

## Die Bedeutung des Elektronenstrahlschweissens zur Lösung des weltweiten Versorgungsproblems mit grossvolumigen Guss- und Schmiedeteilen

Aufgrund der weltweit gestiegenen Nachfrage nach grossvolumigen Guss- und Schmiedeteilen gibt es in Westeuropa Lieferzeiten von bis zu drei Jahren für diese Produkte. Mit Errichtung einer Elektronenstrahl-Grosskammeranlage in Burg bei Magdeburg konnte pro-beam das Angebotsspektrum für Grossbauteile deutlich erweitern. Durch weltweite Versorgungsgänge werden zunehmend auch hochwertige Halbzeuge mittels Elektronenstrahlschweissen hergestellt. Grossvolumige Guss- oder Schmiedestücke und auch grossformatige Tafeln werden in schneller und besser beschaffbare Einzelteile zerlegt und im Vakuum hochwertig und preisgünstig verbunden.

V. Adam, Braunschweig, und H.-J. Seilkopf, Burg  
Vortrag gehalten an der GST 2007 in Basel

Eine Domäne des Elektronenstrahlschweissens besteht in der Möglichkeit, endbearbeitete oder endkonturnah bearbeitete Werkstücke verzugsarm zu fügen. Über eine weitere herausragende Eigenschaft dieses Schweissverfahrens, nämlich das Fügen von grossen Wanddicken bis zu 200 mm Dicke wurde zwar schon häufig berichtet, in der Praxis wurde dies aber bis heute zumeist nur bei wenigen Spezialanwendungen, häufig aus dem militärischen oder nukleartechnischen Bereich, zur Anwendung gebracht. Enorm gestiegene Rohstoffpreise insbesondere im Bereich hochlegierter Stähle und Edelmetalle machen das Elektronenstrahlschweissen ohne Zusatzwerkstoffe im Vakuum zunehmend interessant. Der geringe Energieverbrauch moderner Elektronenstrahlanlagen, die ausgereifte Technik und die hohe Anlagenverfügbarkeit haben die Elektronenstrahlschweisstechnik auch bei der Herstellung von Halbzeugen zu einer wirtschaftlichen Fertigungsmethode heranreifen lassen.

Auch bei hochwertigen und schnellen Reparaturlösungen an sehr teuren oder schwer beschaffbaren Maschinen- und Anlagenkomponenten wird das Elektronenstrahlschweissen inzwischen mit grossem Erfolg eingesetzt.

### Platten- und rohrförmige Halbzeuge

Viele plattenförmigen Halbzeuge gibt es nur in bestimmten lagergängigen Abmessungen. Im Anlagen- und Apparatebau sowie im Maschinen- und Werkzeugbau werden jedoch häufig wesentlich grössere Formate benötigt. Ausgereifte Lichtbogen-schweisstechnologien stehen zwar zur Verfügung, aber der Markt bietet nicht für alle Werkstoffe geeignete Schweisszusätze und viele Anwender möchten, dass ihre Halbzeuge bei der Weiterverarbeitung «wie aus einem Guss» sind. Das Elektronenstrahlschweissen im Hochvakuum kann diesen Erwartungen in vielen Fällen gerecht werden.

Abb. 1 zeigt den Blick auf eine 630 m<sup>3</sup> Elektronenstrahl-Grosskammeranlage bei pro-beam in Burg (bei Magdeburg). Mit dieser Maschine können Tafelformate bis 6000 mm x 12000 mm hergestellt werden.



Abb. 1 630 m<sup>3</sup> Elektronenstrahl-Grosskammeranlage

Die dargestellte Aluminiumplatte mit 6 m Durchmesser und 70 mm Dicke besteht aus zwei Halbbronden, welche mittels Elektronenstrahlschweissen gefügt werden. Aus dieser Platte wird später ein halbkugelförmiger Dom für die Mittelstufe der ARIANE 5 Rakete geformt. Die Elektronenstrahlschweissnaht muss hierbei die gesamte Verformung mitmachen.

Abb. 2 zeigt einen Querschliff der Verbindung. Um die zerstörungsfreie Prüfbarkeit zu verbessern, wird nach der 70 mm Tiefschweissung der ersten Seite (im Abb. von oben) von der Rückseite noch eine etwa 5 mm tiefe Kosmetiknaht gelegt. Hierdurch wird die Nahtwurzel geglättet und Einbrandkerben, welche die Auswertung der Durchstrahlungsprüfungen und der Ultraschallprüfungen in Tandemtechnik erschweren würden, werden beseitigt. Die schlanke und auf ganzer Tiefe fast parallele Naht sorgt dafür, dass die Platten beim Schweissen nahezu gerade bleiben. Bei sehr hohen Anforderungen an die Gradheit kann die Kosmetiknaht auch genutzt werden, um die Platten bis auf wenige zehntel Millimeter genau zu richten.

Da die Einzelplatten wegen der Nahtgeometrie in Querrichtung frei schrumpfen können, sind die Gesamtplatten nach dem Schweissen bereits so spannungsarm, dass sie in den meisten Fällen ohne eine Wärmebehandlung weiter verarbeitet werden können.



Abb. 2: Elektronenstrahlschweissnaht 70 mm für Dom an ARIANE 5

Ein weiteres Beispiel für die Herstellung von Grossformattafeln zeigt Abb. 3. In diesem Fall wurden aus einem Gussbarren der Legierung AL5083 (AlMn4,5Mn0,7) Tafeln mit den Abmessungen 1950 mm x 3000 mm heraus gesägt, welche dann anschliessend mit 4 Längsnähten zu einer Tafel mit den Abmessungen 9720 mm x 3000 mm verschweisst worden sind.



Abb. 3: Gesamtabmessung der 5-teiligen Platte aus Al5083 9,72 x 3 m

Derartige Formate werden zum Beispiel im Flugzeugbau zur Fertigung von zylindrischen Werkzeugen für die Kohlefaserproduktion von Rumpfsegmenten benötigt. Nach dem Schweißen wurde diese Tafel ohne jede weitere Wärmebehandlung zu einem zylindrischen Werkzeug von ca. 3000 mm Durchmesser gewalzt. Die Schweißnähte zeigten dabei das gleiche Verformungsverhalten wie der Grundwerkstoff. Aufgrund der Abmessungen des Vormaterials wurden die Schweißungen an diesen Platten als Fallnaht ausgeführt. Die zum Schweißen vorbereitete Platte zeigt Abb. 4, das Ergebnis dieser Schweißung in Zwangslage zeigt Abb. 5. Die Schweißtiefe beträgt hier 26 mm. Wegen des äusserst geringen Verzuges nach dem Schweißen betrug das Aufmass zur Fertigungskontur beidseitig lediglich 2 mm. Neben der schnellen und preiswerten Herstellungsmethode ergeben sich also weitere erhebliche Einsparpotenziale im Bereich des Rohmaterialeinsatzes und der Zerspanung.

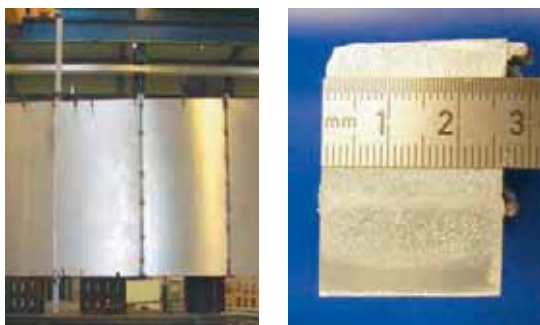


Abb. 4 und Abb. 5: Vorbereitete Platte (siehe Abb.3) und Nahtquerschnitt

Für die Herstellung von Tafeln oder auch längsnahtgeschweissten Rohren (Abb. 7) eignen sich grundsätzlich alle Werkstoffe, welche mit Schmelzschweisverfahren geschweisst werden können. Da in der Regel ohne Schweisszusätze gearbeitet wird, muss weder auf die grundsätzliche Verfügbarkeit geeigneter Zusatzwerkstoffe geachtet, noch müssen diese vorgehalten werden. Somit ergeben sich weitere Einsparungen im Bereich der Vorfinanzierung teurer Schweisszusätze.

Aus folgenden Sonderwerkstoffen wurden bisher Halbzeuge hergestellt:

- diverse Aluminiumlegierungen, erprobt bis 205 mm (Abb. 6)
- Titan und Titanlegierungen, erprobt bis 60 mm
- Kupfer und Kupferlegierungen, erprobt bis 50 mm
- Nickel- und Nickel-Aluminiumbronze, erprobt bis 100 mm
- sprengplattierte Bleche Stahl/Kupfer, erprobt bis 100 mm Gesamtdicke

Dazu kommen natürlich noch viele Stahl- und Edelstahl sowie Mischverbindungen, die hier nicht alle aufgezählt werden sollen.

Typische Schweissgeschwindigkeiten sind z.B.:

- 12 cm/Min. für 150 mm Dicke in Aluminium oder 50 mm in Kupfer
- 30 cm/Min. für 60 mm Dicke in Aluminium oder 40 mm in Stahl
- 240 cm/Min. für 15 mm Dicke in Aluminium, 12 mm in Stahl oder 8 mm in Kupfer

Kurz zusammengefasst lässt sich feststellen, dass sich das Elektronenstrahlschweissen von Halbzeugen umso besser rechnet, je teurer der Werkstoff und je dicker die Wandstärke ist. Aber auch bei kleinen Wanddicken gibt es Vorteile, da der geringe Verzug beim Schweißen nur sehr kleine Bearbeitungsaufmasse erforderlich macht.



Abb. 6: AlMg4,5Mn0,7 Schweißtiefe 205 mm



Abb. 7: Rohr aus Nickelbronze Schweißtiefe 22 mm

### Halbzeuge für hoch belastete Maschinen- und Anlagenkomponenten

Grosse Versorgungsengpässe gibt es zurzeit bei grossvolumigen Guss- und Schmiedeteilen, insbesondere bei höherwertigen Werkstoffen für hoch belastete Maschinen- und Anlagenkomponenten. Durch eine Designänderung von einteiligen Guss- oder Schmiedeteilen zu mehrteiligen Schweisskonstruktionen eröffnen sich den Konstrukteuren interessante neue Optimierungsmöglichkeiten. Häufig werden hochwertige Werkstoffe nur an bestimmten Funktionsbereichen benötigt. Abb. 8 zeigt eine Hubzapfenwelle aus Schmiedematerial, wo die Welle aufgrund der Verzahnung aus einem Vergütungsstahl hergestellt werden muss, hingegen die Wangen für die Aufnahme des Hubzapfens aus einem Baustahl ausgeführt werden können. Dieser ist nicht nur preiswerter und besser beschaffbar, sondern liefert auch günstige Zähigkeitseigenschaften in besonders kritischen Bereichen. Die Einzelteile dieser Welle können vor dem Schweißen weitgehend endbearbeitet werden.



Abb. 8 Hubzapfenwelle



Abb. 9. Kurbelwelle aus 30 CrMoV9

Lediglich die Klemmböden für den Hubzapfen werden nach dem Schweißen noch einmal auf Fertigmass fein bearbeitet. Die Durchlaufzeit für die Herstellung dieses nun dreiteiligen Bauteils konnte signifikant verkürzt werden. Die Einzelteile sind nicht nur schneller, sondern wegen der günstigeren Wettbewerbssituation durch eine grössere Lieferantenauswahl auch preiswerter zu beschaffen.

Das Halbzeug zur Herstellung einer gebauten Kurbelwelle zeigt Abb. 9. Die fünfteilige Konstruktion bestehend aus drei Wellenstümpfen und zwei Scheiben aus Werkstoff 30 CrMoV9 wurde mit fünf Elektronenstrahlnähten realisiert. Die Schweisstiefe beträgt jeweils 100 mm. Nach dem Schweißen wurden die vom Kunden geforderten Werkstoffeigenschaften durch eine entsprechende Wärmebehandlung eingestellt. Neben dem deutlich reduzierten Zerspanungsvolumen haben auch hier die kurze Durchlaufzeit und die Flexibilität dieser Lösung den Ausschlag für die Kundenentscheidung zugunsten der Schweisslösung gegeben.

Ähnliche Überlegungen haben zu der in Abb. 10 dargestellten zweiteiligen Kaplan-Nabe für eine Wasserturbine geführt. Das Einsatzgewicht für die Gussteile aus Werkstoff GS20Mn5 wurde halbiert, dadurch ist eine wesentlich grössere Anzahl von Giessereien lieferfähig. Die Innenbearbeitung der Halb-



Abb. 10: Zweiteilige Kaplan-Nabe GS20Mn5

schalen kann wegen der guten Zugänglichkeit weitgehend vor dem Schweißen erfolgen.

Eine Schwierigkeit war allerdings die geforderte Schweisstiefe von 240 mm der vier Segmente. Bei einer verfügbaren Strahlleistung von 40 kW stösst man hier an die Grenzen der maximalen Schweisstiefe. Es wurde deshalb eine Art Hybridlösung EB/UP gewählt. Die Schweissnahtvorbereitung der beidseitigen UP-Tulpennaht von 60 mm Tiefe mit einer 120 mm Elektronenstrahlnaht in der Mitte zeigt Abb. 11. Auf Abb. 12 ist die Wurzel Ausbildung nach dem Elektronenstrahlschweißen zu sehen. Hier sind auch rechts und links die unterschiedlichen Schweisstiefen zwischen 180 mm und 240 mm zu erkennen. Nach der zerstörungsfreien Prüfung der Elektronenstrahlnähte mittels Ultraschall und Röntgen wurden die UP-Ergänzungsschweißungen vorgenommen.



Abb. 11: Nahtvorbereitung EB/UP



Abb. 12: EB-Wurzel Ausbildung am Stück

### Herstellung von Strukturelementen als Schweisskonstruktion

Auch bei komplizierten Strukturen kann es Sinn machen, anstelle einer Fertigung «aus dem Vollen» mit Einsatz der Elektronenstrahltechnologie über eine schweisstechnische Lösung nachzudenken. Erfolgreich realisierte Lösungen sind dabei dadurch gekennzeichnet, dass folgende Faktoren gleichzeitig eine Rolle spielen:



Abb. 13: Brennerkasten (Kupfer)

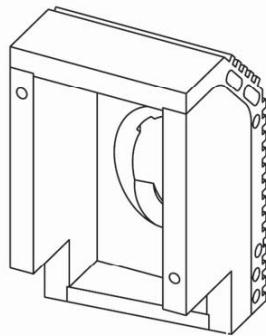


Abb. 14: EB-Schweissung Eckenausbildung und schematische Darstellung

- teurer Grundwerkstoff
- grosses Zerspanungsvolumen (über 50%)
- Einzelteile wesentlich einfacher zu zerspanen als das ganze Werkstück
- Bauteile mit Kühl- und/oder Heizkanälen
- Lösungen mit Verschraubungen und Dichtungen zu kompliziert oder zu teuer

Ein typisches Beispiel hierfür ist der auf Abb. 13 dargestellte Brennerkasten aus Kupfer für die Stahlindustrie. Die Einzelteile wurden mit einer Schweisstiefe von 55 mm gefügt. In den Seitenwänden befindet sich ein aufwändiges Kühlsystem. Eine Vielzahl von Kühl- und Verbindungsbohrungen wurde zuvor in die Einzelteile eingebracht. Diese wurden abschliessend mit Stopfen und Passstücken nach aussen verschlossen und mit dem Elektronenstrahl druckdicht verschweisst. Abb. 14 zeigt das Detail einer geschweissten Ecke, einige der eingeschweis-

ten Verschlussstopfen, sowie eine schematische Darstellung des Brennerkastens.

Durch das elektronenstrahlgerechte Design wurden etwa 80% Zerspanungs- und damit Materialvolumen eingespart. Die Nahtvorbereitung mit entsprechenden Absätzen, in welche die Nahtwurzel gelegt werden konnte, hat es ermöglicht, dass die Wärme übertragenden Wände des Brennerkastens volltragend angeschweisst worden sind.

Die Mass- und Formhaltigkeit des Bauteils entsprach einer Fertigung «aus dem Vollen». Das ausgeklügelte Kühlsystem hätte bei einer einteiligen Lösung so gar nicht hergestellt werden können.

Ein weiteres Beispiel für eine innovative schweisstechnische Lösung ist der auf Abb. 15 gezeigte Stössel für ein Stanzwerkzeug. Ähnliche Teile wurden bisher im Wesentlichen als Stahlgussteil hergestellt. Das Bauteil muss 4 Hübe pro Minute realisieren.

Es wurde deshalb als steife Hohlstruktur konstruiert. Die sich daraus ergebenden Hinterschneidungen waren für ein Gussteil äusserst kompliziert. Deshalb wurde das Werkzeug als Schweisskonstruktion ausgeführt. Zunächst war zur Verbindung der Deckplatten mit der Unterkonstruktion eine Vielzahl von Lochschweissungen geplant, Abb. 16. Diese hätten jedoch



Abb. 15: Stössel für Stanzwerkzeug

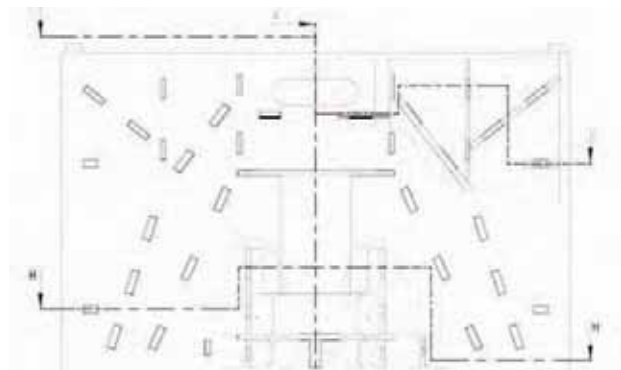


Abb. 16: Geplante Lochschweissung

zu enormem Verzug in Verbindung mit schwer kalkulierbaren Eigenspannungszuständen geführt.

Für die Realisierung des rechnerisch erforderlichen Anbindungsquerschnitts wurden deshalb Stichnähte in einfacher, doppelter oder dreifacher Ausführung mit dem Elektronenstrahl gewählt.

Wie auf Abb. 17 zu erkennen ist, beträgt die tragende Breite je Stichnaht nur etwa 2 mm. Trotzdem ist aufgrund der durchgehenden Schweissnähte der tragende Querschnitt im Vergleich zu den ursprünglich geplanten Lochschweissungen deutlich grösser geworden. Durch die auf ganzer Länge angebrachten Stichnähte zur Verschweissung der Deckel mit der Innenstruktur konnte in Verbindung mit den volltragend eingeschweissten Stirnseiten ein äusserst formstabiles und mit 1,5 to vergleichbar leichtes Werkzeug realisiert werden.

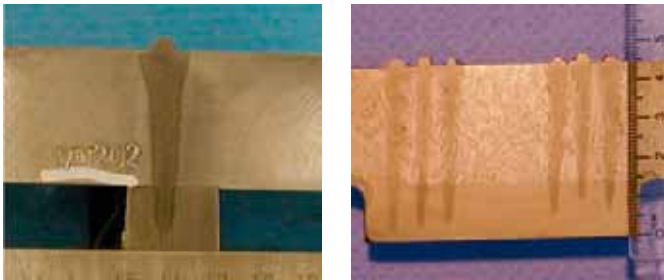


Abb. 17: EB-Stichnähte zwecks Verbindung Deckel – Innenstruktur

### Reparaturlösungen

Insbesondere wegen des sehr geringen Verzugs und der grossen Schweisstiefen, welche ohne Zusatzwerkstoffe ausgeführt werden können, ist das Elektronenstrahlschweissen prädestiniert für Reparaturlösungen aller Art. Seit Jahrzehnten werden Reparaturschweissungen an Komponenten für Flugzeugtriebwerke mit Hilfe des Elektronenstrahlschweissens instand gesetzt. Hierzu werden üblicherweise Kammermaschinen mit Volumina zwischen 10 m<sup>3</sup> und 25 m<sup>3</sup> eingesetzt. Mit der grossen 630 m<sup>3</sup> Maschine von pro-beam in Burg können nun auch Bauteile bis 6 m im Durchmesser, 12 m Länge und bis 50 to Gewicht geschweisst werden. Da die Elektronenstrahlkanone hierbei an einem 7-Achsen Knickarmroboter geführt wird, sind nun auch komplizierte 3D-Schweissungen möglich.

Abb. 18 zeigt einen zur Reparaturschweissung vorbereiteten Leitschaukelträger der Firma Alstom Power Service Berlin. Im Hintergrund ist die Elektronenstrahlkanone am Roboter zu sehen.

Die Nebenzeit dieser Anlage für das Ein- und Ausfahren des Bauteils mit dem Luftkissentransporter, das Öffnen und Schliessen der Tore, das Evakuieren in einen Vakuumbereich von  $2 \times 10^{-3}$  mbar und das abschliessende Belüften der Anlage auf Atmosphärendruck beträgt knapp eine Stunde. Auch bei Grossbauteilen liegen die reinen Schweisszeiten selten im Bereich mehrerer Stunden.



Abb. 18: Einfahren des Leitschaukelträgers in die Anlage

Für die Produktivität der Maschine ist deshalb von entscheidender Bedeutung, dass unterschiedlichste Bauteile (vergl. Abb. 1, 3, 10, 18 und 20) parallel auf 4m x 6m grossen Standardpaletten vormontiert werden können. Sobald dies erledigt ist, können die Bauteile von der Bedienermannschaft der EB-Anlage übernommen und abgeschweisst werden. So ist es möglich, auch mehrere Grossbauteile mit grossen Schweissnahttiefen und -längen in einer Schicht abzarbeiten.

Abb. 19 zeigt die Nahtwurzel der 60 mm tiefen Durchschweissung am Leitschaukelträger aus dem Werkstoff 12CrMo19.5. Die Ringschweissung rekonstruiert den ursprünglichen Durchmesser in einer Qualität, welche dem Grundkörper mindestens gleichwertig ist. Das Werkstück kann also nach der mechanischen Endbearbeitung des Aussendurchmessers wieder wie ein Neuteil eingesetzt werden. Die Schweisszeit beträgt bei einem Durchmesser von 2500 mm und einer Schweissgeschwindigkeit von 18 cm/Min. lediglich 44 Minuten.



Abb. 19: Nahtwurzel des Leitschaukelträgers mit 60 mm Nahtdicke aus 12CrMo195

Eine weitere Möglichkeit sehr wertvolle vorhandene Gussteile weiter zu verwenden zeigt Abb. 20/21. Bei diesem etwa 33 to schwerem Gussgehäuse einer Gasturbine handelt es sich um das Erstmuster, welches zum Nachweis der technischen Machbarkeit unter der Regie von Alstom Power Service Berlin hergestellt worden ist.

Mit diesem Gehäuse konnte nachgewiesen werden, dass eine deutliche Leistungssteigerung einer älteren Turbinengeneration unter Weiterverwendung vorhandener grosser Gussstücke mit Hilfe des Elektronenstrahlschweissens technisch möglich und auch wirtschaftlich ist. Der oben (in Höhe der Kanone) befindliche Flansch wurde an anderer Stelle abgetrennt, schweisstechnisch und mechanisch bearbeitet und mit dem Elektronenstrahl wieder angeschweisst. Inzwischen wurde dieses Gehäuse im Zuge einer Kraftwerksüberholung eingesetzt und muss nun den Praxistest bestehen. Darüber wird in Zukunft noch zu berichten sein.



Abb. 20/21: Gasturbinen-Gussgehäuse in der EB-Anlage

### Zusammenfassung und Ausblick

Das Elektronenstrahlschweissen ist ein ausgereiftes Verfahren, welches für das Fügen grosser Querschnitte prädestiniert ist. Die Anlagen- und Steuerungstechnik wurde und wird von pro-beam kontinuierlich weiter entwickelt. Als Ergebnis steht nun auch für Grossbauteile Anlagentechnik zur Verfügung, mit welcher sogar das Schweissen von grossvolumigen oder grossformatigen Halbzeugen wirtschaftlich geworden ist. Einen kleinen Ausschnitt aus dem aktuellen Anwendungsspektrum gibt der vorliegende Bericht wieder.

Im Bereich der Grossteile- und Halbzeugfertigung wird das Elektronenstrahlschweissen an Bedeutung gewinnen. Dabei tritt es nicht nur in einen sportlichen Wettbewerb zu etablierten und ausgereiften konventionellen Schweissverfahren, sondern es werden auch ständig neue Anwendungen generiert. Bei diesen werden insbesondere die Kombinationen aus schnellem Schweissen grosser Wandstärken ohne Schweisszusätze in Verbindung mit sehr geringem Verzug die Alleinstellungsmerkmale und damit die Potenziale des Verfahrens aufzeigen.

Neue Anwendungen aus den Bereichen Schiffbau, Luftfahrt, Offshore-Windenergieanlagen sowie aus dem Anlagen- und Maschinenbau sind zurzeit in der Bemusterungsphase. Darüber wird in Zukunft zu berichten sein.

### Résumé et perspectives

Le soudage par faisceau d'électrons est un procédé bien au point, prédestiné pour l'assemblage de grosses sections. La technique de l'équipement et de son pilotage a été, et continu d'être développé par Probeam. Il en résulte des d'installations qui permettent de souder économiquement même des ensembles semi-finis volumineux ou de grand format. Ce compte-rendu donne un petit aperçu de l'étendu des applications actuelles.

Dans le domaine des grosses pièces et des produits semi-finis, le soudage par faisceau d'électrons va gagner en importance. Non seulement ce procédé entre vigoureusement en concurrence avec les procédés conventionnels bien établis et bien au point, mais il génère aussi continuellement de nouvelles applications. Dans ce dernier cas, la combinaison d'un soudage rapide de grandes épaisseurs sans métal d'apport et d'un retrait réduit est unique, d'où le potentiel de développement de ce procédé. La documentation sur les nouvelles applications dans les domaines de la construction navale et aérienne, des éoliennes offshore ainsi que de la construction d'installations et de machines est en préparation. Elle fera l'objet d'une publication future.