ANWENDUNG DES ELEKTRONENSTRAHLSCHWEISSENS

Vom Einzelteil bis zur Großserienfertigung

Peter Schmidt, Rudolfstetten/Schweiz

Die Investitionskosten für eine Elektronenstrahlschweißanlage sind zweifellos bedeutend. Dank der hohen Schweißgeschwindigkeiten und der damit verbundenen kurzen Schweißzeiten werden aber nur geringe Stückkosten erzeugt. Das Einsatzgebiet des Elektronenstrahlschweißens als multifunktionales Verfahren reicht von der Herstellung exzellenter Einzelteile bis hin zur Großserienfertigung.

Die Anwendung des Elektronenstrahlschweißens (EB-Schweißen) wird im Allgemeinen dadurch interessant, dass eine Schweißaufgabe dieses Verfahren unabdingbar macht und die Kosten für die Herstellung einzelner Komponenten und deren Fügen zum fertigen Werkstück niedriger sind, als die Kosten für dessen Herstellung aus einem Stück (**Bild 1**). Auch die Aufteilung eines Werkstücks in unterschiedliche Werkstoffe kann wesentliche Vorteile bringen. Insbesondere die Einsparung von Werkstoffen, die 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 sehr viele Beispiele, die belegen, dass solch ein Vorgehen sinnvoll ist.

◀ Bild 1. Zwei kostengünstige Einzelteile im Querschnitt dicht verschweißt

Die gerätetechnische Seite einer Elektronenstrahl-Schweißmaschine ist gegenüber anderen Schweißverfahren durch einen erheblichen technischen Aufwand und daher durch höhere Investitionskosten gekennzeichnet. Vakuumtechnik in Druckbereichen bis 10^{-9} mbar und Hochspannungstechniken im Bereich bis 150 kV sind nur zwei Teilaspekte im gerätetechnischen Schema. Werden die Leistungen und Möglichkeiten des Elektronenstrahlschweißens mit anderen Fügetechniken 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 Elektronenstrahlschweißen eine besondere Stellung einnimmt.

Strahl mit höchster Intensität

Die Erzeugung des Elektronenstrahls erfolgt grundsätzlich im Vakuum bei einem Druck von etwa 10^{-4} mbar. Dafür hat jede Elektronenstrahl-Schweißmaschine (**Bild 2**) einen Strahlgenerator (**Bild 3**), der auch „Kanone" genannt wird. In dieser Kanone befindet sich eine geheizte Wolframkathode, die sich auf negativem Potenzial 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, die die Elektronen beschleunigt. Durch eine Steuerelektrode, auch Wehneltzylinder genannt, werden die beschleunigten Elektronen zum Elektronenstrahl gebündelt. Zu-

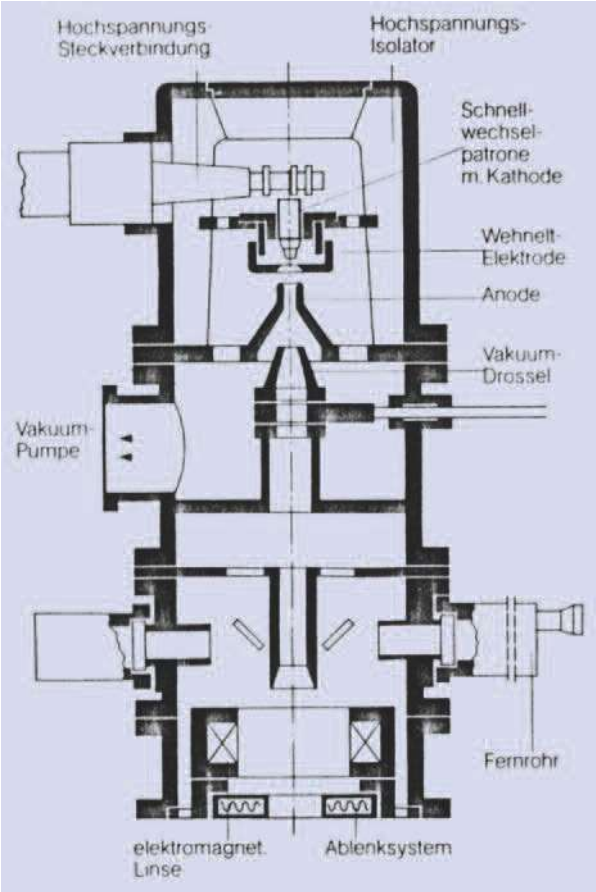
▲ Bild 2. Numerisch gesteuerte Elektronenstrahl-Schweißmaschine mit 150 KV Spannung und 15 kW Leistung

sätzliche elektronenoptische Einheiten im Generator sind Lochblenden und Ablenksysteme 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 Einschaltdauer emittiert. Das Schweißen mit Impulsstrahlen kann noch schmalere und tiefere Schweißnähte herbeiführen. Neue Anlagen sind mit Einschalt- und Auslaufbereich ausgestattet. Alle Hauptschalter der elektronischen Versorgung sind verriegelt, sodass eine Fehlbedienung der Anlage, insbesondere der Hochspannung, ausgeschlossen ist.

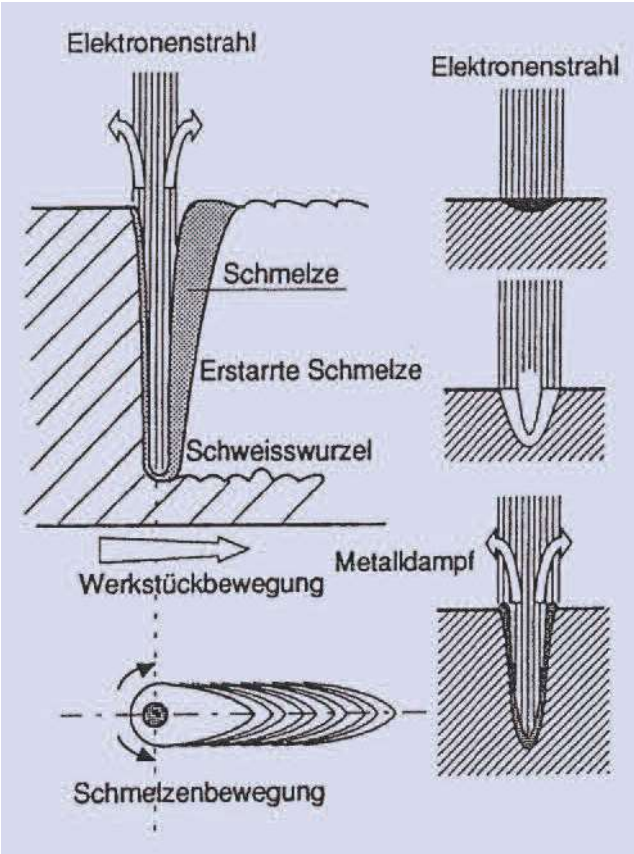
Der Strahl stellt den Energiefluss dar, dessen Umsetzung in Wärme erst an der Auftreffstelle, sprich am Werkstück, stattfindet. Um eine entsprechende Leistungsflussdichte zu erzielen, wird der Elektronenstrahl (**Bild 4**) fokussiert und kann je nach Einstellung einen Durchmesser von 0,1 bis 1 mm erreichen. Dieser kleine Strahl hat eine sehr hohe Leistungsintensität von über 10 Mio. Watt/cm^2. Dieser Wert ist bis zu fünfzig Mal höher als bei herkömmlichen Lichtbogen-Schweißverfahren. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, große Nahttiefen schnell zu schweißen und dabei die wärmebeeinflussten Zonen sehr klein zu halten.

Trifft ein solch intensiver Strahl auf eine Werkstückoberfläche, schmilzt diese örtlich



◀ Bild 3. Schematische Darstellung des Strahlgenerators mit seinem Triodensystem (Kathode, Steuerelektrode und Anode)

▶ Bild 4. Originalaufnahme eines Elektronenstrahls mit Schmelze, zwölffach vergrößert



◀ Bild 5. Der Dampfdruck verdrängt die Schmelze, und es entsteht ein Dampfkanal. Dadurch können die Elektronen tiefer in das Werkstück vordringen, was eine Tiefenschweißung ermöglicht.

begrenzt auf und verdampft teilweise. Die Eindringtiefe liegt unter 0,1 mm, dabei werden die meisten Elektronen im Metall gehalten. Der Elektronenstrahl schmilzt das Metall an, und ein Teil davon verdampft, sodass eine Kapillare (Kaverne) in der Schmelze entsteht. Durch die Kapillare dringt der Elektronenstrahl tief in das Werkstück ein, und man spricht vom Tiefenschweißeffekt. Dieser Prozess ermöglicht es, dass tiefe und schlanke Nähte entstehen.

Einige wenige Elektronen werden zur Beobachtung des Schweißprozesses genutzt. Je stärker der Strahl gebündelt ist, umso höher wird der Anteil verdampften Werkstoffs, das heißt, der zunächst reine Schmelzprozess ist verbunden mit einem Abtragen von Werkstoff. Selbststabilisierende Vorgänge treten dabei nicht auf. Die genaue Kontrolle des Elektronenstrahls wird mit einem erheblichen Aufwand im Energieversorgungsteil des Elektronenstrahlerzeugungssystems, insbesondere mit Regelorganen in der Elektronenstrahlkanone, sichergestellt.

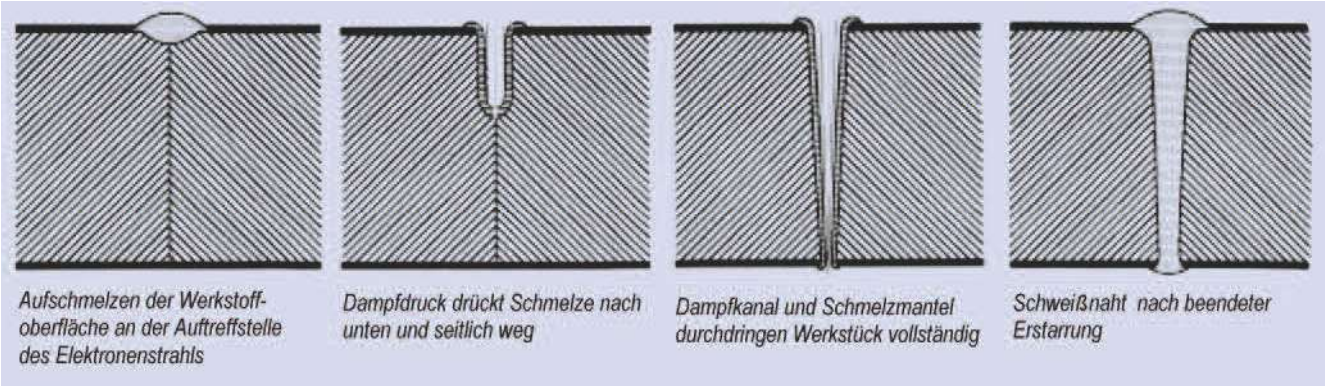
Durch geeignete Steuersysteme ist es möglich, dass sich der Strahl ohne vorgegebene Wegkoordinaten die Schweißnaht selber sucht. Die Daten des Elektronenstrahls werden in einem Programm erfasst, sodass unabhängig vom Maschinenbediener reproduzierbar geschweißt werden kann.

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 unzugänglichen Stellen,
- Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe zu verbinden.

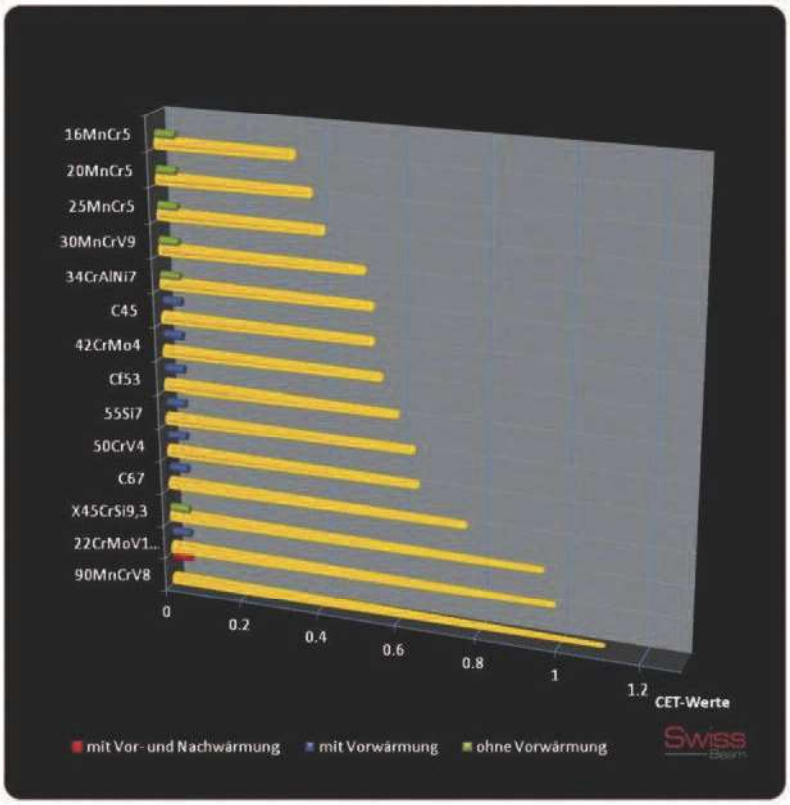
Das Vakuum, das zur Erzeugung des Elektronenstrahls nötig ist, wird von zuverlässigen Vakuumsystemen hergestellt. Diese erlauben es, eine Schweißkammer zum Elektronenstrahlschweißen in wirtschaftlich vertretbarer Zeit zu evakuieren. Durch automatische Vakuumsteuerungen sind auch jegliche Bedienungsfehler ausgeschlossen. Das Elektronenstrahlschweißen erfolgt bei einem Druck unter 10^{-4} mbar. Im Falle eines höheren Drucks, insbesondere bei Atmosphärendruck, verliert der Elektronenstrahl seine typischen Eigenschaften wie exakte Steuerbarkeit, hohe Leistungsdichte, große Reichweite und Eindringtiefe.

Der Druck im Strahlgenerator von üblicherweise 10^{-4} mbar bedeutet, dass von jeweils 10 Mio. Molekülen Luft nur noch ein Molekül im Generator und eins in der Arbeitskammer übrigbleiben. Der Strahl kann aber



▲ Bild 6. Durch Schmelzen und Verdampfen kann der Strahl tief in den Werkstoff eindringen (Tiefschweißeffekt) und in einem Arbeitsgang 100 mm tiefe Nähte in Stahl erzeugen.

▲ Bild 7. Schliffbild mit einer 55 mm tiefen Schweißnaht; mit einem Breiten-Tiefen-Verhältnis von 1:50 werden Nahtbreiten erzielt, die im Vergleich zu Wolfram-Inertgas(WIG)- oder Metall-Schutzgas(MAG)-Schweißnähten etwa 2% der Breite entsprechen.



▲ Bild 8. Ein CET-Wert über 0,5 zeigt eine eingeschränkte Schweißeignung auf; ein Vorwärmen wird empfohlen.

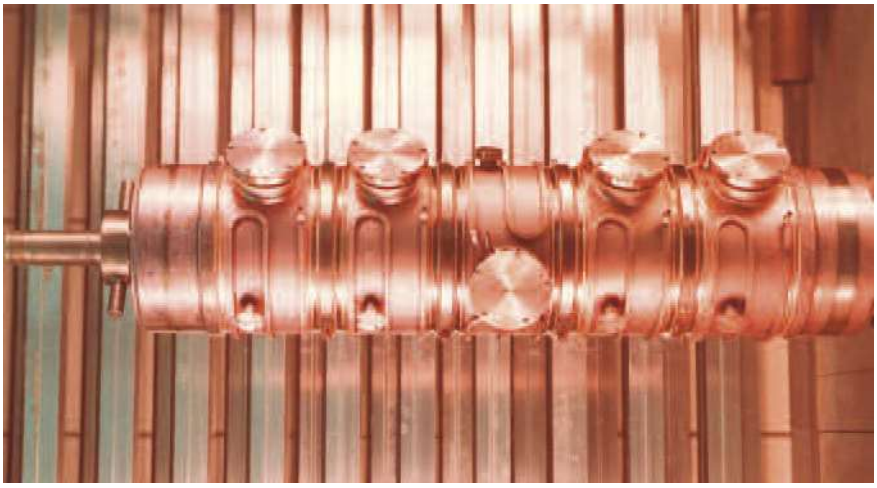
auch mithilfe einer Druckstufenstrecke in Kammern mit einem Druck von 10^{-2} mbar oder höher geleitet werden. Mit zunehmendem Druck nehmen die Elektronenreichweite und damit die Qualität der Schweißung ab. Zum Evakuieren des Strahlgenerators und der Kammer werden leistungsfähige Pumpen eingesetzt. Dazu haben sich Drehkolbenpumpen (Rootspumpen) als Vorpumpen bewährt. Nachdem ein bestimmtes Vorvakuum erreicht ist, werden Turbo-Molekularpumpen gestartet.

Schmale und tiefe Nähte

Trifft der gebündelte Elektronenstrahl mit ausreichender Energie auf dem Werkstück auf, entsteht zunächst eine Kaverne, wodurch die Elektronen sehr tief eindringen können und einen großen Teil ihrer Energie in Sekundenbruchteilen an der Auftreffstelle abgeben. Im Zentrum des Dampfkanals (**Bild 5**) befindet sich ionisierter Metalldampf. Die Kanalwände bestehen aus der Schmelze des Werkstoffs. 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 Schmelzbads. Die Bildung dieses Dampfkanals erfolgt im Millisekundenbereich. Die Bewegung zwischen Werkstück und Strahlachse bewirkt dann eine aufgeschmolzene und wiedererstarrte Zone.

Das Tiefschweißen (**Bild 6**) wird ohne Verwendung von Zusatzwerkstoffen durchgeführt. Metallurgische und geometrische Ergebnisse lassen sich weitestgehend vorausbestimmen und damit innerhalb enger Toleranzen reproduzierbar in den Verfahrensablauf



▲ Bild 9. Ringbeschleuniger, in dem etliche Kupfereinzelsegmente zu einer Einheit verbunden wurden

▲ Bild 10. Kontaktscheibe aus Silber, die mit einem Stator aus Kupfer durch Elektronenstrahlschweißen verbunden wurde

▲ Bild 11. Bis in eine Tiefe von 25 mm geschweißter Kupferanschluss

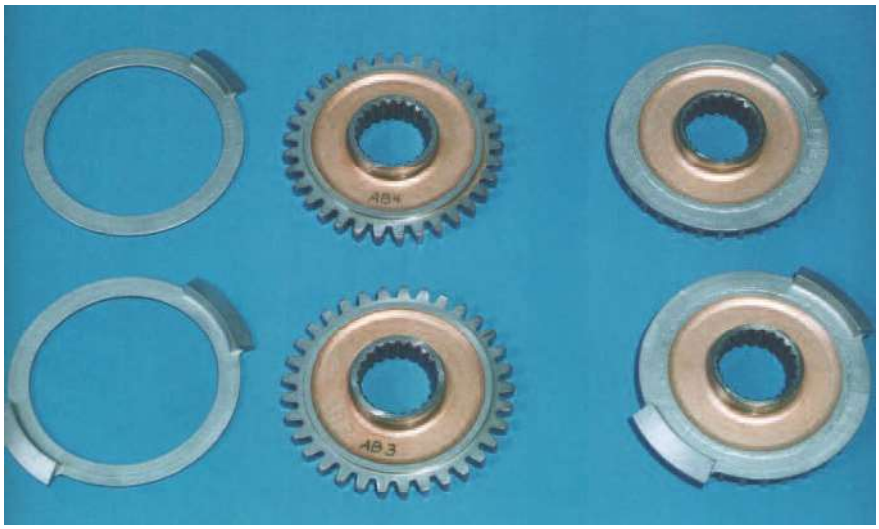
einbeziehen. Damit erstreckt sich der Einsatz des Elektronenstrahlschweißens über die bisher dem Schweißen zugänglichen Bereiche hinaus bis zum Fügen fertig bearbeiteter Werkstücke, was einem „Montieren" gleichkommt. Elektronenstrahlgeschweißte Nähte sind durch ein besonderes Verhältnis von Nahtbreite und Nahttiefe (**Bild 7**) sowie eine schmale Wärmeeinflusszone gekennzeichnet.

Wärmebehandlung abwägen

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 Aluminium und dessen Legierungen sowie Titan und dessen Legierungen bevorzugt mit diesem Verfahren verbunden werden. 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. Die Festigkeitswerte von geschweißten Verbindungen sind denen des Grundwerkstoffs sehr ähnlich.

Ein Abfall der Duktilität elektronenstrahlgeschweißter Stähle lässt sich durch den Einfluss von Legierungselementen auf die (Kalt-) Rissneigung in den ausgehärteten Zonen erklären und mithilfe des Kohlenstoffäquivalents CET definieren. Davon hängt es ab, ob eine Wärmebehandlung vor und/oder nach dem Schweißen notwendig ist (**Bild 8**). 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, die im Schweißprozess gesteuert wird.

Unter Berücksichtigung des Kohlenstoffäquivalents ist die Vorwärmung unter Beachtung der Wanddicke, des wärmeableitenden Querschnitts und der Art des Wärmeeinbringens zu wählen. Dadurch wird die kritische Abkühlgeschwindigkeit reduziert bzw. die Abkühlzeit verlängert, 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 etwa 12 mm) ein Vorwärmen auf etwa 80 bis 150°C



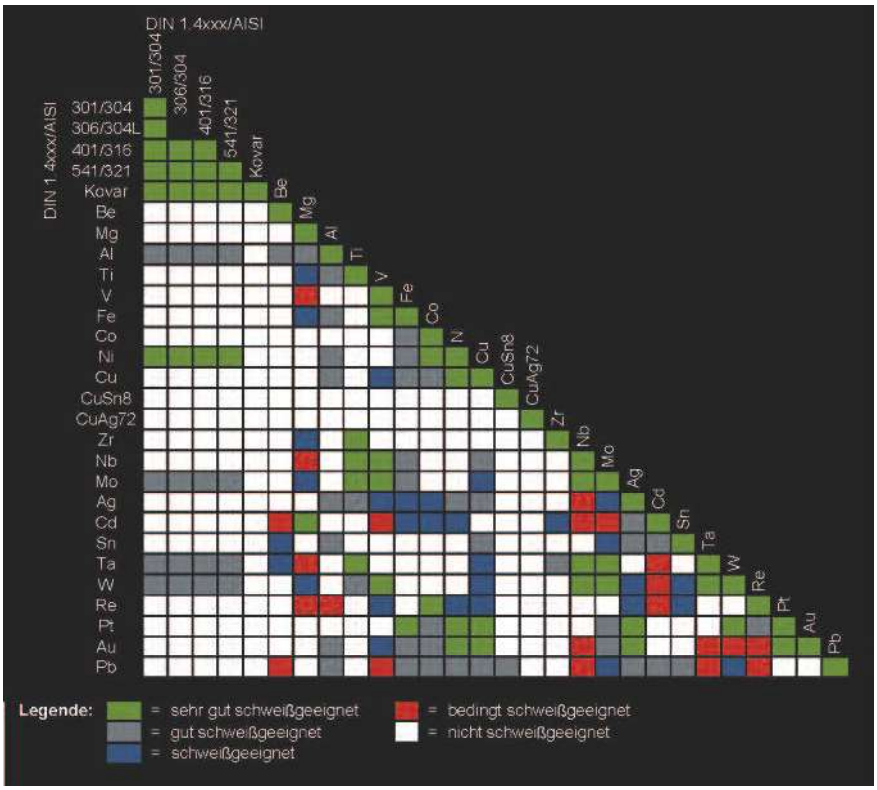
▲ Bild 12. Durch Elektronenstrahlschweißen gefügte Scheibe-Zahnrad-Verbindung

ratsam. Die Grobkornbildung ist mit einem Zähigkeitsabfall bei leichtem Härteanstieg verbunden. Die Zwischenlagentemperatur liegt meist mindestens 50°C über der Vorwärmtemperatur, allerdings maximal bei 250°C.

Je höher die Vorwärmtemperatur ist, desto länger wird die $t_{8/5}$-Zeit. Es handelt sich dabei um eine Wärmeeinbringung ins Bauteil vor dem Schweißen, was technologisch die wirkungsvollste Methode ist, um bei schlecht schweißbaren 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 sich der Elektronenstrahl als Fügewerkzeug heute anwenden lässt. **Bild 9** zeigt einen Ringbeschleuniger mit etlichen zu einer Einheit verbundenen Kupfereinzelsegmenten, **Bild 10** eine Kontaktscheibe aus Silber, die mit einem Stator aus Kupfer mithilfe des Elektronenstrahls verschweißt wurde. **Bild 11** stellt einen Kupferanschluss dar, der bis in eine Tiefe von 25 mm geschweißt wurde. Der Elektronenstrahl erlaubt hier eine Schmelzverbindung, die mit anderen Verfahren technologisch nicht möglich wäre. **Bild 12** zeigt eine Scheibe, die mit einem Zahnrad elektronenstrahlverschweißt wurde.



▲ Bild 13. Das Diagramm zeigt den aktuellen Stand der Werkstoffkombinationen, die erfolgreich durch Elektronenstrahlschweißen gefügt werden können. (Bilder: SwissBeam)

Die Vielfalt der Werkstoffe, die sich zum Schweißen eignen, zeichnet das Elektronenstrahlschweißen mit weiteren Vorteilen aus **(Bild 13).** Abgesehen von reaktiven Metallen, die nur mit dem Elektronenstrahl im Vakuum schweißbar sind, bieten sich zum Beispiel Kohlenstoffstähle (0,4% C), Chrom-Stähle (13% Cr) und viele Aluminiumlegierungen bestens an, um die Vorteile des Elektronenstrahlschweißens auszuspielen. Auch hier kann nur eine kleine Auswahl für viele verschiedene Werkstoffe stehen. In Einzelfällen helfen Anfragen beim Dienstleister.

Peter Schmidt,
Geschäftsleitung,
SwissBeam AG,
Rudolfstetten/Schweiz,
peter.schmidt@swissbeam.ch

Anzeige