Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 16

Artikel: Einsatz des Elektrostrahlschweissens im Instrumentbau

Autor: Mettler, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915585

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

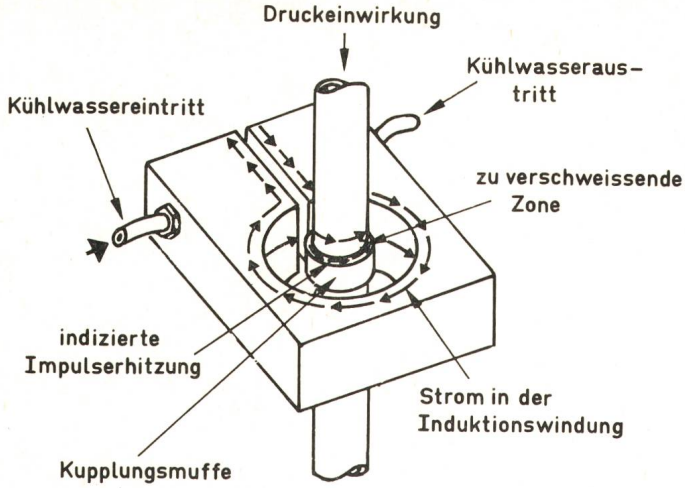

Fig. 24
Druckeinwirkung in Pfeilrichtung oben und induktive Impulserhitzung am Beispiel einer Verschweissung von Rohr mit Muffe

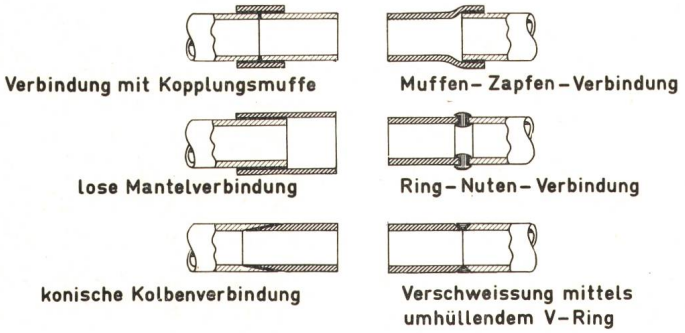

Fig. 25
Formgebung von Werkstücken für Kurzzeit-Induktionsverschweissung
Die Schmelzzone ist schwarz

stücken mit Eignung zur Impuls-Induktionsschweissung zeigt Fig. 25. Zu beachten ist stets, dass bei sehr kleinen Dimensionen, z. B. Durchmessern unter oder um 1 mm herum, die Erwärmung im Zeitbereich von etwa 5...50 ms vollzogen ist und die Drucknachführung entsprechend rasch ausgebildet sein muss. Bei fest neben- oder übereinander angeordneten Werkstücken mit einer automatisch ineinander verfliessenden Schmelzbadzone sind sehr viel längere Impulszeiten notwendig infolge der trägen Wärmeleitung, und die Impuls-Induktionsschweissung geht dann in die konventionelle Induktionserhitzung über, wobei geringe Arbeitsfrequenzen im Gebiet einiger hundert KHz wesentlich preisgünstiger die erforderlichen Leistungen zu erzielen erlauben. Dabei wird die hier vorliegende Thematik der Kurzzeitschweissung jedoch verlassen.

Literatur

[1] *F. B. A. Früngel:* Conversion of capacitively stored energy into heat. In: F. B. A. Früngel: High speed pulse technology. Vol. I, Chapter G. New York/London Academic Press, 1965; p. 338...401.

[2] *G. Kuper:* Überlegungen vor der schweisstechnischen Anwendung des Lasers. Der Praktiker, Schweissen und Schneiden 22(1970)9, S. 206...207.

[3] *R. Hartung*: Kondensatorentladungsschweissen in der Feinwerktechnik und Elektroindustrie. Der Praktiker, Schweissen und Schneiden 23(1971)2, S. 35.

[4] *A. Visser:* Zur Wirkungsweise des Werkstoffabtrages mit Elektronen- und Photonenstrahlen. In: Strahltechnik II. Vorträge des II. internen Kolloquiums «Strahltechnik» in Aachen vom 19. bis 20. Januar 1968. Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweisstechnik GmbH, 1968; S. 173...215.

[5] *F. Früngel, L. Ettenreich* und *K. H. Andre:* Impulshärten von Stahl. VDI-Z 114(1972)14, S. 1073...1078 + Nr. 16, S. 1234...1237.

[6] *F. Früngel:* Impulse härten Stahl. Vortrag auf dem deutschen Härtereikolloquium in Wiesbaden, September 1971. Maschinenmarkt 78(1972)12, S. 219...222.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *F. Früngel,* International Impulsphysics Association e. V., D-2000 Hamburg 56, Dr.-Ing. *G. Kuper* und Ing. *R. Hartung,* Impulsphysik GmbH, Sülldorfer Landstrasse 400, D-2000 Hamburg 56.

Einsatz des Elektronenstrahlschweissens im Instrumentenbau

Von *E. Mettler*

Der Aufsatz ist auf die Anwendung des Elektronenstrahlschweissens in der Fabrikation von mechanischen Messinstrumenten hoher Genauigkeit ausgerichtet, insbesondere aber auf die Herstellung von sog. Kapselfedermembranen und Aneroiddosen, die als Messfühler das Kernstück dieser Instrumente darstellen. Da die Qualität dieser Instrumente in hohem Masse von der Güte der Membranen oder Dosen abhängig ist, und diese ihrerseits von den Verbindungsverfahren, die zu ihrer Herstellung verfügbar sind, drängte sich die Anwendung dieses Schweissverfahrens aus mehreren Gründen auf. Diese sollen hier aufgezeigt werden.

Obwohl Nichttechniker, habe ich es übernommen, diesem Aufsatz eine kurze Einleitung über die Grundlagen des Elektronenstrahlschweissverfahrens zu geben. Ich bitte um Nachsicht, wenn dabei irgend etwas nicht genügend deutlich dargestellt werden sollte.

In groben Zügen sind die physikalischen Vorgänge dieses Verfahrens die folgenden:

Träger der Schweissenergie ist das Elektron. Dies ist ein Elementarteilchen, das eine Ruhemasse aufweist, eine negative Elementarladung trägt, ein magnetisches Moment und einen Eigendrehimpuls besitzt. Es befindet sich in der Atomhülle der Materie, wo es energetisch festgelegte Zustände einnimmt. Bei Metallen sind die äussersten Elektronen nur sehr schwach an die Atome gebunden. Durch Energiezuführung kann man sie zum Austritt aus der Metalloberfläche bringen. Bei den Elektronenstrahlschweissmaschinen geschieht dies durch Glühemission, erzeugt durch Zuführung elektrischer Energie, unter Verwendung eines meist direkt geheizten Wolframdrahtes.

Der Elektronenstrahl wird grundsätzlich in einem Vakuum von etwa 10^{-4} Torr in einer sog. Kanone erzeugt. Diese besteht in den Hauptgruppen aus einer Wolframkathode und einer ringförmigen Anode. Durch Anlegen einer Hochspannung von beispielsweise 30...200 kV zwischen Kathode und Anode, die, wie das Werkstück, am Massenpotentional liegt, erfolgt die nötige Beschleunigung der Elektronen, die dann mit bis zu ⅔ der Lichtgeschwindigkeit auf das Werkstück auftreffen.

Zwischen der Anode und dem Werkstück befindet sich eine elektromagnetische Fokusierlinse und eine Ablenkspule. So können Brennflecken erzielt werden mit Durchmesser

zwischen 0,1...0,5 mm und mit Leistungsdichten von $10^6...10^9$ W/cm², die bezüglich der Leistung nur vom Laser übertroffen werden. Die Ablenkspule erlaubt das Auslenken des Strahls in x- und y-Richtung bis zu 15 Winkelgraden. Auch eine kreisförmige Aussteuerung ist möglich, so dass eine kreisrunde Schweissung ausgeführt werden kann, ohne das Werkstück zu bewegen.

Durch Auftreffen des Elektronenstrahls mit ausreichender Energie auf das Werkstück entsteht in diesem eine feine Kaverne. Die Kavernenwand besteht aus Metallschmelze und im Zentrum befindet sich ionisierter Metalldampf. Durch Bewegen des Werkstückes oder des Strahles wandert diese Kaverne entsprechend der Bewegungsrichtung, so dass eine Schweissnaht entsteht. Die Metalldampfkaverne, oder der Kanal, falls es sich um eine durch das Werkstück hindurchgehende Schweissung handelt, bilden sich innert Sekundenbruchteilen.

Bezogen auf den Luftdruck, in dem sich das Werkstück befindet, unterscheidet man drei Verfahren: das Vakuum-, das Halbvakuum- und das Atmosphärenschweissen. Im Vakuumverfahren wird das Werkstück in eine Vakuumschweisskammer eingebracht, die je nach Kammergrösse und Vakuumanlage in einigen Sekunden auf 10^{-4} Torr oder besser evakuiert werden kann. Bei den beiden anderen Verfahren wird der Elektronenstrahl über Stufen in höheren Druck bis Umgebungsdruck gebracht. Dadurch kann je nach Werkstückmaterial die Pumpzeit sogar wegfallen.

Als wichtige Vorteile der Elektronenstrahlschweissung sind zu nennen:

a) Geringe Wärmeeinbringung in das Werkstück und damit verzugsarmes Schweissen, sowie Geringhaltung der Wärmeeinflusszone;
b) Erhaltung der Festigkeit vergüteter Materialien;
c) Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe zu verbinden;
d) Reine Schweissnaht im Vakuumverfahren;
e) Gleichmässiges und feinkörniges Nahtgefüge;
f) Schweissen ohne Zusatzwerkstoff;
g) Grosse Schweissgeschwindigkeit;
h) Gute Reproduzierbarkeit und Automation;
i) Starke Unabhängigkeit vom Bedienungspersonal.

Die Anwendungen liegen denn auch in der Fertigung hochwertiger Teile im Flugzeugbau, der Kerntechnik, der Massenfertigung von Relais, der Automobil- und Armaturenfabrikation, um neben der Feinwerktechnik nur einige typische Gebiete zu nennen.

Als Schweissnähte können einfache Stumpfschweissungen, die Verbindung von drei Teilen mit einer einzigen Schweissung, Rohrnähte längsseitig wie auch radial und simultane Mehrfachschweissungen ausgeführt werden.

Auch die Materialien, die elektronenschweissbar sind, sind sehr vielfältig und reichen von Kohlenstoffstählen, Chromstählen und Aluminiumlegierungen bis zu den reaktiven Materialien, wie z. B. Kupfer-Beryllium oder Nickel-Beryllium, die in Vakuum zu schweissen sind.

Wichtig für die Erzielung einwandfreier und vakuumdichter Schweissungen ist die gute Werkstückvorbereitung. Die zu verbindenden Teile sollten möglichst ohne Spalt aneinandergefügt sein, insbesondere wenn es sich um die Schweissung dünner Bleche von nur einigen hundertstels Millimetern handelt. Diese bedingen ohnehin bereits eine sehr gute Fokusierung des Elektronenstrahls und eine genaue Ausrichtung desselben, was dank einer optischen Kontrolle nicht allzuschwer zu erreichen ist. Organische Rückstände an den Nahtstellen, wie Fette und Öle, können die Schweissgüte beeinträchtigen. Sie verdampfen bei Auftreffen des Elektronenstrahls explosionsartig und können dabei Teile der Metallschmelze aus der Kaverne oder aus dem Schweisskanal herausschleudern.

Um die Gründe darstellen zu können, die uns veranlassten, eine Elektronenstrahlschweissmaschine zu beschaffen, möchte ich in einigen Sätzen, zum besseren Verständnis, etwas über unsere Firma und unsere Produkte sagen. Im Jahre 1853 gegründet, wurden bis 1936 ausschliesslich Ankeruhren hergestellt. Ermuntert durch die Bemühungen der Bundesbehörden, Mitte der 30er Jahre in der Schweiz eine Flugzeugindustrie aufzubauen, begannen wir 1936 mit der Fabrikation von pneumatisch funktionierenden Flugzeuginstrumenten, wie Höhenmesser, Geschwindigkeitsmesser und Variometer. Mit der technischen Entwicklung schritthaltend, bauten wir auch für die Mirage-Flugzeuge die entsprechenden Instrumente mit Messbereichen bis 2,5 Mach und 26 000 m Höhe. Aber auch Höhenmesser für Verkehrsflugzeuge wie die DC-8, DC-9 und DC-10, der Boeing 707, 727, 737 und 747 und andere, stellen wir her. Solche Höhenmesser stehen bei etwa 30 Fluggesellschaften im Einsatz, darunter auch in den Jets der Swissair. Zudem gehören Höhenmesser, die mittels einer Codiereinrichtung der Bodenkontrolle in digitaler Form die Flughöhe von Militär- und Geschäftsflugzeugen melden, zum Fabrikationsprogramm. Alle diese Instrumente, wie auch eine zweite Gruppe, unsere Präzisionsfeindruckmesser mit Anzeigengenauigkeiten von 1 ‰ auf linearen Skalen von 70 mm Durchmesser und bis zu 2 m Länge, die in der Mess- und Regeltechnik und der Prozesssteuerung ihre Anwendung finden, haben als Messelement Membrandosen, meistens aus Cu-Be-Legierungen mit 2 bis 2,5 % Be-Gehalt.

Für alle Anwendungsfälle genügte es bis 1950, diese Membranen mit Weichlot zu Messdosen zusammenzulöten. Mit dem Aufkommen der Düsenflugzeuge änderte dies. Die elastischen Nachwirkungen des Weichlotes und die Festigkeit der Lötstellen reichten für die gesteigerten Anforderungen nicht mehr aus. Damals gelang uns als zweite Firma der Welt die Entwicklung eines Verfahrens zum Hartlöten solcher Membrandosen mit Durchmessern von etwa 55 mm und Materialdicken bis herunter zu $^5/_{100}$ mm. Dadurch konnten wir unsere Marktstellung für Flugzeuginstrumente behaupten und jene für den Absatz der Druckmessinstrumente dank erhöhter Präzision und erweiterten Messbereichen ausweiten.

Die technischen Anforderungen steigerten sich jedoch weiter: Immer höhere Drücke sind mit gleicher Genauigkeit zu messen, z. B. 20 bar auf 1 ‰ genau. Zudem sind korrosionsbeständigere und temperaturstabilisierte Materialien wie Inconel, Ni-Span-C-, Ni-Be- und Co-Ni-Cr-Legierungen zu verarbeiten.

Diese erweiterten Anforderungen bedingten die Anwendung eines weiteren Verfahrens neben dem Weich- und Hartlöten, nämlich das Mikroplasmaschweissen. Versuche ergaben jedoch, dass Cu-Be-Legierungen mit diesem Verfahren nicht schweissbar sind. In dieser Phase stellten wir fest, dass inzwischen Elektronenstrahlschweissmaschinen auf den Markt gebracht wurden, die bezüglich der Abmessungen und des Preises auch unseren Möglichkeiten angemessen sind. Anlagen, die wir schon früher kennenlernten, wie etwa die

des Eidg. Institutes für Reaktorforschung oder der amerikanischen Raumfahrtindustrie, waren für uns aus Platz- und Preisgründen unerschwinglich.

Eine Prüfung des Einsatzes des Elektronenstrahlschweissens ergab, dass dieses folgende technische Vorteile bietet:

1. Eine wesentliche Qualitätsverbesserung unserer Produkte;
2. Dass wir alle Membrandosen wieder selbst herstellen können, nachdem wir aus technischen Gründen gewisse Dosen im Ausland haben herstellen lassen müssen, wo im Zusammenhang mit den Entwicklungen im Flugzeugbau bereits höhere Qualitätsanforderungen erfüllt werden konnten;
3. Dass wir statt ein drittes Verfahren einzuführen, uns wieder auf ein einziges reduzieren konnten und damit eine wesentliche Rationalisierung möglich war. Damit konnten wir auch auf Materialien, die wir andernfalls neu hätten verwenden müssen, verzichten, und nach völliger Umstellung werden wir auch keine Lote mehr benötigen;
4. Wir können die Arbeitsgänge zur Herstellung einer Dose von 18 auf 11 reduzieren und dabei alle jene ausschalten, die bisher die Qualitätsstreuung am stärksten negativ beeinflussten, wie Schmirgeln und Beizen, Arbeiten also, die ohnehin niemand mehr machen will;
5. Wird die Qualitätsstreuung wesentlich eingeschränkt und damit die Ausschussquote verringert;
6. Wird die Hysterese der Cu-Be-Aneroiddosen, die wir weiterhin in grosser Quantität benötigen, auf etwa die Hälfte reduziert;
7. Werden die Eichzeiten der herzustellenden Instrumente verringert, dank der vorerwähnten Qualitätsverbesserung der Dosen.

Diesen technischen und betrieblichen Vorteilen war nun die Kostenrechnung gegenüberzustellen. Diese ergab:

1. Eine wesentliche Steigerung des Kostenansatzes gegenüber dem bisherigen Verfahren von Fr. 15.80 auf Fr. 42.30 pro Arbeitsstunde, dies bei Zugrundelegung einer Abschreibung über 10 Jahre;
2. Eine Auslastung der Anlage von 80 % auf Grund der heutigen Gegebenheiten, wobei bei eventuell später nötig werdender Steigerung der Arbeitsstunden auf 1½ Schichten, der Kostensatz vergleichsweise auf Fr. 34.20 gesenkt werden könnte eventuell durch Übernahme von Lohnaufträgen von auswärts;
3. Bezogen auf eine 80 %ige Auslastung eine Kostensenkung um 17,5 % pro Dose, was einer Einsparung von Fr. 30 000.– pro Jahr entspricht;
4. Eine Reduktion des Personals;
5. Eine Senkung des Lohnanteils in der Kostenrechnung von bisher 55 auf 19 %, womit künftige Lohnteuerungen besser getragen werden können als bisher.

Diesen wesentlichen Vorteilen stehen natürlich auch Nachteile gegenüber, wie:

1. Die relativ hohen Anschaffungskosten von 230 000 Franken.
2. Es müssen einige bestehende Formwerkzeuge an die neue Technik angepasst werden, damit die gleichen Dosenauslenkungsdiagramme wieder erreicht werden können;
3. Es sind neue Erfahrungen zu sammeln und neue Werkzeuge und Einrichtungen zu erstellen;
4. Wir werden von Störungen der Schweissanlage härter betroffen. Bisher standen 3 Hochfrequenzgeneratoren im Einsatz, während vorläufig nur eine Schweissanlage beschafft werden konnte. Daher ist eine rasche und gute Serviceleistung der Lieferfirma notwendige Voraussetzung für die Vermeidung längerer Fabrikationsunterbrüche.

Da in der Kostenrechnung die Abschreibung einen wesentlichen Einfluss hat, haben wir uns wegen eventuell zu erwartender technischer Neuerungen mit einem Professor der Physik der EPFL besprochen. Da wir auf hochvakuumdichte Schweissungen angewiesen sind, kann das Laser-Schweissen in absehbarer Zeit für unsere Bedürfnisse nicht in Frage kommen. Zudem kamen wir zur Überzeugung, dass der technische Stand der Elektronenstrahlschweissmaschinen eine Höhe erreicht hat, die eine Abschreibung über 10 Jahre als vernünftig erscheinen lässt.

Und nun noch kurz einige Angaben zu unserer Anlage. Es handelt sich um eine 30-kV-Hochvakuum-Elektronenstrahl-Schweissmaschine von England, mit einer Emissionsstromstärke bis 30 mA. Sie ist ausgerüstet mit einer Vakuumkammer von 152 mm Durchmesser und 203 mm Länge. Der normale Arbeitsdruck in der Kammer beträgt 10^{-2} Torr, wobei ein Arbeitszyklus von 20 s erreicht wird, ohne Einlegen und ohne Entladen. Mittels einer zusätzlichen Diffusionspumpe wird in einem 25-s-Zyklus ein Vakuum von besser $5 \cdot 10^{-4}$ Torr erreicht, was für Aneroiddosen für Flugzeughöhenmesser nötig, aber auch zur Erzielung eines reineren und feineren Schweissgefüges vorteilhaft ist. Der Elektronenstrahl kann auf einen Brennfleck von 0,1 mm Durchmesser bei 4 mA fokusiert und sowohl in der x- und y-Achse, wie auch kreisrund ausgelenkt werden.

Zur Werkzeugausrüstung gehört eine Vorrichtung zum Zusammenschweissen von zwei Membranen zu einer Aneroiddose, wobei die beiden Membranen erst nach Erreichen des gewünschten Vakuums zusammengepresst und dann verschweisst werden.

Ein zweites Werkzeug ermöglicht Linearschweissungen bis zu einer Länge von 80 mm oder auf 3 Positionen Rundschweissungen mittels zirkulierendem Elektronenstrahl.

Die Abmasse der Anlage: 167 × 76 × 109 cm in Breite, Tiefe und Höhe. Die Kanone selbst steht 23 cm oben heraus. Die Schweissprozesse sind im Ablauf durch elektronische Steuerungen automatisiert, bis auf das Einlegen der Membranen und das Herausnehmen der geschweissten Dosen.

Adresse des Autors:
Dr. rer. pol. *E. Mettler*, Revue Thommen AG, 4437 Waldenburg.