

Elektronenstrahl-Schweissen

Mehr als ein Werbeslogan

Rationalisierungsfragen und Einsparpotentiale stehen im Vordergrund

Die Anwendung des Elektronenstrahlschweissens (EB-Schweissen) wird im Allgemeinen dadurch interessant, indem eine Schweissaufgabe dieses Verfahren nicht nur unabdingbar macht, sondern auch, weil die Kosten für die Herstellung einzelner Komponenten und deren Fügen zum fertigen Werkstück niedriger sind, als die Kosten für dessen Herstellung aus einem Stück (Abb.1). Auch die Aufteilung eines Werkstücks in unterschiedliche Werkstoffe kann wesentliche Vorteile bringen. Insbesondere die Einsparung von Werkstoffen, Reduzierung von Form- und Fertigungskosten sowie funktionsgerechtere Konstruktionen sind die Zielvorstellungen der heutigen Ansätze für die Anwendung des Elektronenstrahlschweissens. Dabei ist es wesentlich das Elektronenstrahlschweissen bereits im frühen Stadium der Produktkonstruktion mit heranzuziehen. In vielen Fällen lohnt sich eine vergleichende Betrachtung schon existierender Fertigungsabläufe mit den durch Elektronenstrahlschweissen gegebenen Möglichkeiten. Derartige Untersuchungen sind oft komplex; es gibt aber unendliche Beispiele die belegen, dass solch ein Vorgehen sinnvoll ist.

Peter Schmidt, SwissBeam AG, 8964 Rudolfstetten

Die gerätetechnische Seite einer Elektronenstrahl-Schweissmaschine ist gegenüber anderen Schweiss-Verfahren durch einen erheblichen technischen Aufwand und daher mit höheren Investitionskosten gekennzeichnet. Vakuumtechnik im Druckbereichen bis 10^{-9} mbar und Hochspannungstechniken im Bereich bis 150 kV sind nur zwei Teilaspekte im gerätetechnischen Schema.



Abb. 1: Zwei kostengünstige Einzelteile im Querschnitt dicht verschweisst.



Abb. 2: NC-gesteuerte Elektronenstrahl-Schweissmaschine mit 150KV und 15 kW Leistung.

Werden die Leistungen und Möglichkeiten des Elektronenstrahlschweissens mit anderen Fügeverfahren verglichen so zeigt sich, dass sich in vielen Fällen geringere Fertigungskosten durch das EB-Schweissen erzielen lassen.

In Gesprächen mit Konstrukteuren, Fertigungsplanern und Einkäufern über Fügeverfahren, zeigt sich, dass gerade bei diesem Personenkreis das Elektronenstrahl-Schweissen eine besondere Stellung einnimmt.

Der Strahl mit höchster Intensität

Die Erzeugung des Elektronenstrahls erfolgt grundsätzlich im Vakuum bei einem Druck von ca. 10^{-4} mbar. Dafür besitzt jede Elektronenstrahl-Schweissmaschine (Abb. 2) einen Strahlgenerator (Abb. 3), der auch „Kanone“ genannt wird. In dieser Kanone befindet sich eine geheizte Wolframkathode, die sich auf negativem Potential bis zu -150 kV befindet. Sie hat die Aufgabe Elektronen zu emittieren.

Wo eine Kathode ist, findet sich meist auch eine Anode, so auch in der Kanone. Zwischen den beiden liegt eine Hochspannung an, welche die Elektronen beschleunigt. Durch eine Steuerelektrode, auch Wehneltzylinder genannt werden die beschleunigten Elektronen zum Elektronenstrahl gebündelt. Zusätzliche elektronenoptische Einheiten im Generator sind Lochblenden und Ablenssysteme für den Strahl. Innerhalb dieses Strahls fliegen die einzelnen Elektronen mit bis zu $2/3$ Lichtgeschwindigkeit ihrem Verwendungszweck entgegen.

Der Strahlgenerator bezieht seine Energie aus einem Hochspannungstransformator mit angeschlossener Gleichrichtung. Oft wird zwischen Hochspannungstransformator und Strahlgenerator ein Impulsgeber geschaltet, wodurch der Strahl in Impulsen mit veränderlicher Frequenz und Einschalt-dauer emittiert. Das Schweissen mit Impulsstrahlen kann noch schmalere und tiefere Schweissnähte herbeiführen. Neue Anlagen sind mit Einschalt- und Auslaubbereich ausgestattet. Alle Hauptschalter der elektronischen Versorgung sind verriegelt, so dass eine Fehlbedienung der Anlage, insbesondere der Hochspannung, ausgeschlossen ist.

Der Strahl stellt den Energiefluss dar, dessen Umsetzung in Wärme erst an der Auftreffstelle, sprich am Werkstück

stattfindet. Um eine entsprechende Leistungsflussdichte zu erzielen, wird der Elektronenstrahl (Abb. 4) fokussiert und kann je nach Einstellung einen Durchmesser von 0.1 bis 1 mm erreichen. Dieser kleine Strahl hat eine sehr hohe Leistungsintensität von über 10 Millionen Watt/cm². Dieser Wert ist bis zu fünfzig Mal höher als bei herkömmlichen Lichtbogen - Schweißverfahren. Daraus ergibt sich die Möglichkeit grosse Nahtiefen schnell zu schweißen und dabei die wärmebeeinflussten Zonen sehr klein zu halten.

Trifft ein solch intensiver Strahl auf eine Werkstückoberfläche, schmilzt diese örtlich begrenzt auf und verdampft teilweise. Die Eindringtiefe liegt unter 0,1mm und dabei werden die meisten Elektronen im Metall gehalten bzw. einige wenige Elektronen werden zur Beobachtung des Schweißprozesses genutzt.

Je stärker der Strahl gebündelt ist, umso höher wird der Anteil verdampften Materials, das heisst der zunächst reine Schmelzprozess ist verbunden mit einem Abtragen von Material. Selbststabilisierende Vorgänge treten dabei nicht auf und die genaue Kontrolle des Elektronenstrahls wird mit einem erheblichen Aufwand im Energieversorgungsteil des Elektronenstrahlerzeugungssystems, insbesondere mit Regelanorganen in der Elektronenstrahlkanone sichergestellt.

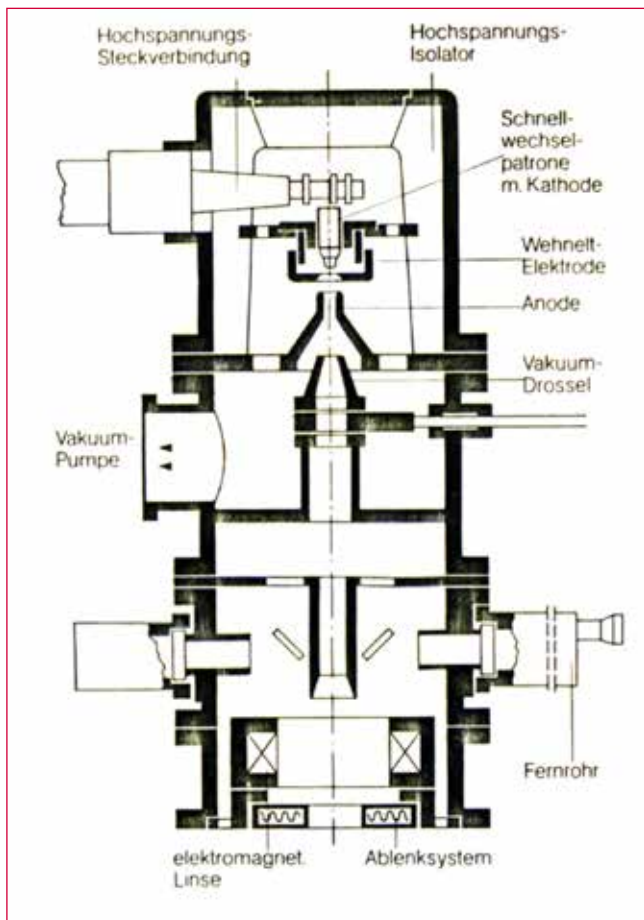


Abb. 3: Schematische Darstellung des Strahl-Generators mit seinem Triodensystem (Kathode, Steuerelektrode und Anode).



Abb. 4: Originalaufnahme eines Elektronenstrahls mit Schmelze, 12-fach vergrößert.

Durch geeignete Steuersysteme ist es möglich, dass sich der Strahl ohne vorgegebene Wegkoordinaten die Schweißnaht selber sucht. Die Daten des Elektronenstrahls werden in einem Programm erfasst, so dass unabhängig von Maschinen - Operateur reproduzierbar geschweisst werden kann.

Vorteile der hohen Strahlintensität sind:

- Hohe Schweißgeschwindigkeit
- Geringe Wärmeeinbringung, dadurch verzugsarmes Schweißen an fertig bearbeiteten Teilen
- Gleichmässiges, feinkörniges und reines Nahtgefüge
- Hohe Reproduzierbarkeit
- Schweißen ohne Zusatzwerkstoff
- Schweißmöglichkeit auch an unzugänglicher Stellen
- Möglichkeit unterschiedliche Werkstoffe zu verbinden

Luftleerer Raum

Das Vakuum, welches zur Erzeugung des Elektronenstrahls nötig ist, wird von zuverlässigen Vakuumsystemen erzeugt. Diese erlauben es eine Schweißkammer zum Elektronenstrahl-Schweißen in wirtschaftlich vertretbarer Zeit zu evakuieren. Durch automatische Vakuumsteuerungen sind auch jegliche Bedienungsfehler ausgeschlossen. Das Elektronenstrahlschweißen erfolgt bei einem Druck unter 10⁻⁴ mbar.

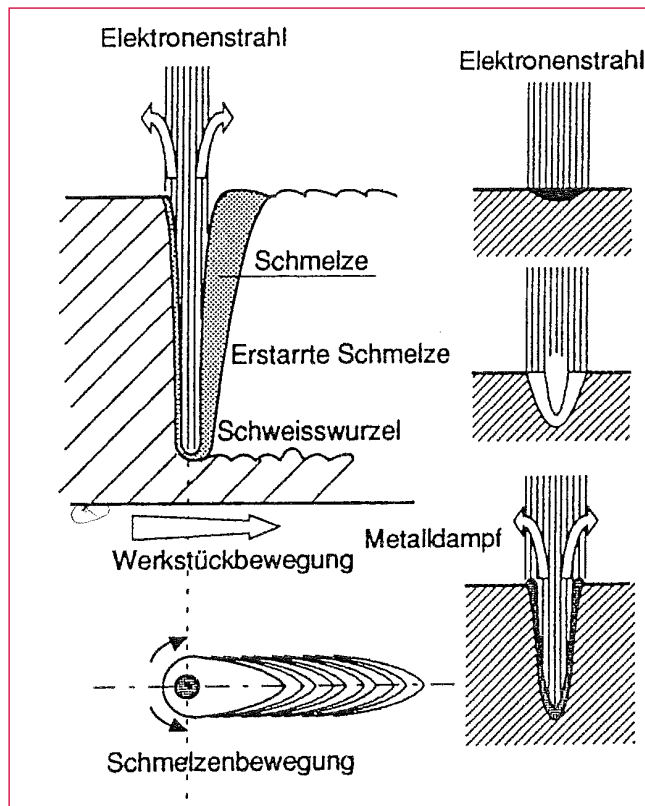


Abb. 5: Der Dampfdruck verdrängt die Schmelze und es entsteht ein Dampfkanal. Dadurch können die Elektronen tiefer in das Werkstück vordringen, es entsteht die Tiefenschweißung.



Abb. 6: Durch Schmelzen und Verdampfen kann der Strahl tief ins Material eindringen (Tiefenschweisseffekt) und in einem Arbeitsgang 100mm tiefe Nähte in Stahl erzeugen.



Abb. 7: Schliffbild mit einer 55mm tiefen Naht. Mit einem Breiten Tiefen Verhältnis von 1:50 werden Nahtbreiten erzielt, die im Vergleich zu WIG oder MAG Nähten etwa 2% der Breite entspricht.

Im Falle eines höheren Drucks, insbesondere bei Atmosphärendruck verliert der Elektronenstrahl seine typischen Eigenschaften, wie exakte Steuerbarkeit, hohe Leistungsdichte, grosse Reichweite und Eindringtiefe.

Üblicherweise herrscht im Strahlgenerator ein Vakuum von 10^{-4} mbar. Das bedeutet von jeweils 10 Millionen Molekülen Luft bleibt nur noch 1 Molekül im Generator und der Arbeitskammer übrig. Der Strahl kann aber auch mit Hilfe einer Druckstufenstrecke in Kammern mit einem Druck von 10^{-2} mbar oder höher geleitet werden. Mit zunehmendem Druck nehmen die Elektronenreichweite und damit die Qualität der Schweißung ab.

Zum Evakuieren des Strahlgenerators und der Kammer werden leistungsfähige Pumpen eingesetzt. Dazu haben sich Drehkolbenpumpen (Rootspumpen) als Vorpumpen bewährt und nachdem ein bestimmtes Vorvakuum erreicht ist, werden Turbo-Molekularpumpen gestartet.

Die Schmelze und die daraus resultierende schmale und tiefe Naht

Trifft der gebündelte Elektronenstrahl mit ausreichender Energie auf dem Werkstück auf entsteht zunächst eine Kaverte, wodurch die Elektronen sehr tief eindringen können und einen grossen Teil ihrer Energie in Sekundenbruchteilen an der Auftreffstelle abgeben.

Im Zentrum des Dampfkanals (Abb. 5) befindet sich ionisierter Metalldampf. Die Kanalwände bestehen aus der Schmelze des Werkstoffes. Nachfolgende Elektronen durchdringen diesen Metalldampf und geben ihre Energie auf dem Boden des Dampfkanals frei.

Der Dampfdruck in der Kapillare muss grösser sein als die Oberflächenspannung des umgebenden Schmelzbades. Die Bildung dieses Dampfkanals erfolgt im Millisekundenbereich. Die Bewegung zwischen Werkstück und Strahlachse bewirkt dann eine aufgeschmolzene und wiedererstartete Zone.

Das Tiefschweißen (Abb. 6) wird ohne Verwendung von Zusatzwerkstoffen durchgeführt. Metallurgische und geometrische Ergebnisse lassen sich weitestgehend vorausbestimmen und damit innerhalb enger Toleranzen reproduzierbar in den Verfahrensablauf einbeziehen. Damit erstreckt sich der Einsatz des Elektronenstrahl-Schweißens über die bisher dem Schweißen zugänglichen Bereiche hinaus bis zum Fügen auf fertig bearbeiteter Werkstücke, was einem "Montieren" gleichkommt.

Elektronenstrahl geschweisste Nähte sind durch ein besonderes Verhältnis von Nahtbreite zur Nahttiefe (Abb. 7) sowie einer schmalen Wärmeeinflusszone gekennzeichnet.

Schweisstechnische Verwendung

Generell lassen sich mit dem Elektronenstrahl metallische Werkstoffe stumpf schweißen. Auch unterschiedliche Metallkombinationen sind möglich, soweit nicht spröde, intermetallische Phasen auftreten. Aus der Gruppe der Leichtmetalle können folgende Werkstoffe bevorzugt mit diesem Verfahren verbunden werden: Aluminium und dessen Legierungen sowie Titan und dessen Legierungen. Besonders eignet sich der Elektronenstrahl zum Schweißen hochschmelzender Metalle wie Titan, Wolfram, Molybdän oder Tantal. Superlegierungen, austenitische Werkstoffe sowie auch Kupfer und Baustähle lassen sich ebenfalls mühelos mit dem Elektronenstrahl fügen.

Statisch werden Festigkeitswerte des Grundwerkstoffs erreicht. Die Festigkeitswerte von geschweissten Verbindungen sind denen des Grundwerkstoffs sehr ähnlich.

Beispiel von Festigkeitswerten bei Baustählen nach dem EB-Schweißen

Werkstoff	[N/mm ²]	
	Soll	Ist
1.0451	360/480	430
1.7335	440/590	490

Ein Abfall der Duktilität elektronenstrahlgeschweisster Stähle lässt sich durch den Einfluss von Legierungselementen definieren und kann mittels des Kohlenstoffäquivalents CEV auf (Kalt-) Rissneigung in den ausgehärteten Zonen definiert werden, ob eine Wärmebehandlung vor und/oder nach dem Schweißen notwendig ist (Diagramm 1).

Rissentstehungen sind aber noch von weiteren Faktoren wie dem Wasserstoffgehalt, der Werkstückgeometrie und den Schweißparametern abhängig. Da die genannten Punkte auch Auswirkungen auf die Abkühlzeit haben wird die Abkühlzeit ($t_{8/5}$) zur Reduzierung der Härte und Rissgefahr mit einbezogen. Einen wichtigen Einfluss auf die Abkühlzeit, hat die Streckenenergie, welche im Schweißprozess gesteuert wird.

Unter Berücksichtigung des Kohlenstoffäquivalents ist die Vorwärmung, unter Berücksichtigung der Wanddicke, des wärmeableitenden Querschnittes und des Wärmeeinbringens zu wählen. Dadurch wird die kritische Abkühlgeschwindigkeit reduziert bzw. die Abkühlzeit erhöht, da die Abkühlung durch die zusätzliche Wärme verzögert wird.

Durch das Vorwärmen können spröde Aufhärtungszonen in der Wärmeeinflusszone (WEZ) vermieden werden. Für hohe Anforderungen an die Kaltzähigkeit ist deshalb bereits bei relativ geringen Blechdicken (ab ca. 12 mm) ein Vorwärmen auf ca. 80 - 150°C ratsam. Die Grobkornbildung ist mit einem Zähigkeitsabfall bei leichtem Härteanstieg verbunden. Die

Zwischenlagentemperatur liegt meist bei min. 50°C über Vorwärmtemperatur, allerdings max. 250°C.

Je höher die Vorwärmtemperatur, desto grösser wird die $t_{8/5}$ -Zeit. Es handelt sich dabei um eine Wärmeeinbringung ins Bauteil vor dem Schweißen und ist technologisch die wirkungsvollste Methode, um bei schlecht schweisbaren Stählen die Ausbildung des Gefüges während des Abkühlens zur Reduzierung der Härte positiv zu beeinflussen. Zudem verringern vorgewärmte Bauteile in der Regel den Eigenspannungszustand. Mit entsprechender Vorwärmung sind selbst Stähle mit relativ hohem Kohlenstoffäquivalent schweißgeeignet.

Was kann geschweisst werden

Nachfolgende Beispiele zeigen, wie vielseitig der Elektronenstrahl als Fügwerkzeug heute angewandt wird.

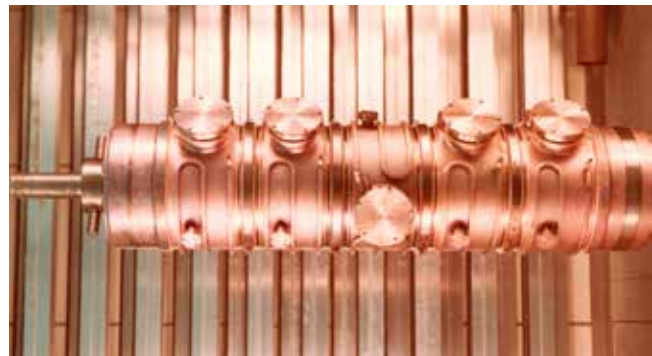


Abb. 8: Zeigt ein Ringbeschleuniger in dem etliche Kupfereinzelsegmente zu einer Einheit verbunden wurden.



Abb. 9: Eine Kontaktscheibe aus Silber die mit einem Stator aus Kupfer mittels Elektronenstrahl gefügt ist.



Abb. 10: Kupferanschluss in einer Tiefe von 25mm geschweisst. Der Elektronenstrahl erlaubt hier eine Schmelz-Verbindung, was mit anderen Verfahren technologisch nicht möglich wäre.

