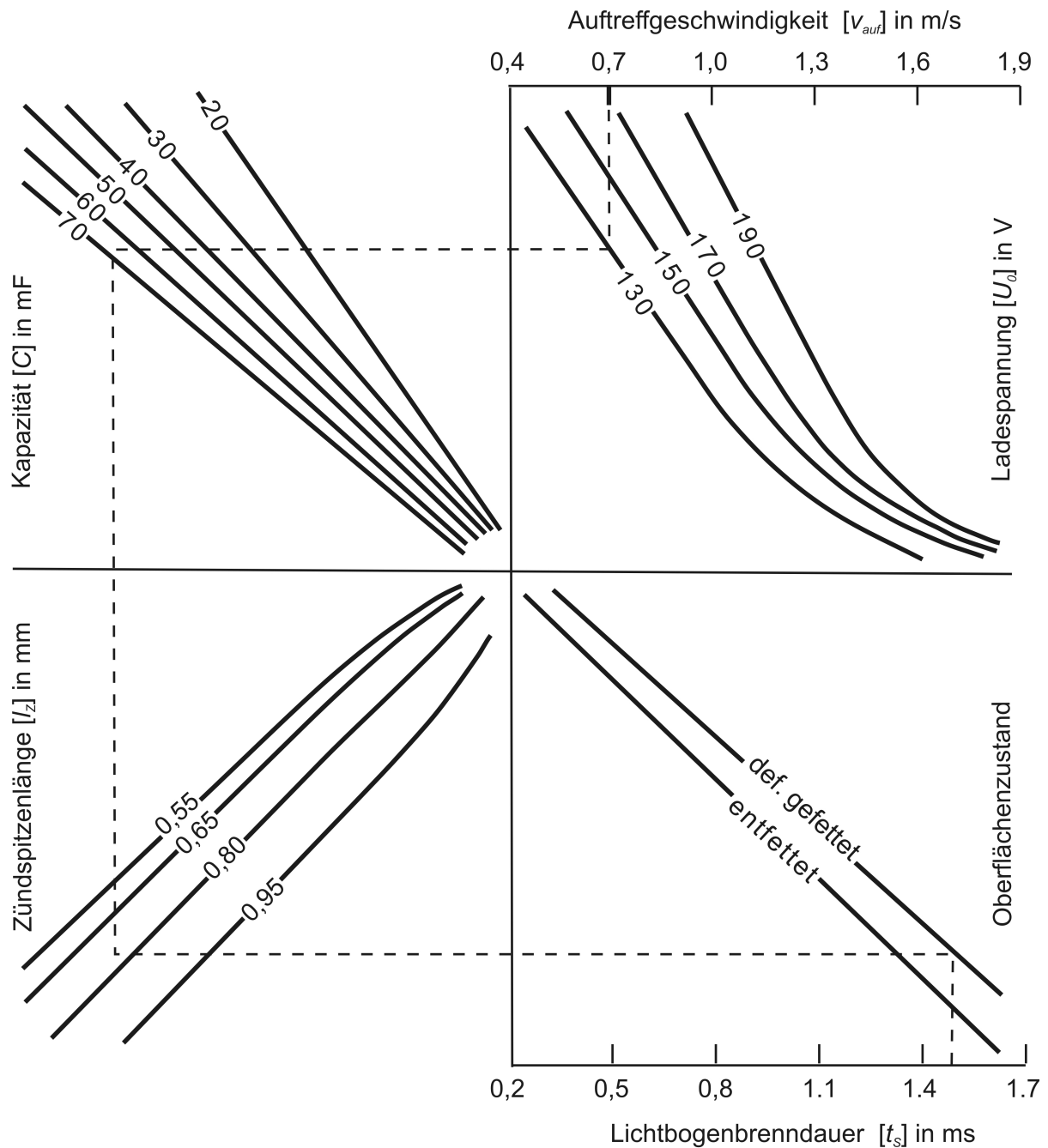


Bild 5.7: Nomogramm der Zusammenhänge zwischen Auftreffgeschwindigkeit, Ladespannung, Kapazität, Zündspitzenlänge, Oberflächenzustand und Lichtbogenbrenndauer nach SCHMITT [Sch83] (ermittelt für das Spaltverfahren)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Reduzierung der beschleunigten Masse kürzere Schweißzeiten bei einem zugleich stabilen und gegenüber Schwankungen der Einstellparameter relativ toleranten Prozess ermöglicht.

Neben der Auftreffgeschwindigkeit liefern die Eintauchtiefe, der qualitative Verlauf der Bolzenbewegung (ideal: stetiger monoton degressiver Verlauf) und die Ausprägung von Schwingungen durch eine Prellbewegung wichtige Aussagen zur Bewer-

tung der Prozessstabilität sowie der Fügequalität und können zur Prozessüberwachung ergänzend herangezogen werden.

Mit der verwendeten mechanischen Wegüberwachung konnten die Auftreffgeschwindigkeit sowie die Eintauchtiefe ermittelt werden. Da die Bolzen aufgrund der automatisierten Zuführung nicht fest mit dem Wegmesssystem verbunden werden konnten, sind detaillierte Aussagen zum Prellverhalten nicht möglich. Die Überwachung der Bolzenbewegung war konzeptionell nur indirekt über den Bolzenhalter möglich, der den Bolzen mittels einer relativ geringen Klemmkraft reibschlüssig fixiert. Die gewonnenen Daten der Auftreffgeschwindigkeit, des Beschleunigungsverhaltens sowie der finalen Eintauchtiefe liefern dennoch wertvolle Hinweise auf mechanische Einflüsse auf den Schweißprozess z. B. durch einen kritischen Verschmutzungszustand der Schweißkopfmechanik. Um die Bolzenbewegung im automatisierten Betrieb direkt messen zu können, ist ein berührungsloses optisches Messsystem erforderlich.

5.4 Einstellung der Prozessparameter

Die Prozessführung beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung wird durch elektrische und mechanische Einflussparameter bestimmt. Aufgrund der kurzen Lichtbogenbrenndauer sowie der hohen Dynamik müssen die Phasen des Schweißprozesses primär durch die Einstellparameter Kondensatorkapazität, Ladespannung und Aufsetzkraft auf die spezifischen Randbedingungen der Anlage abgestimmt werden. Zur Ermittlung einer geeigneten Einstellung der Prozessparameter wurden die in Tabelle 5.3 genannten Einflussfaktoren in einer Parameterstudie systematisch variiert.

Tabelle 5.3: Variierte Prozessparameter

Prozessparameter	Variation
Kondensatorkapazität C	33 mF; 66 mF; 99 mF
Ladespannung U_L	100–160 V (in 10 V-Schritten)
Aufsetzkraft F_{auf}	44–86 N (in den Stufen 0–6)
Blechdicke s_0	0,5 mm; 0,75 mm; 1 mm
Oberflächenzustand	Lieferzustand (LZ); entfettet mittels Aceton (EF)

Anhand der im Folgenden beschriebenen Prozessbeobachtungen und Untersuchungsergebnisse aus Sicht- und Biegeprüfungen sowie Gefügebildern wurde eine geeignete Referenzeinstellung für die anschließenden Untersuchungen des Prozesses im Serienbetrieb bestimmt. Beurteilungskriterien dabei sind:

- die Ausprägung der Spritzerbildung,
- das Erscheinungsbild der Schweißverbindung,
- der erreichte Ausknöpfungsdurchmesser und
- die im Schliffbild erkennbare Verbindungsqualität.

5.4.1 Kapazität

Die Energie die für den Schweißprozess zur Verfügung steht, wird bestimmt durch die Kapazität der Kondensatorbatterie und die Ladespannung. In der Praxis weisen die Kondensatorbatterien selten mehr als zwei Kapazitätsstufen auf. Für den Bolzennennendurchmesser M 5 ist aus Bild 5.8 ein Anhaltswert für die Ladeenergie W_L von 700 Ws zu entnehmen [DVS0903, DVS0904, Tri97]. Diese Ladeenergie ergibt sich gemäß:

$$W_L = 0,5C \cdot U_L^2 \quad (5.1)$$

Daraus ergeben sich die für die drei mit der verwendeten Schweißstromquelle möglichen Kapazitätsstufen 33, 66 und 99 mF empfohlenen Einstellwerte für die Ladespannung von etwa 205, 145 und 120 V.

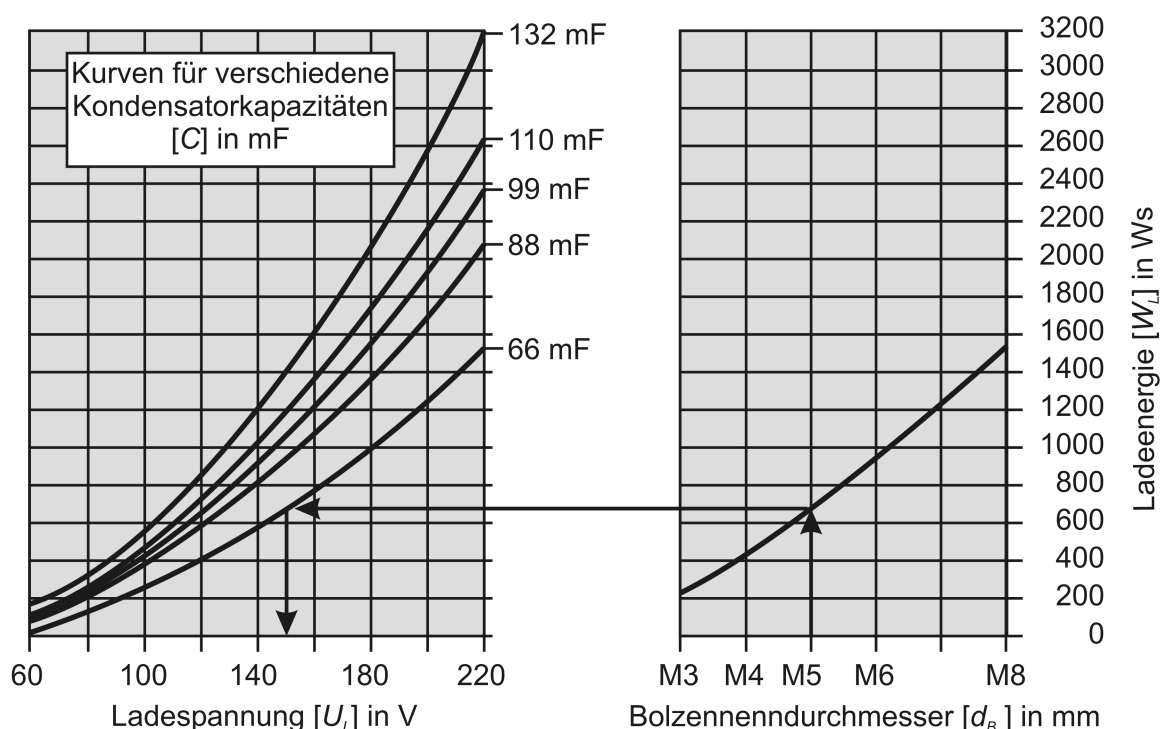
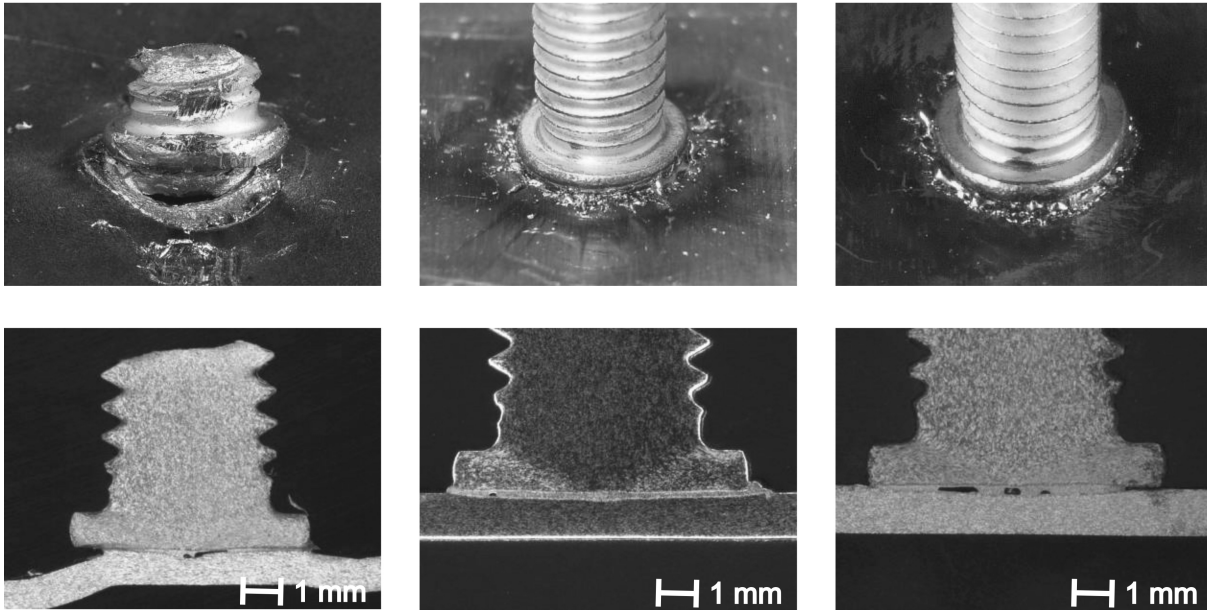


Bild 5.8: Überschlägige Ermittlung der Ladespannung zum Schweißen von Stahlbolzen im Spitzenzündungsverfahren nach [DVS0904]

Die geeignete Kondensatorkapazität wurde in Vorversuchen bestimmt. In Bild 5.9 sind beispielhafte Ansichten und zugehörige Schliffbilder zur Beurteilung der Anschmelz- und Einbrandform bei verschiedenen Kondensatorkapazitäten dargestellt. Eine Kapazität von 33 mF führt bei Ladespannungen unter 160 V zu einem nicht ausreichenden Energieeintrag. Bei Schweißungen mit einer Kapazität von 33 mF und einer Ladespannung von 120 V treten beispielsweise deutliche Bindefehler im Randbereich und in der Mitte auf (Bild 5.9 a). Die für die geringe Kapazität hohe erforderliche Ladespannung befindet sich nahe der oberen Einstellgrenze des Schweißgerätes bei 200 V und führt damit zu einer nur eingeschränkten Anpassungsmöglichkeit.



a) Kapazität 33 mF,
Ladespannung 120 V:
ungeeignet
(nach Biegeprüfung)

b) Kapazität 66 mF,
Ladespannung 120 V:
gut geeignet

c) Kapazität 99 mF,
Ladespannung 105 V:
ungeeignet

Bild 5.9: Ansichten und Schiffe bei unterschiedlichen Kapazitäten
(F_{auf} : 72 N (Stufe 4); Blech: 1 mm; DC04; LZ)

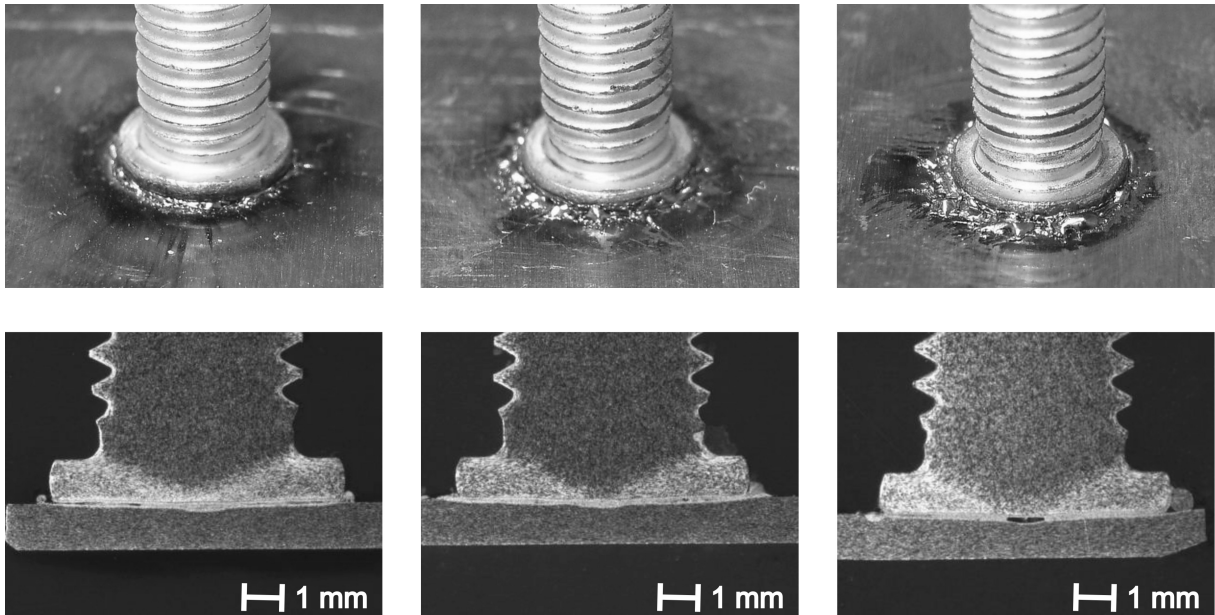
Bei Schweißungen mit 66 mF konnten in den Vorversuchen ab einer Ladespannung von etwa 120 V keine wesentlichen Schweißfehler festgestellt werden (Bild 5.9 b).

Einstellungen mit einer Kapazität von 99 mF führen ab einer Ladespannung von 105 V zu starker Spritzerbildung. Die geringe Ladespannung bei dieser Einstellung führt zu instabilem Zündverhalten des Lichtbogens und verstärkt auftretenden Bindefehlern (Bild 5.9 c).

Aufgrund der für die Lichtbogenzündung günstigen Ladespannung und des gut reproduzierbaren Zündverhaltens sowie der umfangreicheren Einstellmöglichkeiten der Ladeenergie, wurde die Kapazität von 66 mF für die weiteren Versuche festgelegt.

5.4.2 Ladespannung und Aufsetzkraft

In Bild 5.10 sind typische Ansichten und Einbrandformen bei verschiedenen Ladespannungen dargestellt. In Bild 5.10 a deuten erkennbare Unterschneidungen auf eine zu geringe Anschmelzung und damit nicht ausreichende Schweißenergie hin. Die eingestellte Ladespannung von 100 V erweist sich damit als zu gering. Die Schweißung in Bild 5.10 b zeigt mit einem vollständigen schmalen Spritzerkranz, guter Randanbindung und fehlerfreier Verschweißung ein gutes Ergebnis.



a) Ladespannung 100 V:
geringe Energie, Unterschnidungen und Bindefehler:
ungeeignet

b) Ladespannung 130 V:
geeignete Energie, vollständiger und symmetrischer Spritzerkranz, geringe Schweißfehler:
geeignet

c) Ladespannung 150 V:
hohe Energie, Tendenz zu Spritzern, Bindefehler, stärkere Wulst- und Spritzerbildung:
ungeeignet

Bild 5.10: Ansichten und Schiffe mit unterschiedlicher Ladespannung
(C : 66 mF; F_{auf} : 72 N (Stufe 4); Blech: 1 mm; DC04; LZ)

Eine Ladespannung von 130 V erweist sich damit als eine geeignete Einstellung. Bild 5.10 c zeigt ein Schweißergebnis mit einer Ladespannung von 150 V. Schweißungen mit dieser Einstellung zeigen verstärkte Spritzerbildung und einen ausgeprägten vollständigen Spritzerkranz mit partieller Wulstbildung. Aufgrund der zu beobachtenden Poren wird diese Einstellung als ungeeignet bewertet.

Bild 5.11 zeigt die erreichten Ausknöpfungsdurchmesser bei ausgewählten Parameterkombinationen verschiedener Aufsetzkräfte und Ladespannungen sowohl auf entfettetem Blech als auch auf einer Blechoberfläche im Lieferzustand. Die Kurven zeigen, dass die erreichten Tragfähigkeiten mit der Ladespannung bis 130 V deutlich zunehmen und das Maximum bei etwa 140 V liegt. Über 130 V nimmt die mit Hilfe einer Videokamera beobachtete Spritzerbildung signifikant zu, so dass das Optimum der Ladespannung unter den Versuchsbedingungen bei etwa 130 V liegt.

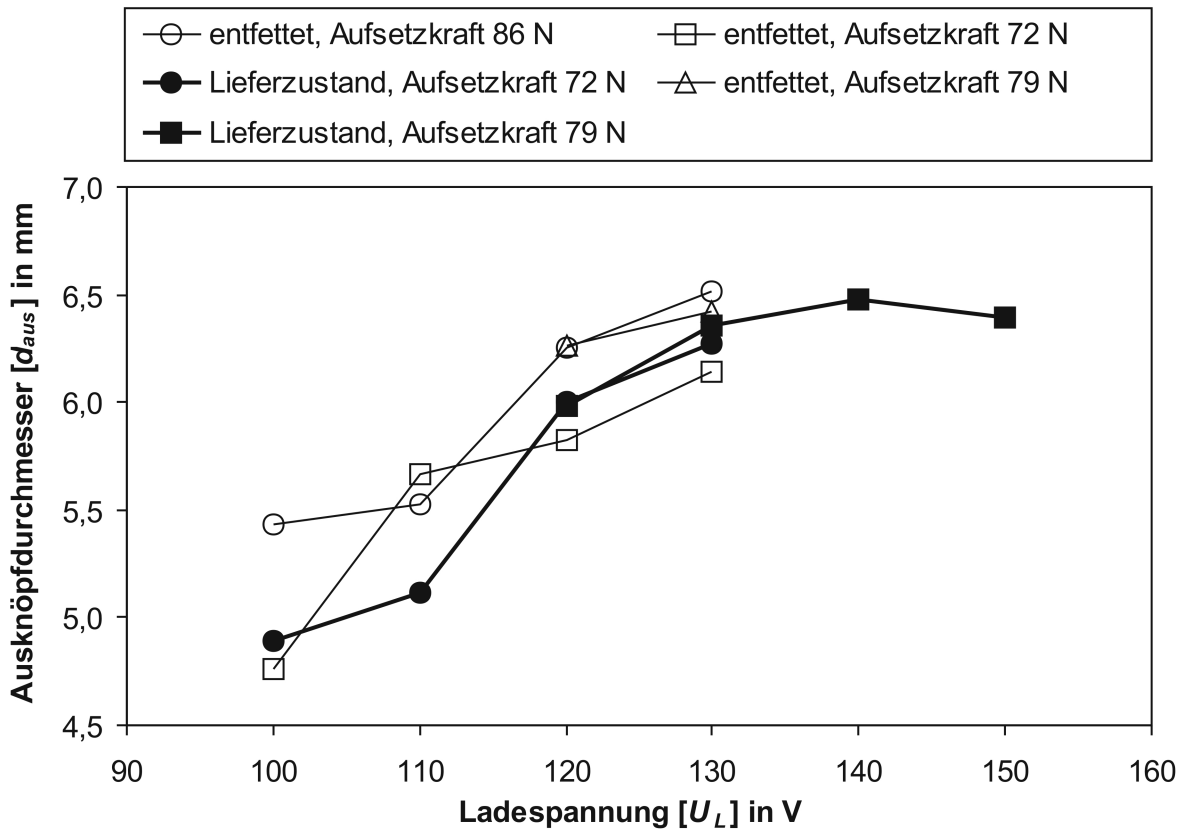


Bild 5.11: Ausknöpfungsdurchmesser in Abhängigkeit der Ladespannung für verschiedene Aufsetzkräfte und Oberflächenzustände des Bleches
(C: 66 mF; Blech: 1 mm; DC 04)

Die Wechselbiegeprüfung zeigt bei geeigneter Aufsetzkraft (ab Stufe 4) in einem vergleichsweise großen Bereich der Ladespannung zwischen 120 und 150 V Ausknöpfungsdurchmesser größer 6 mm. Brüche in der Schweißzone treten ausschließlich außerhalb dieses Prozessfensters und erst bei Fehleranteilen (Poren, Lunker, Bindefehler) von über 40 % des Schweißquerschnittes auf. Bei geeigneter Einstellung weisen alle Schweißungen nach der Wechselbiegeprüfung einen Ausknöpfungsdurchmesser auf, der gleich oder größer dem Durchmesser des Bolzenflansches ist.

5.4.3 Prozessanalyse

Bild 5.12 zeigt die Verläufe von Stromstärke, Lichtbogenspannung und Bolzenbewegung einer Schweißung bei einer geeigneten Einstellung, wie sie auch für den anschließenden Serienversuch gewählt wurde. Die Kurvenverläufe weisen eine für das Schweißverfahren charakteristische Form auf. Die Spannungskurve zeigt darin die Lichtbogenbrenndauer zwischen der Spannungsspitze bei Zündung des Lichtbogens und dem Spannungsabfall bei Erlöschen des Lichtbogens. Die Auftreffgeschwindigkeit des Bolzens wird durch die Steigung der Wegkurve zum Zeitpunkt des Kurzschlusses dargestellt. Das Wegsignal wird zu Beginn des Prozesses während der Zündphase durch den hohen Anstieg der Stromstärke di/dt (Größenordnung: MA/s) gestört. Eine Filterung war nicht möglich.

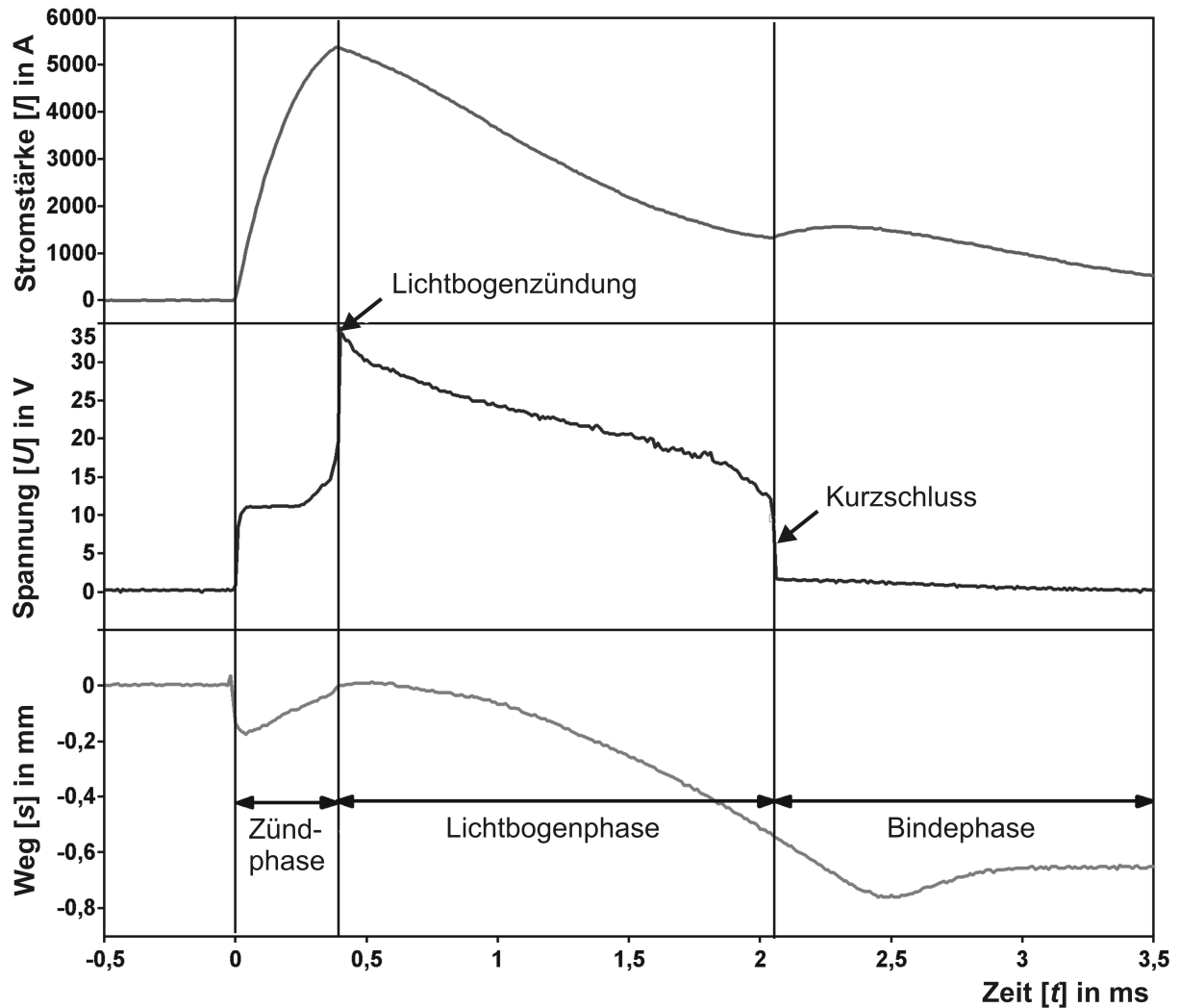


Bild 5.12: Strom-, Spannungs- und Wegverlauf einer Schweißung mit geeigneter Einstellung (C : 66 mF; U_L : 130 V; F_{auf} : 72 N (Stufe 4); Blech: 1 mm; LZ)

Zündphase

Mit dem Zuschalten des Kondensatorpotentials steigt die Stromstärke schnell an, wird dabei aber durch die Induktivität des Schweißstromkabels begrenzt. Der anfangs geringe Ohmsche Widerstand nimmt durch die Erwärmung und die anschließende Verdampfung der Zündspitze schlagartig zu. Mit Erreichen der Spannungsspitze bei etwa 35 V wird etwa 0,4 ms nach Beginn der Kondensatorentladung der Lichtbogen gezündet. Das Maximum des Schweißstromes beträgt etwa 5,5 kA und tritt zeitgleich mit dem Spannungsmaximum auf. Die Zündphase erfordert eine Energie bis zu 40 Ws. Zur Bauteilerwärmung liefert diese Energie keinen wesentlichen Beitrag.

Lichtbogenphase

Während der Lichtbogenphase verringert sich die Lichtbogenspannung aufgrund der Bolzenbewegung in Richtung des Bleches entsprechend dem kleiner werdenden Schweißspalt. Dieser entspricht bei Prozessbeginn dem Wert der Zündspitzenlänge von 0,75 mm. Der Wärmeeintrag endet mit Erlöschen des Lichtbogens bei Kurz-

schluss des Schweißstromkreises etwa 1,6 ms nach der Lichtbogenzündung. Da der Bolzen etwa 0,1 mm in die Schmelze eintaucht, während der Lichtbogen bereits erloschen ist, endet die Bolzenbewegung erst in der Bindephase. Die Auftreffgeschwindigkeit ist definiert als die Bolzengeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Lichtbogenlöschung.

Bindephase

In der Bindephase nach Erlöschen des Lichtbogens entlädt der Kondensator weiter bei kurzgeschlossenem Schweißstromkreis. Der Spannungsabfall an der Schweißstelle ist quasi Null. Ein weiterer Energieeintrag erfolgt nicht. Die Schmelze erstarrt aufgrund ihres geringen Volumens und der hohen Wärmeableitung schnell. In dieser Phase findet der eigentliche Fügeprozess durch Verbinden der Schmelzbäder statt. Die Prellbewegung ist aufgrund der hohen Federkraft, der geringen bewegten Masse und der hohen Steifigkeit der Blechfixierung relativ schwach ausgeprägt, was bei der Erstarrung von Vorteil ist [Gau97].

Schlussfolgerungen aus dem Wegverlauf des Schweißprozesses sind nur bis zur ersten Umkehr der Bewegungsrichtung in der Bindephase und am abschließend ruhenden System möglich. Bis zu dieser Richtungsumkehr stützt sich der Bolzen gegenüber dem Bolzenhalter ab, an dem aufgrund des automatisierten Prozesses die Fügebewegung indirekt gemessen wird. Da der Bolzen im Bolzenhalter nur mit der elastischen Klemmkraft der Spannzangen fixiert wird, ist die Position des Bolzens während der Prellbewegung am Anschlag im Halter nicht gewährleistet.

5.4.4 Festlegung der Prozesseinstellung für den Serienversuch

Bei den Untersuchungen der Einflüsse der Parameter Ladespannung und Aufsetzkraft zeigte sich, dass der Schweißprozess in relativ weiten Einstellbereichen eine hohe Fügequalität erreicht. Unter der Anforderung einer hohen Tragfähigkeit bei zugleich geringer Spritzerbildung, wurde für den Serienversuch die Kondensatorkapazität von 66 mF, die Ladespannung von 130 V und die Aufsetzkraft von 72 N (Stufe 4) gewählt. Damit ist für den entwickelten Prozess eine um 15 % geringere Ladeenergie erforderlich als im DVS-Merkblatt 0904 empfohlen [DVS0904].

Die Federeinstellung wurde zum Ende des Serienversuches variiert. Die dünne Befettung des Bleches im Lieferzustand zeigt keinen negativen Einfluss auf das Schweißergebnis. Eher begünstigt sie das Erscheinungsbild der Schweißung und führt zu geringer Reduzierung der Bildung von Schweißspritzern. Rückseitige Spiegelungen sind bei Blechdicken über 1 mm optisch kaum noch zu erkennen. Auf 0,5 und 0,75 mm dicken Blechen zeigen sich erwartungsgemäß etwas stärker ausgeprägte Spiegelungen sowie leichte Anlaufspuren bei ansonsten identischem Prozessverhalten (Bild 5.13). Da Aussagen über die Fügequalität anhand der wechselseitigen Biegeprüfung bei 1 mm Blechdicke aufgrund der höheren Steifigkeit und höheren Bruchkraft genauer sind als bei dünneren Blechen, wurde im Serienversuch ausschließlich dieses Abmaß verwendet.

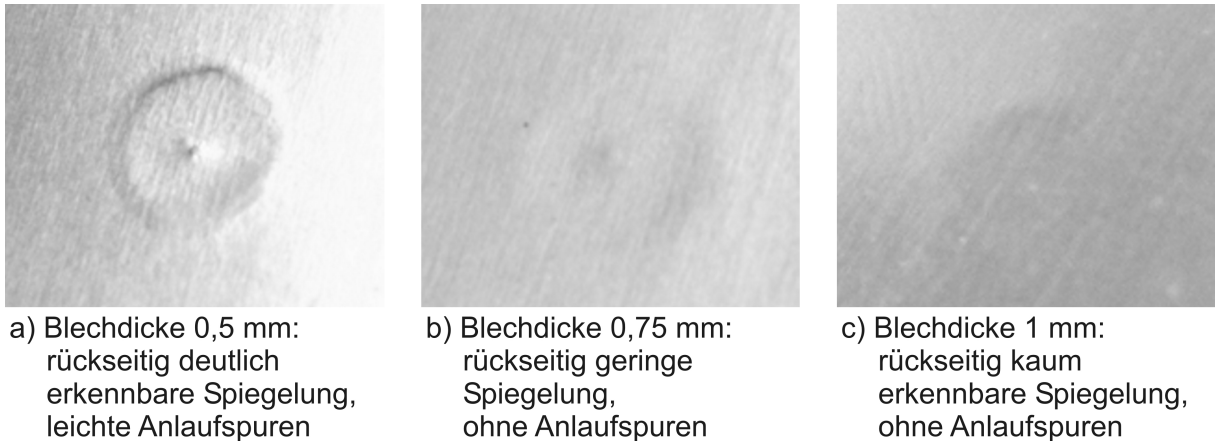


Bild 5.13: Rückseitige Markierungen auf unterschiedlichen Blechdicken bei sonst gleichen Prozessparametern (C : 66 mF; U_L : 130 V; F_{auf} : 72 N)

Die Schweißungen zeigen trotz der installierten Absaugung keine erkennbaren Blaskwirkungen. Dieses häufige Problem beim Bolzenschweißen stellte sich im Rahmen dieser Untersuchungen somit nicht.

5.5 Prozessstabilität im Serienversuch

Zur Beurteilung der Prozessstabilität wurden, nach Einfahren der Versuchsanlage auf Betriebstemperatur, nach jeweils 500 Schweißungen insgesamt sieben Proben (bezeichnet mit 1 bis 7) im Umfang von jeweils 20 Schweißungen entnommen und untersucht. Für den Serienversuch wurde die Blechdicke 1 mm gewählt. Für die Verarbeitung im dünn befetteten Lieferzustand wurden abgeleitet aus den Parameteruntersuchungen folgende Einstellungen verwendet:

- Kapazität $C = 66$ mF
- Ladespannung $U_L = 130$ V
- Aufsetzkraft $F_{auf} = 72$ N (Stufe 4) bei Probenentnahme 1 bis 5
 $= 65$ N (Stufe 3) bei Probenentnahme 6
 $= 86$ N (Stufe 6) bei Probenentnahme 7
- Blechdicke $s_0 = 1$ mm (DC 04, LZ: dünn befettet)

5.5.1 Tragfähigkeit und Bindequalität

Bei der wechselseitigen Biegeprüfung zeigt sich die Tragfähigkeit der Schweißungen im Serienbetrieb auf hohem Niveau, wie die nachfolgende Grafik veranschaulicht (Bild 5.14). Bei nahezu allen untersuchten Schweißungen beträgt der Ausknöpfungsdurchmesser weit über 5,5 mm und liegt damit deutlich über dem Bolzenennendurchmesser. Der Variationskoeffizient als Maß für dessen Streuung beträgt zwischen 0,035 und 0,07. Werte unter 0,05 bedeuten dabei eine geringe relative Standardabweichung und werden als gut eingestuft. Aufgrund des hohen Niveaus der Tragfähigkeit sind die etwas höheren Variationskoeffizienten unkritisch.

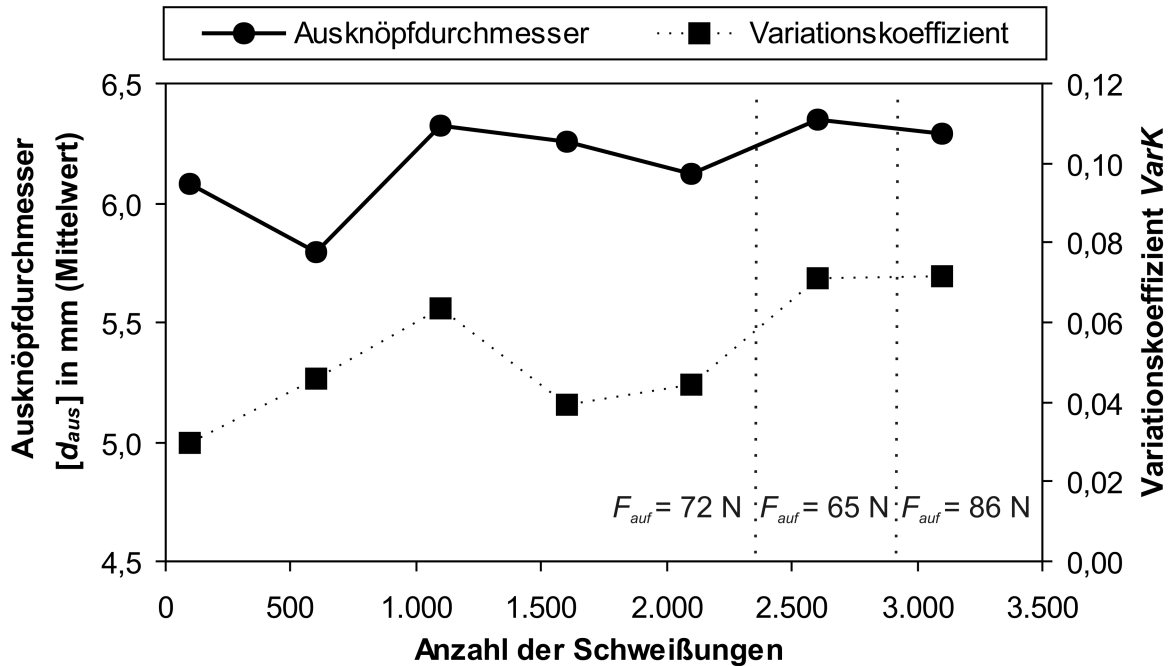


Bild 5.14: Mittlere Ausknöpfungsdurchmesser und Variationskoeffizienten bei wechselseitigen Biegeprüfungen im Serienversuch

Bild 5.15 zeigt Schliffbilder beispielhafter Schweißungen aus sechs der insgesamt sieben Probenentnahmen während des Serienversuches. Die Ergebnisse zeigen in der Sichtprüfung vollständige schmale und gleichmäßige Spritzerkränze und in den Schliffbildern weitgehend fehlerfreie Schweißungen mit guter Randanbindung.

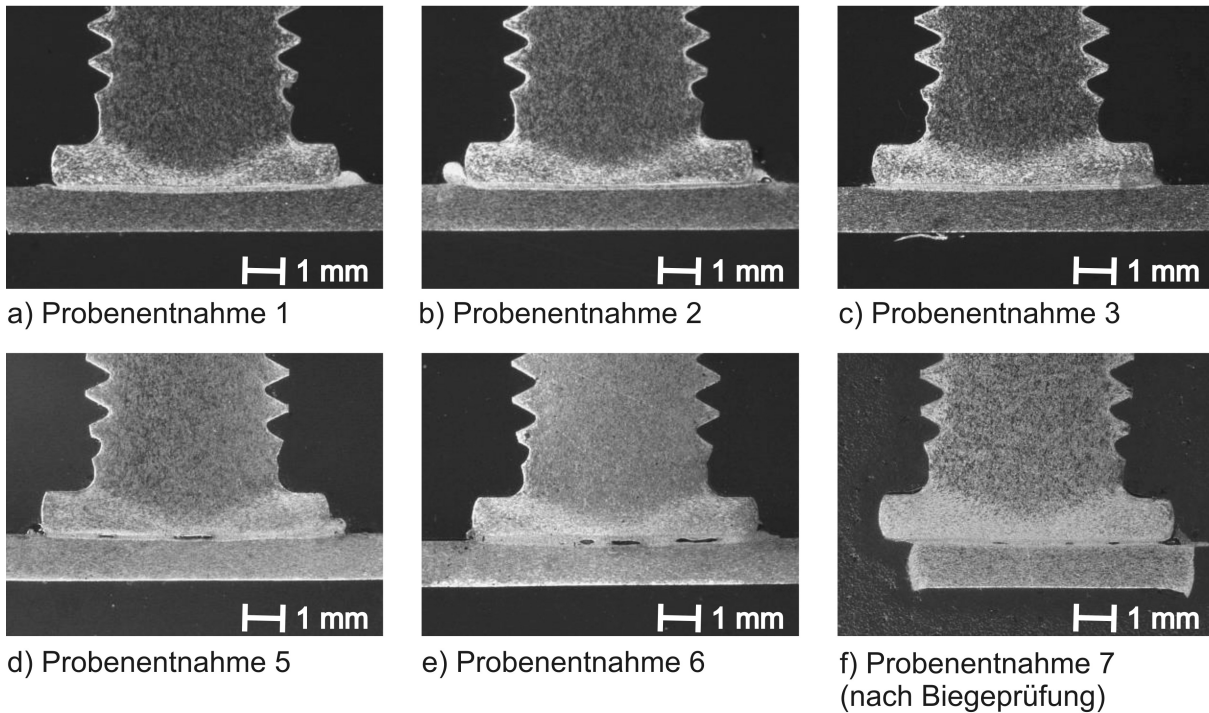


Bild 5.15: Einbrandformen im Serienversuch an jeweils einem Beispiel aus drei verschiedenen Probenentnahmen

Die Schlibfbilder zeigen im Serienverlauf tendenziell zunehmend auftretende Bindefehler, die sich in einem für das Spitzenzündungsverfahren in der Praxis üblichen Rahmen befinden. Die durchgehend hohen erreichten Werte im Ausknöpfversuch bestätigen eine ausreichende Schweißqualität. Die Bolzen sind aufgrund der durch den Flanschdurchmesser von 6,5 mm definierten Fügefläche über einen Querschnitt mit dem Blech verschweißt, der größer ist als der Querschnitt der sich aus dem Nenndurchmesser des M5-Gewindebolzens ergibt.

Die Schweißungen zeigen eine gleichmäßige und flache Schmelzzone mit etwa 0,1 mm Einbrandtiefe. Das homogene Gefüge des Bleches und das im Flanschbereich stark kaltumgeformte und damit verfestigte Gefüge des Bolzens werden durch den geringen Energieeintrag im Schweißprozess nur in einer kleinen Wärmeinflusszone von etwa 30 µm Höhe verändert (Bild 5.16).

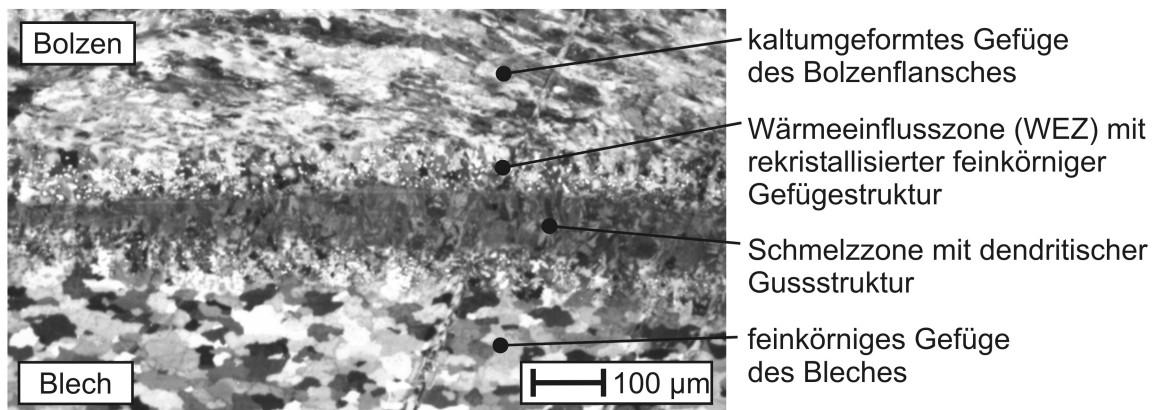


Bild 5.16: Mikroschliff einer beispielhaften Schweißung des Serienversuches

5.5.2 Prozessverhalten im Serienversuch

In Bild 5.17 sind beispielhaft die 20 Messkurven der Schweißungen von Probenentnahme 3 übereinander gelegt in je einem Diagramm für Stromstärke, Lichtbogen­spannung und Bolzenweg abgebildet. Diese Schweißungen wurden in unmittelbarer Folge ausgeführt. Die maximale Differenz der Lichtbogenbrenndauer beträgt etwa 250 µs. Die Messkurven weisen eine hohe Reproduzierbarkeit auf, insbesondere im Spannungsverlauf während der Zündphase. Die Streuung der Eintauchtiefe deutet auf Schwankungen der Prellkraft durch variierende Reibkräfte hin. Gründe sind zum einen Verschmutzungen durch Schweißemissionen und zum anderen an den Schweißkopf gelangende Dämpfe des Konservierungs- und Schmierstoffes von dem Blech.

Die ermittelten Einzelwerte der relevanten Schweißparameter sowie das Ergebnis der Wechselbiegeprüfung aller Probeentnahmen wurden jeweils anhand von arithmetischem Mittelwert, Streuband, Standardabweichung und Variationskoeffizient statistisch ausgewertet und in Abhängigkeit von der Probenanzahl des Serienversuches dargestellt.

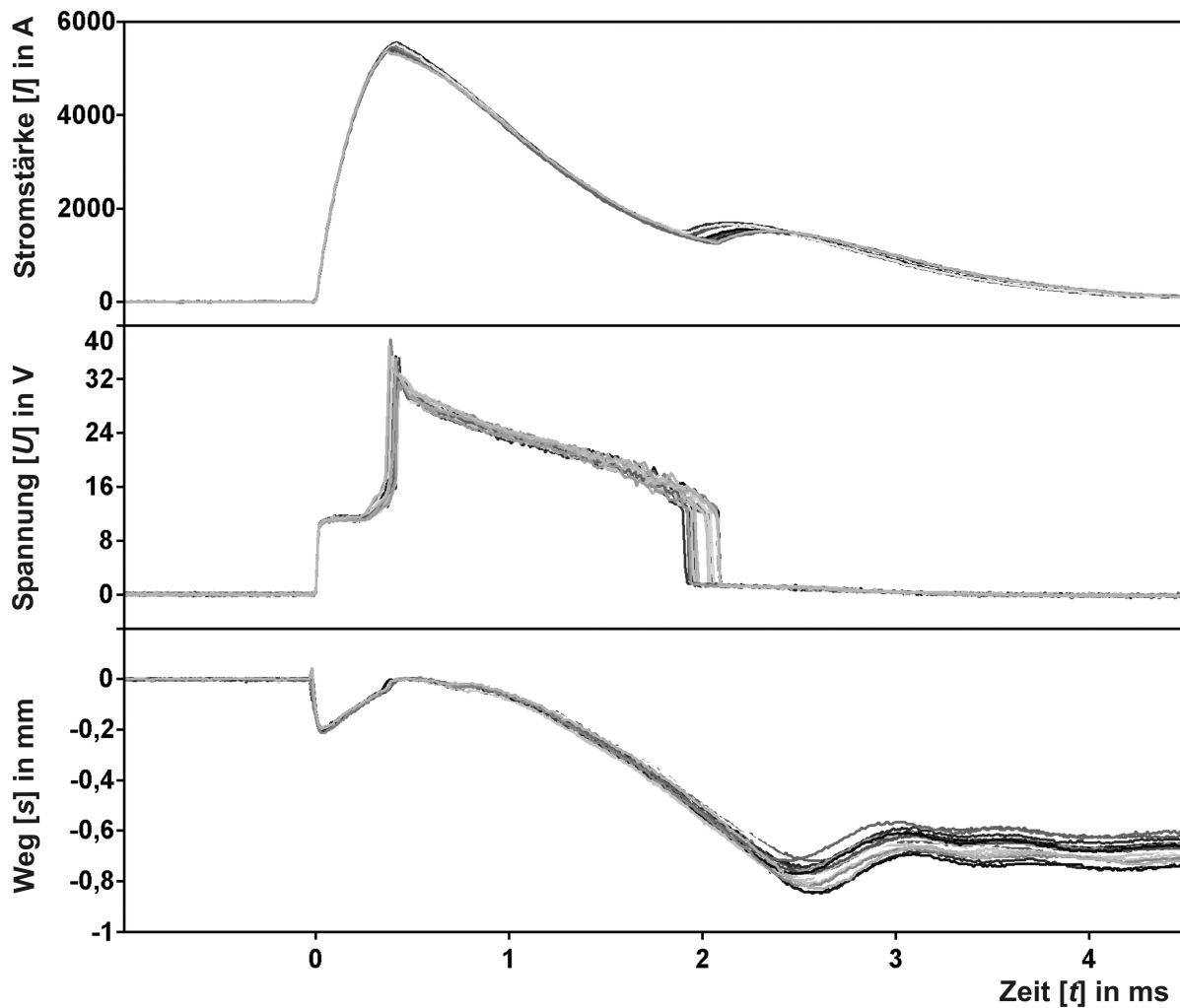


Bild 5.17: Verlauf von Stromstärke, Lichtbogenspannung und Bolzenbewegung von 20 in Folge ausgeführten Schweißungen (Probenentnahme 3)

Die Abbildungen Bild 5.18 bis Bild 5.21 zeigen die Gesamtauswertung der Schweißparameter:

- Lichtbogenbrenndauer,
- Schweißenergie (eingetragen während der Zünd- und Lichtbogenphase),
- Maximale Schweißstromstärke,
- Lichtbogenspannung,
- Eintauchtiefe und
- Auftreffgeschwindigkeit.

Bild 5.18 enthält die Mittelwerte der Lichtbogenbrenndauer t_s als wichtigen Schweißparameter sowie die Minimal- und Maximalwerte zur Kennzeichnung des Streubandes. Die Lichtbogenbrenndauer verlängert sich zu Beginn des Serienversuches von etwa 1,35 ms auf Werte von maximal etwa 1,6 ms, hatte aber keinen erkennbaren negativen Einfluss auf die Schweißergebnisse. Bei der Probenentnahme 6 ist die Schweißzeit aufgrund reduzierter Aufsetzkraft (65 N, Stufe 3) geringfügig auf 1,7 ms

erhöht. Bei den Schweißungen der letzten Probenentnahme 7 beträgt die Lichtbogenbrenndauer nur etwa 1,0 ms aufgrund einer Steigerung der Auftreffgeschwindigkeit auf Werte über 800 mm/s. Diese resultiert aus einer Erhöhung der Aufsetzkraft auf 86 N (Stufe 6). Die Tragfähigkeit und das Aussehen der Fügeverbindungen sowie die Ausprägung der Spritzerbildung werden durch Veränderungen der Aufsetzkraft in dem betrachteten Bereich nicht signifikant verändert und die Fügequalität verbleibt auf hohem Niveau.

Gemäß der Integration von der Lichtbogenspannung U_S und des Schweißstromes I_S über die Lichtbogenbrenndauer t_S zeigt sich eine nahezu konstante eingetragene Schweißenergie mit Werten von etwa 140 Ws. Aufgrund der verkürzten Lichtbogenbrenndauer bei einer Aufsetzkraft von 86 N am Ende des Serienversuches (Probenentnahme 7) reduziert sich der Energieeintrag auf 110 Ws. Trotz dieser deutlichen Verringerung der Lichtbogenbrenndauer sowie der Schweißenergie erreichen die Ausknöpfungsdurchmesser bei dieser Einstellung Werte über 6 mm und befinden sich damit auf hohem Niveau (Bild 5.14).

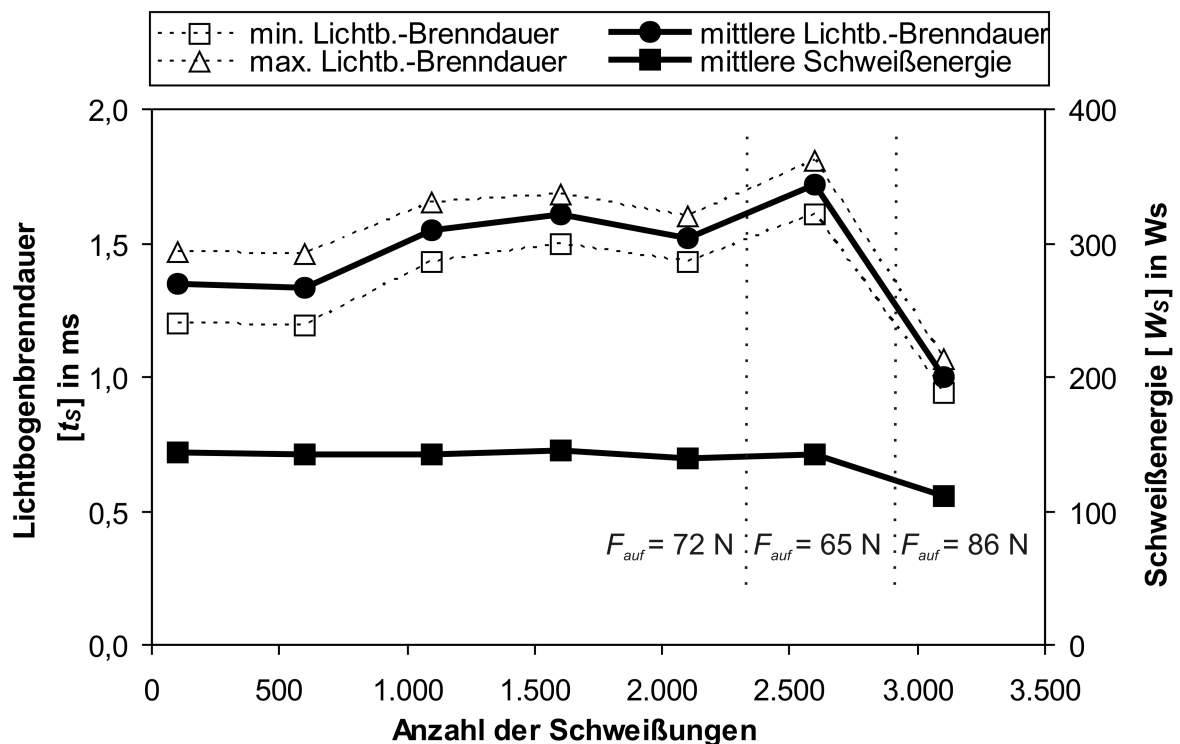


Bild 5.18: Lichtbogenbrenndauer und Schweißenergie im Verlauf des Serienversuches

Die maximale Schweißstromstärke I_{max} fällt von Beginn bis Ende des Serienversuches um etwa 500 A oder 10 % ab (Bild 5.19). Die mittlere Lichtbogenspannung zeigt sich auf einem gleich bleibendem Niveau zwischen 22 und 24 V (Bild 5.20).

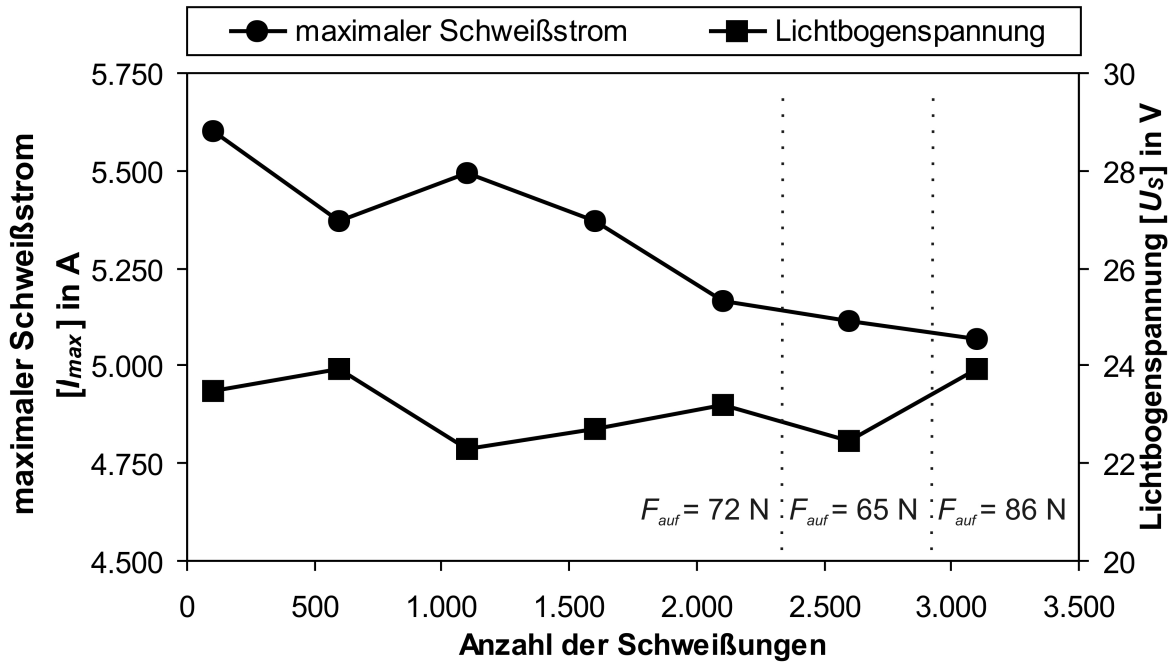


Bild 5.19: Maximaler Schweißstrom und mittlere Lichtbogenspannung im Verlauf des Serienversuches

Die Eintauchtiefe s_{ein} bewegt sich ab der Probenentnahme 3 in einem Streuband zwischen 0,7 und 0,9 mm. Die Eintauchtiefe stellt die Positionsdifferenz des Bolzens relativ zum Werkstück zwischen dem Beginn des Schweißprozesses und seiner Endlage dar. Die Eintauchtiefe kann aufgrund elastischer und plastischer Deformation der Zündspitze sowie in einer Erstarrung während der Rückprellbewegung bei einer einwandfreien Schweißung kleiner sein als die Zündspitzenlänge von 0,75 mm.

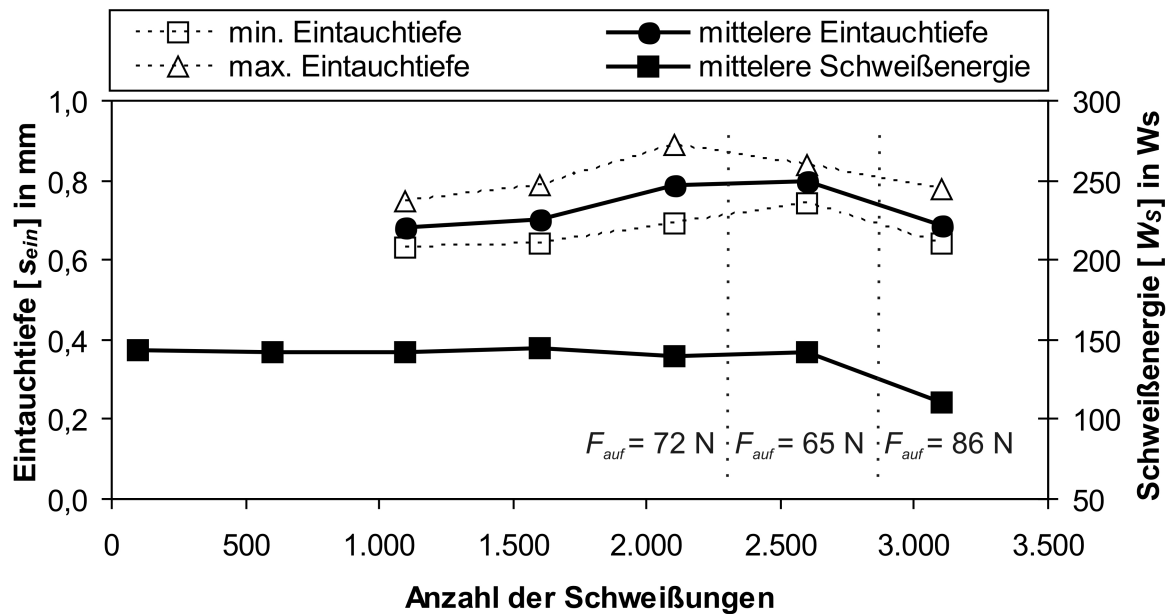


Bild 5.20: Eintauchtiefe und Schweißenergie im Verlauf des Serienversuches

Die gemessenen Auftreffgeschwindigkeiten und Lichtbogenbrenndauern sind in Bild 5.21 aufgezeigt. Während die Lichtbogenbrenndauer, wie in Bild 5.18 gezeigt, bei gleich bleibender Aufsetzkraft wenig variiert, weist die Auftreffgeschwindigkeit eine geringere Stabilität auf und steigt zwischen den Probenentnahmen 3 bis 5 von etwa 550 bis 730 mm/s deutlich an. Die verringerte Auftreffgeschwindigkeit bei Probenentnahme 6 und ihr hoher Wert bei der letzten Messreihe sind begründet in der reduziert bzw. erhöht eingestellten Aufsetzkraft. Gründe für die ausgeprägten Schwankungen der Auftreffgeschwindigkeit sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Verringerungen der Reibwiderstände der Linearlagerung im Schweißkopf durch Einlaufeffekte und Schmierstoffdämpfe, die vom Blech zum Schweißkopf gelangt sind. Durch die permanente Überwachung der Bolzenbewegung werden Veränderungen der Mechanik erkannt, auch wenn sich die elektrischen Prozessparameter noch im tolerierten Bereich befinden. Damit zeigt sich der Prozess robust gegenüber Veränderungen der Eintauchgeschwindigkeit.

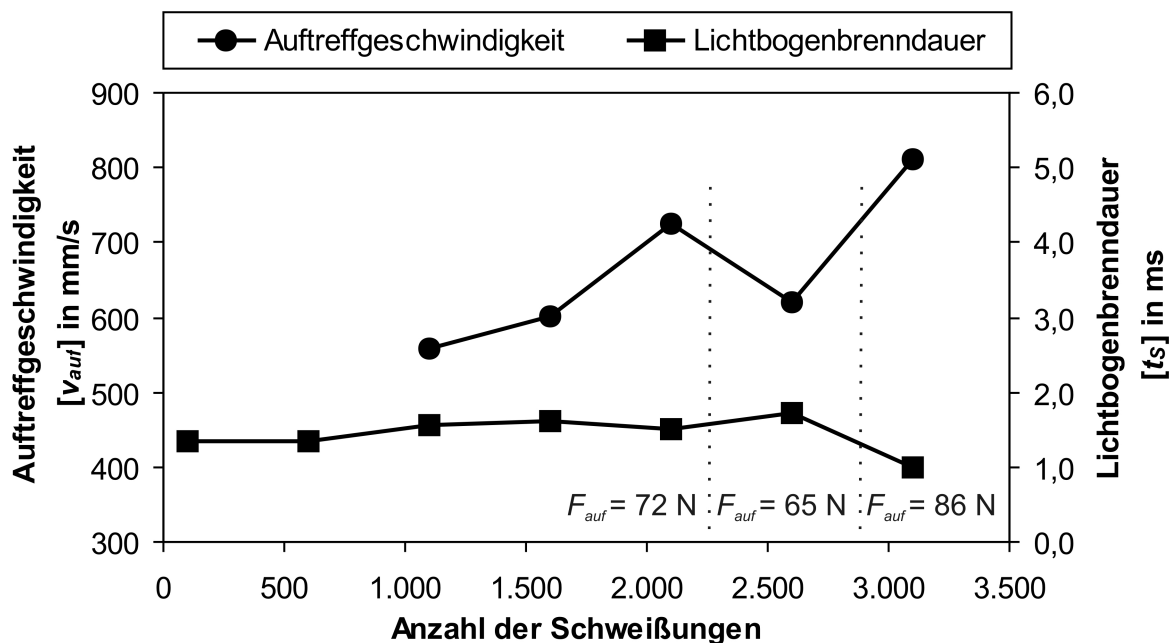


Bild 5.21: Auftreffgeschwindigkeit und Lichtbogenbrenndauer im Verlauf des Serierversuches

In Bild 5.22 sind die Variationskoeffizienten der diskutierten Parameter in der Übersicht dargestellt. Die Auftreffgeschwindigkeit streut demnach am stärksten mit Werten zwischen 0,05 und 0,07. Die Größen Maximalstromstärke, mittlere Lichtbogenspannung und Schweißenergie verhalten sich mit Variationskoeffizienten unter 0,04 verhältnismäßig stabil. Die Parameter Lichtbogenbrenndauer und Eintauchtiefe zeigen etwas höhere Werte, um 0,05.

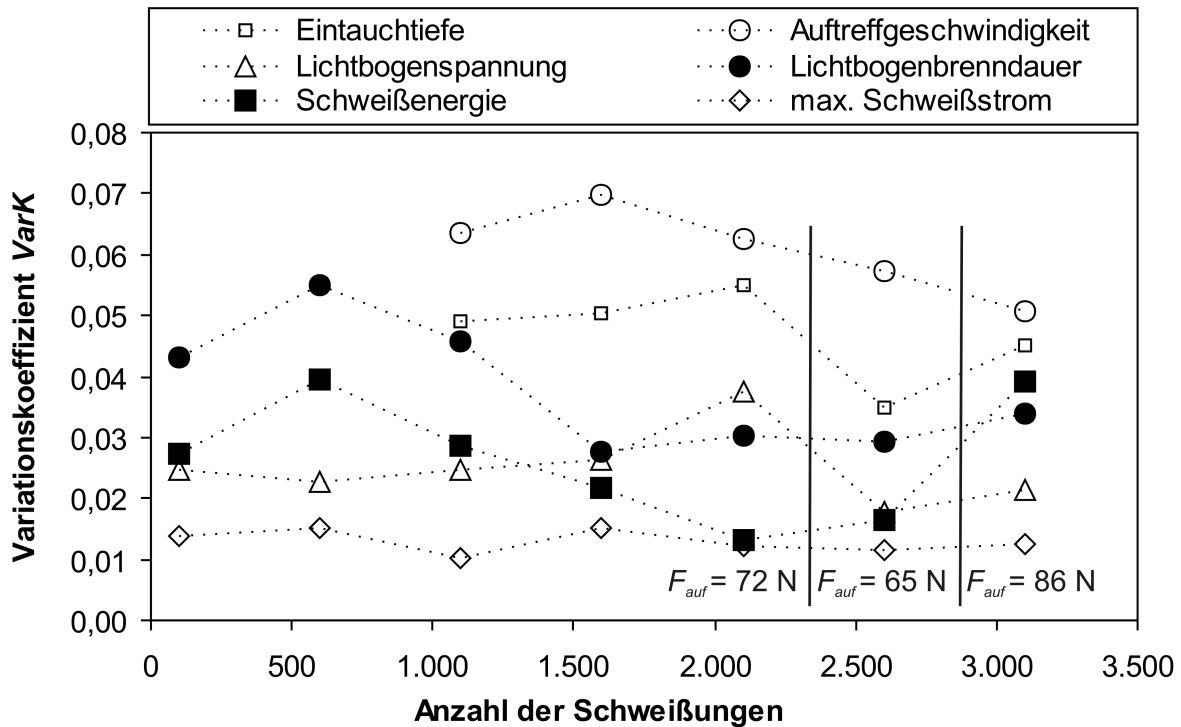


Bild 5.22: Variationskoeffizienten wichtiger Prozessparameter im Verlauf des Serienversuches

Bild 5.23 zeigt die Messkurven jeweils der Schweißung aus den Probenentnahmen 1 bis 7, die der mittleren Lichtbogenbrenndauer der jeweiligen Reihe am nächsten kommt. Die Messkurven der Probenentnahmen 6 und 7 mit verringerter bzw. erhöhter Aufsetzkraft sind eindeutig anhand der erheblich entgegengesetzt abweichenden Lichtbogenbrenndauern zu erkennen. Die während der Probeentnahme 7 eingestellte Aufsetzkraft von 86 N führt zu einer deutlichen Verkürzung der Lichtbogenbrenndauer auf etwa 1 ms. Bei dieser Kraft zeigen sich ein stark abweichendes Prellverhalten und eine reduzierte Eintauchtiefe. Die geringfügig verspätete Lichtbogenzündung deutet auf einen verringerten Übergangswiderstand an der Zündspitze durch Deformation hin.

Die Spannungskurven bestätigen mit ihrem Verlauf im Bereich ihres Maximums die hohe Wiederholgenauigkeit des Zündverhaltens. Die bei den Probenentnahmen 1 und 2 gemessenen Wegdaten sind aufgrund eines im Verlauf des Versuches festgestellten Defektes der Tasterbefestigung fehlerhaft, während die Wegmessungen bei den Probenentnahmen 3 bis 7 korrekt erfolgten. Die Proben 3, 4 und 5 die etwa 1.500 unter unveränderten Bedingungen ausgeführte Schweißungen repräsentieren zeigen nur geringfügige Abweichung der drei aufgenommenen Messgrößen.

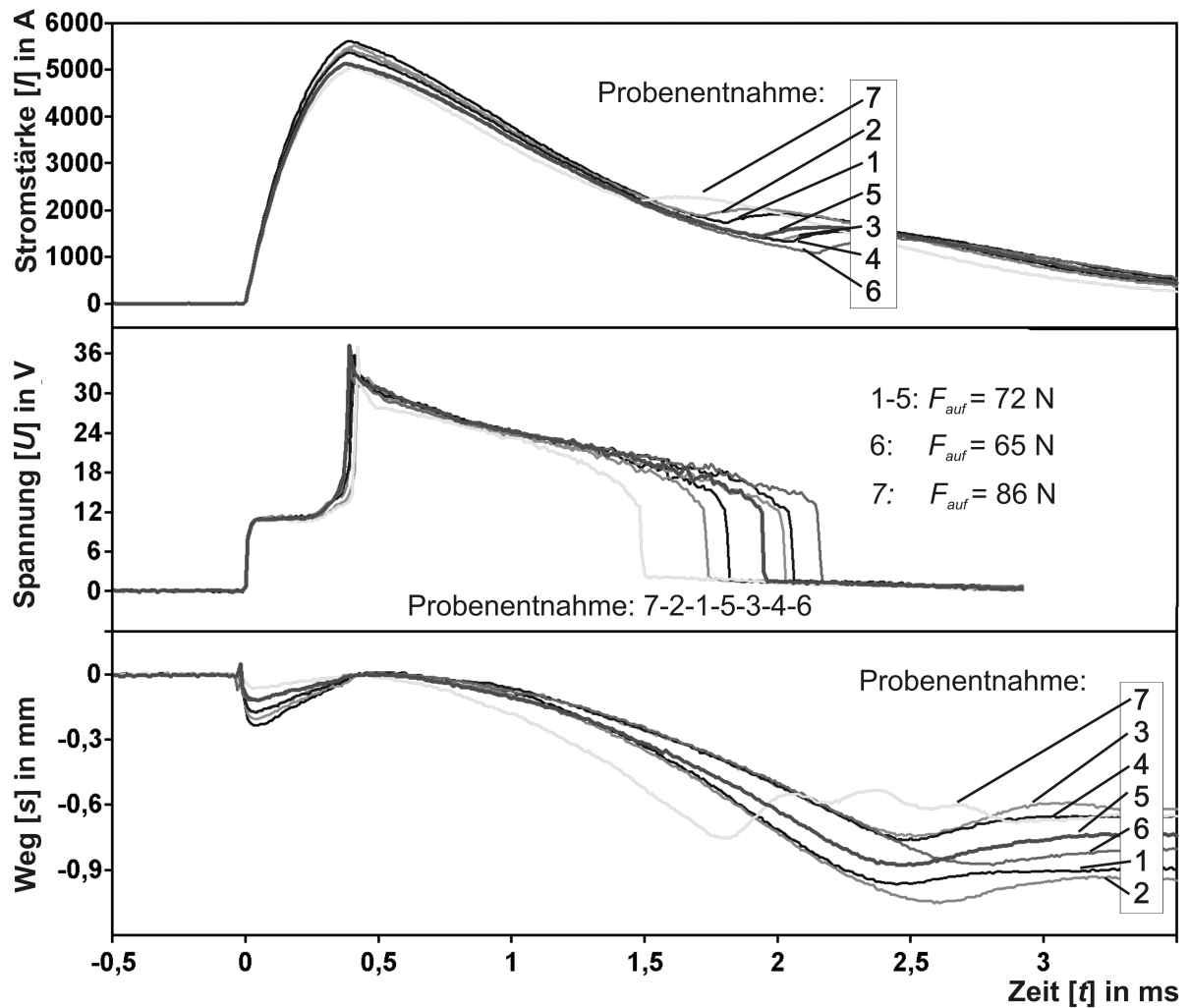


Bild 5.23: Messkurven von Schweißungen mit jeweils mittlerer Lichtbogenbrenndauer aus den Probenentnahmen 1 bis 7

Die Messdaten des Prozesses zeigen insgesamt:

- einen gleichmäßigen Verlauf des Schweißstromes,
- ein gleichmäßiges Zündverhalten mit nahezu identischen Spannungsspitzen,
- eine Streuung der Eintauchtiefe von $\pm 0,1 \text{ mm}$ und
- hohe Auftreffgeschwindigkeiten $> 600 \text{ mm/s}$.

5.5.3 Fehlzündungen

Bei wenigen Auslösungen des Schweißprozesses (fünf Mal im Rahmen des Serienversuches) kam es im Serienversuch zu Fehlzündungen, wobei der Energieeintrag durch den Lichtbogen stark reduziert ist. In diesen Fällen blieb der Bolzen dennoch korrekt positioniert über einen minimalen Schmelzkontakt am Blech haften und konnte stets sicher aus dem Werkzeug transportiert werden (Bild 5.24). Dieser Fehler wird von der Schweißüberwachung aufgrund stark abweichender Strom- und Spannungsverläufe eindeutig erkannt und ist optisch an fehlenden Schmauchspuren, fehlendem Spritzerkranz sowie akustisch an einem leisen dumpfen Knall zu erkennen.

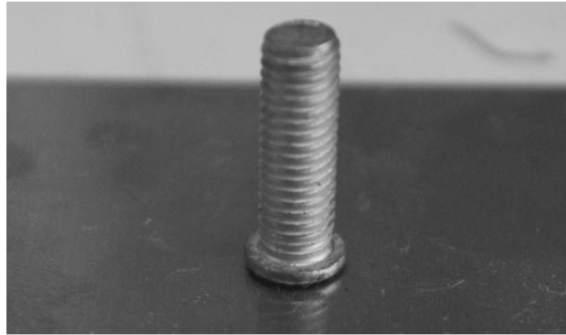


Bild 5.24: Fehlzündung ohne Spritzerkranz und Schmauchspuren

Als Grund für diese Fehlzündungen werden eine deformierte oder zu kurze Zündspitze vermutet, da bei Versuchen mit bewusst gekürzter Zündspitze (siehe Kapitel 5.6.5) vergleichbare Prozessfehler provoziert werden konnten. Bolzen mit deformierter Zündspitze sind auch durch eine 100 %-Kontrolle im Produktionsprozess aufgrund der Handhabung als Schüttgut nicht auszuschließen. Auch bei fehlerhaftem Bolzeneinschuss ist eine Verformung der Zündspitze möglich.

5.6 Prozessrobustheit gegen Störeinflüsse

Um die Robustheit des entwickelten Schweißprozesses zu untersuchen, wurden während des automatisierten Betriebes der Versuchsanlage folgende in der Praxis relevanten Störungen eingebracht:

- A: Unterbrechung eines Massekontaktes,
- B: dicke Benetzung des Bleches mit Ziehöl,
- C: Benetzung des Bleches mit Wasser,
- D: Ausfall der Absaugung,
- E: Bolzen mit gekürzter Zündspitze (0,35 mm),
- F: permanente Absaugung (auch während der Lichtbogenzündung),
- G und H: Mischverbindungen mit Bolzen aus austenitischem CrNi-Stahl (mit verschlissenenem und neuem Bolzenhalter).

Um einen vergleichbaren Ausgangszustand sicherzustellen, wurden die Versuchsreihen von je 20 Schweißungen mit Störeinflüssen jeweils unterbrochen von 40 unbeeinflussten Schweißungen. Als Vergleich zur Darstellung und Beurteilung der Auswirkung der verschiedenen Störungen auf den Strom- und Spannungsverlauf während des Prozesses wird eine exemplarische Schweißung des Serienversuches (aus Probenentnahme 5) herangezogen. Bei einigen der im Folgenden beschriebenen Versuchsreihen wurde gegenüber dieser ungestörten Vergleichseinstellung die Aufsetzkraft verändert. In diesen Fällen ist die geänderte Einstellung an den entsprechenden Stellen explizit genannt und auch eindeutig an der Lichtbogenbrenndauer zu erkennen. Die aufgenommenen Messkurven geben Hinweise zur Auslegung der Schweißüberwachung und lassen auf Zusammenhänge mit beobachtbaren Veränderungen des Prozessverhaltens sowie der Fügequalität schließen.

5.6.1 Unterbrechung eines Massekontaktes

Unter ungestörten Bedingungen waren Blaswirkungen mit asymmetrischer Anschmelzung oder einseitigem Spritzerauswurf nicht zu beobachten. Dies ist nicht zuletzt auf den in Bezug zur Schweißstelle symmetrischen Massekontakt zurückzuführen. In der Praxis stören Blaswirkungen oftmals auch unter scheinbar idealen Anschlussbedingungen das Schweißergebnis und stellen einen der häufigsten Fehler beim Bolzenschweißen dar.

Um einen asymmetrischen Stromfluss zu erzwingen und Blaswirkungen zu provozieren, wurde ein Massekontakt getrennt (Störeinfluss A), so dass der Strom über die zweite verbliebene Masseverbindung geführt werden musste. Elektromagnetischen Gesetzen zufolge bildet sich dabei im Werkstück ein Strompfad zwischen Schweiß- und Kontaktstelle mit dem Ergebnis einer radial wirkenden Magnetkraft und einer damit verbundenen Ablenkung des Lichtbogens (siehe Kapitel 2.3.3).

Die mit nur einem Massekontakt werkzeugintegriert geschweißten Verbindungen weisen äußerlich kaum erkennbare Anzeichen von Blaswirkungen auf. Auch in dem für diesen Störeinfluss beispielhaften Schliff in Bild 5.25 sind keine einseitigen Anschmelzungen zu erkennen. Es treten deutliche Poren auf und stellenweise Bindefehler am Rand, so dass gegenüber den ungestörten Schweißungen die Ausknöpfungsdurchmesser bei der wechselseitigen Biegeprüfung geringfügig verringert sind und stärker variieren. Die kleinsten Ausknöpfungsdurchmesser betragen deutlich über 4 mm. Brüche ohne eine Ausknöpfung treten nicht auf.

Der großflächige Kontakt zum Blechniederhalter und die erhebliche ferromagnetische Masse des Werkzeuges gewährleisten einen weitgehend symmetrischen Stromfluss und wirken sich damit stabilisierend auf den Lichtbogen aus. Magnetische Blaswirkungen werden dadurch unterdrückt.

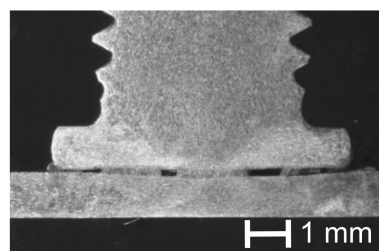


Bild 5.25: Bindefehler bei einseitigem Massekontakt

Die Erkennbarkeit der Unterbrechung eines Massekontaktes anhand der Messungen ist durch den Vergleich des Stromverlaufes zur Referenzkurve gegeben (Bild 5.26).

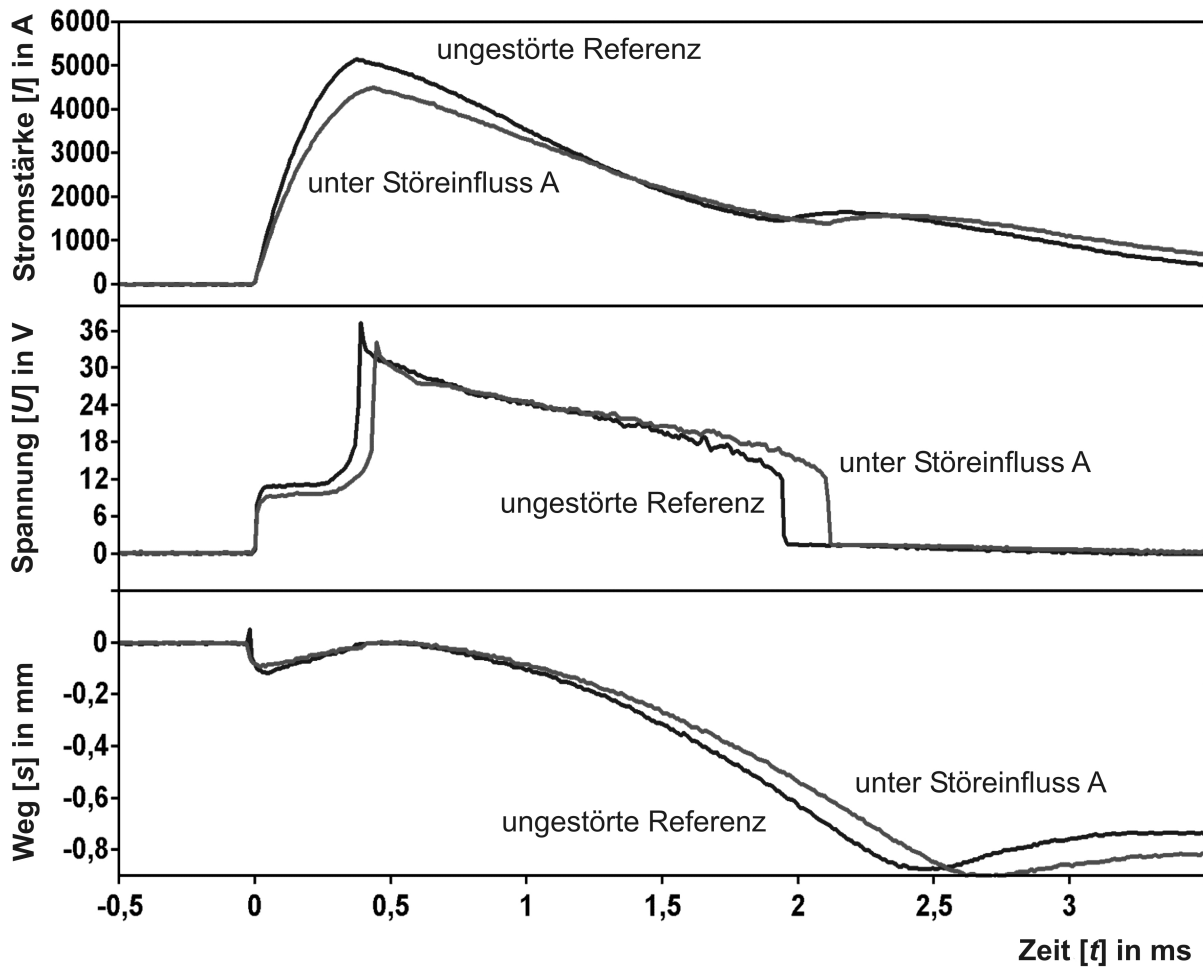


Bild 5.26: Messkurven bei einseitigem Massekontakt im Vergleich zu einer ungestörten Referenzschweißung

Im Vergleich zu ungestörten Referenzschweißungen ist der maximale Schweißstrom um etwa 500 bis 700 A reduziert (Bild 5.27). Ursache ist die deutliche Widerstandserhöhung des Schweißstromkreises infolge der einen unterbrochenen Masseleitung. Die Entladung ist aufgrund des höheren elektrischen Widerstandes des Schweißstromkreises niedriger (geringerer Stromanstieg di/dt) und die Lichtbogenzündung findet verspätet statt. Die eingetragene Schweißenergie ist etwa 10 % verringert. Das Maximum der Lichtbogen Spannung tritt deutlich verzögert auf und ist um etwa 10 % reduziert. und die Bolzenbewegung gibt keinen auswertbaren Hinweis auf diese Störung.

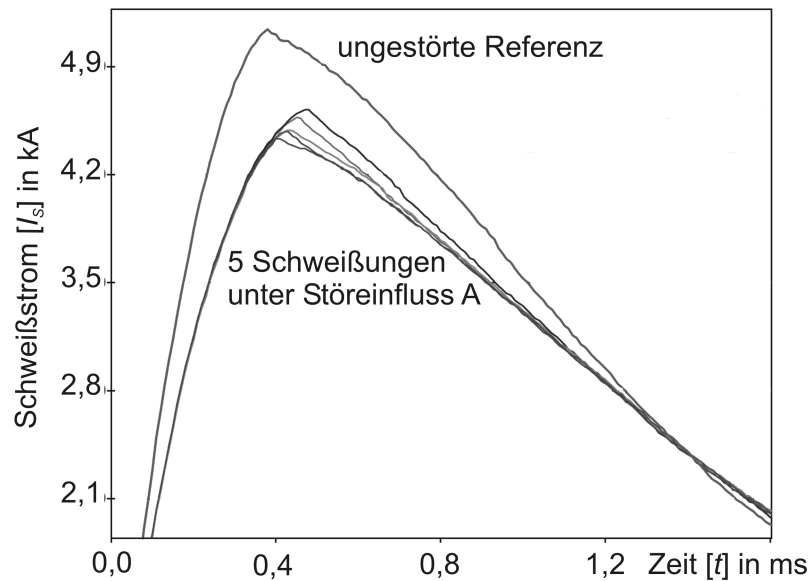
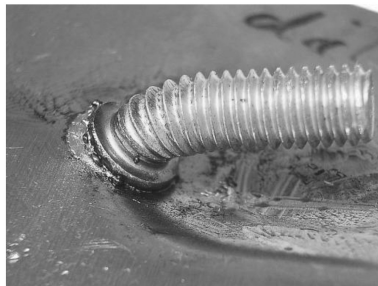


Bild 5.27: Detail der Stromkurven bei einseitigem Massekontakt im Vergleich zu einer ungestörten Referenzschweißung

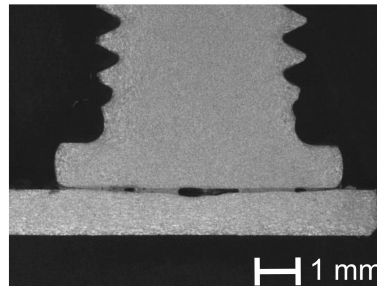
5.6.2 Mit Öl benetztes Blech

Bolzenschweißen auf dünn mit Öl benetzter Oberfläche hat sich in Bereichen wie z. B. der Medizin- sowie der Lebensmitteltechnik in der Praxis etabliert. Durch die Ölbenetzung wird die Menge der entstehenden Schweißspritzer sowie ihr Anhaften am Werkstück reduziert und das mühsame Entfernen zum Erreichen hygienisch glatter Oberflächen wird vermieden. Der gleiche Effekt wird in etwas reduzierter Ausprägung durch die im Lieferzustand vorhandene dünne Befettung des für die Versuche verwendeten Bleches erreicht. Zu dicke Ölbenetzungen führen zu negativen Auswirkungen auf die Schweißqualität.

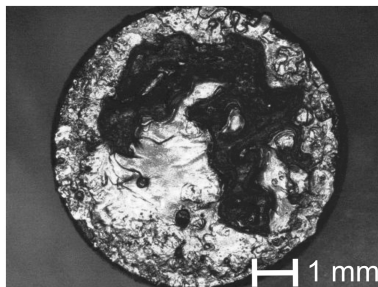
Die Aufnahmen a) und b) in Bild 5.28 zeigen Schweißungen auf dick mit Ziehöl benetzter Oberfläche (satt aufgepinselt, etwa 50 g/m², Störeinfluss B) nach der einfachen Biegeprüfung und im Schliff. Diese Ölmenge simuliert die Auswirkungen beispielsweise eines Öltropfens auf der Schweißstelle. Die Schweißungen weisen dabei einen vollständigen, aber gering ausgeprägten Spritzerkranz auf. Der Einbrand lässt häufig größere porenartige Bindefehler in der Bolzenmitte erkennen, die den tragenden Querschnitt schwächen und bei den Biegeprüfungen häufig zum Bruch in der Schweißzone führen (Bild 5.28 c und d).



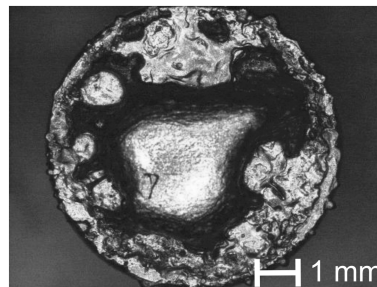
a) 60°-Biegeprüfung wird trotz dicker Ölbenetzung oftmals bestanden



b) Randanbindung ausreichend, mittlerer Bindefehler



c) Bindefehleranteil erheblich, Bruch in der Schweißzone



d) Großer mittlerer Bindefehler und Bruch in der Schweißzone

Bild 5.28: Ansicht, Einbrandform und Bruchansichten bei dicker Ölbenetzung

Die Erkennbarkeit der Ölbenetzung anhand der Messungen ist primär durch den Spannungsverlauf im Vergleich zu ungestörten Referenzschweißungen gegeben (Bild 5.29). Die Messkurven der Lichtbogen Spannung im Bereich des Maximums bei der Zündung des Lichtbogens sind verändert (Bild 5.30). Die Lichtbogenzündung beim Spannungsmaximum findet verspätet statt. Im Detail zeigen sich eine um etwa 8 V überhöhte Maximalspannung sowie ein etwa dreifach breiterer Bereich der Spannungsspitze bei der Lichtbogenzündung. Als Ursache für den veränderten Spannungsverlauf ist eine gegenüber den Referenzschweißungen abweichende Ionisierbarkeit des Lichtbogenplasmas durch das verdampfende Öl anzunehmen. Die maximale Stromstärke ist reduziert, jedoch geringfügiger ausgeprägt als unter dem Störeinfluss B mit der Unterbrechung eines Massekontaktes. Die Unterscheidung dieser Störeinflüsse ist im Spannungsverlauf eindeutig gegeben. Die Bolzenbewegung liefert keine auswertbaren Hinweise auf eine Ölbenetzung.

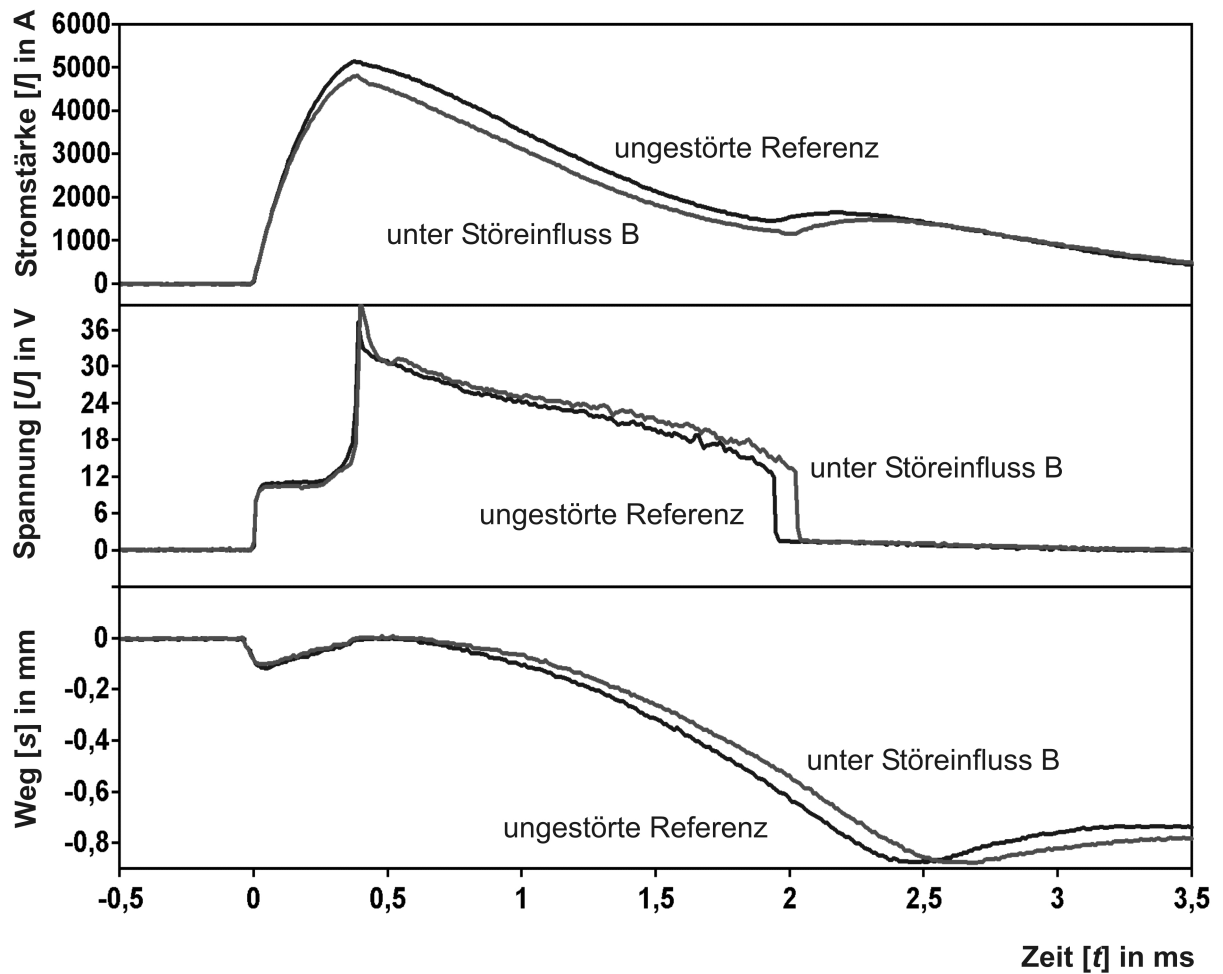


Bild 5.29: Messkurven bei dicker Ölbenetzung im Vergleich zu einer ungestörten Referenzschweißung

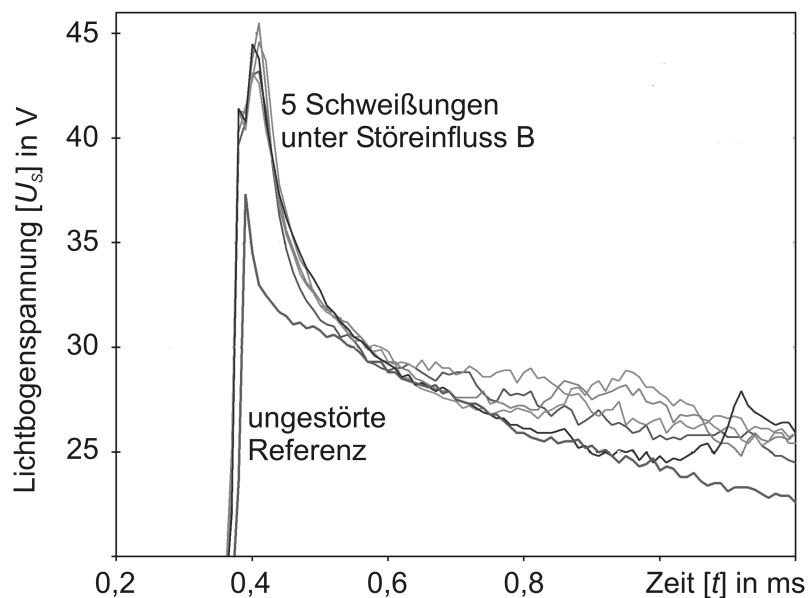


Bild 5.30: Detail der Spannungskurven bei dicker Ölbenetzung im Bereich des Maximums im Vergleich zu einer ungestörten Referenzschweißung

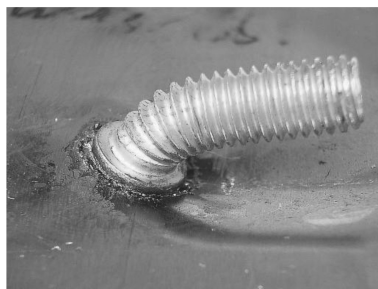
Die Versuche mit stark ölbenetztem Blech führten zu einer deutlichen Verschmutzung des Werkzeuges durch Verölung der Zuführmechanik. Der Ölfilm führte dort zum Anhaften von Verbrennungsrückständen und erforderte eine gründliche Reinigung nach dieser Versuchsreihe. Veränderungen des Prozesses innerhalb dieser Reihe traten durch die Verschmutzung nicht auf.

Die Auswirkungen der Ölbenetzung gelten nur für einen vergleichsweise dicken und somit überdosierten Auftrag auf das Blech. Bei üblicher dünner Blechbenetzung von etwa 5 g/m^2 tritt keine übermäßige Verschmutzung des Werkzeuges auf und es ergeben sich Schweißergebnisse ähnlich der im Folgenden beschriebenen Wasserbenetzung, wie eine Versuchsreihe zeigte.

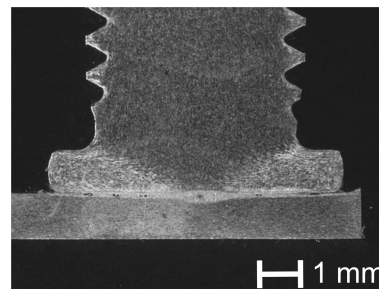
5.6.3 Mit Wasser benetztes Blech

Eine Wasserbenetzung der Blechoberfläche wird beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung zur Verbesserung der Wulstgestalt und zur Verringerung der Spritzerbildung in der Praxis häufig eingesetzt. Derart gefertigte Schweißungen zeigen eine nur minimale Spritzerbildung, wenige Bindefehler und eine gute Randanbindung. Verschmutzungen der Schweißstelle durch anhaftende Verbrennungsrückstände und Anlauffarben werden vermieden.

Bild 5.31 zeigt eine Schweißung auf mit Wasser benetzter Blechoberfläche (Störeinfluss C) nach bestandener einfacher Biegeprüfung (a) sowie die Einbrandform im Schliffbild (b). Die Schweißungen weisen bei der Sichtprüfung ein sauberes Erscheinungsbild auf mit deutlich verringerten Rußablagerungen in der Schweißumgebung sowie einen nur minimalen Spritzerkranz. Im Schliffbild sind Bindefehler am Rand und kleine Poren erkennbar.



a) Biegeprüfung erfüllt bei Wasserbenetzung des Bleches



b) Verschweißung mit Bindefehler am Rand und kleinen Poren

Bild 5.31: Ansicht und Einbrandform bei Wasserbenetzung des Bleches

Die Erkennbarkeit der Wasserbenetzung anhand der Messungen erfolgt analog zur Ölbenetzung anhand des Spannungsverlaufes im Bereich des Maximums während der Lichtbogenzündung (Bild 5.32).

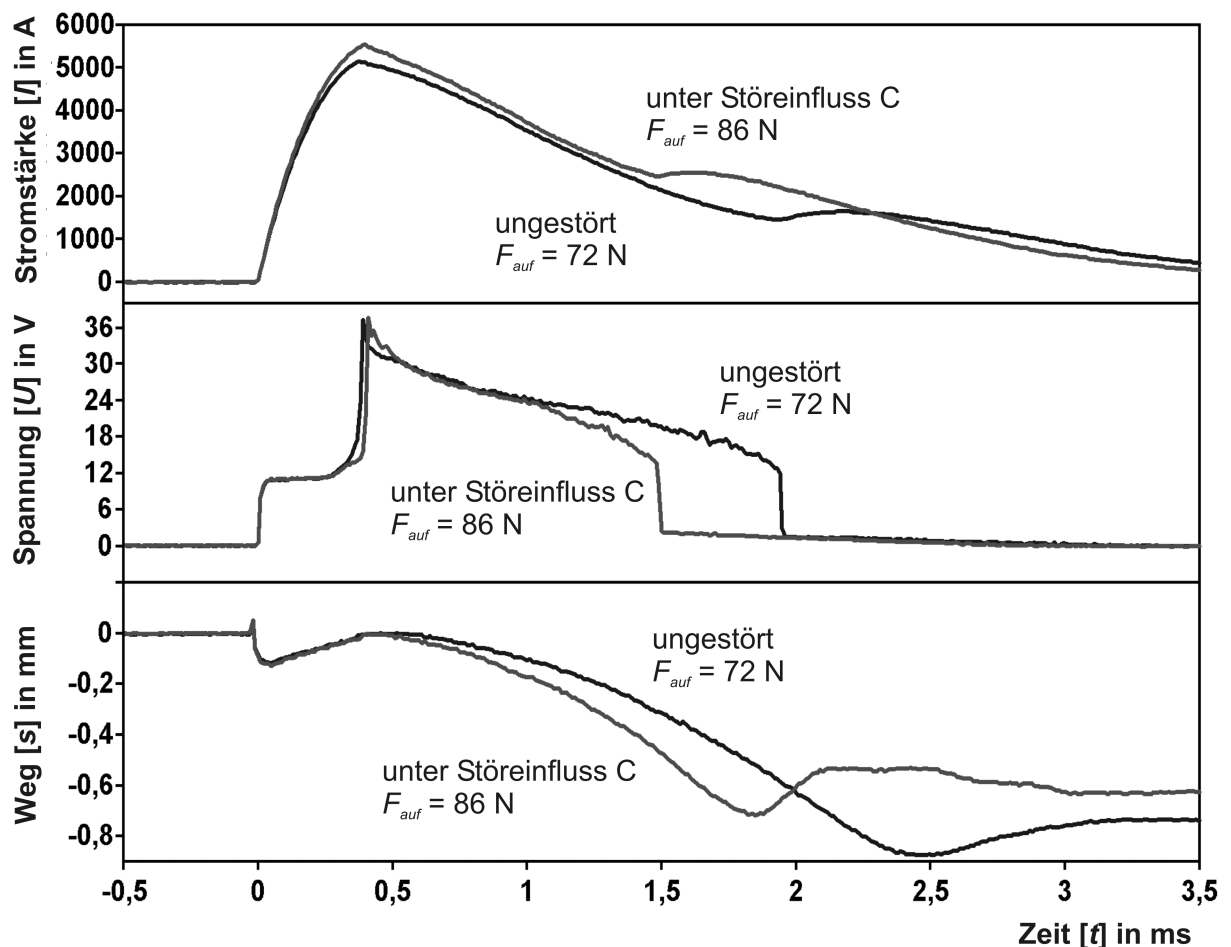


Bild 5.32: Messkurven bei Wasserbenetzung im Vergleich zu einer ungestörten Schweißung

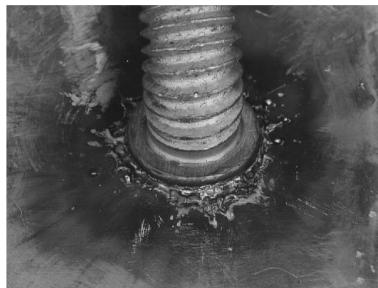
Die kürzere Lichtbogenbrenndauer, erkennbar am deutlich früheren Abfall der Spannung, hat ihre Ursache in einer auf 86 N (Stufe 6) erhöhten Aufsetzkraft mit dem Resultat einer erhöhten Auftreffgeschwindigkeit. Der Schweißstrom sowie die Bolzenbewegung zeigen keinen auswertbaren Hinweis auf die Wasserbenetzung.

Um durch eine gezielte Wasserbenetzung des Bleches optisch sauberere Schweißverbindungen zu erhalten ist eine vorherige Entfettung des Bleches und eine geeignete Applikation des durch Zugabe von Tensiden oberflächenentspannten Wassers zu achten. Nur eine dünne gleichmäßige Benetzung ohne Tropfenbildung gewährleistet ausreichend stabile Ergebnisse.

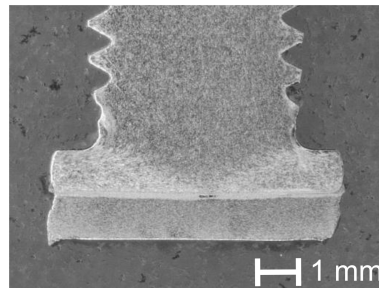
5.6.4 Ausfall der Absaugung

Bei fehlender Absaugung (Störeinfluss D) zeigt sich auf dem Werkstück eine stark ausgeprägte Ablagerung von Verbrennungsrückständen um die Schweißstelle herum (Bild 5.33 a) sowie eine deutliche Anhäufung von Schweißspritzern im Werkzeug. Die Schweißspritzer neigen ohne die Absaugung insbesondere zum Anhaften an scharfen Kanten ferromagnetischer Werkzeugkomponenten. Bei der Zuführmechanik können derartige Anhaftungen schnell zum Ausfall führen. Die Einbrandform zeigt

eine gleichmäßige Fügezone auf dem Niveau der ungestörten Schweißungen mit nur wenigen vereinzelt auftretenden Bindefehlern (Bild 5.33 b).



a) Spritzerbildung verstärkt ausgeprägt



b) Gleichmäßige Verschweißung, Ausknöpfungsdurchmesser 6,2 mm

Bild 5.33: Ansicht und Einbrandform bei Ausfall der Absaugung

Eine Erkennbarkeit des Schweißens ohne Absaugung anhand der Messwertaufzeichnungen der Prozessüberwachung ist nicht gegeben.

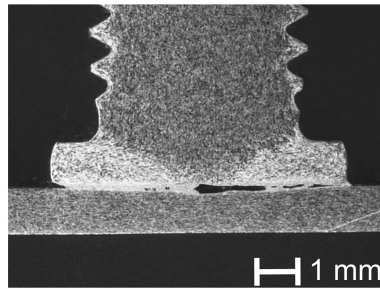
5.6.5 Bolzen mit verkürzter Zündspitze

Die Abmessungen und Toleranzen der Zündspitze sind in DIN EN ISO 13918 in Abhängigkeit vom Bolzendurchmesser definiert [DIN13918]. Abweichungen von diesen Standardabmessungen aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten beim Pressen der Bolzen führten in früheren Jahren häufig zu schwankender Schweißqualität bei der Spitzenzündung. Bei der heutigen Bolzenfertigung ist diese Problematik aufgrund geeigneter Qualitätssicherungssysteme kaum noch von Bedeutung.

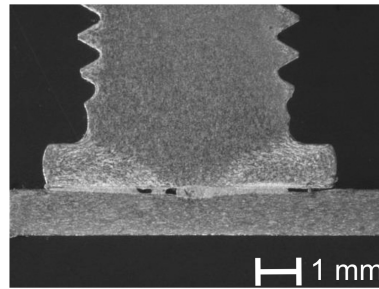
Die Zündspitzen der als Schüttgut vorliegenden Bolzen können beim Transport, bei der Lagerung und der Zuführung in den Bolzenhalter leicht deformiert werden. Dies stellt einen ernst zu nehmenden Störeinfluss auf den Schweißprozess dar.

Bei verkürzter Zündspitze trifft der Bolzen auf dem Blech auf, bevor der Lichtbogen ein ausreichendes Materialvolumen an Bolzen und Werkstück schmelzen konnte. Eine Verschweißung findet somit nur auf einem Teil der Fügefläche statt [Tri98a]. Für diese Versuchsreihe wurden die Zündspitzen der Bolzen spanend von 0,75 mm auf 0,35 mm gekürzt.

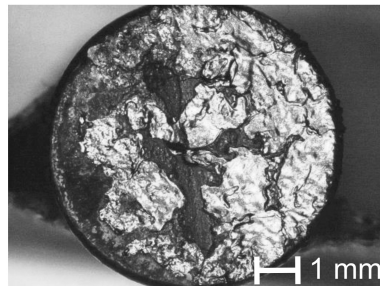
Die gekürzte Zündspitze (Störeinfluss E) beeinflusst in erheblichem Umfang die Schweißergebnisse. Bei der Sichtprüfung fallen ein fehlender Spritzerkranz sowie deutliche Unterschneidungen als Merkmale unzureichenden Energieeintrages auf. Die Einbrandformen zeigen erhebliche Fehlstellen in der Bolzenmitte und unvollständige Randanbindung (Bild 5.34 a und b). Der Lichtbogen zündet in der Regel problemlos, aber kann aufgrund der zu geringen Lichtbogenbrenndauer kein ausreichendes Materialvolumen anschmelzen. Die Brüche bei den Biegeprüfungen erfolgen vollständig (c) oder mit hohem Anteil in der Schweißzone (d).



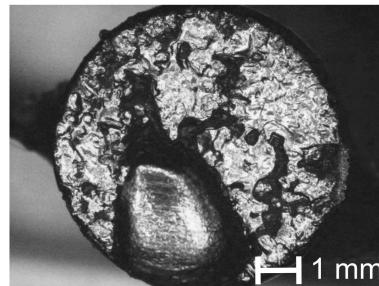
a) Hoher Anteil von Bindefehlern, tragender Querschnitt zu gering



b) Verschweißung des Nennquerschnitts gegeben, Bindefehler rechts



c) Unvollständige Anschmelzung des Bolzens aufgrund zu kurzer Lichtbogenbrenndauer



d) Ausknöpfdurchmesser stark reduziert, Bindefehler, Bruch primär in der Schweißzone

Bild 5.34: Einbrandformen und Bruchansichten bei gekürzter Zündspitze

Die veränderte Zündspitzenlänge ist anhand der Messwertaufzeichnungen deutlich erkennbar. Die Strom- und Spannungswerte sowie die Bolzenbewegung geben Hinweise auf diese Störung (Bild 5.35). Der Lichtbogen zündet gegenüber den ungestörten Schweißungen verspätet und die Lichtbogenbrenndauer ist deutlich verkürzt. Eine signifikante Spannungsüberhöhung zum Zündzeitpunkt ist kaum erkennbar. Die Eintauchtiefe ist verringert und die Auftreffgeschwindigkeit aufgrund der geringeren Dauer der Beschleunigung entsprechend reduziert.

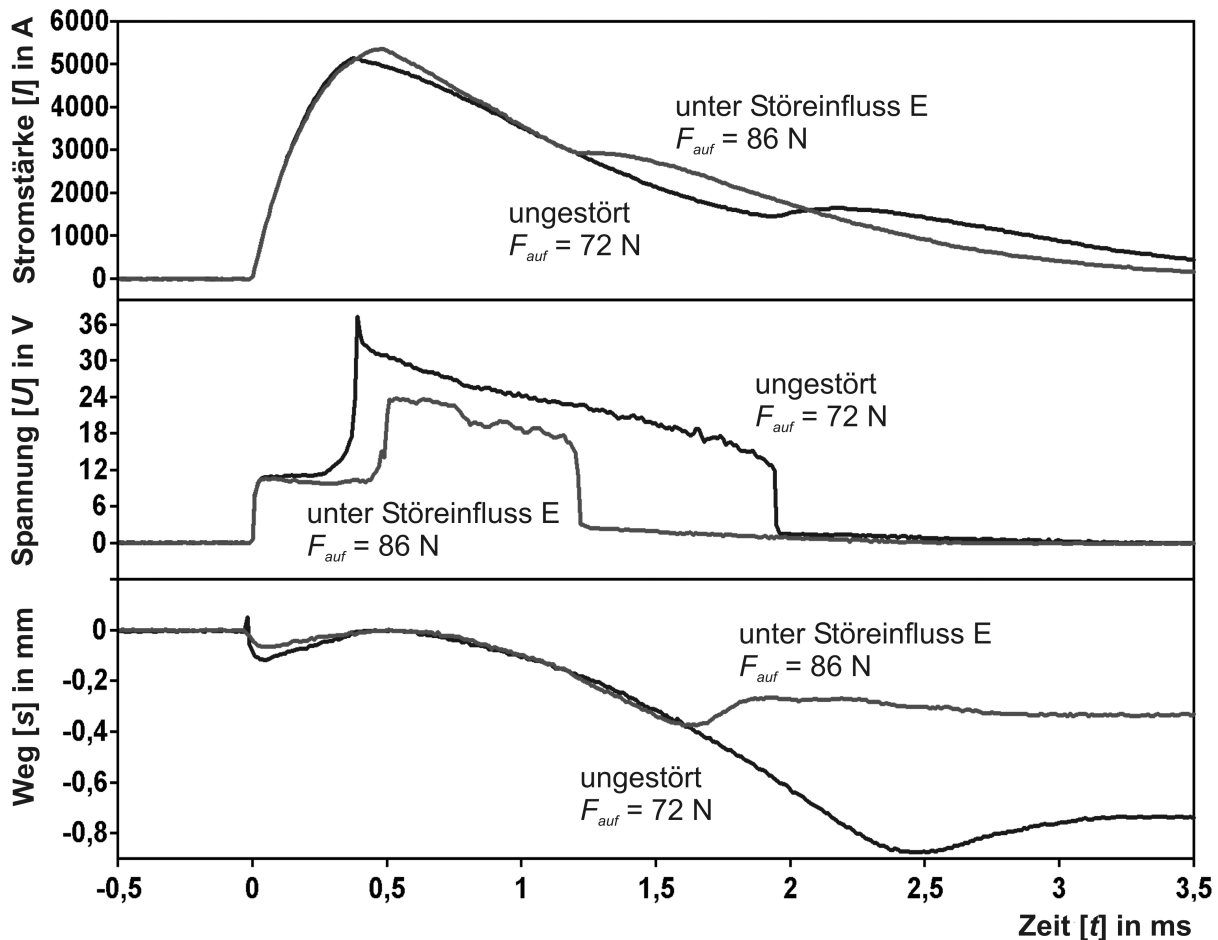
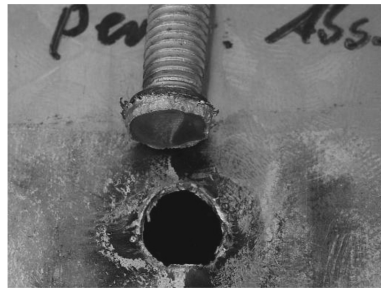


Bild 5.35: Messkurven bei gekürzter Zündspitze im Vergleich zu einer ungestörten Schweißung

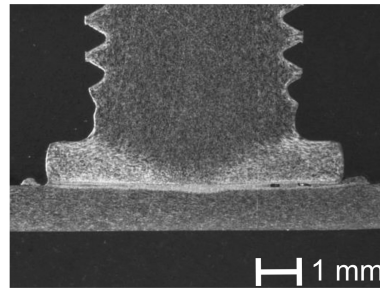
5.6.6 Permanente Absaugung

Ein starker radial zur Schweißstelle wirkender Luftstrom könnte das Lichtbogenplasma beeinflussen und zu einer Destabilisierung des Lichtbogens führen. Denkbar sind eine Ablenkungen des Lichtbogens oder von schmelzflüssigem Material in Richtung des Luftstromes.

In den Versuchen beim Schweißen mit permanenter Absaugung (Störeinfluss F) zeigen sich keinerlei Auswirkungen auf die Fügequalität (Bild 5.36). Die Ergebnisse entsprechen den ungestörten Schweißungen, bei denen die Absaugung erst nach dem Schweißvorgang zugeschaltet wurde. Bezüglich der Kontamination des Werkzeuges durch Schweißspritzer ist eine permanente Absaugung als günstiger zu bewerten. Trotz der relativ hohen Strömungsgeschwindigkeit der Absaugung wird der Lichtbogen aufgrund der kurzen Brenndauer und stabilisierenden Effekten durch die umgebende ferromagnetische Masse des Werkzeuges nicht erkennbar negativ beeinflusst.



a) Vollflächige Ausknöpfung aus dem Blech



b) Verschweißung mit kleinem Bindefehler rechts

Bild 5.36: Schweißung bei permanenter Absaugung nach wechselseitiger Biegeprüfung und Einbrandform im Schlibbild

Der Messkurvenvergleich zeigt aufgrund der gegenüber den Serienschweißungen auf 86 N (Stufe 6) erhöhten Aufsetzkraft lediglich eine geringere Lichtbogenbrenndauer und eine erhöhte Auftreffgeschwindigkeit (Bild 5.37). Das Zündverhalten sowie die maximale Stromstärke sind identisch mit der ungestörten Schweißung.

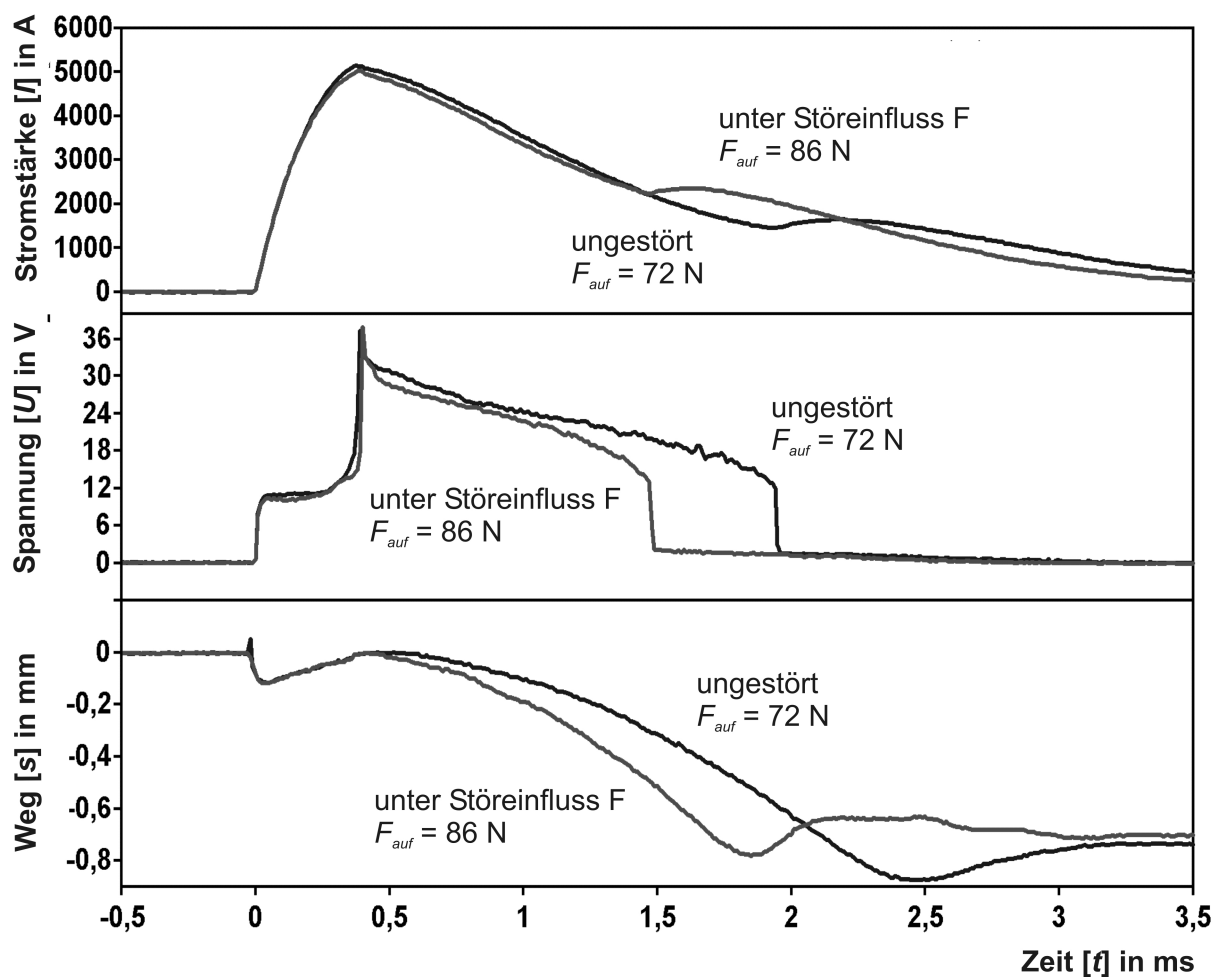


Bild 5.37: Messkurven bei permanenter Absaugung im Vergleich zu einer ungestörten Schweißung

5.6.7 Mischverbindungen mit Bolzen aus austenitischem CrNi-Stahl

Die Verwendung von Schweißbolzen aus legiertem CrNi-Stahl soll zeigen, wie sich dieser Werkstoff auf den Prozessverlauf auswirkt. Es soll geklärt werden, wie sich die Messwertaufzeichnungen mit dem abweichenden Bolzenwerkstoff verändern, um das Erkennen von Materialverwechselungen mit Hilfe der Schweißüberwachung sicherstellen zu können.

So genannte Schwarz-Weiß-Verbindungen — Mischverbindung zwischen unlegiertem ferritisch-perlitischem und legiertem austenitischem CrNi-Stahl — werden in der Praxis bewusst eingesetzt. Meist werden legierte Bolzen auf unlegiertem Blech verwendet. Schwarz-Weiß-Verbindungen führen aufgrund eines (nach dem Schaeffler-Diagramm ermittelbaren) entstehenden Martensitanteiles zu einem spröden Gefüge in der Schweißzone [Tri97]. Da beim Bolzenschweißen die Schmelzzone relativ flach, die Durchmischung gering und der Anteil der Schmelze zu etwa 60 % aus dem Bolzenmaterial besteht, werden Mischverbindungen zwischen legierten Bolzen und unlegiertem Blech für viele Anwendungen mit ausreichender Duktilität und akzeptablen Tragfähigkeiten hergestellt.

Die mit der entwickelten Versuchsanlage hergestellten Mischverbindungen (Störeinfluss H) erreichten einen mittleren Ausknöpfungsdurchmesser von etwa 6,0 mm. Ihre Tragfähigkeit befindet sich damit nahezu auf dem Niveau der Schweißungen mit unlegierten Bolzen. Ein Abreißen des Bolzens vom Blech trat bei Biegeversuchen nicht auf. Für die Versuche mit legierten Bolzen wurde ein neuer Bolzenhalter mit entsprechend hoher Klemmkraft verwendet. Bild 5.38 zeigt die aufgenommenen Messkurven.

Im Vergleich zur ungestörten Schweißung mit unlegiertem Bolzen zeigt der legierte Bolzenwerkstoff einen signifikant abweichenden Spannungsverlauf mit früher eintretendem Maximum und schwächer ausgeprägtem Sprung in der Zündphase. Dieses Verhalten ist begründet durch die geringere elektrische und thermische Leitfähigkeit des legierten Werkstoffes. Dadurch kommt es bei gleicher Ladespannung und Ladeenergie zu einer schnelleren Erwärmung, Verdampfung und Ionisierung der Zündspitze. Das Kontaktschweißen von legierten Bolzen aus CrNi-Stahl ist gekennzeichnet durch eine kürzere Zündphase bei einer etwa 0,2 ms frühen Lichtbogenzündung. Aufgrund des höheren elektrischen Widerstandes des CrNi-Stahles ist der maximale Schweißstrom um über 15 % verringert.

Die gegenüber den Schweißungen von unlegierten Bolzen geringere Lichtbogenbrenndauer und höhere Auftreffgeschwindigkeit sind begründet in einer höheren eingestellten Aufsetzkraft von 86 N (Stufe 6). Sowohl die Messkurven als auch die Ausknöpfungsdurchmesser der Mischverbindungen zeigen eine hohe Reproduzierbarkeit.

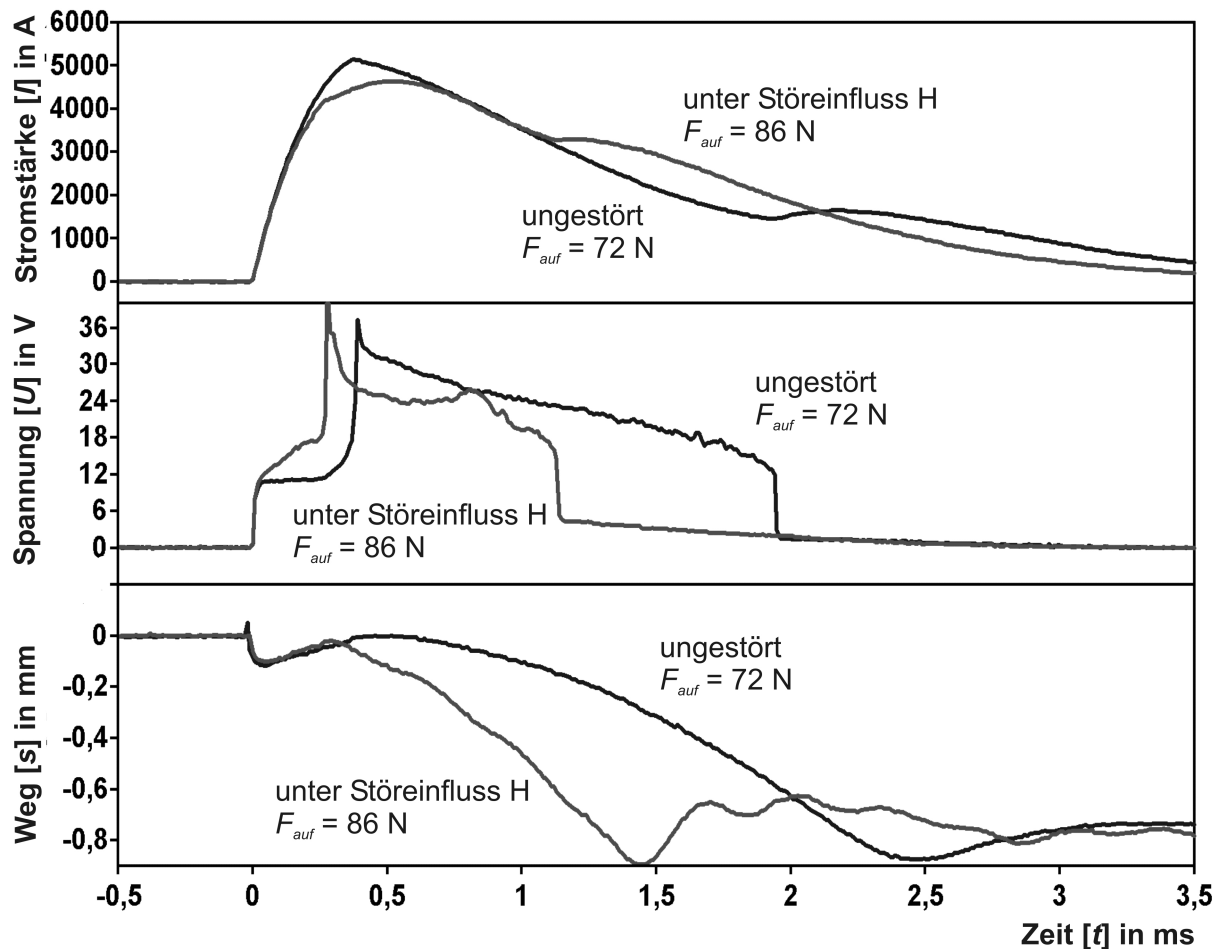


Bild 5.38: Schweißungen von Bolzen aus CrNi-Stahl mit neuem Bolzenhalter (Störeinfluss H) im Vergleich zu einer ungestörten Schweißung

Bei einem vorangegangenen Fehlversuch mit legierten Bolzen zusammen mit einem Bolzenhalter mit zu geringer Klemmkraft (Störeinfluss G) und dadurch erhöhtem Kontaktwiderstand zündeten Nebenlichtbögen zwischen der Bolzenaufnahme und dem Bolzengewinde. Verstärkt wird dieser Effekt durch den im Vergleich zu unlegierten verkupferten Bolzen zusätzlich erhöhten Übergangswiderstand bei Bolzen aus CrNi-Stahl. Anschmelzungen auf der Bolzenmantelfläche sind ein eindeutiger Hinweis auf einen verschlissenen Bolzenhalter. Durch die Nebenlichtbögen wird das Außengewinde beschädigt (siehe auch Kap. 6.2). Trotz der Bildung von Nebenlichtbögen ist die eingetragene Schweißenergie ausreichend, so dass vergleichbare Tragfähigkeiten erreicht werden wie bei Nutzung eines einwandfreien Bolzenhalters.

Die Nebenlichtbögen sind an weiteren Spannungsanstiegen nach Zündung des primären Lichtbogens eindeutig zu erkennen (Bild 5.39). Die Formen des Spannungsanstieges während der Zündphase sowie der Strom- und Wegverlauf zeigen aufgrund des abweichenden Zündverhaltens des CrNi-Stahles die gleiche Charakteristik wie Schweißungen ohne Nebenlichtbögen mit einwandfreiem Bolzenhalter. Durch die Nebenlichtbögen ist die Varianz der Messgrößen jedoch erhöht.

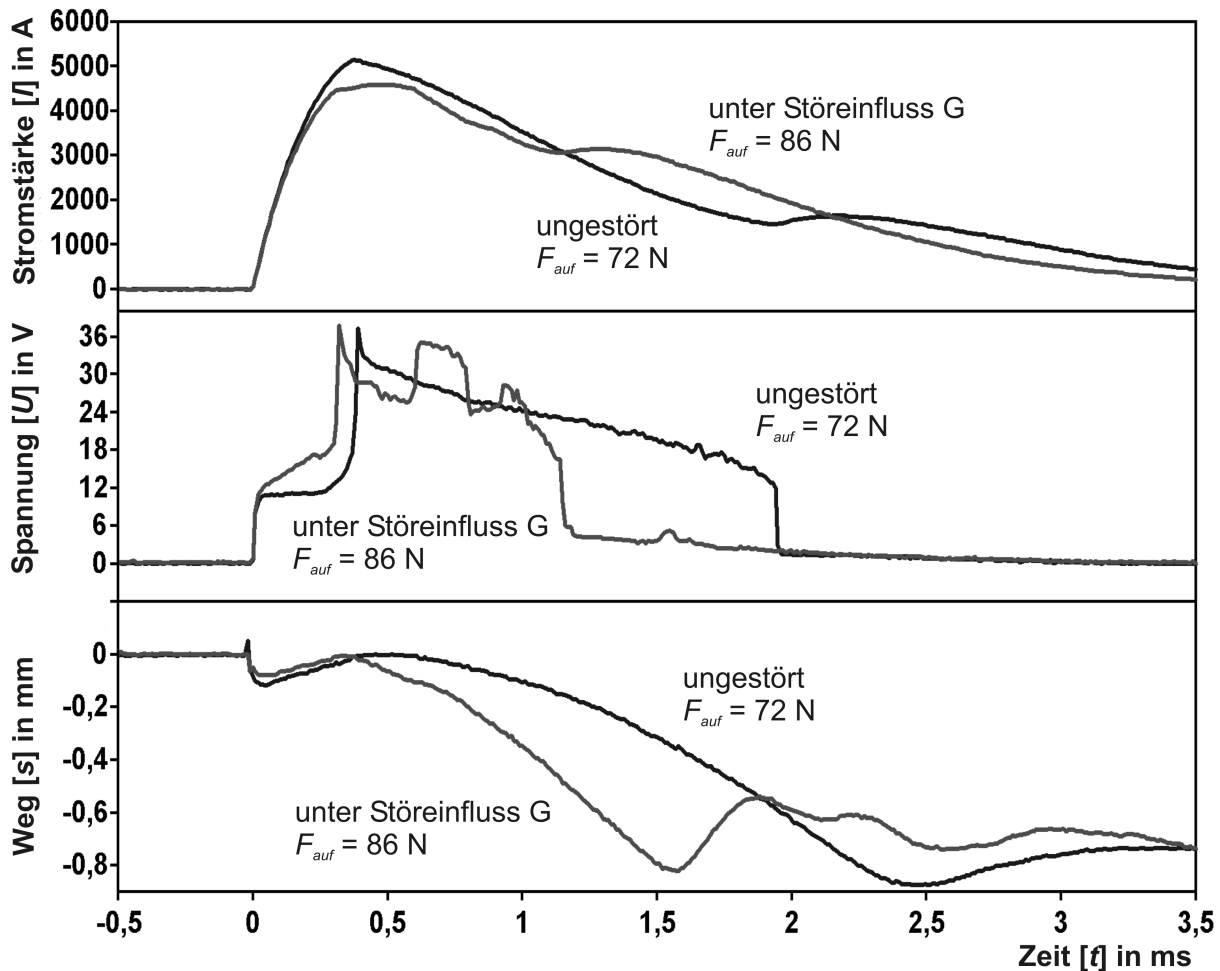


Bild 5.39: Schweißungen von Bolzen aus CrNi-Stahl mit verschlissenem Bolzenhalter (Störeinfluss G) im Vergleich zu einer ungestörten Schweißung

5.6.8 Vergleich der untersuchten Störeinflüsse

Die Diagramme Bild A 8.1 bis Bild A 8.6 im Anhang enthalten die statistischen Auswertungen der Schweißparameter Lichtbogenbrenndauer, Schweißenergie, Auftreffgeschwindigkeit, Eintauchtiefe, maximale Schweißstromstärke und mittlere Lichtbogenspannung unter den verschiedenen Störeinflüssen. In Form von Box-Whisker-Plots sind für jede Versuchsreihe jeweils die Werte des Median, des oberen und unteren Quartil sowie die Minimal- und Maximalwerte der genannten Parameter grafisch dargestellt. Zum Vergleich sind jeweils die Auswertungen unbeeinflusster Schweißungen (Probenentnahme 5 des Serienversuches) zum Vergleich angegeben. Die Diagramme bestätigen die anhand der Messkurven getroffenen Aussagen zu den einzelnen Störeinflüssen in diesem Kapitel.

Die Diagramme in Bild 5.40 und in Bild 5.41 zeigen zusammenfassend die Ergebnisse der wechselseitigen Biegeprüfungen für die untersuchten Störeinflüsse im Vergleich zu ungestörten Serienschweißungen. Die statistischen Auswertungen sind in Form von Box-Whisker-Plots dargestellt.

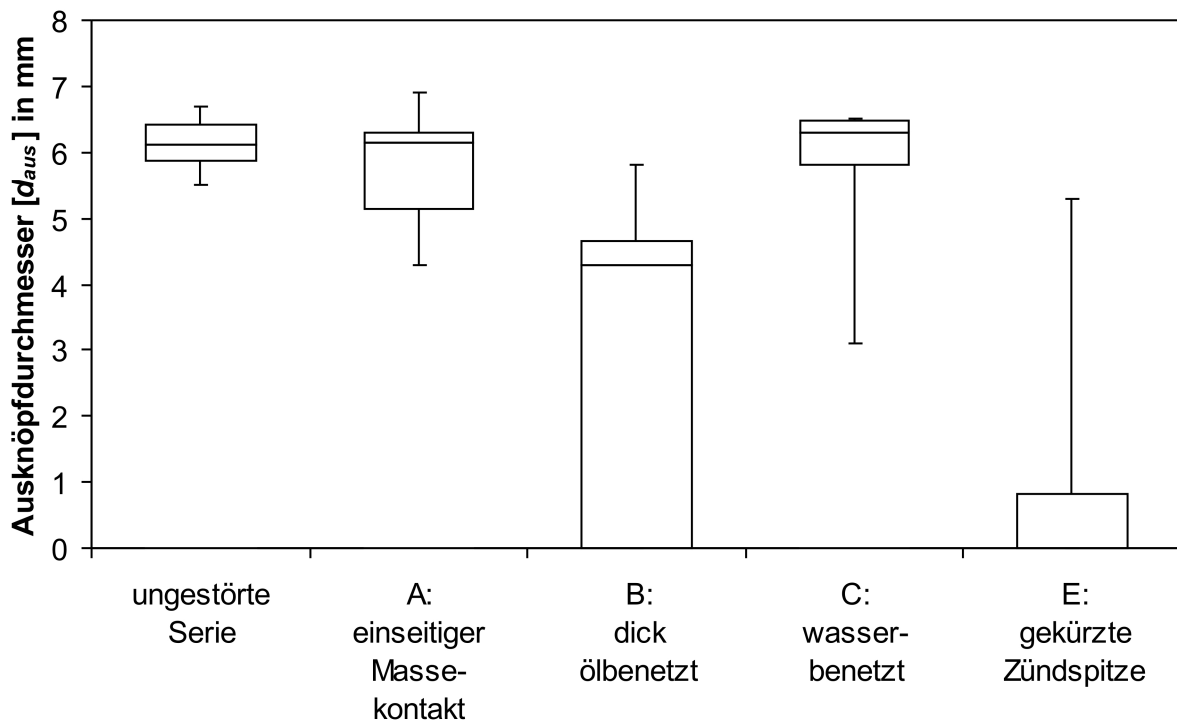


Bild 5.40: Statistische Auswertung der Ausknöpfungsdurchmesser unter den Störeinflüssen A, B, C und E im Vergleich zu ungestörten Serienschweißungen

Bei den Störeinflüssen A und C sind im Vergleich zu den Störungen B und E vergleichsweise geringe Auswirkungen auf den Ausknöpfungsdurchmesser festzustellen (Bild 5.40). Die Schweißungen mit einseitigem Massekontakt (Störeinfluss A) sowie auf mit Wasser benetzter Oberfläche (Störeinfluss C) weisen im Mittel Ausknöpfungsdurchmesser auf dem Niveau der ungestörten Serienschweißungen auf. Sie zeigen eine größere Streuung und die asymmetrische Lage des Median in der Box stellt eine deutliche Abweichung von der Normalverteilung dar. Dabei wurde unter den Störeinflüssen A und C nur bei je einer der jeweils 20 untersuchten Schweißungen ein Ausknöpfungsdurchmesser kleiner als 5 mm ermittelt.

Besonders geringe Ausknöpfungsdurchmesser treten beim Schweißen an dick mit Ziehöl benetztem Blech (Störeinfluss B) und bei gekürzter Zündspitze (Störeinfluss E) auf. Dabei brechen etwa 25 % (Störeinfluss B) bzw. 75 % (Störeinfluss E) der Proben unter den Störeinflüssen B und E in der Schweißzone, was einem Ausknöpfungsdurchmesser von 0 mm entspricht. Daher sind die erreichten Werte bei diesen Störungen entsprechend gering.

Bild 5.41 enthält die Ergebnisse der wechselseitigen Biegeprüfungen für die Störeinflüsse D, F, G und H, ebenfalls im Vergleich zu ungestörten Serienschweißungen. Die Ausknöpfungsdurchmesser bei diesen Störungen erreichen im Mittel etwa 6 mm und sind somit vergleichbar mit den Ergebnissen ungestörter Schweißungen. Nur einzelne Proben unter den Störeinflüssen D und H weisen gering reduzierte Ausknöpfungsdurchmesser von etwa 5 mm auf.

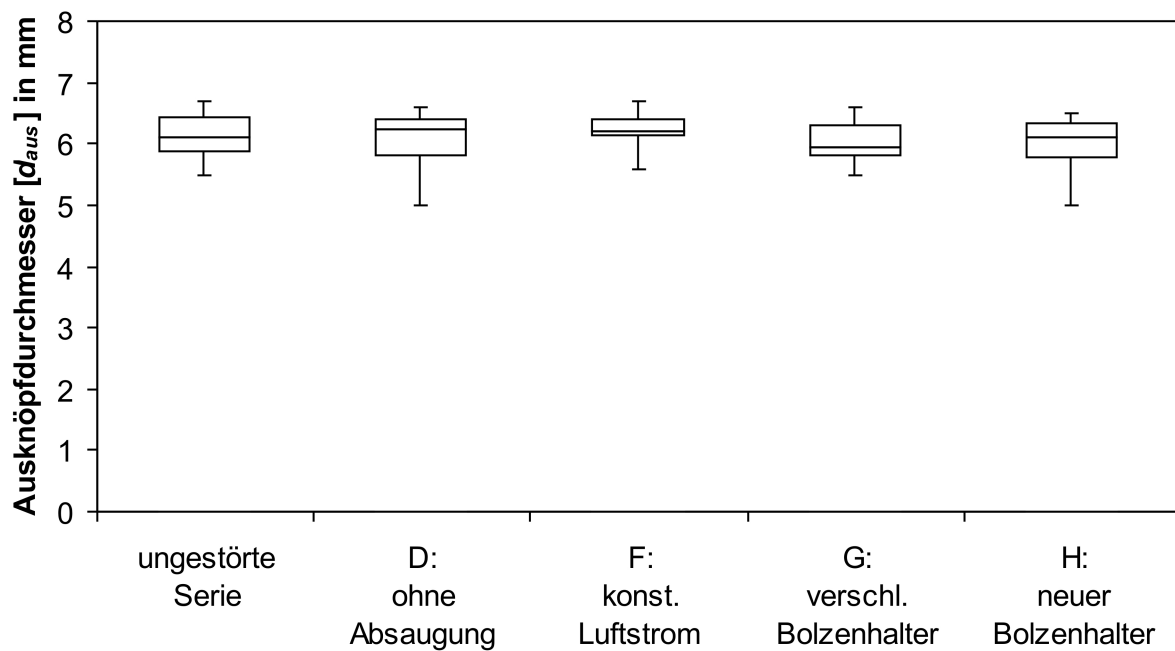


Bild 5.41: Statistische Auswertung der Ausknöpfungsdurchmesser unter den Störeinflüssen D, F, G und H im Vergleich zu ungestörten Serienschweißungen

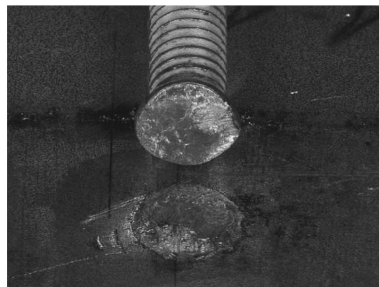
Insgesamt zeigt sich der Schweißprozess innerhalb des Versuchswerkzeuges als ausgesprochen robust gegenüber den untersuchten und in der Praxis oftmals auftretenden Störeinflüssen. Eine starke Ölbenetzung oder eine veränderte Zündspitzenlänge führen dabei zu deutlichen Einschränkungen der erreichbaren Tragfähigkeiten der Schweißverbindungen. Der Einsatz einer Wasserbenetzung führt aufgrund der im Werkzeug schlecht reproduzierbaren Benetzungsverhältnisse zu einer deutlichen Streuung der Ergebnisse und stellt sich für den integrierten Prozess als wenig geeignet dar. Die bei Stanzprozessen übliche dünne Beölung oder Befettung des Bleches verhindert bereits das Anhaften von Spritzern und Oxidationsrückständen sowie Anlaufverfärbungen, so dass ein Vorteil durch die Wasserbenetzung nicht gegeben ist.

Interessant ist, dass der Prozess selbst bei einseitigem Massekontakt und bei verschlissenen Bolzenhaltern noch relativ stabil ist und hohe Tragfähigkeiten erreicht werden. Mit Ausnahme von geänderten Absaugbedingungen zeigen die untersuchten Störeinflüsse charakteristisch veränderte Messkurven. Dadurch ist ihre Erkennbarkeit durch die Schweißüberwachung gegeben. Fehler bei der Absaugung wie ein Ausfall des Aggregates oder des Ventils können über die Prozesssteuerung erkannt werden. Während eine permanente Absaugung — auch während der Zündphase — den Prozess nicht negativ beeinträchtigt, führt eine Akkumulation von Verschmutzungen bei ausbleibender Absaugung zu einer vergrößerten Streuung der Schweißqualität.

5.7 Verarbeitung von verzinktem Blech

Nach [SLV04, SLV03] sind per Sendzimirverfahren verzinkte Bleche mit der Spitzenzündung im Spaltverfahren mit Schichtdicken bis 10 μm und im Kontaktverfahren bis 20 μm schweißbar. Für eine tragfähige Schweißverbindung ist ein höherer Energieeintrag während einer ausreichend langen Lichtbogenbrenndauer erforderlich, so dass die Zinkschicht an der Schweißstelle vollständig durch den Lichtbogen verdampft werden kann. Zinkreste im Schweißgut führen i. d. R. zu unzureichenden Tragfähigkeiten der Schweißverbindung und spröden Brüchen in der Schweißzone bei der Biegeprüfung.

Die Eignung des entwickelten Prozesses für verzinkte Bleche wurde an zwei Versuchsreihen mit Ladespannungen U_L von 200 und 190 V bei einer Aufsetzkraft von 72 N (Stufe 4) überprüft. Bild 5.42 zeigt zwei Schweißstellen an verzinktem Blech mit einer Zinkauflage von 100 g/m² (Z100) die einer beidseitigen Schichtdicke von je etwa 7 μm entspricht. Die Schweißung Bild 5.42 a wurde mit zu geringer Energie ausgeführt und zeigt bei der Biegeprüfung einen spröden Bruch in der Schweißzone. Bild 5.42 b stellt eine Schweißung mit ausreichendem Energieeintrag und Bruchlage im Bolzen dar. Bei 1,60 mm dickem Blech treten generell keine Ausknöpfungen auf. Die Schweißstelle ist vergleichsweise stark mit Oxidationsrückständen behaftet.



a) Ladespannung 190 V:
Bruchlage in der Schweißzone
aufgrund großer Bindefehler



b) Ladespannung 200 V:
Bruchlage im Bolzen nach
Biegewechselprüfung

Bild 5.42: Schweißungen auf verzinktem Stahlblech

(C : 66 mF; F_{auf} : 72 N; Bolzen: M5, S235; Blech: s_0 : 1,6 mm; DX54D+Z100)

Um eine höhere Prozessstabilität zu erreichen, ist eine weitere Erhöhung der Ladeenergie erforderlich. Angesichts der bereits bei der Ladespannung von 200 V in Verbindung mit einer Kapazität von 66 mF auftretenden starken Spritzerbildung wurde auf eine weitere Steigerung der Ladeenergie (die nur durch Erhöhung der Kapazitätsstufe auf 99 mF möglich gewesen wäre) verzichtet.

Die Einbrandformen sind gemäß Bild 5.43 gleichmäßig mit kleineren Fehlstellen ausgeführt. Die Randanbindung des Bolzens im Flanschbereich könnte durch Erhöhung der Schweißenergie noch verbessert werden.

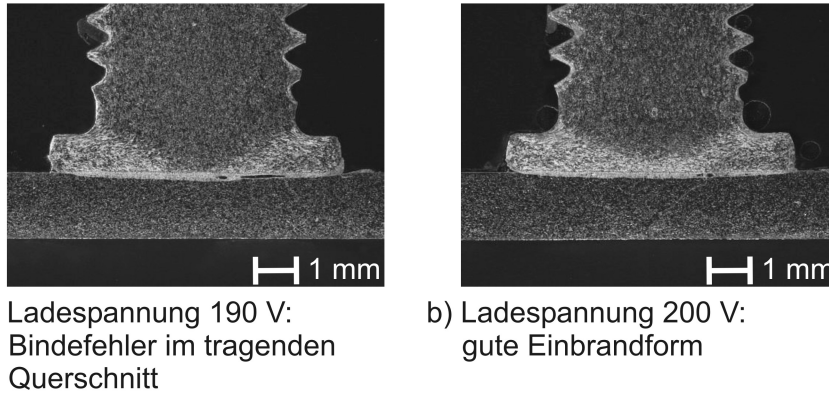


Bild 5.43: Einbrandformen auf verzinktem Stahlblech

Die Diagramme Bild 5.44 und Bild 5.45 zeigen die gemessenen Werte der Schweißparameter Schweißenergie, Lichtbogenbrenndauer, maximale Schweißstromstärke und Lichtbogen Spannung bei verzinktem Stahlblech (Z100). Die gegenüber den Vergleichsschweißungen auf unverzinktem Blech verdoppelte Energiemenge resultiert im Wesentlichen aus der Verdoppelung der maximalen Stromstärke auf Werte um 10 kA. Als Vergleich dient die Auswertung von 150 Schweißungen auf unverzinktem Blech (DC 04; 1 mm; dünn befettet im LZ) mit der Ladespannung 130 V bei gleicher Kondensatorkapazität und Aufsetzkraft wie bei den Versuchen mit beschichtetem Blech.

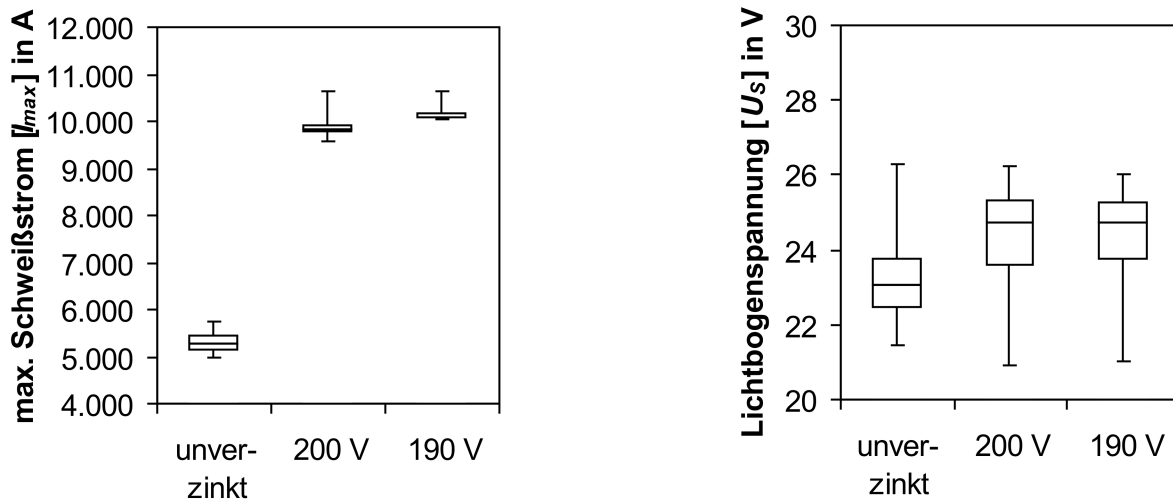


Bild 5.44: Maximaler Schweißstrom und Lichtbogen Spannung bei verzinktem Stahlblech im Vergleich zu Schweißungen an unbeschichtetem Blech

Der Schweißstrom ist aufgrund der für das verzinkte Blech höheren erforderlichen Ladespannung deutlich erhöht und zeigt eine geringe Streuung. Die im Mittel um etwa 2 V erhöhte Lichtbogen Spannung weicht nicht deutlich von den Vergleichsschweißungen auf unverzinktem Blech ab.

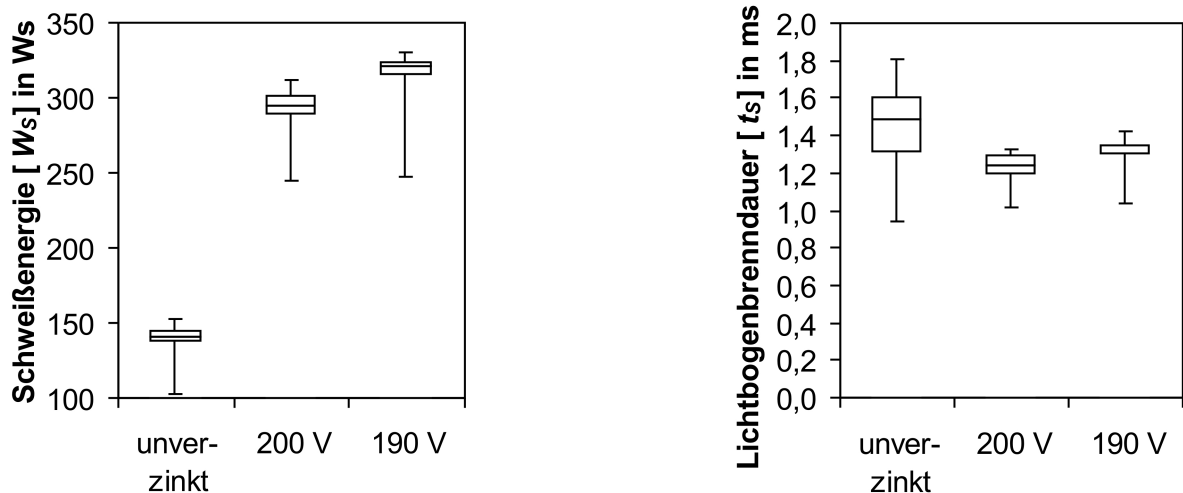


Bild 5.45: Eingezeichnete Schweißenergie und Lichtbogenbrenndauer bei verzinktem Stahlblech im Vergleich zu Schweißungen an unbeschichtetem Blech

Die etwa größere Streuung des Energieeintrages zeigt die verringerte Prozessstabilität bei verzinktem Grundmaterial. Zwar ist mit einer weiteren Erhöhung der Schweißenergie und Verlängerung der Lichtbogenbrenndauer mit einem stabileren Prozess und guten Fügeergebnissen zu rechnen, die damit zunehmende Spritzerbildung stellt für das Werkzeug jedoch Probleme dar. Die Neigung der Schweißspritzer, am Bolzenhalter anzuhafte, erwies sich nach nur 25 bis 50 Schweißungen als kritisch, da sich verklumpte Ansammlungen von Spritzern plötzlich lösen und das Werkzeug schädigen können (Bild 5.46). Anhaftungen von Schweißspritzern am Bolzenhalter wurden zuvor bei der Verarbeitung von unverzinktem Blech selbst im Serienversuch nur von wenigen einzelnen Partikeln festgestellt und hatten keinen erkennbaren Einfluss auf den Schweißprozess oder die erreichbare Fügequalität.

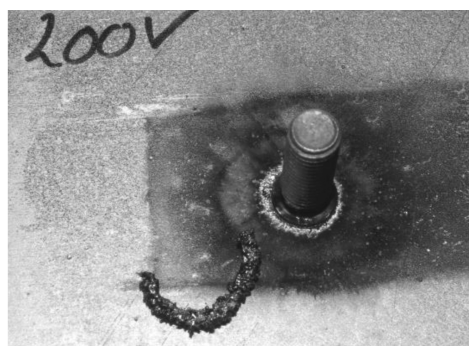


Bild 5.46: Vom Bolzenhalter abgelöste Ansammlung von Schweißspritzern

Abhilfen zur Verhinderung des Anhaftens von Schweißspritzern könnten die Wahl von nicht ferromagnetischen Werkstoffen wie Aluminium oder Kunststoff sowie Beschichtungen der Werkzeugelemente und die Optimierung der Absaugung darstellen. Nicht anhaftende Schweißspritzer können nahezu vollständig abgesaugt werden.

5.8 Fügegenauigkeit

Nach TRILLMICH werden mit üblichen positionsgesteuerten Automatikschweißköpfen Positionsgenauigkeiten von $\pm 0,4$ mm erreicht, mit besonders spielarmen Systemen $\pm 0,2$ mm [Tri97]. Die Schweißköpfe werden bei herkömmlichen automatisierten Schweißanlagen i. d. R. auf Koordinatentischen betrieben. Dabei wird die Fügegenauigkeit von der Systemsteifigkeit limitiert, die wesentlich von der über die Führung herausragende Länge des Schweißkopfes sowie der Lagerspiele der Linearführungen beeinflusst wird.

Zur Bestimmung der Positions- und Orientierungsgenauigkeit der werkzeugintegriert hergestellten Schweißverbindung werden jeweils 20 Stichproben aus sechs ausgewählten Versuchsreihen mit einer Koordinatenmessmaschine taktil vermessen. Dabei dienen die Lochungen des Versuchsteiles als Referenz für die Bolzenposition, während die Blechebene als Referenzfläche zur Bestimmung der Orientierung herangezogen wird. Das Bezugskordinatensystem wird bestimmt durch die in z-Richtung verlaufende Normale zur Blechebene und die Verbindung beider Referenzlochungen in y-Richtung. Die x-Richtung ergibt sich senkrecht zu diesen Achsen. Die Blechebene wird über acht Messpunkte ermittelt. Alle 26 Messpunkte sind in Bild 5.47 dargestellt.

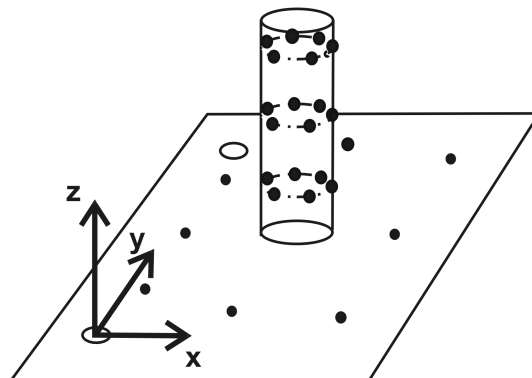


Bild 5.47: Bezugskordinatensystem und die 26 Messpunkte

5.8.1 Positionsgenauigkeit

Bild 5.48 zeigt die absoluten Abweichungen von der idealen Sollposition. Bei den Vermessungen ergaben sich im Mittel absolute systematische Abweichungen in x-Richtung von $-0,25$ mm und in y-Richtung von $0,67$ mm. Diese relativ großen Abweichungen sind primär auf Fertigungs- und Montagetoleranzen bei der Installation des Kopfes im Versuchswerkzeug zurückzuführen. Durch eine Justiermöglichkeit des Schweißkopfes können diese systematischen Abweichungen einfach kompensiert werden.

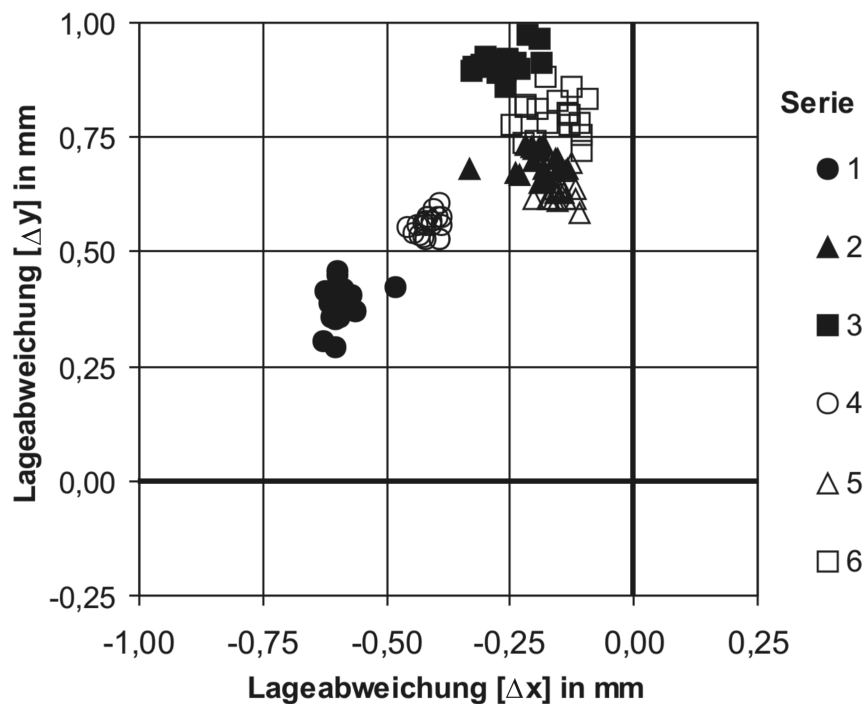


Bild 5.48: Lageabweichung relativ zur Sollposition

Die innerhalb der einzelnen Serien auftretenden Streuungen zeigen, dass die Fügepositionen bei einer bestehenden Einstellung mit Standardabweichungen in x-Richtung zwischen 0,019 mm und 0,043 mm nur geringfügig abweichen. Die Standardabweichungen in y-Richtung sind innerhalb der einzelnen Serien mit Werten zwischen 0,022 mm und 0,042 mm vergleichbar.

Die Positionsgenauigkeit zeigt sich damit aufgrund der Steifigkeit des Werkzeuges und der reproduzierbaren Zentrierung des Blechstreifens den üblichen Schweißköpfen insgesamt überlegen.

Die Streuungen sind ähnlich wie bei der folgenden Darstellung der Orientierungsabweichungen auffällig diagonal verteilt. Diese bevorzugten Abweichrichtungen lassen auf einen deutlichen Einfluss des Führungsspieles des verwendeten Zweisäulengestelles schließen. Die Verwendung eines Viersäulengestelles verspricht eine deutlich verbesserte Werkzeugführung.

5.8.2 Orientierungsgenauigkeit

Die Orientierungsgenauigkeit wurde über die Winkel zwischen der Normalen zur Blechebene und der auf die yz- sowie zx-Ebene projizierte Bolzenachse bestimmt. Bild 5.49 zeigt eine grafische Darstellung der Winkelabweichungen der sechs vermessenen Serien.

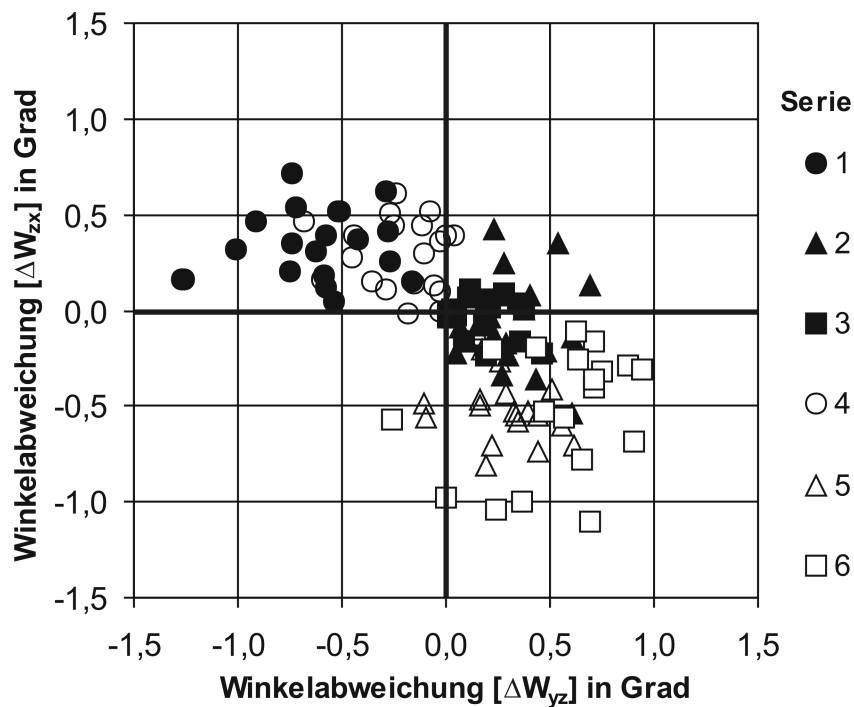


Bild 5.49: Winkelabweichung von der senkrechten Bolzenorientierung

Die Standardabweichungen der Bolzenorientierung über alle vermessenen Serien hinweg liegen bei beiden Projektionsebenen unter $0,5^\circ$. Auch bei der Orientierungsgenauigkeit zeigt sich, dass die Standardabweichungen innerhalb der einzelnen Serien mit Werten zwischen $0,1^\circ$ und $0,3^\circ$ gering sind. Damit zeigt der werkzeugintegrierte Schweißprozess eine hohe Fügegenauigkeit.

6 Auswirkungen der Prozessintegration auf das Werkzeug

Neben der Gewährleistung einer hohen Fügequalität und eines stabilen Fügeprozesses unter den Bedingungen in Blechbearbeitungswerkzeugen ist für Anwendungen relevant, welche Auswirkungen der integrierte Schweißprozess auf die Werkzeugfunktion hat. Der entwickelte integrierte Schweißprozess stellt insbesondere durch die entstehenden Schweißspritzer und die Art der Fügeteilezuführung neue Risiken für die Fertigungsanlage dar. In der folgenden Prozessanalyse werden die während der Versuche gesammelten Erfahrungen zur Beherrschung der Spritzerbildung sowie möglicher Prozessfehler dargestellt und Abhilfemaßnahmen abgeleitet.

Technische Beeinträchtigungen des Werkzeuges durch Wärmebelastungen treten aufgrund der geringen, im Schweißprozess eingetragene Energiemenge und der günstigen Wärmeableitung über das Werkzeug sowie das Blechteil nicht auf. Der Schweißkopf erreichte maximal Temperaturen von etwa 50 °C, gemessen wenige Sekunden nach einständigem Dauerbetrieb.

6.1 Beherrschung der Spritzerbildung

Im Umgang mit entstehenden Schweißspritzern hat sich das entwickelte Konzept mit enger Abschirmung des Schweißbereiches und einer starken Absaugung in den Versuchen bewährt. Die Spritzer konnten bis auf wenige am Blech oder am Werkzeug haftende Rückstände ohne negative Beeinträchtigung des Schweißprozesses und der erreichbaren Fügequalität entfernt werden. Bild 6.1 zeigt eine Aufnahme der Fügeverbindung während der Öffnung des Werkzeuges im Automatikbetrieb. Zu erkennen sind vereinzelt im abgeschirmten Schweißbereich haften bleibende Metallpartikel. Der um die Schweißstelle herum ungleichmäßig verlaufende Luftstrom der Absaugung führte lediglich zu einem bevorzugten Auftreten von Verbrennungsrückständen auf dem Blech in Strömungsrichtung. Auf die Tragfähigkeit negativ wirkende Effekte, wie asymmetrische Anbindungen durch Blaswirkungen, traten nicht auf.

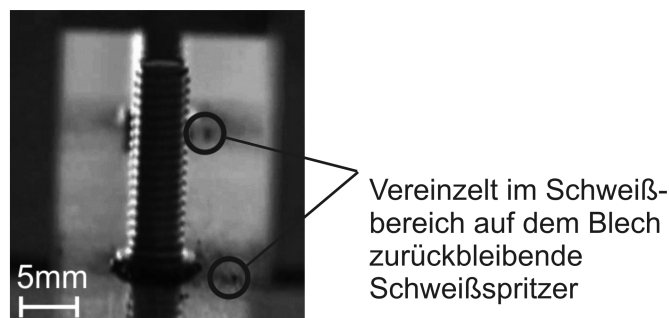


Bild 6.1: Vereinzelt auf den Versuchsteilen verbleibende Schweißspritzer

Als Material für die Abschirmelemente des Schweißbereiches hat sich der Kunststoff PTFE gut bewährt. Nach wenigen Schweißungen waren diese PTFE-Elemente mit anhaftendem Ruß bedeckt. Spritzer blieben, mit Ausnahme beim Schweißen auf verzinktem Blech, nicht haften. Nach den Versuchen mit verzinktem Material, bei

deutlich erhöhtem Energieeintrag und entsprechend stärkerer Spritzerbildung, konnten auf den PTFE-Elementen einzelne oberflächlich eingeschmolzene Partikel beobachtet werden.

Um die entstehenden Schweißspritzer sicher im Absaugbereich zu halten, ist ein möglichst geringes Spaltmaß zwischen der Abschirmung und dem Blech erforderlich, da sich die Schweißspritzer bevorzugt direkt über der Blechoberfläche radial mit hoher Geschwindigkeit nach außen bewegen. Die Abschirmung sollte daher federelastisch auf das Blech gedrückt werden.

Eine gezielte Absaugung von Schweißspritzern bei Bolzenschweißverfahren wird nach bisherigem Kenntnisstand erstmals bei dem entwickelten Werkzeugkonzept eingesetzt.

Beobachtungen und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Absaugprozesses, der durch einen transparenten Schlauch beobachtet werden konnte, zeigten eine unerwartet hohe Leuchtintensität glühender Partikel (Bild 4.13). Die Filmaufnahmen zeigten zudem, dass die Bildung der Spritzer in mehreren Schüben erfolgt. Zu erklären sind der erste Schub durch die Explosion der Zündspitze bei Lichtbogenzündung, die Folgenden durch die kinetische Energie austreibender Lichtbogengase sowie dem Auftreffen des Bolzens im Schmelzbad.

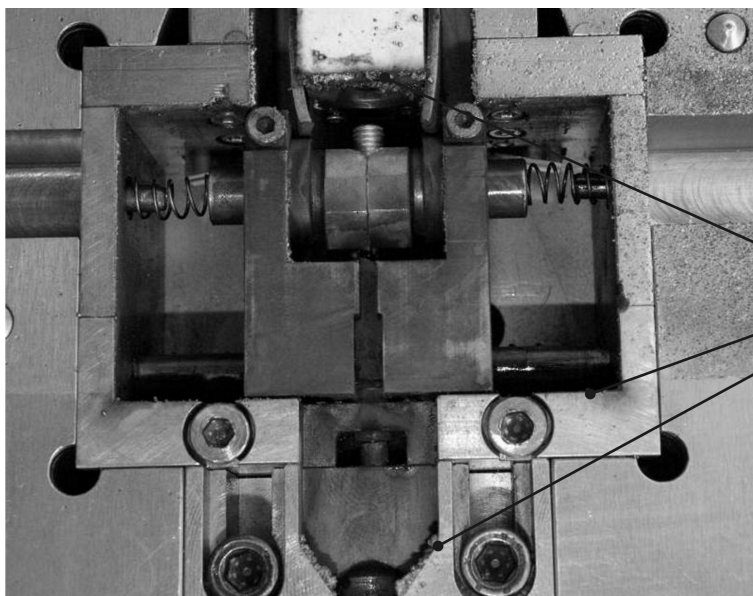
Die Saugleistung des verwendeten Industriesaugers erwies sich als ausreichend. Der Einsatz eines leistungsstärkeren Radialventilators erscheint dennoch vorteilhaft, um die im Werkzeug verbleibenden Schweißemissionen weiter zu reduzieren. Das pneumatisch angesteuerte Kugelventil ermöglichte eine schnelle Zuschaltung des Luftstromes und funktionierte störungsfrei. Probleme mit Verschmutzungen aufgrund der durchgeleiteten Emissionen konnten nicht erkannt werden. Die in der Steuerung eingestellte Zeitdifferenz von 1 ms zwischen der Kondensatorentladung und der Ventilansteuerung erwies sich für den Prozess als geeignet. Dieser Wert ist anlagenspezifisch und abhängig von strömungsmechanischen Parametern wie der Saugleistung und der Länge der Luftsäule sowie der Ventilschaltzeit.

Während der Versuche konnte eine Verschmutzung des Werkzeuges durch Abschirmung und Absaugung weitgehend verhindert werden. Sämtliche Dreh- und Linearführungen der Zuführmechanik konnten vor übermäßiger Verschmutzung geschützt werden. Dennoch empfehlen sich Dichtungen an Lagerstellen und insbesondere eine Faltenbankdichtung am Schweißkopf.

Durch die hohen Ströme des Schweißprozesses trat eine leichte Magnetisierung der ferromagnetischen Werkzeugkomponenten auf. Schweißspritzer sammelten sich bevorzugt an exponierten Kanten dieser Komponenten. Diese bevorzugten Stellen sind mit der lokalen Ausprägung der Magnetfelder zu begründen. Betroffen von der Anhäufung anhaftender Schweißspritzer sind die Mündung des Strömungskanals der Absaugung sowie blechnahe scharfe Kanten von Teilen der Zuführmechanik (Bild 6.2). Diese Spritzersansammlungen lösten sich in unregelmäßigen Abständen, fielen unkontrolliert auf das Blech und führten blech- wie werkzeugseitig zu Ab-

drücken auf den Kontaktflächen. Eine sichere Absaugung dieser Partikelverbände von etwa 1 mm Durchmesser konnte nicht immer gewährleistet werden. Um Beschädigungen und Verschleiß der Blech- und Werkzeugoberflächen zu vermeiden, ist es wichtig, ein Anhaften von Schweißspritzern durch Anpassungen der Werkzeuggestaltung im Schweißbereich und Verwendung geeigneter Werkstoffe zu verhindern. Deutliche Verbesserungen sind durch Vermeidung scharfer Kanten und den Einsatz von Beschichtungen oder von Werkstoffen mit geringerer Haftneigung zum verarbeiteten Werkstoff zu erwarten.

Durch Benetzung des Werkzeuges mit einem Schweißschutzspray als Trennmittel konnte das Anhaften von Spritzern weitgehend verhindert werden. Es war jedoch ein regelmäßiger Neuauftrag nach wenigen hundert Schweißungen erforderlich.



Kanten ferromagnetischer Komponenten im Schweißbereich mit Neigung zur Anhaftung von Schweißspritzern

Bild 6.2: Verschmutzung nach etwa 3.500 Schweißungen

In den Versuchen zeigte sich, dass die Intensität der Spritzerbildung und der damit einhergehenden Verschmutzungen durch Verringerung der eingetragenen — über die Ladespannung eingestellten — Energie nicht wesentlich reduziert werden kann, ohne die Schweißqualität zu beeinträchtigen.

Auf der Blechoberfläche der Versuchsteile bleiben am äußeren Rand innerhalb des abgeschirmten Schweißbereiches häufig kleine Schweißspritzer mit wenigen Zehntelmillimetern Durchmesser haften. Diese werden mit dem Blechband weitertransportiert und führen in den Folgestufen zu Abdrücken auf der Oberfläche des Blechniederhalters welche sich mit der Zeit akkumulieren. Die folgenden Abbildungen zeigen die Oberfläche des Niederhalters nach 1.500 (Bild 6.3) und nach 8.000 (Bild 6.4) Schweißungen.

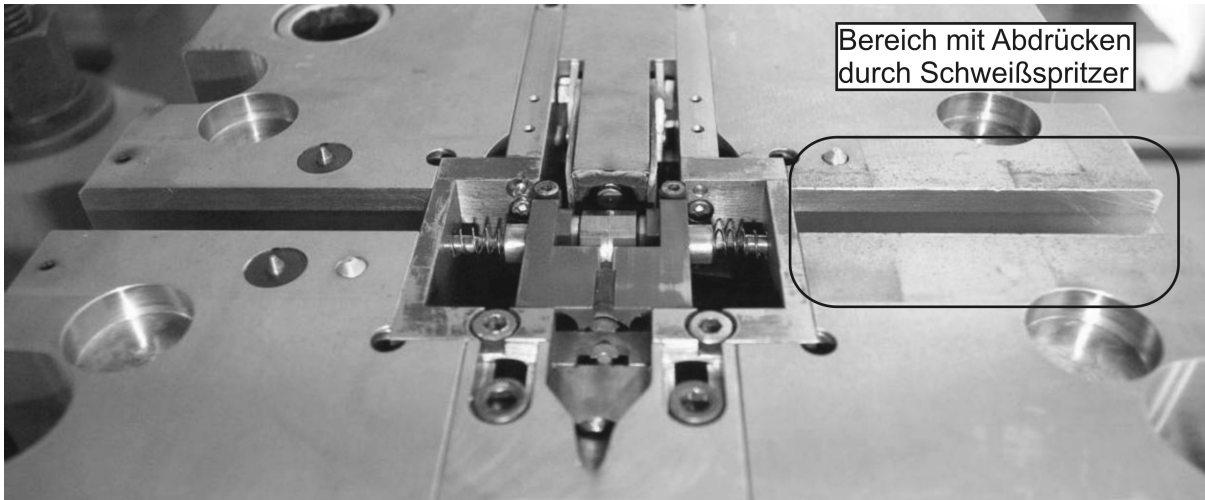


Bild 6.3: Abdrücke auf dem Niederhalter nach 1.000 Schweißungen

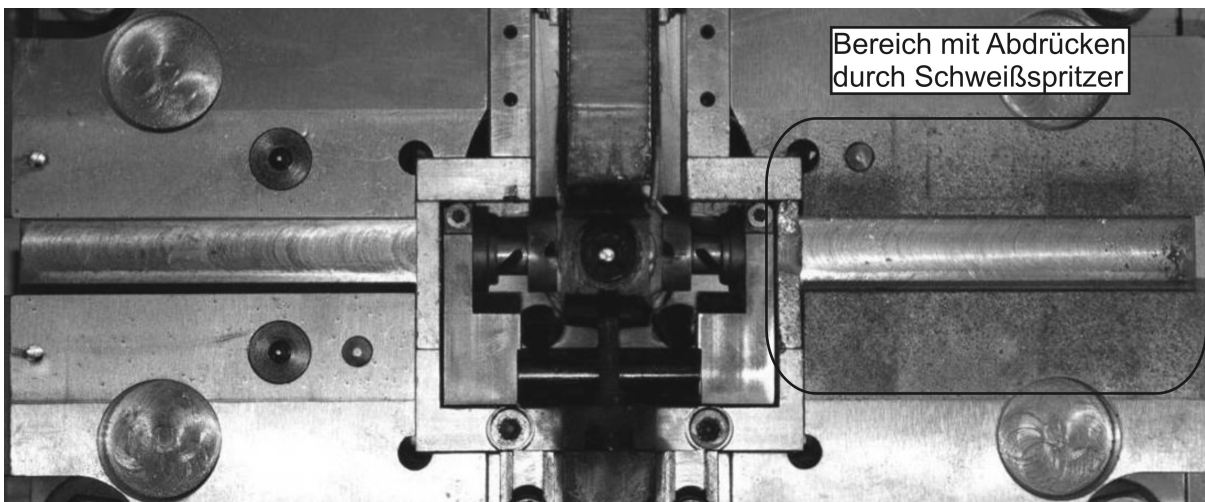


Bild 6.4: Abdrücke auf dem Niederhalter nach 8.000 Schweißungen

Wie an den Spuren auf der Oberfläche der Niederhalterplatte zu erkennen ist, werden die Verunreinigungen nahezu ausschließlich auf dem Blech in Vorschubrichtung mitgezogen. Abdrücke von Metallpartikeln in dem Fügeprozess vorangehenden Bearbeitungsschritten traten in den Versuchen ausschließlich bei Schweißungen auf, bei denen die Absaugung deaktiviert oder die Abschirmung nicht korrekt positioniert war.

Um derartige Schäden zu vermeiden, sollte bei nachfolgenden Bearbeitungsstufen der Niederhalter im Schweißbereich freigehalten werden, so dass an diesen Stellen kein Kontakt zum Blech erfolgt. Mit Rücksicht auf das Risiko durch im Werkzeug verbleibende Reste von Schweißspritzern ist die Positionierung der Schweißstufe nahe dem Ende des Blechbearbeitungsprozesses vorteilhaft.

Für den Umgang mit entstehenden Spritzern werden zusammenfassend folgenden Maßnahmen vorgeschlagen:

- Enge Abschirmung des Schweißbereiches insbesondere auf der Fügeebene
- Installation einer leistungsstarken Absaugung
- Strömungsmechanisch günstige Gestaltung des Schweißraumes
- Vermeidung scharfer Kanten im Umfeld des Schweißprozesses
- Verwendung von nicht-ferromagnetischem Material von Werkzeug- und Zuführkomponenten im Schweißbereich wie Kunststoff oder austenitischem CrNi-Stahl
- Dünne gleichmäßige Beölung der Blechoberfläche mit leicht flüchtigem Öl
- Reduzierung der Haftneigung von Schweißspritzern auf Werkzeugteilen
- Abdichtung von Führungen bewegter Komponenten z. B. durch Bürsten oder Faltenbalge
- Vermeidung von einem Werkzeugkontakt im Schweißbereich des Werkstückes nach dem Fügeprozess

6.2 Risiken bei der Bolzenzuführung

Die Zuverlässigkeit der Zuführung der Fügeelemente spielt in der Praxis für den wirtschaftlichen Betrieb eines Werkzeuges mit integriertem Fügeverfahren eine wesentliche Rolle. Die Zuführmechanik stellt bei vielen Anwendungen werkzeugintegrierter Fügemethoden eine primäre Fehlerquelle dar und ist oftmals entscheidend für die erreichbare Taktrate.

Das entwickelte und beschriebene Zuführkonzept hat sich für das integrierte Bolzenschweißen in den Versuchen als störungssicher und robust erwiesen. Ein Risiko der mechanischen Beschädigung der Zuführmechanik tritt auf, wenn das Werkzeug beim Schließen, beispielsweise aufgrund eines Fehlers beim Blechvorschub, auf einen bereits gefügten Bolzen trifft (Bild 6.5). Trotz optischer Abfrage des Blechvorschubs kann ein derartiger Fehler z. B. im Fall eines späteren Zurückrutschens des Blechstreifens nicht verhindert werden. Durch eine geeignete Gestaltung der mechanischen Komponenten der Zuführung konnten derartige Störungen im Einzelfall ertragen werden und führten zu keinen wesentlichen Werkzeugschäden.

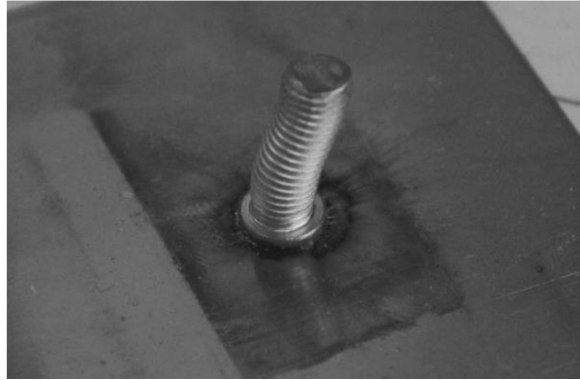
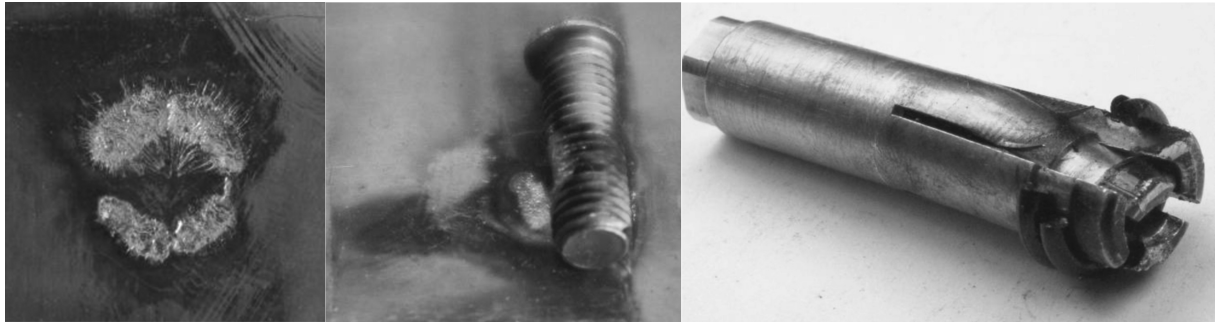


Bild 6.5: Gestauchter Bolzen aufgrund eines Fehlers beim Blechvorschub

Als ausschlaggebend für die erforderlichen Reinigungsintervalle der Zuführmechanik zeigte sich insbesondere der verwendete Schmierstoff. Durch Öle werden Oxidationsrückstände vom Schmierfilm gebunden, wodurch die Reibwerte der Gleitführungen sowie ihr Verschleiß erhöht werden. Gleiche Effekte waren bei der Verarbeitung von stark ölbenetztem Blech aufgrund von Verspritzen des Öles zu beobachten. Bei Verwendung des Trockenschmierstoffes Grafit zeigte die Mechanik eine deutlich geringere Neigung zur Verschmutzung und funktionierte über mehrere tausend Schweißungen störungsfrei. Beeinträchtigungen des Schweißprozesses durch das in geringen Mengen und in einem Abstand von einigen Zentimetern von der Schweißstelle eingesetzte Grafit konnten nicht festgestellt werden.

Um eine korrekte Zuführung der Fügelemente in den Schweißkopf sicherzustellen ist eine Abfrage der korrekten Positionierung der Bolzen in der Zuführmechanik erforderlich. Sollte ein Schweißprozess ohne eingeführtes Fügeelement ausgelöst werden, führt dies zum Aufschweißen des Bolzenhalters auf das Blech und anschließendem Abreißen, wobei der Bolzenhalter beschädigt wird (Bild 6.6 a). Gründe für ein im Bolzenhalter fehlendes Fügeelement können ein Ausbleiben des pneumatischen Einschusses, nicht korrekte Justage der Zuführmechanik oder Deformationen am Bolzenhalter sowie Formabweichungen des Fügeelementes sein. Durch Verringerung des dynamischen Anteiles des Federvorspannweges kann diese mögliche Prozessstörung konstruktiv ausgeschlossen werden.

Sofern ein Bolzen zwar zugeführt aber nicht in den Bolzenhalter gesteckt werden kann, wird dieser quer unter dem Bolzenhalter eingeklemmt oder bleibt undefiniert im Schweißbereich liegen. Wenn der Bolzen dabei zum Zeitpunkt der Zündung Kontakt zum Bolzenhalter hat, zeigte er i. d. R. Schweißspuren und bleibt quer auf dem Blech haften (Bild 6.6 b). Wenn kein Kontakt bestand, wird bei Zündung der Bolzenhalter aufgeschweißt. In diesen Fällen erkennt die Schweißüberwachung aufgrund der stark anweichenden Messwerte einen fehlerhaften Prozess. Im Falle eines Verklemmens des Bolzens unter dem Bolzenhalter wurde der mechanische Endtaster am Wegsensor betätigt und die Stößelbewegung unterbrochen. Aufgrund der hohen Federkraft kann der Bolzenhalter dabei deutlich deformiert werden (Bild 6.6 c).



a) Schweißspur des Bolzenhalters bei fehlendem Bolzen

b) Fehlerhaft zugeführter Bolzen mit Kontakt zum Bolzenhalter

c) Aufgrund einer fehlerhaften Zuführung beschädigter Bolzenhalter

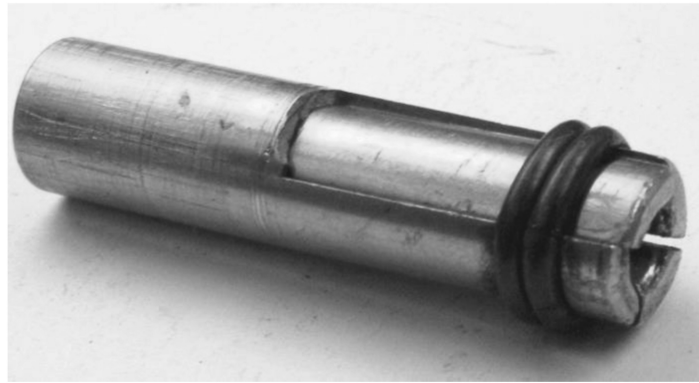
Bild 6.6: Auswirkungen von Fehlern bei der Bolzenzuführung

Im Vergleich zur konventionellen automatischen Zuführung von oben nach dem Durchsteckprinzip in den Bolzenhalter hinein oder zum manuellen feinfühligem Einstecken bei Handpistolen, stellt das entwickelte mechanisierte Einstecken in den Bolzenhalter eine erhöhte Belastung für den Bolzenhalter dar. Grund dafür ist die für dieses Einsteckprinzip ungünstige Geometrie der verwendeten nach DIN EN ISO 13918 genormten Bolzen [DIN13918]. Normbolzen verfügen an ihrem oberen Ende nicht über eine Einführungshilfe und weisen zudem häufig durch den Gewindewalzprozess fertigungsbedingt einen scharfkantigen Grat an ihrer oberen Kante auf.

Diese Faktoren können beim automatisierten Einstecken auch bei exakter Justierung der Mechanik zu höheren Belastungen durch größere elastische Aufweitung der Spannzange und verstärktem Reibverschleiß führen. Um das Einstecken zu erleichtern wurden die verwendeten und von den Handpistolen übernommenen Bolzenhalter durch eine vergrößerte Aufnahme fase angepasst. Abrieb insbesondere durch das Gewinde und die schwellende elastische Beanspruchung führen zu einer langsamen Reduzierung der Klemmkraft und zur Erhöhung des Kontaktwiderstandes. Bei zu hohem Kontaktwiderstand kommt es zur Bildung von Nebenlichtbögen zwischen dem Bolzenhalter und dem Bolzengewinde, wodurch das Bolzengewinde durch Schweißspuren beschädigt wird (Bild 6.7 a). Diese Veränderungen sind vor allem durch zusätzliche Spitzen im Spannungsverlauf mit Hilfe der Schweißüberwachung deutlich erkennbar (siehe Kap. 5.6.7). Aber auch bei noch ausreichender Klemmkraft ist ein plötzlicher Ermüdungsbruch eines Zangenelementes möglich und trat aufgrund ungünstiger Kerbwirkung in einem Fall nach wenigen hundert Schweißungen auf (Bild 6.7 b). Die in den Versuchen maximal erreichte Standmenge eines Bolzenhalters betrug etwa 3.000 Schweißungen.



a) Schweißspuren durch Nebenlichtbögen



b) Bolzenhalter mit Ermüdungsbruch eines Segmentes der Spannzange

Bild 6.7: Auswirkungen bei Verschleiß des Bolzenhalters

Um die Standmenge des Bolzenhalters zu erhöhen sollte sowohl die Gestalt der Fügeelemente als auch die Konstruktion des Bolzenhalters angepasst werden. Neben ausgeprägten Einführungsfasen an den Bolzen sowie am Bolzenhalter ist für den Bolzenhalter die Verwendung eines festeren Werkstoffes, z. B. eines Kupfer-Wolfram-Verbundwerkstoffes oder einer Kupfer-Beryllium-Legierung, wie sie zum Teil für automatisierte Anwendungen bereits eingesetzt werden, zu empfehlen. Die Verwendung eines aktiven Klemmmechanismus kann gegenüber der passiven elastischen Klemmung ein widerstandsfreies Einstecken und eine stets ausreichende Klemmkraft sicherstellen. Um ein sicheres Einstecken des Bolzens und eine hohe Positionierungsgenauigkeit zu erreichen, sind neben einer steifen spielarmen Werkzeugführung Möglichkeiten zur Justierung des Schweißkopfes und der Zuführmechanik empfehlenswert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Wirtschaftlichkeit der Fertigung von Blechteilen hängt in besonderem Maße ab von dem Grad der Automatisierung der Prozesskette und damit von den innerhalb der Werkzeuge beherrschbaren Prozessen. Oftmals sind an Blechteilen Gewindebolzen oder andere zylindrische Fügeelemente erforderlich. Dazu ist das Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung aufgrund des geringen Energieeintrages, der hohen Produktivität und der nur einseitig erforderlichen Zugänglichkeit verbunden mit nur geringen Fügekräften häufig das Verfahren der Wahl. Bisher wird dieses Schweißverfahren auf separaten Anlagen und meist an bereits vereinzelt Blechteilen ausgeführt. Eine Integration von Fügeprozessen in Stanz- und Umformwerkzeuge führt durch den Wegfall von Handhabungsschritten und vereinfachter Logistik der Blechteile zu einer Verkürzung der Prozesskette. Neben einer Reduzierung der Fertigungskosten sowie der Durchlaufzeit werden aufgrund der stabilen Bedingungen im Werkzeug die Prozessstabilität und Positionsgenauigkeit des Fügeelementes verbessert. Während sich Lösungen zur Integration von umformtechnischen Füge- sowie von Widerstandsschweißverfahren in Werkzeuge industriell etabliert haben, besteht bezüglich des Lichtbogenbolzenschweißens Entwicklungsbedarf. Dabei stellen der Umgang mit Schweißspritzern, die erreichbare Prozessqualität und eine geeignete Zuführtechnik wichtige Fragestellungen dar.

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Integration des Lichtbogenbolzenschweißens mit Spitzenzündung im Kontaktverfahren in Blechbearbeitungswerkzeuge dargestellt. Die modular aufgebaute Schweißstufe besteht aus einem im Oberwerkzeug montierten Schweißkopf und einer neuartigen im Blechniederhalter installierten Zuführmechanik. Die entwickelte Schweißstufe wurde in ein Folgeverbundwerkzeug integriert und automatisiert betrieben. Während des Schweißprozesses wird das Werkzeug durch eine enge Abschirmung des Schweißbereiches vor Verschmutzung geschützt. Emissionen wie Schweißspritzer und Rauch werden während des Fügeprozesses durch eine gesteuerte Absaugung direkt an der Schweißstelle entfernt.

Die Versuchsanlage wurde mit etwa 20 Hub/min betrieben. Geschweißt wurden genormte Gewindebolzen der Abmessung M5 x 16 mm in Wannelage auf vorwiegend 1,0 mm dickes Stahlblech aus DC 04. Der Schweißprozess wurde anhand der Stromstärke, der Lichtbogen Spannung sowie der Bolzenbewegung überwacht und ausgewertet. Aufgrund der geringen bewegten Masse des entwickelten Schweißkopfes und einer vergleichsweise hohen Aufsetzkraft konnten Auftreffgeschwindigkeiten bis zu 1.100 mm/s und eine Lichtbogenbrenndauer zwischen 1 und 2 ms mit guten Schweißergebnissen realisiert werden.

Um eine für die entwickelte Anlage geeignete Einstellung mit hoher Fügequalität und geringer Spritzerbildung zu ermitteln, wurden in Versuchen zunächst relevante Prozessparameter wie die Schweißenergie und die Aufsetzkraft systematisch variiert. Die Schweißqualität wurde anhand von Sicht-, Biege und Ausknöpfprüfungen sowie

Schliffuntersuchungen beurteilt. Mit einer Kondensatorkapazität von 66 mF wurden in einem vergleichsweise großen Ladespannungsbereich zwischen 120 und 150 V maximale Tragfähigkeiten der Schweißungen bei guter Wiederholbarkeit erzielt.

Im automatisierten Serienbetrieb wurden die Prozessstabilität und die Tragfähigkeit der Schweißergebnisse analysiert. Eine statistische Gesamtauswertung der Schweißparameter Lichtbogenbrenndauer, eingetragene Schweißenergie, maximale Schweißstromstärke, Lichtbogen Spannung, Eintauchtiefe und Auftreffgeschwindigkeit bestätigt die gute Wiederholbarkeit des Prozesses. Die Variationskoeffizienten betragen für die untersuchten Schweißparameter zwischen 0,04 und 0,07 und zeigen damit eine vergleichsweise geringe Streuung, wobei die mechanischen Parameter stärker variieren als die elektrischen. Der Schweißprozess zeichnet sich insbesondere aus durch nahezu deckungsgleiche Spannungsverläufe während der Lichtbogenzündung, eine hohe Eintauchgeschwindigkeit und eine geringe Streuung der Eintauchtiefe. Die generell gute Schweißqualität mit Fügequerschnitten deutlich über dem Nennmaß der Bolzen wird auch durch vereinzelte kleine Bindefehler wie Lunker und Poren, die für das Verfahren typisch sind, nicht gestört. Blaswirkungen auf den Lichtbogen traten nicht auf.

Ausgehend von den Bedingungen im Serienversuch wurden praxisrelevante Störgrößen während des automatischen Betriebes eingebracht, um die Robustheit des Prozesses zu untersuchen. Analysiert wurden Störungen wie die Unterbrechung eines Massekontaktes, Öl- und Wasserbenetzung der Blechoberfläche, Fehler bei der Absaugung, eine reduzierte Zündspitzenlänge sowie das Schweißen legierter Bolzen mit Bolzenhaltern in unterschiedlichen Verschleißzuständen. Der Schweißprozess zeigte sich dabei bezüglich der erreichten Fügequalität als ausgesprochen robust. Lediglich die Änderung der Zündspitzenlänge und eine starke Ölbenetzung führten zu einer erheblichen Verschlechterung der Fügequalität. Korrelationen der untersuchten Störgrößen mit charakteristischen Änderungen der aufgezeichneten Prozessparameter konnten mit Hilfe der um die Messung der Bolzenbewegung erweiterten Schweißüberwachung erkannt werden.

Durch die im Vergleich zu üblichen Schweißstationen hohe Steifigkeit des Werkzeuges werden relativ hohe Positions- und Orientierungsgenauigkeiten erreicht. Die Standardabweichungen innerhalb der Messreihen betragen deutlich unter $\pm 0,05$ mm bezüglich der Lage und $\pm 0,5^\circ$ bezüglich des Winkels.

Um die Vorteile der Prozessintegration industriell nutzen zu können, sollten weitergehende Untersuchungen das Ziel verfolgen, die Auswirkungen entstehender Spritzer auf das Werkzeug weiter zu reduzieren und die Taktrate zu erhöhen. Es sollten eine hohe Oberflächenqualität der Blechteile sowie eine wirtschaftliche Werkzeugstandzeit sichergestellt werden. Ansätze dazu sind beispielsweise die Reduzierung der Haftneigung auf Werkzeugoberflächen, der Einsatz von Schutzgasen sowie geeigneter Schmierstoffe und die Optimierung der Absaugung. Um die Zuführung zu vereinfachen und unabhängig von der Pressenbewegung auszuführen, bieten sich eine aktive Bolzenklemmung und der Einsatz elektrischer Servoantriebe an.

8 Quellenverzeichnis

- [Arb99] Arbuckle, H. J.: Progressing to In-Die Welding. In: MetalForming Magazin (online Archiv). Stand: April 1999. URL: <http://archive.metalfformingmagazine.com/1999/04/tooling/progress/GR.htm> (abgerufen am 11.05.2009).
- [Arn80] Arnhold, H.-J.: Stand des Lichtbogenschweißens im Ingenieurbau. In: Schweissen und Schneiden, DVS-Verlag Bd. 32 (1980) H. 12, S. 496-501.
- [Arn95] Arnhold, H.-J.: Zündverhalten des nichtrostenden Stahles 1.4301 beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. In: Stahl und Eisen (1995) H. 1, S. 49-51.
- [ASG07] Arnold & Shinjo GmbH & CO. KG: Innovative Problemlösungen. Firmenschrift, Dörzbach 2007.
- [Bak77] Bakardjev, V.; Doiniv, E.; Doitschinov, E.: Bolzenschweißen nach dem Kondensatorentladungsverfahren. In: ZIS-Mitteilungen (1977) H. 3, S. 399-404.
- [Ban89] Banck, H.: Wenn´s bläst, wird´s unangenehm!. In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 41 (1989) H. 1, S. 10-15.
- [Bec85] Beckert, M.; Neuhauer, A.: Aspekte und Entwicklungstendenzen zur Prozessintegration in der Umform- und Fügetechnik. In: Fertigungstechnik und Betrieb Bd. 35 (1985) H. 4, S. 198-202.
- [Beh11] Behrens, B.-A; Nickel, R.; Gruß, D.; Jenicek, A.: Stud Welding within Sheet Metal Working Tools. In: Production Engineering - Research and Development (WGP), Springer (2011) DOI 10.1007/s11740-011-0304-3.
- [BIH07] Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH & Co. KG: Zweite Technologiemesse BihlerTEC 2007 - „Herausforderungen meistern“ in Umform-, Montage- und Schweißtechnik. In: VDI-Z Bd. 149 (2007) H. 11/12, S. 28-29.
- [BIH08] Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH & Co. KG: MSS Mutternschweißsystem. Firmenschrift, Halblech 2008.
- [Bra85] Braeulich, H.; Hitschke, J.: Umformen und Schweißen in einer Transferlinie. In: Fertigungstechnik und Betrieb Bd. 35 (1985) H. 5, S. 285-287.
- [CLO02] Carl Cloos Schweißtechnik GmbH: Roboter-Schweißzellen fertigen hochwertige Gehäuseteile. In: VDI-Z (2002) Special Blechbearbeitung S. 38-40.
- [CON10] conntronic Prozess- und Automatisierungstechnik GmbH: Technische Information für den Detailsuchenden - CD-Schweißen. URL: <http://www.conntronic.com/download/ppp-cd-schweissen.pdf> (abgerufen am 23.07.2010).
- [CPL73] Patent DE 000001615170 C (01.02.1973), Crompton Parkinson Ltd.: Anordnung zur Beschickung eines Spannkopfes eines Lichtbogenschweißgerätes mit Bolzen.
- [Die78] Dienst, H.: Die Lichtbogenbolzenschweißverfahren. In: TAB Bd. 40 (1978) H. 7, S. 589-592.

- [Die79] Dienst, H.: Lichtbogenbolzenschweißen – nicht ganz ohne Probleme. In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 31 (1979) H. 10, S. 282-284.
- [DIN13918] DIN EN ISO 13918: Bolzen und Keramikringe zum Lichtbogenbolzenschweißen, Oktober 2008.
- [DIN14555] DIN EN ISO 14555: Schweißen - Lichtbogenbolzenschweißen von metallischen Werkstoffen, Dezember 2006.
- [DIN4063] DIN EN ISO 4063: Schweißen und verwandte Prozesse - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern, März 2010.
- [DIN60812] DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA), November 2006.
- [DIN6947] DIN EN ISO 6947: Schweißnähte - Arbeitspositionen - Definition der Winkel von Neigung und Drehung, Juni 2009.
- [Dor97] Dorner, R.: Bolzenschweißen dünnwandiger Teile: Zündende Ideen. In: SMM (1997) H. 28, S. 26-28.
- [DVS0712] Merkblatt DVS 0712: Anwendung von DIN EN 729 über die Qualitätsanforderungen beim Schmelzschweißen, Juli 1994.
- [DVS0901] Merkblatt DVS 0901: Bolzenschweißen für Metalle - Übersicht, Dezember 1998.
- [DVS0903] Merkblatt DVS 0903: Kondensatorentladungsschweißen mit Spitzenzündung, Dezember 2000.
- [DVS0904] Merkblatt DVS 0904: Hinweise für die Praxis – Lichtbogenbolzenschweißen, Dezember 2000.
- [Ehl85] Ehl, R.; Binding, J.: Verfahrensintegration in der Blechbearbeitung. In: VDI-Z Bd. 127 (1985) H. 17, S. 687-690.
- [Ehm02] Ehmer, M. (Mercer Management Consulting GmbH): Automobiltechnologie 2010 – Technologische Veränderungen im Automobil und deren Konsequenzen für Automobilhersteller, Zulieferer und Ausrüster. Vortrag am 24.09.2002, Stuttgart 2002.
- [Eic71] Eichhorn, F.; Schaefer, R.: Grundlegende Untersuchungen zum Bolzenschweißen mit Kondensatorentladungsenergie. In: Schweissen und Schneiden Bd. 23 (1971) H. 1, S. 8-12.
- [Fah09] Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V.: Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 3. Aufl., Vieweg+Teubner, 2009.

- [FMA06] FMA Communications Inc.: In-die welding system welds nuts, screws at up to 60 SPM. In: thefabricator.com (online Archiv). Stand: 12. September 2006. URL: <http://www.thefabricator.com/product/toolanddie/in-die-welding-system-welds-nuts-screws-at-up-to-60-spm> (abgerufen am 11.05.2009).
- [Fra99] Franz, U., et al.: Prozessführung und Qualität beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. In: DVS-Berichte, Bd. 204 (1999) S. 243-248.
- [Fri81] Frings, A.; Stoeckel, S.: Zum Lichtbogenbolzenschweißen an feuerverzinkten Stahlfeinblechen. In: Thyssen Technische Berichte (1981) H. 1, S. 25-40.
- [Fue06] Füssel, U.: Dichtsysteme für mechanische Fügeelemente mit Vorlochoperation, EFB-Forschungsbericht Nr. 261, EFB, Hannover 2006.
- [Gau97] Gauger, W.: Prozeßkontrolle beim Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung - Erfahrungen aus der Praxis. Seminarunterlagen, 1997.
- [GOE10a] Dr. Josef Gödde Schweissüberwachungen: Qualitätsüberwachung beim Bolzenschweißen mit STUD-DI. URL: <http://www.schweissqualität.de> (abgerufen am 16.07.2010).
- [GOE10b] Gödde, J.: Qualitätsaudit in der Automobilzulieferindustrie, Dr. Josef Gödde Schweissüberwachungen, unveröffentlichter Bericht, Greifenstein-Nendenroth 2010.
- [Gra53] Patent DE 867418 (08.01.1953), Graham, H. J.: Verfahren und Vorrichtung zum Schweißen.
- [Gra77] Graßmugg, K. R.: Lichtbogenschweißen mit Spitzenzündung nach dem Gap- oder Kontaktverfahren. Begriffe, Vorgänge und Charakteristiken. In: Technische Rundschau Bern Bd. 69 (1977) H. 38, S. 2-3.
- [Gri86] Grigull, U. (Hrsg.); Sander, H.: Wärmeleitung. Springer-Verlag, 1986.
- [Gru02] Grundler, E.: Hightech sichert konkurrenzfähige Teilekosten. In: VDI-Z (2002) H. 10, S. 32-33.
- [Gru08] Gruß, D.; Lau, P.: Bolzenschweißen im Folgeverbundwerkzeug. Stand: 15. April 2008. URL: http://www.utfscience.de/pdf/70624_UT-08-01_004xx0108ut.pdf (abgerufen am 01.11.2011).
- [Gru09] Gruß, D.; Cramer, H.: Integration und Überwachung des Schweißens von Normteilen in Blech-Verbundwerkzeuge. EFB-Forschungsbericht Nr. 302, EFB, Hannover 2009.
- [Gru10a] Gruß, D.; Kache, H.; Nickel, R.: Blechumformwerkzeuge mit integrierter Bolzenschweißoperation verkürzen Prozessketten. In: intelligenter produzieren, VDMA Verlag (2010) H. 1, S. 36-38.
- [Gru10b] Gruß, D.; Kache, H.; Nickel, R.; Behrens, B.-A.; Jenicek, A.; Cramer, H.: Bolzenschweißen in Folgeverbundwerkzeugen. In: Schweißen und Schneiden, DVS-Verlag Bd. 62 (2010) H. 6, S. 322-326.

- [Gru10c] Gruß, D.; Nickel, R.; Behrens, B.-A.: Integration and Control of Arc Stud Welding in Sheet Metal Tools. In: steel research international, Proceedings of the 13th International Conference on Metal Forming 2010 Vol. 81 (2010) No. 9, pp. 1152-1155.
- [Gru10d] Gruß, D.; Kache, H.; Nickel, R.; Behrens, B.-A.; Jenicek, A.; Cramer, H.: Integration of stud welding in sheet metal working tools. In: Welding And Cutting Vol. 9 (2010) No. 5, pp. 313-318.
- [Gru11] Offenlegungsschrift DE 102009050241 A1 (26.05.2011), Gruß, D.: Vorrichtung zum Drehen und Ausrichten eines Gegenstandes.
- [Hah81] Hahn, O.; Schmitt, K. G.: Prozessbegleitende Qualitätskontrolle beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. In: DVS Berichte, Bd. 73 (1981), S. 38-42.
- [Hah82] Hahn, O.; Schmitt, K. G.: Untersuchung von Einflussgrößen beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. In: Schweißen und Schneiden, DVS-Verlag Bd. 34 (1982) H. 11, S. 521-524.
- [Hah88] Patent EP 0100787 B1 (07.01.1988), Hahn, O.: Verfahren und Vorrichtung für optimale Bolzenschweißung mit Spitzenzündung.
- [Hah99] Hahn, O.: Kennwertermittlung an selbststanzenden Funktionselementen sowie Niet-/ Einpreßmuttern und Bolzen, EFB-Forschungsbericht Nr. 143, EFB, Hannover 1999.
- [HBS95] Patent DE 4427370 C1 (02.11.1995), HBS Bolzenschweiß-Systeme GmbH & Co. KG: Vorrichtung zum Anschweißen von Metallbolzen an einem Werkstück.
- [Hee02] Heesen, N., v.; Koglin, K.: Einsatz des Lichtbogenschweißens im Aluminium-Karosseriebau. In: DVS-Berichte Bd. 50 (2002) S. 262-266.
- [Hel01] Hellwig, W: Spanlose Fertigung – Stanzen, 7. Aufl., Vieweg Verlag, Wiesbaden 2001.
- [Hes00] Hesse, S.: Rationalisierung der Kleinteilezuführung - Ordnen, sortieren, prüfen und Zuführen. Blue Digest on Automation, 2000.
- [Hes95] Hesse, S.: Atlas der modernen Handhabungstechnik. Vieweg Verlag, Wiesbaden 1995.
- [Hil85] Hilgenböcker, H.: Methodische Entwicklung von Zuführsystemen. Fortschritt-Berichte VDI, Düsseldorf 1985.
- [Idl08] Idler, T.: Blechverbindungen - Systemgedanke senkt Kosten und sichert Qualität bei Blechverbindungen. In: blechnet.com (online Archiv) Stand: 13.Oktober 2008. URL: <http://www.blechnet.com/themen/trenntechnik-verbindingstechnik/articles/148798/> (abgerufen am 01.11.2011).

- [IEK87] Patent DE 3716195 C2 (14.09.1989), Institut elektrosvaki imeni E.O. Patona Akademii Nauk Ukrainskoj SSR, Kiew: Verfahren zum Lichtbogen-Perkussionsschweißen von Bolzen.
- [Ill70] Ille, H.-J.: Bolzenschweißen nach dem Kondensatorentladungsprinzip an kunststoffbeschichteten Blechen. In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 22 (1970) H. 8, S. 192-193.
- [Jen02] Jenicek, A.; Cramer, H.: Stand und Zukunftsaussichten der Sonderschweißverfahren Teil 2: Bolzenschweißen. In: Schweißen und Schneiden, DVS-Verlag Bd. 54 (2002) H. 11, S. 650-658.
- [Kil97] Killing, R: Kompendium der Schweißtechnik. DVS-Verlag, Düsseldorf 1997.
- [Kli03] Klier, R.: Das MARC-Bolzenschweißen. Schweißverfahren - Teil 3. In: Bänder Bleche Rohre Bd. 44 (2003) H. 4, S. 22-23.
- [Kli07a] Klier, R.: Lichtbogenbolzenschweißen - Teil 1: Verfahren und Anwendungsbeispiele. In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 59 (2007) H. 11, S. 346-354.
- [Kli07b] Klier, R.: Lichtbogenbolzenschweißen - Teil 2: Einflussgrößen und ihre Auswirkungen auf das Fügeergebnis. In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 59 (2007) H. 12, S. 386-390.
- [KOE10a] Köster & Co. GmbH: Bolzenschweißen in Übereinstimmung mit DIN EN ISO 14555. Stand: 08. Januar 2003. URL: <http://www.bolzenschweisstechnik.de/de/downloadcenter> (abgerufen am 26.07.2010).
- [KOE10b] Köster & Co. GmbH: Lichtbogenschweißen - zuverlässig auch bei dünnen beschichteten Blechen?. Stand: 13. Februar 2003. URL: <http://www.bolzenschweisstechnik.de/de/downloadcenter> (abgerufen am 26.07.2010).
- [Kre08] Kren L. A.: Why Choose In-Die Welding? In: MetalForming (2008) Vol. 9, pp. 58-60.
- [Kur08] Kurz, R: Das Weldfast-Verfahren fügt Anbauhalter ohne Flansch an die Karosserie. In: maschinenmarkt (online Archiv). Stand: 10. April 2008. URL: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/verbindungstechnik/articles/117167/> (abgerufen am 24.06.2010).
- [Lau02] Lauenroth, T.: Prozessanalyse zum Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung, Dissertation, TU Clausthal, 2002.
- [Lau08] Lau, P.; Gruß, D.: Bolzenschweißen im Folgeverbundwerkzeug. In: Blech Rohre Profile, Meisenbach Verlag, 55. Jg. (2008) H. 3, S. 12.
- [Mat08] Matthes, K.-J.; Richter, E. (Hrsg.): Schweißtechnik - Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, 4. Aufl., Hanser Verlag, 2008.
- [MAT92] Patent DE 4032572 C1 (23.04.1992), Matuschek Messtechnik GmbH: Verfahren und Vorrichtung für die Qualitätsbeurteilung einer Lichtbogenbolzenschweißung mit Spitzenzündung.

- [Nen97] Nentwig, A.; Hirschmüller, F.: Blechschweißen mit Hubzündung: Ein neues Schweißverfahren zum Fügen von nichtkreisförmigen Stahlblechteilen. In: Dünnblechverarbeitung (1997) S. 167-179.
- [Neu03] Neubauer, H.: Integration von Schweißvorgängen im Folgeverbundwerkzeug, VIA-Forschungsbericht Nr. 167, IFU, Lüdenscheid 2003.
- [Nic10] Nickel, R.; Behrens, B.-A.; Gruß, D.; Krause, A.: Bolzenschweißen in Umformwerkzeugen. In: Bauteile der Zukunft - Methoden und Prozesse. Tagungsband EFB-Kolloquium 2010, S. 467-483.
- [NN10] Mündliche Aussage von Experten.
- [NN91] N. N.: Rationeller Trend in der Verbindungstechnik – Bolzenschweißen. In: MAV (1994) H. 1-2, S. 60-61.
- [OBO01] Patent DE 4236526 C2 (08.11.2001), OBO Bettermann oHG: Verfahren zum Anschweißen von Schweißbolzen an ein Werkstück.
- [OBO92] Patent DE 4124511 C1 (10.12.1992), OBO Bettermann oHG: Verfahren zur Überwachung des Schweißvorgangs beim automatisierten Bolzenschweißen.
- [OCO10] Ocon Automated Systems S. L.: In-Die Welding Works. URL: http://www.oconik.com/eng_home.htm (abgerufen am 17.05.2010).
- [Pah05] Pahl, G. et al.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. 6.Aufl., Springer-Verlag, 2005.
- [Pau10] Paul, S.: Umformtechnik: Wirtschaftliches Umformen durch Integration von Folgeprozessen. In: blechnet.com (online Archiv). Stand: 06. September 2010. URL: <http://www.blechnet.com/index.cfm?pid=2907&pk=280698> (abgerufen am 06.09.2010).
- [Pen02] Pennington, W.; Armock, D.; Lawrence, J.: Job Shop Tackles In-Die Welding. In: MetalForming Magazin (online Archiv). Stand: 01. April 2002. URL: <http://archive.metalfomingmagazine.com/2002/04/GRSpring.pdf> (abgerufen am 11.05.2009).
- [Poh10] Pohl, A.: Verbindungselemente im Stanzautomaten – Beispiellösungen -. In: Fertigfallende Baugruppen im Stanzprozess mit hoher Wertschöpfung, Seminar Nr. 2410 (25.11.2010), IFU, Lüdenscheid 2010.
- [Ret98] Retzlaff, G.; Neubert, B.: Bolzenschweißen erhöht die Wirtschaftlichkeit – Montagehilfen für den Behälter- und Anlagenbau. In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 50 (1998) H. 7, S. 232-234.
- [RIF03] RIFAST Systems GmbH + Co. KG: Fügekosten dramatisch reduzieren - Kombinierte Stanz-/ Einpressverfahren für Schrauben oder Muttern in Blechformteilen. Firmenschrift, Schwabach 2003.

- [Ros89] Rostek, W.: Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Einstellparametern, der Lichtbogenbrennzeit und der Bruchkraft beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. In: Schweißen und Schneiden, DVS-Verlag Bd. 41 (1989) H. 8, S. 388-391.
- [RUE04] Oskar RÜEGG AG: Kombi-Transferwerkzeuge machen's möglich: Je höher die Technologie, desto tiefer die Teilekosten. Stand: 10. Februar 2004. URL: <http://www.oskar-ruegg.ch/news/doppelpunkt8.pdf> (abgerufen am 17.05.2010).
- [Rug93] Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik, Bd. 2: Verfahren und Fertigung. Springer-Verlag, 1993.
- [Rut03] Ruthenberg, R.: Verbindungskosten reduzieren. In: Blech Rohre Profile Bd. 50 (2003) H. 4, S. 36-41.
- [Sch08] Schmitt, K. G.: Bolzenschweißen - Wechselstrom-Energiequelle verbindet Aluminium-Bolzen mit Aluminiumbauteilen. Stand: April 2008. URL: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/verbindungstechnik/schweissen/articles/136010/> (abgerufen am 16.07.2008).
- [Sch83] Schmitt, K. G.: Untersuchungen zur Prozessanalyse und prozessbegleitenden Qualitätskontrolle beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. Dissertation, Universität-Gesamthochschule-Paderborn, 1983.
- [Sch89] Schmitt, K. G.: Operational and technological limits inherent to short duration stud welding. DVS-Verlag, 1989.
- [Scl10] Schulze, J.: Bolzen - Eine Alternative zu herkömmlichen Schweißverfahren. In: konstruktionspraxis (online Archiv). Stand: 24. September 2010. URL: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/fileserver/pdfarticles/kopra/themen/verbindungstechnik/schrauben/articles/283731/283731.pdf> (abgerufen am 24.09.2010).
- [Scm10] Schumann, U.: Flexibilitätssteigerung durch prozessintegriertes Gewindeformen. In: blechnet (online Archiv). Stand: 15.03.2010. URL: <http://www.blechnet.com/themen/stanzen/articles/254925/> (abgerufen am 01.11.2011).
- [SLV02] SLV München, NL der GSI mbH: Einseitiges Widerstandsschweißen an Stahl-Hohlprofilen, SLV-Forschungsbericht Nr. 5123, SLV, München 2002.
- [SLV03] SLV München, NL der GSI mbH: Verbesserung der Schweißqualität beim Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung von Stahl- und Aluminiumwerkstoffen, SLV-Forschungsbericht Nr. 5118, SLV, München 2003.
- [SLV04] SLV München, NL der GSI mbH: Bolzenschweißen an beschichteten Blechen, SLV-Forschungsbericht Nr. 5132, SLV, München 2004.

- [SOY10] Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH: Produktinformation 2010. Firmenschrift, Wörthsee-Ettersschlag 2010.
- [SOY80] Gebrauchsmuster DE: G 8006621.3 (31.07.1980), Soyer Bolzenschweißtechnik: Bolzenschweißeinrichtung.
- [SOY98] Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH: Bedienungsanleitung Bolzenschweißer BMS-10P. Firmenschrift, Wörthsee-Ettersschlag 1998.
- [Sta98] Stache, K.: Prozessanalyse und Maßnahmen zur Qualitätssicherung beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. Dissertation, TU Clausthal, 1998.
- [STE10] Steinel Normalien AG: Produktprogramm 2010. Firmenschrift, Villingen-Schwenningen 2010.
- [Sum03] Summerauer, J. K.: Integrierte Prozessketten in der Stanzindustrie. In: 8. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, Markterfolge durch innovative Produktionstechnik (2003) S. 169-183.
- [Tri08] Trillmich, R.: Zur Qualitätssicherung beim Bolzenschweißen - Was sagt die DIN EN ISO 14555:2006 dazu? (Teil 2). In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 60 (2008) H. 7/8 S. 258-262.
- [Tri93a] Trillmich, R.: Stand des Lichtbogenbolzenschweißens in der Praxis (Teil 1). In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 45 (1993) H. 10, S. 622-628.
- [Tri93b] Trillmich, R.: Stand des Lichtbogenbolzenschweißens in der Praxis (Teil 2). In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 45 (1993) H. 12, S. 772-777.
- [Tri94a] Trillmich, R.: Erfahrungen beim Bolzenschweißen mit neuen Stromquellen und Steuerungen. In: DVS-Berichte, DVS-Verlag Bd. 162 (1994) S.18-21.
- [Tri94b] Trillmich, R.: Stand des Lichtbogenbolzenschweißens in der Praxis (Teil 3). In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 46 (1994) H. 2, S. 68-74.
- [Tri96] Trillmich, R.: Integriertes Steuerungssystem regelt Bewegungsablauf beim Bolzenschweißen mit Hubzündung. In: Maschinenmarkt Bd.102 (1996) H. 20, S. 46-49.
- [Tri97] Trillmich, R.; Welz, W.: Bolzenschweißen - Grundlagen und Anwendung, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 133, DVS-Verlag, Düsseldorf 1997.
- [Tri98a] Trillmich, R.: Bolzenschweißen auf dünnen und beschichteten Blechen. In: Bänder Bleche Rohre (1998) H. 9, S. 154-157.
- [Tri98b] Trillmich, R.: Lichtbogen-Bolzenschweißen – Bewährtes Verfahren mit Variationen. In: Metallbau Technik (1998) H. 5, S. 50-52.
- [Tri98c] Trillmich, R.: Kurze Prozesszeiten verhindern Schäden. In: Industrieanzeiger Bd. 120 (1998) H. 18, S. 34-35.

- [Tri99] Trillmich, R.: Qualitätssicherung beim Bolzenschweißen – Was bringt die neue DIN EN ISO 14555? In: Der Praktiker, DVS-Verlag Bd. 51 (1999) H. 9, S. 368-374.
- [TRLV1] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung TRLV1: Beurteilung der Gefährdung durch Lärm - Teil 1, 2010.
- [TUC10] Emhart Fastening Technologies TUCKER GmbH: Neue TUCKER Technologie: Bolzenschweißen mit DCE! URL: http://www.bbr.de/filesserver/henrich/files/reinigung_im_lichtbogen.pdf (abgerufen am 05.11.2010).
- [UTM07] Ultra Tool & Manufacturing, Inc.: Case Study: Advanced Manufacturing Practices: In-Die Welding. Stand: Mai 2007. URL: <http://www.ultratoolmfg.com> (abgerufen am 14.02.2009).
- [VDI2221] Richtlinie VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Mai 1993.
- [VDI3260] Richtlinie VDI 3260: Funktionsdiagramme von Arbeitsmaschinen und Fertigungsanlagen, 1977 (zurückgezogen).
- [VDI3386] Richtlinie VDI 3386: Keiltriebe in Stanzerei-Großwerkzeugen, November 1990.
- [Wag07] Wagner, P.: Untersuchungen zum Anschweißen von Widerstandsschweißmuttern an Bleche aus höher- bis höchstfesten Werkstoffen, SLV-Forschungsbericht Nr. 5140, SLV, München 2007.
- [Wan06] Wanner, M.-Ch. et al.: Dichtigkeit von mechanisch gefügten Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen. In: UTFscience IV/2006 (online Archiv). Stand: 19. Dezember 2006. URL: <http://www.UTFscience.de> (abgerufen am 14.02.2009).
- [Wei66] Weidemann, L.: Praktische Erkenntnisse bei der Anwendung des Bolzenschweißens nach dem Graham-Kondensator -Entladungsprinzip bei Aluminium-Bauelementen. In: Aluminium (1966) H. 3, S. 184-190.
- [Wel64] Welz, W.: Bolzenschweißen nach dem Kondensatorentladungsverfahren. In: Schweissen und Schneiden, DVS-Verlag Bd. 16 (1964) H. 5, S. 184-191.

Anhang

A Statistische Auswertung wichtiger Schweißparameter unter Störeinflüssen

- A: Unterbrechung eines Massekontaktes
- B: dicke Benetzung des Bleches mit Ziehöl
- C: Benetzung des Bleches mit entspanntem Wasser
- D: Ausfall der Absaugung
- E: Bolzen mit gekürzter Zündspitze (0,35 mm)
- F: permanente Absaugung (auch während der Lichtbogenzündung)
- G und H: Mischverbindungen mit Bolzen aus austenitischem CrNi-Stahl (mit verschlissenenem und neuem Bolzenhalter)

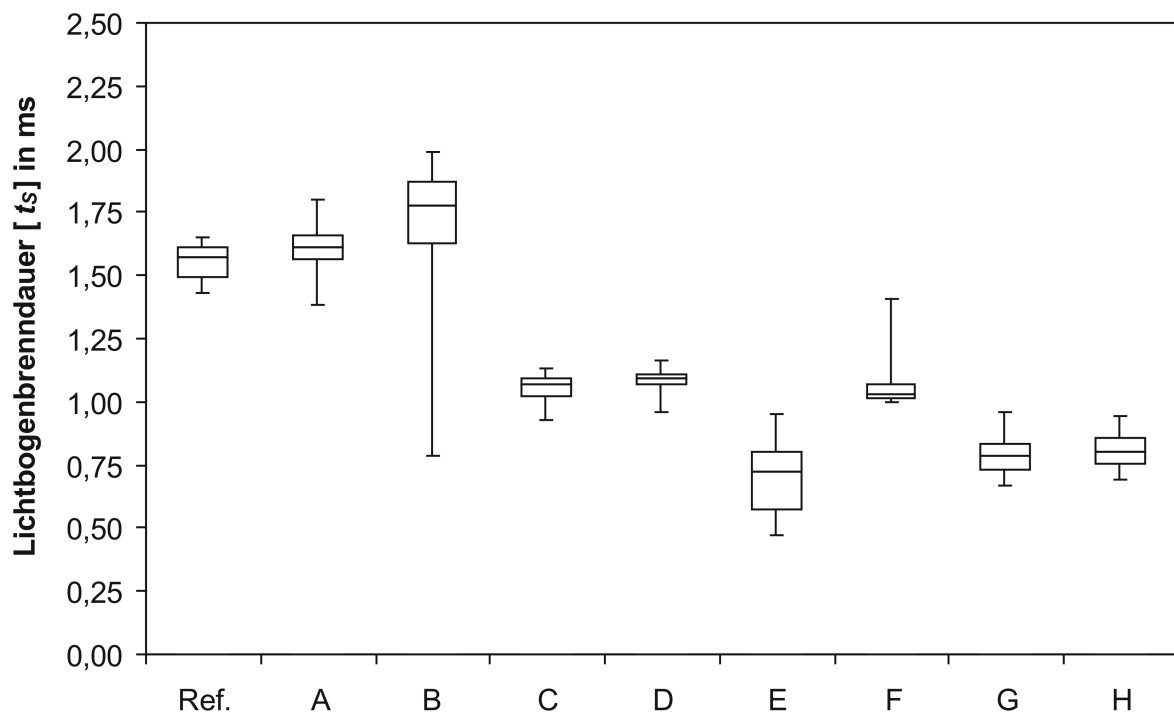


Bild A 8.1: Lichtbogenbrenndauer unter den Störeinflüssen A bis H im Vergleich zu Referenzschweißungen

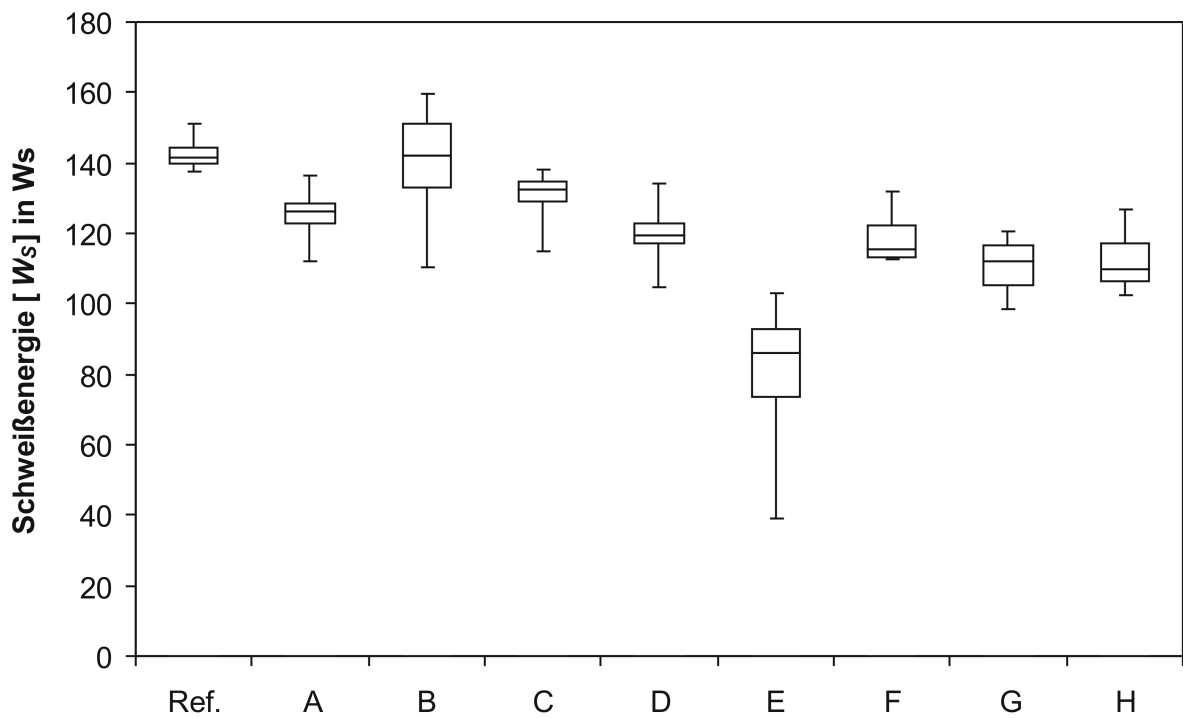


Bild A 8.2: Schweißenergie unter den Störeinflüssen A bis H im Vergleich zu Referenzschweißungen

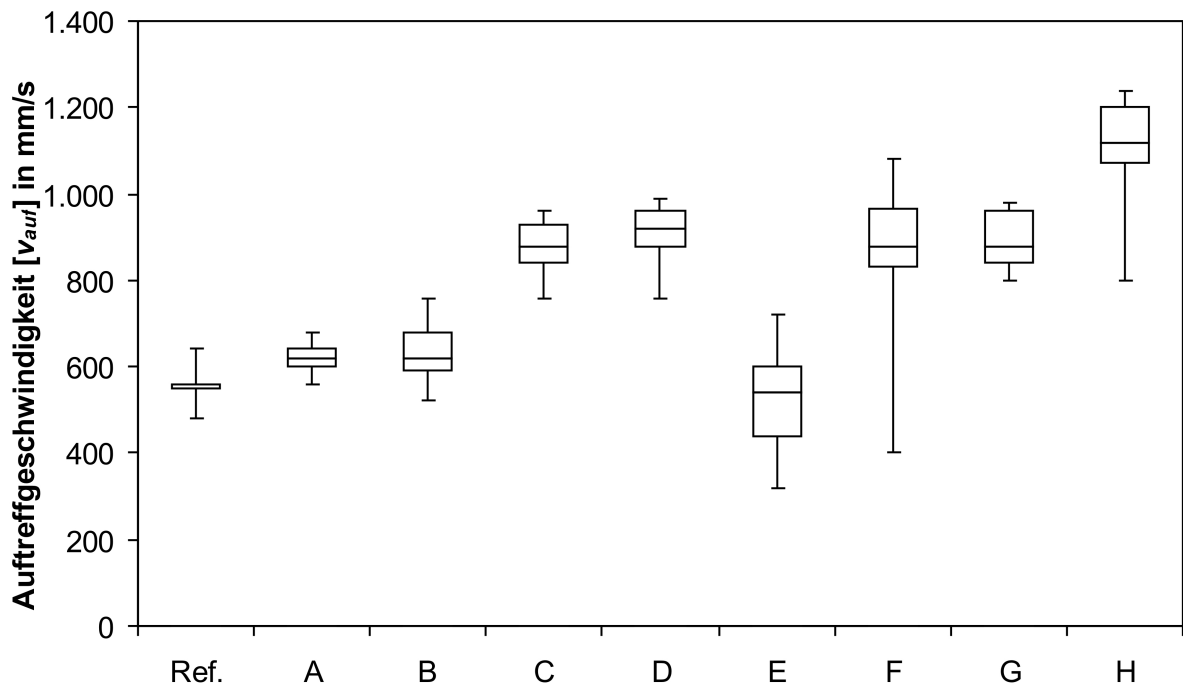


Bild A 8.3: Auftreffgeschwindigkeit unter den Störeinflüssen A bis H im Vergleich zu Referenzschweißungen

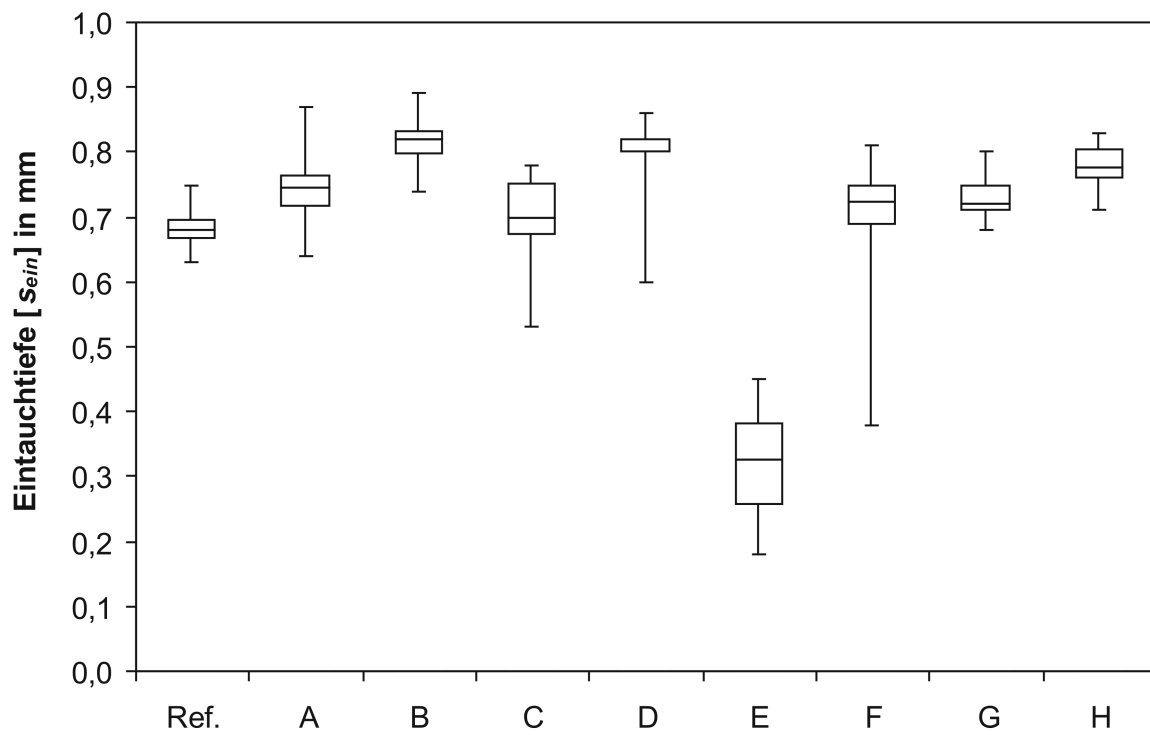


Bild A 8.4: Eintauchtiefe unter den Störeinflüssen A bis H im Vergleich zu Referenzschweißungen

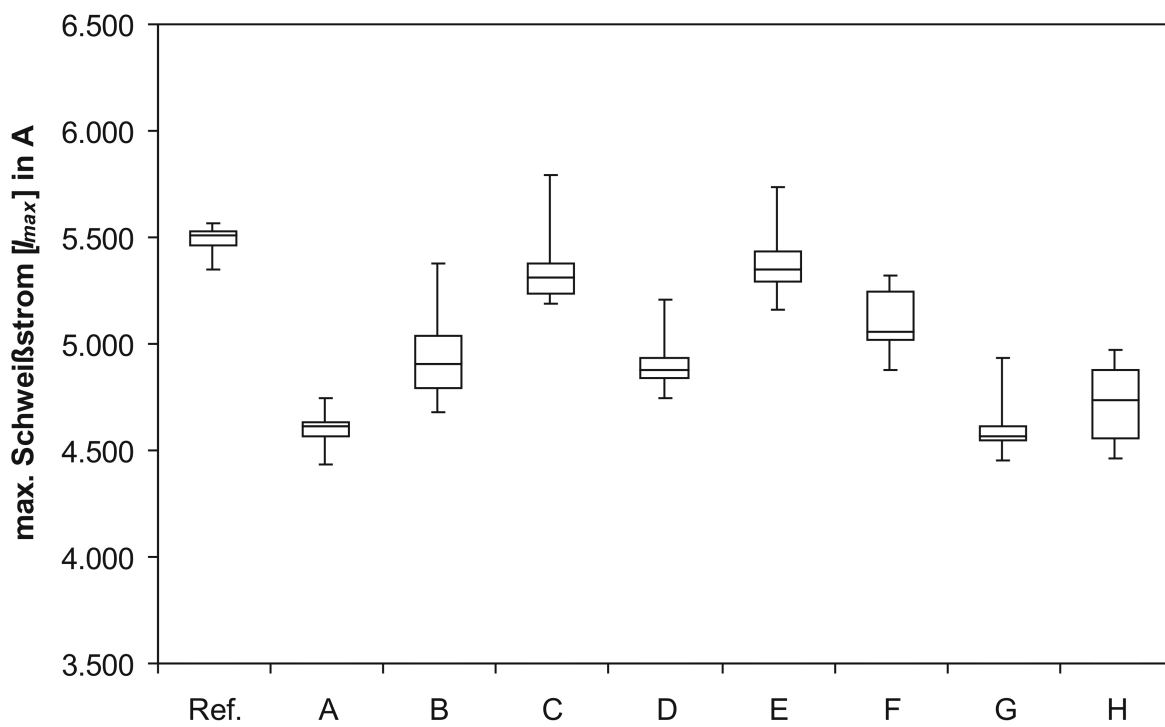


Bild A 8.5: Maximale Schweißstromstärke unter den Störeinflüssen A bis H im Vergleich zu Referenzschweißungen

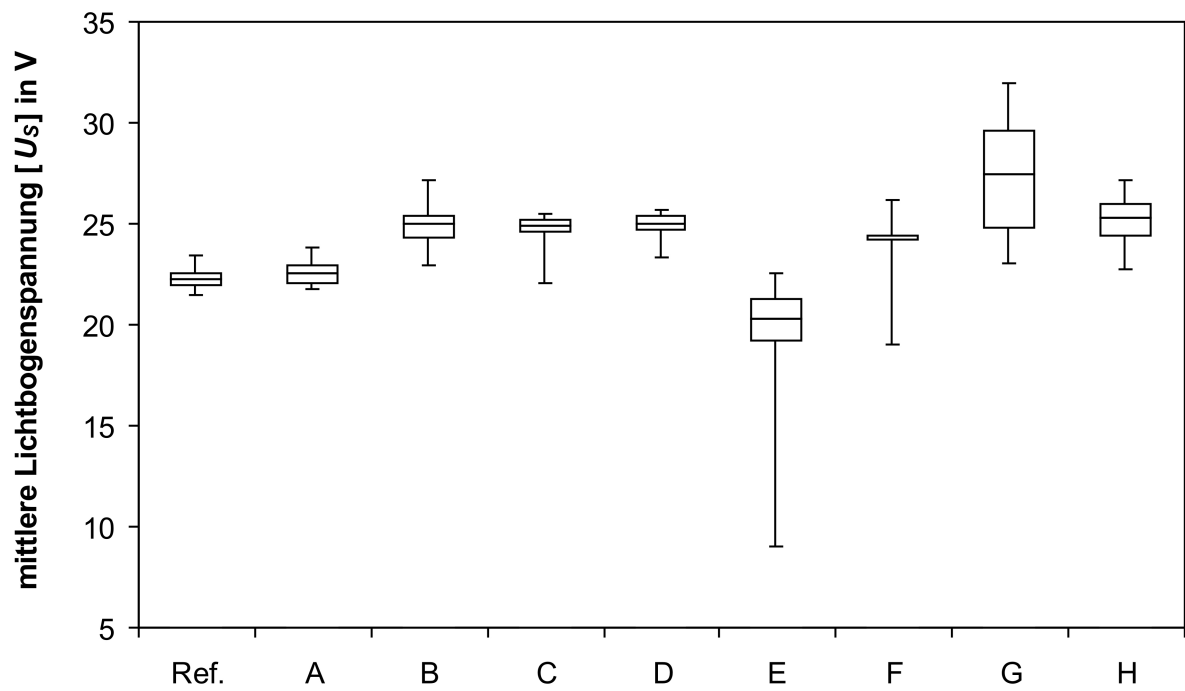


Bild A 8.6: Lichtbogenspannung unter den Störeinflüssen A bis H im Vergleich zu Referenzschweißungen

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Dominic Gruß
Geburtsdatum und -ort 18.03.1979 in Wolfsburg
Familienstand ledig

Schulausbildung

08/1985 – 07/1989 Wohltberg Wolfsburg (Grundschule)
08/1989 – 07/1991 Hermann-Löns-Schule Wolfsburg (Orientierungsstufe)
08/1991 – 07/1998 Theodor-Heuss-Gymnasium Wolfsburg
Schulabschluss: Abitur

Grundwehrdienst

11/1998 – 08/1999 Panzergrenadierbataillon 332 in Wesendorf

Studium

10/2000 – 03/2006 Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu
Braunschweig
Allgemeiner Maschinenbau
Studienabschluss: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)
03/2002 – 10/2005 Studienbegleitende Tätigkeit
Institut für Konstruktionstechnik der TU Braunschweig
unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. H.-J. Franke
Studentische Hilfskraft in der Lehre

Berufstätigkeit

08/2006 – 09/2010 IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH,
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung Prozesstechnik
seit 01/2011 Phoenix Feinbau GmbH & Co. KG, Lüdenscheid
Projektleiter, Abteilung Technologieentwicklung