Energieeffiziente Elektronenstrahlschweiss-Technologie geht in Betrieb

Gute Gründe für eine Investition

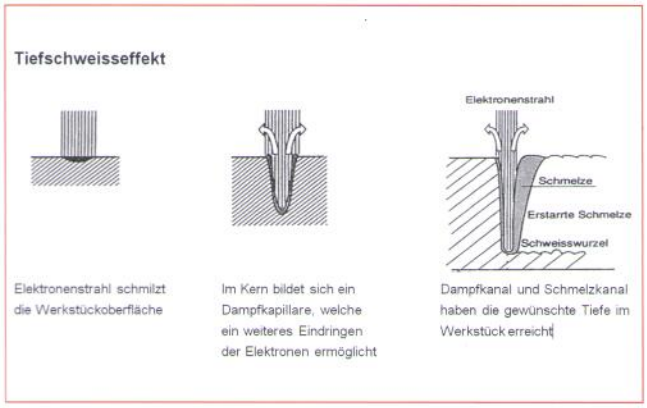
Mit dem Einsatz von modernsten Technologien können sich kleine Dienstleistungsunternehmen am Markt differenzieren und gezielt einen Mehrwert für ihre Kunden schaffen. Es gibt viele Gründe für Investitionen. Was dazu gehört ist ein bisschen Mut, um das Ersparte in ein langfristig rentables Anlageobjekt anzulegen. Dazu zählt auch für kleinste Unternehmen die Differenzierungsstrategie als ein wichtiger und gängiger Weg. Investitionen müssen zukunftssicher mit einer erweiterten Leistungstechnologie nachrüstbar sein, um im Wettbewerb langfristig bestehen zu können wie beispielweise das Thema additive Fertigung von Metallkomponenten.

Peter Schmidt, SwissBeam AG, 8964 Rudolfstetten

Investitionskosten für eine neue Elektronenstrahlschweissanlage sind unberechtigterweise eine Hemmschwelle, weil die überzeugende, wirtschaftliche Arbeitsweise und der hohe Qualitätsgewinn die Elektronenstrahltechnologie für viele Branchen attraktiv macht. Für die Werkstoffbearbeitung zählt derzeit das Elektronenstrahlschweissen zu den zuverlässigsten und einsatzflexibelsten Fügeverfahren.
Mit der Installation einer neuen Elektronenstrahlschweissanlage wurde von einem Lohnfertiger ein hoher Geldwertbetrag investiert, um deren Kunden umfassender bedienen zu können und neue Kapazitäten zu generieren.

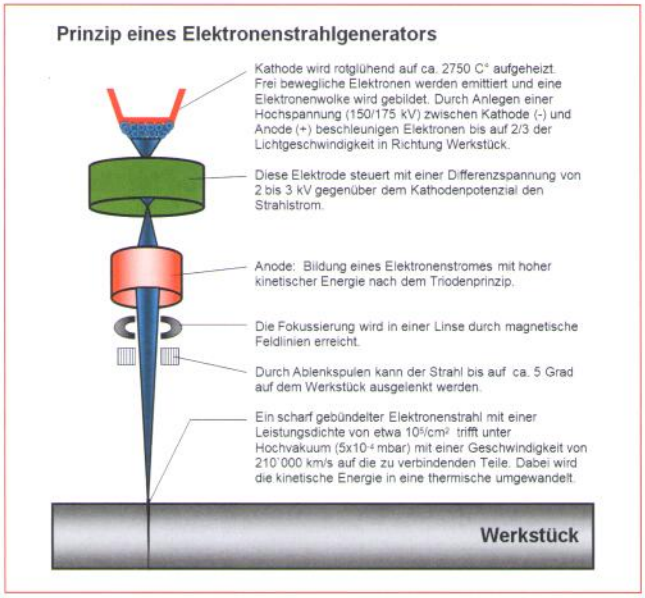
Über 60 Jahre bewährt und ausserordentlich präzise

Die Möglichkeiten der thermischen Materialbearbeitung mit Elektronenstrahlen wurde um 1952 von Dr. K.H. Steigerwald entdeckt und bis in das Jahr 1958 mit dem Tiefschweisseffekt weiterentwickelt. Im gleichen Jahr wurde eine erste käuflich erwerbbare Elektronenstrahlschweissanlage in Betrieb genommen. Bis heute ist der Elektronenstrahl eine altbewährte Technologie, die bezüglich Nahtdurchdringung, Nahtreinheit, und Reproduzierbarkeit unübertroffen bleibt. Der Elektronenstrahl hat sich in den vergangenen Jahren weitgehend als wertvolle Schlüsseltechnologie für schwierige Herausforderungen etabliert und weiterentwickelt. Die gegenwärtig verbaute Technik erhöht die Effizienz und berücksichtigt die Wünsche der Kunden intensiver. «Die Inbetriebnahme der neuesten Anlagengeneration war wie das Einsetzen eines neuen Herzens», beschreibt Betriebsleiter Marc Güller.



Das Herzstück jeder Elektronenschweissanlage ist der Generator

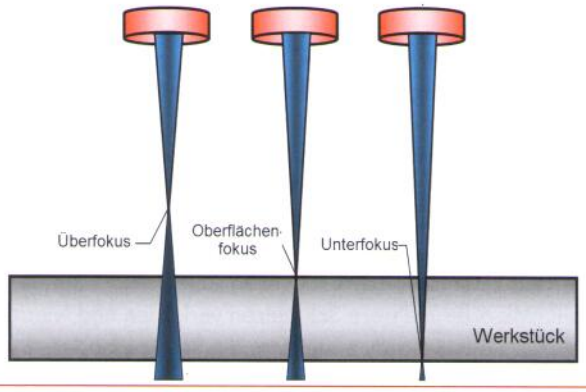
Alle Geheimnisse legt Wolfgang Rudolf, Leiter Technik bei Steigerwald Strahltechnik, nicht offen. Ein paar wichtige Faktoren nennt er aber doch:
Im Elektronenstrahl-Generator werden Elektronen aus einer Wolframkatode emittiert und mit bis zu 150 kV auf ca. 2/3 der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und treffen im Vakuum auf das Werkstück auf. Dort werden die Elektronen beim Aufschlagen auf den Werkstoff abrupt abgebremst, wobei die Bewegungsenergie der Elektronen beim Aufprall in Wärme umgewandelt wird. Die Energiedichte des Elektronenstrahls ist bis zu fünfzig Mal höher als bei einem konventionellen Lichtbogenschweissverfahren. Die Elektronenleistungsdichte von grösser als 100 KW / mm^2 führt bei Werkstoffen dazu, dass diese verdampfen und somit ein sogenannter Tiefschweisseffekt entsteht. Daraus ergeben sich grosse Nahttiefen, mit einer auf ein Minimum reduzierten wärmebeeinflussten Zone.



Die wesentlichen Baugruppen des Generators setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Im Strahlkopf wird die benötigte Energie mit einem Hochspannungskabel von 60 bis 150 kV beschleunigten Elektronen in die Prozesszone eingebracht. Das Strahlerzeugungssystem arbeitet im Hochvakuum (< 10^{-4} hPa) in einem Triodensystem. Dies besteht im Wesentlichen aus Kathode, Steuerelektrode (Wehneltzylinder) und Anode.
  - Die Bandkathode aus Wolfram ist im Betrieb rotglühend aufgeheizt und wird mit einem Präzisionswerkzeug in wenigen Minuten gewechselt. Die Emissionsfläche ist leistungsabhängig (bis 60 KW Strahlleistung) und beträgt in der Regel ca. 2 mm^2.
  - Aus einer elektrisch erwärmten Wolframkathode mit einer V-förmig gekröpften Spitze werden Elektronen emittiert und durch Anlegen einer Hochspannung zwischen Kathode und Anode beschleunigt.
  - Eine Steuerelektrode (Wehneltzylinder) zwischen Anode und Kathode steuert mit einer Differenzspannung bis etwa 2000 V gegenüber dem Potential der Kathode den Strahlstrom.
- Unmittelbar nach der Strahlerzeugung wird der Elektronenstrahl geformt und zu einem Brennfleck (bis zu einem Durchmesser von ca. 0,1 mm) mit hoher Leistungsdichte fokussiert. Beim Auftreffen der Elektronen auf der Werkstückoberfläche wird die kinetische Energie der Elektronen in Wärme umgewandelt. Gleichzeitig werden Röntgenstrahlen freigesetzt, was die Abschirmung der Schweissanlage erfordert.
- Die Vakuumsektion enthält den für den EB-Generator nötigen Anschluss eines Vakuumsystems sowie das Strahlrohrventil, welches das Strahlerzeugungssystem vakuumtechnisch von der Arbeitskammer trennt.
- Der Turbomolekular-Pumpstand fördert ein kohlenwasserstofffreies Hochvakuum für eine lange Kathodenlebensdauer.
- Ein Kamerasystem dient zur Justierung der Strahlauftreffstelle am Werkstück und darüber hinaus zur Beobachtung des Schweissvorgangs in der Arbeitskammer.
- Linsensektion: In diesem Bereich sind die elektromagnetische Linse zur Strahlfokussierung und das Ablenksystem untergebracht.

Fokuslagen des Elektronenstrahls

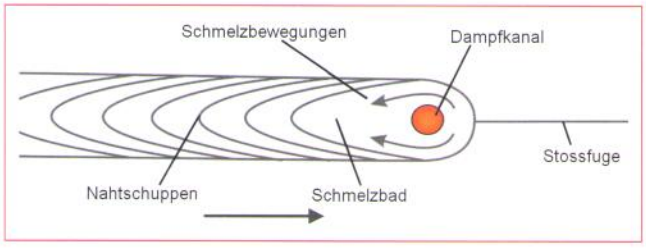


Schweissen im Vakuum sichern reinste und sauberste Schweissnähte

Eine generelle Herausforderung beim Schweissen besteht darin, dass die Metallschmelze vor Umgebungsgasen in der Atmosphäre zu schützen ist. Diese Gase reagieren mit dem Schmelzbad, wobei Oxide entstehen können, welche die Schweissbadmetallurgie negativ beeinflussen und verunreinigen. Um diese Effekte zu minimieren wird oft ein Schutzgas wie beispielsweise Argon, Helium etc. verwendet. Die Rückseite der Schweissnaht kann ebenfalls eine grosse Herausforderung darstellen, da sie wie die Vorderseite für die oben genannten Schwierigkeiten ebenfalls anfällig ist. Der Einsatz eines qualitativ hohen Vakuums beim Schweissen bietet erhebliche Vorteile: Es schützt die Metallurgie des Schmelzbades besser als jedes Schutzgas. Der Elektronenstrahl kann nicht im Atmosphärendruck erzeugt oder aufrechterhalten werden, da Elektronen auf Gasmoleküle treffen würden und dadurch abgelenkt werden. In der Arbeitskammer einer Elektronenstrahlschweissanlage, die auf $5x10^{-4}$ hPa gepumpt wird, verschwinden alle oben genannten unerwünschten Erscheinungen. Kein anderes Verfahren kann bezüglich Nahtsauberkeit beim EB-Schweissen im Vakuum gleichwertig erfolgen. Als Ergebnis entstehen die reinsten und saubersten Schweissnähte.

Verfahren Elektronenstrahlschweissen

Der Elektronenstrahl erzeugt mit wenigen Zehntelmillimetern Durchmesser tiefe und schlanke Nähte und ist erforderlich, um geringste Streckenenergien erzeugen zu können. Die Schweisswärme am Werkstück entsteht durch die Umwandlung der kinetischen Energie des gebündelten Elektronenstrahls. Die im Vakuum beschleunigten und fokussierten Elektronen treffen auf das Werkstück auf. Unterhalb des Brennfleckes wird die kinetische Energie der Elektronen in Wärme umgewandelt. Die Elektronen schmelzen die Oberfläche auf. Ein Teil des geschmolzenen Metalls beginnt schlagartig in wenigen Millisekunden zu verdampfen. Der Dampfdruck verdrängt die Schmelze und es entsteht ein Dampfkanal. Dampfdruck, Oberflächenspannung und das Gewicht der Schmelze sind im Gleichgewicht. Durch den Dampfkanal können die Elektronen tiefer in das Werkstück vordringen, wodurch eine Tiefschweissung entsteht. Durch die trägheitslose Ablenk- und freie Programmierbarkeit können je nach Werkstoff im einfachen I-Stoss 200 mm Wandstärke in einem Arbeitsgang realisiert werden. Damit können weitaus tiefere Nähte als bei allen anderen Verfahren erzeugt werden. Die Nähte sind gekennzeichnet durch ein extrem hohes Verhältnis von Nahtbreite zur Nahttiefe (1/50) und steile Nahtflanken mit schmaler Wärmeeinflusszone.



Energieeffiziente EB-Technologie geht in Betrieb

Vorteile:

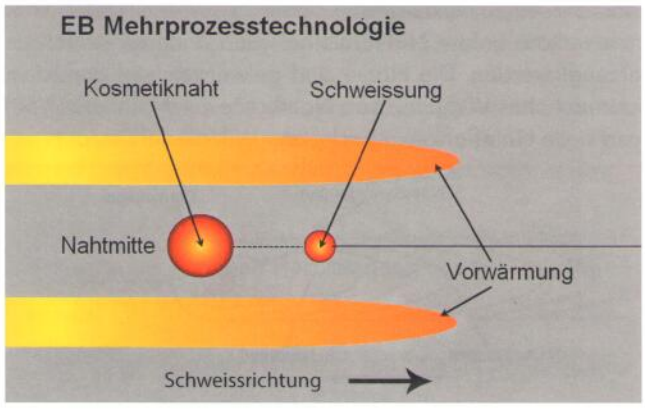
- hohe Wirtschaftlichkeit und Produktivität durch moderne Technologien
- Mehrstrahl- und Mehrfokustechnik
- Schnelle Steuer- und Regelungstechnologien
- keine Zusatzwerkstoffkosten
- keine Schutzgase nötig, da der Prozess im Vakuum erfolgt
- höchste Präzision, Masshaltigkeit und Genauigkeit
- sehr hohe Reproduzierbarkeit
- Elektronenstrahl ist sehr exakt und schnell lenkbar
- hohe Energiedichte und geringe Wärmeeinbringung
- Erzeugen von schmalsten, tiefen Nähten mit dem geringstem Verzug eines Schmelzschweissverfahrens
- Schweissen geometrisch komplexer Werkstücke wie Hohlkörper oder I-Profile
- Fügen feinster Folien
- Festigkeit der Schweissnaht in Höhe des ungeschweissten Grundwerkstoffes
- Verbinden gasempfindlicher Werkstoffe wie Titan, Tantal, Zirkon etc.

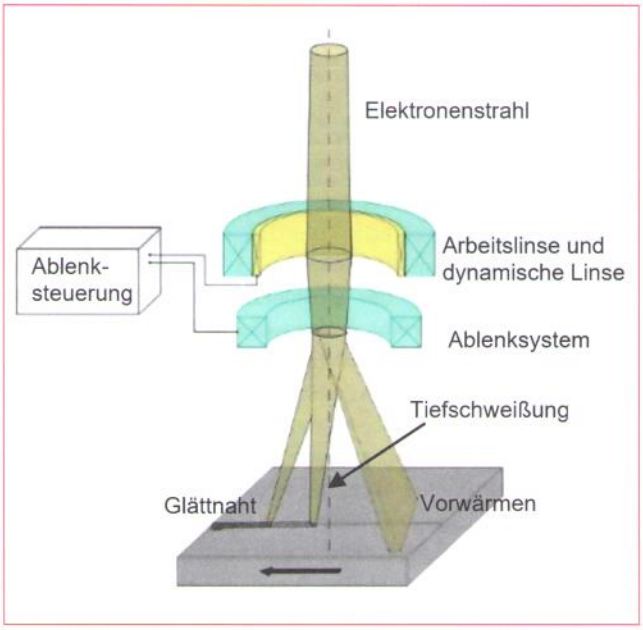
Für die moderne Fügetechnologie ist das Elektronenstrahlverfahren ein wichtiger Bestandteil.

Produktivitätssteigerung und Reduzierung der Eigenspannungen durch integrierte Wärmebehandlung mit Mehrstrahl- und Mehrfokustechnik

Ist das nötig? Ja, da Bauteile immer anspruchsvoller werden und oftmals versucht wird möglichst viele Funktionen in einem Bauteil zu integrieren. Früher konnte manche Aufgabe mangels technischer Möglichkeiten nur schwer realisiert werden. Doch mit der neu entwickelten Mehrstrahltechnik «EBO Jump» (schnelle Strahlablenkung) aus dem Haus Steigerwald Strahltechnik können solche Herausforderungen deutlich leichter in Angriff genommen werden.

Der Strahl kann mit einer sehr hohen Geschwindigkeit zwischen mehreren Schweissstellen bewegt werden, so dass dabei alle Schmelzen bzw. Dampfkapillaren erhalten bleiben, ohne Schmelzspuren zu hinterlassen. Beim Schweissen entstehen durch thermische Ausdehnungen Eigenspannungen, die aus Schrumpfungen des Werkstoffes resultieren. Besonders hohe Zugspannungen sind unerwünscht, da sie die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes negativ beeinflussen. Spannungen können insbesondere bei Bauteilen auftreten, welche einer schwingenden Belastung ausgesetzt sind. Durch das symmetrische Schweissen mittels der Mehrstrahltechnik «EBO Jump», entsteht jedoch ein deutlich geringerer Bauteilverzug welcher mit Hilfe eines zusätzlich eingebrachten und exakt dosierten Wärmeintrags reduziert wird.





Durch eine exakte Vorgabe der Schweissparameter mittels der frei programmierbaren CNC Sinumerik 840D Steuerung können Eigenspannungen so beeinflusst und reduziert werden. Das Mehrstrahlschweissen kann mit veränderlicher Brennweite zwischen zwei festgelegten Punkten am Werkstück gleichzeitige eine Schweissnaht mit anschliessender Glättnaht herstellen. Es können auch neben der Schweissnaht bestimmte Stellen erwärmt werden und so Druckspannungen einbringen. Eine weitere Variante dieser faszinierenden Technik ist ein gleichzeitiges Vorwärmen, Schweissen und Glätten in einem Arbeitsgang oder das symmetrische Schweissen nicht paralleler Schweissnähte. Dieser Prozess kann dadurch zur Produktivitätssteigerung führen. Darüber hinaus bietet die Mehrprozesstechnologie die Möglichkeit einer prozessintegrierten lokalen Wärmebehandlung wie beispielsweise das partielle Härten.

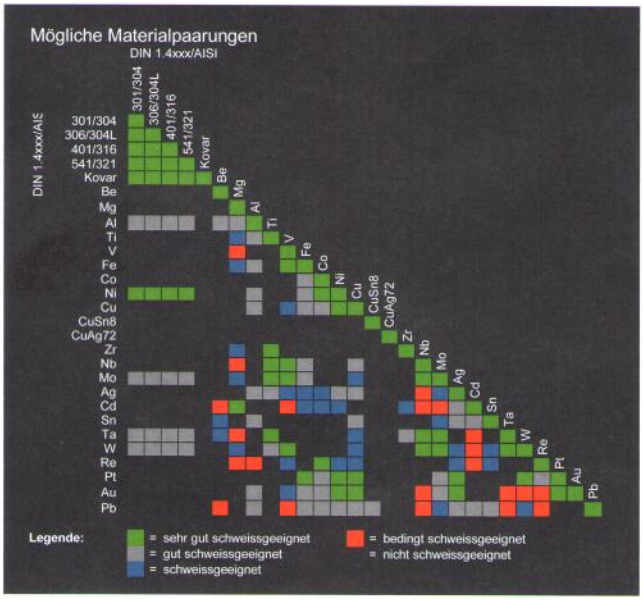
Dieses Verfahren ist für die Luft- und Raumfahrt genauso interessant wie für die Massenfertigung im Elektronikbereich oder im Automobilbau.

Aufgrund einer besonders schnellen Ablenkung kann der Strahl eine oder mehrere Schmelzen verlassen und wieder zu dieser zurückkehren, ohne dass die Schmelzbäder während der Abwesenheiten des Strahls zusammenbrechen.

Fügbare Werkstoffe:

Mit dem Elektronenstrahlschweiss-Verfahren lassen sich auch schwierige und höchstschmelzende Werkstoffe sowie Werkstoffkombinationen, bei grösster Reinheit tief und schlank fügen. Selbst Werkstoffe, welche als äusserst umständlich, rissempfindlich oder porös gelten bzw. in der Fachliteratur als nicht schweissgeeignet beschrieben werden, können aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Elektronenstrahl-Verfahrens gefügt werden.

- Heissrissgefährdete Werkstoffe wie z.B. AlCu- Legierungen sind durch konventionelle Schweissverfahren nur bedingt fügbar, da diese eine hohe Nahtbreite und damit eine verhältnismässig grosse Wärmeeinflusszone aufweisen. Mittels Elektronenstrahl (kleiner Nahtquerschnitt, geringer Wärmeeinfluss) können diese Verbindungen gefügt werden
- Kupfer und Kupferlegierungen in Querschnittstiefen von mehr als 30 mm
- Hitzebeständige Metalle, wie beispielsweise Titan erweisen sich als problemlos schweissbar
- Gusswerkstoffe
- Nickellegierungen
- Mischverbindungen



Das Elektronenstrahlschweissen gilt als das Verfahren, welches den weitläufigsten Bereich der thermisch fügbaren Werkstoffe abdeckt. Letztendlich kann auch das Gravieren von Artikelnummern und Zeichnen per Elektronenstrahl viele Anwendungen und Materialien erobern.

Aspekte der Ergonomie

Im Pflichtenheft wurde vorgegeben, individuelle und flexible Lösungen der Ergonomie zur betrieblichen Gesundheitsförderung zu finden. Dabei wurde das Ziel verfolgt, die Produktivität der Mitarbeiter durch Vermeidung belastender Tätigkeiten möglichst lange zu erhalten, so dass sich ein Wohlbefinden und eine Effizienzsteigerung einstellen.

Die Ergonomie hat direkte Auswirkungen auf die Gesundheit, Motivation und Leistung der Mitarbeiter. Die Ergonomie beschäftigt sich vor allem mit folgenden Kriterien:

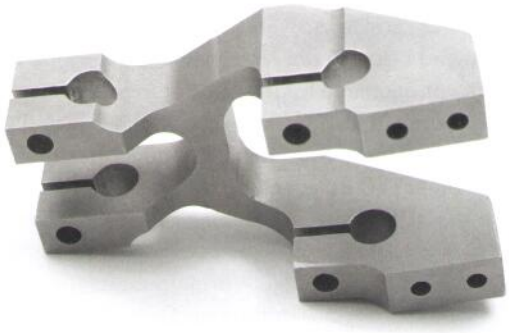
- Dem Arbeitsumfeld (z.B. Licht, Lärm, Raumklima): Die Lichtverhältnisse der Maschinenumgebung bestanden bereits aus einer LED Beleuchtung. Alle Vakuumpumpen wurden in einer hierfür konzeptionierten Schallschutzkammer positioniert, wobei die Abwärme gezielt in einen eigens hierfür gebauten Wärmetauscher umweltschonend und wiederverwendbar zur Gebäudeheizung eingeleitet wurde.
- Die Organisation und der Arbeitsinhalt: Manuelle Arbeiten sind trotz fortschreitender Digitalisierung und Automatisierung auch künftig nicht aus der Welt der Industrie wegzudenken. Serienmässig wurde erstmals ein Touchscreen Monitor ergonomisch positioniert. Kabel wurden geschützt ausser Sichtweite in Kabelwannen verstaut. Auch ein elektrisch höhenverstellbarer Arbeitstisch mit entsprechendem Stehstuhl wurde eingesetzt. Zusätzlich vermeiden die individuelle Positionierung von Materialien und Werkzeugen einseitige Bewegungen, die auf Dauer den Bewegungsapparat schädigen können.
- Maschine und Werkzeuge am Arbeitsplatz: Bisher wurde der Elektronenstrahl durch den Mitarbeiter manuell von Hand für jede Schweissnaht auf das Werkstück auf ein 0.01 mm genau positioniert. Dieser Prozess erfordert vom Mitarbeiter ein sehr hohes Konzentrationsvermögen. Aus diesem Grund wechseln sich die Mitarbeiter bei Ermüdungserscheinungen zur Vermeidung von Fehlern ab. Die neuste Maschinengeneration kann mit dem Elektronenstrahl die eigentliche Fügezone selbst automatisiert finden und schweisst ohne Zusatzwerkstoff (Füllmaterial) im Anschluss die Bauteile hochpräzise µm-genau mit minimalstem Verzug. Anstrengende und ermüdende Arbeiten entfallen, die Bauteilgenauigkeit steigt und die Herstellung ist dadurch deutlich produktiver.

Die von Steigerwald Strahltechnik entwickelte Elektronenstrahlschweissanlage ermöglicht zuverlässig alle Punkte. Entscheidend dafür sind zahlreiche technische Finessen, die in die Entwicklung eingeflossen sind. Diese Anlage ist die erste weltweit ausgelieferte Maschine in dieser durchdachten Ausfertigung, was eine präzise und an den Mitarbeiter angepasste Arbeitsweise ermöglicht und dabei körperliche Belastungen weitgehend vermeidet.

3D-Druckmaterialien eignen sich besonders gut für das EB-Schmelzen:

Die additive Fertigung von Metallkomponenten gewinnt zunehmend Akzeptanz in der industriellen Fertigung, wobei erste Komponenten bereits in unterschiedlichsten Industriezweigen Anwendung finden. Die Herstellung von Metalladditiven erfordert das Schmelzen eines Materials zu einem Feststoff. Diese Methode neigt dazu, dass durch Hohlräume im Materialgitter des herzustellenden Teils erhebliche Porosität erzeugt wird.

Energieeffiziente EB-Technologie geht in Betrieb

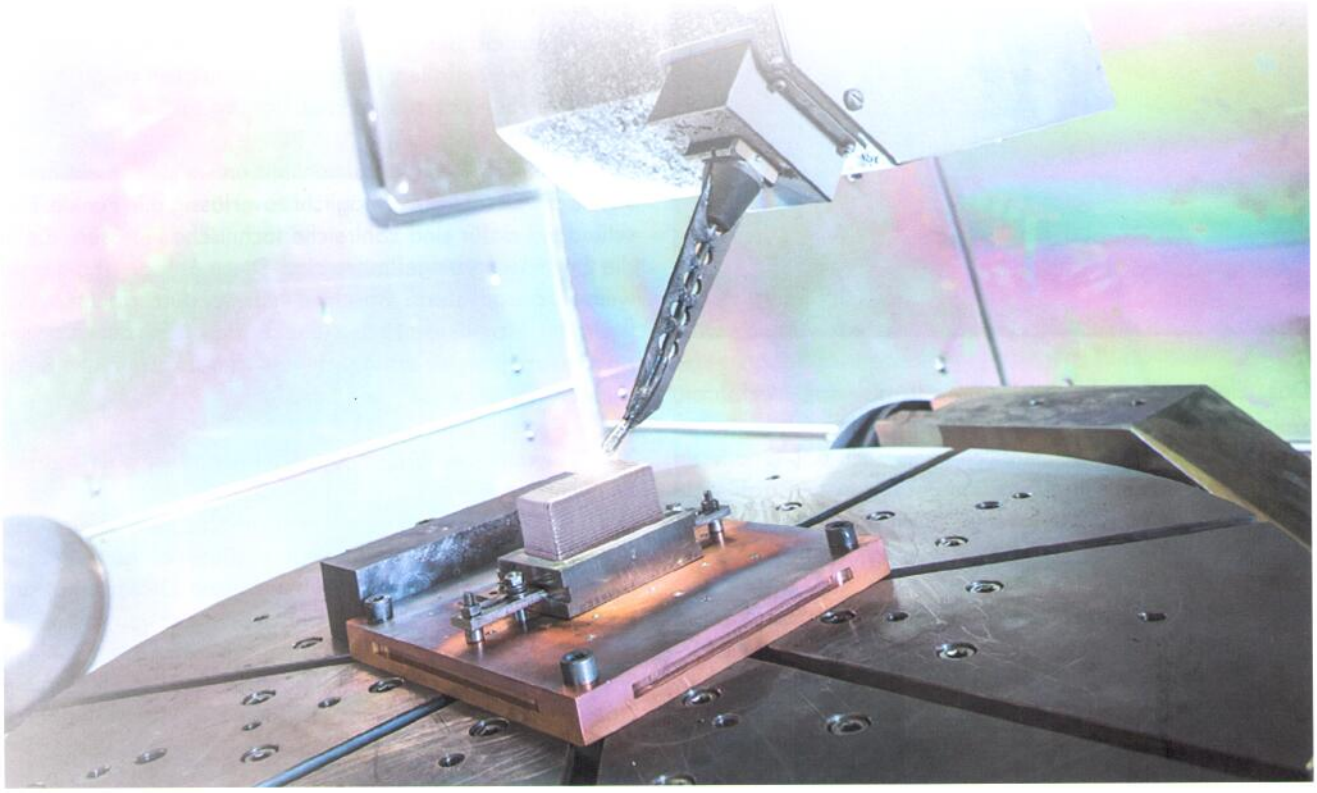


Der Elektronenstrahl ist eine sehr effiziente Energiequelle mit hoher Leistung, durch die sich leicht hochschmelzende Werkstoffe (z.B. Tantal) oder auch reaktive Legierungen wie beispielsweise Titan nach dem drahtbasierten Elektronenstrahladditive Verfahren (EBAM) mit minimaler Porosität realisieren lassen. Die Verarbeitung im Hochvakuum führt zu makellosen Bauteilen und ist besonders für industrielle Anwendungen verschiedener Materialien wie Stahl, Kupfer und Titan geeignet. Die Weiterentwicklung solcher Verfahren ist für unsere Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Mit diesen 3D Herstellungsverfahren können Metalle verarbeitet werden. Sie erlauben neue Techniken in der Produktentwicklung, sowie neue Perspektiven mit einem deutlich beschleunigten Abstimmungsprozess. Somit können schnellere Markteintritte von Prototypen und Kleinserien realisiert werden.

Einsatzgebiete

Die Einsatzgebiete des Elektronenstrahl-Verfahrens sind breit gefächert. Sie reichen von der Herstellung hochwertiger Einzelteile, bis hin zur Gross-Serienfertigung für die Kraftfahrzeugindustrie, Medizintechnik oder Luft- und Raumfahrttechnik. Unter allen betrachteten Verfahren ist das Elektronenstrahlschweissen in der Ökobilanz das umweltfreundlichste. Grund hierfür ist keinerlei Bedarf an Zusatzwerkstoffen und Schutzgasen, sowie die ausserordentliche Schweissgeschwindigkeit. Zudem führt der hohe Wirkungsgrad des Strahls (> 70 Prozent), unter Berücksichtigung einer vorbildlichen und hervorragenden Strahllenkung, zu einem gezielten Einsatz mit minimalstem Stromverbrauch. Im globalen Wettbewerb der hochindustrialisierten Fertigung ist es unabdingbar, technologische Möglichkeiten zu nutzen und auszuweiten.

Immer mehr Anwender entdecken die Vorteile dieser Technologie, denn sie ist schneller, effizienter und produktiver.

Angaben:
Peter Schmidt
SwissBeam AG
Grossmattrain 3
8964 Rudolfstetten

Tel. 044 545 20 80
Fax 044 545 20 84
info@swissbeam.ch / www.swissbeam.ch