ELEKTRONENSTRAHL-SCHWEISSEN

Grundlagen einer faszinierenden Technik

Volker Adam, Uwe Clauß, Dr. h. c. Dietrich v. Dobeneck, Dr. Thomas Krüssel, Dr. Thorsten Löwer



probeam

Elektronenstrahlschweißen

Grundlagen einer faszinierenden Technik

Volker Adam, Uwe Clauß, Dr. h. c. Dietrich v. Dobeneck, Dr. Thomas Krüssel, Dr. Thorsten Löwer





Elektronenstrahlschweißen Grundlagen einer faszinierenden Technik

Volker Adam (Kapitel 7) Uwe Clauß (Kapitel 6) Dr. h. c. Dietrich v. Dobeneck (Vorwort, Gesamtlektorat) Dr.-Ing. Thomas Krüssel (Kapitel 3 und 4) Dr. Thorsten Löwer (Kapitel 2 und 5)

2011 1. Auflage: 6000 Exemplare Herausgeber: pro-beam AG & Co. KGaA

Titelbild:

"Elektronenstrahlschweißen mit Zusatzdraht im Vakuum" Fotograf: Sascha Mushack, pro-beam technologies GmbH, Burg.

© Alle Rechte bei pro-beam AG & Co. KGaA

Eigendruck im Selbstverlag Printed in Germany www.pro-beam.com



Inhaltsverzeichnis

1.	Vorwort	3
2.	Grundlagen des Verfahrens	6
2.1	Elektronen	6
2.2	Elektronenstrahl	8
2.3	Strahlerzeugung	10
2.4	Strahloptik	11
2.5	Systemaufbau	13
2.6	Strahlbewertung	14
3.	Schweißbarkeit eines Bauteiles	16
4.	Konstruktion	18
4.1	Werkstoffe und Elektronenstrahlschweißen	18
4.1.1	Gestaltungsbeispiele	24
4.1.2	Normgerechte Darstellung von EB-Schweißnähten	
	in technischen Zeichnungen	25
4.1.3	Konstruktive Voraussetzungen zum Elektronenstrahlhärten	27
4.2	Eignung von Werkstoffen	29
4.2.1	Elektronenstrahlschweißen	29
4.2.2	Aluminium und seine Legierungen	30
4.2.3	Kupfer- und Kupferlegierungen	31
4.2.4	Hitzebeständige und reaktive Metalle	33
4.2.5	Stähle und andere Eisenlegierungen	34
4.2.6	Austenitische Stähle, Duplexstähle und hochlegierte Stähle	34
4.2.7	Baustähle, korrosionsbeständige ferritische Stähle	
	und Vergütungsstähle	36
4.2.8	Gusseisen	37
4.2.9	Nickel- und Nickellegierungen	39
4.2.10	Mischverbindungen	39
4.2.11	Elektronenstrahlhärten / Elektronenstrahlumschmelzen	40
4.2.12	Elektronenstrahlbeschichten / Rekonstruktion / Prototypen	42
4.3.	Fertigung (Magnetismus, Reinigung, Spannvorrichtungen)	44
4.3.1	Magnetismus	44
4.3.2	Reinigung	45
4.3.3	Vorrichtungen zum Spannen	47
4.3.4	Antang und Ende einer Schweißnaht	49

5	Der Elektronenstrahl als Multifunktionstalent	50
5.1	Werkzeug für die Qualitätssicherung und die Diagnostik	50
5.1.1	Automatische Strahljustierung	50
5.1.2	Werkstückbeobachtung	53
5.1.3	Automatische Fugensuche	54
5.1.4	Prozesskontrolle	58
5.1.5	Qualitätskontrolle	59
5.2	Schnelle Ablenktechnik, Mehrstrahltechnik	60
5.2.1	Mehrbadschweißen	61
5.2.2	Mehrprozesstechnik	64
5.2.3	Randschichttechnologie	66
6	Elektronenstrahl-Anlagen	68
6.1	Definitionen	68
6.2	Maschinenbeispiele	70
6.2.1	Kammermaschine	71
6.2.2	Taktmaschine	79
6.2.3	Schleusen-Kammermaschine (Shuttle und Transfer)	80
6.2.4	Schleusen-Taktmaschine (Rundtakt)	83
7	Kostenbetrachtung und Vergleich	
	mit anderen Fertigungstechnologien	85
7.1	Gibt es Alternativen zum Elektronenstrahlschweißen?	85
7.2	lst Laserstrahlschweißen kostengünstiger?	86
7.3	Kann Elektronenstrahlschweißen preiswerter sein als	
	konventionelle Schweißverfahren mit Lichtbogen?	88
8	Die pro-beam Gruppe	92
9	Die Autoren dieses Buches	95

1. Vorwort

"Innovationen entstehen aus Leidenschaft, nicht aus Zufriedenheit."

Ferdinand von Steinbeis (württembergischer Wirtschaftspolitiker, 1807-1893)

Das Elektronenstrahlschweißen ist über 50 Jahre nach der Entdeckung des Tiefschweißeffektes 1958 zwar keine neue Technologie mehr, sondern eine ausgereifte und mit ca. 7500 weltweit gebauten Anlagen, von denen noch etwa die Hälfte in Betrieb ist, eine eingeführte und bewährte Technik. Dennoch sind in den letzten 10 Jahren bei pro-beam viele neue Möglichkeiten eröffnet worden, die in Ansätzen schon vorhanden waren, die aber insbesondere erst durch die moderne Steuerungstechnik zur Entfaltung kamen. Es sind dies Innovationen, die aus der täglichen Praxis des Schweißens entstanden sind. Auch die konsequente Forderung nach Qualität und deren Dokumentation hat einige Neuerungen hervorgebracht, die sich der besonderen Fähigkeiten des Elektronenstrahls hedienen

Ein Schweißverfahren, das das Fügen winzigster Bauteile mit Schweißtiefen im 0,1-mm-Bereich bis zu riesigen Komponenten mit Schweißtiefen bis 200 mm in Stahl in einer Lage zu schweißen ermöglicht, müsste eigentlich überall bekannt sein. Dies ist aber nicht der Fall. Es gibt nur wenige Hochschulen, die ihren Ingenieurstudenten das Wissen zum Elektronenstrahlschweißen vermitteln. Folglich fehlt das Wissen um dieses Verfahren auch in der Industrie. Das liegt zum Teil an der Komplexität der Technologie. Wir haben es im Bereich der Anlagen mit klassischem Präzisions-Maschinenbau zu tun, gepaart mit Vakuumtechnik, Hochspannungstechnik, Magnetstromkonstantern, extrem schneller Steuerungstechnik und nicht zuletzt mit der Elektronenoptik, die heute nur noch an einer einzigen deutschen Universität gelehrt wird.

Schweißgeschwindigkeiten Die erreichbaren können häufig werkstoffbedingt nicht gesteigert werden. Um nun kürzere Taktzeiten zu erreichen, zielen die neuen Maschinenkonzepte auf konsequente Eliminierung der Nebenzeiten ab, vor allem der des Evakuierens. Dies geschieht durch die Einführung von Belade-Schleusen bei Shuttle-, Transfer- und Taktanlagen. Die kürzeste Zeit bei One-Piece-Flow liegt heute bei 5 Sekunden. Das Evakuieren einer Großkammer mit über 600 m³ dauert gerade mal 30 Minuten. Wenn dann in weiteren 80 Minuten eine 12 m lange und 100 mm tiefe Schweißnaht ausgeführt ist, ist das Elektronenstrahlschweißen im Vergleich zu Lichtbogen-Schweißverfahren - in vielen Lagen ausgeführt - vielfach schneller.

Das alles zu optimieren, ist freilich das Aufgabengebiet des Anlagenherstellers. Aber auch der Betreiber solcher Maschinen möchte über ihre Funktionsweise Bescheid wissen und sie verstehen. Sein Arbeitsgebiet, das Elektronenstrahlschweißen selbst, hat eine Reihe von Besonderheiten die zum Teil auf der Schnelligkeit des Prozesses beruhen: auf Grund der schnellen Selbstabschreckung wird z. B. das Kornwachstum unterdrückt oder es entstehen übersättigte feste Lösungen. Besonders vorteilhaft ist die Möglichkeit, schlanke (aber auch breite) parallele Schweißnähte herzustellen, die es dem Konstrukteur erlauben, fertig bearbeitete Bauteile sehr verzugsarm zu fügen. Damit lassen sich vor- und / oder nachgeschaltete Bearbeitungen einsparen, wie z.B. das Richten. Auch die Fähigkeit des Elektronenstrahlschweißens,

unterschiedliche Materialien zu verbinden, eröffnet Rationalisierungseffekte, indem – der Funktion entsprechend – billige und teure Werkstoffe kombiniert werden.

Es ist das Ziel dieses Büchleins. Ihnen als interessierten Leser, die Grundlagen des Elektronenstrahlschweißens zu vermitteln und Sie mit dem gewonnenen Wissen und Anregungen zu animieren. in Ihrem Arbeitsumfeld nach vorteilhaften Anwendungen des Elektronenstrahlschweißens Ausschau zu halten. Die Möglichkeit, diese auf einer unserer 40 Anlagen im Lohnschweißbereich der Firmengruppe pro-beam zu erproben, sollte Ihnen die Entscheidung für den Einstieg in die Elektronenstrahl-Technik erleichtern, müssen Sie doch nicht schon zu Beginn hohe Investitionskosten vorhalten. Und sind Ihre Stückzahlen zum Betreiben einer eigenen Elektronenstrahl-Anlage zu klein, werden wir gerne für Sie die Einzel- oder Serienfertigung übernehmen – so wie bei mehr als 1.000 anderen, zufriedenen pro-beam Kunden auch.

Dr. h. c. Dietrich von Dobeneck

Die in den folgenden Kapiteln häufig verwendete Abkürzung "EB" steht für Electron Beam = Elektronenstrahl.

2. Grundlagen des Verfahrens

2.1 Elektronen

Abbildung 1: Atome bestehen aus einem Kern mit Protonen und Neutronen, der von einer Hülle aus Elektronen umgeben ist.

Das thermische Werkzeug "Elektronenstrahl" ist ein gebündelter Strahl von hochbeschleunigten Elektronen. Also jenen Elementarteilchen, die in jedem Atom enthalten sind und eine negative elektrische Ladung tragen. Sie sind für die mechanischen und chemischen Eigenschaften der Atome verantwortlich und dienen als Energieträger des elektrischen Stroms. Um freie Elektronen für einen Strahl zu bekommen, müssen diese erst einmal aus den Atomen heraus gelöst werden. Das wird durch Heizen einer Emissionselektrode erreicht.



Abbildung 2: Aufgrund der Coulomb-Kraft F spürt das Elektron im elektrischen Feld E eine Beschleunigung in Richtung der Anode.

Wegen ihrer Ladung lassen sich Elektronen auf zwei Arten beeinflussen: In elektrischen Feldern werden sie in Richtung der Anode (positive Elektrode) beschleunigt; dort wirkt auf sie die so genannte Coulomb-Kraft. Auch in Elektronenstrahl-Anlagen werden die Elektronen durch diese Kraft beschleunigt. Dabei nehmen sie Energie auf, die sich durch eine höhere Geschwindigkeit bemerkbar macht. Die Energiemenge, die ein Elektron dabei aufnimmt, wird nur durch die elektrische Spannungsdifferenz bestimmt, die das Elektron durchfliegt. So wird ein Elektron durch eine Spannung von 150 kV auf ca. 63 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Man gibt daher diese Beschleunigungsspannung an, um die Energie der Elektronen zu beschreiben.



Abbildung 3: Die Lorentz-Kraft \vec{F} wirkt auf das Elektron im magnetischen Feld \vec{B} senkrecht zur Flugrichtung \vec{v} und den Feldlinien.

Die zweite Art, mit der man Elektronen beeinflussen kann, sind magnetische Felder. Durch die so genannte Lorentz-Kraft wird die Flugrichtung der Elektronen geändert. Sie werden senkrecht zur Flugbahn und den Feldlinien abgelenkt, sodass sich ihre Geschwindigkeit nicht ändert. In der Schweißanlage werden Magnetfelder an verschiedenen Stellen eingesetzt. Sie dienen zur Formung und Ablenkung des Strahls und zum Aufbau magnetischer Linsen. Auch Magnetfelder des Schweißguts haben einen Einfluss auf den Strahl, der aber unerwünscht ist. Man versucht daher, diese störenden Felder möglichst gering zu halten.

Nun ist die physikalische Basis der Elektronen beschrieben und wir können uns dem Strahl und seinen Eigenschaften zuwenden.



Abbildung 4: Strahlaufweitung: Ein Elektronenstrahl in Restgas (500 mbar) zeigt die Aufweitung durch Vielfachstreuung (links); bei 50 mbar ist die Aufweitung kaum zu erkennen (rechts). Die elektrischen Felder innerhalb der Atome nehmen natürlich auch Einfluss auf die Elektronen. Wenn Elektronen auf Atome treffen (z.B. Werkstück oder Luft), werden sie von ihnen gestreut (abgelenkt) und geben dabei einen Teil ihrer Energie an diese Atome ab, die dadurch wiederum erwärmt werden. Für einen Elektronenstrahl in Gas – z.B. in schlechtem Vakuum – bedeutet das, dass er sich aufweitet. In Abbildung 4 sieht man zum einen, wie ein Elektronenstrahl in gezielt eingebrachtem Restgas durch Vielfachstreuung immer breiter wird und zum anderen, dass die Aufweitung von der Dichte abhängt. Das ist der Grund dafür, dass man in Elektronenstrahl-Anlagen bevorzugt mit einem Vakuum arbeitet.

2.2 Elektronenstrahl



Abbildung 5: Wirkung des Strahls: Das Werkstück wird stark erwärmt, zudem entstehen Röntgenstrahlen. Einige Elektronen werden zurück gestreut, die zur Beobachtung genutzt werden können.

Die gewünschte Wirkung des Elektronenstrahls auf dem Werkstück ist es, auf einer möglichst kleinen Fläche das Material zu erwärmen. Es muss geschmolzen und teilweise verdampft werden, um eine Schweißnaht zu erhalten oder Bohrlöcher zu erzeugen.

	Mg	Al	Ti	Cu	Fe	W
60 kV	35µm	23µm	14µm	7µm	8µm	3µm
120kV	112µm	72µm	43µm	22µm	25µm	10µm

Tabelle 1: Eindringtiefen von Elektronen in verschiedene Metalle.

Trifft ein Elektronenstrahl auf Metall, dringen die Elektronen in dieses ein. Diese Eindringtiefe hängt von der Elektronenenergie (Beschleunigungsspannung) und der Dichte des Metalls ab (siehe Tabelle 1). So dringen Elektronen in Aluminium siebenmal tiefer ein als in Wolfram. Üblicherweise liegt die Eindringtiefe unter 0,1mm; dabei werden die meisten Elektronen im Metall festgehalten. Einige wenige Elektronen werden jedoch von den Atomen zurückgestreut, so dass sie das Metall wieder verlassen. Die Anzahl dieser zurückgestreuten Elektronen ist abhängig von der Eindringtiefe und damit wiederum vom Material des Werkstücks. Ein kleiner Teil der Energie der Elektronen wird als Röntgenstrahlung abgegeben. Diese Abstrahlung ist unerwünscht, kann aber nicht vermieden werden. Als Folge muss die Anlage abgeschirmt werden, um gesundheitliche Schäden zu verhindern. Diese Abschirmung wird meist in die Vakuumkammer integriert.



Abbildung 6: Tiefschweißeffekt: Durch Schmelzen und Verdampfen kann der Strahl tief ins Material eindringen: Das Schweißbad durchdringt das Werkstück. Rechts: Schliffbild einer 50mm Durchschweißung an S355.

Obwohl die Flektronen in den verschiedensten Metallen weniger als 0,1mm eindringen, sind Einschweißtiefen von mehreren Zentimetern möglich. Der so genannte Tiefschweißeffekt ist dafür verantwortlich. Der Elektronenstrahl erwärmt das Metall so stark, dass dieses schmilzt und in der Mitte sogar verdampft. Der Dampfdruck erzeugt dabei eine Kapillare in der Schmelze, durch die der Elektronenstrahl tiefer in das Werkstück eindringen kann. Dieser Effekt ermöglicht es, mit dem Elektronenstrahl tiefe und schlanke Schweißnähte herzustellen.

2.3 Strahlerzeugung





Aufgabe der Strahlquelle ist es, einen möglichst dünnen und wenig divergenten Strahl mit variabler Leistung zur Verfügung zu stellen. Bei Bedarf, z.B. für breitere Nähte, kann dieser dann leicht aufgeweitet werden. Um einen Elektronenstrahl zum Schweißen oder Bohren zu erzeugen, braucht man zunächst freie Elektronen. Diese treten aus heißen Materialien aus, meistens Wolfram (W) wegen seines hohen Schmelzpunktes, teilweise auch Tantal (Ta) oder Lanthanhexaborid (LaB6). Diese Elektronenguelle kann direkt durch einen Strom oder indirekt durch ein zusätzliches Heizelement geheizt werden. Die Elektronen werden dann durch eine angelegte Spannung beschleunigt. In Abbildung 7 ist eine direkt geheizte Kathode dargestellt. Sie wird durch einen Strom erwärmt und dient gleichzeitig als Elektrode. Das elektrische Potenzial im Strahlerzeuger ist rechts als Höhe dargestellt. Die Elektronen laufen diesen "Potentialhang" herunter und werden dadurch schneller. Die Energie, die sie dabei bekommen, wird nur durch die Spannung zwischen der Kathode (negative Elektrode und Elektronenguelle) und Anode (positive Elektrode) bestimmt. Durch eine zusätzliche Steuerelektrode (Wehnelt) ist es möglich, den Strahlstrom durch eine Spannung zu steuern. Damit kann man den Strahlstrom deutlich schneller beeinflussen, als durch eine Änderung des Heizstromes. Erst durch eine hohe Schaltgeschwindigkeit ist das Bohren von Löchern mit dem Elektronenstrahl möglich (Pulsen), und das Schweißen wird weitaus präziser. Durch geschickte Wahl der Elektrodenform ist es zudem möglich, die Strahlform zu verbessern. Der Potentialhang wird dabei zu einer schmalen "Schlucht". Eine negative Spannung an der Steuerelektrode schnürt den Strahl förmlich ab und reduziert dadurch den Strahl förmlich ab und reduziert dadurch den Strom. Gleichzeitig wandert auch die Taille (Cross-over) in Richtung Kathode. Bei geringerem Strom verbessern sich Strahldurchmesser und Divergenz. Während eines Schweißvorgangs werden üblicherweise die Beschleunigungsspannung konstant gehalten und die Leistung über den Strom geregelt.

2.4 Strahloptik

Damit man mit dem Elektronenstrahl arbeiten kann, muss dieser gezielt auf die Werkstückoberfläche gebracht werden. Mit Magnetfeldern ist es möglich, Elektronenstrahlen ähnlich wie Lichtstrahlen zu fokussieren. Wenn man den Elektronenstrahl mit einem stromdurchflossenen Draht "umwickelt", erzeugt diese Spule ein Feld, das wie eine Linse wirkt. Die Brennweite dieser Linse ist abhängig von der Energie der Elektronen, vom Spulenstrom und ihrem Aufbau. Durch Verändern des Spulenstromes ist es leicht möglich, den Strahl auf verschiedene Abstände zu fokussieren, man hat sozusagen eine "Gummilinse". Diese Stromabhängigkeit eröffnet den Zugang für schnelle, elektronische Regelungen. Mit der entsprechenden Ansteuerung sind schnelle Brennweitenänderungen machbar. die mit mechanischen Elementen unerreichbar sind.



Abbildung 8: Magnetische Linse: Tritt ein Elektronenstrahl durch eine Spule, wird er dahinter fokussiert.

Grundlagen des Verfahrens



Abbildung 9: Ablenkung: In einem homogenen Magnetfeld quer zum Elektronenstrahl wird der zunächst zentrische Strahl (links) seitlich abgelenkt (rechts).

Ordnet man zwei Spulen quer zum Strahl an, sodass sie ein Magnetfeld ähnlich dem eines Hufeisenmagneten erzeugen, lässt sich der Elektronenstrahl seitlich ablenken. Die Stärke der Ablenkung lässt sich wiederum durch den Spulenstrom steuern. Zusammen mit einem zweiten, um 90 Grad gedrehten Spulenpaar ist es möglich, den Strahl beliebig über das Werkstück zu bewegen. Da auch diese Steuerung ohne mechanische Bewegung auskommt, können sehr schnelle Ablenkungen erreicht werden. Wird dieser Ablenker mit einem Funktionsgenerator verbunden, können sehr komplexe Figuren auf dem Werkstück erzeugt werden.

Abbildung 10: Strahlformung: Mit magnetischen Multipolen ist es möglich, den Astigmatismus des Strahls zu korrigieren. Der Astigmatismus (links) wird durch Magnetfelder korrigiert (rechts).



Mit komplizierteren Spulenanordnungen (magnetische Multipole) ist es möglich, die Form des Strahlquerschnitts zu verändern. Dies wird meistens dazu eingesetzt, den auch aus der Lichtoptik bekannten Astigmatismus zu korrigieren, also den Strahl möglichst rund zu formen.

2.5 Systemaufbau



Abbildung 11: Hochspannungssäule für hohe Strahlleistung (links), Niederspannungssäule für mittlere Strahlleistung (Mitte), Schema einer Strahlsäule (rechts).

Eine vollständige Elektronenstrahl-Säule besteht je nach Konfiguration aus unterschiedlichen Komponenten. Allen gemeinsam sind der Strahlerzeuger mit Kathode, Wehnelt und Anode, eine Fokuslinse und ein Ablenker. Optional bietet es sich an, einen Zentrier-Ablenker einzubauen, um den Strahl mittig durch die Linse zu justieren und dadurch die Linsenfehler zu minimieren. Mit einem Stigmator lässt sich die Strahlform (Rundheit) optimieren. Für bestimmte Prozesse ist es sinnvoll, eine weitere Linse in Verbindung mit einer Blende zu verwenden. Auf diese Art kann ein Diffundieren des Prozessgases (Metalldämpfe) in den Strahlerzeuger reduziert werden.

Weitere Variationsmöglichkeiten bestehen in der Geometrie des Strahlerzeugers, der Kathodengröße oder dem Abstand von Strahlerzeuger und Linse, der Gegenstandsweite. Das Verhältnis aus Gegenstandsweite und Bildweite bzw. Arbeitsabstand bestimmt den Abbildungsmaßstab und damit den Strahlfleckdurchmesser. So ist es möglich, die Säule auf die Schweißaufgabe und Arbeitsabstände zu optimieren. Die Magnetoptik und die elektronische Steuerung lassen sich ebenfalls auf die jeweiligen Anforderungen anpassen. So kann auch hier ein optimales Verhältnis zwischen Schnelligkeit, Genauigkeit und Kosten erreicht werden. Die meisten Flektronenstrahl-Säulen sind mit Diagnosesystemen zur Beobachtung des Schweißprozesses ausgestattet. Dies ist in den meisten Fällen ein lichtoptisches System mit einer CCD-Kamera (charge coupled device) oder einem Fernrohr. Eine weitere Möglichkeit bietet die Auswertung der zurückgestreuten Elektronen, die auch zur Bildgewinnung genutzt werden können. Anwendungsmöglichkeiten dieser Diagnosesysteme werden in Kapitel 5 behandelt.

2.6 Strahlbewertung



Will man die Qualität eines Elektronenstrahls beurteilen, müssen verschiedene Merkmale des Strahls betrachtet werden. Ein Elektronenstrahl muss zum Schweißen oder Bohren genug Energie einbringen, um das Metall zu verdampfen. Dabei sollen die Bereiche neben der Schweißnaht oder dem Bohrloch möglichst wenig erwärmt werden. Man braucht folglich viel Leistung auf kleiner Fläche, d.h. eine hohe Energiedichte. Die kleinstmögliche Breite einer Schweißnaht wird durch den minimal möglichen Strahldurchmesser und die Schweißgeschwindigkeit bestimmt. Je dünner der Strahldurchmesser ist, desto genauere und feinere Schweißungen sind

Abbildung 12: Strahlkaustik: Vermessung der Intensität entlang des Strahls. Diese Falschfarbendarstellung ist in der Höhe sehr stark vergrößert. Es sind der minimale Durchmesser im Fokus (d_0) und der Divergenzwinkel (θ_{voll}) eingezeichnet. möglich. Bei größeren Einschweißtiefen ist zudem wichtig, dass der Strahl entlang seiner Achse auch dünn bleibt. Weitet sich der Strahl zu stark auf, kann die Dampfkapillare nicht über die ganze Werkstückdicke aufgebaut werden. Die Divergenz gibt an, wie stark sich der Strahl aufweitet. Bei großen Materialdicken mit hohen Einschweißtiefen ist deshalb eine geringe Divergenz erforderlich.

Wie aus der Lichtoptik bekannt, hängen minimaler Strahldurchmesser und Divergenz zusammen. Durch eine Linse kann man entsprechend dem Abbildungsverhältnis den Strahldurchmesser ändern, die Divergenz ändert sich dabei gleichzeitig im umgekehrten Verhältnis. Das (normierte) Produkt aus minimalem Strahldurchmesser (d₀) und der Divergenz (θ) heißt Strahlparameterprodukt (engl: Beam Parameter Product, BPP), in der Beschleunigerphysik auch Emmitanz (ϵ) genannt. Es ist eine Strahlkonstante und ändert sich durch Verändern der Abbildungen nicht.

So kann man durch einen kleineren Fokusabstand den Fokusdurchmesser reduzieren (verkleinerte Abbildung), vergrößert dabei aber gleichzeitig die Divergenz. Für eine schmale und zugleich tiefe Schweißnaht sind folglich ein kleines Strahlparameterprodukt und eine geringe Divergenz der Quelle erforderlich, siehe dazu auch [1]. Dieses kann nicht durch die Optik verbessert werden, sondern wird nur durch die Strahlquelle vorgegeben. Typische Werte für eine Elektronenstrahl-Schweißanlage liegen bei 1 bis 2 mm mrad für das BPP mit einem Strahldurchmesser von 200 bis 300 µm. Für eine Laserschweißanlage liegen diese Werte beispielsweise bei 20 mm mrad und 600 µm.

 C. G. Menhard und Dr. T. Löwer: "Die Elektronenstrahlgeometrie – Definition, Vermessung und Bedeutung für den Schweißprozess", in: Schweißen und Schneiden 61 (2009), Heft 2, S. 68 – 73.

$$\epsilon = -\frac{\mathsf{d}_{0} \cdot \boldsymbol{\theta}_{\text{voll}}}{4}$$

3. Schweißbarkeit eines Bauteiles

Unter der Schweißbarkeit wird im Allgemeinen die Eignung eines bestimmten Schweißprozesses zum Fügen eines Bauteiles verstanden. Diese allgemeine Definition wird nach DIN 8528-1 durch drei äußere Faktoren gestützt. Erst wenn sicher gestellt ist, dass sowohl der Werkstoff, die Konstruktion sowie die Fertigung für den geforderten Schweißprozess eine Schweißung des Bauteils erlauben, ist die Schweißbarkeit des Bauteiles gewährleistet.

Werkstoff Schweißagnung Schweißarbarkeit Schweißarbarkeit Schweißarbarkeit Schweißarbarkeit

Abbildung 13: Einflussfaktoren für Schweißbarkeit eines Bauteiles nach DIN 8528-1. In diesem Zusammenhang stellt die Schweißeignung des Werkstoffs häufig den entscheidenden Faktor für die Schweißbarkeit dar. Das ist auch der Grund, weshalb oftmals die Schweißbarkeit mit der Schweißeignung gleichgesetzt wird.

Dabei spielen jedoch alle drei Faktoren gleichermaßen eine entscheidende Rolle. Ist zum Beispiel die Schweißsicherheit durch die Konstruktion nicht gegeben, kann es zu einem vorzeitigen Versagen der Schweißnaht und dabei im schlimmsten Fall zur Zerstörung des Bauteils und einer Gefährdung von Menschenleben kommen. Gleiches gilt für die Schweißmöglichkeit im Rahmen der Fertigung. Erst wenn gewährleistet ist, dass alle Schweißnähte entsprechend der Spezifikation ausgeführt werden können (in Bezug auf Zugänglichkeit, Wärmeführung usw.) kann eine anforderungsgerechte Schweißung erfolgen.

In diesem Zusammenhang spielt auch die Schweißeignung des Werkstoffes eine entscheidende Rolle. So ist für die bekannten Standard-Schweißprozesse wie MIG/MAG oder WIG die Anzahl der schweißgeeigneten Werkstoffe begrenzt bzw. die Schweißeignung muss erst durch aufwendige Maßnahmen wie etwa eine angepasste Wärmeführung oder das Aufbringen von Pufferlagen hergestellt werden. Diesbezüglich bietet der Elektronenstrahl eine Reihe von teilweise entscheidenden Vorteilen, so dass die Anzahl der schweißgeeigneten Werkstoffe und Werkstoffkombinationen durch eine angepasste Prozessführung in den letzten Jahren deutlich erweitert werden konnte. So kann an Baustählen wie den S355-Qualitäten u. ä. oder an warmfesten Baustählen für die Petrochemie wie 13CrMo 4-4 für das Schweißen mit dem Elektronenstrahl eine Vorwärmung – im Gegensatz zur Verarbeitung mit den Lichtbogenverfahren – gänzlich unterbleiben.

Erfordert der Werkstoff eine Vorwärmung, um fehlerfrei geschweißt werden zu können, so kann diese in vielen Fällen ebenfalls mit dem Elektronenstrahl realisiert werden, wodurch eine erhebliche Vereinfachung des Prozesshandlings ermöglicht wird. Die erforderlichen Parameter werden dann im Rahmen der Prozessentwicklung ebenso ermittelt wie die Schweißparameter und sind in der späteren Fertigung exakt reproduzierbar.

4. Konstruktion

4.1 Elektronenstrahlschweißen

Aus den Anforderungskriterien für die Anwendung resultiert bei den Lichtbogenverfahren eine Vielzahl von unterschiedlichen Nahtgeometrien. Da bei Verwendung des Elektronenstrahls im Allgemeinen kein Zusatzwerkstoff erforderlich ist, um die gewünschten Anbindungstiefen zu erzielen, die in Abhängigkeit des Werkstoffes bis teilweise über 100 mm betragen können, stellt der I-Stoß die ideale Nahtvorbereitung dar. In unterschiedlich abgewandelter Form ist mit dieser Stoßgeometrie annähernd iede Schweißverbindung realisierbar. Neben der Stoßform werden Schweißverbindungen in Längs- und Rundnähte aufgeteilt. Bei Rundnähten kann noch präziser in Axial- und Radialnähte unterschieden werden



I-Naht, Normalausführung





Axialnaht: Elektronenstrahl parallel zur Drehachse

Radialnaht: Elektronenstrahl senkrecht zur Drehachse

Für die in Abbildung 14 dargestellten Grundformen gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten in der Detailausführung, von denen einige ausschließlich mit den Strahlschweißverfahren realisiert werden können. Stoßform und damit

Abbildung 14: Allgemeine Einteilung der Schweißverbindungen in Längs- und Rundnähte. einhergehende Nahtgeometrie bilden die Basis für die Realisierung von Schweißverbindungen höchster Präzision und herausragender Nahtqualitäten.

Die Schweißnahtvorbereitung ist beim Elektronenstrahlschweißen relativ einfach, da die Einzelteile lediglich möglichst spaltfrei (technischer Nullspalt) zueinander in Position gebracht werden müssen. Das Ziel dabei ist die Einstellung eines Spaltes von weniger als 0,2 mm. Ist dies herstellungsbedingt nicht möglich, ergeben sich durch den Einsatz von Zusatzdraht Möglichkeiten, das Bauteil trotzdem fehlerfrei zu schweißen.

Dabei ist die Einhaltung von Form- und Lagetoleranzen generell von größerer Bedeutung als die Rauhigkeit der Oberflächen am Fügestoß. Sehr glatte Flächen können, insbesondere bei Tiefschweißungen, die Entgasung des Fügespalts erschweren und zu Problemen führen; geschlichtete, gefräste, Laser- oder Wasserstrahl geschnittene, oder sogar gesägte Fügestöße sind für eine Vielzahl von Anwendungen völlig ausreichend.

Bei der Wahl der Nahtvorbereitung ist darauf zu achten, dass an der Schweißnahtoberseite eine möglichst scharfe Kante ohne Grat gewährleistet ist. Dies ermöglicht ein genaueres Positionieren mittels Elektronenoptik, was sowohl für die Einzelteilfertigung als auch für eine bessere Erkennung in automatisierten Prozessen von Vorteil ist.

Für den Schweißprozess im Vakuum sind eingeschlossene Hohlräume generell ungünstig, wenn sie vom Schweißprozess angeschnitten werden, da der mögliche Überdruck der eingeschlossenen Luft zur Prozessinstabilitäten führen kann. Bearbeitungsbedingte Hohlräume sollten daher so klein wie möglich gehalten werden. Vorteilhaft ist deshalb, wenn Fasen und Innenradien stets genau vorgegeben und toleriert werden (vgl. Abbildung 15 links). Dabei muss beachtet werden, dass die Einzelteile hinterher auch tatsächlich spaltfrei zu montieren sind. Wird beispielsweise eine ungünstige Kombination von Fase und Radius gewählt, können unerwünschte Spalten im Stoßbereich auftreten (vgl. Abbildung 15 rechts).



Abbildung 15: Links unten zulässiger Hohlraum. Rechts: Riss entlang der Nahtflanke sowie zur Nahtwurzel, ausgehend von einem teilweise mit Schmelze gefüllten Hohlraum.

Gerade beim Schweißen von runden Bauteilen in Form von Radialnähten ist eine Bauteilzentrierung zur genauen Lagefixierung notwendig. Diese Zentrierung kann dabei entweder von der Innen- oder von der Außenseite erfolgen.

Aufgrund der einfachen Teilevorbereitung sowie der günstigeren Verhältnisse im Hinblick auf Schweißeigenspannungen sind Radialnähte sowohl für Massenproduktionen als auch höchstbelastete Maschinenteile hervorragend geeignet und vorteilhaft im Vergleich zu Axialnähten.



Vorteil • Zentrierung als artgleiches ZusatzAbbildung 16: Ausführung von Zentrierungen für Radialschweißnähte.

Vorteil	Zentrierung als artgleiches Zusatz- werkstoffdepot kein unverschweißter Restspalt	Zentrierung als artfremdes Zusatz- werkstoffdepot (metallurgische Beeinflussung) kein unverschweißter Restspalt	kein unverschweißter Restspalt Standardzentrierung
Nachteil	 verdeckter Fügespalt mech, Aufwand 	 verdeckter Fügespalt mech, Aufwand 	verdeckter Fügespalt

Auch bei Verwendung dieser Nahtform muss unbedingt darauf geachtet werden, dass bei der Montage der Einzelteile keine Hohlräume verschlossen und somit von einer Evakuierung ausgeschlossen werden. Gegebenenfalls sind Entlüftungsbohrungen oder Entgasungsnuten konstruktiv vorzusehen.

Beim Schweißen von Axialnähten (Abbildung 18) erfolgt die Zentrierung der Teile in den meisten Fällen über den Formschluss der Drehteile, wie in den Beispielen 1 bis 4 der Abbildung 18 grafisch dargestellt. Besondere Bedeutung haben hierbei die Passungsverhältnisse. Bei Axialnahtschweißungen setzt Querschrumpfung ein. Sie führt entweder zu einer Spaltbildung auf der gegenüberliegenden Seite, oder es besteht infolge zu hoher Schweißspannungen im Falle einer behinderten Querschrumpfung die Gefahr von Rissen.



Abbildung 17: Bauteil mit Entlüftungsbohrung.

Geschickt gewählte Übergangspassungen – wie beispielsweise H7/n6 bzw. H7/r6 in Verbindung mit möglichst schlanken Schweißnähten – verhindern diese Effekte in den meisten Fällen wirkungsvoll.

Im Beispiel 6 der Abbildung 18 wird eine axiale Stichnahtlösung dargestellt, bei der auch sehr dünnwandige Bleche, wie z.B. Membrane, sicher geschweißt werden können. Über mehrere, koaxiale Kreisnähte nebeneinander kann dann die Anbindungsfläche erhöht werden. Bei Stichnähten ist stets zu beachten, dass die Einschweißtiefe nur in geringer Relation zum Anbindungsquerschnitt steht. Aufgrund dessen muss gegebenenfalls durch mehrere Schweißungen nebeneinander die geforderte Anbindungsfläche realisiert werden.



Axialnahtausführungen. 1. Stumpfnaht 2. Ecknaht 3. Ecknaht mit Anschlag für Scheibe 4. Verbindung Rohr/ Flansch; Anschlag Flansch 5. Überlappnaht 6. Anschweißen einer Membrane; durch aufgesetzten Ring wird "Durchbrennen" der Membrane verhindert.

Abbildung 18:

Bei 1, 2, 3 und 4 ist ein leichter Preßsitz vorzusehen; bei 5 und 6 werden die Teile mittels Spannvorrichtung zusammengepreßt.

Der charakteristisch schlanke Elektronenstrahl mit hoher Energiedichte – äußerst präzise hinsichtlich des Auftreffortes, und des steuerbaren Leistungseintrages – erlaubt es, auch schwerbzw. nicht zugängliche Nähte zu schweißen (Abbildung 19).

Durch die vielseitigen Eigenschaften des Elektronenstrahls werden dem kreativen Konstrukteur unzählige Möglichkeiten wirtschaftlicher und technisch raffinierter Lösungen geboten, wenn die Hinweise auf ein strahlschweißgerechtes Design konsequent beachtet werden.







Hilfsmarkierung zur Positionieruna





Abbildung 19: Schweißen schwer (links) und nicht (rechts) zugänglicher Nähte.

So stellen das geringe Schmelzbadvolumen und die Flankensteilheit der Schweißnähte wesentliche Verfahrensvorteile dar. Aus diesen Eigenschaften resultieren der kleinste Winkelverzug sowie die geringsten Schrumpfungen und Schwindungen aller Schmelzschweißverfahren. Verzug und Formänderungen können im Rahmen der Parameterermittlung minimiert und später in der Fertigung prozesssicher reproduziert werden. Damit kann der Konstrukteur teilweise endmaßgenau planen und somit kostenintensive mechanische Nacharbeiten einsparen. Somit ist das Verfahren exzellent zur Neuteilbeschriftung aber auch zur Reparatur von Zerspanungsfehlern an hochwertigen endbearbeiteten Bauteilen geeignet.

Bezeichnung	Zeichnung	Realteil	Werkstoff
Einfache I-Naht			Werkstoff S960QL
l-Naht mit Badunter- stützungsleiste		63	Werkstoff S355NL
I-Naht mit Zentrierlippe		14	Werkstoff TiAl6V4
T-Stoß mit I-Naht für hohe Festigkeits- anforderungen			Werkstoff AISI 316 L
T-Stoß mit I-Naht für geringe Festigkeits- anforderungen		2 3-4	Werkstoff G-AlSi10Mg an EN AW 5083
Überlappnaht		e de la constante de	Werkstoff 16MnCr5
Axialnaht – I-Naht einfach			Werkstoff 1.4404

4.1.1 Gestaltungsbeispiele



Weitere Hinweise und Beispiele hierzu befinden sich im DVS-Merkblatt 3201.

4.1.2 Normgerechte Darstellung von EB-Schweißnähten in technischen Zeichnungen

Die Darstellung von EB-Schweißnähten in technischen Zeichnungen erfolgt analog zu anderen Schweißprozessen und wird beispielhaft in Abbildung 20 dargestellt. Abbildung 20: Normgerechte Darstellung von EB-Schweißnähten.

10 II <51 / DIN EN ISO 13919 – D / PA



Erläuterung zur Zeichnungsangabe:

	Schweißverbindung als Stumpfnaht, umlaufend, Tiefe 10 mm, von der Pfeilseite
51 (511)	Kurzzeichen für Elektronenstrahl- schweißen nach DIN ISO 4063 (EB im Vakuum)
DIN EN ISO 13919 – D	Angabe zur Qualität der Schweißnaht (Bewertungsgruppe)
PA	Schweißposition

Da die Schweißposition bei allen Schweißverfahren einen entscheidenden Einfluss auf die Nahtausprägung und auf die spezifischen Eigenschaften der Naht hat, muss diese zwingend in einer normgerechten Schweißnahtbezeichnung angegeben werden.

Die möglichen Schweißpositionen werden dabei nach DIN EN ISO 6947 definiert und sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.



*begrenzte Tiefe für Durchschweißung auf Grund des Schmelzverhaltens

Abbildung 21: Allgemeine Darstellung der Schweißpositionen nach DIN EN ISO 6947. Die Bezeichnung erfolgt dabei in Form zweier Buchstaben, wobei der erste "P" für "Position" steht. Der zweite Buchstabe gibt indes die Position von oben beginnend bei A an. Die typische Wannenposition wird demnach mit "PA" bezeichnet, die Überkopfposition als "PE".



Abbildung 22: Darstellung der Zwangslagen PF und PG bei zylindrischen und ebenen Bauteilen.

Neben diesen Grundpositionen gibt es weiterhin noch die Ausführungen als steigende (PF) oder fallende Naht (PG).

Beim Elektronenstrahlschweißen wird überwiegend in Position PA geschweißt, was sich aus der festen Position des Strahlerzeugers zum Bauteil ergibt. Einige Anlagen bieten die Möglichkeit, auch in Position PC zu schweißen, was entweder durch den Einsatz eines zweiten, horizontalen Strahlerzeugers oder durch den Umbau des vertikalen Strahlerzeugers in die horizontale Position ermöglicht wird. In Verbindung mit einer Drehvorrichtung kann damit auch in den Positionen PF und PG geschweißt werden. Nur in Anlagen mit mobilem Strahlerzeuger können andere Schweißpositionen ausgeführt werden.

4.1.3 Konstruktive Voraussetzungen zum Elektronenstrahlhärten

Beim Härten mit dem Elektronenstrahl handelt es sich um eine Randschichtbehandlung. Dabei wird zwischen einer Mehrzahl von Varianten unterschieden, bei denen eine erste grobe Einteilung in die Verfahren mit einer Gefügeumwandlung in der festen Phase und denen in der flüssigen Phase vorgenommen wird. Das Elektronenstrahlhärten in der festen Phase bietet im Vergleich zu anderen Verfahren den Vorteil, dass die Bauteiloberflächen nahezu verzugsfrei, ohne Anlauffarben oder Verzunderung, lokal exakt definierbar und ohne Anschmelzung gehärtet werden können. Dadurch kann in der Regel auf eine Nacharbeit verzichtet und das Verfahren als letzter Bearbeitungsschritt vor Auslieferung verwendet werden. Den Einsatz von Kühlmedien schließt das verwendete Vakuum aus Stattdessen wird eine hinreichend schnelle Abkühlung der zu härtenden Bauteilbereiche durch die enorm gute Wärmeleitung der metallischen Bauteile genutzt, die zum so genannten Effekt der Selbstabschreckung führt.

Der Effekt der Selbstabschreckung – also die rasche Abkühlung der dünnen wärmebeaufschlagten Randschicht in das kalte Bauteil hinein – führt zu besonders guten Härtewerten.

Damit das Verfahren aber effektiv sein kann, sind verschiedene Konstruktionshinweise zu beachten. So sind z.B. ferritische Bauteile mit einer auten Zugänglichkeit der zu härtenden Oberfläche und einer ausreichenden Wanddicke gut zum Härten geeignet, vorausgesetzt, der Werkstoff ist martensitisch härtbar (C m% ≥ 0,18). Gerade bei geringen Wanddicken lässt sich iedoch nur eine begrenzte Selbstabschreckung durch das Bauteil erzielen, so dass die erzielbaren Härtewerte bzw. Einhärtetiefen geringer sind. Nicht geeignet sind Bauteile, die entweder keine Zugänglichkeit für den Elektronenstrahl haben oder eine zu geringe Wanddicke aufweisen, so dass entweder die geforderten Härtewerte oder die Einhärtetiefe nicht erreicht werden.

4.2 Eignung von Werkstoffen

4.2.1 Werkstoffe und Elektronenstrahlschweißen

Das Elektronenstrahlschweißen gehört als thermisches Materialbearbeitung zu den Schmelzschweißverfahren, d.h. der metallisch leitfähige Werkstoff wird bis zum Aufschmelzen erwärmt. Durch unterschiedliche Strahlfiguren, welche über Oszillation eingestellt und gesteuert werden können, ist der Leistungseintrag hochflexibel sowie auf das ieweilige System angepasst steuerbar. Dies erfordert einen genauen Blick auf die Metallurgie der verwendeten Werkstoffe, da verschiedene Werkstoffe und Werkstoffkombinationen als nicht oder nur bedingt schweißgeeignet gelten. Im Gegensatz zu den meisten anderen Verfahren deckt das Elektronenstrahlschweißen aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften einen großen Bereich verarbeitbarer Werkstoffe sowie Werkstoffkombinationen ab, darunter auch solche, die z.B. mit den Lichtbogenverfahren nicht oder nur unter größten Umständen zu verarbeiten sind. Dabei lassen sich zum Beispiel sehr große Einschweißtiefen bei gleichzeitig geringen Nahtbreiten und einer schmalen wärmebeeinflussten Zone erzeugen. Neben der Verzugsminimierung hat dies den Vorteil, dass sich heißrissgefährdete Werkstoffe, wie beispielsweise AlCu-Legierungen, überwiegend mit dem Elektronenstrahl schweißen lassen. Andererseits sind aufarund der schmalen Wärmeeinflusszone Härtespitzen insbesondere bei höher kohlenstofflegierten Stählen oftmals unvermeidbar, so dass hier teilweise eine gezielte Wärmebehandlung zur Reduzierung der Härtewerte in der Wärmeeinflusszone notwendig ist. Auch diese Wärmeführung kann in bestimmten Fällen mittels Elektronenstrahl-Mehrprozesstechnik erfolgen.

Wird ohne Zusatzwerkstoff gearbeitet, kann die Schmelzbadmetallurgie nicht weiter beeinflusst werden, so dass zum Beispiel das Verdampfen von Legierungselementen nicht ausgeglichen werden kann. Aufgrund des kleinen Schmelzbadvolumens ist dieser Einfluss aber oftmals zu vernachlässigen.

4.2.2 Aluminium und seine Legierungen

Gerade Aluminiumwerkstoffe finden aufgrund ihres geringen spezifischen Gewichts und ihrer guten Wärmeleitfähigkeit eine immer breitere Anwendung in allen Bereichen unseres täglichen Lebens, insbesondere unter Gesichtpunkten des Leichtbaus.

Für diesen Werkstoff ist das Elektronenstrahlschweißen ein sehr gut geeignetes Verfahren, da die bei anderen Schweißverfahren störende hochschmelzende Oxidhaut über den mechanischen Impuls der Elektronen problemlos zerstört wird Fin Beizen der Oberflächen im Stoßbereich vor dem Elektronenstrahlschweißen reduziert die Oxidschicht, verbessert die Fließeigenschaften und führt bei geminderter Porenzahl zu sehr guten Nahteigenschaften. Weiterhin gibt es beim Elektronenstrahlschweißen keinerlei Probleme hinsichtlich einer Reflexion des Strahls und somit einer geminderten Leistungseinkopplung, so dass Finschweißtiefen von 200 mm und mehr bei sehr guten Aspektverhältnissen realisiert werden können

Gerade die weit verbreiteten 5000er (AlMg) Legierungen zeigen mit dem Elektronenstrahlschweißen sehr gute Eigenschaften, bei den 2000er (AlCu), den 4000er (AlSi) und den 6000er (AlMgSi) Legierungen müssen zum Teil bestimmte Maßnahmen zur Heißrissvermeidung getroffen werden. Die Heißrissneigung ist dabei jeweils stark von den unterschiedlichen Legierungsgehalten, der Wärmeführung sowie den Spannungsverhältnissen beim Schweißen oder infolge des Schweißens abhängig; hier kann also keine allgemeine Aussage getroffen werden. Chemische Änderungen dieser Werkstoffe durch den Schweißprozess sind weitestgehend vernachlässigbar.

Im Gegensatz dazu kann bei den 7000er Legierungen die Verdampfung des Legierungsbestandteils Zink zu einer anderen Werkstoffzusammensetzung in der Schweißnaht führen, was einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat.

Neben dem Einfluss der Legierungsbestandteile gibt es insbesondere beim Aluminium auch einen Einfluss der Herstellungsart. Während sich zum Beispiel Knetlegierungen je nach Legierungszusammensetzung relativ problemlos schweißen lassen, besteht insbesondere bei Gusslegierungen die Gefahr einer verstärkten Porenbildung, die beispielsweise auf hohe Gehalte von Wasserstoff im Werkstück zurückzuführen ist. Durch mehrmaliges Schweißen oder dem Einsatz einer Mehrbadtechnik kann eine Ausgasung des Wasserstoffs unterstützt werden, so dass auch hier zufrieden stellende Ergebnisse erzielbar sind.

4.2.3 Kupfer- und Kupferlegierungen

Im Gegensatz zu den meisten anderen Schweißverfahren kann die Mehrheit der Kupferlegierungen mit Ausnahme von Messing und Neusilber relativ problemlos elektronenstrahlgeschweißt werden. Aufgrund der hohen Energiedichte des Elektronenstrahls ist ein Schweißen von Kupfer auch ohne Vorwärmung bis in eine Tiefe von mehr als 50 mm in einem Durchgang möglich. Auch so genanntes "reines" Kupfer kann Verunreinigungen oder Legierungselemente in ho-



Abbildung 23: oben: Wurzelspiking am Beispiel einer CuCrZr-Legierung. rechts: Spiking beim Schweißen von Kupfer.

Abbildung 24: Modellvorstellung: Zusammenhang Fokuslage und Nahtunregelmäßigkeiten hen Maßen wie Sauerstoff, Schwefel, Phosphor oder Kohlenstoff enthalten. Diese beeinflussen die Schweißeignung, so dass OFHC-Kupfer oder phosphor- und sauerstofffreie Kupferarten bevorzugt werden.

Insbesondere bei den gut wärmeleitfähigen Metallen wie Aluminium oder Kupfer tritt bei Einschweißungen ein so genanntes "Spiking" auf, das periodische Änderungen der Einschweißtiefe beschreibt. Dieser Effekt kann auf ungleichmäßige Verdampfungsvorgänge und Druckverteilungen in der Dampfkapillare zurückgeführt werden. Da das Spiking nur bei Einschweißungen auftritt, wird empfohlen, Kupferwerkstoffe entweder auf einen ausreichend tiefen Rezess zu schweißen, der die Spikes vollständig aufnehmen kann, oder durchzuschweißen. Gleiches gilt im Übrigen auch für Aluminium.



4.2.4 Hitzebeständige und reaktive Metalle

Durch die extrem hohe Leistungsdichte des Elektronenstrahls und die Regel, im Vakuum zu arbeiten, können Werkstoffe geschweißt werden, die nicht nur sehr hohe Schmelzpunkte haben, sondern auch solche, die auch mit geringen Mengen von Restgasen in der Umgebung extrem reagieren.
So können zum Beispiel Titan und viele seiner Legierungen problemlos elektronenstrahlgeschweißt werden, ohne Gefahr der Oxidation, Karbidbildung oder Wasserstoffversprödung und der daraus resultierenden schwer nachweisbaren Reduzierung der Zähigkeit des Werkstoffs. Aus diesem Grund werden sicherheitskritische Komponenten aus Titanlegierungen in der Triebwerksindustrie elektronenstrahlgeschweißt.

Weitere Anwendungen des Elektronenstrahlschweißens bei Titanwerkstoffen sind zum Beispiel Implantate (Gelenkschäfte) oder Operationswerkzeuge. Aufgrund der hohen Prozessstabilität und dem Fehlen äußerer Einflüsse können derartige Bauteile mit höchster Qualität geschweißt werden und sind danach teilweise Jahrzehnte im Einsatz.

Gleiches gilt für Zirkoniumlegierungen und Niobium, die ebenfalls auf Restgase sehr empfindlich reagieren. Derartige Werkstoffe finden überwiegend im Reaktorbau ihren Einsatz. Aufgrund der hohen Materialkosten muss die Qualität der Schweißnähte stets sichergestellt sein, so dass das Elektronenstrahlschweißen oftmals das einzige Verfahren ist, welches die hohen Anforderungen erfüllen kann.

Derartige Anforderungen gelten auch für Tantal, Iridium, Vanadium und ihre Legierungen, die erfolgreich elektronenstrahlgeschweißt werden. Auch hier ist es erforderlich, das Niveau von Verunreinigungen zu reduzieren, da die Schweißqualität und die erzielten Eigenschaften durch diese erheblich beeinflusst werden können.

Wolfram, Molybdän und ihre Legierungen können unter bestimmten konstruktiven Voraussetzungen, die die mangelnde Duktilität der Schweißnähte berücksichtigen, ebenfalls geschweißt werden. Gerade bei Wolfram ist der Elektronenstrahl das einzige thermische Schweißverfahren, welches in der Lage ist, Wolfram aufzuschmelzen. Die auf dem Markt erhältlichen Wolfram-Bauteile sind in der Regel mit Nickel-Anteilen flüssigphasengesintert. Aufgrund der hohen Temperaturen werden beim Schweißen jedoch erhebliche Anteile an Nickel verdampft, so dass die Duktilität stark abnimmt.

4.2.5 Stähle und andere Eisenlegierungen

Die meisten Stähle, die mit konventionellen Schmelzschweißverfahren schweißgeeignet sind, lassen sich auch mit dem Elektronenstrahl schweißen. Insbesondere wegen der besonders schmalen Wärmeeinflusszone und der Abwesenheit von Wasserstoff im Vakuum können viele Stähle, die beim Lichtbogenschweißen nur mit erheblichem Aufwand oder unter Inkaufnahme von Eigenschaftsverlusten (z.B. Festigkeitsverlust an Feinkornbaustählen) zu verarbeiten sind, ohne besondere Vorkehrungen mit dem Elektronenstrahl geschweißt werden.

Weicheisen und silikonhaltiges Eisen wie es im Transformatoren- und Elektromotorenbau verwendet wird, lässt sich mit dem Elektronenstrahl gut schweißen.

4.2.6 Austenitische Stähle, Duplexstähle und hochlegierte Stähle

Austenitische Stähle – insbesondere die hochlegierten Vollaustenite – finden aufgrund ihrer hervorragenden Korrosionsbeständigkeit in den unterschiedlichsten industriellen Bereichen Anwendung, wo es auf hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber korrosiven Medien ankommt, wie etwa in Meerwasserentsalzungsanlagen, in der chemischen Industrie oder in der Erdölraffination. Aufgrund der hochpreisigen Legierungsbestandteile, wie zum Beispiel Nickel, sind derartige Werkstoffe jedoch sehr teuer. Hier stellen die Duplex-Werkstoffe, die aus gleichen Anteilen an ferritischem und austenitischem Gefüge bestehen, eine interessante Alternative gegenüber den Vollausteniten dar: Duplex-Werkstoffe haben eine ähnlich hohe Korrosionsbeständigkeit, die aber zu einem deutlich günstigeren Preis im Vergleich zu Vollausteniten erzielt werden kann. Das Schweißen von Vollausteniten ist bei Beachtung bestimmter Randbedingungen einfach beherrschbar. So sind für die Schweißung mittels Lichtbogen besondere Vorkehrungen zur Sauerstoffabschirmung oder anschließende Nachbehandlung der Oberflächen erforderlich, um Verzunderungen zu vermeiden, die in korrosiven Medien nicht zulässig sind. Hier bietet das Elektronenstrahlschweißen durch seine sauerstofffreie Prozessumgebung entscheidende Vorteile. Duplexstähle und austenitische Werkstoffe sind häufig stickstofflegiert. Deshalb sind Schweißparameter zu entwickeln die das Risiko der Porenbildung durch Stickstoffausgasung minimieren und die insbesondere bei den Duplexstählen den nachteiligen Effekt des Stickstoffverlustes durch die Stabilität des Phasengleichgewichts kompensieren. Beim Schweißen der Duplexstähle verschiebt sich aufgrund der Stickstoffausgasung das Phasengleichgewicht zum Ferrit hin. so dass die Korrosionsbeständigkeit nicht mehr gewährleistet werden kann. Durch den Einsatz aeeigneter Prozesstechnik und Zusatzwerkstoffe können heutzutage auch Duplexstähle bei voller Gewährleistung der Korrosionsbeständigkeit mittels Elektronenstrahl geschweißt werden.

Die ausscheidungshärtbaren Arten zeigen beim Elektronenstrahlschweißen eine leichte Abnahme der Zugfestigkeit, die aber durch Alterungsprozesse wieder erreicht werden kann.

Hochlegierte Stähle werden in vielen Anwendungen wie geschweißt eingesetzt, auch bei Getriebeteilen für Flugturbinen oder Automobile. NiCrMo-Stähle, z.B. hochlegierte kriechfeste Stähle, können ohne Vorwärmung in beachtlichen Dicken geschweißt werden. Wiederum sind gute Reinheitswerte vorteilhaft, insbesondere wenn gute Zähigkeitseigenschaften gefordert werden.

4.2.7 Baustähle, korrosionsbeständige ferritische Stähle und Vergütungsstähle

Ferritische Stähle lassen sich in der Regel gut schweißen, die Schweißeignung hängt dabei aufgrund der Martensitbildung insbesondere vom Kohlenstoffgehalt ab. So gelten ferritische Stähle bis 0,2 % Kohlenstoffgehalt als schweißgeeignet, bei höheren Kohlenstoffgehalten muss dann in der Regel eine Vorwärmung erfolgen. Diese kann entweder über eine externe Vor-wärmung im Ofen oder über Mehrbadtechnik erfolgen. Dabei bewegt sich der Strahl sprung-artig zwischen Positionen, so dass an der ersten Position in Schweißrichtung eine Vorwärmung erfolgt und an der zweiten Position der eigent-liche Schweißprozess. Mit dieser Methode lässt sich zum Beispiel 42CrMo4 ohne Vorwärmung bis in 20 mm schweißen. Ein Wanddicken von weiteres Beispiel ist das Hartschweißen von Getrieberädern in der Automobilindustrie Darunter versteht man das Schweißen von einsatzhärtbaren Stählen, wie 17CrNiMo5 oder 20MnCr5, die nach dem Aufkohlen und Härten geschweißt werden. Aufgrund des hohen Kohlenstoffanteils in der Randschicht ist es erforderlich, die Rand-schicht in der Fügezone z B. durch Hartdrehen zu entfernen. Weiterhin können diese Werkstoffe vor dem Schweißen auf 150 bis max. 180 °C vorgewärmt werden, um die Aufhärtung im Schweißgut zu reduzieren und damit die Rissgefahr insbesondere bei Axialnähten zu senken.

4.2.8 Gusseisen

Gusseisen gilt im Allgemeinen aus metallurgischen Gründen als nicht schweißgeeignet. Außer zum Schweißen von duktilem globularem Gusseisen ist das Elektronenstrahlschweißen von Gusseisen nicht empfehlenswert.

Aufgrund seiner preiswerten Herstellung und seiner guten dämpfenden Eigenschaften ist Gusseisen in bestimmten Bereichen immer noch sehr stark am Markt vertreten. So besteht zum Beispiel seit langem verstärktes Interesse darin. Schneckenräder für Getriebe, insbesondere im Schwermaschinenbau, als geschweißte Mischverbindung Bronze-Guss auszuführen. Im Augenblick werden derartige Komponenten noch geschraubt oder verpresst, jedoch ergeben sich dadurch Nachteile hinsichtlich Bauteilgewicht und -belastbarkeit. In den letzten Jahren konnten jedoch sowohl in der Forschung als auch in der praxisnahen Anwendung deutliche Fortschritte im Elektronenstrahlschweißen derartiger Mischverbindungen erzielt werden, so dass heutzutage die Ausführung solcher Schneckenräder als Schweißkonstruktion sicher möglich ist. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es in der Schweißnaht verstärkt zur Ausbildung von Poren kommen kann. Prüfstandsversuche haben jedoch gezeigt, dass bei korrekter Auslegung die geforderten Festigkeiten erzielt werden können. Aufgrund des Einflusses des so genannten Thermocouple-Effektes wird jedoch empfohlen, eine Schweißtiefe bei Einschweißungen von 20 mm nicht zu überschreiten. Bei größeren Tiefen müsste von beiden Seiten geschweißt werden. Ein weiteres Beispiel für die Anwendung von

Gusseisen in der Praxis ist die Mischverbindung GJS440-15 an S235 (Abbildung 25). Hier hat sich gezeigt, dass sich zum einen durch geeignete Vorwärmung und zum anderen durch den EinAbbildung 25: Vergleich Schweißen der Mischverbindung GJS440-15 mit S235 ohne Zusatzwerkstoff (oben) und mit Zusatzwerkstoff (unten). satz geeigneter Zusatzwerkstoffe ein deutlicher Abbau der Härtespitzen im Schweißgut erzielen lässt. Damit ist die Gefahr von Aufhärtungsrissen deutlich reduziert.



Bei den Härteverläufen in Abbildung 26 wird der Einfluss der Vorwärmung und des Zusatzwerkstoffes auf die Ausbildung der Härtespitzen in der Schweißnaht verdeutlicht.



Ohne Zusatzwerkstoff und Vorwärmung liegen die Härtwerte infolge der zwangsgelösten hohen Kohlenstoffanteile im Bereich von 1000 HV1, wodurch eine extrem hohe Rissgefahr besteht. Erst wenn Härtewerte in der Fügezone von ca. 600 HV1 oder weniger eingestellt werden können, lässt sich eine derartige Verbindung unter Berücksichtigung gewisser Randbedingungen rissfrei schweißen. Hierfür können auch bei

Abbildung 26: Vergleich der Härteverläufe in der Fügezone beim Elektronenstrahlschweißen von GJS440-15 an S235. Elektronenstrahlprozessen Vorwärmung und Zusatzwerkstoff eingesetzt werden.

4.2.9 Nickel- und Nickellegierungen

Reines Nickel, Nickel-Kupferlegierungen und viele Nickel-Eisenlegierungen können ohne Schwierigkeiten geschweißt werden. Die komplexen Hochtemperaturlegierungen, die eine hohe Kriechfestigkeit und hohe Temperaturfestigkeiten aufweisen, wie z.B. Inconel 617. können im Gegensatz zum Lichtbogenschweißen durchaus rissfrei geschweißt werden. Die Gründe dafür sind die durch den Strahlprozess hervorgerufene, geringe metallurgische Beunruhigung sowie die niedrigen thermischen Spannungen. Bei den komplexeren Superlegierungen müssen allerdings Vorkehrungen getroffen werden. um Rissbildungen während der Wärmebehandlung nach dem Schweißen zu vermeiden. Mit der Mehrstrahltechnik können durch geeignete Nachwärmung Druckspannungen erzeugt werden, die solche Heißrisse unterdrücken.

4.2.10 Mischverbindungen

Es ist eines der herausragenden Vorteile des Elektronenstrahlprozesses, dass die Strahlintensität so hoch ist, dass auch unterschiedliche Werkstoffe mit weit auseinanderliegenden Schmelzpunkten und unterschiedlicher Wärmeleitung erfolgreich geschweißt werden können. Aufgrund metallurgischer Unverträglichkeit und der Bildung unerwünschter intermetallischer Phasen sind zwar nicht alle Mischverbindungen schweißgeeignet, es lassen sich jedoch viele ungleiche Werkstoffe kombinieren. Wegen des "Thermocouple-Effektes" werden beim Schweißen unterschiedlicher Werkstoffe hohe thermo-elektrische Ströme erzeugt, die starke magnetische Felder verursachen und den Elektronenstrahl entsprechend ablenken. Der Einfluss dieses Phänomens ist abhängig von der Werkstoffkombination sowie von den magnetischen und elektrischen Eigenschaften der Werkstoffe und der Bauteilgeometrie.

Wo die Kombination von unterschiedlichen Werkstoffen in der Schmelze Versprödungen verursacht, ist es oft möglich, durch Hinzufügen beidseitig verträglichen Übergangsmaterials trotzdem eine Schweißnaht zu erzeugen.

In Abbildung 27 ist die Schweißeignung von verschiedenen Mischverbindungen dargestellt.

Abbildung 27: Schweißeignung von verschieden Werkstoffen zueinander.



4.2.11 Elektronenstrahlhärten / Elektronenstrahlumschmelzen

Das Elektronenstrahlhärten geschieht durch Umwandlung eines ferritisch-perlitischen Grundgefüges in ein martensitisches Gefüge und kann nur bei entsprechend kohlenstoffhaltigen ferritischen Stählen oder Gusseisen erfolgen. Dabei sind zur Erzeugung eines ausreichenden Martensitanteils Kohlenstoffgehalte von mehr als 0,3 Prozent erforderlich. Da es sich beim Elektronenstrahlhärten um ein Randschichtverfahren handelt, dessen Abkühlung durch das Bauteilvolumen erfolgt, ist eine Durchhärtung des Bauteiles nicht möglich. Die erzielbare Einhärtetiefe richtet sich dabei stark nach dem Legierungsgehalt, da dieser Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Grundwerkstoffes hat. So ist zum Beispiel die Einhärtetiefe von hochlegierten Werkzeugstählen geringer als die von niedriglegierten Einsatzoder Warmarbeitsstählen und beträgt etwa 0,5 bis 1 mm. Maximal erzielbare Einhärtetiefen sind etwa 1,5 mm bei Härtewerten im Bereich von 650 HV10 bzw. 53 HRC.

Bei einer Härtung desselben Werkstoffes in der festen Phase gilt folgender qualitativer Zusammenhang: Mit steigender Einhärttiefe sinkt die maximal erreichbare Härte.

Einige Legierungen, beispielsweise auf EisenoderAluminiumbasis, zeigennachdemSchweißen eine Härtesteigerung im Schweißgut. Durch gezielte Prozessparameterführung kann dieser Effekt zum so genannten "Umschmelzhärten" genutzt werden, also einem Härten über die flüssige Phase.

Oftmals sind höhere Einhärtetiefen oder Härtewerte gefordert, die sich dann jedoch nur über Elektronenstrahlumschmelzen realisieren lassen. Dabei muss im Gegensatz zum Elektronenstrahlhärten in der Regel eine Nachbearbeitung des Bauteiles erfolgen, da die Maßhaltigkeit nach dem Umschmelzen oft nicht mehr gegeben ist. Ein Beispiel hierfür ist das Umschmelzen von Gusseisenwerkstoffen zur Herstellung verschleißbeständiger ledeburitischer Randschichten.

Ein weiterer Einsatzbereich des Elektronenstrahlumschmelzens ist die Anwendung bei Leichtmetallen, wo durch das Umschmelzen eine Kornfeinung und damit eine Erhöhung der Verschleißbeständigkeit erzielt werden kann.

Weiterführende Literatur: Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung, Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Zenker, Dr.-Ing. Anja Buchwalder, pro-beam (2010)

4.2.12 Elektronenstrahlbeschichten / Rekonstruktion / Prototypen

In den letzten Jahren ist ein verstärktes Bestreben der Industrie hin zum Einsatz von Beschichtungen und Schichtverbunden, insbesondere im Bereich des Verschleißschutzes zu erkennen. Dies resultiert vor allem aus den gestiegenen Rohstoffkosten, die die Herstellung verschleißbeständiger Bauteile "aus dem Vollen" unrentabel machen. In diesem Kontext gibt es verschiedenste technologische Prozesse zum Auftragschweißen mit einer breiten Palette an Werkstoffen. Hierbei wird ein verschleißbeständiger und oftmals teurer Werkstoff in Pulver-, Draht- oder Bandform auf einen weniger verschleißbeständigen, billigeren Grundwerkstoff aufgetragen. Dieser Verbundwerkstoff weist dann an den beschichteten Funktionsflächen die geforderten Eigenschaften hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit auf. Damit lässt sich eine erhebliche Kosteneinsparung ohne Funktionalitätsverlust erzielen.

Auch das Elektronenstrahlschweißen kann hier einen Beitrag zur Steigerung der Prozesseffizienz leisten. Die Vorteile liegen auf der Hand: Neben der Einsparung der bei den anderen Verfahren notwendigen Prozessgase kann beim Elektronenstrahlschweißen oftmals der Aufmischungsgrad ohne Einbuße der Haftfestigkeit reduziert werden. Dies bedeutet, dass die geforderten Schichteigenschaften mit weniger Zusatzwerkstoff realisiert werden können. Ein Beispiel mit besonderes hohem Anwendungspotential ist hierbei die Beschichtung preiswerter, verschleißanfälliger Grundkörper mit hochverschleißbeständigen, aber teueren Zusatzwerkstoffen (z.B. Stellite).



Abbildung 28: Zweilagiger Stellit 6 auf Qualifikationswerkstoff (oben), Längsschliff (unten).

Prozesstechnisch lassen sich Auftragschweißungen mittels Elektronenstrahl nur mit Zusatzwerkstoffen in Draht- oder Bandform realisieren. Dabei gibt es unterschiedliche Konzepte, bei denen die Drahtzufuhr entweder von außen über eine Druckstufe in die Kammer erfolgt, oder indem die Drahtzufuhr direkt in die Kammer integriert ist. Neben der bereits genannten Einsparung der Prozessgase bietet das Elektronenstrahl-Auftragschweißen den weiteren Vorteil, dass auch reaktive Werkstoffe als Beschichtungsmaterial verwendet werden können. Ein weiteres Beispiel ist das Auftragschweißen von Kupfer (Abbildung 29), da insbesondere in den Bereichen der Gleitlagergestaltung oder im maritimen Einsatzfeld häufig der Bedarf an Legierungen auf Cu-Basis besteht. Dieses ist entweder auf die Notlauf- und Gleiteigenschaften oder auf die Anti-Fouling-Charakteristik zurückzuführen. Durch das Auftragschweißen geeigneter Cu-Werkstoffe auf kostengünstige Grundwerkstoffe lassen sich die Bauteilkosten bei gleichzeitiger Steigerung der Bauteilfunktionalität und Verbesserung der Bauteileigenschaften deutlich reduzieren

Abbildung 29: Cu-Schicht auf CrNi-Stahl. Das Elektronenstrahlbeschichten ist dabei nicht nur auf die Verbesserung der Eigenschaften bestehender Bauteile beschränkt, sondern kann auch genutzt werden, um neue Bauteile im Sinne des Rapid-Prototypings herzustellen. Die Vorteile sind hierbei vielfältig. So kann zum Beispiel auf Gussformen oder aufwändige mechanische Bearbeitung "aus dem Vollen" verzichtet werden. Stattdessen wird eine bestimmte Struktur Lage für Lage aus dem gewünschten Drahtwerkstoff aufgebaut. Aufgrund der guten Maßtoleranz ist nur noch ein geringer Nachbearbeitungsaufwand notwendig. In Abbildung 30 ist der Herstellungsprozess beispielhaft dargestellt.



Abbildung 30: Schrittfolge zum Rapid-Prototyping dreidimensionaler Strukturen mittels Elektronenstrahlauftragschweißens (links: Auftragschweißen der Struktur; Mitte: erzeugte Struktur; rechts: Struktur nach der Drehbearbeitung).

4.3 Fertigung (Magnetismus, Reinigung, Spannvorrichtungen)

4.3.1 Magnetismus

Der Elektronenstrahl wird durch elektrische und magnetische Felder abgelenkt. Diese Eigenschaft wird bei der Strahlerzeugung bzw. Strahlformung genutzt. In der Nähe der Schweißstelle können unbeabsichtigte Ablenkungen jedoch zu Bindefehlern oder sogar Fehlpositionierungen führen. Vorrichtungen, Spannmittel und sonstige Einbauten in der Nähe des Strahls sollten deshalb entweder aus unmagnetischem Werkstoff hergestellt oder müssen auf einen Wert von weniger als 1 Gauß (0,1 mT) entmagnetisiert werden. Bei ferritischen Stählen kann Magnetismus durch mechanische Bearbeitung der Bauteile insbesondere beim Schleifen (z.B. von Zahnflanken) oder sonstigen Feinbearbeitungen sowie durch magnetische Spannmittel oder magnetische Hebezeuge entstehen. In diesen Fällen muss entweder das gesamte Bauteil oder der Schweißbereich partiell entmagnetisiert werden.

4.3.2 Reinigung

Wie bei anderen Schmelzschweißverfahren auch, ist die Reinigung des Schweißnahtbereichs ein wichtiger qualitätsrelevanter Fertigungsschritt. Die Nahtfugen müssen frei von Oxidschichten sowie von Fett-, Öl-, Schmierstoffen und Farbresten sein. Im Vakuum verdampfen diese Verunreinigungen größtenteils explosionsartig und führen zu erheblichen Schweißnahtfehlern. Der gereinigte Bereich an der Oberseite des Bauteiles sollte dabei jeweils mindestens das Dreifache der



der Bauteile beim Elek-3 x t tronenstrahlschweißen.

Abbildung 31: Empfoh-

lener Reinigungsbereich

geforderten Schweißtiefe betragen.

Der gereinigte Bereich sollte nach dem Reinigen zum einen fettfrei und metallisch blank und zum anderen auch frei von Werkstoffschichten sein, die zum Beispiel durch Aufkohlen, Nitrieren, Eloxieren, Phosphatieren usw. entstanden sind. Darüber hinaus bestehen auch gewisse Grundanforderungen an die Geometrie der Fügezone. So darf der Höhenversatz der Bauteile in der Fügezone je nach Schweißtiefe und Anforderungen an das Bauteil nur wenige Millimeter betragen, bei geringen Einschweißtiefen kann sich bereits ein Versatz von unter einem Millimeter negativ



- 1 Metall
- 2 Verformungszone im Metall
- 3 Oxidschicht
- 4 Schicht adsorbierter Gase
- 5 adsorbiertes Wasser
- 6 Schicht polarisierter Moleküle (Öle und Fette)

Abbildung 32: Schichtaufbau an der Oberfläche eines metallischen Werkstoffs. auf das Schweißergebnis auswirken.

Alle diese Hinweise machen deutlich, wie wichtig eine sorgfältige und gründliche Bauteilvorbereitung für das Schweißergebnis ist. Daher soll auf die Reinigung der Bauteiloberflächen im weiteren Verlauf noch näher eingegangen werden. So wird beispielhaft der Schichtaufbau an der Oberfläche eines metallischen Werkstoffs in Abbildung 32 dargestellt.

Grundsätzlich kann zwischen chemischen und mechanischen Reinigungsverfahren unterscheiden werden. Zu den gebräuchlichen chemischen Verfahren zählen:

- Entfetten mit Alkohol
- Dampfentfetten
- alkalisches Reinigen mit wässriger Lösung

Diese Verfahren sind zur Beseitigung der Schichten 4, 5 und 6 geeignet und in den meisten Fällen ausreichend, da häufig mechanisch bearbeitete Werkstücke ohne Oxidschichten zur Anwendung kommen. Bei bestimmten Werkstoffen, die zur raschen Bildung einer Oxidschicht neigen, wie z.B. Aluminium und Aluminiumlegierungen, kann es notwendig sein, möglichst unmittelbar vor dem Schweißen eine Beizbehandlung mit Säuren, Laugen oder gemischte Badreihen vorzunehmen.

Bei mechanischen Reinigungsverfahren werden Verunreinigungen bis zum Grundwerkstoff hin erreicht, also die Schichten 1 bis 6 entfernt. Hierzu zählen:

- Strahlen mit abrasivem Strahlgut
- Schleifen mit Schleifmitteln
- Bürsten mit Metallbürsten (möglichst artgleich)

Mechanische Reinigungsverfahren sind zwar sehr wirkungsvoll, hinterlassen jedoch eine für erneute Oxidation äußerst empfindliche Oberfläche, so dass sie unmittelbar vor dem Schweißen eingesetzt werden müssen.

In der Praxis hat es sich als günstig erwiesen, Bauteile einer Grundreinigung mit alkalischen Reinigungsverfahren zu unterziehen und dann unmittelbar vor dem Fügen lediglich die Schweißflächen noch einmal mit Alkohol (z. B. Isopropanol) oder Aceton zu säubern.

Im praktischen Einsatz werden in der Regel mechanische und chemische Reinigungsverfahren kombiniert.

Eine Vielzahl von Tipps und geeigneten "Kochrezepten" zur chemischen Reinigung unterschiedlicher Metalle findet man im "DVS-Merkblatt 3213" mit dem Titel "Empfehlungen für das Reinigen von Nahtfugen für das Elektronenstrahlschweißen".

4.3.3 Vorrichtungen zum Spannen

Nach dem Entmagnetisieren und Reinigen der Einzelteile müssen die zu schweißenden Flächen für den Elektronenstrahl in Position gebracht werden. Wie beim konventionellen Schweißen gibt es auch hierzu drei Möglichkeiten:

- 1. Heftschweißung in einer Heftvorrichtung (z.B. WIG, möglichst ohne Schweißzusatz o.ä.)
- 2. Montage der Einzelteile in einer Spannund Schweißvorrichtung
- Verpressen oder Warmfügen der Einzelteile, anschließend Formschluss über Passung

Möglichkeit 3 ist insbesondere für rotationssymmetrische Teile geeignet. Abzuraten ist bei der Montage, von der Unterkühlung eines Fügepartners mit flüssigem Stickstoff, da hierbei Luftfeuchtigkeit auf der Schweißfläche ausfriert, was beim Schweißen zwangsläufig zu erheblichen Problemen durch Poren- und Lunkerbildung führen wird.



Abbildung 33: Beispiele für Spannvorrichtungen mit auswechselbaren Komponenten als Anschmelz- und Spritzerschutz.

Bei der Gestaltung von Schweißvorrichtungen ist zu beachten, dass beim Elektronenstrahlschweissen zur Ausformung einer einwandfreien Unterraupe 20 bis 30 Prozent Leistungsüberschuss benötigt werden. Auf der Nahtwurzelseite des Werkstücks tritt also ein immer noch sehr energiereicher Elektronenstrahl wieder aus. Dieser sollte durch geeignete Hilfswerkstücke oder auswechselbare Komponenten in den Vorrichtungen abgebremst werden, damit das Bauteil und/ oder die teure Vorrichtung nicht beschädigt werden. Auf diese Weise wird auch verhindert, dass Bauteil bzw. Vorrichtung unnötig erwärmt werden. In Abbildung 33 werden einige Lösungsmöglichkeiten zu dieser Problematik dargestellt.

Da in der Regel ohne Zusatzwerkstoffe geschweißt wird, ist beim Spannen bzw. Vormontieren der Einzelteile darauf zu achten, dass möglichst Spaltfreiheit erreicht wird. Als Anhaltswerte für eine zulässige Spaltweite können 1 bis 2 Prozent der Schweißtiefe, jedoch maximal 0,2 mm genannt werden. Abweichungen von diesen Werten aus der Praxis sind möglich, müssen aber gegebenenfalls am konkreten Anwendungsfall überprüft werden.

Da beim Elektronenstrahlschweißen keine Bearbeitungskräfte und verfahrensspezifisch nur sehr geringe Schweißverzüge auftreten, sind die Anforderungen an die Stabilität der Vorrichtung im Vergleich zu Spanneinheiten für konventionelle Schweißverfahren eher klein. Es kommt vielmehr auf hohe Genauigkeit für gute Reproduzierbarkeit an, um den Ansprüchen an die Präzision gerecht zu werden, die mit dem Elektronenstrahlschweißen möglich ist.

4.3.4 Anfang und Ende einer Schweißnaht

Prozessbedingt ist beim Elektronenstrahlschweissen ein so genannter Einslope und ein Ausslope erforderlich. Dabei wird der Strahl über eine Rampe auf volle Leistung gebracht bzw. wieder zurückgefahren. In diesen Bereichen wird bei Linearnähten die vollständige Anbindungstiefe nicht erreicht und es kann darüber hinaus zu Bindefehlern kommen. Aus diesem Grund müssen diese Bereiche im Nachhinein abgearbeitet werden. Ist dies nicht bzw. nur unter erhöhtem Aufwand möglich, können Ansatzbleche verwendet werden, die am Nahtanfang bzw. -ende angebracht werden.



Abbildung 34: Einsatz von Ansatzstücken beim Schweißen von Linearnähten

5. Der Elektronenstrahl als Multifunktionstalent

5.1 Werkzeug für die Qualitätssicherung und die Diagnostik

5.1.1 Automatische Strahljustierung

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für beste Schweißergebnisse ist ein gut justierter Elektronenstrahl. Mit steigenden Ansprüchen an die Schweißnahtgualität steigt auch der nötige Aufwand an Strahljustierung. Der wichtigste und elementarste Schritt bei der Strahljustierung ist das Fokussieren des Elektronenstrahls auf die Werkstückoberfläche. Hierdurch wird ein möglichst kleiner Strahldurchmesser und somit eine möglichst hohe Leistungsdichte erzielt. Um das Strahlwandern bei Veränderung des Fokus zu minimieren und eine optimale Leistungsdichteverteilung zu erreichen, muss der Elektronenstrahl auf die optische Achse der Linse zentriert werden Strahlsäulen für besonders hohe Leistungsdichten sind zusätzlich mit Stigmatoren ausgestattet, um einen eventuellen Astigmatismus des Strahls zu kompensieren, so dass das resultierende Strahlprofil rotationssymmetrisch ist. Wurden all diese Schritte durchgeführt, so entspricht das Strahlprofil annähernd einer Gauss-Verteilung, die für gute Schweißergebnisse immer anzustreben ist.

Ein gut justierter Strahl ist gerade für industrielle Anwendungen von besonderer Bedeutung, um eine konstante Produktqualität gewährleisten zu können. Da das Elektronenstrahlschweißen häufig nur einen Schritt innerhalb der kompletten Produktionskette darstellt, mangelt es meist an Personal mit Spezialwissen zur Elektronenstrahltechnik, das den Elektronenstrahl verlässlich und vor allem reproduzierbar justieren könnte. Des Weiteren zeigen sogar die Justier-Ergebnisse erfahrener Operateure einen spezifischen Offset zueinander. Dagegen gewährleistet eine automatische Strahljustierung eine unabhängig vom Bediener gleich bleibend gute Strahlqualität und hat dabei die geringste Streuung der Justier-Ergebnisse vom tatsächlichen Optimalwert. Abbildung 35 stellt diesen Sachverhalt schematisch dar.



+ Optimalwert Strahljustierung

Abbildung 35: Zentrierung und Stigmatisierung besitzen je zwei Stellgrößen, die Justierachsen X und Y. Die möglichen Fehler auf beiden Achsen addieren sich zu einem Fehlerblättchen. Während ein durchschnittlicher Anlagenbediener ein relativ großes Fehlerblättchen erzeugt, können erfahrene Anlagenbediener ihre Justierergebnisse wesentlich besser reproduzieren. Allerdings besitzen die Mittelwerte ihrer Ergebnisse häufig einen spezifischen Offset zueinander. Eine automatische Strahljustierung minimiert das Fehlerblättchen deutlich und liegt immer sehr nahe bei den optimalen Justierwerten.

Zur automatischen Strahljustierung setzt pro-beam einen passiven Sensor ohne elektrischen Anschluss ein, der eine dreidimensionale Strahlvermessung – Leistungsdichteverteilung in verschiedenen Ebenen der Strahlachse – ermöglicht. Der Sensor ist klein und robust, schränkt den Platz in der Vakuumkammer nicht ein und kann beispielsweise direkt neben das Werkstück gelegt werden. Nach dem Start der Strahljustierung läuft diese vollkommen automatisch innerhalb von ca. 45 Sekunden ab.

Im Anschluss an die automatische Strahliustierung werden die Ergebnisse (Abbildung 36) auf dem Computerbildschirm dargestellt. Auf der linken Seite ist das erzielte Strahlprofil in Falschfarben zu sehen. Die rechte Seite enthält einen Überblick über die für die Zentrierung und die Stigmatisierung gefundenen Werte. Zudem werden diese Werte den Maschinenkonstanten aeaenüberaestellt. Des Weiteren wird ein so genannter Formfaktor angegeben. Dieser Wert wird aus einem Vergleich zwischen dem erhaltenen Strahlprofil und einer entsprechenden Gauss-Verteilung bestimmt und dient als Bewertung für die erzielte Leistungsdichteverteilung. Alle bei der automatischen Strahljustierung ermittelten Größen werden automatisch dokumentiert



Abbildung 36: Auf dem Ergebnisbildschirm der automatischen Strahljustierung ist auf der linken Seite das erhaltene Strahlprofil in Falschfarben dargestellt. Die rechte Seite zeigt die für die Zentrierung und die Stigmatisierung bestimmten Werte im Vergleich zu den Maschinenkonstanten.

5.1.2 Werkstückbeobachtung



Abbildung 37: Vergleich eines CCD-Kamera-Bildes (links) mit einem elektronenoptischen Bild (rechts) desselben Werkstücks.

Zur Darstellung eines Werkstücks in der Vakuumkammer stehen zwei grundsätzlich verschiedene Techniken zur Verfügung. Eine ist die lichtoptische Beobachtung mit einer CCD-Kamera oder Fernrohr, die andere das Abtasten der Werkstückoberfläche mit dem Elektronenstrahl wie beim Rasterelektronenmikroskop. Hierbei wird das Werkstück zeilenweise mit Hilfe der Ablenkung abgetastet und für jeden Punkt werden die beim Auftreffen auf die metallische Werkstücksoberfläche rückgestreuten Elektronen gemessen. Die aus diesen Elektronen unter Verwendung einer speziellen Sensorik resultierenden Bilder bestechen vor allem durch ihren hohen Kontrast von 1.15000 Da selbst 75-kW-Strahlerzeuger bei kleinem Strahlstrom eine Auflösung von bis zu 80 µm erreichen, können auch feinste Details üblicher Werkstückoberflächen dargestellt werden.

Abbildung 37 zeigt den Vergleich eines CCD-Kamera-Bildes mit einem elektronenoptischen Bild desselben Werkstücks. Beide Bilder haben eine vergleichbar hohe Auflösung. Als Nachteil bei der CCD-Beobachtung erweisen sich aber häufig die metallisch glänzenden Werkstückoberflächen, wodurch die Beobachtung vor allem bei zylindrischen Bauteilen durch Lichtreflexionen gestört wird. Die elektronenoptische Bilderzeugung bietet dagegen eine größtenteils



Abbildung 38: Das elektronenoptische Bild dieses Bauteils besticht durch den enorm hohen Kontrast aller Bauteilkonturen.

ungestörte Beobachtung von nahezu jedem Bereich des Werkstücks, der auch für den Schweißstrahl zugänglich ist.

Abbildung 38 stellt ein Beispiel für den sehr hohen Kontrast der elektronenoptischen Beobachtung dar. Auf dem Bild sieht man ein Bauteil mit einer großen Aussparung von ca. 15 mm Durchmesser in der Mitte, fünf Bohrungen mit einem Durchmesser von 4 mm in einer Vertiefung und einem axialen Fügespalt nahe einer ca. 10 mm hohen Kante. Trotz der Kante ist der Fügespalt deutlich zu erkennen. Die Bohrungen bestechen durch ihren hohen Kontrast zur Bauteiloberfläche. Alle Kanten sind über ihren gesamten Verlauf hinweg deutlich sichtbar.

Eine weitere nützliche Eigenschaft pro-beams elektronenoptischer Beobachtung ist die Unterscheidungsmöglichkeit verschiedener Metalle. Somit können auch Fügestellen verlässlich detektiert werden, die mit Hilfe lichtoptischer Beobachtung kaum sichtbar sind (vgl. Abbildung 39).



Abbildung 39: Ein Bauteil, bei dem aufgrund der Bearbeitungsspuren auf der Oberfläche die Fügestelle kaum auszumachen ist. Im elektronenoptischen Bild rechts ist der Fügespalt auch aufgrund der verschiedenen Metalle gut auszumachen.

5.1.3 Automatische Fugensuche

Industrielle Anwendungen – vor allem für die Massenproduktion – verlangen in der Regel einen hohen Grad an Automatisierung und Reproduzierbarkeit. Diese Anforderungen können im Fall des Elektronenstrahlschweißens durch die vielseitigen Möglichkeiten der Elektronenoptik erfüllt werden. Mit ihr können auch komplexe Aufgabenstellungen und Anordnungen abgebildet und anschließend analysiert werden.

Häufig anzutreffende Aufgabenstellungen beim Elektronenstrahlschweißen sind Radial- und Axialnähte. Zur automatischen Fugensuche eignet sich hier besonders die Aufnahme der Abwicklung des Fügespalts mit einem Linienscan. Der entscheidende Vorteil dieser Art der Analyse ist, dass nicht nur die Position der Fuge bestimmt werden kann. Vielmehr sind alle Fehler, die bei der Bearbeitung auftreten können, auch bereits in der Diagnostik sichtbar. Somit wird das Werkzeug – Strahl und Maschine – bei der Fugensuche automatisch überprüft.





Im elektronenoptischen Bild (Abbildung 40) ist die Position der radialen Fuge mit einem Pfeil markiert. Der Fügespalt liegt in einer sehr schmalen Vertiefung, ist aber im Gegensatz zur Lichtoptik elektronenoptisch gut zu sehen. Die Abwicklung der Fuge und der sie umgebenden Kanten mit Hilfe eines Linienscans ist in Abbildung 40 rechterhand zu sehen. Durch das hohe Kontrastverhältnis der Sensorik ist die Fuge trotz ihrer für Abbildungen jeglicher Art ungünstigen Lage sehr gut sichtbar und somit auch automatisch detektierbar. Abbildung 40: Elektronenoptisches Bild eines Drucksensors für Einspritzsysteme (links) und die Abwicklung seines Fügespalts (rechts). Die dort gezeigten grünen und roten Kreuze stellen Stützpunkte für die automatische Fugensuche dar. Die Elektronenoptik eröffnet verschiedenste Möglichkeiten zur Ermittlung der Lage einer Schweißfuge. Abbildung 41 zeigt auf der linken Seite einen Flansch, in den zwei Rohre eingeschweißt werden sollen. Zur automatischen Fugensuche wird ein elektronenoptisches Bild des gesamten Verteilerstücks erzeugt, das auf der rechten Seite von Abbildung 41 dargestellt ist. Bei der Auswertung werden die beiden Öffnungen detektiert und die Koordinaten ihrer Mittelpunkte bestimmt, wodurch die Messrohre zusammen mit dem bekannten Durchmesser der Fuge automatisch geschweißt werden können.



Abbildung 41: Foto eines Bauteiles (links) und das zugehörige elektronenoptische Bild (rechts). Die berechneten Mittelpunkte der Rohre sind mit kleinen Kreuzen markiert.

Auch in Bereichen, in denen man bislang aufgrund der Komplexität des Bauteils noch vollkommen manuell gearbeitet hat, können Schweißprozesse durch Einsatz der kontrastreichen Elektronenoptik automatisiert werden. Ein Beispiel hierfür ist die vollautomatische Bearbeitung eines so genannten Ring-of-Vanes für Flugzeugturbinen (siehe Abbildung 42). Ein Ring-of-Vanes besteht aus vielen einzelnen Segmenten, die in getrennten Arbeitsschritten geheftet, geschweißt und geglättet werden.

Aufgrund eines möglichen Verzugs während der Bearbeitung muss vor jedem Arbeitsschritt neu positioniert werden. Die glatte metallische Oberfläche, der ungünstige Blickwinkel und auch die schlechte Zugänglichkeit der Fügestelle erschweren eine lichtoptische Positionierung enorm. Die elektronenoptische Beobachtung dagegen kann ohne Weiteres derart parametriert werden, dass der übliche hohe Kontrast über den gesamten Fugenverlauf hinweg erhalten bleibt.



Die Elektronenoptik ermöglicht es auch, lange Strukturen und Fugenverläufe von mehreren Metern in einem Zug mit einer Auflösung im 1/10-mm-Bereich abzubilden und zu vermessen. Somit wird wiederum das gesamte Werkzeug – Strahl und Maschine – vor Prozessbeginn genauestens kontrolliert. Prozessrelevante Abweichungen können zuverlässig erkannt und vor bzw. während der Schweißung korrigiert werden. Ein Beispiel hierfür ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 43: Kühlplatte mit EB zu schweißender, mäanderförmiger Abdeckung des Kühlkanals (rechts); elektronenoptisches Bild des Fügespalts welches durch Abfahren der Fügestelle und gleichzeitiger Bildaufnahme generiert wurde (oben). Trotz komplexer Struktur kann die Schweißbahn in Bezug zum Werkstück auch bei langen Fügespalten präzise vermessen werden.



Abbildung 42: Links ist ein Ring-of-Vanes für Flugzeugturbinen (Durchmesser 1600 mm, Trent 900) zu sehen, rechts das elektronenoptisches Bild eines Fügespalts zwischen zwei Leitschaufeln mit Auswertung.

5.1.4 Prozesskontrolle

Wie bei der Werkstückbeobachtung und -positionierung, so konkurrieren auch bei der Prozessbeobachtung die beiden verschiedenen Einblicksysteme miteinander. Die klassische und bisher übliche Prozesskontrolle stellt dabei der lichtoptische Einblick dar. Durch die Beobachtung des Schweißprozesses mit einer CCD-Kamera ist es beispielsweise möglich, zu sehen, wie die Schmelze fließt, ob die Dampfkapillare gleichmäßig geöffnet bleibt oder ob eine starke Spritzerbildung auftritt. Zur Positionskontrolle und Nachführung eignet sich wiederum besonders die elektronenoptische Beobachtung mit ihrem hohen Kontrast und ohne das bei manchen Aufgaben störende Prozessleuchten. Zur Aufnahme der Bilder verlässt der Strahl in regelmäßigen Abständen für sehr kurze Zeit den Schweißprozess. Dabei wird ein Scan um die aktuelle Schweißposition herum durchgeführt. Das resultierende elektronenoptische Bild zeigt neben der Fuge und dem Keyhole auch teilweise das Fließen der Schmelze und deren Erstarrung. Diese – bei probeam ELO-Online genannte – Diagnostik ermöglicht z.B. erst das Schweißen der in Abbildung 44 aezeiaten, oktogonalen und bis zu 15 m langen Strukturen, die sich während der Bearbeitung durch die Wärmeeinbringung verformen. Die nötige Strahlnachführung wäre aufgrund des 45°-Stoßes und den damit verbundenen Reflexionen mit der Lichtoptik nicht möglich.

Das kurzzeitige Verlassen des Schweißbades und die Aufnahme eines elektronenoptischen Scans während eines Schweißprozesses kann auch für eine automatisierte Strahlnachführung genutzt werden. Dabei wird das erfasste Rückstreusignal wie auch bei der automatischen Fugensuche ausgewertet und die Strahlposition entsprechend korrigiert.



Abbildung 44: Links ist das elektronenoptische Bild eines Schweißprozesses dargestellt, das deutlich Fuge und Keyhole, teilweise aber auch das Fließen der Schmelze und deren Erstarrung zeigt. Rechts ist ein ausschließlich mit ELO-Online schweißbares Bauteil gezeigt.

5.1.5 Qualitätskontrolle

Beim Elektronenstrahlschweißen gibt es mehrere Möglichkeiten zur Überwachung und Kontrolle der Nahtqualität.

Da es sich bei allen für den Schweißprozess relevanten Strahlparametern um elektrische Stellgrößen handelt, ist eine einfache Überwachung und Aufzeichnung dieser Parameter möglich.

Des Weiteren kann der enorm hohe Kontrast des elektronenoptischen Einblicks benutzt werden, um in einer dem Schweißprozess nachgelagerten Aufnahme die Qualität der Nahtoberraupe zu kontrollieren. Mit Hilfe des elektronenoptischen Bildes können Auswürfe, unverschweißte Bereiche, ausgeprägte Nahtüberhöhungen bzw. –unterwölbungen, sowie Schweißspritzer auf der Nahtoberraupe leicht erkannt werden.

Zusätzlich zur Auswertung der rückgestreuten Elektronen von der Bauteiloberfläche sind auch die Erfassung und Analyse der erzeugten und das Bauteil durchdringenden Röntgenstrahlung möglich. Die daraus resultierenden Bilder gestatten einen Blick in das Bauteilinnere und können Poren und Anbindungsfehler der Nahtwurzel sichtbar machen. In besonderen Fällen kann die Röntgendiagnostik auch zur Positionierung des Bauteils dienen. Durch den hohen Kontrast der Elektronenoptik und der Vermeidung der störenden Lichtreflexionen ist die offene Pore im elektronenoptischen Bild leicht erkennbar.



Abbildung 45: Foto einer Axialschweißung mit einer offenen Pore.

Abbildung 46: Elektronenoptisches Bild

5.2 Schnelle Ablenktechnik, Mehrstrahltechnik

Durch die verwendete Magnetoptik in der Elektronenstrahltechnik ist es möglich, den Strahl nahezu trägheitslos in seiner Richtung zu verändern. Dies kann zum einen genutzt werden, um mit Hilfe der Ablenkung die Schweißkontur abzufahren. Zum andern werden mit diesem Ablenksystem kleine Pendelbewegungen innerhalb des Schweißbades ausgeführt, welche zur Verbreiterung oder, insbesondere beim Tiefschweißen, zur Stabilisierung der Dampfkapillare verwendet wird. Damit können z.B. Bindefehler oder Porenbildung in der Schweißnaht verhindert werden. Führt man die Strahlablenkung so schnell aus, dass die thermische Trägheit des Strahles überwunden wird und er an mehreren Orten nahezu gleichzeitig wirkt, spricht man von Mehrstahltechnik. Dabei kann der Strahl frei programmiert werden und an verschiedenen Orten des Werkstückes gleich oder unterschiedlich wirken. Um die hohe Flexibilität und Dvnamik des Ablenksystems zu demonstrieren, wurde in Abbildung 47 ein Bild auf den Arbeitstisch einer Elektronenstrahl-Anlage geschrieben. Dabei sind das Prinzip sowie die Bildfrequenz mit denen eines Fernsehers vergleichbar.



Hauptanwendungsgebiet der Mehrstrahltechnik ist jedoch das Schweißen: Reduzierung der Schweißzeit, Einsparung von Arbeitsschritten und Verringerung von Verzug sind dabei die primären Vorteile dieser Technologie.

5.2.1 Mehrbadschweißen

Beim Mehrbadschweißen können mehrere, im einfachsten Fall parallel verlaufende Nähte gleichzeitig gefügt werden. Der Strahl springt zwischen den Schweißbädern mit einer festgelegten Frequenz und einer daraus resultierenden Verweilzeit zwischen den Schweißpunkten hin und her so dass gleichzeitig mehrere Schmelzbäder entstehen.



Dieser Vorgang erfolgt so schnell, dass die thermische Trägheit des Schweißprozesses überwunden wird. Der Strahl kehrt so schnell in die für das Tiefschweißen typische Dampfkapillare zurück, dass diese offen bleibt. Diese für den Prozess notwendige minimale Sprungfrequenz zwischen den Bädern ergibt sich aus den Materialeigenschaften des Werkstückes, der Anzahl



Abbildung 48: Mehrstrahlprozess von drei Schweißnähten (links) Schematische Darstellung eines 3-Strahl-Prozesses (oben).

Abbildung 47: Ein Bild (hier ein ICE) wird auf den Arbeitstisch einer Elektronenstrahl-Anlage geschrieben. der Schweißbäder und der Schweißgeschwindigkeit. Die Dynamik des Ablenksystems begrenzt die maximalen Sprunggeschwindigkeiten nach oben hin. Dabei sind Geschwindigkeiten bis zu 2,2 x 10⁶ % bzw. in der Einheit einer Frequenz ausgedrückt 2,2 MHz bei einer Auslenkung von 1 Grad möglich.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel des Mehrbadschweißens sind Axialnähte. Hier generieren mehrere, symmetrisch angeordnete Schweißbäder eine kreisförmige Schweißnaht, indem das Werkstück, wie im Modell dargestellt, gedreht wird oder der Strahl (Abbildung 49) die Naht abfährt. Das "gleichzeitige" Schweißen an mehreren Punkten führt zu minimalen Verzügen und gleichmäßig verteilten Spannungen im Bauteil. Reduzierte Prozesszeiten aufgrund geringerer Schweißlängen und der mögliche Wegfall von Heftungen führen ebenfalls zu erhöhter Produktivität.



Abbildung 49: Schweißung einer Axialnaht mit drei Bädern und bewegtem Strahl (links). Modell einer Axialnahtschweißung mit drei Bädern und bewegtem Werkstück (rechts).

Bei dem dargestellten Rußpartikelfilter (Abbildung 50) muss die Fitertasche über zwei Axial- und 60 Linearnähte mittels Wärmeleitungsschweißen auf die Lamellen gefügt werden. Da dieses Sintermaterial langsame Schweißgeschwindigkeiten voraussetzt, ist es möglich, mit 60 Schweißbädern erst durch Drehung der Strahlfigur die innere Axialnaht zu schweißen, dann durch Vergrößerung der Amplitude die 60 Stege (Abbildung 50 rechts) und anschließend die äußere Axialnaht. Dabei ist darauf zu achten, dass entsprechend viel Leistung zur Verfügung steht, da diese sich auf 60 Bäder aufteilt.



Abbildung 50: 60-Bad-Schweißung bei einem Rußpartikelfilter (links). Schweißfolge mit 60 Strahlen, beispielhaft für einen Strahl dargestellt (rechts).

Um einen weiteren Freiheitsgrad in der Mehrstrahltechnik zu haben, kann die Fokuslinse mit einer zusätzlichen, schnellen Linse erweitert werden, welche Fokusänderungen mit vergleichbarer Dynamik wie der schnelle Ablenker ermöglicht. Diese Fokusänderungen sind mit der Strahlablenkung synchronisierbar, d.h. bei einer Mehrstrahlfigur können einzelnen Bädern unterschiedliche Fokuswerte zugeordnet werden.

Somit ist es möglich, die Mehrstrahltechnik an Bauteilen anzuwenden, bei denen mehrere Schweißungen auf unterschiedlichen Arbeitshöhen durchzuführen sind. Mit herkömmlicher Anlagentechnik müssen diese Nähte einzeln geschweißt werden. Über die schnelle Ablenkung können, wie z.B. im Abbildung 51 links dargestellt, die beiden Schweißnähte gleichzeitig, jedoch eine im Über-, die andere im Unterfokus geschweißt werden. Die schweißtechnischen Ergebnisse der beiden Nähte unterscheiden sich jedoch aufgrund der Fokuslagen. Durch Synchronisation von Ablenker und Linse können in diesem Anwendungsfall zwei identische Schweißnähte erzeugt werden, beide Nähte können mit der optimalen Fokuslage geschweißt werden.



Abbildung 51: Radialschweißungen mit 2-Strahl-Technik, links ohne dynamische, rechts mit dynamischer Linse.

5.2.2 Mehrprozesstechnik

Das gleiche Prinzip kommt auch bei der Kombination aus Schweiß- und Kosmetiknaht zum Einsatz. In diesem Fall verlaufen die Schweißprozesse allerdings auf einer Arbeitshöhe und nicht neben-, sondern hintereinander. Der nacheilende Strahl ist defokussiert und somit weicher als der vorauseilende Schweißstrahl und glättet die Oberraupe der Naht.

Beim Schweißen von Aluminiumdruckguss hat der Einsatz der Mehrstrahltechnik einen anderen Vorteil. Hier ist es nicht Ziel, effizienter und zeitsparender zu arbeiten, sondern ein schweißtechnisches bzw. materialspezifisches Problem zu lösen. Aluminiumdruckguss enthält aufgrund des Herstellungsverfahrens (Gießprozess und Trennmittel) einen relativ hohen Anteil an Einschlüssen, die beim Schweißprozess ausgasen und eine erhöhte Porosität in den Nähten zur Folge haben. Durch den Einsatz einer Mehrstrahlfigur kann das Ausgasen dieser Verunreinigungen aus dem Werkstoff begünstigt und die Porosität (siehe Gegenüberstellung in Abbildung 53) herabgesetzt werden. Dazu werden mehrere Bäder (hier im Beispiel drei Bäder) unterschiedlicher Leistung im Abstand von einigen Millimetern über den Schweißstoß geführt, die den Einschlüssen über einen längeren Zeitraum die Möglichkeit bieten, an die Oberfläche der Schmelze zu steigen.





Abbildung 52: Schweißund Kosmetiknaht mit unterschiedlicher Fokuslage.

Abbildung 53: Schweißergebnis von Ein- und Mehrstrahlprozess. Eine ähnliche Strahlkonfiguration wird zum lokalen Vorwärmen hochkohlenstoffreicher Stähle verwendet. Diese Materialien neigen in der Schweißnaht und der wärmebeeinflussten Zone zu Spannungsrissen.

In der Industrie ist es üblich, die gesamten Bauteile vor dem Schweißen in Öfen zu erwärmen. Dies bedeutet allerdings einen erheblichen Zeitund Energieaufwand. Bei bereits gehärteten Bauteilen ist ein Vorwärmen des gesamten Bauteils nicht zulässig. Durch den Einsatz der Mehrstrahltechnik mittels Elektronenstrahl kann das Vorwärmen auf die Schweißzone begrenzt und parallel, zeitgleich mit dem Schweißen vorgenommen werden, so dass auch gehärtete Bauteile ihre Grundhärte nicht verlieren. Die Energie wird dabei durch den vorwärmenden Strahl in Form eines kleinen Schweißbades nicht flächig, sondern bis in die Tiefe und somit gezielt und schneller eingetragen.



Ebenfalls können Werkstoffe mit Hilfe der Mehrbadtechnik geschweißt werden, die mit herkömmlichen Schweißverfahren aufgrund ihrer niedrig schmelzenden Gefügeanteile und der beim Schweißen entstehenden Spannungen zu Heißrissen neigen.

Durch zwei links und rechts vom Schweißbad leicht nacheilende Wärmefelder wird Energie in Form von Wärme eingebracht. Die Felder selbst können die Form eines defokussierten Strahls oder eines Scanfeldes haben. Dabei sollte es zu keinen Anschmelzungen kommen. Die Wärmefelder führen dazu, dass sich das Material ausAbbildung 54: Vorwärmen mit einem zusätzlichen kleinen Schweißbad. dehnt. Der durch die Ausdehnung erzeugte Druck kompensiert die Zugspannung in der Erstarrungszone des Schweißbades. Das Material kann so ohne Rissbildung erstarren.





5.2.3 Randschichttechnologie

Alle aufgeführten Anwendungsbeispiele bezüglich des Mehrstrahlschweißens lassen sich auch in ähnlicher Weise auf Oberflächentechniken wie etwa Härten und Umschmelzen anwenden. Die Vorteile der Randschichtbehandlung mittels Elektronenstrahl bestehen darin, dass Energie nur lokal in die umzuwandelnden Zonen eingebracht und somit Verzug minimiert wird. Durch das Umwandeln von mehreren Bahnen oder Feldern gleichzeitig arbeitet diese Technologie außerdem sehr wirtschaftlich (Abbildung 56).

Abbildung 56: Mehrbadbehandlung in der Randschichttechnologie.



Dabei können verschiedene Belichtungsstrategien eingesetzt werden, also Möglichkeiten, wie der Strahl die Energie ins Werkstück einbringt. Im einfachsten Fall ist es ein herkömmlicher Linienscan, wobei z.B. beim Härten mit dieser Methode keine großen Einhärtetiefen ohne Anschmelzungen zu erreichen sind. Dort bieten sich spezielle Ablenkfiguren an, bei der durch das Halten der Temperatur über längere Zeit mit niedrigerer Intensität eine höhere Einhärtetiefe erreicht werden kann.

6. Elektronenstrahl-Anlagen

Der Elektronenstrahl als Software gesteuertes Schweißwerkzeug zeichnet sich durch hohe Flexibilität, Präzision und Reproduzierbarkeit aus. Diese Eigenschaften haben zu einer weiten Verbreitung dieses Werkzeuges in der Industrie geführt. Moderne Elektronenstrahl (EB) Anlagen sind durch speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) gesteuerte Maschinen. Ausführungen mit einer computerisierten numerischen Steuerung (CNC) sind in der Lage die EB-Prozesse zu automatisieren. Vorraussetzungen für den Betrieb der Elektronenstrahlmaschinen, wie zum Beispiel das Prozessvakuum, werden in der Maschine automatisch generiert und überwacht.

Die hohe Energieeffizienz der Elektronenstrahltechnologie und die nicht erforderlichen Prozessmedien (z.B. Schutzgas) führen zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen.

Neben den Standard-Maschinen sind für Großserien Sonderkonstruktionen üblich, die vom zu bearbeitenden Bauteil geprägt sind. Dabei sind neben den Abmessungen auch die geforderten Prozesszeiten relevant. Bis heute wurde eine Vielzahl von Konzepten für Maschinen entwickelt, die auf unterschiedlichste Weise die Bewegung des Bauteils unter dem Elektronenstrahl im Vakuum realisieren.

Bevor wir zu Beispielen für EB-Maschinen kommen, soll eine Reihe von Begriffen zum Verständnis der einzelnen Maschinenkonzepte definiert werden.

6.1 Definitionen

In der Produktion werden zur Planung der Arbeitsprozesse und zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer Maschine verschiedene Zeiten definiert.
Zykluszeit				
Nebenzeit		EB-Prozesszeit	Nebenzeit	
beladen	 einfahren Tür schließen pumpen (Pumpzeit) 	EB-Bearbeitung (Strahl-Ein-Zeit)	 fluten (Flutzeit) Tür öffnen ausfahren 	entladen

Abbildung 57: Grafische Darstellung von Zykluszeit, Nebenzeiten und EB-Prozesszeit.

Die Zeiten für das Be- und Entladen sind werkstückabhängig und damit keine Maschinenkennwerte. Diese Zeiten dürfen beim Vergleich der verschieden Maschinenkonzepte nicht berücksichtigt werden. Sie sind allerdings ein Bestandteil der Nebenzeit und beeinflussen damit wesentlich die Produktivität der EB-Maschine.

Die **Zykluszeit** schließt die EB-Prozesszeit und alle Nebenzeiten ein und ist die Summe aller für die Herstellung des Werkstücks benötigten Zeiten. Sie ist maßgebend für die Berechnung der Fertigungskosten.

Die **EB-Prozesszeit** ist der gesamte zeitliche Aufwand für den eigentlichen EB-Prozess. Sie beinhaltet alle Zeitanteile, welche vom Prozessstart bis zu dessen Ende anfallen. Außerhalb liegende Nebenzeiten werden nicht berücksichtigt.

Die **Strahl-Ein-Zeit** ist die Zeit, in welcher alle Randbedingungen für das Einschalten des Elektronenstrahls erfüllt sind und in welcher die Bearbeitungsprozesse mit dem Elektronenstrahl stattfinden.

Die **Nebenzeit** ist die Zeit, welche erforderlich ist, die Vorraussetzungen für den EB-Prozess zu schaffen. Sie ist unterteilt in die werkstückabhängige und maschinenabhängige Nebenzeit.

Die **werkstückabhängige Nebenzeit** ist die Zeit für das Be- und Entladen und gegebenenfalls für das Ausrichten der Werkstücke auf der EB-Maschine. Die **maschinenabhängige Nebenzeit** ist die Zeit für das Ein- und Ausfahren des Werkstücks, die Türfahrten und die Pump- und Flutzeit.

Die **Pumpzeit** ist die Zeit, die benötigt wird, um das für den EB-Prozess erforderliche Vakuum in der Arbeitskammer herzustellen.

Die **Flutzeit** ist die Zeit, die benötigt wird, um Normaldruck in der Arbeitskammer herzustellen.

Für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer Maschine ist die Verfügbarkeit für den Arbeitsprozess entscheidend.

Die Verfügbarkeit einer Maschine ist die Wahrscheinlichkeit oder das Maß, dass die Maschine bestimmte Anforderungen innerhalb eines vereinbarten Zeitrahmens (Gesamtzeit) erfüllt. Sie ist ein Qualitätskriterium einer Maschine. Sie wird anhand der Zeit in der die Maschine verfügbar ist definiert:

Verfügbarkeit = <u>Gesamtzeit - Ausfallzeit</u> Gesamtzeit

Die Verfügbarkeit von EB-Anlagen beträgt in der Regel zwischen 80 und 98 Prozent.

Die **Ausfallzeit** ist die Zeitspanne, in der die Maschine nicht verfügbar ist, da Wartungsarbeiten ausgeführt werden oder eine technische Störung vorliegt.

6.2 Maschinenbeispiele

Im Weiteren werden verschiedene Maschinenkonzepte vorgestellt, die für die Konstruktion typischen Zeiten definiert und Beispiele für den Einsatz in der Industrie aufgezeigt.



Im Wesentlichen können vier Konstruktionsgrup-

6 2 1 Kammermaschine

Grundlage aller EB-Maschinen ist das Prinzip der Kammermaschine. In einer abgeschlossenen Kammer (Rezipient) werden die Teile mittels einer Kinematik relativ zum Elektronenstrahl bewegt. Zugang zur Kammer ist in der Regel eine Tür, welche den gesamten Querschnitt der Kammer freigibt. Abweichende Konstruktionen, bei denen die Kammer durch Aufklappen geöffnet wird, sind ebenfalls bekannt. Die Arbeitskammer gewährleistet zum einen die mechanische Stabilität der Maschine unter Arbeitsvakuum und schützt zum anderen den Maschinenbediener vor den im Prozess entstehenden Röntgenstrahlen. Das Arbeitsvakuum der Maschine liegt für die meisten Anwendungen im Bereich zwischen $\leq 2 \times 10^{-2}$ bis 7 x 10⁻⁴ mbar und wird von der Anwendung bestimmt. Für die Bearbeitung

von reaktiven Werkstoffen (z.B. Niob) kann auch ein Vakuum im Bereich von 10⁻⁵ bis 10⁻⁶ mbar realisiert werden.

Die für die Werkstückbewegung verwendete Kinematik innerhalb der Kammer wird sehr stark von der Arbeitsaufgabe geprägt. Standardlösungen sind ein auf dem Boden der Kammer angebrachter Koordinatentisch, auf dem unterschiedliche Vorrichtungen montiert werden können. Vorrichtungen erzeugen zusätzliche Bewegungen, um die Werkstücke zu drehen, zu schwenken oder zu heben.

Merkmale der Kammermaschine sind die hohe Flexibilität, die mit geeigneter Kinematik eine beliebige Vielfalt von Teilen zu bearbeiten erlaubt. Die Zykluszeit der Kammermaschine ist stark abhängig von der werkstück- und maschinenabhängigen Nebenzeit. Für jeden Bearbeitungszyklus muss das komplette Kammervolumen evakuiert und belüftet werden. Die Dauer der Pumpzeit der Kammer steht im umgekehrten Verhältnis zur Investition der installierten Pumpleistung.



Abbildung 62 zeigt eine Kammermaschine in kompakter Bauweise. Alle für den Betrieb der Maschine notwendigen Komponenten wurden

Abbildung 62: Kammermaschine Typ K7 (Kammervolumen 700 I). auf einem Grundrahmen montiert. Die Arbeitskammer ist über eine Schiebetür zugänglich. Der EB-Generator ist auf der Oberseite der Kammer angebracht. Durch die Verwendung einer Generatorverschiebung kann der verfügbare Arbeitsraum der Kammer deutlich erweitert werden. Typische Nebenzeiten der Maschine liegen im Bereich von 5 bis 10 Minuten, wobei der Anteil der Pumpzeit je nach Pumpausrüstung und gefordertem Vakuum (2 x 10^{-2} bis 7 x 10^{-4} mbar) 1 bis 4 Minuten beträgt.

Die Vorteile der Maschine sind der geringe Platzbedarf und die hohe Flexibilität. Durch den Einsatz geeigneter Vorrichtungen kann eine große Teilevielfalt bearbeitet werden. Neben Anwendungen für Kleinserienlohnfertigung ist es ein optimales Anlagenkonzept für Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen. Merkmal der Kammermaschine ist, dass die Nebenzeit einen erheblichen Anteil an der Zykluszeit ausmacht, besonders wenn die Prozesszeiten kurz sind.

Abbildung 63 zeigt die Drehschwenkvorrichtung einer Kammermaschine. Die Vorrichtung steht auf einem Koordinatentisch der in einem xy-Koordinatensystem durch eine CNC-Steuerung bewegt werden kann. Auf der Vorrichtung kann ein Bauteil in beliebigem Winkel unter dem Strahl rotiert werden. Die Nebenzeiten pro Bauteil können reduziert werden, wenn mehrere Bauteile pro Maschinenladung bearbeitet werden. Dargestellt ist eine Mehrfach-Vorrichtung zur Bearbeitung von bis zu 9 Bauteilen.



Abbildung 63: Drehschwenkvorrichtung (rechts) und Mehrfachvorrichtung zur Bearbeitung von bis zu 9 Teilen (links), Strömungsring für Einspritzsysteme (mitte).



Abbildung 64: Kammermaschine Typ K190 (19 m³ Kammervolumen).



Form und Größe der Kammern sind geprägt von den zu bearbeitenden Bauteilen. Die in Abbildung 64 dargestellte Maschine ist für die Bearbeitung von langen Bauteilen konzipiert. Zentrale Einheit der Maschine ist ein Funktionswürfel. der die EB-Generatortechnik trägt. Zu beiden Seiten des Würfels sind Rohre angebracht, die entsprechende Verfahrwege der Bauteile innerhalb der Kammer zulassen. Die Bauteile werden über eine Linearbewegung (X-Achse) unter dem Elektronenstrahl bewegt. Zusätzliche Bewegungen in orthogonaler Richtung können wahlweise durch horizontale oder vertikale EB-Generatorverschiebungen realisiert werden. Typische Nebenzeiten der Maschine liegen im Bereich von 10 bis 20 Minuten, wobei der Anteil der Pumpzeit je nach Pumpausrüstung und gefordertem Vakuum (2 x 10⁻² bis 7 x 10⁻⁴ mbar) 5 bis 15 Minuten beträgt.

Der Vorteil der Maschine ist die Möglichkeit der Bearbeitung von langen, axialsymmetrischen Bauteilen. Durch den Einsatz der Generatorverschiebung wird der verfügbare Arbeitsraum ohne Veränderung der Nebenzeiten deutlich vergrößert. Die Maschine ist trotz der Spezialisierung für ein weites Teilespektrum einsetzbar.

Be-und Beatelen

Abbildung 65: Kammermaschine Typ K640 (64 m³ Kammervolumen)

Die Bearbeitung von großen Bauteilen verlangt entsprechende Arbeitskammervolumina, ähnlich der in Abbildung 65 dargestellten Anlage. In einem Volumen von 64 m³ werden die Bauteile auf einem Koordinatentisch auf der Kammergrundfläche und mit einer Vorrichtung, welche über eine Rotationsachse (A-Achse), eine Schwenkachse (B-Achse) und eine Hubachse (Z-Achse) verfügt, beliebig unter dem Strahl bewegt. Alle Achsen werden durch eine CNC gesteuert, die bei Bedarf mit der Strahlablenkung überlagert werden können.

Zum Beladen kann die Vorrichtung bei geöffneter Kammertür komplett auf das Vorbett gefahren werden. Somit ist die Be- und Entladung durch einen Kran gewährleistet.

Typische Nebenzeiten der Maschine liegen im Bereich von 15 bis 25 Minuten, wobei der Anteil der Pumpzeit je nach Pumpausrüstung und gefordertem Vakuum (2 x 10^{-2} bis 7 x 10^{-4} mbar) 10 bis 20 Minuten beträgt.

Beispiel einer Anwendung ist das in der Abbildung 67 dargestellte Frontlagergehäuse eines Turbofan-Strahltriebwerks für ein Passagierflugzeug vom Typ Airbus A380 (Abbildung 66). Das Bauteil besteht aus einer Vielzahl von Einzelteilen aus Titan, die in einer Vorrichtung gespannt in der Kammer miteinander verschweißt werden. Durch die Lage und die Geometrie der Fügestellen muss das Bauteil während des Schweißens gedreht und geschwenkt werden. Bei manueller Bearbeitung beträgt die EB-Prozesszeit pro Bauteil ca. 8 Stunden. Durch den Einsatz automatischer Fugensuche wird die EB-Prozesszeit auf unter 4 Stunden reduziert.





Abbildung 66: Airbus A380 mit Rolls-Royce Trent 900 Triebwerk. (This photograph is reproduced with the permission of Rolls-Royce plc, copyright © Rolls-Royce plc 2010.)

Abbildung 67: Detail eines automatisch geschweißten Frontlagergehäuses.



Abbildung 68: Großkammermaschine vom Typ K6000 mit innen liegendem EB-Generator am Roboterarm (links), EB-Schweißen von Aluminiumplatten für Ariane 5 (rechts oben), Instandsetzung von Leitschaufelträger einer Gasturbine (mitte), Drehvorrichtung mit Kupferkessel (unten).

Für die Bearbeitung von großvolumigen Werkstücken stößt das Konzept des an der Außenseite der Kammer montierten EB-Generators an seine Grenzen. Die Zugänglichkeit der erforderlichen Bearbeitungsorte kann mit sinnvollen Arbeitsabständen nicht mehr gewährleistet werden. Zusätzlich erfordert die komplexe Kinematik für solche Teile erheblichen konstruktiven Aufwand. Die Lösung ist der Einsatz eines beweglichen EB-Generators innerhalb der Arbeitskammer. Ein 4-achsiger Roboterarm trägt den EB-Generator. Der Roboter selbst kann an einem x-z-Portal über die gesamte Kammerseitenwand verfahren werden. Vorrichtungen, die auf der Palette montiert werden können, realisieren zusätzliche Bewegungen des Werkstücks (z.B. Vorrichtungen zum Drehen des Werkstücks in der Kammer).

Typische Nebenzeiten der Maschine liegen im Bereich von 60 bis 80 Minuten, wobei der Anteil der Pumpzeit je nach Pumpausrüstung und gefordertem Vakuum (2 x 10⁻² bis 7 x 10⁻⁴ mbar) 30 bis 50 Minuten beträgt. Da die EB-Prozesszeiten im Segment der Großbauteile bis zu 20 Stunden betragen können (große Schweißlängen und hohe Schweißtiefen), ergibt sich somit trotzdem ein sehr günstiges Verhältnis von Prozesszeit zu Zykluszeit von über 90 Prozent.

Der wesentliche Vorteil dieses Maschinenkonzepts besteht darin, dass die werkstückabhängigen Nebenzeiten unabhängig von der EB-Anlage zeitgleich vorgenommen werden; die Werkstücke können also an einem anderen Ort auf- und abgespannt werden. Der Zyklus an der EB-Anlage beginnt also unmittelbar mit dem Einfahren des aufgespannten Werkstücks in die Maschine. Da bei großvolumigen Werkstücken die werkstückabhängigen Nebenzeiten häufig viel länger als die Prozesszeiten sind, ergibt sich bei Verwendung mehrerer Werkstückträger eine sehr hohe Produktivität. Durch das Prinzip des innenliegenden EB-Generators ist die Maschine flexibel und für verschiedenste Anwendungen einzusetzen



Abbildung 69: Querschnitt eines mit dem Elektronenstrahl geschweißten Weichenherzstückes.

Abbildung 70: EB-Maschine mit Spezialvorrichtung und externem Transportsystem.



Abbildung 71: Schematische Darstellung der Gesamtanlage zur Produktion von EB-geschweißten Weichenherzstücken.



Bei einer entsprechenden Auslastung einer Maschine ist es sinnvoll, Sonderkonstruktionen zu erstellen. Dabei werden die Arbeitskammer und die Kinematik den spezifischen Anforderungen angepasst. Mitunter stellt sich auch der Einsatz von mehreren EB-Generatoren als wirtschaftlich dar.

Abbildung 70 zeigt die Realisierung einer solchen Einzweckanlage. Eine Anwendung aus dem Bereich der Bahntechnik eröffnet für das EB-Schweißen von Standardschienenprofilen zur Herstellung von Weichenherzstücken ein enormes Potential. Die EB-Maschine ist eine Kammerkonstruktion, die mit zwei horizontal betriebenen EB-Generatoren ausgestattet ist. Durch Generatorverschiebungen kann die Position des Elektronenstrahls relativ zur Fügestelle eingestellt werden. Die Positionierung erfolgt dabei online während der EB-Schweißung.

Wie in Abbildung 71 dargestellt, ist die EB-Maschine nur ein Teil der Gesamtanlage. Werkstoffbedingte Vorgaben für die Wärmebehandlung vor und nach dem Schweißen erfordern die Integration einer Heiztechnologie die rasch gleichmäßige Temperaturen im Bauteil erzeugt. Das wurde mit UMH (Uniform Magnetic Heating) erreicht. Ziel der Konstruktion der Anlage ist die Realisierung des kompletten technologischen Prozesses. Vorteile einer kundenspezifischen Lösung sind die optimale Abbildung der technologischen Prozesse. Somit werden die höheren Investitionen in eine solche Anlage durch parallelisierte Nebenzeiten und der daraus resultierenden effizienteren Produktion innerhalb kurzer Zeit amortisiert.

6.2.2 Taktmaschine

Taktmaschinen sind vom Konstruktionsprinzip Kammermaschinen bei denen eine möglichst kleine Arbeitskammer mit einem kompakten Werkstückträger als Teil der Arbeitskammer genutzt wird. Die Maschine hat zwei Positionen, die Ladeposition (Be- und Entladen) und die Arbeitsposition.

Zugeführt werden die Teile in den Werkstückträger unter Atmosphäre. Für die Zuführung werden Standard Komponenten eingesetzt. Je nach Typ der Taktmaschine können bis zu 4 Teile pro Werkstückträger aufgenommen werden. In der Regel sind Taktmaschinen als Einzweckmaschinen konzipiert.



Abbildung 72: Taktmaschine Abbildung 73: Turboläufer



Abbildung 74: Abtriebswelle

Abbildung 75: Nockenwelle

Der Vorteil der Taktmaschine ist das gleichzeitige Laden, Pumpen und Schweißen in einer sehr kleinen Kammer Dadurch reduziert sich die Nebenzeit auf einen Bereich von 4 bis 10 Sekunden. Durch die kompakte Bauweise der Maschine ergibt sich eine minimale Stellfläche. Alle Komponenten sind auf einer Plattform montiert. die containertauglich ist. Die Taktmaschine ist gut geeignet für Automatisierung und zur Verkettung von Produktionsprozessen. Die Maschinen zeichnen sich durch niedrige Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten aus. Wichtig für eine möglichst hohe Produktivität ist dabei, dass die Prozesszeit länger als die Nebenzeit ist. Durch die kurze Zykluszeit ist es möglich, moderne Fertigungsstrategien (One-Piece-Flow) umzusetzen welche besonders in der Automobilindu-

strie Anwendung finden.

6.2.3 Schleusen-Kammermaschine (Shuttle und Transfer)

Das Konzept der Schleusen-Shuttle-Maschine ist eine Weiterentwicklung der Kammermaschine mit dem Ziel, die Nebenzeiten zu reduzieren. Erreicht wird dies durch Hinzufügen einer Schleusenkammer zur Arbeitskammer. Die Maschine besteht somit aus:

- 1. Station zum Be- und Entladen
- 2. Schleusenkammer zum Pumpen und Fluten
- 3. Arbeitskammer.





Abbildung 76: Schleusen-Shuttle-Maschine vom Typ S20.



Abbildung 77: Elektronenstrahl geschweißtes Zahnrad.

Je nach Größe der zu schweißenden Bauteile werden ein oder mehrere Werkstücke auf Paletten oder Vorrichtungen zwischen den Stationen bewegt. Es sind also jeweils 3 Paletten im Umlauf.

Die Werkstücke werden auf der Be- und Entladestation auf die Palette geladen. Zum nächsten Takt wird die Palette an Atmosphäre automatisch in die Schleusenkammer bewegt. Gleichzeitig wird auf der Parallelspur eine Palette mit bereits bearbeiteten Werkstücken auf die Beund Entladestation bewegt. Nach dem Schließen der Schleusentür wird die Schleusenkammer abgepumpt. Zum nächsten Schleusentakt wird die Palette unter Vakuum in die Arbeitskammer bewegt und auf der Parallelspur eine Palette mit bearbeiteten Werkstücken in die Schleuse eingefahren. Nach dem Schließen der Arbeitskammertür kann die EB-Bearbeitung unmittelbar gestartet werden, da die Arbeitskammer immer unter Vakuum (7 x 10⁻⁴ mbar) gehalten wird.

Zur Bearbeitung der Teile kann die Palette in der Arbeitskammer durch einen Koordinatentisch über die gesamte Grundfläche der Arbeitskammer bewegt werden. Sind weitere Bewegungen für die Bearbeitung der Werkstücke erforderlich, so können diese über zusätzliche Kinematik in der Palette realisiert werden. Nach Abschluss der EB Bearbeitung wird die Palette zum nächsten Schleusentakt in die Schleuse und in einem weiteren Takt auf die Be- und Entladeposition bewegt. Die Zeit für den Schleusentakt wird maßgeblich von der für die Bearbeitung der Teile benötigen EB-Prozesszeit bestimmt.

Der wesentliche Vorteil dieses Konzepts besteht darin, dass nicht nur die werkstückabhängigen Nebenzeiten parallelisiert werden konnten, sondern auch die Zeiten für Pumpen und Fluten. Die Nebenzeit reduziert sich damit auf das Ein- und Ausfahren der Paletten sowie das Öffnen und Schließen der Türen.

Typische Nebenzeiten für eine Schleusen-Shuttle Maschine mit einer 2m³ großen Arbeitskammer (Typ S20) liegen im Bereich von 30 Sekunden. Ein optimaler Betrieb ist möglich, wenn die Prozesszeit länger als die Pumpzeit der Schleuse (ca. 60 Sekunden) sowie die Zeit für das Be- und Entladen auf der ersten Station ist. Da auf den Paletten häufig mehr als 30 Werkstücke Platz finden, reduziert sich die Nebenzeit pro Werkstück dann auf unter eine Sekunde. Des Weiteren ist der Teileausstoß der Maschine gut planbar.

Abbildung 78: Palette einer Schleusen-Shuttle-Maschine mit 72 Werkstücken.



6.2.4 Schleusen-Taktmaschine (Rundtakt)



Abbildung 79: Schleusen-Rundtakt-Maschine.

Die Schleusen-Rundtakt-Maschine verbindet die Effizienz des Schleusen-Shuttle-Prinzips mit dem der Taktmaschine.

Optimiert für die Bearbeitung kleiner Teile beträgt das typische Kammervolumen 4 bis 60 dm³. Die Maschine hat zwei Stationen:

1. Be- und Entladestation

(fungiert zusätzlich als Schleuse)

2. Arbeitsstation

Die Teile werden nach dem Evakuieren mittels eines Rundtisches unter Vakuum in die Arbeitsstation gebracht. In der Regel wird die Maschine im Einzelstückfluss betrieben.

Die Vorteile der Maschine liegen aufgrund des gleichzeitigen Be- und Entladens und der EB-Bearbeitung in kurzen Nebenzeiten. Typische Nebenzeiten der Maschine liegen im Bereich von 3,3 bis 4 Sekunden. Für den effizienten Betrieb sollte die EB-Prozesszeit länger als die Pumpzeit in der Be- und Entlade-Schleusenstation (ca. 3 bis 8 Sekunden) sein.

Ein Beispiel der Anwendung einer Schleusen-Rundtakt-Maschine ist die in Abbildung 80 dargestellte GearCell. Das System schweißt vollAbbildung 80: Fertigungssystem vom Typ GearCell als Teil einer Produktionsstraße für Zahnräder. automatisch Zahnräder für Getriebe. Für den gesamten Produktionsprozess sind eine Reihe von Teilprozessen notwendig, wie z.B. Teileerkennung, Waschen, Fügen, Erwärmen, EB-Schweißen, Bürsten und Rundlaufkontrolle, um nur die wichtigsten zu nennen. Diese Prozesse werden durch einzelne Module realisiert. In der GearCell wurden sie entsprechend des Produktionsflusses auf einer Plattform montiert. Das Teilehandling zwischen den Stationen wird mit Standard-Komponenten realisiert. Das EB-Schweißen mit der Schleusen-Rundtakt-Maschine ist ein Prozessschritt im Gesamtablauf.



7. Kostenbetrachtung und Vergleich mit anderen Fertigungstechnologien

Bei der Auswahl und Festlegung der Fertigungstechnologien stehen am Ende immer die Kosten im Vordergrund. Die Fragen, welche im folgenden Abschnitt gestellt werden und die Hinweise zu den Antworten sollen dem Anwender helfen, für sich die richtige Strategie bei der Kostenbetrachtung zu entwickeln. Es wurde dabei bewusst auf konkrete Rechenbeispiele verzichtet, weil für eine seriöse Betrachtung die Randbedingungen für den Einzelfall immer exakt beschrieben werden müssten.

7.1 Gibt es Alternativen zum Elektronenstrahlschweißen?

Es gibt einige Produkte, bei denen der Einsatz der Elektronenstrahltechnik zwingend erforderlich ist oder bei denen es keine technische Alternative gibt. Die Antworten auf folgende Fragen oder Kombinationen daraus können zu einem Alleinstellungsmerkmal des Elektronenstrahlschweißens führen:

- 1. Ist für den Werkstoff oder die Werkstoffkombination das Schweißen im Vakuum zwingend erforderlich?
- 2. Gibt es geeignete Zusatzwerkstoffe am Markt?
- 3. Ist das Elektronenstrahlschweißen für die Herstellung vorgeschrieben, weil die Bauteile entsprechendqualifiziertundnurin Verbindung mit dem Verfahren freigegeben worden sind?
- 4. Lässt sich der tolerierte Verzug nur durch den Einsatz eines Strahlschweißverfahrens erreichen?

5. Kann die geforderte Schweißtiefe auch noch mit Laserstrahlschweißen realisiert werden (derzeit ca. 10-20 mm)?

Für den Anwender gibt es die Möglichkeiten, die Fertigung seiner Bauteile an einen Lohnschweißbetrieb zu vergeben oder in eigene Maschinentechnik zu investieren. Auch wenn die Stückzahlen unter wirtschaftlichen Aspekten eine Eigenfertigung nicht rechtfertigen, können strategische Gründe wie z.B. Verkürzung der Durchlaufzeiten oder Bewahrung der "Kernkompetenz Schweißen" im eigenen Betrieb den Ausschlag geben. Manchmal ist die Herausgabe von Schweißarbeiten aber auch nicht möglich, weil der Prozess integraler Bestandteil einer Fertigung ist (z.B. Reinraumbedinaungen bei UHV-Komponenten oder Sensoren) oder weil Sicherheits- bzw. Geheimhaltungsgründe (z.B. in Forschungseinrichtungen oder in der Nukleartechnik) eine Verlagerung nicht erlauben.

In diesen Fällen sind die Entscheider im Wesentlichen von den Investitionskosten getrieben, da sich die Stückkosten wegen der planmäßigen Unterauslastung der Maschinen ausschließlich daran festmachen lassen.

Die Auswahlkriterien für eine zweck- und damit kostenoptimierte Maschine sind in Kapitel 6 beschrieben.

7.2 lst Laserstrahlschweißen kostengünstiger?

Wenn unter technischen Aspekten das Laserund das Elektronenstrahlschweißen gleichwertige Resultate liefern, muss die Verfahrensentscheidung aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus getroffen werden. Da es sich hierbei zumeist um Anwendungen aus der Massenproduktion handelt, kann man in der Regel davon ausgehen, dass die Maschinen und Anlagen mit einer Vollauslastung betrieben werden. Die Entscheider sind dann im Wesentlichen von den zu erwartenden Stückkosten getrieben, welche wiederum von den Investitionskosten, der Verfügbarkeit, dem zu erwartenden Lebenszyklus des Produkts in Verbindung mit der Lebenserwartung der Maschinentechnik sowie den Betriebskosten beeinflusst werden.

Die Investitionskosten für die Strahlguellen zum Schweißen (ieweils ohne zugehörige Maschine) setzen sich beim Laser aus einer Basisgröße sowie linear steigenden Kosten pro Kilowatt (kW) Strahlleistung zusammen. Moderne Laserstrahlquellen wie z.B. Faser- oder Scheibenlaser, welche im Bereich bis 20 mm Schweißtiefe dem Elektronenstrahl vergleichbare Resultate liefern. haben einen Basispreis von etwa € 35.000,- (inklusive Faser und Schweißoptik) zuzüglich Kosten pro Kilowatt von ca. € 40.000,- (Stand 2011). Der Einstieg in die Elektronenstrahltechnik beginnt heute bei 6 kW Strahlleistung mit Kosten von € 85.000,- für ein komplettes Stahlerzeugersystem (Stand 2011). Mit diesen Strahlguellen lassen sich Schweißtiefen von etwa 20 mm erreichen. Sie entsprechen im Schweißergebnis damit modernen Laserguellen im Bereich von etwa 10 bis 15 kW. Die Investitionskosten sind beim Elektronenstrahl im hier betrachteten Bereich nicht leistungsabhängig, beim Laserstrahlschweißen steigen sie aber nahezu linear mit der betrachteten Schweißtiefe. Je nach geforderter Schweißtiefe kann der Elektronenstrahl also im direkten Vergleich etwas teurer, bei höheren Leistungen aber auch wesentlich preiswerter sein

Im Getriebebau werden häufig Schweißtiefen von 2 bis 8 mm verlangt und dafür Laser mit 1 bis 4 kW Strahlleistung eingesetzt. Zu den Kosten für die Strahlquellen kommen sowohl beim Laser- als auch Elektronenstrahlschweißen noch die Kosten für den Rest der Maschine hinzu. Der Energieverbrauch moderner Fertigungsanlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung.



Abbildung 81: Beim Laserschweißen wirken je nach Strahlquelle zwischen 4% (Nd-YAG) und 25-30% (Faser- und Scheibenlaser) der eingesetzten elektrischen Energie auf das Werkstück. Beim Elektronenstrahlschweißen können dagegen 60-70% der Anschlussleistung für thermische Bearbeitungsprozesse verwendet werden. Von allen Schmelzschweißverfahren hat das Elektronenstrahlschweißen damit die höchste Energieeffizienz.

sentliche Rolle[.]

7.3 Kann Elektronenstrahlschweißen preiswerter sein als konventionelle Schweißverfahren mit Lichtbogen?

Wie das Elektronenstrahlschweißen haben sich auch die Lichtbogenprozesse in den letzten Jahren enorm weiter entwickelt und sind durch einen hohen Automatisierungsgrad gekennzeichnet. Dazu zählen insbesondere die Engspaltschweißverfahren (WIG, MAG) sowie UP-(Unterpulver)Schweißmaschinen, bei denen bis zu 7 Drähte gleichzeitig im Einsatz sind. Wenn man in der Fertigungskette den reinen Schweißprozess zum Kostenvergleich heranzieht, spielen hierbei sieben Faktoren eine we-

- 1. Schweißgeschwindigkeit und Abschmelzleistung (bei den Lichtbogenprozessen)
- 2. Verbrauch an Zusatzmaterial pro Meter Nahtlänge
- 3. Verbrauch an Energie und technischen Gasen (nur Lichtbogenprozesse)
- 4. Aufwand für Nahtvorbereitung
- 5. Nebenzeiten beim Schweißen
- 6. Maschinenstundensatz
- 7. Nacharbeit aufgrund Verzug

Die Schweißgeschwindigkeit und die Abschmelzleistung sind beim Lichtbogenschweißen sehr stark verfahrensabhängig. Außerdem spielen Nahtvorbereitung, der Werkstoff selbst (z.B. Einhaltung der Zwischenlagentemperatur) und letztlich auch die geforderte Nahtqualität eine sehr große Rolle bei den Schweißzeiten und damit den Schweißkosten, welche in Summe realisiert werden können.

Beim Elektronenstrahlschweißen ist in der Regel überhaupt kein Zusatzmaterial erforderlich. Daraus folgt, dass die Schweißkosten vom zu schweißenden Werkstoff nahezu unabhängig sind, d.h. das Schweißen eines Meters Edelstahl oder Titan kostet genau soviel wie das Schweißen eines Meters Baustahl. Die Prozessnebenkosten beschränken sich im Wesentlichen auf den Stromverbrauch, welcher im Vergleich zu allen anderen Schmelzschweißverfahren sehr niedrig ist. Gase oder entsprechende Pulver zum Schutz des Schmelzbades sind nicht erforderlich, da das verfahrensbedingt vorhandene Vakuum hier die optimalen Randbedingungen bietet.

Abbildung 82 stellt den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Schweißzeit bzw. Schweißkosten über die Schweißnahtlänge für Lichtbogenprozesse im Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen grafisch dar. Abbildung 82: Trotz prozessbedingter Nebenzeiten ist das Elektronenstrahlverfahren bei zunehmender Schweißtiefe /-nahtlänge häufig wirtschaftlicher als Lichtbogenprozesse.



In Kapitel 6 wurden bereits Nebenzeiten von Elektronenstrahlanlagen vorgestellt und im Zusammenhang mit unterschiedlichen Maschinenkonzepten erläutert. Die in der Abbildung 82 dargestellte Nebenzeit für das Evakuieren vor und dem Belüften nach dem Schweißen kann je nach Maschinentyp von wenigen Sekunden (z.B. bei Schleusentaktanlagen) bis zu 60 Minuten bei sehr großen Kammeranlagen betragen. In dieser Zeit gewinnen die Lichtbogenprozesse einen gewissen Vorsprung. Wegen der beim Elektronenstrahlschweißen erheblich höheren Schweißgeschwindigkeiten holt der Strahl diesen Rückstand jedoch sehr schnell auf, so dass in den meisten Fällen bereits nach kurzer Nahtlänge Zeitgleichheit erreicht wird.

Der Schnittpunkt bei den Schweißkosten wird in der Regel später erreicht. Die Steigung der Geraden in Abbildung 82 wird im Wesentlichen von den Investitionskosten, der Schweißtiefe und den Kosten für Zusatzwerkstoffe bei den Lichtbogenprozessen bestimmt. Die Investitionskosten sind beim Elektronenstrahlschweißen meistens höher, dafür entfallen die Kosten für Schweißzusätze und die Schweißgeschwindigkeit ist vergleichsweise unabhängig von der Schweißtiefe. Die Steigung der Geraden ist deshalb beim Elektronenstrahlschweißen immer sehr flach, während sie bei den Lichtbogenprozessen mit zunehmender Schweißtiefe immer steiler wird. Hierzu ein Zahlenbeispiel:

Beim Elektronenstrahlschweißen von Stahl mit 100 mm Schweißtiefe beträgt die Schweißgeschwindigkeit 8 Minuten pro Meter Nahtlänge (Einlagenprozess). Lichtbogenprozesse benötigen für die gleiche Schweißaufgabe je nach Verfahren und Werkstoff für einen Meter Nahtlänge 2 bis 5 Stunden (Mehrlagenprozess bis zu 150 Lagen) und zusätzlich 20 bis 30 kg Zusatzwerkstoff je Meter Naht.

Weitere Kostenvorteile für das Elektronenstrahlschweißen resultieren aus der einfachen Nahtvorbereitung (glatter I-Stoß) und den sehr niedrigen Nachbearbeitungskosten durch den geringen Verzug. Häufig kann auf eine Nachbearbeitung gänzlich verzichtet und der Schweißprozess dann auch an das Ende der Fertigungskette gelegt werden. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Einzelteile bereits vor dem Schweißen auf preiswerteren Maschinen endbearbeitet werden können.

Als Entscheidungsgrundlage für ein bestimmtes Schweißverfahren müssen die in Abbildung 82 dargestellte Zusammenhänge also mit Daten und Fakten quantifiziert werden, welche sich aus der jeweils betrachteten Anwendung präzise bestimmen lassen.

Folgende Aussage gilt aber grundsätzlich:

"Je größer Nahttiefe, Nahtlänge und Materialkosten sind, umso größer ist der Kostenvorteil des Elektronenstrahlschweißens gegenüber Lichtbogenprozessen"

8. Die pro-beam Gruppe

Die Firma pro-beam wurde 1974 als Elektronenstrahl-Lohnbearbeiter mit zwei Mitarbeitern und zwei gebrauchten Maschinen gegründet. Heute, nach mehr als 35 Jahren kontinuierlichen Wachstums, hat pro-beam den Status eines mittelständischen Unternehmens erreicht und beschäftigt knapp 300 Mitarbeiter an vier inländischen und zwei ausländischen Standorten. Die Firma betreibt über 30 Elektronenstrahlschweißmaschinen. fünf Flektronenstrahlperforationsanlagen sowie mehrere PACVD (Plasma Activated Chemical Vapour Deposition)-Beschichtungsanlagen. Die Elektronenstrahlanlagen haben Strahlleistungen im Bereich von 1 bis 45 kW und Kammergrößen von 0,05 bis 730 m³. PACVD-Anlagen Die mit Kammergrößen von 50 Liter bis 1 m³ arbeiten mit RF-Generatoren (13,56 MHz) im Leistungsbereich von 1,2 bis 5,5 kW. pro-beam bearbeitet an bis zu sieben Tagen in der Woche, teilweise im Dreischichtbetrieb, Aufträge für seine Kunden. Damit ist pro-beam der größte Elektronenstrahl-Lohnbearbeiter weltweit und die einzige Firma, die jahrzehntelange Erfahrung in den möglichen Anwendungsgebieten Schweißen, Bohren und Veredelung von Oberflächen durch Härten, Umschmelzen und Auflegieren sowie Auftragsschweißen mittels Elektronenstrahl-Technik hat. Basierend auf den Erfahrungen aus der Vielfalt der Lohnanwendungen der ersten 25 Jahre hat pro-beam Anforderungen an Maschinenkonzepte spezifiziert, die der Markt nicht liefern konnte. So wurden in-house in den letzten zehn Jahren verschiedene Anlagentypen auf dem Gebiet der Elektronenstrahltechnik bis zur Serienreife entwickelt. pro-beam verfügt über eine Strahltechnik höchster Qualität und eine optimal leistungsfähige Strahlsteuerungstechnik. Auch gualitative Analysen der Schweißnähte über die Auswertung von verschiedenen Signalen können mit den herkömmlichen Strahlerzeugersysteme realisiert werden. Derzeit entwickelt die pro-beam-Gruppe mit über 50 Ingenieuren und externen Instituten weitere Anlagen und Verfahren, um dem Elektronenstrahl neue Anwendungsfelder zu erschließen. Ziel ist es, die technologische Spitzenstellung des Elektronenstrahlschweißens, des Elektronenstrahlbohrens, der Elektronenstrahl-Randschichttechnologien sowie die Spitzenstellung als Anlagenlieferant auszubauen und damit die Marktführerschaft der Firmengruppe zu festigen. pro-beam ist in den einschlägigen Arbeitskreisen von DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.), IIW (International Institute for Welding) und DIN (Deutsches Institut für Normung) vertreten. Die Philosophie des Unternehmens ist, die Kunden ausgehend von der verfahrenstechnischen Problemstellung bis zum Ende des Lebenszyklus eines Produktes partnerschaftlich zu begleiten. Zunächst gilt es dabei, den Kunden in Bezug auf Themen der Verfahrenstechnik – z.B. im Bereich der Fügetechnik – qualifiziert zu beraten. Hierbei liegt der Schwerpunkt der innovativen Lösungen von pro-beam auf dem Einsatz der strahltechnischen Verfahren, wobei die hauseigenen Erfahrungen sowohl aus der Laser- wie der Elektronenstrahltechnik im Zentrum der Expertise stehen. Sind die technischen Themen alle entsprechend adressiert, kann der Kunde Probeteile. Prototypen und Erstmuster bei pro-beam fügen lassen. Neben Einzelteilen können dann auch ganze Serien an den Lohnstandorten der Gruppe bearbeitet werden. Von der Sofort- bis zur Justin-time-Lieferung reicht der Lieferservice, wenn nötig rund um die Uhr. Wünscht ein Kunde die

Übertragung der Lohnfertigung in eine eigene in-house-Fertigung, so kann pro-beam ihm die entsprechende Anlagentechnik speziell entwickeln sowie bauen und liefern. Eine reibungslose Übertragung der Prozessparameter von der Lohnfertigung in die Eigenfertigung ohne entsprechende Oualitätsrisiken ist dabei unmittelbar gewährleistet. Auch eine zeitweise Vermietung von Anlagentechnik an unsere Kunden mit einem kurzzeitig hohen Bedarf an Produktionskapazitäten im eigenen Haus wurde bereits mehrfach realisiert. Wenn für ein auslaufendes Produkt beim Kunden noch eine entsprechende Ersatzteilversorgung sichergestellt sein muss, so kann diese wiederum problemlos über den probeam Lohnbetrieb streng bedarfsorientiert und kostengünstig sichergestellt werden. pro-beam hat sich mit dem beschriebenen strategischen Ansatz von der reinen Entwicklung technischer Lösungen im Bereich der Strahltechnik hin zu einem Dienstleister für komplexe Produktionsanforderungen mit höchsten Qualitätsansprüchen entwickelt. Zahlreiche Qualitätszertifikate zeugen von der entsprechenden Expertise. Für die Zukunft geht pro-beam davon aus, dass mit innovativen strahltechnischen Bearbeitungsverfahren noch viele technische Herausforderungen bewältigt werden können. Die Voraussetzungen dafür zu schaffen und dann die einzelnen Themen erfolgreich umzusetzen, das entspricht unserem Anspruch. Mit diesem Buch hoffen wir. einen Beitrag zum Verständnis und zur Verbreitung der faszinierenden Elektronenstrahltechnologie zu leisten. Sie war und ist die zentrale Kernkompetenz von pro-beam.

pro-beam AG & Co. KGaA Behringstr. 6 82152 Planegg Tel.: +49 89 899 233 0 Fax: +49 89 899 233 11 www.pro-beam.com

pro beam

Nicolas Freiherr von Wolff, Vorstandsvorsitzender der pro-beam-Gruppe

9. Die Autoren dieses Buches

(in alphabetischer Reihenfolge)

Dipl.-Ing. Volker Adam, geb. 1959

Vorstand pro-beam-Gruppe

Nach seinem Maschinenbaustudium an der Technischen Universität Braunschweig begann Volker Adam seine berufliche Laufbahn bei der Firma "ETN GmbH & Co.KG" als Leiter des FuE-Projektes Elektronenstrahlgroßkammeranlage. Von 1992 bis 1994 leitete er den Bereich Elektronenstrahltechnik bei ETN, 1994 zum Geschäftsführer bestellt, baute er den Betrieb zu einem leistungsfähigen Lohnschweißfachbetrieb aus. Mit der Integration der "ETN GmbH & Co.KG" in die "pro-beam AG & Co. KGaA" wurde Volker Adam als Vorstand der pro-beam Verwaltungs AG bestellt und zeichnet seither verantwortlich für Vertrieb & Marketing sowie Verfahrenstechnik der pro-beam Gruppe. Darüber hinaus leitet er als Vorstand des pro-beam application center Europe in Burg/Magdeburg den größten Dienstleistungsstandort für Elektronenstrahltechnologie weltweit, welcher über zwei der größten Elektronenstrahlkammeranlagen mit etwa 630m³ Kammervolumen verfügt und an dem knapp 80 Mitarbeiter beschäftigt sind.

Dipl.-Ing. Uwe Clauß, geb. 1968

Senior Sales Engineer der pro-beam systems GmbH

Uwe Clauß studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden und an der Heriot-Watt University in Edinburgh, Schottland. Seine Diplomarbeit verfasste er bei Harris Semiconductor, Mountaintop, PA, USA. Von 1995 bis 1997 war er Assistent am Lehrstuhl für Leistungselektronik an der Technischen Universität Dresden.





Es folgte die Beschäftigung als Vertriebsingenieur bei HIGHVOLT Dresden bis zum Jahr 2004. Im Rahmen seiner dortigen Tätigkeit verantwortete Uwe Clauß während seines Aufenthaltes in Manassas, VA, USA, den Aufbau der Vertriebsstruktur für den Nordamerikanischen Markt. 2004 wechselte Uwe Clauß als Projektingenieur zur pro-beam Anlagenbau GmbH, 2008 umfirmiert zu pro-beam systems GmbH, und ist dort seit 2006 verantwortlich für den Vertrieb International im Bereich Maschinen und Anlagen sowie Lohngeschäft. Er realisierte Projekte für Elektronenstrahlschweißanlagen und Perforationsanlagen im In- und Ausland.

Dr. h. c. Dietrich Frhr. von Dobeneck, geb. 1938 Vorsitzender des Aufsichtsrates der pro-beam AG & Co. KGaA und Vorstand der Dobeneck-Technologie-Stiftung.

Dietrich von Dobeneck studierte Physik an der Technischen Universität München, wo er weitere fünf Jahre als wissenschaftlicher Assistent blieb und im Bereich Plasmaphysik unter Prof. Krempl arbeitete. 1969 begann er bei Steigerwald Strahltechnik GmbH als Verantwortlicher für Marketing und Elektronenstrahlbohren und initijerte dort die Tiefdruckgravur mit dem Elektronenstrahl - ein Prozess dem 25 Jahre intensiver Forschung und Entwicklung folgten. Im Jahr 1974 gründete er in München mit einem Mitarbeiter und zwei gebrauchten Elektronenstrahl-Anlagen die Firma pro-beam als Lohnfertigungsunternehmen. 2001 übergab er die operative Geschäftsführung an die nächste Generation. Im Jahr 2010 erhielt er die Ehrendoktorwürde der TU Bergakademie Freiberg für sein wissenschaftliches Lebenswerk rund um die Elektronenstrahltechnik sowie für sein Engagement für den wissenschaftlichen Nachwuchs

Dr.-Ing. Thomas Bernhard Krüssel, geb. 1971 Geschäftsführer der pro-beam technologies GmbH

Dr. Thomas Krüssel studierte Maschinenbau in Hannover. 1999 bis 2001 leitete er die Abteilung Schweißtechnik am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie in Dortmund. Von 2001 bis 2004 war er u. a. Fachgruppenleiter "Mechanische Prüfung" am Institut für Werkstoffkunde in Hannover, wo er 2005 zum Thema "Zentrifugalprojektionsbeschichtung - iCPC - mittels Elektronenstrahl" promovierte. Für die probeam Gruppe ist Herr Dr. Krüssel seit 2004 tätig. Als Werksleiter plante und koordinierte er den Aufbau der pro-beam Verfahrenstechnik GmbH in Halle/Saale, die zum Jahreswechsel 2008/2009 in pro-beam technologies GmbH umfirmiert wurde. Als ihr Geschäftsführer zeichnet er seit 2009 für die Prozessentwicklung in der pro-beam Gruppe verantwortlich und ist in verschiedenen Forschungs- und Arbeitskreisgremien, wie dem DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.) und der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.), engagiert.





Dr. phil. nat. Thorsten Löwer, geb. 1966 Vorstand pro-beam-Gruppe

Dr. Thorsten Löwer studierte Physik an der Universität Frankfurt.

Er promovierte am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München und an der Universität Frankfurt. Von 1991 bis 1997 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in der Abteilung für Hochleistungslaser und Laserplasmen tätig und unternahm Forschungsaufenthalte in Japan und Frankreich.

Seit 1997 ist Herr Dr. Löwer bei pro-beam verantwortlich für den Bereich Forschung und Entwicklung, sowie für die pro-beam Anlagentechnik. Er ist in Arbeitskreisen des DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.), IIW (International Institute for Welding) und DIN (Deutsches Institut für Normung) engagiert. Seit 2004 ist er Mitglied des Vorstandes der probeam Gruppe.

Danksagung:

Die Autoren bedanken sich bei folgenden Kollegen, die sie bei Erstellung der Beiträge für dieses Buch mit Ihrem Fachwissen unterstützt haben: Herr Jürgen Fath, Herr Georg Fischer, Herr Dr. Michael Maaßen, Herr Alexander Maaz, Herr Eberhard Wagner.