

STUDIE

„Gerätetechnischer Forschungsbedarf in der Fügetechnik aus Sicht mittelständischer Anlagenhersteller oder Systemanbieter“

Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes

Dr.-Ing. E. Seliga

unter Mitwirkung von:

Dipl.-Ing. M. Kusch (Stromquellen Lichtbogenschweißen)

Dr.-Ing. W. Schneider (Stromquellen Widerstandsschweißen)

Dipl.-Ing. H. Letsch (Laserstrahlschweißanlagen)

Dr.-Ing. E. Seliga (Elektronenstrahlschweißanlagen)

Dipl.-Ing. H. Lang (Löttechnik)

Prof. rer. nat. Dr.-Ing. H. Kleinert – TU Dresden (Klebtechnik)

Dipl.-Ing. M. Todtermuschke (Mechanische Fügetechnik)

Dipl.-Ing. T. Kohler (Robotertechnik/Prozesssensorik)

Dr.-Ing. U. Semmler (Numerische Simulation)

im Auftrag der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen
und verwandte Verfahren e. V.

Chemnitz und Düsseldorf im März 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Allgemeine Entwicklungstendenzen	2
3	Die Gerätetechnik im Einzelnen	6
3.1	Stromquellen zum Lichtbogenschweißen	6
3.1.1	Bauart	6
3.1.2	Ausgangsstrom	6
3.1.2.1	Wechselstrom	6
3.1.2.2	Gleichstrom	7
3.1.2.3	Impulsförmiger Gleichstrom	7
3.1.2.4	Frei einstellbarer Stromverlauf	8
3.1.3	Benutzerführung	8
3.1.4	Forschungsansätze	9
3.2	Stromquellen Widerstandsschweißen	10
3.2.1	Elektrischer Teil – Stromquellen, Steuerungsarten	10
3.2.1.1	Gleichstrom-Mittelfrequenz-Invertertechnik	10
3.2.1.2	Mikrowiderstandsschweißtechnik	11
3.2.1.3	Steuerungen mit Kondensatorentladung	11
3.2.2	Mechanisches System	11
3.2.2.1	Antriebe	11
3.2.2.2	Schweißzangen und Elektroden	12
3.2.3	Kontroll- und Regeleinrichtungen	13
3.2.4	Simulation von Widerstandsschweißprozessen	16
3.2.5	Arbeits- und Gesundheitsschutz	17
3.2.6	Forschungsansätze	17
3.3	Laserstrahlschweißanlagen	18
3.3.1	Strahlquellen	18
3.3.1.1	CO ₂ -Gaslaser	18
3.3.1.2	Festkörperlaser	18
3.3.1.3	Diodenlaser	20
3.3.2	Anlagentechnik/Sensorik/Prozessüberwachung	20
3.3.2.1	Prozesssensorik	21
3.3.2.2	Laserhandbearbeitung	21
3.3.2.3	Remote-Welding-Systeme	21
3.3.2.4	Telepräsenz/Ferndiagnose	22
3.3.2.5	Hybridverfahren	22
3.3.3	Arbeitsschutz/Lasersicherheit	23

3.3.4	Qualitätssicherung	24
3.3.5	Forschungsansätze	25
3.4	Elektronenstrahlschweißanlagen	27
3.4.1	Elektronenstrahlerzeugung, -führung und -vermessung	27
3.4.2	Nahtsuch- und Positioniersysteme	30
3.4.3	Anlagenkonzepte	31
3.4.3.1	Arbeitskammern	31
3.4.3.2	Vakuumerzeugung	32
3.4.3.3	Bewegungseinrichtungen	33
3.4.3.4	Steuerung und Bedienung	33
3.4.3.5	Non Vacuum Electron Beam Welding (NVEBW)	34
3.4.4	Arbeitsschutz	35
3.4.5	Forschungsansätze	36
3.5	Löttechnik	37
3.5.1	Verfahren und Grundwerkstoffe	37
3.5.1.1	Herausforderungen an Verfahren	37
3.5.1.2	Grundwerkstoffe	38
3.5.1.3	Hybridverfahren	39
3.5.2	Anlagentechnik	39
3.5.2.1	Lötöfen/Mechanischer Teil	39
3.5.2.2	Steuerungen	42
3.5.2.3	Optimierung der Anlagenfertigung	42
3.5.3	Qualitätssicherung	43
3.5.4	Arbeits- und Umweltschutz	43
3.5.5	Forschungsansätze	44
3.6	Klebtechnik	45
3.6.1	Oberflächenbehandlung	45
3.6.2	Klebstoffverarbeitung	45
3.6.3	Forschungsansätze	46
3.7	Mechanische Fügetechnik	48
3.7.1	Verfahren	48
3.7.1.1	Clinchen (früher: Durchsetzfügen)	48
3.7.1.2	Nieten	49
3.7.2	Nicht betrachtete Verfahren – Sonderanwendungen	50
3.7.2.1	Hybridverfahren	50
3.7.2.2	Weitere Verfahren	51
3.7.3	Maschinentechnik	51
3.7.3.1	Antrieb	51

3.7.3.2	Kinematik der Werkzeuge	51
3.7.4	Werkzeuge	52
3.7.4.1	Clinchen	52
3.7.4.2	Nieten	52
3.7.5	Qualitätssicherung und Arbeitsschutz	52
3.7.5.1	Stand der Technik	52
3.7.6	Reparaturmöglichkeiten	53
3.7.7	Simulation der Fügeverfahren	53
3.7.8	Forschungsansätze	54
3.8	Robotertechnik/Prozesssensorik	56
3.8.1	Robotertechnik	56
3.8.2	Prozesssensorik	57
3.8.3	Forschungsansätze	58
3.9	Numerische Simulation	60
3.9.1	Stand	60
3.9.2	Forschungsansätze	62
4	Übergreifende Forschungsansätze	63
5	Literatur	64

Herzlichen Dank allen, die uns bei der Erarbeitung der Studie unterstützt haben. Insbesondere möchten wir in diesem Zusammenhang die Fachkollegen nennen, die bei der Ausarbeitung des Fragenkataloges und der anschließenden Befragung behilflich waren, und hier ganz speziell Herrn Dipl.-Ing. M. Peschka vom IFAM Bremen. Ebenfalls Dank den Referenten, die mit ihren Vorträgen einen großen Beitrag zum Gelingen leisteten. Nicht zuletzt gilt unser Dank auch jenen, die sich die Zeit für die Beantwortung des Fragebogens genommen haben und damit die vorliegende Analyse erst ermöglichten.

1 Einleitung

Die Studie entstand im Auftrag der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. in Vorbereitung auf das Forschungsseminar „Fügen im Produktlebenszyklus“ am 27. Januar 2003 in Stuttgart.

Ziel des Seminars war die Definition eines Handlungsrahmens und die Identifizierung des konkreten Forschungsbedarfes aus Sicht der Fügetechnik im Rahmen des Produktlebenszyklus. Betrachtet wurden dabei die Phasen der Produktplanung, Entwicklung und Konstruktion, der Einsatz, die Wartung und Reparatur sowie das Recycling und die Entsorgung. Unter Berücksichtigung der aktuellen Forschungsvorhaben und Anknüpfung an die vorhergehenden Forschungsseminare erfolgte in Vorträgen, Diskussionen und Workshops eine umfassende Analyse dieser Themenfelder.

Eingebettet in dieses Konzept war die Darstellung des Standes der zur Produktfertigung, -wartung und -reparatur eingesetzten Gerätetechnik aus Sicht der Gerätehersteller und Systemanbieter sowie die Herausarbeitung von neuen Forschungsansätzen zur Diskussion mit Projektträgern des BMBF.

Hauptaufgabe der Studie ist dabei die Darlegung des aktuellen Standes der Geräteentwicklung auf den Gebieten der Stromquellen, Strahlschweißanlagen, Löttechnik, Klebtechnik, mechanischen Fügetechnik, Robotertechnik/Prozesssensorik und numerischen Simulation.

Für die dabei durchgeführte Marktanalyse wurde der Zwei-Stufen-Ansatz ausgewählt. In der ersten Stufe erfolgte unter Einbeziehung von Branchenexperten in strukturellen Gesprächen die Erstellung eines Fragebogens. Im Anschluss wurden die Marktakteure interviewt. Befragt wurden 133 klein- und mittelständische Unternehmen, die in erster Linie an der Forschungsarbeit unter Federführung des DVS teilnehmen und ebenso branchenintern von Bedeutung sind (Bild 1).

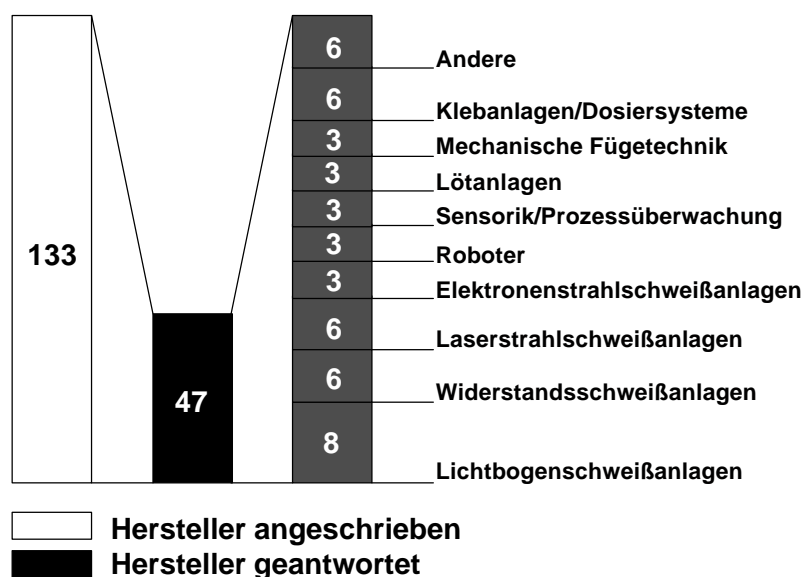


Bild 1 Fokusgruppe der Untersuchungen

2 Allgemeine Entwicklungstendenzen

Im ersten Teil dieser Studie werden die allgemeinen bzw. quantifizierbaren Aussagen der Gerätehersteller und Systemanbieter der Fügetechnik präsentiert.

Insgesamt blickt die Branche optimistisch in die Zukunft und will den Markt für das Fügen vor allem durch technische Innovationen und eine preisstabile Politik weiter festigen. Neben dem Recycling der Anlagen und einer ressourcenschonenden Produktion werden als technische Herausforderungen vor allem die Möglichkeiten der Überwachung und der Regelung des Schweißprozesses sowie der Dokumentation der Schweißnahtqualität gesehen. Oberste Priorität hat hier die fehlertolerante und bedienerfreundliche Umsetzung komplizierter und in der Regel auch teurer technischer Lösungen.

Im Vorfeld zukünftiger Entwicklung nehmen heute mehr und mehr Hersteller durch aktive Kundenbefragungen Entwicklungstendenzen auf, führen kurz vor Produkteinführung intensive Feldtests durch und bieten in der Produktnutzungsdauer servicefreundliche Konzepte, im Zusammenspiel mit umfangreichen Anwender- und Mitarbeiterschulungen. Die Frage nach der Entwicklung bzw. dem Potenzial der Fügeverfahren, die ja unmittelbar im Zusammenhang mit der Gerätetechnik stehen, ergab wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Entwicklungstendenzen in der Fügetechnik (Bild 2).

Die in den letzten 10 Jahren am stärksten gewachsenen Bereiche sind das Laserstrahlschweißen, das Kleben, das mechanische Fügen und das Löten. Interessant der Bekanntheitsgrad der einzelnen Verfahren. Während sich beim Laser nur 16 Firmen keine Aussage zutrauten, waren es beispielsweise beim Elektronenstrahl 31.

Im Wesentlichen decken sich die Zukunftsprognosen mit den Aussagen zu den vergangenen 10 Jahren – auch in Zukunft ist das Fügen eine Wachstumsbranche.

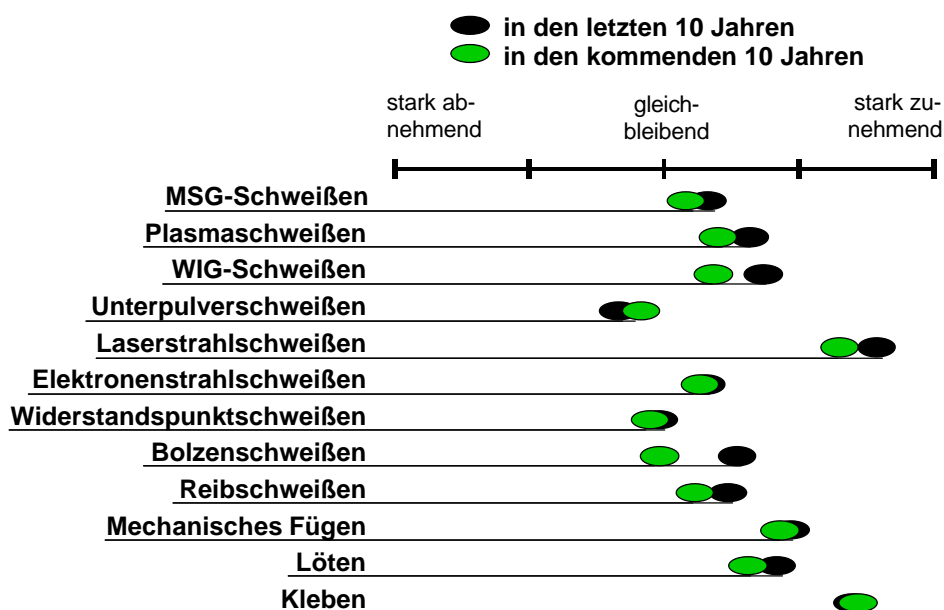


Bild 2 Entwicklung der Fügeverfahren aus Sicht der Hersteller

Als Ergänzung an dieser Stelle die Aussagen der Forschungsinstitute (Bild 3). Insbesondere beim mechanischen Fügen, aber auch dem Metallschutzgasschweißen und Elektronenstrahlschweißen, wurde von den Instituten im Vergleich zu den Herstellern in den letzten 10 Jahren ein stärkerer Zuwachs eingeschätzt. Die Prognosen für die Zukunft sind verhaltener. Beispielsweise wird das MSG-Schweißen wesentlich weniger zulegen als in den letzten Jahren, das Widerstandspunktschweißen wird, insbesondere durch die mechanische Fügetechnik, aber auch das Kleben, an Einfluss verlieren.

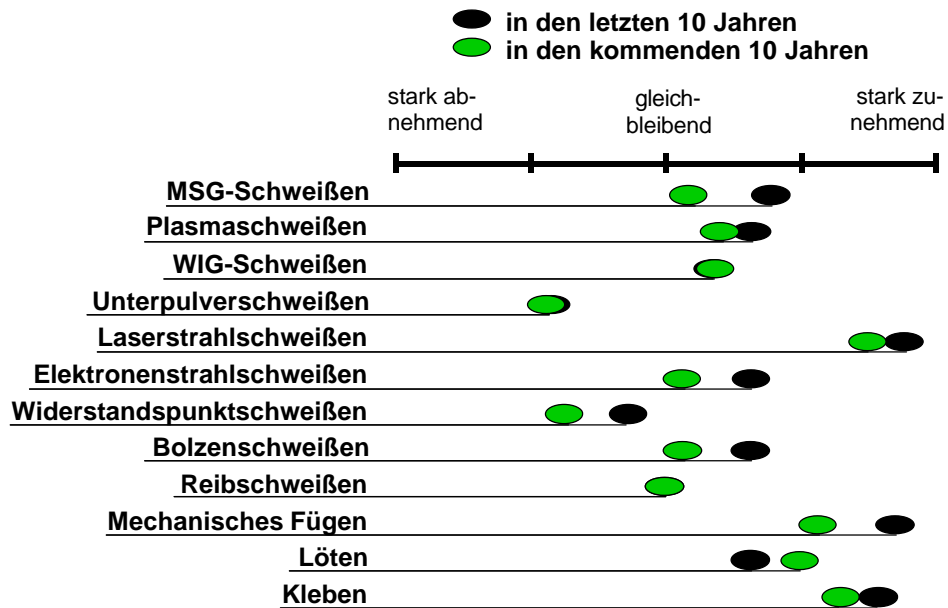


Bild 3 Entwicklung der Fügeverfahren aus Sicht der Forschung

Bei der Frage nach der Bedeutung der Hybridverfahren sind sich die Hersteller einig. Laserhybridschweißen bezeichnen 65 % als zukünftig dominante Verfahrenskombination, wobei vor allem dem Laser-MIG-Prozess das größte Potenzial eingeräumt wird. Die anderen 35 % sehen auch ohne Laser Chancen im Hybridprozess.

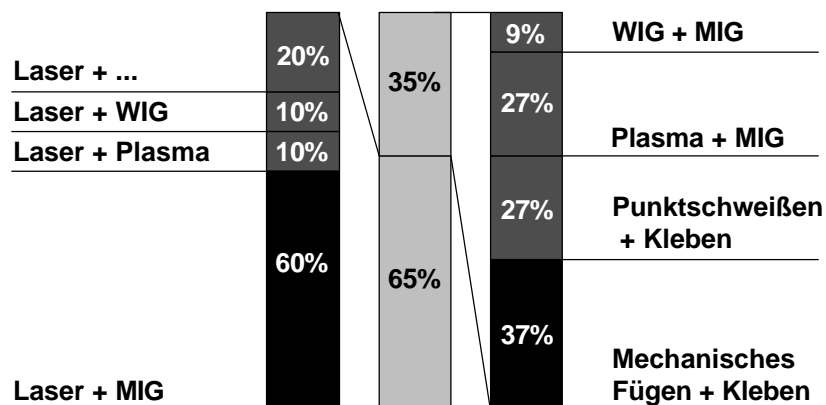


Bild 4 Zukünftige Bedeutung der Hybridverfahren (Mehrfachnennungen möglich)

Sie favorisieren vor allem das mechanische Fügen bzw. das Punktschweißen in Verbindung mit dem Kleben und den Plasma-MIG-Prozess (Bild 4).

Fast ein Drittel der Befragten sehen bei den zukünftig zu fügenden Werkstoffen/Werkstoffverbunden Stahl weiterhin als Werkstoff der Wahl (Bild 5).

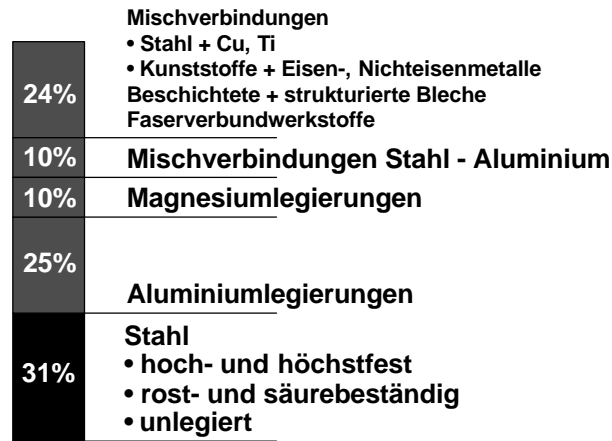


Bild 5 Werkstoffe und ihr Potenzial (Mehrfachnennungen möglich)

Dies liegt zum einen, vor allem beim Massenstählen, an der preiswerten Herstellung und problemlosen Verarbeitbarkeit, zum anderen aber auch an den legierungstechnisch vielfältigsten Möglichkeiten der Einstellung der geforderten Eigenschaften.

Eine große Bedeutung werden, neben Aluminiumlegierungen, zukünftig auch Mischverbindungen erlangen, gerade die beschichteten und strukturierten Bleche sowie Faserverbundwerkstoffe treten mehr und mehr in den Vordergrund.

Die Mehrzahl der fügetechnischen Anlagen ist auf 8 - 10 Jahre Lebensdauer ausgelegt. Insbesondere gilt, je teurer eine Anlage und ausgereifter der Prozess, desto länger die projektierte Lebensdauer (Bild 6).

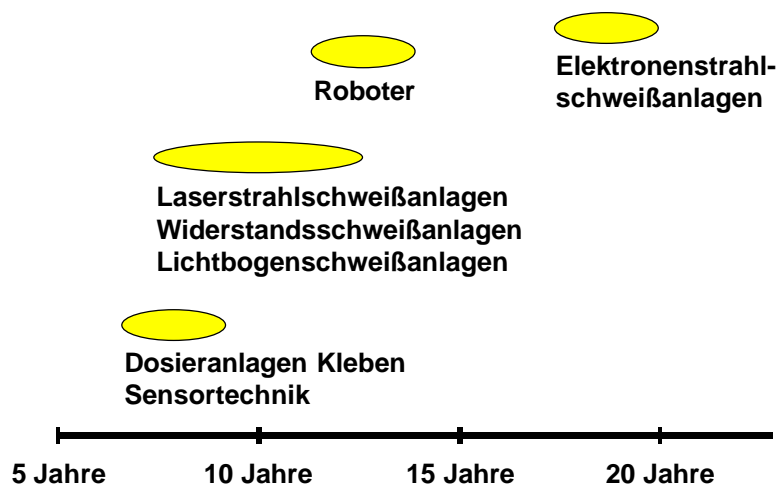


Bild 6 Produktlebensdauern

Beim Bemühen um zufriedene Kunden gibt sich Branche ebenfalls keine Blöße, immerhin 66 % der Unternehmen sind nach ISO 9000ff. zertifiziert. Wer den einen oder anderen Service noch nicht anbietet, denkt zumindest ernsthaft über eine Einführung nach (Bild 7).

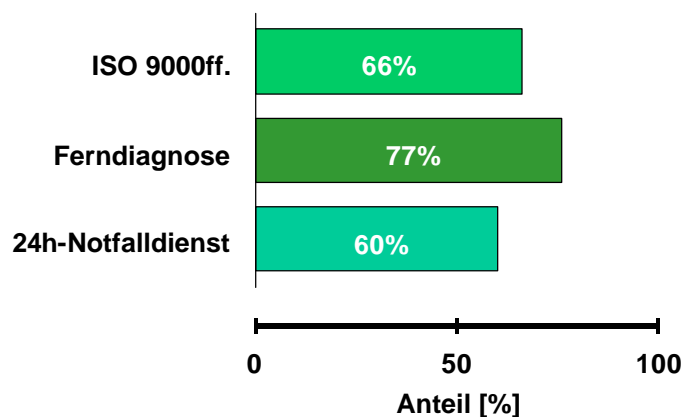


Bild 7 Zertifizierung und Service

Werden die Geräte als Systemkomponente eingesetzt, stellt sich die zentrale Frage der elektrisch/elektronischen Schnittstelle bzw. des Protokolles. 60 % der Unternehmen sehen im Bussystem die Zukunft, immerhin 40 % halten die digital/analoge Schnittstelle auch weiterhin als konkurrenzfähig. Obwohl bei den Bussystemen die Hersteller auf Kundenwünsche flexibel reagieren, besteht die Forderung nach Standardisierung. Neben dem I2C-Bus, dem Interbus S, aber auch der Internettechnologie, sehen 45 % im Profibus sowie 25 % im CAN-Bus das geeignete Protokoll (Bild 8).

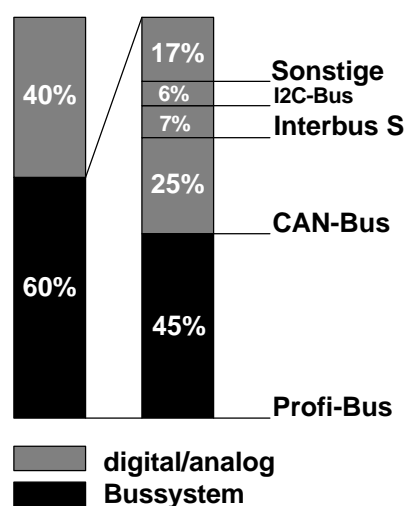


Bild 8 Elektrisch/Elektronische Schnittstelle (Mehrfachnennungen möglich)

3 Die Gerätetechnik im Einzelnen

Im Weiteren erfolgt die Darstellung des technischen Standes der Gerätetechnik. Unter Berücksichtigung der Ausrichtung der Studie wird hier nur ansatzweise auf Grundlagen eingegangen, für weitere Studien diesbezüglich sei deshalb die einschlägige Fachliteratur empfohlen. Hauptaugenmerk der folgenden Ausführungen liegt auf der Beschreibung der aktuellen Entwicklungstendenzen und dem Aufspüren und der Formulierung von Forschungszielen.

3.1 Stromquellen zum Lichtbogenschweißen

3.1.1 Bauart

Die Vorteile und Möglichkeiten der modernen Elektronik wurden in den letzten Jahren konsequent in das Produkt Schweißstromquelle adaptiert. Dadurch wurden klassische Schweißgeräte, wie Umformer oder Transformator, immer mehr verdrängt. Umformer werden heute praktisch nur noch im Baustellenbereich, reine Transformatoren nur noch im Amateursektor eingesetzt.

In der industriellen schweißtechnischen Fertigung finden derzeit fast ausnahmslos Gleichrichter oder Inverter Anwendung. Moderne Leistungsteile verfügen hierbei über eine Taktfrequenz von bis zu 100 kHz. Durch primäre Taktung lassen sich vollwertige Schweißstromquellen mit geringem Gewicht realisieren. Bei sekundärer Taktung wird die hohe Taktfrequenz direkt auf das Nutzsignal übertragen. Dadurch sind sehr schnelle Schaltvorgänge möglich und die dynamischen Eigenschaften der Stromquelle werden verbessert. Durch der Gleich- bzw. Wechselrichtung nachgeschaltete elektronische Bauelemente können vielfältige technologische Effekte erzielt werden. Der Einsatz von nachrüstbaren Einsteckkarten ermöglicht dabei einen modularen Maschinenaufbau. In den letzten Jahren ist jedoch auch in der Schweißtechnik ein zunehmender Trend zur Digitalisierung festzustellen. Der Einsatz von digitalen Signalprozessoren eröffnet die Möglichkeit analoge elektronische Bauelemente bei der Erzeugung des Ausgangsstromes zu substituieren. Der Stromverlauf wird durch digitale Vorgaben erzeugt und ist somit im Wesentlichen von der Programmierung des Signalprozessors abhängig.

3.1.2 Ausgangsstrom

3.1.2.1 Wechselstrom

Durch der Transformation nachgeschaltete elektronische Bauelemente ist der typische sinusförmige Wechselstromverlauf in An- und Abstiegsgeschwindigkeit veränderbar. Der Extremfall sind rechteckförmige „Halbwellen“, die einen sehr schnellen Nulldurchgang ermöglichen. Ebenfalls auf elektronischen Weg lassen sich die einzelnen Halbwellenanteile zueinander verschieben (Balanceregulierung).

3.1.2.2 Gleichstrom

Der durch Gleichrichtung aus einem Wechselstrom erzeugte Gleichstrom weist noch eine gewisse Restwelligkeit auf. Je höher die Taktfrequenz bei der Transformation gewählt wird, desto geringer fällt diese aus. Bei Belastung der Stromquelle wird je nach den Erfordernissen des Schweißprozesses die Schweißspannung (abschmelzende Elektrode) oder die Schweißstromstärke (nichtabschmelzende Elektrode) konstant geregelt. Während die Stromquellencharakteristik bei herkömmlichen Stromquellen durch die Hardware fest vorgegeben ist, lassen elektronische Schweißstromquellen eine nahezu stufenlose Veränderung der Kennlinienneigung zu.

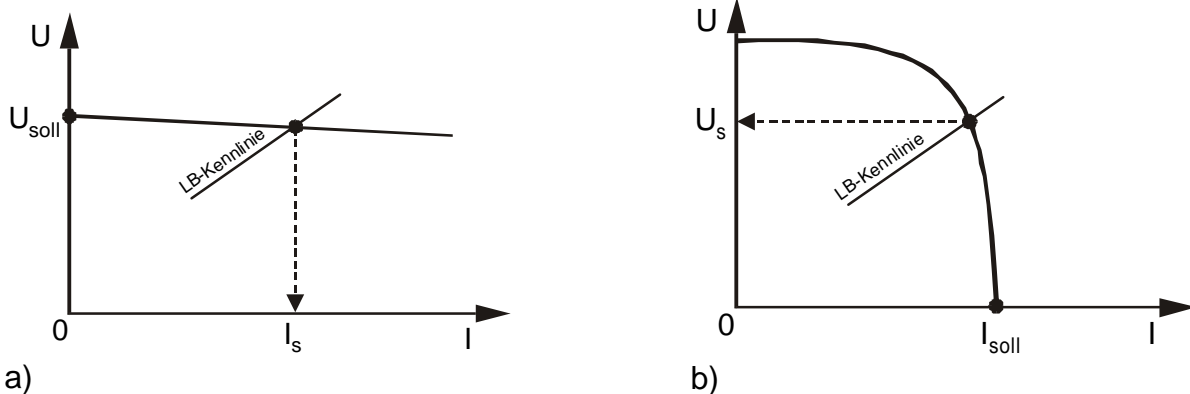


Bild 9 Strom-Spannungskennlinien

a) Konstantspannungs-Kennlinie b) Konstantstrom-Kennlinie

3.1.2.3 Impulsförmiger Gleichstrom

Ein Impulsstrom auf Gleichstrombasis wird durch die Umschaltung zwischen zwei verschiedenen Arbeitspunkten erzeugt (Modulation). Ein Arbeitspunkt ist dabei als Schnittpunkt zwischen der statischen Stromquellenkennlinie und der Lichtbogenkennlinie im Strom-Spannungs-Diagramm definiert. Die Kenngrößen des Impulsstromverlaufes sind die Frequenz, die Puls- und Pausenzeit, die An- und Abstiegsgeschwindigkeit sowie die Amplituden in Grund- und Pulsphase. Je nachdem welche elektrische Größe in der Grund- bzw. Pulsphase konstant geregelt wird, werden verschiedene Modulationsarten unterschieden.

I-U-Modulation:

In der Grundphase wird der Strom und in der Pulsphase die Spannung geregelt. Der Impulsstrom stellt sich entsprechend den vorliegenden Lichtbogenverhältnissen ein.

I-I-Modulation:

Sowohl in der Grund- als auch in der Pulsphase wird der Strom konstant geregelt. Dies ist besonders im unteren Leistungsbereich von Vorteil. Da aber die Spannung und somit die Lichtbogenlänge in keiner Prozessphase geregelt wird, besteht die Gefahr von un-

zulässigen Lichtbogenlängenänderungen. Um dies zu verhindern, wird bei dieser Modulationsart noch eine zusätzliche äußere Regelung überlagert, die die Schweißspannungswerte begrenzt bzw. zur Regelung der Lichtbogenlänge werden bei I_g - I_p -modulierten Impulsstromquellen mehrere Impulsparameter, vorzugsweise die Frequenz und der Grundstrom, gleichzeitig verändert.

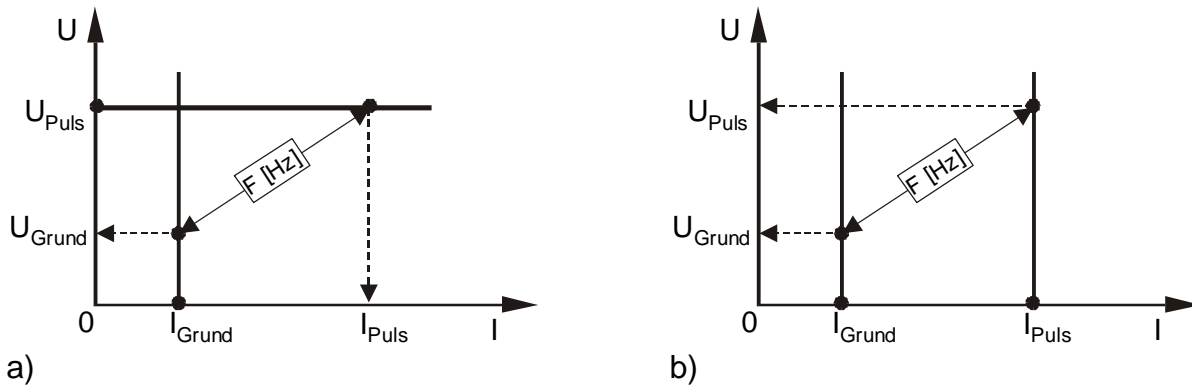


Bild 10 Modulationsarten von Impulsstromquellen
a) I_g -Up-Modulation b) I_g - I_p -Modulation

3.1.2.4 Frei einstellbarer Stromverlauf

Mit digitalisierten Stromquellen lassen sich nahezu beliebige Stromverläufe realisieren. Analoge Sollwertvorgaben bzw. Regelgrößen werden über einen A/D-Wandler digitalisiert und durch einen digitalen Signalprozessor verarbeitet. Die Art bzw. der Verlauf des Ausgangsstromes ist über die Programmierung des Signalprozessors steuerbar. Die digitale Verarbeitung gewährleistet dabei eine hohe Reproduzierbarkeit der Lichtbogenparameter.

Beispiele für frei generierte Stromverläufe sind das gesteuerte Kurzlichtbogenschweißen, das Kurzlichtbogenschweißen mit Zwischenimpulsen und das MIG-Wechselstromschweißen.

3.1.3 Benutzerführung

Bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche sind zwei gegensätzliche Trends erkennbar. Zum einen soll dem Anwender die Bedienung der Stromquelle so einfach wie möglich gemacht werden, zum anderen sollen möglichst viele Freiheitsgrade bei der Einstellung von Schweißparametern vorhanden sein.

Die Kommunikation des Bedieners mit der Stromquelle erfolgt über Schalter und Potentiometer oder über ein LCD-Display. Die Auswahl der Schweißleistung erfolgt in festen Stufen (stufengeschaltet) oder stufenlos über eine Synergiefunktion. In der Stromquelle sind dazu für verschiedene Werkstoffe, Schutzgase und Drahtdurchmesser entsprechende Parameter in Kennlinienform hinterlegt. Programmierbare Stromquellen bieten

dem Anwender zudem die Möglichkeit, eigene Kennlinien bzw. Arbeitspunkte zu definieren. Zur externen Einstellung der Schweißparameter, zur Steuerung des Schweißablaufes bzw. zur Dokumentation der Schweißparameter verfügen die Stromquellen über analoge und digitale Schnittstellen oder über ein Datenbus-System. Ebenfalls schon realisiert ist die Nutzung moderner Multimedia-Werkzeuge, wie z. B. die Fehlerdiagnose über Internet.

3.1.4 Forschungsansätze

Die beschriebene „Elektronisierung“ der Stromquellen besitzt noch weiteres Entwicklungspotenzial. Dies betrifft zum einen die Minimierung von Baugröße und Gewicht bei gleich bleibenden bzw. steigenden Leistungsdaten und zum anderen die Verbesserung der Regelalgorithmen zur Optimierung der Parameterkonstanz. Für eine bessere Handhabung der Stromquellentechnik werden zudem immer mehr Bedienfunktionen in den Schweißbrenner verlegt. Andererseits werden aber auch, wie zum Beispiel bei Hybridverfahren, immer mehr externe Steuerungsaufgaben durch die Stromquelle realisiert.

In Bezug auf das Grundkonzept der Schweißmaschine sind zwei wesentliche Entwicklungsrichtungen vorhanden. Zum einen werden einfache Schweißstromquellen konzipiert, deren Hauptverkaufsargument ein geringer Preis ist. Diese Gerätetechnik ist zu meist nur für eine spezielle Schweißaufgabe nutzbar und ist leicht zu bedienen. Die Kommunikation mit dem Bediener beschränkt sich auf das Wesentliche und erfolgt über Schweißleistungs-Stufenschalter oder über eine Vorauswahl von fest einprogrammierten Kennlinien. Zum anderen werden Multifunktionsmaschinen entwickelt, deren hervorstechendstes Merkmal eine große Flexibilität ist. Diese Schweißstromquellen sind für mehrere Prozessvarianten nutzbar und an beliebige Schweißaufgaben anpassbar. Der Bediener kann eigene Parametersätze definieren. Die Kommunikation erfolgt über ein offenes Dialogsystem. Die Stromquelleneinstellungen sind nahezu frei veränderbar. Der Einsatz derartiger Geräte erfordert allerdings geschultes Personal mit speziellen schweißtechnischen Kenntnissen.

Aus Sicht der Stromquellenhersteller besteht besonderer Entwicklungsbedarf bei den der Stromquelle nachgeschalteten mechanischen Komponenten der Schweißanlage. Dies betrifft insbesondere die Dynamik bzw. die Konstanz des Drahtfördersystems.

3.2 Stromquellen Widerstandsschweißen

3.2.1 Elektrischer Teil – Stromquellen, Steuerungsarten

Transformatoren für das **Wechselstromschweißen** werden einphasig angeschlossen. Dadurch wird das Netz ungleichmäßig belastet. Aufgrund der geringeren Gerätekosten wird die Wechselstromschweißung jedoch noch immer am häufigsten angewendet. Diese Wechselstromquellen haben aber nur Reaktionszeiten von 20 ms und sind für Regelbetrieb zu langsam.

Die Anwendung von **Gleichstrom** beim Widerstandsschweißen mit sehr hohen Leistungen ist notwendig, da die unsymmetrische Netzbelastung im einphasigen Wechselstrombetrieb nur bis zu einer bestimmten Leistungsgrenze zulässig ist. Zum Schweißen von Werkstoffen mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit eignet sich Gleichstrom ebenfalls besser.

3.2.1.1 Gleichstrom-Mittelfrequenz-Invertertechnik

Mittelfrequenzschweißanlagen erlangten in letzter Zeit eine größere Bedeutung, da deren Schweißtransformatoren durch die Arbeitsfrequenz von 500 bis 1200 Hz nur etwa 30 % des Gewichtes eines Trafos gleicher Leistung haben, der mit 50 Hz betrieben wird [3.2.1]. Wegen der geringeren Masse und des kleineren Bauvolumens werden diese Trafos vorwiegend an Schweißrobotern installiert. Der Schweißprozess beim Einsatz der Mittelfrequenz verläuft viel ruhiger und gleichmäßiger als bei der Wechselstromtechnik. Es gibt keine Strompausen zwischen den Halbwellen. Das verkürzt die Schweißzeiten, die Elektroden werden geringer beansprucht und erreichen längere Standzeiten. Mittelfrequenzinverter verfügen über eine Eingriffszeit von 1 ms und sind somit für schnelle Regelprozesse bestens geeignet. Bei noch höheren Anforderungen an die Regelgeschwindigkeit können 20 kHz Hochfrequenzinverter mit einem Sekundärstrom bis zu 65 kA eingesetzt werden [3.2.2].

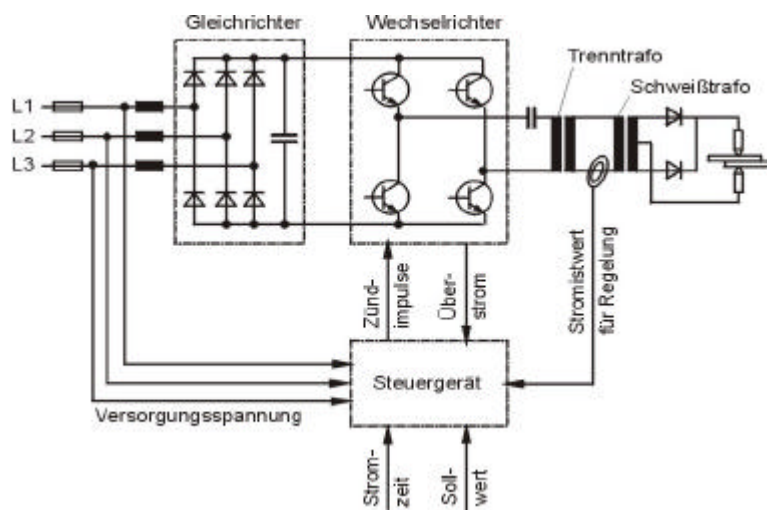


Bild 11 Prinzipskizze einer Mittelfrequenzschweißanlage

Die Schweißsteuerung hat einen dreiphasigen Anschluss und besteht aus einem 6-pulsigen Gleichrichter, dem Mittelfrequenzwechselrichter, einem Steuergerät und dem Trenntransformator mit Schweißtrafo. Der Schweißtrafo ist mit Sekundärgleichrichtern ausgerüstet, um die induktiven Spannungsabfälle klein zu halten.

Mit der modernen IGBT-Technologie (Insulated Gate Bipolar Transistor) ist es bereits möglich, eine Mittelfrequenzinverterstromquelle herzustellen, die mit einem externen Transformator Schweißströme über 200 kA bei 95 % Wirkungsgrad liefern kann [3.2.3].

3.2.1.2 Mikrowiderstandsschweißtechnik

Inverter von 2 bis 25 kHz bieten verlustarm Gleichstrom mit beliebiger Impulsformung und kurzen Stromanstiegszeiten. Das ist für das Schweißen von Kupferlegierungen erforderlich, um die Wärmeableitung in das Werkstück möglichst gering zu halten. Ebenfalls noch eingesetzt werden Transistorgleichstromquellen. Sie liefern bei beliebigen Schweißzeiten einen glatten, oberwellenfreien Gleichstromimpuls [3.2.3].

3.2.1.3 Steuerungen mit Kondensatorentladung

Beim Schweißen von Kleinteilen werden Schweißanlagen eingesetzt, bei denen die Schweißenergie aus der Entladung eines Kondensators über einen Impulsschweißtransformator gewonnen wird. Die kürzeste Schweißzeit kann kleiner 1 ms sein.

In [3.2.5] wird das Kondensatorentladungsschweißen auch CD-Schweißen genannt (Capacitor Discharge) vorgestellt. Die zum Schweißen notwendige elektrische Energie wird nicht direkt dem Netz entnommen. Kondensatoren, die als Zwischenspeicher fungieren, speichern diese Energie bis zum eigentlichen Schweißprozess (Ladevorgang: 0,5 bis 2 ms). Die elektrische Energie kann sofort in einem einzigen kurzen Impuls eingesetzt werden (Entladevorgang: 8 bis 25 ms). Dadurch sind Schweißverbindungen zwischen extrem unterschiedlichen Bauteildicken, Schweißungen ohne Anlauffarben oder mit rückseitig beschichteten Teilen möglich. Der Schweißablauf ist aber während der eigentlichen Schweißzeit nicht regelbar. In dem vorgestellten Beitrag wird das CD-Schweißen für das Verfahren Buckelschweißen eingesetzt.

3.2.2 Mechanisches System

3.2.2.1 Antriebe

Nachdem Punktschweißzangen über viele Jahre, bis auf wenige Ausnahmen, pneumatisch angetrieben wurden, halten jetzt verstärkt elektromotorische Servoantriebe Einzug. Der Wechsel der Antriebsart bringt erhebliche Vorteile und neue Möglichkeiten mit sich. Allein auf der Fachmesse Schweißen und Schneiden 2001 in Essen stellten zwölf Hersteller Schweißanlagen mit Servomotorantriebstechnik, eingebaut in Feinpunktschweißmaschinen, Hand- und Roboterschweißzangen sowie Ständerschweißmaschinen, vor. Nach der Prognose von Fachleuten werden Schweißanlagen mit pneumatischem Kraftaufbau aufgrund der Schweißqualität und der geringeren Taktzeiten immer

mehr von diesen Systemen verdrängt. Durch mehrere Hersteller wurden Schweißzangen mit luftgekühltem Servomotorantrieb präsentiert, die für ein breites Spektrum von Schweißaufgaben hinsichtlich der erforderlichen Elektrodenkräfte und Taktzeiten ohne eine Wasserkühlung des Antriebs auskommen [3.2.3, 3.2.1, 3.2.6].

Diese Antriebseinheiten ermöglichen stufenlos programmierbare Hübe, prallfreies Aufsetzen, verschiedene Kraftprogramme während des Schweißens und schnellen Aufbau der Elektrodenkraft (Bild 12).

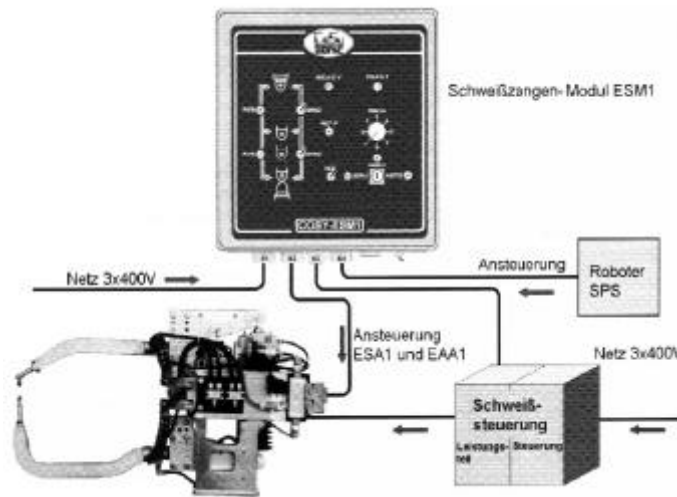


Bild 12 Roboterschweißzange mit Servomotorantrieb und Regelsteuerung; Quelle: Düring Schweißtechnik

Ein ideales Nachsetzverhalten kombiniert mit beliebig programmierbarem Wegverlauf besitzen Feinpunktschweißanlagen mit piezo-elektrischem Linearantrieb des Schweißkopfes. Extrem kurze Schweißnebenzeiten in der Positionierphase vor und nach der Schweißung werden durch die mechanisch steife, piezo-elektrische Antriebstechnologie ermöglicht, bei dem sich ein übergangsloses Umschalten von Vorhub auf Arbeitshub ohne Zeitverlust für den Schweißkraftaufbau ergibt. Mit den robusten und hochdynamischen Piezo-elektrischen Antriebssystemen lassen sich die Schweißköpfe vorzugsweise in automatisierten Produktionsanlagen mit hoher Stückzahlfertigung einsetzen [3.2.7].

3.2.2.2 Schweißzangen und Elektroden

Die „Mensch-Maschine-Schnittstelle“ beeinflusst die sichere, handhabungsgerechte und zugleich präzise Auslösung des Schweißvorganges unmittelbar. Die Handgriffe von Punktschweißzangen zeigen jedoch im Detail recht unterschiedliche Formen und Anordnungen an der Schweißzange. Auch die Positionierung der Schweißzange am Gesamtgerät wird verschieden ausgeführt. Formgestaltung, Gewicht und Schwerpunktlage, Anordnung, aber auch mögliche optische und akustische Belastungen durch den Schweißvorgang sind von ergonomischer Bedeutung. Beispielhaft wurde eine Wider-

standspunktschweißeinrichtung „Karostar“ für die Kraftfahrzeuginstandsetzung entwickelt. Sie ist mit einer Widerstandspunktschweißzange ausgerüstet und zeigt eine Fülle ergonomisch gut durchdachte Details [3.2.8].

Die herkömmlichen Stahl-Zangen zum Stanznieten, Durchsatzfügen und Punktschweißen können die immer höheren Anforderungen an Hochleistungsroboter bzgl. Bewegungsgeschwindigkeit und Präzision nicht mehr erfüllen. Um außerdem große Ausladungen bei möglichst kleiner Aufbiegung realisieren zu können, wurden konstruktive Ansätze zur Entwicklung einer neuen Generation von hybriden Roboterzangen in extremer CFK-Composit-Leichtbauweise erarbeitet [3.2.9]. Entsprechend dem entwickelten Konzept wurde eine Prototypzange gefertigt, die nach eingehenden experimentellen Untersuchungen weiter optimiert wurde. Die daraus erarbeitete Bauvariante mit längsgewickelten, hochsteifen Biegeträgern und Gegensteuerkraft erlaubt sogar durch Online-Steuerung die Kompensation des Winkelversatzes, was zu noch besserer Ausnutzung des Leichtbaupotenzials moderner Faserwerkstoffe führt.

Elektrodenverschleiß spielt in allen Bereichen der Widerstandsschweißtechnik eine große Rolle. Vor allem beim Widerstandspunktschweißen verzinkter Stahlbleche wird eine schnelle Abnutzung der Elektroden festgestellt, was auf eine kontinuierliche Legierungsbildung zwischen dem geschmolzenem Zink und den Kupferelektroden zurückzuführen ist. In der Großserienfertigung hat sich in der letzten Zeit das Elektrodenfräsen zur wesentlichen Steigerung der Standmenge der Elektroden bewährt. Zu dieser Methode gibt es keine veröffentlichten systematischen Untersuchungen, so dass die Kenntnisse hierzu überwiegend auf einige Großanwender (Automobilindustrie) und Gerätehersteller begrenzt sind. Ziel eines Forschungsvorhaben ist es [3.2.15] dem Anwender ausführliche Hinweise zur optimierten Steigerung der Elektrodenstandmenge durch Elektrodenfräsen zu geben.

3.2.3 Kontroll- und Regeleinrichtungen

Qualitätssicherung sollte bereits während oder unmittelbar im Anschluss an den Schweißprozess erkennen, ob Qualitätsmängel vorliegen und diese anzeigen. Dadurch kann unmittelbar nach Feststellung von Schlechtschweißungen korrigierend auf den Prozess eingewirkt werden sowie die Nacharbeit gezielt an den fehlerhaften Bauteilen erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist das Ausregeln der Störgröße noch während des laufenden Schweißprozesses.

In den letzten Jahren hat es auf dem Gebiet der Qualitätssicherung verschiedene Entwicklungen gegeben, um Qualitätsminderungen beim Schweißen, die durch das Auftreten von Störgrößen bedingt sind, mit Hilfe innovativer Auswertetechniken zu erkennen. Hierbei gibt es Qualitätssicherungssysteme, die sich folgenden 3 Gruppen zuordnen lassen:

- Qualitätsprüfung
- Qualitäts-Überwachung während sowie nach dem Schweißprozess

- Qualitätsreglung

Die **Qualitätsprüfung** erfolgt am fertig geschweißten Bauteil. Für stichpunktartige Prüfungen wurde hierfür in der Vergangenheit ausschließlich die zerstörende Prüfung eingesetzt. Die Nachteile, wie z. B. Zerstörung oder Deformation des Prüflings, hohe Prüfzeiten, erhöhtes Arbeitsrisiko beim Zerstören durch Anmeißeln und mit der Meißelprobe nicht auffindbare lose oder nur verklebte Schweißpunkte bei „Zinkklebern“ sind mit modernen Fertigungsverfahren und Kostenbewusstsein nicht mehr vereinbar. Immer stärker treten deshalb zerstörungsfreie Prüfverfahren in den Vordergrund. Weit verbreitet ist die Ultraschallprüfung, weitere Techniken sind die thermographische Infrarotprüfung mit Lampe, Gasbrenner oder Laser sowie die recht schnelle aber ungenauere Prüfung über den elektrischen Widerstand [3.2.20].

Bisher eingesetzte Verfahren der Ultraschallprüfung basieren auf Auswertung der Amplitudenabnahme von Wiederholungsechos, welche durch die Kornstruktur durchgeschweißter Punkte stärker geschwächt werden als bei geklebten Punkten. In [3.2.19] wird gezeigt, dass aber auch die Beschaffenheit der Schweißelektroden, Oberflächenrauheit, Parallelität und andere geometrische Faktoren das Durchstrahlungsergebnis wesentlich beeinflussen. Neuartige Systeme, wie z. B. die SPOTLINE-Ultraschallprüfung, können bereits im Schweißprozess den Schweißpunkt prüfen [3.2.18].

In [3.2.10] wird ein neues Verfahren vorgestellt, bei dem die Messung des dynamischen Widerstandes eine Beurteilung der Festigkeit des ausgebildeten Schweißpunktes erlaubt. Es werden Schweißspannung und der Schweißstrom sowie der dynamische Widerstand gemessen. Die Zuverlässigkeit der erhaltenen Werte wird mit Standardwiderständen verglichen. Für die Auswertung werden der Spitzenwiderstand, dessen Stelle, der Anstieg bis zum Maximum und die Standardabweichung des dynamischen Widerstandes herangezogen. Mit diesem Verfahren ist eine Echtzeitkontrolle der Schweißqualität möglich.

Die **Qualitäts-Überwachung** kontrolliert durch Registrierung und Auswertung bestimmter physikalischer Größen den Schweißprozess und gibt unmittelbar nach Beendigung der Schweißung eine Bewertung der Schweißqualität. Die Bewertung der elektrischen Schweißgrößen kann mit Methoden der künstlichen Intelligenz erfolgen. Zum Einsatz kommen dabei sowohl Neurale Netze als auch Fuzzy- Klassifikationen.

Auf ein Methode der komplexen Qualitätssicherung und Schweißprozessüberwachung wird in [3.2.11] näher eingegangen. Diese neuronalen Netze brauchen keine Vorgaben über den algorithmischen Zusammenhang von Werkstoff-, Elektroden-, Maschineneigenschaften und Störungen, sie können anhand von Beispielen lernen. Nach Strommessungen und Spannungsmessungen aus Trainingsschweißungen kann ein solches Netz in der Schweißsteuerung zerstörungsfrei eine Aussage zur Qualität der Schwei-

ßung machen. Da auftretende Störungen erkannt und neu angelegt werden können, kann die Qualitätssicherung an sich ändernde Produktionsbedingungen angepasst werden. Durch entsprechendes Training können z. B. Elektrodenverschleiß, Änderung der Parameter, Elektrodengeometrie, Werkstückdicke, Nebenschluss, u. a. erkannt und deren Auswirkungen auf die Schweißung vorausgesagt werden.

In [3.2.14] wird über die Möglichkeiten und praktische Anwendung eines Fuzzy-basierenden Überwachungssystems für Punkt- und Buckelschweißanwendungen berichtet. Durch den Einsatz der Fuzzy-Musteranalyse ist ein Qualitätsüberwachungsverfahren entstanden, das eine einfache Signalaufnahme direkt im Schweißprozess mit konkreten Qualitätsinformationen verbindet. Das vorgestellte MQ-Fuzzy-System arbeitet mit einer detaillierten Aufzeichnung von Spannung und Strom und dem resultierenden Widerstand (bis ca. 5000 Messwerte pro Sekunde). Am Anfang muss das System mit den Ergebnissen, z. B. der zerstörenden Prüfungen „angelernt“ werden. Daraus werden automatisch die individuellen Toleranzen über die gesamten Muster ermittelt und es entsteht im Fuzzy-Gerät quasi eine Beschreibung für die Schweißqualität. Beispiele haben gezeigt, dass MQ-Fuzzy eine Vielzahl von Störungen im Schweißverlauf detektiert.

Die **Qualitätsreglung** überwacht durch Aufnahme und Auswertung bestimmter physikalischer Größen den Schweißprozess und greift, wenn erforderlich, in diesen ein. Zum Ausgleich der auftretenden Störung werden in der Regel die Parameter Schweißstrom und/oder die Schweißzeit alteriert, um das gewünschte Ziel zu erreichen. Ein großer Fortschritt aller Systeme gegenüber älteren und bereits untersuchten Anlagen ist die Nutzung mehrerer bzw. neuartiger Führungs- und Stellgrößen, mathematischer Verknüpfung der ermittelten Signale dank verbesserter Leistungsfähigkeit der Elektronik und Rechentechnik.

Ein Messtechnikhersteller [3.2.8] stellte in diesem Sektor eine sogenannte Technologiesteuerung vor. Dabei handelt es sich um eine Mittelfrequenzinverterstromquelle mit integrierter Steuerung, die zwei Servoantriebe für die Elektrodenbewegung der Schweißzange und den Zangenausgleich ansteuert. Als Prozessreglung wurde das so genannte Kraft-Master-Regelverfahren entwickelt und eingesetzt. Es basiert auf dem Prinzip der Kalibrierschweißung. Während der Kalibrierschweißung wird der Schweißstrom konstant auf den eingestellten Wert geregelt. Ohne Störeinflüsse wird bei optimaler Wahl von Schweißzeit, Schweißstrom und Elektrodenkraft eine gute Schweißverbindung hergestellt. Die während dieser Schweißung gemessenen Daten werden gespeichert. Nach Umschalten auf die Betriebsart „Regelung“ werden alle folgenden Schweißungen mit den abgespeicherten Daten geregelt durchgeführt.

Ein neues Regelverfahren beim Widerstandspunktschweißen ist das IQR-System (Intelligentes Qualitätsregelungssystem) [3.2.12, 3.2.13]. Mit dieser Methode werden Störgrößen wie Blechdickenschwankungen, Beschichtungsvariationen, Nebenschluss oder Elektrodenverschleiß durch Regelung mittels einer U-I-Kennlinienauswertung kompen-

siert. Der IQR-Regler sorgt durch seine einfache Handhabung für eine Zeit- und Kostenersparnis bei konstant hoher und sicherer Punktqualität. Es können aufwendige Programmierzeiten für jeden einzelnen Schweißpunkt bei Roboteranwendungen deutlich reduziert werden. Durch die direkte Qualitätsüberwachung nach Fuzzy-Klassifikation kann eine Qualitätsaussage zum Widerstandspunktschweißen Online getroffen werden. Mit der IQR-Reglung und der Fuzzy-Überwachung kann ein prozesssicheres Schweißen von hochfesten Materialien gewährleistet werden.

Eine prozessintegrierte Stromreglung mit Ultraschallmessung zeigte die Möglichkeit auf, die Qualität der Schweißpunkte (Punktdurchmesser) schon während des Schweißprozesses mittels Ultraschalltechnik zu messen, zu überwachen und gegebenenfalls den Schweißstrom zu regeln. Mit transversal polarisierten Ultraschallwellen, die von Metallen im flüssigen Zustand abgeschwächt werden, wird die Größe des aufgeschmolzenen Schweißvolumens bestimmt. Ein integrierter Regler vergleicht die Messung mit einer Musterkurve, berechnet daraus Stromsollwerte und regelt den Strom innerhalb der Taktzeit [3.2.3].

In [3.2.2] wird eine Technologiesteuerung für das Widerstandsschweißen auf Basis einer Mittelfrequenz-Inverterstromquelle mit integrierter Servoantriebssteuerung für zwei Achsen sowie Elektrodenkraft- und Schweißzangenausgleich vorgestellt. Der Technologiesteuerung stehen, neben den Signalverläufen von Schweißstrom und Elektrodenspannung, die Kraft- und Wegverläufe der Elektroden sowie des Zangenausgleichs zur Prozessreglung und Qualitätsbeurteilung zur Verfügung. Das Ziel, mit der Erstellung der Schweißverbindung reproduzierbarer Qualität in naher Zukunft auch eine 100 %ige Prüfung der Schweißpunkte zu verbinden ohne zusätzliche Sensorik einzusetzen, ist mit der Kombination von Servoschweißzange und Technologiesteuerung näher gerückt.

3.2.4 Simulation von Widerstandsschweißprozessen

Die Finite-Element-Methode stellt auch in der Widerstandsschweißtechnik ein Berechnungsmodell dar, das sich über die letzten Jahre immer mehr verbessert hat und somit auch immer mehr Anwendung in der Praxis erfährt. Die Software SPOTSIM [3.2.17] ist ein Simulationsprogramm für den Widerstandspunktschweißprozess, das eine Werkstoffdatenbank mit Angaben zu thermophysikalischen und thermomechanischen Eigenschaften der Stähle sowie eine Schweißmaschinen- und Elektrodendatenbank einschließt. Die Simulationssoftware ermöglicht die Bestimmung der Schweißlinsenabmessungen, des Elektrodeneindrucks, der Spaltweite zwischen den Blechen, die Vorhersage des Auftretens von Schweißspritzern und das Erstellen von Schweißbereichsdiagrammen.

Zur Ermittlung der Schweißnahtgröße auf der Grundlage der Überwachungsparameter sind als entwickelte Verfahren numerische Simulation und neuronale Netzwerktechniken verfügbar.

Eine weitere Software im Bereich der Simulation stellt SORPAS dar. Sie simulierte eine Dreiblechschweißung. Um mit dieser Software arbeiten zu können, sind nach Herstellerangaben keine Kenntnisse der Finite-Elemente Methode erforderlich (Dr.-Ing. P. Xu, Berlin), [3.2.3].

3.2.5 Arbeits- und Gesundheitsschutz

In [3.2.21] werden Diagramme zu EMVU-relevante Feldemissionen vorgestellt, die zulässige Abstände des Bedienungspersonals von der Schweißmaschine vorgeben. Es wurde eine Klassifizierung von Widerstandsschweißmaschinen hinsichtlich der zu erwartenden Magnetfeldexpositionswerte vorgenommen. Sowohl für Altgeräte als auch für Neugeräte sind diese Ergebnis von hoher Bedeutung. Informationen über die Feldemissionen liegen somit für Punkt- und Buckelschweißmaschinen umfassend vor. Handlungsbedarf ergibt sich für andere Widerstandsschweißmaschinen. Ein neues Forschungsvorhaben beschäftigt sich deshalb mit der Verringerung der elektromagnetischen Störemissionen von Widerstandsmaschinen durch leistungsteilinterne Maßnahmen.

3.2.6 Forschungsansätze

Für zukünftige Forschungsschwerpunkte sind folgende Ansätze möglich:

- Verfahrensoptimierung beim Fügen
 - hoch- und höchstfester Stahlwerkstoffe (mit Beschichtungen) in Kombination mit weichen Stahlwerkstoffen sowie beim Widerstandsschweißen von Magnesiumlegierungen und höher kohlenstoffhaltigen Stählen
 - durch kombinierte Verfahren (z. B. Punktschweißkleben)
- Weiterentwicklung der Servoschweißzange
- Weiterentwicklung der Simulationsprogramme
- Standmengenuntersuchungen von Elektroden
- Planung und Prozess-Simulation,
- Ermittlung optimaler Prozessgrößen und Stromprogramme
- Weiterentwicklung der Online-Qualitätsprüfung (Sensortechnik)
- Optimierung der Bedieneroberflächen an den Schweißsteuerungen

3.3 Laserstrahlschweißanlagen

Die Techniken der Lasermaterialbearbeitung, insbesondere Schneiden und Schweißen, sind seit einem längeren Zeitraum bekannt. Trotzdem ist das Gebiet der Lasermaterialbearbeitung durch umfangreiche Innovationen geprägt. Kontinuierlich werden Neuentwicklungen am Produkt präsentiert – leistungsfähigere Laserstrahlquellen, verbesserte Strahlführungssysteme, optimierte Bearbeitungsoptiken, ausgefeiltere Maschinenkonzepte und nicht zuletzt hochflexible Systemankopplung und Programmieretechniken.

Mit Blick auf die eingesetzten Strahlquellen werden Festkörperlaser künftig verstärkt für Applikationen eingesetzt, die bisher ausschließlich CO₂-Lasern vorbehalten waren.

Aufgrund ihrer Qualitäten werden sich CO₂-Systeme weiter auf dem Markt behaupten.

Der Diodenlaser mit seinem hohen Wirkungsgrad und Leistungen im einstelligen kW-Bereich ist in der Direktanwendung aufgrund seiner schlechten Strahlqualität und damit geringeren Energiedichte noch auf ausgewählte Anwendungen limitiert, durchläuft derzeit jedoch einen hochdynamischen Entwicklungsprozess. Von dieser Entwicklung profitieren auch diodengepumpte Nd:YAG-Laser durch Verbesserungen in Wirkungsgrad, Lebensdauer und Strahlqualität [3.3.1].

3.3.1 Strahlquellen

3.3.1.1 CO₂-Gaslaser

Auf dem Gebiet der CO₂-Gaslaser wird das Bild von der konsequenten Weiterentwicklung etablierter Systeme geprägt. Kundenforderungen nach kompakten, robusten Strahlquellen mit hohem Integrationsgrad, langen Wartungsintervallen, hoher Servicefreundlichkeit kombiniert mit der Applikation angepassten hohen Laserleistungen und guter Strahlqualität bestimmen die Entwicklungsschwerpunkte der Gerätehersteller. Die modernen Strahlquellen sind durch eine sehr kompakte und stabile Resonatorgeometrie gekennzeichnet, die eine applikationsangepasste Leistungsskalierung in Verbindung mit optimierter Strahlqualität im Bereich von einigen 100 W bis hin zu 20 kW bietet. Dabei hat sich im kW-Bereich der Einsatz von HF-Generatoren zur Anregung längs- und quer-geströmter CO₂-Gaslaser durchgesetzt.

Neben geströmten Systemen, wo dem Gaskreislauf im Resonator ständig frisches Resonatorgas zugeführt werden muss, stellen CO₂-Laser mit plattenförmiger Resonatorgeometrie die „Slab-Laser“ mit Ausgangsleistungen bis etwa 5 kW eine in der Materialbearbeitung etablierte Weiterentwicklung ungeströmter CO₂-Laser dar. Das Funktionsprinzip des Slab-Lasers gestattet einen kompakten Aufbau der Strahlquellen, den Wegfall der Gasumwälzung und externen Gasversorgung bei minimalem Gasverbrauch in Verbindung mit einer sehr guten Strahlqualität und verringertem Serviceaufwand.

3.3.1.2 Festkörperlaser

Durch die Weiterentwicklung der Hochleistungsdiodenlaser und der damit verbundenen Senkung des Preisniveaus der Dioden stellen diodengepumpte Nd:YAG-Laser eine Al-

ternative zum lampengepumpten Laser dar. Die Pumpquellen (Dioden) weisen eine um den Faktor 10 höhere Lebensdauer auf, womit sich deutlich verlängerte Wartungsintervalle ergeben. Bedingt durch die bessere Abstimmung der Diodenemission auf die Absorption des Nd:YAG-Kristalls ergibt sich mit rund 10 % ein höherer Gesamtwirkungsgrad bei Ausgangsleistungen der Strahlquellen bis 6 kW. Aufgrund einer deutlich besseren Strahlqualität ergeben sich Vorteile im Bereich einer geringen Wärmeeinbringung durch einen kleinen Fokussdurchmesser und eine höhere Flexibilität durch eine größere Schärfentiefe [3.3.2].

Die Attraktivität der Diodenlaser als kostengünstiger Ersatz für Bogen- und Blitzlampen basiert auf deren hoher Effizienz und langen Lebensdauer. In Verbindung mit der hervorragenden Strahlqualität und der daraus resultierenden guten Fokussierbarkeit werden neue Laserkonzepte möglich, bei denen die qualitätsmindernden thermischen Linsenwirkungen im Laserkristall reduziert sind. Bei Systemen für kommerzielle Anwendungen haben sich drei Konzepte herausgebildet, die intensiv untersucht werden: der Stab-, der Scheiben- und der Slablaser (Bild 13).

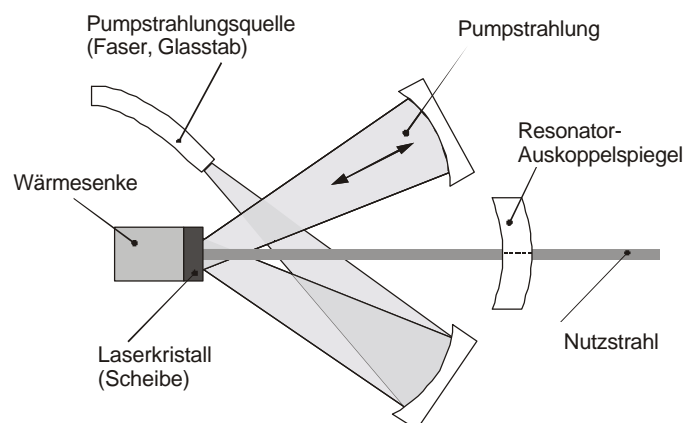


Bild 13 Schematischer Aufbau eines Scheibenlasers

Für Schweißanwendungen im Multi-Kilowattbereich ist derzeit einzig der diodengepumpte Stablaser industriell umgesetzt. Zahlreiche industrielle Einsatzfälle belegen die Vorteile dieses Lasers. Durch spezielle Anpassungen könnte die Strahlqualität noch weiter verbessert werden, allerdings erscheint das Potenzial für weitere wesentliche Verbesserungen der Strahlqualität wegen der unvermeidbaren und qualitätsmindernden thermischen Linse im Laserkristall begrenzt. Ziel zukünftiger Entwicklungen im Bereich Multi-Kilowatt-Festkörperlaser ist die Erhöhung der Strahlqualität auf ca. 5 mm x mrad um eine Einkopplung des Strahles in Lichtleitfasern von 100 bis 200 μm Kerndurchmesser zu ermöglichen. Damit stünde aus dem Blickwinkel der Fokussierbarkeit ein System für die Fertigung zur Verfügung, welches mit den besten heute verfügbaren CO₂-Lasern vergleichbar wäre. Aus heutiger Sicht haben sowohl der Innoslab- als auch der Scheibenlaser das Potenzial, dieses Ziel zu erreichen. Für die Gerätehersteller ergibt sich die

Forderung bei der Umsetzung dieser Konzepte in praxisgerechte Lösungen, die jeweiligen Vorteile der Konzepte in kostengünstig zu fertigende, robuste kommerzielle Systeme umzusetzen. Im Leistungsbereich unter 100 W haben Systeme auf Basis von Slab- und Scheibenlaser ihre Leistungsfähigkeit bereits unter Beweis gestellt, das Konzept des Scheibenlasers für Anwendungen im kW-Bereich steht vor seiner industriellen Einführung [3.3.3].

3.3.1.3 Diodenlaser

Der Diodenlaser entwickelt sich mehr und mehr zum marktreifen Werkzeug [3.3.4]. Der konventionelle Lasermarkt wird durch Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) in der Leistungsklasse von 4 bis 5 kW in industriellen Applikationen ergänzt. Entwicklungen zielen einerseits auf die Verbesserung der Fokusgeometrie durch weiterentwickelte Optiken und andererseits in der Erhöhung der Leistung und Lebensdauer pro Barren durch Leistungssteigerung der Halbleiterbauelemente und die Weiterentwicklung spezieller Kühl- und Montagetechniken. Dies ermöglicht völlig neue Strahlquellen. Durch die gegenüber früheren Diodenlasern verbesserte Strahlqualität ermöglichen moderne Geräte die Faserkopplung mit einer zirkular symmetrischen TOPHAT-Verteilung in der Arbeitsebene. In Verbindung mit einer Faserkopplung werden Anwendungen an schwer zugänglichen Stellen oder im Bereich mobiler Lasersysteme möglich. Durch die sehr kompakte Bauform von Diodenlaserköpfen sind beste Voraussetzungen für eine Integration gegeben. HLDL besitzen das Potenzial viele neue Anwendungen zu erschließen und teilweise einfacher und besser zu bewältigen als etablierte Strahlquellen. Mit einem Gesamtwirkungsgrad von über 30 % und einer typischen Diodenlebensdauer von über 15000 Stunden gehören HLDL zu den kostengünstigsten Fertigungswerkzeugen mit niedrigen Betriebskosten.

3.3.2 Anlagentechnik/Sensorik/Prozessüberwachung

Im Bereich von Laserbearbeitungssystemen ist ein Anstieg maßgeschneiderter kundenorientierter Maschinen- und Systemlösungen die möglichst flexibel eingesetzt werden können, zu verzeichnen. Maschinenhersteller stehen insbesondere bei der Entwicklung von Sondermaschinen unter starkem Kosten- und Wettbewerbsdruck. Einem in Zusammenarbeit mit dem Kunden erstellten Lastenheft kommt im Hinblick auf die Positionierung des eigenen Produktes und der Vergleichbarkeit von Produkteigenschaften große Bedeutung zu.

Bei der Entwicklung von Laserbearbeitungsköpfen zeichnet sich ein Trend hin zu integrierter Sensorik ab. Die Integration einer Schutzglasüberwachung in Schweißköpfen für Nd:YAG-Laser in Verbindung mit Schnellwechselsystemen erfolgt mit Blick auf die Servicefreundlichkeit. Neue Entwicklungen beinhalten, neben integriertem Cross-Jet, Möglichkeiten zur Temperaturüberwachung von Strahlteiler und Fokussierlinse. Integrierte Medienführungen für Crossjet, Kühlwasser und Arbeitsgase sind mittlerweile Standard.

Bei Schweißköpfen für CO₂-Laser hoher Leistungen finden sich neben wassergekühlten Spiegeln Einrichtungen zur kombinierten Temperatur und Positionsüberwachung [3.3.5].

3.3.2.1 Prozesssensorik

Die zunehmende Anzahl und Vielfalt der Applikationen zum Laserstrahlschweißen hat auch den Bedarf an effizienten Prozessüberwachungssystemen erhöht, um eine höchstmögliche Bearbeitungsqualität sicherzustellen. Durch den Einsatz von Temperatur-, Plasma- und Rückreflexdetektoren ist eine Online-Überwachung von Schweißprozessparametern möglich. Ergänzend hierzu können Fokuslage und Einschweißtiefe auf der Basis geometrischer Größen parametrisiert und visualisiert werden.

Um toleranzbedingte Abweichungen zwischen theoretischem und tatsächlichem Verlauf einer Schweißnaht zu detektieren und das Schweißwerkzeug optimal zu positionieren werden Systeme zur optischen Nahtverfolgung eingesetzt, die in nahezu alle bestehenden Schweißanlagen integriert werden können.

3.3.2.2 Laserhandbearbeitung

Im Bereich der Reparaturschweißungen und des Materialauftragens im Werkzeug- und Formenbau finden flexible Laser-Handarbeitsplätze Anwendung, die alle Anforderungen erfüllen, die sich aus der wirtschaftlichen Bearbeitung komplexer, filigraner Formen ergeben. Bei der Konzeption von Laserhandarbeitsplätzen, die optimal auch für Schweißverbindungen im Bereich der Feinwerk- und Mikrotechnik eingesetzt werden können stehen aus Anwendersicht den Forderungen nach optimaler Performance und Flexibilität ergonomische Gesichtspunkte sowohl im Hinblick auf das Handling, die Sitzhaltung, Prozessbeobachtung und Arbeitsschutz gegenüber.

Neben Lösungsvarianten, bei denen der Bediener das Werkstück bewegt, ermöglichen Lichtleiter, die den Laserstrahl flexibel zur Schweißstelle übertragen die Entwicklung manueller Laserschweißsysteme als handgeführte Systeme, wobei die Strahlquelle vom Bediener frei geführt wird bzw. die Strahlbewegung teilmechanisiert erfolgt. Diese Systeme zeichnen sich durch einen hohen Integrationsgrad hinsichtlich Prozessregelung, Prozessbeobachtung und Lasersicherheit aus. Mit einer Kombination aus mobilem Laser und handgeführtem Bearbeitungskopf entsprechen diese Systeme Forderungen der Anwender zur Bearbeitung maximaler Bauteilgrößen, ortsunabhängig auch an schwer zugänglichen Stellen. Bei Nutzung aller lasertypischen Vorteile können damit bisherige Restriktionen durch die Systemtechnik überwunden werden.

3.3.2.3 Remote-Welding-Systeme

Die Kombination von hohen Ausgangsleistungen mit gleichzeitig hoher Strahlqualität bei diffusionsgekühlten CO₂-Slablasern ermöglicht den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz von Remote-Laserschweißsystemen. Die für das Tiefschweißen erforderliche hohe Energiedichte wird aufgrund der über den gesamten Leistungsbereich vorliegenden Grundmo-

denstruktur auch bei sehr großen Fokussierbrennweiten erreicht. Die Kombination hoher Laserleistungen mit der Scannertechnik erweitert das Einsatzspektrum des Lasers um ein sehr schnelles und flexibles Fügeverfahren, da sich gegenüber kartesisch oder mit Robotern geführten Arbeitsoptiken unproduktive Nebenzeiten eliminieren lassen [3.3.6, 3.3.1].

Auch für Festkörperlaser mit hohen Strahlleistungen im cw-Betrieb steht nun eine programmierbare Fokussieroptik zur Verfügung, welche eine Strahlbewegung über Galvanoscanner realisiert und damit die gewünschte Schweißkontur ohne zusätzliche NC-Achsen oder Steuerungen ermöglicht [3.3.6]. Der Interessenkonflikt zwischen hohen Genauigkeiten und gleichzeitig hohen Scangeschwindigkeiten wurde mit neuen Systemen weitestgehend gelöst [3.3.1].

Neben Festkörperlasern werden auch gut fokussierbare CO₂-Laser im kW-Bereich für Schweißapplikationen eingesetzt. Eine drastische Erhöhung der technologisch möglichen Schweißgeschwindigkeiten bedingt extreme Anforderungen an die Dynamik der Laserbearbeitungsmaschinen, die selbst mit auf hohe Dynamik optimierten Lasermaschinen mit Linearantrieben nicht in jedem Fall zufriedenstellend erfüllt werden. Als Alternative zu den gebräuchlichen kartesischen und verketteten Achssystemen konventioneller Laserbearbeitungsmaschinen können auch hier Strahlablesysteme auf der Basis von Galvanometerscannern und entsprechender Strahlfokussierung sinnvoll eingesetzt werden [3.3.7].

3.3.2.4 Telepräsenz/Ferndiagnose

Im Bereich der Hochleistungsfestkörperlaser ist eine deutliche Entwicklung bei diodengepumpten Systemen zu verzeichnen. Diodengepumpte Stabsysteme erreichen bei Ausgangsleistungen bis zu 6 kW Gerätewirkungsgrade deutlich über 10 %. In Verbindung mit einer Strahlführung über Lichtleitkabel zur Bearbeitungsstation steht Anwendern ein extrem leistungsfähiges und flexibles Schweißwerkzeug zur Verfügung. Mit entsprechender Steuerung ausgestattet wird durch die Einbindung der Strahlquelle in die Telepräsenz eine ständige Überwachung der Betriebsparameter durch Bediener oder Serviceexperten. Durch die Möglichkeit der Ferndiagnose können Störungen schnell diagnostiziert und beseitigt werden.

3.3.2.5 Hybridverfahren

Gerade die Forderungen nach leistungsfähigen Fügeverfahren, beispielsweise im Karosseriebau mit Aluminiummischbauweisen, führt zu einer steigenden Nachfrage nach hybriden Fügetechniken als Kombination aus Laser- und Lichtbogenschweißprozessen. Dabei ist eine Kombination sowohl mit Nd:YAG-Festkörperlasern als auch mit CO₂-Gaslasern realisierbar.

Durch die Kombination des Laserschweißens mit Schutzgasschweißverfahren wie beispielsweise dem MIG-Schweißen werden die Vorteile der beiden Verfahren in Anwen-

dungen beispielsweise in der Automobilindustrie konsequent genutzt. Gegenüber den Einzelverfahren werden Einbrandgeometrie, Spaltüberbrückung, Schweißgeschwindigkeit, Streckenenergie, mechanisch-technologische Eigenschaften der Verbindung, Investitionskosten und Anwendungsspektrum optimal gestaltet. Das Kernstück eines Laser-MIG-Hybrid-Schweißsystems wird durch den Schweißkopf gebildet. Umfangreiche Entwicklungsarbeiten auf gerätetechnischem Gebiet mündeten in einen robotertauglichen, modularen Bearbeitungskopf mit integrierter Abstandssensorik. Daneben wurden bei der Entwicklung hauptsächlich Forderungen nach großer Flexibilität und Beweglichkeit, kompakter Bauform, guter Positionierbarkeit von Laserstrahl und Lichtbogen zueinander und hoher Prozesssicherheit entsprochen.

Die Entwicklung und der Einsatz hybrider Prozesse des Laserstrahlfügens beschränkt sich nicht nur auf die Verfahrenskopplung Laser – MSG – Schweißen. Beim induktiv unterstützten Laserstrahlschweißen wird durch eine gezielte Beeinflussung der Abkühlbedingungen das Laserstrahlschweißen für aufhärtungsanfällige Werkstoffe ermöglicht. Den Forderungen nach einer prozessbegleitenden Wärmebehandlung durch Vorwärmung, Schweißen bei konstanter Haltetemperatur oder Nachwärmung beim Schweißen höherlegierter Stähle kann durch die Integration der induktiven Erwärmung in den Laserprozess entsprochen werden, ohne die lasertypischen Vorteile wie kurze Taktzeiten, geringe thermische Belastung der Bauteile und kleine Wärmedehnung einzuschränken. Insbesondere für das Laserschweißen von Aluminiumlegierungen, welche immer mehr an Bedeutung gewinnen, werden neue Methoden zur Beeinflussung der Geometrie und Qualität der Schweißnähte grundlegend untersucht. Die Anforderungen an den Fügeprozess richten sich neben der Wirtschaftlichkeit zunehmend auf die erreichbare Qualität der Fügeverbindungen. Derzeitig noch grundlagenorientierte Untersuchungen verfolgen den Ansatz direkt die Schmelzbadgeometrie durch die Wirkung elektromagnetischer Kräfte zu beeinflussen [3.3.8]. Mit Hilfe des magnetisch unterstützten Laserstrahlschweißens kann auf das Strömungsfeld gezielt eingewirkt werden, wobei die elektromagnetischen Volumenkräfte die Schmelzbadströmung unmittelbar beeinflussen. Damit lassen sich der Laserschweißprozess und die Eigenschaften der Schweißverbindung bedarfsgerecht gestalten. Vor diesem Hintergrund werden sich künftige Arbeiten vorwiegend mit der Thematik der Qualitätsverbesserung und der gezielten Gestaltung der Nahtquerschnitte beschäftigen.

Insgesamt besitzen Laser-Hybrid-Prozesse ein großes Potenzial, um unterschiedlichste Werkstoffe anforderungsgerecht zu verarbeiten, welches in unterschiedlichen Applikationen zunehmend genutzt wird.

3.3.3 Arbeitsschutz/Lasersicherheit

Die Sicherheit von Lasereinrichtungen wird in der DIN EN 60825 geregelt, die seit Juli 1993 gilt und ist für Hersteller von Laseranlagen bindend. Teil 1 dieser Norm (Juli 1994) enthält die Vorschriften zur Klassifizierung von Anlagen sowie Anforderungen an die

Schutzeinrichtungen und die Benutzer-Richtlinien. Die im November 2001 erfolgte grundlegende Überarbeitung führte zu einer Vereinfachung der Klasseneinteilung von Lasergeräten und einer Reduzierung der bisher zu hoch gewählten Sicherheitszuschläge.

Mit der neuen Norm DIN EN 60825-1 (VDE 0837 Teil 1): 2001-11 ergeben sich für die Hersteller sowie für Betreiber von Laseranlagen Veränderungen, die vor allem die Einteilung von Lasergeräten betreffen. Für Gerätehersteller ergeben sich somit Forderungen, die bei der Konzeption von Laserschweißsystemen zu berücksichtigen sind. Ab dem 01.01.2004 müssen neu in den Verkehr gebrachte Anlagen entsprechend der neuen Vorschrift klassifiziert werden. Eine Pflicht zur Neuklassifizierung für vorhandene Lasereinrichtungen und solche, die bis zum 31.12.2003 in Betrieb gehen, besteht nicht. Entsprechend der neuen DIN EN 60825-1 müssen Lasereinrichtungen der Klassen 3R, 3B und 4 der Berufsgenossenschaft gemeldet werden (bisher nur 3B und 4). Für den Betrieb von Lasereinrichtungen der Klassen 3B und 4 ist die schriftliche Bestellung eines Laserschutzbeauftragten erforderlich. Die Klasse 3R erfordert nur im Falle von unsichtbarer Laserstrahlung einen Laserschutzbeauftragten. Für die Laser der Klassen 3R, 3B und 4 müssen wie bisher Laserbereiche definiert und gekennzeichnet werden, sowie zum Schutz der Augen und/oder der Haut geeignete Augenschutzgeräte (Brillen) Schutzkleidung oder Schutzhandschuhe zur Verfügung stehen, wenn keine apparativen Maßnahmen wie eine Einhausung der Laseranlage möglich sind. Der Unternehmer hat für eine entsprechende Unterweisung seiner Angestellten, die mit Lasereinrichtungen der Klasse 1M, 2, 2M, 3R, 3B oder 4 aufhalten zu sorgen. Für Leitstrahl- und oder Vermessungsarbeiten dürfen nur Laser der Klassen 1, 1M, 2, 2M oder 3A verwendet werden. Die neuen MZB-Werte aus der DIN EN 60825-1 (VDE 0837 Teil 1):2001-11 sind ab sofort anstelle der bisherigen Werte anwendbar. Bestehende Berechnungen für die maximal zulässige Bestrahlung und die daraus resultierenden Laserbereiche müssen nicht neu bestimmt werden [3.3.9].

3.3.4 Qualitätssicherung

Zwei zentrale Zielstellungen beim Betrieb von Laserstrahlschweißanlagen sind Produktion und Prüfung qualitativ hochwertiger Fügeverbindungen. Im Zuge der verstärkten Marktdurchdringung haben sich automatisierte Systeme für die Qualitätssicherung verbreitet. Beim Schweißen steht die Qualitätssicherung im Sinne der Vermeidung der Auslieferung von Ausschussware an den Kunden im Vordergrund. Gleichzeitig ergeben sich die Reduzierungen der Reklamationskosten und die Dokumentation der Bearbeitungsergebnisse. Beim Schweißen liegt aus heutiger Sicht der Schwerpunkt der Umsetzung als Reaktion auf die ISO 9001 / VDA 6-4, die Lieferanten zur Einführung und Umsetzung von QS-Systemen zwingt. Die komplexen Wirkzusammenhänge beim Laserstrahlschweißen machen für eine Analyse insgesamt drei Themenkreise zugänglich: die Energieeinkopplung, Laser-Plasma-Wechselwirkung und Schmelzbaddynamik.

Hilfsmittel für die objektive Prozessvisualisierung können dazu beitragen, Einarbeitungszyklen beim Know-how-Transfer zwischen Prozessentwickler und Anlagenbediener deutlich zu verkürzen.

Automatische Qualitätssicherungssysteme setzen an unterschiedlichen Stellen im Fertigungsprozess an. Einerseits werden die Ausgangsparameter, zum Beispiel bei der Vermessung der Bauteilkanten oder des Fügespaltens überwacht, andererseits kann auch der Schweißprozess, die Schweißnaht und selbst das Bauteil nach der Schweißung begutachtet werden [3.3.10].

Durch den Kunden werden mit steigenden Qualitätsansprüchen zunehmend Prüf- und Vermessungsaufgaben gefordert, die in Anlagenkonzepten zu integrieren sind.

- Online-Überwachung des Schweißprozesses selbst (zum Beispiel Plasmamonitoring)
- On- und Offline-Bestimmung geometrischer Bauteilkriterien mittels Bildverarbeitung
- Feststellung metallurgischer Kriterien wie Risse und Poren, die in der Erstarrung entstehen durch klassische zerstörungsfreie Methoden der Bauteilprüfung (Wirbelstrom, Ultraschall, Röntgen) und zerstörende Prüfmethode
- On- und Offline-Überwachung der Anlagenparameter.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Kriterien ist keine 100%ige Kontrolle aller möglichen Parameter realisierbar. Eine Kombination unterschiedlicher Geräte sind aus Gründen explodierender Kosten und steigender Fehlerraten ebenfalls Grenzen gesetzt. Moderne Qualitätssicherungssysteme der zweiten Generation zeichnen sich durch Robustheit, hohe Performance, einfache, zweckorientierte Bedienung und Servicefreundlichkeit aus. Moderne Sensorsysteme, ausgestattet mit einsatzadäquaten Algorithmen bieten einen Doppelnutzen. Sie prüfen den Prozess nicht nur hinsichtlich Fehlstellen in der Schweißnaht, sondern liefern gleichzeitig einen Beitrag zur Verbesserung der Prozessstabilität und dadurch zur Steigerung der Produktivität. Die Einstellung eines stabilen Prozesses wird extrem erleichtert.

Wichtige Eingangsgrößen des Laserstrahlschweißprozesses sind die die Qualität des Laserstrahls entscheidend beeinflussenden Kenngrößen wie Strahlprofil, Strahldurchmesser, Strahldivergenz, Strahlverlauf (M^2) und Strahllagestabilität. Mit geeigneten optischen Messkonzepten können diese Kenngrößen reproduzierbar ermittelt werden und bilden die Grundlage einer präzisen numerischen Strahlanalyse [3.3.11]. Die Möglichkeit zur schnellen und reproduzierbaren Diagnostik von Lasersystemen stellt in vielen Fällen die Basis für den eigentlichen technologischen Prozess dar und wird zunehmend in Gerätekonzepten integriert.

3.3.5 Forschungsansätze

- Weiterentwicklung Strahlquellen (Lebensdauer, Strahlqualität, Wirkungsgrad, ...) insbesondere diodengepumpte Festkörperlaser aber auch CO_2 -Slablaser

- Erschließung neuer Anwendungen für Diodenlaserdirektanwendung
- Weiterentwicklung Optikkonzepte mit integrierter Sensorik/Prozesskontrolle
- Einsatz von Remote-Welding-Systemen mit Hochleistungslasern (Scanneroptiken/lange Brennweiten)
- Integration von Prozesssensorik in Richtung QS-Systeme
- Möglichkeiten zur zweckorientierten Prozessvisualisierung in Richtung Anwenderunterstützung
- Flexible/modular aufgebaute Maschinenkonzepte
- Lasersysteme mit Ferndiagnosemöglichkeiten/Telepräsenz
- Onlinemessung und Dokumentation relevanter Strahl- und Prozesskenngrößen
- Optimierung und applikationsabhängige Entwicklung von Laser-Hybridprozessen
- Nutzung des Potenzials der Laserhandbearbeitung und mobiler Lasersysteme

3.4 Elektronenstrahlschweißanlagen

Das Elektronenstrahlschweißen befindet sich seit über vierzig Jahren in der industriellen Anwendung, insgesamt wurden über 7000 Anlagen weltweit gebaut [3.4.1].

Kennzeichnend für dieses Schweißverfahren sind Nahtbreite-/Nahttiefe-Verhältnisse von 1 : 5 bis 1 : 30 bei Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 60 m/min. Im Vergleich zum Laserstrahlschweißen ist die Wärmeeinbringung um bis zu 50 % geringer und ermöglicht verzugsarme Schweißungen an endbearbeiteten Bauteilen sowie höchste Flexibilität bei der Werkstoffauswahl.

Das Schweißen unter Vakuumbedingungen ergibt qualitativ hochwertige Verbindungen, auch an schwierig schmelzschweißbaren Werkstoffen und Werkstoffkombinationen, frei von Anlauffarben und Gaseinschlüssen.

Die Prozessgrößen des Elektronenstrahlschweißens können einfach elektrisch gemessen, gesteuert und geregelt werden und erlauben damit eine umfassende Online-Prozesskontrolle.

Gerade in den letzten Jahren wurden auf dem Gebiet der Anlagentechnik wichtige Fortschritte gemacht. Die heute eingesetzten Elektronenstrahl-Generatoren sind betriebssicher und wartungsfreundlich. Sie ermöglichen eine flexible Strahlablenkung und Strahlformung bei hervorragender Strahllagestabilität. Variable Kammersysteme und bauteilspezifische Vorrichtungen senken die Nebenzeiten und lassen für nahezu jede Anwendung den Elektronenstrahl als Werkzeug geeignet scheinen. Die Auslegung der Anlagen, abhängig vom Anlagentyp, auf 10 bis über 20 Jahre Betriebsdauer, und die anschließende Nutzung der Altanlagen für den Neubau ist ressourcenschonend und nachahmenswert.

Nicht zuletzt das Non Vacuum Electron Beam Welding (NVEBW), also das Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre erlebt derzeit eine Renaissance und sollte bei der Verfahrenswahl durchaus Berücksichtigung finden [3.4.2, 3.4.3, 3.4.4].

Dass die in den vergangenen Jahrzehnten gebildete Meinung der mangelnden Anlagenflexibilität überholt ist und moderne Anlagen der neuesten Generation in Wirtschaftlichkeit und Einsatzbreite mit anderen Hochleistungsschweißverfahren durchaus konkurrieren können, wird nachfolgend übersichtsmäßig dargestellt.

3.4.1 Elektronenstrahlerzeugung, -führung und -vermessung

Der Elektronenstrahl wird mit Hilfe eines aus Kathode, Steuerelektrode und Anode bestehenden Triodensystemes (Strahlerzeugungssystem) im Vakuum erzeugt. Die dafür eingesetzte Kathode stellt jedoch nicht nur die Elektronen bereit, sie hat auch eine Reihe anderer Aufgaben zu erfüllen. Sie soll bei möglichst geringer Heizleistung höchste Strahlströme ermöglichen. Da für einen hohen Elektronenstrom in erster Linie eine hohe Temperatur an der Emissionsfläche der Kathode erforderlich ist, werden hochschmelzende Werkstoffe als Kathodenmaterial eingesetzt. Hier bietet sich neben Tantal besonders Wolfram an, das, teilweise mit Rhenium legiert, einen vergleichsweise geringen

Dampfdruck im Vakuum besitzt und somit eine verhältnismäßig lange Lebensdauer gewährleistet. Wie hoch die Heizleistung sein muss, um die Kathode auf die gewünschte Temperatur zu bringen, ist nicht nur von den Abmessungen abhängig, sondern auch von der Kathodenform und der Art der Heizung. Direkt beheizbare Bandedelektroden haben sich für Elektronenstrahlschweißmaschinen aus mehreren Gründen bewährt. Sie sind als ohmscher Widerstand in einen Stromkreis geschaltet und werden durch den Heizstrom direkt erwärmt. Bandkathoden weisen einen hohen Heizwirkungsgrad auf, haben eine geometrisch stabile Lage der Emissionsfläche und lassen sich praktisch als einziges Verschleißteil der Elektronenstrahlkanone rasch und problemlos austauschen. Bei modernen Anlagen ist dies innerhalb weniger Minuten erledigt [3.4.1, 3.4.5].

Standard bei heutigen Elektronenstrahl-Generatoren sind hochauflösende, nahezu strahlachsparelle Fernrohreinblicke, auch mit CCD-Kamera. Eine präzise Regelung von Hochspannung, Strahl- und Linsenstrom durch moderne Halbleitertechnik sowie die Möglichkeit der CNC-Ansteuerbarkeit garantieren in Verbindung mit fokusstabilisierten Strahlen gleichbleibende Arbeitsergebnisse. Durch neue konstruktive Maßnahmen ist die Reproduzierbarkeit der Auftreffposition des Strahles beim Kathodenwechsel ohne Nachjustierung auf bis zu $\pm 0,01$ mm verbessert worden, ein Wert der selbst für die Mikrobearbeitung ausreichend ist. Mit der Verwendung neuer keramischer Werkstoffe als Trägersysteme für Kathodensystem, Wehneltzylinder und Vergussmassen ist es gelungen, das erforderliche thermische Gleichgewicht des Generators in kürzeren Zeiten, auf niedrigerem Temperaturniveau zu erreichen. Durch optimierte Technologien in Strahlführung, -fokussierung und Leistungsregelung können Strahlstrom, -ablenkung und Strahlfokussierung nach beliebigen frei programmierbaren Funktionen und Datensätzen mit bis zu 100 kHz angesteuert werden. Da diese neuen Systeme praktisch trägheitslos arbeiten, sind Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 60 m/min entlang beliebiger Konturen möglich. Beispielsweise ist das in der Lasermaterialbearbeitung zur Zeit immer öfter eingesetzte Remote-Schweißen, also das Arbeiten mit über Optiken bewegtem Strahl und feststehendem Bauteil, bei möglichen Brennweiten des Elektronenstrahles von 1,5 m und mehr ebenfalls möglich und ergibt hervorragende Schweißergebnisse [3.4.1]. Funktionsgeneratoren lenken Strahlen dynamisch ab und erzeugen Sinus-, Rechteck-, Kreis-, oder Ellipsenkurvenformen, die insbesondere bei metallurgisch anspruchsvollen Werkstoffen oder größeren Werkstücktoleranzen ausgezeichnete Schweißergebnisse liefern. Die Amplituden reichen dabei üblicherweise bis zu $\pm 2^\circ$ bei 1 kHz.

Weiterreichende Einflüsse können diese schnellen Strahlablenksysteme beim Mehrstrahl- und Mehrfokusschweißen, beim Schweißen mit Zusatzwerkstoff, bei der Herstellung von Mischverbindungen und beim Elektronenstrahllöten bringen.

Beim Mehrstrahl- bzw. Mehrbahnschweißen wird ein Elektronenstrahl hoher Leistung schnell abgelenkt, so dass es nur in den Umkehrpunkten zum Aufschmelzen des Werkstoffes kommt und quasi gleichzeitig zwei oder mehr Schweißnähte entstehen. Die Ablenkfrequenz, abhängig von Werkstoff und Schweißtiefe, wird dabei so gewählt, dass

der Strahl in die Schweißposition zurückkehrt, ehe der für den Tiefschweißeffect erforderliche Dampfkanal sich schließt und die Schmelze erstarrt. Interessant ist diese Technik vor allem auch bei der Fertigung von achsparallelen Nähten bei rotationssymmetrischen Körpern, wie z. B. Schalträdern, wo gleichzeitig drei Schweißnähte um 120° versetzt geschweißt werden. Durch das symmetrische Aufschmelzen, Erstarren und Abkühlen der Schmelze ergibt sich ein spaltfreies Schweißen, eine gleichmäßige Spannungsverteilung und ein geringer Bauteilverzug.

Das Mehrfokusschweißen ist durch eine sich periodisch verändernde Fokusslage gekennzeichnet. Dies verbessert u. a. das Ausgasen der Schmelze und führt zu parallelen Nahtflanken. Ebenfalls möglich mit dieser Form der Strahlregelung ist das gleichzeitige Erzeugen einer Glättungsnaht sowie die Ausbildung einer optimalen Schweißnahtwurzel [3.4.6].

Ein spezielles, für das Schweißen mit Zusatzwerkstoff entwickeltes Ablenkraster zeigt Bild 14. Der Strahl wird so geführt, dass der Schweißzusatz über einen Schmelzvorhof in die Dampfkapillare einfließt. Gleichzeitig kann mit der Bewegung des Elektronenstrahles hinter der Kapillare ein Glätten der Nahtoberfläche innerhalb des Schmelzbades erreicht werden [3.4.7].

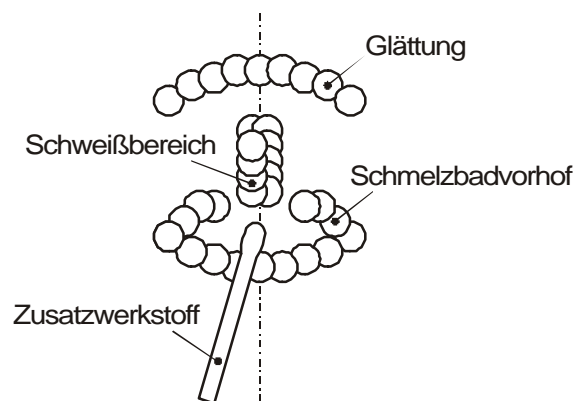


Bild 14 Ablenkraster zum Elektronenstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff [3.4.7]

Mit Hilfe von Pulsgeneratoren lässt sich der Wärmeeintrag in den Werkstoff weiter minimieren. Üblich sind Frequenzen bis 500 Hz und Pulszeiten bis 20 ms, die Pulsform und Frequenz sind dabei in der Regel unabhängig voneinander einstellbar.

Bei Beschleunigungsspannungen bis 60 (70) kV spricht man von Niederspannungsgeneratoren. Diese werden je nach Kundenanforderung mit 1 bis 45 kW Leistung gefertigt. Hochspannungsgeneratoren arbeiten üblicherweise mit Beschleunigungsspannungen von bis zu 150 kV und weisen einige technische und wirtschaftliche Vorteile auf. Bei Arbeitsabständen von bis zu 1500 mm werden geringere Nahtquerschnitte und größere Einschweißstiefen als mit Niederspannungsgeneratoren erzielt.

Mit den derzeit angebotenen Standardsystemen bis 60 kW Leistung werden Einschweißiefen von bis zu 200 mm in Stahl erreicht [3.4.2, 3.4.3, 3.4.4].

Für die Erzeugung des Vorvakuums im Elektronenstrahl-Generator werden üblicherweise Drehschieberpumpen verwendet, den erforderlichen Enddruck von $< 10^{-4}$ mbar stellen Turbomolekularpumpen ein. Sie sind lageunabhängig einsetzbar und garantieren ein trockenes, ölfreies Vakuum [3.4.5].

Bei Anlagen mit Leistungen ab 100 kW sind auch indirekt beheizte Kathoden in neu entwickelten Diodensystemen im Einsatz. Diese werden mit Hochfrequenz (typisch 84 MHz) angeregt und garantieren kompakte Strahlerzeuger, bei entsprechend hohen Kathodenlebensdauern und einer guten Strahlage- und leistungsstabilität [3.4.8].

Das bekannteste, speziell in Japan industriell eingesetzte Verfahren, um den Fokuspunkt und die Apertur des Elektronenstrahles zu ermitteln, ist der Arata-Beam-Test (AB-Test). Hier wird eine Zahnstange mit rechteckförmigem Strahlprofil in einem Winkel zwischen 30 und 60° zum Strahl positioniert. Nach Überfahren der Zahnstange mit dem Elektronenstrahl können anhand der Schnitt- und Schmelzbreiten die Fokuslage und die Strahlapertur recht genau bestimmt werden. In Ergänzung dazu wird bei dem in Deutschland entwickelten Strahlvermessungssystem DIABEAM zusätzlich die Leistungsdichteverteilung erfasst. Zur Abtastung des Elektronenstrahles wird ein Faradaykäfig in Kombination mit einem üblichen Schlitz- und Lochblendensensor eingesetzt [3.4.10, 3.4.11, 3.4.12]. Fokusverschiebungen beim Schweißen von bis zu 50 mm werden nach neuesten Untersuchungen zum Großteil den Abberationswirkungen des Strahlformungssystems und der Beeinflussung der Strahlbildung durch sein Eigenmagnetfeld zugeschrieben [3.4.13].

3.4.2 Nahtsuch- und Positioniersysteme

Für das Elektronenstrahlschweißen werden vorrangig Systeme eingesetzt, bei denen der Elektronenstrahl mit verringerter Leistung selbst als Messwerkzeug dient. Der quer über die Fuge abgelenkte Strahl liefert durch unterschiedlich starke Rückreflexionen Messwerte für die Koordinaten der Schweißnaht. Beim sogenannten Seam Scanner tastet der Elektronenstrahl das Bauteil vor dem Schweißen ab und speichert die Abweichungen der Schweißfuge von der Ideallinie. Anschließend erfolgt der Schweißprozess unter Berücksichtigung der vorher gewonnenen Messwerte. Eine Online-Regelung ist mit dem Seam Tracker möglich. Hier erfolgt das Abtasten, die Korrektur der Nahtabweichung und das Schweißen simultan. Dazu springt der Elektronenstrahl für eine extrem kurze Zeitspanne mit vorwählbarer Frequenz auf eine vor der Schweißstelle liegende Messposition. In Auswertung des Signals erfolgt die Korrektur des Strahles [3.4.6, 3.4.14]. Bei Abtastwiederhol frequenzen von 10 bis 30 Hz und Abtastzeiten von 1 ms beim Seam Tracker wurden keine durch das System bedingte Unregelmäßigkeiten an den Schweißnähten festgestellt [3.4.15].

3.4.3 Anlagenkonzepte

3.4.3.1 Arbeitskammern

Grundsätzlich ist das Schweißen unter Vakuum wesentlich preisgünstiger als unter Schutzgas und die Qualität der Schweißnähte ist unübertroffen.

Dennoch, das Elektronenstrahlschweißen wurde, und wird teilweise auch heute noch, als wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig zu modernen Schweißverfahren, wie beispielsweise dem Laserstrahlprozess, dargestellt. Grund hierfür ist, dass diese Vergleiche oftmals mit veralteten Großkammer-Elektronenstrahlschweißanlagen vergangener Jahrzehnte durchgeführt werden.

Durch den Einsatz moderner Pumpsysteme in Kammeranlagen mit Mehrfachvorrichtungen, Doppelkammer-, Schleusen-Shuttle-, Schleusen-Transfer-, 2-Stationen-Takt- sowie Durchlaufanlagen können die Nebenzeiten beträchtlich minimiert werden (Bild 15). So sind heute bei Taktanlagen Pumpzeiten ab 5 s (5×10^{-2} mbar) realisierbar, aber auch eine Kammeranlage mit einem Volumen von $1,5 \text{ m}^3$ arbeitet mit 4 min (2×10^{-2} mbar) bzw. 7 min (7×10^{-4} mbar) äußerst effektiv [3.4.3].

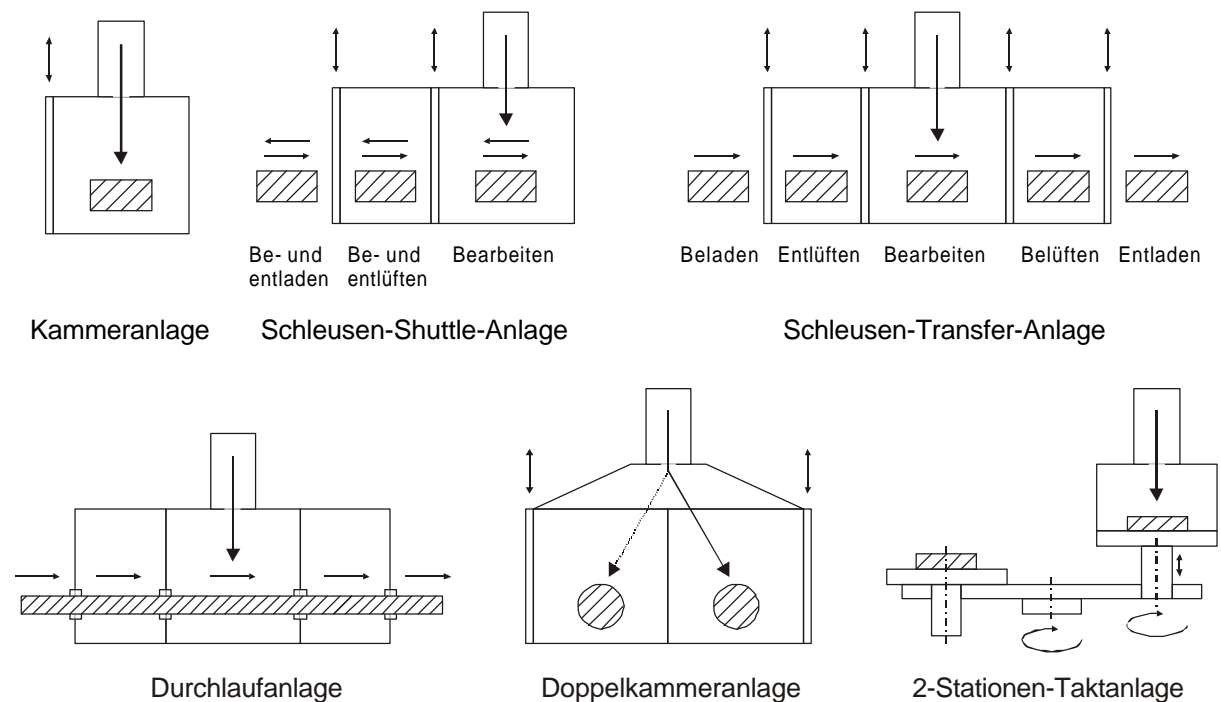


Bild 15 Bauprinzipien von Elektronenstrahlanlagen [3.4.1, 3.4.14]

Alle Kammermaschinen sind Universalanlagen, übliche Kammergrößen liegen zwischen $0,5$ und 20 m^3 . Sie sind sowohl von der Mechanik, als auch der Elektrotechnik in Modulbauweise ausgeführt und lassen sich leicht an unterschiedliche Bearbeitungsaufgaben anpassen. Bei den Schleusenmaschinen steht die Schweißkammer ständig unter Arbeitsdruck, zeitgleich mit dem Fügen wird die Vorkammer mit einem neuen Werkstückträger bestückt und evakuiert. Sobald die Schweißung beendet ist, werden die Werk-

stücke unter Vakuum ausgetauscht. Dieser Palettenwechsel dauert je nach Anlage nur 10 bis 20 s und je nach Teileanzahl pro Palette Bruchteile einer Sekunde bis wenige Sekunden je Teil.

Moderne Taktanlagen werden häufig für ein Großserienbauteil bzw. eine Werkstückfamilie mit ähnlichen Schweißaufgaben konzipiert. Sie weisen, mit entsprechend angepassten Kammern, kurze Be-, Entlade- und Pumpzeiten auf und werden mit mechanisierten Be- und Entladesystemen in Fertigungsstraßen integriert. Anwendung finden Taktanlagen u. a. im Automobilbau und dessen Zuliefererindustrie, wo sie zum Elektronenstrahlschweißen von Getriebe- und Kupplungsteilen, Schwingungsdämpfern oder Turbinen für Turbolader eingesetzt werden.

Durchlaufanlagen sind in erster Linie für die Bearbeitung von Endlosprodukten, wie z. B. Bimetallsägebändern, im Einsatz. Die Werkstücke werden über Vakuumschleusen und besondere Vorrichtungen in die Kammer geführt, kontinuierlich geschweißt und wieder über Schleusen ins Freie geführt [3.4.1, 3.4.14, 3.4.5].

3.4.3.2 Vakuumerzeugung

An Elektronenstrahlanlagen arbeiten nur Drehschieberpumpen unmittelbar gegen Atmosphärendruck. Sie übernehmen die Funktion von Vorpumpen für die übrigen Vakuumeinrichtungen und erreichen einen Enddruck von 10^{-1} bis 10^{-2} mbar. Wälzkolbenpumpen (Rootspumpen) werden ihnen in der Regel nachgeschaltet. Sie haben bereits bei kleinen Abmessungen ein hohes Saugvermögen und erreichen einen Enddruck von ca. 10^{-2} mbar, ausreichend für Schweißaufgaben im Feinvakuum. Öldiffusionspumpen und Kryopumpen werden für das Schweißen im Hochvakuum bis unter 5×10^{-4} mbar eingesetzt (Bild 16).

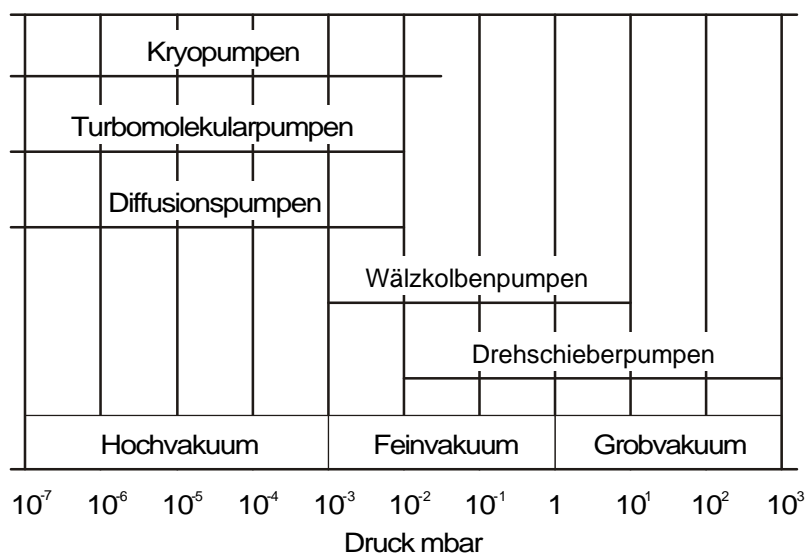


Bild 16 Arbeitsbereiche der eingesetzten Vakuumpumpen

Kryopumpen bieten sich insbesondere für das Fügen von hochreaktiven Sondermetallen, wie z. B. Beryllium, Molybdän, Titan und Tantal an, wenn die Forderung nach einem kohlenwasserstofffreien Vakuum besteht. Sie arbeiten nach dem Prinzip einer Kältemaschine und besitzen ein hohes Saugvermögen. Die in dem einzustellenden Vorvakuum von etwa 10^{-2} mbar noch vorhandenen atmosphärischen Gase kondensieren an der tiefgekühlten Oberfläche der Pumpe und verfestigen.

Beim Fügen der Eisen- und Nichteisenwerkstoffe reicht in der Regel ein Arbeitsdruck von ca. 10^{-2} mbar bei Beschleunigungsspannungen über 120 kV aus [3.4.5]. Neuere Untersuchungen ergaben sogar bei Arbeitsdrücken von ca. 1 mbar in Heliumatmosphäre keine Unterschiede zu Schweißnähten, die bei Drücken von 5×10^{-3} mbar geschweißt wurden, allerdings bei Beschleunigungsspannungen um 200 kV [3.4.8].

3.4.3.3 Bewegungseinrichtungen

Obwohl das Remote-Schweißen zukünftig mit seinen vielen Möglichkeiten der Strahlformung und -lenkung stärker in Erscheinung treten wird, sind auch weiterhin bei vielen Anwendungen Führungsmaschinen erforderlich. Sie haben die Aufgabe, Werkstück und Elektronenstrahl beim Schweißen relativ zueinander zu bewegen. In der Regel befindet sich die Strahlkanone während des Schweißens außerhalb der Arbeitskammer in stationärer Position und das Werkstück wird mit der vorgewählten Geschwindigkeit bewegt. Die am meisten benutzten Vorrichtungen sind der Arbeitstisch und die Drehvorrichtung. Der Arbeitstisch bewegt das Werkstück für das Schweißen von Längsnähten in X- und Y-Richtung, seltener auch in Z-Richtung. Er ist mit Nuten zur Aufnahme von Spannvorrichtungen versehen und wird in der Regel von vakuumtauglichen AC-Servomotoren und Spindeltrieb verfahren. Für das Schweißen von Rundnähten stehen Vorrichtungen mit senkrechter oder waagerechter Drehachse, bzw. mit Kippmöglichkeit für verschiedene Positionen der Drehachse zur Verfügung, die auf dem Arbeitstisch montiert werden.

Mit Zunahme der Applikationen im Bereich hoher Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bzw. gesteigerten Genauigkeiten wird die Lineardirektantriebstechnik stärker in den Vordergrund treten. Linearmotoren gestatten Verfahrensgeschwindigkeiten bis zu 600 m/min bei höchster Regelgüte und werden bereits erfolgreich bei vielen Applikationen, u. a. auch in Führungsmaschinen zum Laserstrahlschneiden eingesetzt.

3.4.3.4 Steuerung und Bedienung

Die Steuerung einer Elektronenstrahlanlage ist sowohl für die Ablauf- und Verriegelungslogik, als auch für die bahngenaue Funktion der Antriebe und nicht zuletzt für Koordination zwischen Elektronenstrahl- und Werkstückbewegung verantwortlich. Die einfachste Ausführung einer Elektronenstrahlanlage besitzt Funktionen einer Logiksteuerung für Pumpstand, Schweißzyklus und Verriegelungen. Diese Basisausstattung lässt sich durch Softwareprogrammpakete und zusätzliche Hardwareeinrichtungen erweitern.

Komponenten wie Bedienerführung, Automatisierung, Maschinendiagnose oder Qualitätssicherung lassen sich mit den bereits beschriebenen Verfahren der Strahlablenkung und -modulation sowie den Nahtsuch- und Positioniersystemen, also der Prozesssteuerung und -regelung, nachrüsten und auch miteinander kombinieren.

Eine moderne Bedienerführung stellt auf Bildschirmen Prozessschaubilder und Prozesszustände dar, gibt Messwerte digital bzw. quasi-analog wieder und zeigt umfangreiche Informationen im Klartext an. Neben Schutzprogrammen gegen Bedienfehler werden auch automatische Anlauf- oder Auslaufprogramme angeboten. Zusätzliche Möglichkeiten bieten Programme für die Optimierung der Schweißparameter und das Speichern der Schweißdaten der einzelnen Nähte für die Qualitätssicherung und wiederkehrende Schweißaufgaben. Dabei werden Programme eingesetzt, die übersichtlich und weitgehend selbsterklärend sind sowie die Möglichkeit des Anlegens einer kompletten Programmbibliothek mit Abbildungen der einzelnen Bauteile und Lage der Schweißnähte bieten [3.4.16, 3.4.14].

3.4.3.5 Non Vacuum Electron Beam Welding (NVEBW)

Diese bereits vor Jahrzehnten in Deutschland begründete Verfahrensvariante hat ihren heutigen Entwicklungsstand und große Verbreitung erst in den USA erlangt und wird seit einigen Jahren zunehmend wieder in Deutschland eingesetzt.

Auch bei diesem Verfahren wird der Elektronenstrahl im Hochvakuum erzeugt, dann aber durch feine Düsen über verschiedene Druckstufen an die Atmosphäre geführt. Damit entfällt die Evakuierzeit und das Schweißen auch großer, sperriger Werkstücke ist wirtschaftlich möglich. Durch Streuung der Elektronen an der Atmosphäre wird der Strahl mit wachsendem Arbeitsabstand jedoch breiter. Um möglichst schmale Nähte zu erzielen und tiefzuschweißen wird mit Arbeitsabständen von 6 bis 30 mm gearbeitet und zur Minderung des Streueffektes Helium (etwa 20 bis 30 l/min Helium 4.6) koaxial zum Elektronenstrahl ausgeblasen.

Stand der Technik sind NVEBW-Anlagen mit 150 bis 175 kV Beschleunigungsspannung und bis zu 30 kW Strahlleistung. Im direkten Vergleich mit dem Laserstrahlschweißen ergibt sich als wesentlicher Vorteil ein hoher Wirkungsgrad von über 50 % inkl. aller Nebenaggregate.

Da auch bei dieser Verfahrensvariante Röntgenstrahlung entsteht, ist entsprechender Strahlenschutz vorzusehen. Bei größeren Teilen bietet sich eine Schutzhaus-Lösung an, bei der die gesamte Arbeitszelle eingehaust wird. Insbesondere für kleinere Teile hat sich die Kapsellösung bewährt, bei der nur der kleine Bereich um das Schweißteil abgeschirmt wird.

Mit dem NVEBW-Prozess sind Stumpfstöße, Überlappverbindungen, T-Stöße, Stirnflachnähte, Stirnkehlnähte und besonders Bördelnähte sehr gut zu schweißen. Die bevorzugten Anwendungen liegen im Blechdickenbereich zwischen 0,5 und 5 mm, dabei sind Nahttiefe-/Breiteverhältnisse bis etwa 6 : 1 erreichbar. Durch den im Vergleich zum

Elektronenstrahlschweißen im Vakuum oder Laserstrahlschweißen recht großen Strahldurchmesser an der Wirkstelle von 1 bis 4 mm, reicht für I-Nähte ein normaler Scherenschnitt, die Spaltüberbrückbarkeit beträgt bis zu 20 % der Blechdicke. Aufgrund der hohen erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten (z. B. AlMg-Legierung: ca. 14 m/min bei 3 mm Nahtdicke und bis zu 60 m/min bei 1 mm Nahtdicke) ergeben sich geringe Streckenenergien bei minimalem Bauteilverzug. Einsatzbeispiele für das NVEBW-Schweißen sind bevorzugt im Automobilbau zu finden. So werden heute bereits Instrumententräger aus Aluminium, Drehmomentwandler für Automatikgetriebe, Getrieberäder, Sicherheitslenksäulen, Katalysatorgehäuse und vieles mehr mit dem Elektronenstrahl an Atmosphäre geschweißt – weitere Anwendungen werden folgen [3.4.17, 3.4.18, 3.4.19, 3.4.20, 3.4.21].

3.4.4 Arbeitsschutz

Arbeitsschutz beim Elektronenstrahlschweißen bedeutet in erster Linie Schutz vor Röntgenstrahlung. Diese entsteht beim Auftreffen der Elektronen auf die Bearbeitungsstelle, breitet sich in alle Richtungen aus, ist biologisch wirksam und für den Menschen schädlich.

Grundsätzlich sind Elektronenstrahlschweißanlagen genehmigungspflichtig. Bei der Beantragung sind u. a. ein Strahlenschutzverantwortlicher bzw. -beauftragter zu benennen. In der Praxis ist der Strahlenschutzverantwortliche in der Regel der Arbeitgeber. Dieser bestellt den Strahlenschutzbeauftragten im Zusammenhang mit der Betriebsgenehmigung der Anlage. Der Strahlenschutzbeauftragte muss die im Umgang mit der Elektronenstrahlschweißanlage erforderliche Fachkunde nachweisen. Diese besteht aus theoretischem Wissen und nach Möglichkeit aus praktischer Erfahrung auf dem jeweiligen Anwendungsgebiet sowie im Strahlenschutz und kann durch Berufsausbildung, Berufserfahrung und Kurse erworben werden.

Die Röntgenverordnung (RöV) vom 8. Januar 1987 mit ihren zahlreichen Änderungen sowie die Richtlinie über die im Strahlenschutz erforderliche Fachkunde weisen auf alle Vorschriften und Maßnahmen sowie gesundheitlichen Aspekte beim Umgang mit Röntgenstrahlung hin. In der DVS-Richtlinie 3205 – „Schutz vor Röntgenstrahlen an Elektronenstrahlmaschinen zur Materialbearbeitung“ werden in kompakter Form die wichtigsten Punkte, die bei der Betreibung von Anlagen zur Materialbearbeitung einzuhalten sind, aufgeführt.

Nach RöV darf die an der zugänglichen Oberfläche der Elektronenstrahlmaschine gemessene Ortsdosisleistung von 1,5 mSv/a nicht überschritten werden. So reicht i. A. bei Niederspannungsanlagen die Wanddicke von Strahlerzeuger und Vakuumkammer aus. Hochspannungsanlagen erfordern zusätzlich Bleiverkleidungen und, bei Einblickmöglichkeit, Bleiglasscheiben zum Schutz vor Röntgenstrahlung.

Die Arbeitskammer und der Strahlerzeuger dürfen keine Spalte aufweisen (Kammertürdichtungen, Kabeldurchführungen usw.) aus denen Röntgenstrahlung austreten darf.

Ummantelungen und Abdeckungen zwischen beweglichen Teilen müssen sich überlappen und sind fest mit dem Gehäuse der Maschine zu verbinden.

3.4.5 Forschungsansätze

Das Elektronenstrahlschweißen wird auch in Zukunft weiter zunehmen. Durch hohe Anlagenwirkungsgrade und Anlagenlebensdauern von teilweise über 20 Jahren ist dieses Verfahren als ökologisch wertvoll und ressourcenschonend einzuschätzen. Neue Forschungsansätze sind vor allem auf folgenden Gebieten möglich:

- Weitere Verkürzung der Nebenzeiten durch noch effizientere Vakuumpumpsysteme
- Verbesserung der Qualitätsüberwachung und Übertragbarkeit der Schweißergebnisse auf unterschiedliche Anlagen durch Aufnahme der „primären“ Strahlparameter wie Apertur, Brennfleckdurchmesser, Leistungsverteilung usw.
- Erschließung des aufgrund der Wellenlänge hohen Potenziales in der Mikrobearbeitung
- Intensivierung der Schulung des Personals
- Erhöhung des Bekanntheitsgrades und hier ganz speziell des NVEBW
- Entwicklung von low-cost-Anlagen im Leistungsbereich unter 5 kW, um auch im unteren Leistungsbereich in den Anschaffungskosten im Vergleich mit dem Laser konkurrenzfähig zu werden.

3.5 Löttechnik

Das Löten stellt nach wie vor ein weit verbreitetes und bezüglich der Verfahren und der benutzten Anlagentechnik ein außerordentlich vielseitig anwendbares Fügeverfahren dar. Obgleich insbesondere das Kleben, vorrangig auf dem Gebiet des Fügens von Blechen, zunehmend in Konkurrenz zum Löten tritt, konnte letzteres mit Erfolg auf neue Werkstoffe und auch neue Bauteilkonstruktionen angewandt werden. Beispielsweise erweist sich das Löten für das stoffschlüssige Fügen von Verbundwerkstoffen und für thermisch hochbelastbare metallische Werkstoffe als ebenso unverzichtbar wie für die Fertigung hochpräziser Bauteile in den Gebieten der Optik und Feinwerktechnik. Anlagen- und Lotmittelhersteller schätzen die Entwicklung der Löttechnik in den vergangenen 10 Jahren und in den kommenden 10 Jahren als zunehmend oder stark zunehmend ein. Generell ist anzumerken, dass sich die Entwicklung der Anlagentechnik für das Löten auf die zu fügenden Grundwerkstoffe und die anzuwendenden Verfahren bezieht. Die Verfahrensentwicklung wirkt somit als ein Motor auch für die Anlagentechnik. Deshalb geht den Betrachtung zur Anlagentechnik und weiteren peripheren Gegenständen der Studie eine knappe Behandlung der gegenwärtigen Lötverfahren einschließlich der verarbeitbaren Grundwerkstoffe voraus.

Unter Pkt. 3.5.2 wird die Anlagentechnik berücksichtigt. Es wird hierbei zwischen dem mechanischen Teil und der Steuerung unterschieden. Der Umfang der Thematik macht eine Beschränkung auf ausgewählte löttechnische Anlagen erforderlich. Die Aussagen beziehen sich im Wesentlichen auf Lötöfen für das Hart- und Hochtemperaturlöten sowie auf Anlagen zum mechanisierten Weichlöten, die innerhalb der löttechnisch-apparativen Ausstattung einen der zentralen Plätze einnehmen. Den Abschluss bildet der Arbeits- und Umweltschutz als ein eng mit den genutzten Verfahren in Bezug stehender Aspekt.

3.5.1 Verfahren und Grundwerkstoffe

3.5.1.1 Herausforderungen an Verfahren

Für die Fügetechnik gilt, in Abhängigkeit von den Fügeaufgaben, allgemein:

Für mittels Massenproduktion mit Standardwerkstoffen gefertigte Teile steht der Kostendruck an erster Stelle. Daraus ergibt sich der Zwang nach hoher Produktivität, weitgehender Materialausnutzung und niedrigste Anforderungen an die Qualifikation der verbliebenen Arbeitskräfte.

Im Gegensatz hierzu stehen Fügeaufgaben im Bereich der sog. Hochtechnologien, wobei vielfach die technischen Grenzen der Fügbarkeit erreicht werden. In diesem Gebiet liegt ein auch ingenieurwissenschaftlich anspruchsvolles Feld weiterer Forschungen.

Allgemein dürfte, bei entsprechendem Zwang durch Vorschriften und Kostendruck, die Berechnung und insbesondere Simulation weiter an Anwendungsfällen gewinnen. Herausforderungen auf dem Gebiet des Lötens werden einerseits in der Konstruktion, insbesondere bei der Schaffung einer Sicherheit und eines Fundamentes für die Berech-

nung von Lötverbindungen und andererseits bei der Verfahrensentwicklung gesehen. Zu letztgenannter Gruppe zählen:

- die Entwicklung von Zinn-Basis-Weichloten mit näher an die bekannten Zinn-Blei-Lote heranreichenden Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften
- das Löten mit mechanischer Aktivierung, um die Verwendung von Flussmitteln einschränken zu können
- das Löten höherfester (niedrig schmelzender) Al-Legierungen
- das Löten von Grundwerkstoffpaarungen mit extrem unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten
- das Löten von zellularen metallischen Werkstoffen.

In einer verstärkten Miniaturisierung von Bauteilen werden auch Auswirkungen auf die Löttechnik erwartet.

3.5.1.2 Grundwerkstoffe

Die Vielfalt der lötbaren und in der Praxis durch Löten gefügten Werkstoffe ist außerordentlich groß. Unterschiedliche Anwendungspotenziale ergeben sich in zweierlei Richtung: zum einen für die klassischen Werkstoffe (Stahl, Al-, Cu-Basislegierungen, Hartmetalle), zum anderen für Sonderwerkstoffe und -legierungen (z. B. Titan-, Berylliumlegierungen, Keramiken).

Bezüglich der klassischen und in großem Umfang eingesetzten Werkstoffe wird das größte Potenzial für zukünftige Entwicklungen in der wirtschaftlichen Optimierung der Verfahren und der wirtschaftlicheren Herstellung der zugehörigen Anlagentechnik (Fertigungsmittel) liegen. Diese Punkte sind klar ingenieurwissenschaftlicher, nicht vorrangig naturwissenschaftlicher oder werkstoffkundlicher Natur. Der Schwerpunkt liegt eher auf der Seite der Anlagenentwicklung. Eine Ausnahme bilden Alternativlote zu den mit Verwendungseinschränkungen belegten cadmium- und bleihaltigen Loten. Auch hier liegen zwar schon neue Lote vor, allerdings erfordern diese die Anpassung der bestehenden, auf die alten Lotsysteme ausgerichteten Anlagentechnik einschließlich einer Anpassung der Konstruktion der Lötverbindungen. Innerhalb der Standardwerkstoffe wird für Nickel-Basiswerkstoffe und verzinkte Stahlbleche eine zunehmende Anwendung des Lötens als Fügeverfahren als wahrscheinlich eingeschätzt.

Die o. g. Sonderwerkstoffe stellen ein Feld lebhaftester Forschung dar, wie die Beiträge auf den großen Fachtagungen zeigen. Hierbei stehen grundlegende, metallurgische und werkstoffkundliche Fragen im Mittelpunkt. Aufgrund der Tatsache, dass der Umfang und Anteil dieser Werkstoffe an den technisch interessanten Werkstoffen stets begrenzt bleiben wird und sich auf Anwendungen in der Hochtechnologie beschränkt, kommt dem Zwang nach unbedingter und stets fortschreitender Effizienzsteigerung hier nicht die dominierende Bedeutung zu.

3.5.1.3 Hybridverfahren

Für das Löten werden Hybridverfahren, d. h. Kombinationen unterschiedlicher Wirkprinzipien zur Herstellung der Verbindung nur als Ausnahmen von Bedeutung sein. Als Beispiel kann das Plasma-MIG-Löten von Stahl-Feinblechen mit Kupferbasis-Loten genannt werden, bei welchem die Drahtelektrode von einem Lichtbogen abgeschmolzen wird [3.5.1, 3.5.2].

Stand der Technik ist das Kombinieren von Löten und anschließender Wärmebehandlung für das Ofenlöten. Für die Mehrzahl der Lötanwendungen sind Hybridverfahren außerhalb der Kombination mit Verfahren der Wärmebehandlung weniger relevant. Potenziale für Hybridverfahren werden jedoch in der Kombination von Dünnschichtverfahren und Lötverfahren erkannt. So könnte mittels Dünnschichttechniken belotet werden. Auch ist die Erzeugung von Diffusionsbarrieren mit Hilfe der Dünnschichttechnologie denkbar.

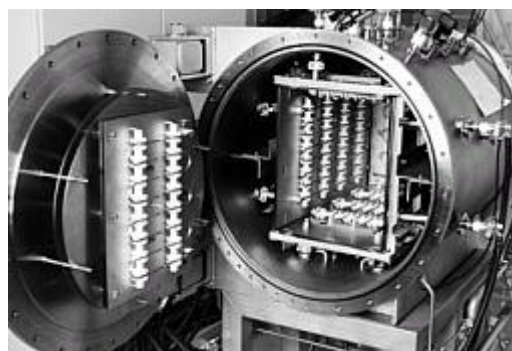
3.5.2 Anlagentechnik

3.5.2.1 Lötöfen/Mechanischer Teil

Die Entwicklung von Lötöfen orientiert zum einen auf Öfen meist kleinerer Abmessungen, die sich sehr flexibel, d. h. für verschiedene Grundwerkstoffe, Lote, Temperaturbereiche und Atmosphären, bei vertretbarem Investitionsaufwand nutzen lassen. Ein Beispiel sind Kammeröfen, die sowohl den Betrieb im Vakuum als auch Schutzgasbetrieb zulassen. Für Weichlötanlagen wird die Fertigung upgradefähiger Basisanlagen mit anschließender, auftragsspezifischer Fertigstellung als vorteilhaft erachtet.



a)



b)

Bild 17 Kammeröfen

a) Vakuum-/Schutzgasretortenofen b) Hochvakuumofen

Quelle: XERION, Freiberg

Andererseits gewinnen auch Öfen, die ganz speziell an ein Verfahren, an eine Werkstoffgruppe oder eine Werkstückfamilie angepasst sind, an Bedeutung. Um diese An-

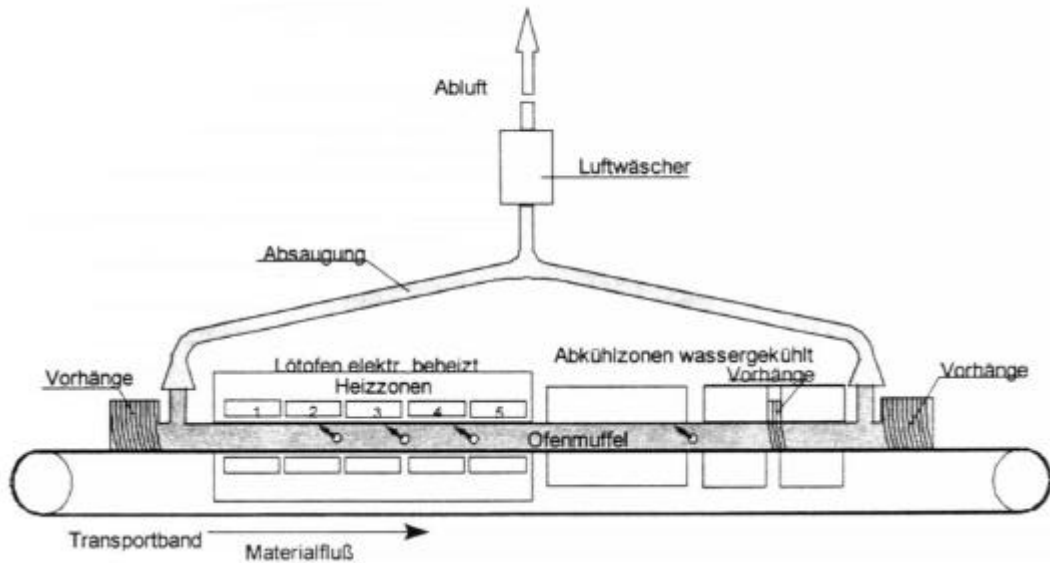
passung zu optimieren, werden beispielsweise zusätzliche Einschränkungen in Form maximal erzielbarer Temperaturen oder die Konzentration auf eine bevorzugte Werkstoffgruppe in Kauf genommen. Beispiele hierfür finden sich für das Löten von Aluminiumbasiswerkstoffen, welche sich wirtschaftlich vorteilhaft in Schutzgasöfen mit maximal möglichen Temperaturen von 660 °C flussmittelfrei löten lassen.

Anwender sehen es als sinnvoll an, aufgrund der fortschreitenden Technologieentwicklung preisgünstige Einzweckmaschinen für einen eng definierten Kreis von Lötaufgaben anzuschaffen, diese möglichst schnell abzuschreiben und durch entsprechend weiterentwickelte Anlagen zu ersetzen. Die Kombination des Lötvorganges mit nachfolgenden Wärmebehandlungen in einer Ofenanlage ist zwar Stand der Technik, jedoch gestattet die Hochdruckabschreckung vakuumgelöteter Teile eine Reduzierung der Dauer der Wärmebehandlung lt. [3.5.3] um 40 %.

Auf dem Gebiet der Wärmequellen für Lötöfen und löttechnische Anlagen erfolgen Anstrengungen zur Optimierung der bisher genutzten Lösungen als auch zur Einführungen neuer Prinzipien der Wärmeerzeugung. Molybdänheizelemente sind in Vakuumöfen weit verbreitet. Deren Festigkeit bei hohen Temperaturen konnte durch das Dotieren mit Lanthanoxid-Teilchen oder des Legieren mit Titan, Zirkon und Kohlenstoff beträchtlich verbessert werden [3.5.4]. Ebenfalls zum Legieren und Dotieren von Molybdän wird in [3.5.5] berichtet. Ein Zusatz von 0,5 % Titan und 0,8 % Zirkon oder das Dotieren mit Lanthanoxid verlängert die Lebensdauer der Molybdänheizelemente wesentlich. Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Molybdänheizelementen ist die Beschichtung von Molybdänheizelementen mit Schwarzkörper-Überzügen. Hierdurch wird erreicht, dass rund 75 % der Strahlungsenergie in das Zentrum der Heizzone in der Ofenkammer abgestrahlt werden. Dies erlaubt verkürzte Aufheizzeiten und reduziert den Energieverbrauch um 15 bis 20 % [3.5.5].

Ein Merkmal der Ofenentwicklung der letzten Jahre war eine zunehmend genaue Einstellung und Regelung von Prozessparametern, insbesondere der Temperatur. Temperaturtoleranzen von ± 3 K gelten als Standard, welche bei Schutzgasöfen in der Regel eine Umwälzung der Ofenatmosphäre erfordern. Tendenzen der Ofenentwicklung zielen beispielsweise in Richtung der exakteren Einstellung von Prozessparametern. Die hohen Anforderungen des flussmittelfreien Aluminiumlötens mittels des sog. NOCOLOK[®]-Prozesses erfordern die sehr genaue Überwachung des Temperatur-Zeit-Regimes und die Einhaltung der Schutzgaszusammensetzung [3.5.6, 3.5.7]. Dem konnte mit der Entwicklung spezieller Öfen für den NOCOLOK[®]-Prozess Rechnung getragen werden. In der Massenfertigung gelöteter Aluminiumkonstruktionen, insbesondere von Wärmetauschern, nimmt dieses Lötverfahren eine dominierende Stellung ein (Bild 18).

Ebenfalls auf dem Gebiet der Schutzgaskammeröfen finden Wechselcontainer (Retorten) Anwendung, die ein bequemes Einsetzen der Lötteile in einen gasdichten Container außerhalb des Ofens erlauben.



Quelle: Behr Industrietechnik GmbH, Stuttgart

Bild 18 NOCOLOK®-Prozess

Da meist mit mehreren Containern gearbeitet wird, lassen sich durch paralleles Arbeiten (Einsetzen in Container außerhalb des Ofens / Erwärmen und Löten im Ofen) die Ausnutzung des Ofens für das Löten und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses verbessern und Leerlaufzeiten verringern. Einen neuen Ansatz könnte die Nutzung von Halogenstrahlern als Wärmequelle auch für Fügearbeiten, z. B. mittels Punktstrahlern in der Mikrotechnik, bieten. Für die Wärmebehandlung liegen hierfür positive Ergebnisse vor (Bild 19) [3.5.8].



Bild 19 Hochleistungspunktstrahler, Quelle: XERION, Freiberg

Werden für das Vakuumlöten sehr hohe Anforderungen an das Vakuum gestellt, setzt sich der Einsatz von Turbomolekularpumpen anstatt der sonst gebräuchlichen Diffusionspumpen durch.

Auf dem Gebiet des Weichlötens in der Elektrotechnik/Elektronik wirkt der Übergang zu bleifreien Weichloten auch als Herausforderung für die Anlagenhersteller. Obwohl die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften der vorgestellten Alternativlote zum Teil kontrovers diskutiert werden, existiert gegenwärtig noch kein Lot, welches die Zinn-Blei-Lote ohne Übergangsprobleme ersetzen könnte [3.5.9]. Hieraus ergibt sich der Zwang, die Weichlötanlagen an die erhöhten Löttemperaturen und die verstärkte Erosionsneigung der Alternativlote, z. B. an den Lotwannen, anzupassen.

Einen Zuwachs an Flexibilität bei reduzierten Nebenzeiten und höherer Prozessstabilität und Bauteilqualität können an die Bauteile angepasste Vorrichtungen zur Aufnahme und Lagesicherung während des Lötprozesses bieten. Diese Vorrichtungen sind naturgemäß auf ein Bauteil oder eine enge Teilefamilie angestimmt. Das Löten von Werkstücken mit sehr engen Lagetoleranzen macht vielfach das Fixieren der zu lötenden Teile in speziellen Vorrichtungen notwendig. Den hohen Entwicklungsstand repräsentiert das Beispiel einer vakuumgelöteten Ionenquelle für die Raumfahrttechnik, deren Teile bei Durchmessern von ca. 30 mm mit geforderten Lagetoleranzen von weniger als 20 µm gefügt wurden [3.5.10]. Die Benutzung von Lötvorrichtungen machte sich auch beim Vakuumlöten dünnwandiger Teile und Strukturen, u. a. Waben-Sandwichstrukturen, für die Fertigung von Titan-Absaugstrukturen am Seitenleitwerk eines Verkehrsflugzeuges erforderlich [3.5.11].

3.5.2.2 Steuerungen

Die Steuerung von Lötöfen mit programmierbaren logischen Steuerungen (PLC) stellt gegenwärtig den Stand der Technik dar. Vielfach werden PLC-Steuerungen mit PC verknüpft. In [3.5.12] wird eingeschätzt, dass PC-gestützte Steuerungen ohne PLC-Steuerungen in der Zukunft dominieren werden. Die Nutzung von PC-Oberflächen, insbesondere Windows, und die Möglichkeit der Fernwartung werden als Bemühungen für die Entwicklung bedienerfreundlicher Steuerungen benannt.

3.5.2.3 Optimierung der Anlagenfertigung

Auch für die Hersteller hat die Optimierung und zunehmend effizientere Gestaltung der Fertigung der Anlagentechnik erstrangige Bedeutung. Dies schließt eine ressourcenschonende Fertigung ein. Beispiele sind die Nutzung regenerativer Energien durch Photovoltaik in den Unternehmen. Bezüglich der Anlagenkonstruktion ist ein Trend die Vermeidung der spanenden Fertigung (Fräsen, Bohren, Drehen) und die Fertigung möglichst vieler Teile in Feinblechtechnologie.

Die Einsparung von Kosten bei der Anlagenfertigung wird außerordentlich hoch eingeschätzt.

3.5.3 Qualitätssicherung

In der Lötfertigung ist die Überwachung, Aufzeichnung und Dokumentation der Prozessparameter eingeführt. Die Verbesserung der Prozesskontrolle ist eine erstrangige Maßnahme, um die Marktchancen der Produkte, d. h. der Anlagentechnik, zu erhalten und auszubauen.

Bezüglich der Anlagenfertigung hat sich die Zertifizierung nach DIN ISO 9000 ff. durchgesetzt. Weiterhin wird die Ferndiagnose bei der Behandlung von Störungen zur Reduzierung der Anlagenausfallzeiten genutzt. Ein sog. 24h-Notfalldienst wird vielfach praktiziert, hat sich aber nicht durchgängig eingeführt. Die Qualitätsdokumentation wird mittels Spezifikationen oder Zertifikaten realisiert.

Ein Hersteller von Wellen- und Reflow-Lötanlagen bietet eine Bildfehlerdatenbank an, die einen Verweis auf die möglichen Fehlerursachen auf den Ebenen der Maschine oder des Produktes bietet. Unterschiedliche, für die Fertigung genutzte Softwarepakete für Steuerung, Simulation, Messwerterfassung und Fehlerdiagnose werden über eine gemeinsame Schnittstelle kombiniert. Potenziale weiterer Optimierung werden in einer einfachen Integration von Bildverarbeitungs-komponenten gesehen.

3.5.4 Arbeits- und Umweltschutz

Neben dem Löten an sich, d. h. dem Benetzen und der Schlusausbildung, existieren weitere Arbeitsgänge zur Vor- und Nachbehandlung, die mit besonderen Gefahren, meist durch toxisch, ätzend, cancerogen oder mutagen wirkende Stoffe, für den Anlagenbediener verbunden sind. Infolge von Gefahrstoffemissionen bei Herstellung der Lötverbindungen oder der Entsorgung gelöteter Bauteile sowie dem Gebrauch und der Entsorgung von Hilfsstoffen können Gefahren auftreten. Diese Problematik ist seit Jahrzehnten bekannt. Seitens des Gesetzgebers resultierten hieraus Einschränkungen für die Verwendung bestimmter Stoffe.

Innerhalb der Löttechnik betraf/betrifft dies im wesentlichen:

- den Ersatz cadmiumhaltiger Lote durch cadmiumfreie, vorrangig als Aufgabe der Lotentwicklung
- die Vermeidung bleihaltiger Weichlote in der Elektrotechnik/Elektronik (Verwendungsbeschränkung gültig ab 1.1.2006)

Die Vermeidung bleihaltiger Weichlote wird, zumal die Zinn-Blei-Weichlote bisher dominierten, zu entsprechenden Modifizierungen an den Lötanlagen führen.

Anforderungen des Arbeits- und Umweltschutzes beziehen sich auch auf die Vor- und Nachbehandlung der Werkstücke. Dies betrifft z. B. das Entfetten mit halogenierten Kohlenwasserstoffen sowie das Beizen mit fluorhaltigen Lösungen, die aus Sicht des Arbeitsschutzes und der Entsorgung zunehmend problematisch werden. Mechanisch oder physikalisch wirkende Vorbehandlungen könnten eine Alternative darstellen. Auch die Vermeidung der Nachbehandlung in Form des Reinigens und Entfernens von

Flussmittelresten ist hier zu nennen, wobei das flussmittelfreie Löten bzw. das Löten mit nichtkorrosiven Flussmitteln, deren Reste auf der Lötstelle verbleiben können, weiten Eingang gefunden hat. In der Massenfertigung von gelöteten Aluminiumbauteilen kann auf das Löten mit nichtkorrosiven Flussmitteln nicht mehr verzichtet werden. Dieses Ziel konnte in der Massenfertigung nur durch die Entwicklung spezieller Durchlauföfen mit integrierter Flussmittelapplizierung, sog. NOCOLOK[®]-Öfen, erreicht werden.

Ein weiterer Trend kann in der Automatisierung der Lötteilhandhabung in allen Arbeitsgängen ausgemacht werden. Neben dem teilweise schon seit Jahrzehnten automatisiertem Erhitzen der Teile betrifft dies zunehmend auch die Handhabung der Lotteile, die Lotapplikation sowie die Vor- und Nachbehandlung der Werkstücke.

Für die Anbieter von Lötmitteln gehört die Rücknahme von Altloten und Krätzen zum Leistungsumfang.

3.5.5 Forschungsansätze

Bezüglich der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der löstechnischen Geräte und Anlagen treten für die hier näher betrachteten Beispiele Weichlötanlagen und Lötöfen hervor:

- Anpassung der Weichlötanlagen an die Prozessparameter und Verarbeitungseigenschaften bleifreier Weichlote. Vor allem ist hier die verstärkte Erosionsneigung an den Lotbadwannen zu nennen.
- Optimierung der Anlagenfertigung mit dem Ziel der Kostensenkung und ressourcenschonenden Fertigung. Als Lösung werden die Nutzung der Feinblechtechnologien, die Vermeidung von spanender Bearbeitung und die konstruktive Gestaltung mit Rücksicht auf minimalen Zeitbedarf für die Montage angeführt. Die erweiterte Anwendung der Feinblechtechnologien wird von einem befragten Unternehmen als wichtig für eine ressourcenschonende Fertigung angesehen. Ebenso wird ein reduzierter Lagerbestand als wünschenswert erachtet. Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine Basismaschine bis zu einem Zustand vorgefertigt und dann auftragsbezogen fertig gestellt.

3.6 Klebtechnik

Kleben als Fügetechnik nimmt in der Bedeutung für Industrie und Handwerk noch stetig zu. Dies hat seine Ursache in Vorteilen der Klebtechnik auf den vier Feldern:

- Werkstoff: Kombination von verschiedenen Werkstoffen
- Verarbeitung: Erhalt der Werkstoffeigenschaften
- Fügen: Integration von zusätzlichen Funktionen
- Konstruktion: Verbesserte Eigenschaften der Bauteile.

Demgegenüber stehen aber auch Nachteile und Risiken bei der Anwendung der Klebtechnik:

- Empfindliche Reaktion der Klebstoffe auf verunreinigte Oberflächen
- Empfindliche Reaktion der Klebstoffe bei Verarbeitungsfehlern
- Eingeschränkte Festigkeiten und thermische Beständigkeiten der Klebungen

Während die dritte Einschränkung naturgegeben ist, lassen sich die beiden ersten möglichen Fehlerquellen durch eine Beseitigung der Fehlerquelle Mensch durch maschinelles Arbeiten beseitigen oder doch stark eingrenzen. Dies ist zur Zeit Stand der Technik auf einem hohen Entwicklungsstand. Wie insgesamt in der Kunststofftechnik sind sowohl als Gerätehersteller wie auch als Verarbeiter von Klebstoffen Klein- und Mittelständler führend.

Entsprechend den ersten beiden Anstrichen erfolgt für die zu erwartenden Entwicklungen und daraus ableitbaren Forderungen für die Gerätetechnik zum Kleben die Unterteilung in Oberflächenbehandlung der Fügeteile und Klebstoffverarbeitung.

3.6.1 Oberflächenbehandlung

Ziel einer Oberflächenbehandlung vor dem Kleben ist die Erzeugung einer klebbereiten Oberfläche in Bezug auf Topografie und chemische Zusammensetzung, die zu langzeitbeständigen Klebungen führt. Aus industrieller Sicht ist dabei wichtig, dass solche Oberflächen unter Produktionsbedingungen sicher und wiederholbar erzielt werden können und häufig auch in eine Serienfertigung integrierbar sein müssen. Ferner sind der Umwelt- und Gesundheitsschutz zu beachten. Daraus folgt, dass beispielsweise langwierige Beizbehandlungen unter Verwendung gesundheits- und umweltschädigender Chemikalien (Chromverbindungen), so gut sie auch sein mögen, höchstens als Übergangslösungen infrage kommen.

3.6.2 Klebstoffverarbeitung

Bei der Klebstoffverarbeitung sind die Verrichtungen Dosieren und Mischen der Komponenten, Auftragen des Klebstoffs mechanisiert oder automatisiert vorzunehmen. Diese Vorgänge sind zur Qualitätssicherung und zum Qualitätsnachweis unter Verwendung geeigneter Sensoren regelbar und protokollierbar zu gestalten. Für die bisherigen Be-

dingungen der Großserie (Automobilindustrie) ist dies gut gelöst. Zum Einsatz kommen zum großen Teil **Pneumatische Kolbenpumpen mit Membranventil** in vielen Ausführungen, u. a. mit

- beheiztem Düsenkopf
- Mehrfachdüsen
- automatischer Vakuumregelung für tropffreie Applikation

Mehr und mehr werden **rotierende Verdrängerpumpen** eingesetzt. Sie bieten drehzahlabhängige Dosiermengen, sind durch das Fehlen von Ventilen wartungsfreundlich und arbeiten mit hohen absoluten Genauigkeiten.

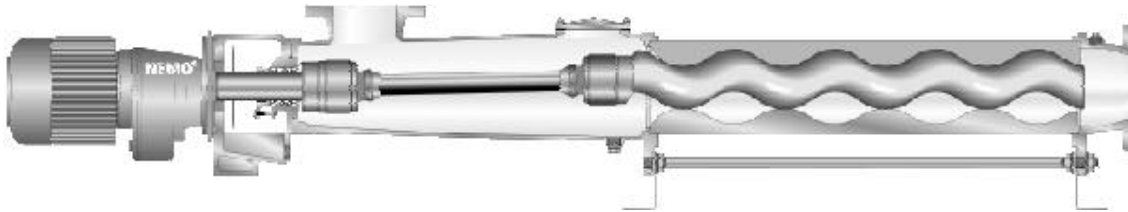


Bild 20 Rotierende Verdrängerpumpe, Quelle: Netzsch GmbH, Waldkraiburg

Zur Prozesssteuerung und -regelung werden Dosiermengensteuerungen eingesetzt, die durch permanentes Messen und Regeln von Druck und Temperatur und genaues Dosieren unabhängig von Vordruck, Medientemperatur und Füllstand hochpräzise und geschwindigkeitsproportional auftragen. CCD-Kameras und Lichtschranken dienen zur Qualitätskontrolle [3.6.1].

3.6.3 Forschungsansätze

- Umweltfreundliche Reinigungsverfahren bestehend aus Behandlung mit einem Reiniger und anschließenden Spülvorgängen sind hinsichtlich Verfahren und Gerätetechnik so zu entwickeln, dass die geforderte Oberflächenqualität erreicht werden kann und die Verfahren im kontinuierlichen Prozess unter Serienbedingungen betrieben werden können.
- Physikalische Verfahren auf der Basis der Plasmatechnik erfüllen die formulierten Zielsetzungen oft in idealer Weise. Für Kunststoffoberflächen sind diese Verfahren schon gut eingeführt und werden theoretisch auch einigermaßen verstanden. Für Metalloberflächen besteht aber hier ein Nachholebedarf. Die Verfahren sind teilweise auch bei diesen Oberflächen anwendbar, aber unter welchen Bedingungen, welche chemisch-physikalischen Vorgänge laufen dabei ab?
- Gleich aus mehreren Gründen kommen in immer stärkerem Umfang vorbeschichtete Werkstoffe in die Fertigung, die dann auch zu fügen und das heißt auch zu kleben sind. Die bisherigen heißhärtenden einkomponentigen Klebstoffe können dann nicht mehr eingesetzt werden. Dafür müssen kalthärtende zweikomponentige Klebstoffe

eingesetzt werden. Für deren Verarbeitung unter Serienbedingungen steht noch keine so entwickelte Verarbeitungstechnik bereit wie für Einkomponenten-Klebstoffe.

- Kleinere und mittlere Unternehmen müssen heute mit dem gleichen Qualitätsstandard fertigen wie Großunternehmen. Also muss auch ihre Klebstoffverarbeitungstechnik dem gleichen Standard entsprechen. Aber welche Elemente der Datenerfassung, -verarbeitung und Regelung beim Arbeiten mit deutlich kleineren mitunter auch handbetriebenen Klebstoffverarbeitungsgeräten sind notwendig und auch bezahlbar? Wie können solche Geräte aussehen?

Die angesprochenen Fragestellungen werden teilweise auch schon in Forschungsprojekten der verschiedenen Ebenen bearbeitet. Jedoch sind dies einzelne isolierte Projekte, mit denen auch bei positivem Ergebnis der Forschungsbedarf bei weitem nicht abgedeckt ist.

3.7 Mechanische Fügetechnik

Da die mechanische Fügetechnik ein sehr weites Feld umschreibt soll im folgenden nur auf die industriell am weitesten verbreiteten Verfahren eingegangen und die Maschinenteknik für diese Fertigungsprozesse betrachtet werden (s. a. DIN 8593 Teil 5 Gruppe 4.5 „Fügen durch Umformen“). Es soll auch nicht auf Schraubverbindungen eingegangen werden.

Den hier aufgezeigten Fügeverbindungen gemein ist die Anwendung an ausschließlich überlappten Fügeteilen im Dickenbereich von 1,0 bis max. 5,0 mm Einzelblechdicke.

3.7.1 Verfahren

3.7.1.1 Clinchen (früher: Durchsetzfügen)

Laut Definition ist Clinchen ein Fügen von zwei oder mehr überlappt angeordneten Blech-, Rohr- und/oder Profilteilen durch Kaltumformen mittels Stempel und Matrize. Dabei findet ein gemeinsames partielles Durchsetzen der Fügepartner (der Blechwerkstoff wird partiell aus der Blechebene heraus verschoben) und ein nachfolgendes Stauchen statt, so dass durch Breiten und/oder Fließpressen eine unlösbare Verbindung entsteht. Die Verbindung ist form- und kraftschlüssig, wobei unter bestimmten Bedingungen Stoffschluss auftreten kann. Verbindungselemente, Zusatz- oder Hilfsstoffe werden nicht verwendet [3.7.1].

Neben Verfahrensvarianten mit unterschiedlichen Werkzeuggeometrien unterscheidet man das Verfahren auch nach der Anzahl der ausgeführten Arbeitshübe der Werkzeuge, d. h. der für die Herstellung einer Fügeverbindung notwendigen Bewegungen. Man unterscheidet einstufige Verfahren, bei denen entweder Stempel oder Matrize einen ununterbrochenen Arbeitshub ausführen und mehrstufige Verfahren, bei denen Stempel und Matrize mehrere aufeinander folgende Arbeitshübe ausführen [Merkblatt Clinchen].

Prozessparameter für das Clinchen sind Stempel- und Matrizenabmessungen sowie Fügekraft, Fügeweg bzw. Bodendicke der Verbindung.

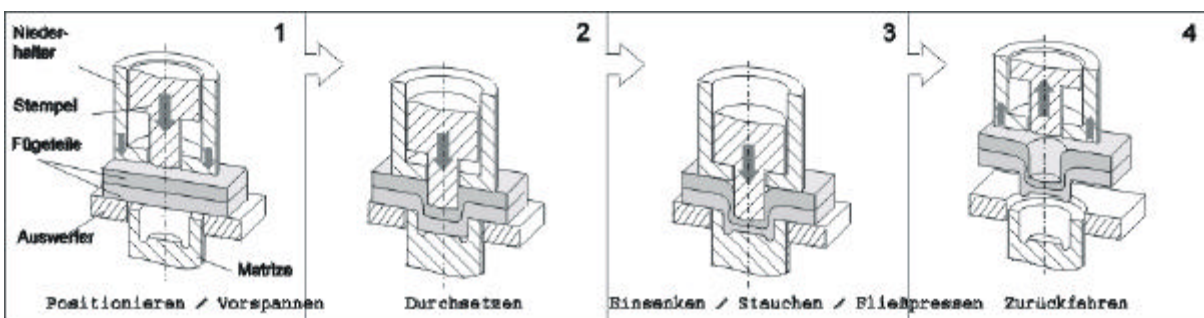


Bild 21 Verfahrensablauf beim einstufigen Clinchen mit geschlossener Matrize [3.7.1]

Es wird stets eine beidseitige Zugänglichkeit zur Fügestelle benötigt, um Stempel und Matrize positionieren zu können.

Eingesetzt wird das Clinchen an Blechverbindungen von verschiedenen Werkstoffen (auch Werkstoffkombinationen), wie Stahl, Aluminium, Kupfer. Es können beschichtete Bleche gefügt werden. Industriellen Einsatz findet das Clinchen in der Weißwaren-Industrie, im Automobilbau und bei Herstellern von Gehäuse-Verkleidungen und im Lüftungsbau [3.7.2, 3.7.3].

3.7.1.2 Niete

Stanzniete

Beim Stanznieten werden die Füge Teile mittels eines Hilfsfügeteiles, dem Niet unlösbar verbunden. Der Niet wird dabei in die zu verbindenden Teile eingepresst. Man unterscheidet je nach Nietform: Halbhohlните und Vollните, wobei bei Vollnieten der Niet in seiner Gesamthöhe der Gesamtlechdicke der Füge Teile entsprechen kann und dann keine Überhöhung bildet, der Halbhohlните jedoch wird wie beim Clinchen in eine Matrize gepresst und bildet eine Überhöhung aus der Blechebene. Es wird wie beim Clinchen eine zweiseitige Zugänglichkeit zur Füge Stelle benötigt.

Prozessparameter sind die Nietform und -größe, der Nietwerkstoff, die Werkzeuge und Arbeitswege sowie die erforderliche Setzkraft.

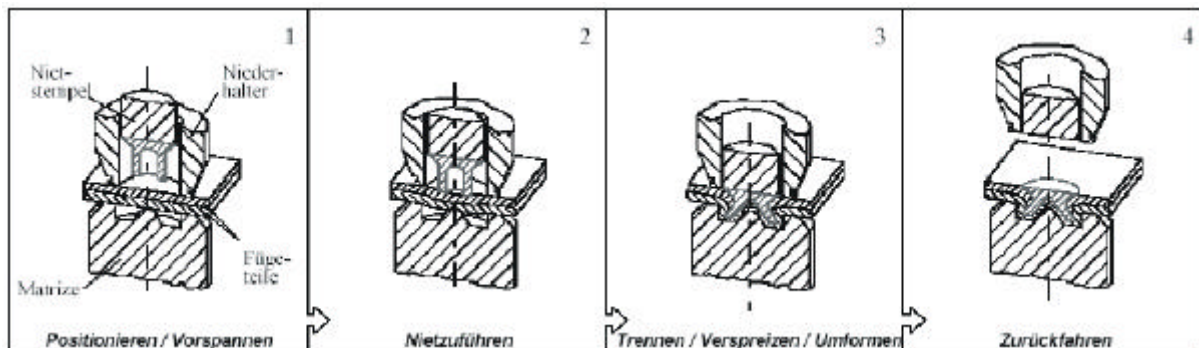


Bild 22 Verfahrensablauf beim Stanznieten mit Halbhohlstanzniet [3.7.4]

Das Stanznieten bietet hochfeste unlösbare Verbindungen mit einem heutigen Haupt Einsatzbereich im Automobilbau und der blechverarbeitenden Industrie. Frühere Brücken und Tragwerkskonstruktionen waren nahezu ausschließlich mittels Vollnieten genietet.

Blindniete

Das Blindnieten findet dort Einsatz, wo nur eine einseitige Zugänglichkeit zur Füge Stelle vorliegt, so z. B. auch bei Reparaturfällen an bereits früher gefügten Stanzniet- oder Clinchverbindungen [3.7.5].

Es wird ein Hilfsfügeteil – der Blindniet – in ein zuvor in alle Fügeteile eingebrachtes Loch gesteckt und mit Hilfe des Nietdorns der Nietschaft auf der, der Fügeseite abgewandten Bauteilseite, gestaucht und im Durchmesser aufgeweitet, so dass der Niet nicht mehr herausgezogen werden kann. Gleichzeitig wird auf der Setzseite der Nietschaft ebenso aufgeweitet und verbindet die Fügeteile damit unlösbar.

Prozessparameter sind die Nietform und -größe sowie die Festigkeit der Sollbruchstelle im Nietdorn.

Schließringbolzen-Verbindungen

Beim Verbinden mittels Schließringbolzen werden zwei Hilfsfügeteile benötigt, ein Schließringbolzen und ein Schließring. Der Schließringbolzen wird durch ein in alle Fügeteile vorher eingebrachtes Loch gesteckt und mittels des Schließringes ähnlich wie bei Schraubverbindungen, allerdings durch Verpressen der beiden Teile unlösbar miteinander verbunden.

Prozessparameter sind die Größe und Geometrie der Schließringe und -bolzen sowie die Setzkraft.

Schließringbolzenverbindungen erreichen (auch aufgrund ihrer Abmessungen und Bauart) höchste Verbindungsfestigkeiten und werden überwiegend im Schiffbau und im Schienenfahrzeugbau eingesetzt [3.7.6].

3.7.2 Nicht betrachtete Verfahren – Sonderanwendungen

3.7.2.1 Hybridverfahren

Bei Hybridfügeverfahren handelt es sich um die Vereinigung zweier unabhängiger Fertigungsprozesse entweder in einen einzigen Arbeitsschritt oder in eine unmittelbare Aufeinanderfolge der beiden Einzelverfahren. Dies führt zu einer Verbindung, die veränderte mechanisch-technologische Eigenschaften gegenüber jedem der einzelnen Fügeverbindungen ausweist.

Mechanische Fügeverfahren werden häufig mit dem Fügeverfahren Kleben kombiniert, da hier die meist punktförmigen mechanischen Fügeverbindungen durch die flächigen Klebverbindungen eine Dichtheit der Fügeteile erhalten und im Gegenzug die noch nicht ausgehärteten Klebverbindungen eine sofortige Mindestfestigkeit der Fügeteile aufweisen.

Weitere Kombinationen der mechanischen Fügeverfahren können mit Löt- oder Schweißprozessen erfolgen, wobei insbesondere letztere kaum Anwendung finden, da der Vorteil mechanischer Fügeverfahren (auch wärmearmes Fügen genannt), einer Vermeidung thermischer Beeinflussung der Fügeteile, durch Kombination mit thermischen Fügeverfahren aufgehoben würde.

3.7.2.2 Weitere Verfahren

Nicht betrachtet werden in dieser Ausarbeitung außerdem Verfahren, wie z. B. Bonden, Bördeln, Falzen, Einspreizen, Verpressen oder Verquetschen, die nur für sehr spezielle Anwendungsfälle eingesetzt werden und über die in der Literatur kaum allgemeingültige Aussagen zum Stand der Maschinenteknik zu entnehmen sind.

3.7.3 Maschinenteknik

3.7.3.1 Antrieb

Je nach mechanischem Fügeverfahren werden unterschiedliche Maschinen eingesetzt. Für das Clinchen und Stanznieten sind dies Pressen, beim Stanznieten im Gegensatz zum Clinchen mit einem zusätzlichen Nietzuführ- und -positioniersystem ausgestattet. Die Pressen können als C-Gestell und Säulenführungsgestelle aufgebaut sein. Angetrieben werden die Arbeitszylinder hydraulisch bzw. pneumo-hydraulisch, bei denen eine Umsetzung von Luftdruck auf Öldruck realisiert wird. Für die üblichen Anwendungsfälle werden die Fügepressen weggesteuert, d. h. es wird ein entsprechender Fügeweg vorgegeben, nachdem die Maschine auf Umkehrhub schaltet. Kraftgesteuerte Maschinen, bei denen die Maschine auf ein bestimmtes Kraftniveau fährt und dann wieder abhebt, werden kaum angewandt. Bei mehrstufigen Verfahren sind mehrere Arbeitszylinder im Einsatz, in den meisten Fällen auf jeder Fügeteilseite ein separat steuerbarer Zylinder.

3.7.3.2 Kinematik der Werkzeuge

In den letzten Jahren wurden spezielle Verfahrensvarianten des Clinchens und Stanznietens entwickelt bei denen die Werkzeuge keine einfache kontinuierliche translatorische Bewegung mehr durchführen. So entstanden Verfahren des Clinchens bei denen die Stempel nicht mehr in einem einzelnen Arbeitshub in die Fügeteile gepresst wurden, sondern durch mehrere schnelle Hübe auf die gewünschte Tiefe in die Fügeteile eingeschlagen wurden. Vorteil dieser Verfahrensvariante sind aufgrund des Impulserhaltungssatzes reduzierte notwendige Fügekräfte und somit größere Ausladungen der Maschine.

Eine weitere Verfahrensvariante mit veränderter Kinematik bilden die Taumelprozesse. Zuerst entwickelt für das Stanznieten werden die Stempel hier neben der axialen Bewegung mit einer rotatorischen Bewegung beaufschlagt, wobei die Werkzeuge auf einer rosettenbahnförmigen Bewegung um die Achse des Arbeitszylinders bewegt werden, was den „taumelnden“ Charakter dieses Prozesses erklärt. Dieses Verfahren wurde vom Stanznieten auf das Clinchen übertragen. Auch diese Variante führt zu einer 40 bis 70%igen Reduzierung der zum Fügen erforderlichen Kräfte.

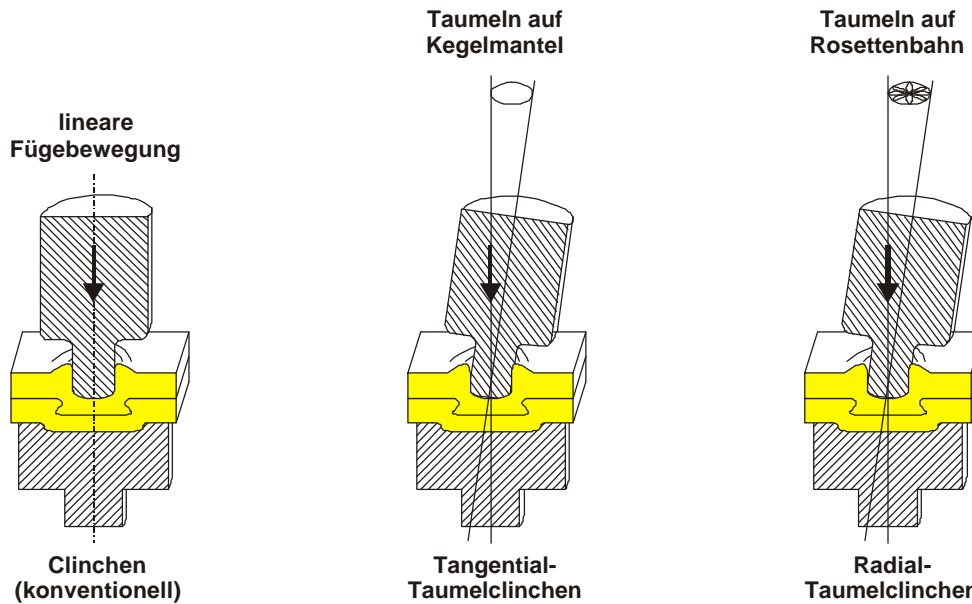


Bild 23 Verschiedene Werkzeug-Kinematiken beim Clinchen [3.7.7], Quelle: IPA, Stuttgart

3.7.4 Werkzeuge

3.7.4.1 Clinchen

Beim konventionellen Clinchen werden zur Herstellung einer Verbindung ein Stempel und eine Matrize benötigt, die koaxial ausgerichtet sind. Es existieren unterschiedliche Verfahrensvarianten mit verschiedensten Stempelgeometrien und Matrizenarten, so gibt es z. B. Rundpunktverfahren und Balkenverfahren, geschlossene und geteilte Matrizen mit unterschiedlichen Geometrien.

3.7.4.2 Nieten

Beim Stanznieten werden ebenfalls ein Stempel und eine Matrize für die Herstellung einer Verbindung benötigt, die je nach Verfahren (Halbhohlstanznieten oder Vollstanznieten) unterschiedlich ausgebildet sind. Die Werkzeuge sind dabei in Abhängigkeit vom verwendeten Niet (Werkstoff, Form usw.) zu wählen.

Beim Blindnieten existieren in Abhängigkeit vom Systemhersteller unterschiedliche Werkzeugausführungen für die Aufnahme und das Setzen des Blindnietes.

3.7.5 Qualitätssicherung und Arbeitsschutz

3.7.5.1 Stand der Technik

Für die Arbeit an Fertigungsmaschinen zur Herstellung mechanischer Fügeverbindungen gelten zumeist die technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen für Pressen. Nur Blindnietmaschinen unterliegen geringeren sicherheitstechnischen Anforderungen an den Arbeitsschutz.

Die Qualitätssicherung kann heute bei nahezu allen Verfahren durch 100%-Online-Kontrolle, d. h. während der Herstellung der Verbindung, sichergestellt werden. Als Kontrollgrößen dienen dabei die eingestellten Prozessparameter (Fügeweg, Fügekraft usw.) sowie optische Kontrollmöglichkeiten nach dem Setzen der Verbindung. Eine computertechnische Auswertung ist möglich.

3.7.6 Reparaturmöglichkeiten

Für mechanisch gefügte Verbindungen existieren bislang keine allgemeingültigen Vorschriften und Aussagen für die Reparatur solcher Verbindungen. Erste Ansätze für Richtlinien zur Reparatur wurden z. B. im DVS-Merkblatt 3420 „Clinchen“ gemacht. Weitere Untersuchungen zur Reparatur und Nacharbeit mechanischer Fügeverfahren könnte das Ziel zukünftiger Forschungsgebiete sein.

3.7.7 Simulation der Fügeverfahren

Mit Hilfe von Finite-Elemente-Methoden (FEM) können heute eine Vielzahl von Fertigungsprozessen computertechnisch simuliert und analysiert werden. Ziel einer Simulation sind die Ermittlung der herstellungsbezogenen Kenngrößen (Prozessparameter) der Verfahren und die Vorhersage des möglichen Versagensverhaltens der Fügeverbindung bei innerer oder äußerer Beanspruchung.

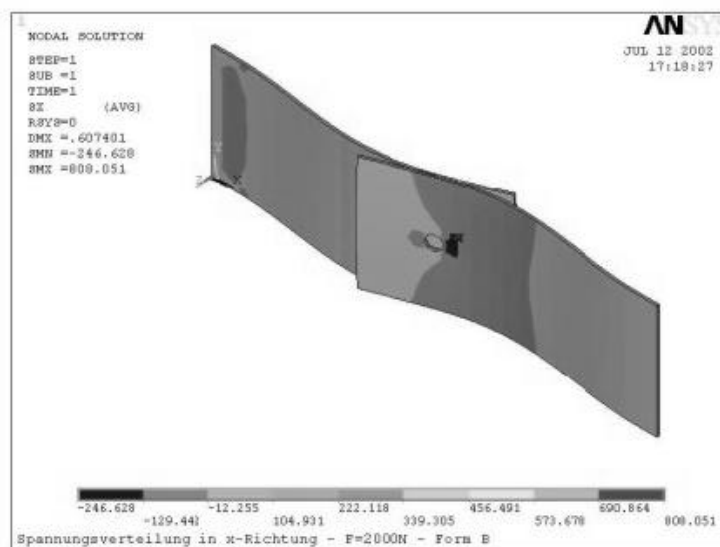


Bild 24 Numerische Simulation einer Clinchverbindung unter Zugbelastung, Quelle: IFS, Chemnitz

Für die mechanischen Fügeverfahren Clinchen, Stanznieten und Schließringbolzenverbindungen existieren derartige Modelle zur numerischen Simulation der Herstellung und des Verhaltens bei äußerer Beanspruchung der Verbindung. Diese werden überwiegend im Automobilbau und zu Forschungszwecken eingesetzt, finden aber aufgrund

der hohen Kosten solcher Systeme kaum Anwendung in der klein- und mittelständischen Industrie. Die Leistung solcher Systeme ist stark vom stetigen Vergleich mit dem realen Bauteil abhängig und kann nur in geringen Grenzen genaue Vorhersagen über vollkommen neue Prozessparameter der einzelnen Verfahren machen.

Die numerische Simulation mechanischer Fügeverfahren ist bereits seit einigen Jahren Gegenstand vieler Forschungsprojekte. Ein steter Ausbau der Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet mit Zunahme der Genauigkeit und einer Vereinfachung der Anwendbarkeit wird zu einer Reduzierung der Kosten dieser Systeme und damit zu einem verbreiteten Einsatz auch in kmU führen.

3.7.8 Forschungsansätze

Durch die Entwicklung verschiedener Verfahrenskinematiken mussten auch die Werkzeuge dafür neu entwickelt werden. Es werden z. B. für die taumelnden Fertigungsprozesse geometrisch angepasste Stempel zur Herstellung einer Clinchverbindung angewandt.

Durch gezielte Werkzeugentwicklungen konnten auch auf konventionellen Clinchmaschinen einseitig ebene, einstufig mechanisch gefügte Flachpunktverbindungen hergestellt werden (Bild 25).

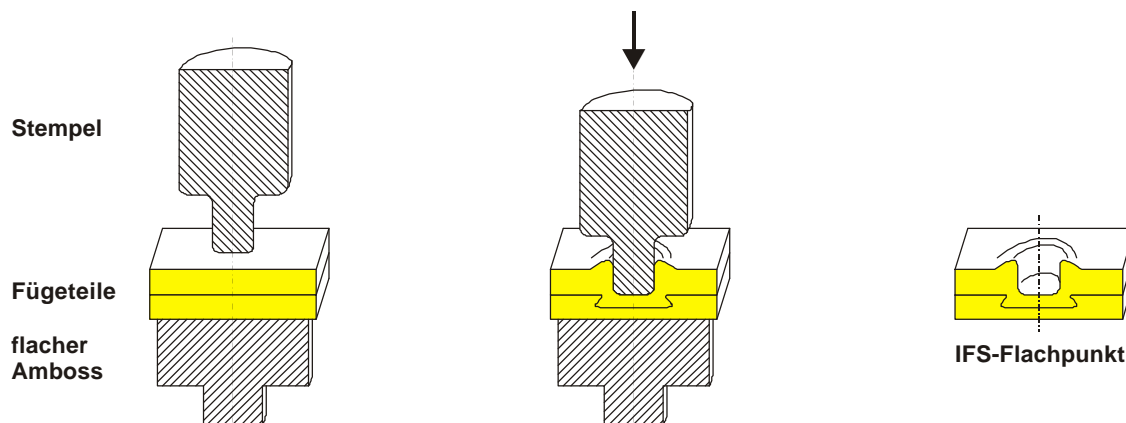


Bild 25 Herstellung einer IFS-Flachpunktverbindung mit konkavem Stempel und flachem Amboss als Gegenwerkzeug [3.7.8], Quelle: IFS, Chemnitz

Momentane Forschungsansätze in der Prozesssensorik bilden der Einsatz weiterer Sensoren (z. B. Ultraschall o. ä.) für die zerstörungsfreie Prüfung einer hergestellten Verbindung. Dies soll auch im Betrieb der Verbindung möglich sein, z. B. an einem Fahrzeug nach einem Crash. Ziel ist die Bewertung der unlösbaren Verbindung ohne Zerstörung des Bauteils mit einer Aussage über die verbleibende Tragkraft der Verbindung.

Forschungsansätze auf dem Gebiet der Gerätetechnik bilden die weitere Reduzierung der erforderlichen Fügekraft zum Herstellen einer Verbindung. Neben diesem Ziel besteht ein weiteres in der Verbreiterung der Anwendung mechanischer Fügeverbindungen durch Schaffung einer einseitig vollkommen ebenen Verbindung. Erreicht werden soll dies durch komplexe Verfahrenskinetiken bei denen mehrstufige Prozesse zum Einsatz kommen. Als dritter Zweig der gerätetechnischen Entwicklung wird versucht eine Fügbarkeit bei einseitiger Zugänglichkeit zu gewährleisten. Ansätze dazu bieten Forschungsvorhaben, die mit hydrostatischem Innendruck an zu verbindenden Fügeteilen arbeiten und die als Hybridverfahren – Hydroforming mit mechanischer Füge-technik – bezeichnet werden können.

3.8 Robotertechnik/Prozesssensorik

3.8.1 Robotertechnik

Allgemein werden dem Roboter weiterhin steigende Marktanteile prognostiziert (Bild 26). Der größte Teil der produzierten Roboter wird derzeit auf dem Gebiet der Schweißtechnik eingesetzt.

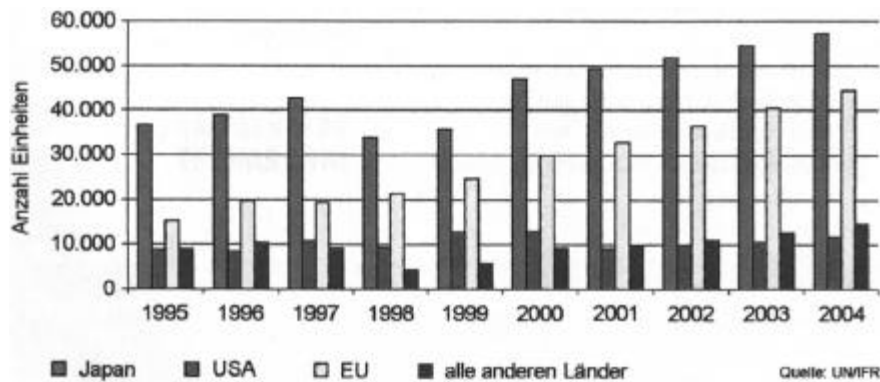


Bild 26 Anzahl der produzierten Industrieroboter nach Jahren (für 2002 bis 2004 geschätzt)

Das Hauptziel aktueller Entwicklung ist die Positioniergenauigkeit zu erhöhen sowie das Robotergewicht zu reduzieren. Darüber hinaus soll die Bearbeitungsgeschwindigkeit gesteigert und der Arbeitsraum vergrößert bzw. die Zugänglichkeit verbessert werden.

Die Genauigkeit lässt sich z. B. über eine leichtere und steifere Bauweise erhöhen. Dies führte zur Entwicklung von Robotern mit Stabkinematiken (Bild 27) und zur Verwendung von neuen Materialien und verbesserten Konstruktionsalgorithmen unter Einsatz von Simulationsprogrammen.



Bild 27 Roboter mit Stabkinematik, Quelle: SEF

Ebenso lässt sich die Genauigkeit über Korrekturmaßnahmen durch spezielle Geräte und Sensorik erhöhen und sicherstellen. Dazu wird z. B. die Position der Drahtspitze im Raum 3-dimensional vermessen. Diese Messwerte können für die genaue Berechnung des TCP (Tool Center Point) herangezogen werden.

3.8.2 Prozesssensorik

Nach wie vor gern benutzt wird der Gasdüsen- und der Lichtbogensensor separat und in Kombination. Die speziellen Vorteile dieser „internen Sensorik“ sind ein Garant für deren Fortbestand. Immer stärker vertreten sind die optischen Sensoren auf Grund der sinkenden Preise und leichteren Handhabung (Bild 28). Diese werden zur Auffindung und Verfolgung der Schweißnaht eingesetzt.



Bild 28 Einsatz eines Lasersensors beim Schweißen von Öltanks, Quelle: CLOOS, Haiger

Für die Prozessüberwachung/Qualitätssicherung werden vorwiegend die elektrischen Signale genutzt. Darüber hinaus werden z. T. vorhandene Sensoren in die Auswertung einbezogen. Der übliche Weg ist derzeit, die Messwerte mit einem Parameterfenster zu vergleichen und ein eventuelles Austreten aus diesem Fenster zu signalisieren. Unter Zuhilfenahme von ci-Methoden (Computational Intelligence) wird versucht die Aussagekraft der Qualitätsparameter zu erhöhen, wobei diese Technologie besonders in der Widerstandsschweißtechnik stark verbreitet ist (Bild 29).

Ein großes Problem ist das gesamte Gebiet der Schnittstellen und deren Standardisierung. Während Systemanbieter einer Standardisierung der Schnittstellen skeptisch gegenüberstehen, wollen Komponentenanbieter eine Standardisierung vorantreiben. Diese Diskrepanz resultiert in einer schleppenden Entwicklung auf diesem Gebiet. Der Leidtragende dabei ist sicherlich der Endkunde, welcher mit den verschiedensten Schnitt-

stellen zurecht kommen bzw. deren Anpassung untereinander bei Bedarf finanzieren muss. Obwohl von allen Seiten die Bustechnologie bei den elektrischen Schnittstellen favorisiert wird, wird aus Kompatibilitätsgründen die alt hergebrachte analog-digitale Schnittstelle weiterhin standardmäßig angeboten.

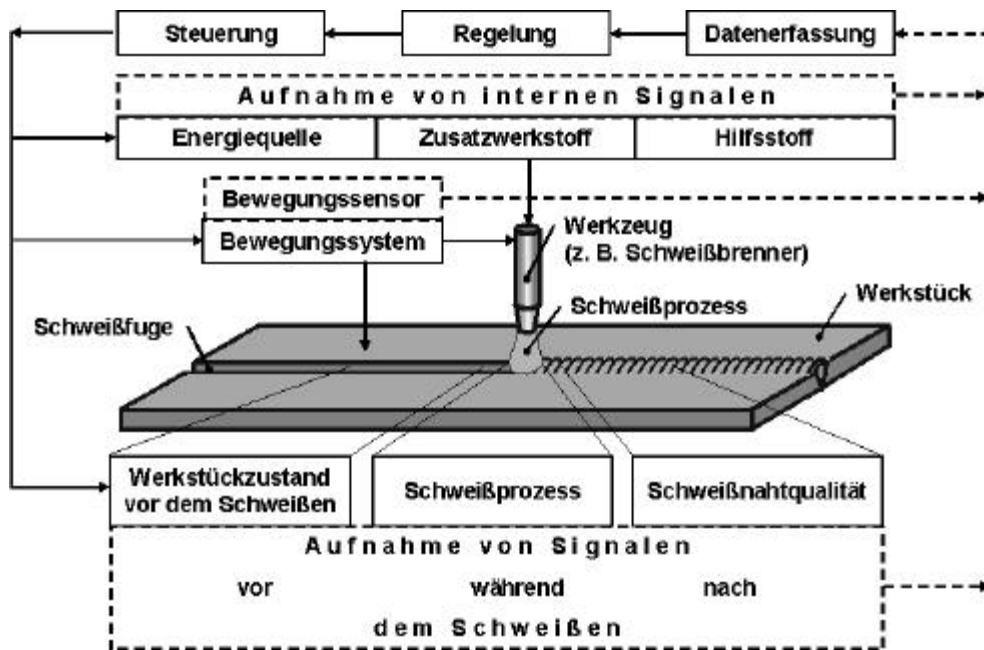


Bild 29 Sensorik in der Schweißtechnik

Diese Schnittstelle ist charakterisiert durch mehrere parallele Leitungen zwischen den Kommunikationspartnern. Über diese Leitungen können dann analoge Werte als Spannung (0...10 V, -10...+10 V) oder Strom (0...20 mA, 4...20 mA) und digitale Werte üblicherweise als Spannung (0 V = L, 24 V = H) übertragen werden. Dabei ist für jeden zu übertragenden Parameter eine zusätzliche Leitung erforderlich. Aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ist diese Form der Signalübertragung längst durch die serielle Datenübertragung (2...3 Leitungen oder Lichtfaserkabel) überholt. Das große Problem dabei ist die Einigung auf ein oder einige wenige Übertragungsprotokolle [3.8.1, 3.8.2, 3.8.3].

3.8.3 Forschungsansätze

Durch den Einsatz von Sensorik bleibt abzuwarten, ob die Notwendigkeit nach hochgenauen Robotermechaniken bestehen bleibt (Ansatz TCP-Vermessung). Denkbar ist die Vermessung der Positionen der einzelnen Achsen im Raum über Videotechnik oder Beschleunigungsaufnehmer. Zunehmend wird die Simulation der Roboterbewegungen eine Rolle spielen, da damit enorme ökonomische und ökologische Effekte erzielbar sind. Großes Entwicklungspotenzial wird auf dem gesamten Gebiet der Internettechnologien/Vernetzung der Systemkomponenten gesehen. Plug&Play-fähige Einzelkompo-

nennten (Roboter, Schweißstromquelle, Steuerung, Sensorik) sind ein Schritt in diese Richtung.

Die Online-Prozessüberwachung ist ein Gebiet mit zunehmenden Interesse (Beeinflussung der Schweißparameter während des Fügevorganges). Ein Schritt dahin ist die Integration der Sensorik in den Brenner, um die Vorteile der internen und externen Sensorik zu vereinen. Ein Ansatz dazu ist der rotierende Brenner sowie die Integration von Thermofühlern in die Schutzgasdüse. Weiterhin laufen derzeit Forschungsprojekte zur Integration von optischen Sensoren in den Brenner.

Ein weiteres Thema ist die Beurteilung der Qualität des Lichtbogens (spektrometrische Plasmaüberwachung mittels mikroelektronischer Sensorik)

Spezielle Online-Sensoren, die in das innere der Naht sehen können sind ebenfalls in Entwicklung (Ultraschall, Wirbelstrom). Dabei werden oft neue Erkenntnisse aus anderen Wirtschaftsbereichen genutzt: hier z. B. berührungslose Einleitung des Ultraschalls mittels Laser sowie entsprechende Messung der rückgestrahlten Signale mittels Lasersensorik. Diese Technik stammt wohl aus der Medizintechnik und wurde dann für Bauwerksbeurteilung weiterentwickelt.

Alle diese Varianten haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile und unterscheiden sich zum Teil wesentlich in der erfassbaren Fehlerart bzw. den erfassbaren Nahtparametern.

3.9 Numerische Simulation

3.9.1 Stand

Durch die Entwicklungen der Computerhardware bestehen keine prinzipiellen Schranken hinsichtlich der Anwendung der meisten vorhandenen Softwarelösungen auf dem Gebiet der Schweißtechnik in klein- und mittelständischen Unternehmen, andererseits wird durch die Computerbranche natürlich auch die Entwicklung schweißtechnischer Software vorangetrieben. Die Ausrichtung und Anwendung von Computersoftware in der Schweißtechnik ist sehr vielgestaltig und reicht von der Übertragung schweißtechnischen Fachwissens auf den Rechner, eingebaut in eine grafische und/oder datenbankorientierte Oberfläche, bis zur Simulation der Physik und Thermomechanik der Schweiß- und Fügeprozesse.

Eine Klassifizierung der Softwareentwicklungen und -anwendungen auf schweiß- und fügetechnischem Gebiet ist schwierig. Eine Übersicht kann aus verschiedenen Gründen nie vollständig sein, zumal gegenwärtig auch international immer stärkere Aktivitäten mit Tagungen zu Problemen der Softwareentwicklung auf dem Gebiet der Werkstoffkunde und Schweißtechnik erfolgen. Regelmäßige jährlich bzw. im zweijährigen Rhythmus stattfindende Tagungen sind die „International Conferences on Computer Technology in Welding“ (letzte Tagung [3.9.1]) und die „International Seminars on Numerical Analysis of Weldability“ (letzte Tagung [3.9.2]).

Darüber hinaus sind viele firmeneigene und im Rahmen von Forschungsarbeiten entstandene Programme nicht bekannt. Lösungen, die an Hochschulen und Forschungseinrichtungen im Rahmen von Graduierungs-, Jahres- und Praktikumsarbeiten entstanden, sind quasi „Ad-Hoc“-Entwicklungen und werden häufig mit dem Fortgang der Bearbeiter nicht weiter gepflegt. Eine Nutzbarkeit durch die Industrie ist damit für diese Entwicklungen kaum möglich.

Es gibt nur sehr wenige Arbeiten, die einen Überblick über die vorhandenen Simulationsprogramme vermitteln [3.9.3, 3.9.4]. In [3.9.1] wird, etwa zum Stand 1998, die vorhandene schweißtechnische Software umfangreich recherchiert und klassifiziert. Von den Autoren erfolgt eine Einteilung in die Kategorien:

1. Schweißtechnologie
2. Werkstoffauswahl und Datenbanken
3. Prozessüberwachung
4. Robotersteuerungen
5. Datenverwaltung und Normung (Qualitätssicherung)
6. Lehrgangsverwaltung für schweißtechnische Kursstätten
7. Konstruktion und Festigkeitsberechnung
8. Simulation
9. Leichtbau
10. Alternatives Fügen
11. Thermisches Beschichten

12. Schneidtechnologien
13. Kostenberechnung
14. Lern- und Informationssysteme
15. Werkstofftechnik und -prüfung, Bruchmechanik
16. Recherchesysteme
17. Sonstige

Nicht eingeschätzt werden kann, wie groß die Nutzung vorhandener Software- und Simulationslösungen in den Firmen, Lehrstätten und Hochschulen tatsächlich ist. Ein Vergleich ähnlicher Programme untereinander kann ebenfalls nur in Ausnahmefällen geführt werden. Meist ist eine Bewertung subjektiv durch den Entwickler bzw. Nutzer geprägt. Die hohen Softwarekosten, die meist notwendige Fachkenntnis für die Nutzung der Programme und die zwangsläufige lange Einarbeitungszeit bedingen, dass in den seltensten Fällen ein Anwender den Vergleich zwischen mehreren Programmen führen kann.

Die große Mehrheit der in [3.9.3] aufgelisteten Softwarelösungen betreffen die Steuerung und Überwachung schweißtechnischer Fertigungsprozesse, der innerbetrieblichen Abläufe und der Auswahl von Werkstoffen und Schweißtechnologien.

Zunehmend werden in Forschung und Entwicklung komplexe Berechnungen (Komplex 7) und Simulation des Schweißprozesses selbst (Komplex 8) durchgeführt. Die Konferenzen [3.9.1] und [3.9.2] sind vorrangig auf diese Komplexe ausgerichtet. Hierbei können schweißtechnischer Prozesse oder das Verhalten von Werkstoffen und Konstruktionen unter realitätsnahen Bedingungen und Belastungen mit adäquaten Rechnerprogrammen simuliert werden. Diese Vorgehensweise kann erheblich Entwicklungszeiten und Kosten verringern. Ein weiterer Vorteil solcher Berechnungs- und Simulationsverfahren ist die Möglichkeit der Variation geometrischer Größen sowie von Prozess- und Materialparametern, was experimentell oft nicht oder nur mit sehr großem Aufwand möglich ist („numerische Experimente“).

Trotz dieser Möglichkeiten ist die Nutzung von Simulationsmethoden in der Schweißtechnik, von wenigen Ausnahmen abgesehen, bisher hauptsächlich auf Hochschulen, Forschungseinrichtungen und auf Ingenieurbüros, die sich auf Berechnungsaufgaben spezialisiert haben, beschränkt. Eine breite Akzeptanz in der klein- und mittelständischen Industrie hat die numerische Simulation noch nicht gefunden.

Gründe dafür sind:

1. Hohe Kosten für die für diese Berechnungs- und Simulationsaufgaben notwendigen Programme, in der Regel universelle Finite-Elemente-Programme (FEM-Programme).
2. Die oft sehr langen Rechenzeiten und damit hohen Berechnungskosten.
3. Die notwendige Qualifizierung der Mitarbeiter in der Nutzung dieser Programme, die trotz immer weiter verbesserter Benutzeroberfläche (z.B. Anwendereingaben in der

Terminologie der Fertigungstechnik statt mathematisch-physikalischer Natur) tiefgründige Kenntnisse der Mathematik und Physik der simulierten Prozesse und der Finiten-Elemente-Methode selbst erfordert.

4. Die oft sehr ungenauen Materialdaten sowie thermophysikalischen Prozessbedingungen und -eigenschaften, die aber die Genauigkeit der Berechnung stark beeinflussen und deshalb bei ungenauem oder unvollständigem Vorhandensein nur qualitative Aussagen erlauben.

3.9.2 Forschungsansätze

Programme für die Modellierung und Simulation von Schweißprozessen werden zum großen Teil von den Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalten angewandt. Dieser zum gegenwärtigen Zeitpunkt unbefriedigende Stand der Nutzung schweißtechnischer Software bedeutet aber nicht, dass Simulationssoftware in der Schweißtechnik keine Bedeutung hat. Es gibt eine Vielzahl überzeugender Lösungen, die aber meist über Forschungsprojekte und Dissertationen sowie Diplom- und Studienarbeiten an Hoch- und Fachschulen entstanden sind. Für eine Nutzung in der klein- und mittelständischen Industrie sind die Programme so zu gestalten, dass sie in der Benutzeroberfläche auf schweißspezifische Begriffe Bezug nehmen und die Modellierung im Wesentlichen selbstständig vornehmen, beraten durch Spezialisten. Mit SYSWELD, einem FEM-Programm auf der Basis der universellen Software SYSTUS, wird über den „Welding Advisor“ dieser Weg bereits beschritten, während das in den meisten anderen Programmen nur über Nutzerschnittstellen und die Anpassung der Materialroutinen sowie Randbedingungen vom Anwender durchzuführen ist. SYSWELD gewinnt im Wettbewerb mit anderen Programmen zunehmend an Gewicht.

Es besteht aber noch erheblicher Forschungsbedarf, um dieses Ziel zu erreichen: Die Formulierung des Problems in der Terminologie der Schweißtechnik am Computer, die Generierung des Modells durch die Software, eine robuste Lösung und die Präsentation der Ergebnisse wiederum in der für den Praktiker notwendigen Form schweißtechnologischer Parameter.

4 Übergreifende Forschungsansätze

Stand und mögliche Forschungsziele der Füge­technik wurden in den vorangegangenen Abschnitten faktenorientiert für die entsprechende Gerätetechnik, im Hintergrund die jeweilige Füge­technologie, dargestellt.

Branchenübergreifende Forschungsansätze zu formulieren fällt aufgrund der großen Anzahl der Fügeverfahren mit ihren Unterschieden u. a. bei den physikalischen Grundlagen, der Automatisierbarkeit, dem Investitionsumfang aber auch der Orientierungen auf spezielle Werkstoffe und Einsatzgebiete schwer.

Untenstehende Ergänzungen sollen deshalb nur Anregungen als Grundlage von Diskussionen geben, spiegeln jedoch nicht in jedem Fall das Umfrageergebnis wider und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

MASCHINE

- | | | |
|------------------|---|---|
| Bauform | - | Ein­zweck­maschine und/oder Viel­zweck­maschine und/oder up­gradefähiges Kom­po­nentensystem? |
| Standardisierung | - | Welchem Bus­system gehört die Zukunft? |
| Menüführung | - | Einknopf­bedien­ung und/oder menü­gesteuerte Bedienerführung |

WERKSTOFF

- | | | |
|------------------------|---|---|
| Kosten/Nutzen/Ökologie | - | Verbundwerkstoffe/Mischbauweise und/oder Einkomponentensystem |
|------------------------|---|---|

VERFAHREN

- | | | |
|---------------------------------|---|---|
| Füge­verbindung | - | Hybridschweißen und/oder Strahlformung für die optimale Verbindung? |
| Qualitätssicherung/
Sensorik | - | Ist eine 100%ige Qualitätssicherung überhaupt sinnvoll? |

WETTBEWERB

- | | | |
|-------------------|---|---|
| Kundendienst | - | Gewährleistung, Ferndiagnose, Servicedienst |
| Produktschulungen | - | Braucht der Heimwerker die Schweißerausbildung? |

5 Literatur

- [3.1.1] Matthes, K.-J.; Richter, E.: Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag München Wien, 2002, ISBN 3-446-22046-1.
- [3.1.2] Susa, F.; Killing R.: Geräte und Anlagen in der Schweißtechnik. Moderne Multifunktionsanlagen – Eigenschaften und Anwendung. Buchkapitel: Jahrbuch Schweißtechnik 2002, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2001, S. 158-164.
- [3.1.3] Ottersbach, O.; Lichtenthäler, F: Buchkapitel: AC-Schweißstromquelle mit intelligentem Kommutator. DVS-Berichte Band 216 (2001) S. 45-49, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3.2.1] Düring, K. A.: Hochfeste Stähle mit Trafohandschweißzangen prozessischer Schweißen. Tagungsreihe Dünnblechverarbeitung, Fügen von Stahlwerkstoffen. SLV München, März 2001.
- [3.2.2] Marek, U.; Matuschek, U.: Technologiesteuerungen für das Widerstandsschweißen mit elektrischen Antrieben. DVS- Berichte Band 217, Roboter 2002, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3.2.3] N. N.: Die Reise nach Essen hat sich gelohnt. Der Praktiker, Heft 12/2001.
- [3.2.4] Middeldorf, K.: Wissensvorsprung führt zu Innovationen. Der Praktiker, Heft 9/2001, S. 370-376.
- [3.2.5] Achatz, S.: Kondensatorentladungsschweißen – Technologie und Einsatzmöglichkeiten auch unter extremen Randbedingungen. DVS- Berichte Band 213, S.105-108, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3.2.6] Düring, K. A.: Warum elektromotorische Schweißzangen die bessere Lösung sind. Sonderteil Schweiß- und Verbindungstechnik. Blech, Heft 5/2001, S. 104-107.
- [3.2.7] Lammer, K.; Lange, E.; Pöll, K.: Feinschweißköpfe mit piezolinearmotorischem Antrieb. Widerstandsschweißen: Neue Werkstoffe – Herausforderungen für das Widerstandsschweißen, DVS-Berichte, Band 213, 2001, Seite 126-128, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3.2.8] N. N.: Schweißen und Schneiden auf der EuroBLECH 2002. Der Praktiker, Heft 10/2002.
- [3.2.9] Grothaus, R.; Kroll, S.: Entwicklung einer Fügezange in Ultraleichtbauweise. Industrielle Anwendung der Faserverbundtechnik IV, Abschlusskolloquium d. DFG Sonderforschungsbereichs 332, Aachen, D, 10. Apr., 2001, Berichte aus dem Maschinenbau, 2001, S. 19-31.
- [3.2.10] Cho, Y.; Rhee, S.: New technology for measuring dynamic resistance and estimating strength in resistance spot welding. Science and Technology of Welding and Joining, Heft 11/2000, S. 1173-1178.

-
- [3.2.11] Dilthey, U.; Bohlmann, H.- C.: Neuronale Netze zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen. Der Praktiker, Heft 8/2000, S. 305.
- [3.2.12] Bothfeld, R.: System IQR – ein neues Regelverfahren beim Widerstandspunktschweißen. Widerstandsschweißen: Neue Werkstoffe - Herausforderungen für das Widerstandsschweißen, DVS-Berichte, Band 213, 2001, S. 138-142.
- [3.2.13] Bothfeld, R.; Jansen, T.: Qualitätssicherung beim Punktschweißen von hochfesten Stählen im Karosserie-Rohbau. Tagungsreihe Dünnschleifverarbeitung, Fügen von Stahlwerkstoffen. SLV München, März 2001.
- [3.2.14] Straube, A.: Fuzzy-basierende Überwachungssysteme für Punkt- und Bukelschweißanwendungen, Möglichkeiten und praktische Anwendungen. DVS- Bericht Band 213, Widerstandsschweißen, DVS- Verlag GmbH, Düsseldorf 2001.
- [3.2.15] Forschungsthema: AIF-Nr.: 13.134N/ DVS-Nr.: 4.031, Standmengenerhöhung beim Widerstandspunktschweißen durch Elektrodenfräsen (2002-2004).
- [3.2.16] Hahn, O.; u. a.: Rechnergestützte Dimensionierung widerstandspunktgeschweißter und mechanisch gefügter Bauteile. Schweißen und Schneiden, Heft 1/1999, S. 17-23.
- [3.2.17] Dilthey, U.; u. a.: Berechnung von Schweißbereichen und numerische Simulation des Widerstandspunktschweißprozesses. Schweißen und Schneiden, Heft 1/2000, S. 18-19,21-23.
- [3.2.18] Vogt, G.: SPOTLINE-Ultraschallprüfung von widerstandsgeschweißten Punkten während des Schweißvorganges. Konferenz-Einzelbericht: 6. Kolloquium Qualitätssicherung durch Werkstoffprüfung, Zwickau, D, 13.-14. November 2001. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP). CD-ROM. V01, Band 79-CD (2001) Seite 1-7.
- [3.2.19] Roberts, D. R.; u. a.: Ultrasonic spot weld testing. Attenuation study. Insight, Heft 11/2000, S. 720-724.
- [3.2.20] Satonaka, S.; Matsuyama, K.: Review on inspection techniques for spot welds. Welding in the World, Heft 3/2000, S. 29-36.
- [3.2.21] Forschungsvorhaben 4.021, EMVU-relevante Feldemission von Widerstandsschweißmaschinen (2002 abgeschlossen).
- [3.3.1] Böhm, M.: Tiefschweißen mit dem Diodenlaser. Das IndustrieMagazin, Heft 8/2000, S. 32-34.
- [3.3.2] Holthaus, M.: Der Laserstrahlschweißprozeß. VDI-Zeitung 144 (2002), S. 60-64.
- [3.3.3] Schnitzler, C.; u. a.: Stab, Scheibe oder Slab – Diodengepumpte Festkörperlaser im Vergleich. Laser-Praxis, 6/2001, S. 18-21.

- [3.3.4] N.N.: Die Direktanwendung nimmt zu – Diodenlaser von DILAS: Direktanwendung und Pumpgeschäft halten sich die Waage.
http://www.eurolaser.de/ausgabe/el_d_0299_s42.htm.
- [3.3.5] N.N.: Alles im Kopf – eine komplette Systemfamilie für das Laserschweißen mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern wurde erstmals auf der EMO vorgestellt. Lasermarkt 2002, Kennziffer 030, S. 34-35.
- [3.3.6] Klinker, W. : Viel Potenzial beim Laserschweißen. Lasermarkt 2002, S. 76-82.
- [3.3.7] Klotzbach, A; u. a.: Laserstrahlschweißen durch High-Speed-Strahlbewegung. LaserOpto, Heft 2/1999, S. 64-65.
- [3.3.8] Ambrosy, G.; u. a.: Magnetisch unterstütztes Laserstrahlschweißen. LaserOpto, Heft 6/2001, S. 48-50.
- [3.3.9] Tangermann, K.; Krauß, H.-J.: Sicherheit mit Laserlicht / Die neuen Laserklassen bringen ab 2004 Veränderungen mit sich. Laser+Photonik, 6/2002, S. 38-40.
- [3.3.10] Bammer, M.; Trbola, J.: Automatische Qualitätskontrolle beim Laserstrahlschweißen. Maschinenmarkt, Heft 34/ 2001, S. 42-45.
- [3.3.11] N.N.: Strahldiagnose mit optischen Systemen. Laser, Heft 1/2002, S. 24-28.
- [3.4.1] v. Dobeneck, D.; Schultz, H.: Neuentwicklungen und Einsatzmöglichkeiten des Elektronenstrahlschweißens. Jahrbuch Schweißtechnik 2002, S. 136-146, Düsseldorf, DVS-Verlag GmbH, 2001. ISBN 3-87155-781-1
- [3.4.2] N. N.: Firmenschrift PRO-BEAM. 2002.
- [3.4.3] N. N.: Firmenschrift STEIGERWALD Strahltechnik. 2002.
- [3.4.4] N. N.: Firmenschrift PTR. 2002.
- [3.4.5] Schultz, H.: Elektronenstrahlschweißen. Düsseldorf, DVS-Verlag GmbH, 1989. ISBN 3-87155-111-2.
- [3.4.6] v. Dobeneck, D.: Elektronen-Mehrstrahlschweißen – Vision oder Wirklichkeit? Tagungsband zur 5. Konferenz „Strahltechnik“ am 27. und 28. November 2001 in Halle, S. 5-10.
- [3.4.7] Keitel, S.: Trends in der Entwicklung der Strahlschweißprozesse. Tagungsband zur 5. Konferenz „Strahltechnik“ am 27. und 28. November 2001. S. 1-4.
- [3.4.8] Dolby, R. E.; u. a.: Recent Developments and Applications in Electron Beam and Friction Technologies. Tagungsband zum 7. Int. Aachener Schweißtechnik Kolloquium am 3. und 4. Mai 2001, Band 1, S. 59-73.
- [3.4.9] Wiesner, P.: Technologie des Elektronenstrahlschweißens. Berlin, VEB Verlag Technik, 1989. ISBN 3-341-00640-0

-
- [3.4.10] Dilthey, U.; Weiser, J.: Untersuchungen des „Werkzeugs“ Elektronenstrahl – Teil 1: Vergleich der Arata-Beam-Test und Strahlvermessung Diabeam. Schweißen und Schneiden, Heft 5/1995, S. 339-345.
- [3.4.11] Dilthey, U.; u. a.: Strahlvermessungssystem zur Qualitätssicherung beim Elektronenstrahlschweißen. Schweißen und Schneiden, Heft 4/1992, S. 191-194.
- [3.4.12] Dilthey, U.; u. a.: Ein wissensbasiertes System zur Maschinen- und Prozessdiagnose und Qualitätssicherung beim Elektronenstrahlschweißen - Expertensystem. Schweißen und Schneiden, Heft 4/1992, S. 191-194.
- [3.4.13] Dilthey, U.; u. a.: Mathematische Simulation des Einflusses von Ionenkompensation, Eigenmagnetfeld und Streuung auf den Schweißelektronenstrahl. Report: 1999.
- [3.4.14] Vanschen, W.: Verzugsarm mit dem Elektronenstrahl schweißen – Anlagenkonzepte, Steuerung und Positionierung. Praktiker, Heft 11/1995, S. 558-562.
- [3.4.15] Ritz, P.: Fugenerkennung und selbsttätige Strahlnachführung entlang der Fuge beim Elektronenstrahlschweißen. Schweißen und Schneiden, Heft 12/1980, S. 504-505.
- [3.4.16] Croker, M.: In touch with the electron beam welding. Welding and Metal Fabrication, Heft 7/2001, S. 6-10.
- [3.4.17] Bach, F.-W.; u. a.: Non-Vacuum-Elektronenstrahlschweißen an Al- und Mg-Feinblechen. Tagungsband zur 5. Konferenz „Strahltechnik“ am 27. und 28. November 2001. S. 46-53.
- [3.4.18] Dilthey, U.; Behr, W.: Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre; Ein bewährtes Verfahren neu im Wettbewerb. Tagungsband zur 5. Konferenz „Strahltechnik“ am 27. und 28. November 2001. S. 54-59.
- [3.4.19] Schulze, K.-R.: Nonvacuum-Elektronenstrahlschweißen in der Industrie. Mit Vielfalt der Anlagenkonzepte zu hoher Wirtschaftlichkeit. Tagungsband zur 5. Konferenz „Strahltechnik“ am 27. und 28. November 2001. S. 60-66.
- [3.4.20] Bouaifi, B.; u. a.: Elektronenstrahlschweißen unter Atmosphärendruck. UTF science, Heft 3/2000, S. 14-18.
- [3.4.21] Schulze, K.-R.: Elektronenstrahlschweißen ohne Vakuumkammer. Maschinenmarkt, Würzburg, Heft 14/1997.
- [3.4.22] Dilthey, U.; u. a.: Dickblechschweißen mit dem Elektronenstrahl. TR Transfer, Heft 20/1994, S. 36-38.
- [3.4.23] Sobisch, G.: Wirtschaftliche Kombination von Elektronenstrahl- und Laserschweißtechnik. Tagungsband zur 5. Konferenz „Strahltechnik“ am 27. und 28. November 2001. S. 11-16.
- [3.5.1] Bouaifi, B.; Draugelates, U.; Helmich, A.; Ouaisa, B.: Plasmalichtbogenlöten - eine energiearme Fügetechnik für Feinblechwerkstoffe. In: Ta-

- gungsband Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen. DVS-Berichte Bd. 212, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2001, S. 88-92.
- [3.5.2] Rosert, R.; Winkelmann, R.: Löten hoch fester Stahlfeinbleche. In: Schweißen und Schneiden 54 (2002) H. 5, S. 246, 248-251.
- [3.5.3] N.N.: Process advantages with high-pressure quench vacuum furnaces. In: Metallurgia 66 (1999) H. 5, S. 30.
- [3.5.4] N.N.: Hot materials and design concepts. In: Metallurgia 69 (2002) H. 3, S. 14.
- [3.5.5] Farrell, T. P. jun.: Energy-saving blackbody coating, advanced materials improve vacuum-furnace hot-zone performance. In: Industrial Heating, 68 (2001) H. 10, S. 89-94.
- [3.5.6] Belt, H.-J.: Nocolok Flux Lötprozeß. In: Wielage, B. (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Werkstofftechnischen Kolloquium, Chemnitz, 14./15.10.1999, Chemnitz: Eigenverlag, 1999, S. 139-180.
- [3.5.7] Swidersky, H.-W.: Aluminium brazing with non-corrosive fluxes - state of the art and trends in NOCOLOK® flux technology. In: Tagungsband Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen. DVS-Berichte Bd. 212, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2001, S. 164-169.
- [3.5.8] Lohse, U.: Lampenheizsysteme für Forschung und Produktion. In: elektrowärme international (2000) H. 1, S. 18-21.
- [3.5.9] N.N.: Bleifrei: Fast alles im Lot. Baugruppenfertigung: In: EPP - Elektronik Produktion und Prüftechnik (2002) H. 11, S. 12-14.
- [3.5.10] Zigerlig, B.; Elsener, H. R.; Piazza, D.; Kiser, M.: Präzisionsfügen durch Hart-, Hochtemperatur- und Laserlöten, am Beispiel von ionenoptischen Komponenten von Massenspektrometern für eine wissenschaftliche Weltraummission (Rosetta Rosina Mission der ESA). In: Tagungsband Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen. DVS-Berichte Bd. 212, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2001, S. 147-150.
- [3.5.11] Knepper, P.; Lohwasser, D.: Hochtemperatur-Vakuumlöten von Titan-Absaugstrukturen für die Flugerprobung am Seitenleitwerk eines Airbus A320. In: Tagungsband Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen. DVS-Berichte Bd. 212, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2001, S. 223-230.
- [3.5.12] Terchila, J.; Kowaleski, J.: Vacuum furnace-control systems: Past, present and future. In: Industrial Heating, 68 (2001) H. 10, S. 113-114, 116.
- [3.6.1] Kleinert, H.: Neues in der Schweißtechnik 2001 – Klebtechnik. Schweißen und Schneiden, Heft 7/2002, S. 392-397.
- [3.7.1] N.N.: DVS/EFB-Merkblatt 3420 Clinchen (2002).
- [3.7.2] Kroh, R.: Erst am Beginn der Karriere. Maschinenmarkt, Heft 31/1999, S. 20-21.

-
- [3.7.3] N.N.: Der springende Punkt. Weniger Clinchpunkte – höhere Stabilität. Bänder Bleche Rohre, Heft 10/2000, S. 38-41.
- [3.7.4] N.N.: DVS/EFB-Merkblatt 3410 Stanznieten (2002).
- [3.7.5] Hahn, O.; u. a.: Garantie für festen Zusammenhalt. Mit Nieten und Clinchen zu modernen Leichtbaustrukturen. Bänder Bleche Rohre, Heft 3/2000, S. 44-48.
- [3.7.6] Grandt, J.: Schließringbolzensysteme. Bibliothek der Technik, Band 216, verlag moderne industrie (2001).
- [3.7.7] Wößner, J.; Spingler, J. C.: Radial- und Taumelclinchen. Kraftreduzierte Herstellung mechanischer Verbindungen mit dem Clinchen. Bleche, Rohre, Profile, Heft 1/2001, S. 36-38.
- [3.7.8] Matthes, K.-J.; Riedel, F.; Todtermuschke, M.: Entwicklung einer einseitig ebenen, einstufig mechanisch gefügten Verbindung. Tagungsband 7. Paderborner Symposium Fügetechnik (2000), S. 47-52.
- [3.8.1] Eissler, W.; u. a.: Praktischer Einsatz von berührungslos arbeitenden Sensoren. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1989, ISBN 3-8169-1167-6.
- [3.8.2] Juckenack, D.: Handbuch der Sensortechnik – Messen mechanischer Größen. Verlag moderne Industrie AG & Co., Landsberg am Lech, 1989, ISBN 3-478-41630-2.
- [3.8.3] Ruocco, S. R.: Sensoren und Wandler für Roboter. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1991, ISBN 3-527-27897-4.
- [3.9.1] Pollock, C.; Siewert, T. A. (Ed.): 11-th International Conference on Computer Technology in Welding. Dec. 2001, USA (Columbus, OH), 2002.
- [3.9.2] Cerjak, H. (Ed.): Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6, Maney Publishing, London, 2002 (Proc. of the 6-th Int. Seminar on Numerical Analysis of Weldability, A, Sept./Oct. 2001).
- [3.9.3] Seyffarth, P.; Scharff, A.: Schweißtechnische Software – Versuch einer Übersicht, DVS-Berichte, 198 (1999), S. 1-29, DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [3.9.4] Radaj, D.: Integrated Finite Element Analysis of Welding Residual Stress and Distortion. In [3.9.2] S. 469-489.