

ELEKTRONENSTRAHL- SCHWEISSEN

Anwendungsbeispiele aus 30 Jahren
Lohnschweißpraxis

Dietrich v. Dobeneck



pro·beam

Elektronenstrahl- Schweißen

Anwendungsbeispiele aus 30 Jahren
Lohnschweißpraxis

Dietrich v. Dobeneck



Dietrich v. Dobeneck:
Elektronenstrahl-Schweißen
Anwendungsbeispiele aus 30 Jahren Lohnschweißpraxis

2. Auflage

© 2007 Alle Rechte bei pro-beam AG & Co. KGaA
Eigendruck im Selbstverlag
Printed in Germany

Inhalt:

Einführung	4
Elektronenstrahl-Schweißen nach werkstofflichen Gesichtspunkten	7
Elektronenstrahl-Schweißen von Stahl	7
Unlegierte Stähle und Baustähle	7
Niedrig- und hochlegierte Stähle	9
Nichtrostende Stähle	11
Gusseisen	14
Elektronenstrahl-Schweißen von Aluminium, Magnesium und ihrer Legierungen	15
Aluminium	15
Magnesium	19
Elektronenstrahl-Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen	21
Elektronenstrahl-Schweißen von Nickel- und Kobaltlegierungen	25
Reaktive und refraktäre Werkstoffe	26
Mischverbindungen	30
Verbundwerkstoffe	34
Elektronenstrahl-Löten	35
Elektronenstrahl-Schweißen unter verschiedenen konstruktiven Gesichtspunkten	37
Geringe Wärmeeinbringung	37
Verzugsarmut	40
Einsparen von Zerspanungsarbeit	43
Materialeinsatz entsprechend der Funktion	48
Zugänglichkeit für Strahl und Werkzeug	51
Dick-dünn Verbindungen	55
Kleinteile	57
Großbauteile	59
Reparaturschweißen mit dem Elektronenstrahl	62
Elektronenstrahl-Schweißen von Serien als Dienstleistung	66
Turbinenleitkränze	67
Elektronenstrahl-Schweißen von IHU-Nockenwellen	68
Schlussbemerkung	70
Herausgeber	71
Danksagung	72

Einführung



Abb. 1: Mit der kleinen handgeführten EB-Kanone wurden unter Weltraumbedingungen Reparaturschweißungen an der Raumstation MIR ausgeführt.

Als ich 1969 über die Sojus-Weltraummission der Russen zum ersten Mal auf das Elektronenstrahl-Schweißen aufmerksam wurde, wusste ich nichts über dieses Verfahren und doch war ich so fasziniert, dass ich mich entschloss, darauf meinen beruflichen Werdegang aufzubauen. Nach 5 Jahren in Vertrieb und Entwicklung von Elektronenstrahl-Anlagen, machte ich mich 1974 als Lohnschweißer selbständig. Aus dieser 30-jährigen Praxis möchte ich Ihnen Erfahrungen und Beobachtungen in Form von Anwendungsbeispielen nahe bringen, und Sie damit nicht nur zur intensiven Nutzung der konstruktiven und wirtschaftlichen Möglichkeiten des Elektronenstrahl-Schweißens anregen, sondern Ihnen auch helfen, Fehler bei der Umsetzung zu vermeiden.

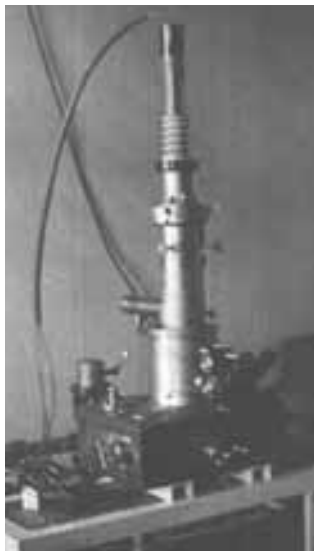


Abb. 2,3,4. Anfänge der EB-Technik.

Mit den ersten Laboraufbauten von elektronen-optischen Säulen (Abb. 2), die Mikroskopen glichen, wurde bereits 1949 die erste Bohrung (Abb. 3) und die erste Schweißnaht (Abb. 4) ausgeführt, aber erst nach der Entdeckung des sogenannten „Tiefschweißeffektes“ 1958 begann die wirtschaftliche Nutzung des Elektronenstrahl-Schweißens. Für das Atomunterseeboot Nautilus sollten 5mm tiefe Nähte in Zircaloy geschweißt werden. Die Anwendungen in den 60er Jahren waren weitgehend der Reaktortechnik und der Luft- und Raumfahrt vorbehalten, beides Branchen, die reaktive Werkstoffe, wie Titan- oder Zirkonium-Legierungen verwendeten, die vorteilhaft auch heute noch unter Vakuum geschweißt werden. Ende der 60er Jahre erkannte die Automobilindustrie den Vorteil des verzugsarmen Schweißens und so wurden seither weltweit über tausend Elektronenstrahl-Maschinen zum Fügen von Getriebeteilen eingesetzt. Das Lohnschweißen in jenen Jahren bestand vorwiegend in Verfahrensentwicklung an Prototypen und Kleinserien. Weitere Branchen kamen hinzu wie das Einhausen von Herzschrittmachern oder das Schweißen von Hüftprothesen für die Medizintechnik; viele Bauteile aus dem allgemeinen Maschinenbau oder der Elektrotechnik erweiterten das Anwendungsfeld. Schließlich

begann Mitte der 90er Jahre die Vergabe von Großserien aus der Automobil- und deren Zulieferindustrie. Voraussetzung für die wirtschaftliche Fertigung von Großserien war die Entwicklung der flexiblen Elektronenstrahl-Schleusen-Schweißanlagen. Flexibel, weil im Lohnbereich ständig andere Anforderungen gestellt werden und die in der Automobilindustrie üblichen Einzweckmaschinen für einen Lohnbetrieb deshalb ungeeignet sind. Schleusentechnik, weil die Nebenzeiten zum Evakuieren und Belüften aus Kostengründen entfallen mussten. Heute gehören zum Lieferumfang vor- und nachgelagerte Arbeitsschritte, wie Eingangsprüfung, Reinigen, Montieren, Entmagnetisieren, Vorwärmen und insbesondere qualitätssichernde Maßnahmen und deren Dokumentation. Und es deutet sich bereits die nächste Veränderung an: die sogenannten „Betreibermodelle“. D.h. die zu schweißende Ware kommt nicht mehr zum Lohnbetrieb, sondern der Lohnschweißer stellt seine Anlage in die Fertigungslinie des OEM und betreibt sie dort mit eigenem Personal. Der Trend der Großindustrie zur Auslagerung schwieriger Prozesse, die nicht ihre Kernkompetenz darstellen, eröffnet dem Dienstleister große Chancen, aber verlangt von ihm auch erhebliche Entwicklungsanstrengungen auf der Geräteseite und der Verfahrenstechnik, um durch Automatisierung und qualitätssichernde Maßnahmen dem Kostendruck standhalten zu können.



Abb.5: Geschweißte Hüftprothese von 1963.



*Abb.6
Schaltrad von 1964.*



Abb. 7: Schleusen-Shuttle Anlage mit 0,6 m³ Kammer-volumen. Über die geöffnete Schleuse (re.) findet der automatische, schnelle Teilewechsel statt.



Für mich persönlich macht gerade das Wechselspiel zwischen ständig neuen technischen Herausforderungen zum Schweißen neuer Produkte aus den verschiedensten Branchen, der Umgang mit kreativen Konstrukteuren oder Werkstoffspezialisten und der unternehmerischen Pflicht, das wirtschaftliche Gleichgewicht zwischen Risiko und Wachstum zu halten, den besonderen Reiz des Elektronenstrahl-Lohnschweißens aus.

Abb. 8: Mobile Strahlkanone am 3-Meter Roboterarm mit Verfahrweg 12 x 7 m.

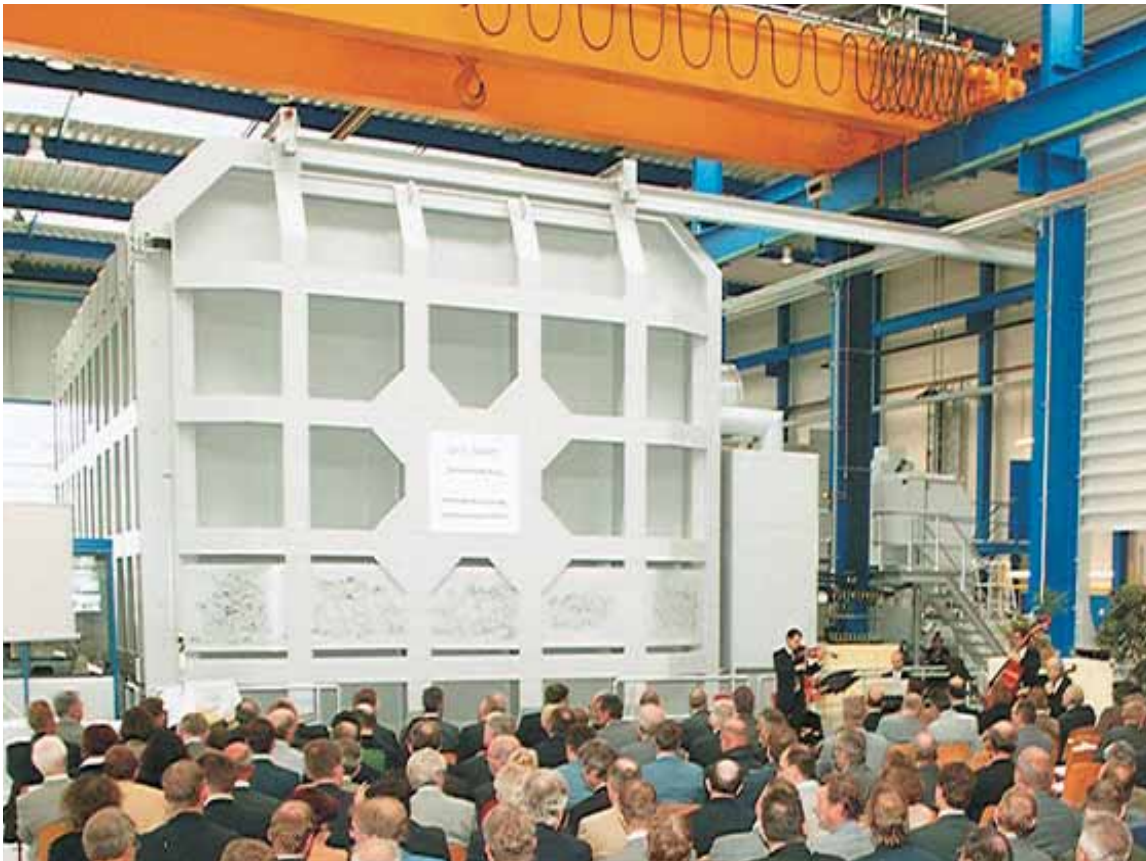


Abb. 9: Großkammer-Elektronenstrahl-Schweißanlage anlässlich der Inbetriebnahme in Burg 2004, Kammerinnenmaße: 7x7x14 m (=630 m³).

Elektronenstrahl-Schweißen nach werkstofflichen Gesichtspunkten

Elektronenstrahl-Schweißen von Stahl

Die vielen Legierungsmöglichkeiten von Eisen mit anderen Metallen oder Nichtmetallen erlauben es, Werkstoffe mit einer Vielfalt von Eigenschaften für die unterschiedlichsten Verwendungszwecke zu entwickeln. In der Praxis lassen sich die meisten Stähle ohne besondere Maßnahmen (z.B. Vorwärmen) und ohne Zusatzwerkstoffe mit dem Elektronenstrahl (EB) schweißen.



Abb. 10: Schliff einer 200 mm tiefen Naht in St 52.3 horizontal geschweißt mit Badunterstützung.

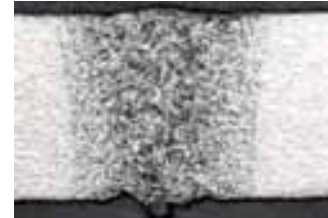


Abb. 11: Blech St 52.3, 1 mm dick.



Abb. 12: Turbinengehäuse aus warmfestem Stahlguss GS-15 Mo 3.

Unlegierte Stähle und Baustähle

Stähle mit $<0,5\%$ Si, $<0,8\%$ Mn, $<0,1\%$ Al gelten als unlegiert. Unlegierte Stähle und Baustähle, deren Verunreinigungen an der Obergrenze der nach EN 10025 zulässigen Grenzwerte für $S < 0,05\%$, $P < 0,08\%$ und $N < 0,01\%$ liegen, sind für das Elektronenstrahl-Schweißen (EBW) weniger geeignet. Bei deutlich reduzierten Verunreinigungen können jedoch gute

Schweißergebnisse bis zu mehreren 100 mm Dicke erzielt werden (z.B. St 52.3 oder Ck 15) (Abb. 10).



Abb. 13:
Nähte der Spann-
vorrichtung.



Abb. 14: Spannvorrichtung aus St 52.3.

Auszuschließen sind unberuhigte Stähle und Automatenstähle. Bei zunehmendem C-Gehalt ist ab 0,25% mit einer Härtezunahme zu rechnen. Ab 0,35% Kohlenstoff (z.B. Ck 45) ist diese erheblich und Ck 60 ist nur noch in geringer Dicke bedingt schweißgeeignet.



Abb. 15:
Schweißkonstruktion
eines Maschinen-
Gestells aus St 52.3
als Ersatz für Gussteil.



Abb. 16: Detail aus Abb. 15.



Abb. 17: Vergütetes Blech und Nabe aus Ck 35.

Niedrig- und hochlegierte Stähle

Niedrig legierte Stähle, wie z.B. Feinkorn-Stähle, Einsatz- und Nitrier-Stähle (Randschicht im Schweißbereich entfernt oder noch nicht angebracht), warmfeste Baustähle (Abb. 12), sowie die meisten Vergütungsstähle, sind schweißgeeignet.



Abb. 18: Standardwerkzeug mit Verlängerungs-Bohrstange aus 16 Mn Cr 5, Schweißtiefe 20 mm.

Ein erhöhter Kohlenstoffgehalt (über 0,25%) führt wegen des schnellen Wärmezyklus zu starker Aufhärtung, die durch Vorwärmen oder Wärmenachbehandlung abgebaut werden kann. (Abb. 111)



Abb. 19: 16 Mn Cr 5 ist der am häufigsten verwendete Werkstoff für Zahnradkombinationen in Schaltgetrieben.

Bei Cr Mo- (Abb. 22) und Ni Cr Mo- (Abb. 23) Stählen, die teilweise heißrissempfindlich sind, kann der Rissbildung durch geeignete Zusatzwerkstoffe entgegengewirkt werden, bei gleichzeitiger Verbesserung der Zähigkeitswerte.



Abb. 20, 21: Doppelzahnrad aus 17 Cr Ni Mo 6, Einschweißtiefe 9 mm.

Abb. 22: Schliff 25 Cr Mo 4, 3 mm tief.



Abb. 23: Zahnkörper aus 21 Ni Cr Mo 2.

Viele Anwendungen im Maschinen-, Triebwerks- und Getriebebau bestehen aus hochfesten Legierungen, die ohne Wärmenachbehandlung EB-geschweißt werden können. Bei niedrig legierten Stählen mit C-Gehalt zwischen 0,25% bis 0,5% (z.B. 34 Cr Mo 4) ist mit Aufhärtung zu rechnen, bei $C > 0,5\%$ mit Heiß- und Kaltrissen (z.B. 100 Cr 6). Je nach Form und Abmessung der Fügestelle, d.h. konstruktionsabhängig, sind Manganhartstähle (z.B. X 120 Mn 12) oder nicht magnetisierbare Stähle (z.B. X 40 Mn Cr 18 5) schweißbar.



Abb. 24: Torsionssteife, biegeeweiche Kupplungswelle aus 31 Cr Mo V 9 oder 30 Cr Ni Mo 8.



Abb. 25: Verlängerung eines Zahnrohres aus 42 Cr Mo 4 V um 250 mm, Schweißtiefe 20 mm, als Änderung eines angearbeiteten Bauteils.

Nichtrostende Stähle

Die meisten rost- und säurebeständigen Stähle, wie austenitische, ferritische Chromstähle und Duplexstähle (Abb. 29, 30) sind gut EB schweißbar.



Abb. 26: Feinschweißung in Blech aus X 22 Cr Ni 17, 0,5 mm dick. Schweißleistung 0,1 kW.



Abb. 27: Tiefschweißung in X 5 Cr Ni 18 9, 1 mm breit, 25 mm tief. Schweißleistung 2,7 kW.



Abb. 28: Schweißnaht in X 6 Cr Ni Ti 18 10, 3 mm tief, Schweißleistung 1,1 kW.



Abb. 29: Rohrlängsnaht in Duplexstahl, 7 mm breit, 22 mm tief, Schweißleistung 15 kW.

Das Ausgasen von Stickstoff bei Duplex- und austenitischen Stählen mit erhöhtem N-Gehalt, führt zu Poren- und Spritzerbildung. Hitzebeständige (z.B. X 7 Cr 13) und hochwarmfeste Chrom-Stähle mit einem Ni-Gehalt <2% (z.B. X 20 Cr Mo V 12 1), ebenso wie solche mit Ni > 2% und Mo (z.B. X 12 Cr Ni 18 8 oder X 10 Cr Ni Mo Ti 18 10) sind schweißgeeignet; auch ausscheidungshärtende und martensitische nichtrostende Stähle sind EB-schweißgeeignet (z.B. X 2 Ni Co Mo 18 9 5).

Schließlich sind kaltzähe Stähle mit besonderer Wärmeausdehnung (z.B. 12 Ni 19 oder Ni 36) gut



Abb. 30: Dekanter aus Duplexstahl, 2,8m hoch, X 2 Cr Ni Mo N 22 5, Schweißtiefe 20 mm.



Abb. 32: Schlanke, 45 mm tiefe Naht in austenitischem Stahl.



Abb. 31: Ventilkombinationen aus der Getränkeindustrie. Aus Hygienegründen sind korrosionsbeständige, glatte Nähte ohne Restspalte gefordert.



Abb. 33, 34: Hochdruckarmaturen.

schweißgeeignet, ebenso wie ledeburitische Kaltarbeitsstähle mit C-Gehalt $> 1,5\%$ (z.B. X 165 Cr Mo V12 oder X 210 Cr 12). Warmarbeitsstähle wie X 30 W Cr V 9 3 und 38 Cr Mo V 5 1 sind nur bedingt schweißbar, während Schnellarbeitsstähle im wei-

chen Zustand wie S 6-5-2 oder S 12-1-4-5 im allgemeinen gut schweißgeeignet sind.



Abb. 35: Filtermodule aus rostfreiem Stahl.



Abb. 36, 37: Umfangsnaht eines Filtermoduls und Stirnansicht.

Nichtrostende Stähle finden ihre Hauptanwendung im Maschinenbau für Lebensmittel- und Getränkeindustrie, der pharmazeutischen und chemischen Industrie, sowie im Anlagenbau der petrochemischen und off-shore Industrie.



Abb. 38: Hochdruckrohr-Formstücke aus X 6 Cr Ni Mo Ti 17 12 2, Schweißtiefe 15 – 26 mm.



Abb. 39: Detail aus Abb. 38.

Gusseisen

Gusseisen, sowohl lamellarer Guss (GGL-25), Kugelgraphitguss (GGG-50) als auch schwarzer Temperguss (GTS-45) sind nicht schweißgeeignet. In Verbindung mit anderen Werkstoffen mit und ohne Zusatzwerkstoff jedoch bedingt schweißbar (siehe Mischverbindungen). (Abb. 110, 111)



Abb. 40: Schlauchporen beim Schweißen von GGG-60.

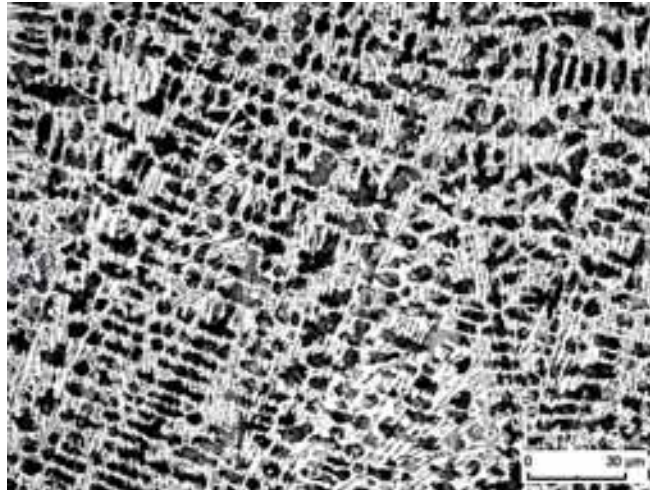


Abb. 41: Ledeburitisches Gefüge von schnell erstarrtem Gusseisen.

Weicheisen

Im Elektromotoren- und Transformatorenbau finden sich Anwendungen des Elektronenstrahl-Schweißens von Weicheisen und Siliziumeisen. Flache, breite Nähte liefern eine verlustarme Verbindung.



Abb. 42: Bruchfläche.



Abb. 43: Transformatorblech aus Siliziumeisen.

Elektronenstrahlschweißen von Aluminium, Magnesium und ihren Legierungen

Aluminium

Aluminium hat als Werkstoff für den Leichtbau eine ständig wachsende Bedeutung im Transportwesen, sowohl in der Luftfahrt, dem Automobilbau, der Schifffahrt und im Waggonbau. Aus Sicht des Schweißers spielt nicht nur die Legierung, sondern auch das Verfahren zur Herstellung des Bauteils und seine Konstruktion eine große Rolle. Knetlegierungen die geschmiedet oder extrudiert werden, sind gewöhnlich gut schweißgeeignet. Rein Al, Al-Mn, Al-Mg, sowie aushärtbare Legierungen wie Al Mg Si 1, Al Cu Mg 1 und Al Zn Mg Cu 1,5, soweit konstruktiv nicht schrumpfbehindert, sind schweißgeeignet.

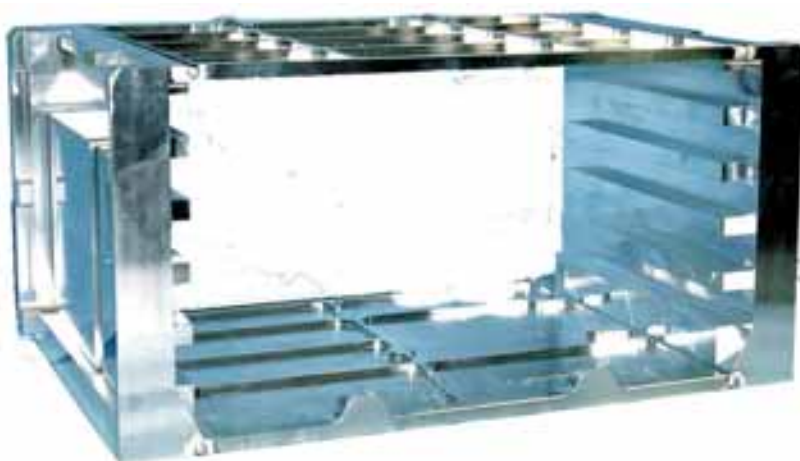


Abb. 44: Präzisionsbaugruppe aus gefrästen Aluminiumplatten durch Elektronenstrahl-Schweißen zu einem Gehäuse gefügt.

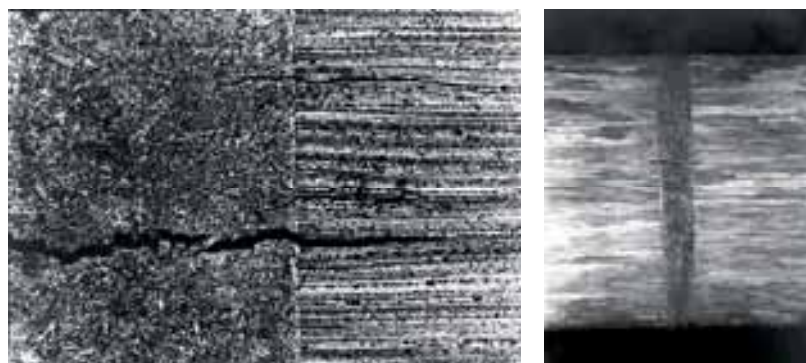


Abb. 45, 46: Bei großer Schweißtiefe und hoher Schweiß-Geschwindigkeit können sowohl Heiß- wie Schrumpfrisse auftreten (Al Mg Si 1).



Abb. 47: In Aluminium lassen sich besonders schlanke Schweißnähte erzielen, hier z.B.: 200 mm, 150 mm bzw. 50 mm tief.



Abb. 48:
Wärmetauscher als
Druckguss-Grund-
Körper mit Deckel aus
Knet-Legierung.



Abb. 49: Pumpengehäuse (Al Si 12) und Wärmeüberträger
(Al Si 10 Mg Mn) aus Aluminium-Druckguss, EB-geschweißt.

Bei gegossenen Bauteilen hängt die Schweißbarkeit sowohl von der Legierung (z.B. G-Al Si 12, G-Al Si 5 Mg, G- Al Mg Si und G-Al Cu 4 Ti) vor allem aber von der Gussart ab. So ist vor allem der Druckguss, wegen der Aufnahme von Wasserstoff und Sauerstoff aus den Trennmitteln während des Gießens, ein schwierig zu schweißender Werkstoff. Die Löslichkeit der eingeschlossenen Gase im Metall nimmt mit höherer Temperatur zu. Dies bewirkt, dass während des Schweißprozesses das Gas in die Schmelze diffundiert und da diese vom Rand her abkühlt, übersteigt schließlich der Gasgehalt die Löslichkeitsgrenze und bildet Poren bzw. einen Überdruck, der zu Auswürfen führt. Durch Überschweißen mit z.B. drei hintereinander herlaufenden Strahlen entweicht das Gas und die Poren verschwinden. (Abb. 50)



Abb. 50: Durch 2 bzw. 3 hintereinander laufende Schweißstrahlen lässt sich in G-Al-Werkstoffen, die Porenbildung unterdrücken.

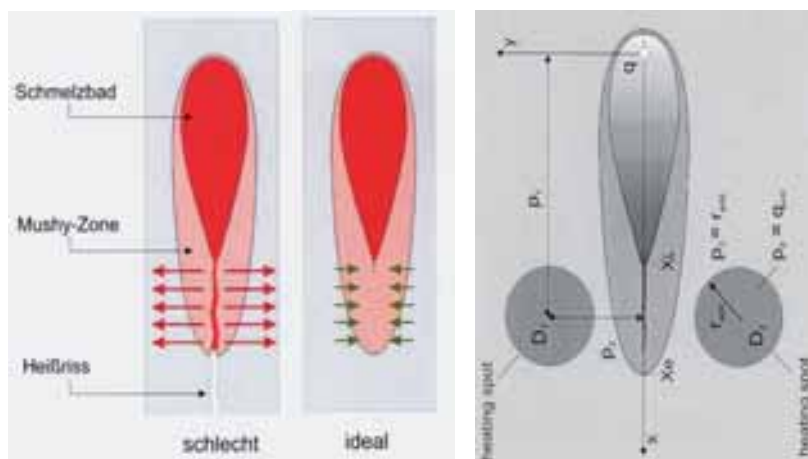


Abb. 51, 52: Durch Aufbau von Druckspannungen, z.B. durch seitlich angebrachte Wärmefelder, kann die Rissbildung unterdrückt werden. (Quelle NMB)

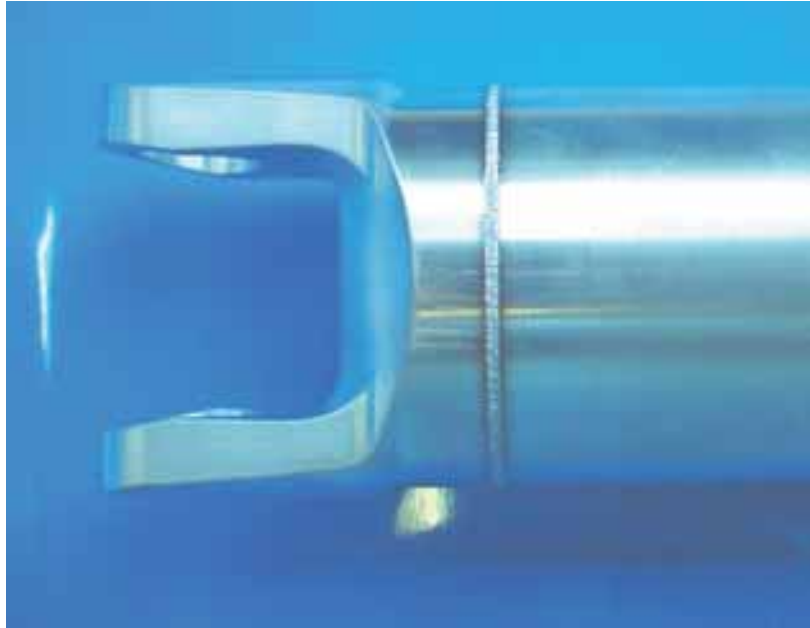


Abb. 54: Schliff der Felge.

Abb. 53: Motorradfelge aus Aluminium-Druckguss mit Schliff, auf dem die Kosmetik-Decklage erkennbar ist.

Kritisch beim Schweißen sind weiter Legierungen, die zur Heißrissbildung neigen (6000er Serie Al-Mg-Si) und Legierungen bei denen Bestandteile mit niedriger Siedetemperatur sich vorzeitig verflüchtigen (5000er Al-Mg-Mn und 7000er Al-Zn Serie), so dass eine veränderte Legierungszusammensetzung entsteht, die die Werkstoffeigenschaften beeinträchtigt. Bei heißrissempfindlichen Werkstoffen ist besonders darauf zu achten, dass während der Erstarrung der Schmelze keine durch Schrumpfbehinderung entstehenden Zugspannungen auftreten. (Abb. 51, 52)

*Abb. 55: Kardanwelle
mit Durchmesser
80 mm aus, Al Mg Si 1.*



*Abb. 56: Feinschweißung
in 0,7 mm dickem Alu-
blech.*



Radialnähte sind deshalb vorzuziehen, da sie frei schrumpfen können. Besonders bei Feinschweißungen machen sich Oberflächenverschmutzung bzw. Oxidation negativ bemerkbar. Reinigen kurz vor dem Schweißen verbessert das Fließverhalten und gleichmäßige Benetzen der Oberfläche (Abb. 56). Im gebeizten Zustand wurde mit halber Streckenenergie eine glattere Naht erzielt, verglichen mit einer stark oxidierten Oberfläche.

Magnesium

Magnesium spielt als Leichtbauwerkstoff im Automobilbau, der Raumfahrt, aber auch als Abschirmung für Hochfrequenzfelder in der Telekommunikation eine wichtige Rolle. Die häufigste Verwendungsform sind Gusslegierungen und hier speziell der Druckguss, mit der Problematik der hohen Wasserstofflöslichkeit. Sowohl bei Guss wie bei Knetlegierungen wird die Schweißbarkeit mit der Zunahme von Legierungselementen herabgesetzt, da sich die Heißrisseignung erhöht. Legierungen mit 6% bis zu 9% Aluminium und bis zu 1% Zink sind jedoch gut schweißgeeignet (z.B. AZ 91).

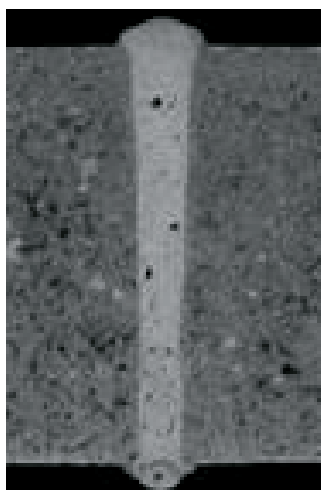


Abb. 57 (li): Schliff durch 5 mm dickes AZ 91.

Abb. 58 (re.): Hohlleiter für Satelliten-Antenne aus AZ 31. Öffnung zur Innenbearbeitung wurde zugeschweißt.



↔
Strahl



Abb. 59, 60: Die gute Schweißbarkeit von DG-AM 50 erlaubt interessante konstruktive Möglichkeiten (Schweißtiefe: 20 mm).

Legierungen mit Zinkgehalt $>3\%$ (z.B. ZK 60) sind nicht schweißgeeignet, außer die Fugestelle ist nicht schrumpfbehindert ausgeführt. Dann ist zum Beispiel auch ZK 60 schweißgeeignet. (Abb. 62.) Magnesium-Legierungen mit Aluminium und Mangan sind als Knetlegierung gut schweißgeeignet. Über AS-Guss-Legierungen (Aluminium und Silizium), beziehungsweise AE-Gusslegierungen (Aluminium und Seltene Erden) liegen nur wenige gesicherte Schweißergebnisse vor; sie scheinen jedoch schweißgeeignet.

Einphasig erstarrende Legierungen sind schweißgeeignet, während Legierungen mit niedrigschmelzenden Beimengungen zur Heißrissbildung neigen. Ähnlich wie beim Elektronenstrahl-Schweißen von Aluminium-Druckguss lässt sich auch bei Magnesium durch Mehrbad-Schweißen die Porenbildung reduzieren.



Abb. 61: Schliff durch Schmiedeteil aus AZ 80 und Stirnblech aus ZK 60.



Abb. 62: Rennfelge aus AZ 80, stirnseitig geschweißt.

Die Schweißverbindungen der Magnesium-Legierungen aus Druckguss AM 50, AM 60, AZ 91, AS 21 und AE 42 und der Knetlegierungen aus AZ 31 und AZ 61 erreichen 80-95% der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs bei geringer Dehnung.

Elektronenstrahl-Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit entzieht Kupfer dem Schmelzprozess viel Energie. Da kommt die hohe Energiedichte im Elektronenstrahl, die nur ein kleines Schmelzvolumen erzeugt, dem Schweißen von Kupfer ideal entgegen. Um die Wärmeverluste klein zu halten, ist mit größtmöglicher Geschwindigkeit zu schweißen. Störend ist dabei ein hoher Gasgehalt, wie er vor allem im E-Kupfer vorkommt (O_2 und $H_2 > 30$ ppm), während SE, SF und OFHC Kupfer gut schweißgeeignet sind.



*Abb. 63, 64:
Schweißnaht in Ring
aus SE-Kupfer,
35 mm tief.*



*Abb. 65, 66:
Kühlkörper mit aufgeschrumpftem Mantel,
stirnseitig geschweißt.*



Abb. 67: Eingusskokille.



Abb. 68: Eingusskokillen für die Stahlindustrie aus Cu Cr Zr, Schweißtiefe: 40 mm.

Kupferlegierungen mit Beimengungen, die bei niedriger Temperatur verdampfen, wie z.B. Messing (Cu Zn), Neusilber (Cu Ni Zn) und Alpaka (Cu Ni Sn Pb) sind dagegen nicht schweißgeeignet, können aber eventuell mit dem Elektronenstrahl gelötet werden. Kupferwerkstoffe wie Nickelbronze, Zinnbronze, Aluminiumbronze oder Berylliumbronze sind dagegen sehr gut schweißgeeignet, ebenso Kupfer mit geringen Legierungszusätzen wie Cu Be 2.

Abb. 69, 70:
Über tausend EB-
geschweißte Spann-
bügel aus Cu Be 2
befinden sich im Asdex
Fusionsreaktor.



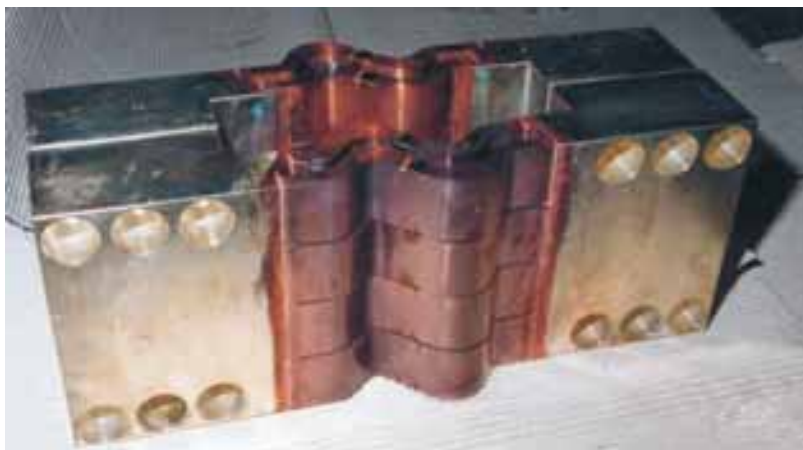


Abb. 71: Hochstrom-Dehnbänder für Kraftwerke. Ausführung mit Lamellenbändern und versilberten Anschlüssen.



Abb. 72: Detailansicht aus Abb. 71.

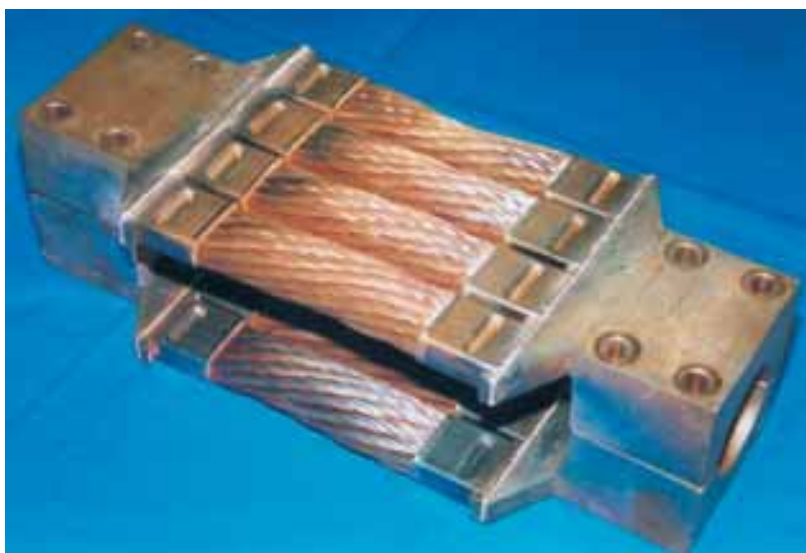


Abb. 73: Hochstrom-Verbindungen für Kraftwerke. Ausführung mit verpressten Kupferseilen.



Abb. 74: Detailansicht aus Abb. 73.



Abb. 75: Hochstrom-Leitungen für Verzinnungsanlage mit Innenkühlung.



Abb. 76: Detail zu Abb. 75, eckige „Rundnaht“ 15 bis 40 mm Schweißtiefe, CNC-gesteuert.

Wegen der guten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit von Kupfer wird dieser Werkstoff vor allem in Anwendungen eingesetzt, bei denen diese Eigenschaften zum Tragen kommen: bei Hochstrom-Verbindungen und bei Wärmetauschern.



Abb. 77: Kupfer-Absorber eines Solarkraftwerkes. Unter Verwendung von Parabolspiegeln und einer Heat-Pipe wird Heißdampf erzeugt, der eine Dampfturbine antreibt.



Abb. 78, 79: Kühlkörper für experimentelle Forschungsanlagen.

Abb. 80: Messingklemme mit Löt- und Schweißverbindung an Kupfer.



Elektronenstrahl-Schweißen von Nickel- und Kobalt-Legierungen,

(auch Superlegierungen oder Hochtemperaturlegierungen genannt)

Reinnickel und Reinkobalt, ebenso wie viele Ihrer Legierungen Ni Mn 2, Ni Cr 80 20, Ni Cu 30 Fe, sind Elektronenstrahl schweißgeeignet. Die hochlegierten ausscheidungshärtenden Nickelbasis Superlegierungen (z.B. Inconel 718) neigen zwar während des konventionellen Schweißens zu Mikrorissen, verursacht durch die Bildung von Eutektica. Aber der schnelle Temperaturzyklus, verbunden mit hohen Abkühlraten beim Elektronenstrahl-Schweißen und die geringen Schrumpfungen aufgrund der schlanken EB-Nähte, wirken der Rissbildung entgegen. Um die hohe Kriechfestigkeit von umwandlungshärtenden Ni-Basis Superlegierungen (z.B. Inconel 625) zu bewahren, darf der Schweißprozess möglichst nicht zu einer Kornverfeinerung führen. Die geringe Wärmebringung beim EB-Prozess ist auch hier von Nutzen. Niob-stabilisierte Legierungen sind Heißriss empfindlich.



Abb. 81: 6 mm tiefe Schweißung in Nimonic 105.

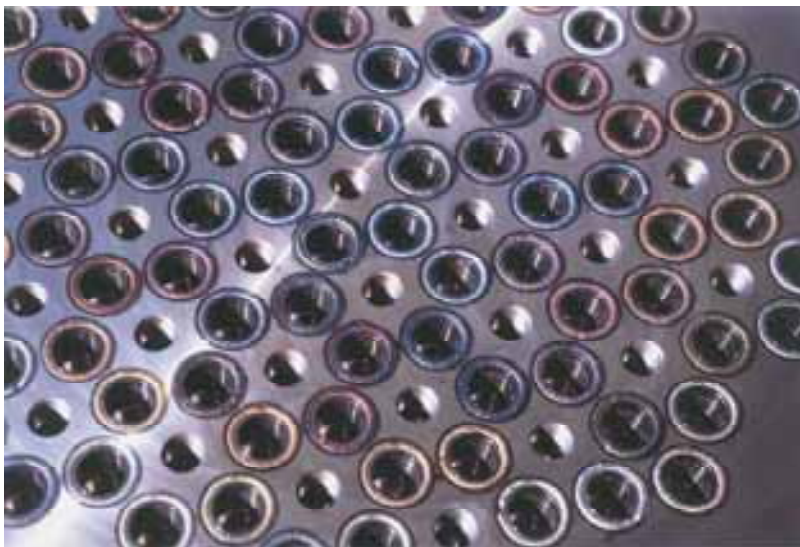


Abb. 82: Düsenplatte des Ariane-Triebwerks aus Inconel 718 mit über 400 eingeschweißten Hülsen aus Inconel 718 oder X 5 Cr Ni Nb 18 10.



Abb. 83, 84, 85: Schweißsituation (li.), Schliff Inco 718 mit Inco 718 (mi.), Schliff X 5 Cr Ni Nb 18 10 mit Inco 718 (re.).

Hochwarmfeste Co-Legierungen (MAR-M509) und korrosionsbeständige Co-Legierungen (Vitallium, Protasul) sind gut schweißgeeignet, verschleißbeständige Co-Legierungen (Stellit) sind je nach Zusammensetzung schweißgeeignet, nicht jedoch Hartstoffe mit hohem Carbidgehalt in Kobaltmatrix.

Abb. 86, 87: Medizinische Implantate, wie Herzschrittmacher oder Hüftgelenke werden aus körperverträglichen Kobalt-Legierungen hergestellt.



Reaktive und refraktäre Werkstoffe

Reaktive Werkstoffe wie Titan, Zirkonium, Tantal, Vanadium oder Niob haben eine hohe Affinität zu Sauerstoff und Wasserstoff, besonders bei hohen Temperaturen. Hier ist das EB-Schweißen unter Vakuum besonders vorteilhaft. Dabei muss der gesamte Temperaturzyklus vom Aufschmelzen bis zur Erstarrung und zum vollständigen Erkalten im Vakuum ausgeführt werden. Die reaktiven Werkstoffe werden gewöhnlich im Hochvakuum (10^{-4} mbar) geschweißt. Niob bei Verwendung als supraleitendes Bauteil in Teilchenbeschleunigern sogar bei 10^{-6} mbar, da einzelne in die Schweißnaht eingelagerte Fremdmoleküle die Sprungtemperatur des Supraleiters verändern und zu „hot spots“ führen.

Abb. 88: Supraleitende Kavität eines Teilchenbeschleunigers aus Niob mit bis zu 50 EB-Nähten.



Alpha- und Alpha-Beta- (z.B. Ti 6 Al 4 V) Legierungen sind in der Luft- und Raumfahrtindustrie für sicherheitsrelevante Bauteile weit verbreitet, wobei

ihre Zähigkeitseigenschaften beim Schweißen weitgehend erhalten bleiben. Wegen der geringen Duktilität von Titanlegierungen sollen Eigenspannungen im Bauteil vermieden werden. Dies wird erreicht, indem im lösungsgeglühten Zustand die Naht voll durchgeschweißt wird. Verunreinigungen, sowohl in der Legierung, wie an der Oberfläche des Fügebereiches können die Nahteigenschaften beeinträchtigen und zu Rissen führen. Deshalb gelten für kritische Anwendungen aufwändige Reinigungsvorschriften (siehe Merkblatt DVS 3213).



Abb. 89: Ober- und Unterraupen des Reaktionsbehälters.



Abb. 90: Reaktionsbehälter aus Titan.



Abb. 91: Hüftgelenk aus Titanlegierung.

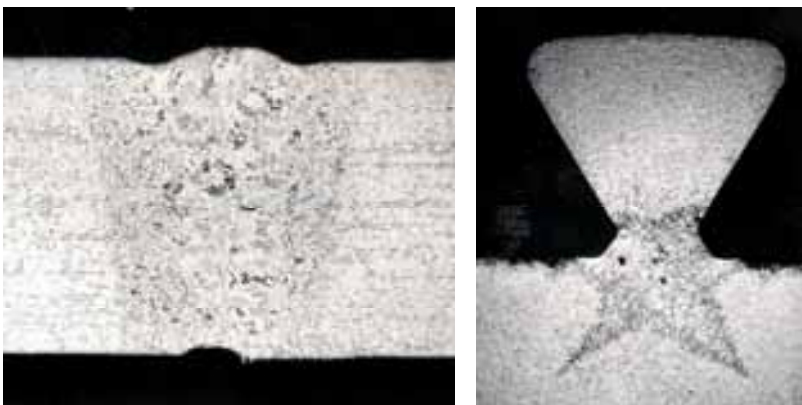


Abb. 92, 93: Schliff Ti 5 Al 2,5 Sn und Schliff eines Gitters aus dem chemischen Apparatebau (2 Kehlnähte, Ti 6 Al 4 V).

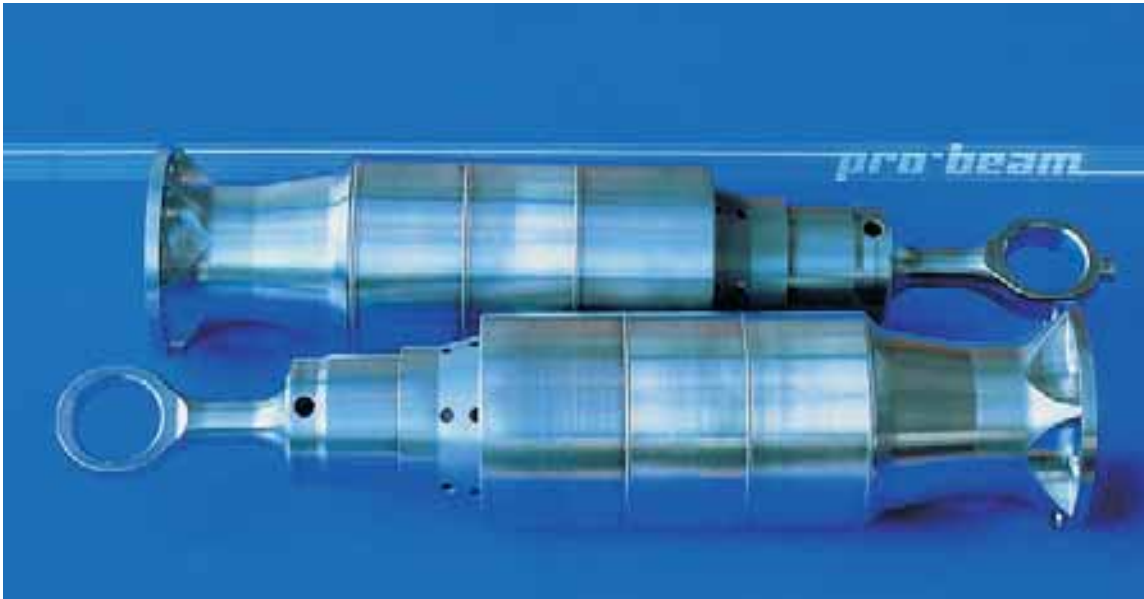


Abb. 94: Schwingungs-Dämpfer von Hubschrauber Rotorblätter aus Titan mit 5 EB-Nähten gefügt.

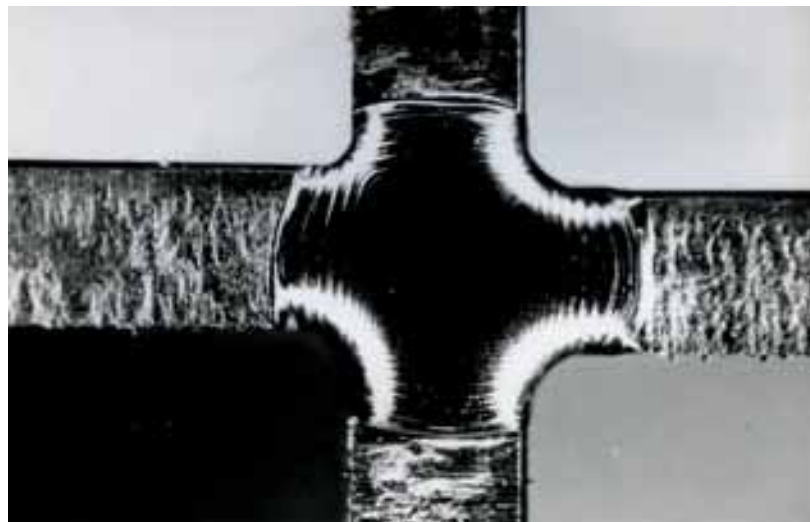


Abb. 95: Kreuzungspunkt eines Abstandsgitters für Brennstäbe aus Zr 2.



Abb. 96: Brennstab aus Zircaloy.

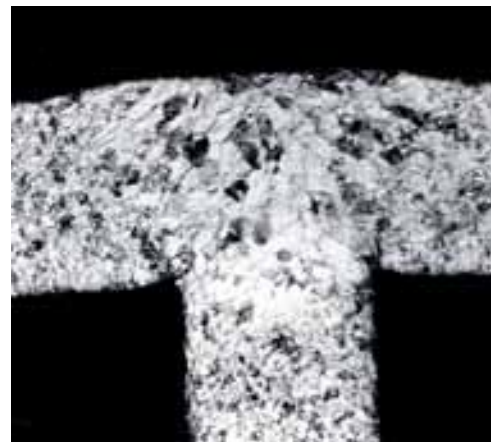
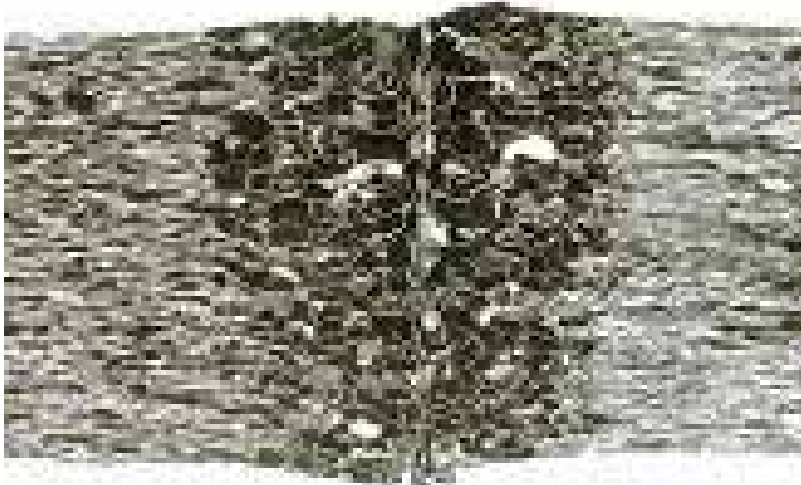


Abb. 97: Schliff zu Abb. 95

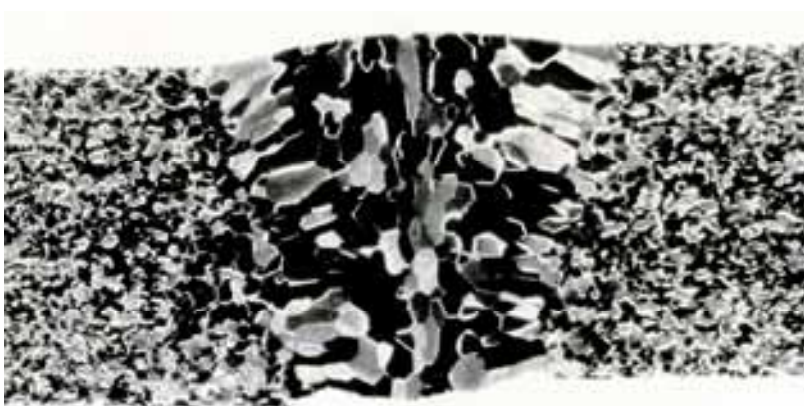
Refraktäre Werkstoffe werden beim Schweißen wegen der Grobkornbildung sehr spröde, sind aber bei geringen Wandstärken bedingt schweißgeeignet (Abb. 109).



*Abb. 98:
Fahne aus Wolfram,
Drahtdurchmesser und
Fahne 0,5 mm, gepulst
geschweißt*



*Abb. 99:
Schliff einer Schweiß-
naht in Wolfram
Dicke: 3 mm*

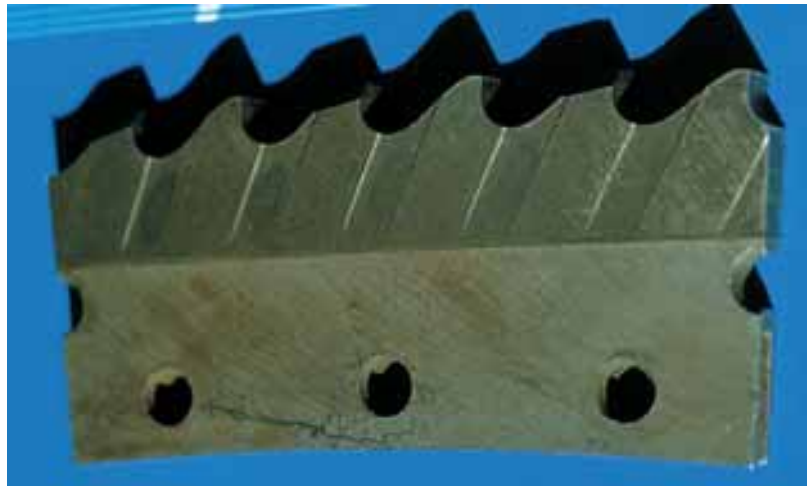


*Abb. 100:
Schliff einer Schweiß-
naht in Molybdän
Dicke: 1 mm.*

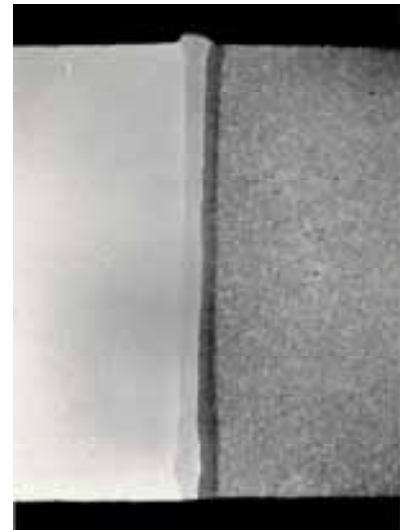
Mischverbindungen

Das Verschweißen unterschiedlicher Werkstoffe mit dem Elektronenstrahl ist zwar grundsätzlich zwischen allen Metallen möglich, auch mit solchen, die weit auseinander liegende Schmelzpunkte aufweisen, aber ob die entstehende Schweißnaht die gestellten Anforderungen erfüllt, ist im Einzelfall zu prüfen. Nur Werkstoffe, die unbeschränkt miteinander legieren sind problemlos schweißgeeignet; bilden sie

*Abb. 101:
Kaltsägensegment aus
Schnellarbeitsstahl
S 6-5-2 mit Ck 45 in
weichem Zustand
geschweißt, spart 50%
des teuren HSS.*



*Abb. 102: St 37 mit
X 2 Ni Co Mo 18 9 5,
100 mm Schweißtiefe.*



*Abb. 103: X 18 Cr Ni W mit
17 Mo V, 14 mm Schweißtiefe.*

intermetallische spröde Phasen, so weist die Naht gewöhnlich keine ausreichende Festigkeit auf, kann aber z.B. vakuumdicht sein. Ist nur eine beschränkte Löslichkeit der zu verbindenden Werkstoffe gegeben (z.B. 2% Fe in Al), dann gibt es zwar theoretisch die Möglichkeit durch Versetzen des Strahls 2% Eisen

und 98% Aluminium aufzuschmelzen, aber eine völlig homogene Durchmischung ist technisch nicht erreichbar. In einer praktischen Schweißung wird sich am Rande der Schmelze immer ein Konzentrationsgefälle zum Grundmaterial hin einstellen, das die Löslichkeitsanforderungen nicht erfüllt. Solche übersättigten festen Lösungen bilden oftmals die Grundlage für verbesserte Eigenschaften von Randschichten.

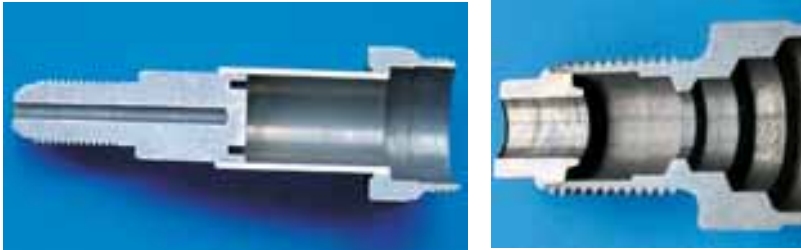


Abb. 104, 105:
Typische Anwendungen für Austenit-Martensit- (sog. schwarz-weiß) Schweißverbindungen sind Magnetventile.

Im Falle von schwarz-weiß Verbindungen wird durch niedrigen Kohlenstoffgehalt des martensitischen Partners Chrom Carbid Bildung verhindert, so dass die Schmelze gute Festigkeitswerte aufweist. Kritisch ist dabei evtl. die Wärmeeinflusszone im C-Stahl, die durch den Temperaturzyklus in einem schmalen Bereich angelassen wird und dort ihre Festigkeitswerte verliert. Zu beachten ist, dass unterschiedliche Werkstoffe meist einen unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen und durch den Temperaturzyklus des Schweißens beim Abkühlen erhebliche Längsspannungen in der Schweißnaht auftreten (Scherkräfte), die zu Verformungen des Bauteils führen. Durch asymmetrisches Schweißen (Strahl wird nicht in Fugenmitte positioniert) kann dem in Grenzen entgegengewirkt werden.



Abb. 106: Turboladerwelle aus Automatenstahl und Schaufelrad aus Inconel.



Abb. 107: Kipphebel aus 100 Cr 6 und Ck 60.

Die 4 nebenstehenden Werkstoffe gelten im allgemeinen als nicht schweißgeeignet, als Mischverbindung jedoch möglich.

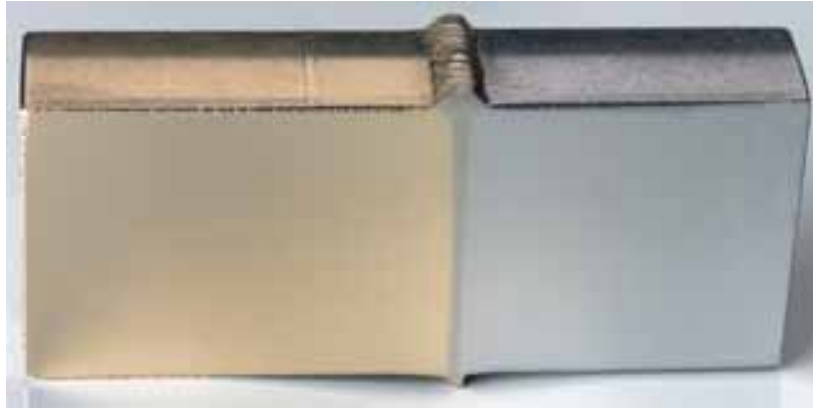


Abb. 108: Stahl-Bronze-Verbindung, 30 mm Schweißtiefe..



*Abb. 109:
Vorratskatode aus
Molybdän-Gehäuse
mit Wolfram Scheibe.*



Abb. 110: Bronze-Stahl bzw. Bronze-Gusseisen-Verbindungen sind die wirtschaftliche Lösung zur Herstellung von Schneckenrädern.

Die Verwendung eines dritten Werkstoffes, sei es als Zusatzmaterial oder als Zwischenlage, löst oftmals die Probleme. So kann durch einen kohlenstoffärmeren Zusatz das Aufhärten von Kohlenstoffstählen in der Schmelze auf einen akzeptablen Wert reduziert werden. Mit einer Zwischenlage aus Vanadium könnte sogar Titan mit Stahl gefügt werden.



Abb. 111: Schiene aus Einsatzstahl mit einer Nickel-Zwischenlage an Gusseisen geschweißt.

Bei solchen Werkstoffkombinationen ist an veränderte Korrosionseigenschaften zu denken und beim Schweißen selbst an die auftretenden Thermoströme (thermo-couple-effect), die den Strahl im Werkstück um mehrere Winkelgrade ablenken können. Dies gilt auch bei Schwarz-Weiß-Verbindungen.



Abb.112, 113: Einspritzdüsen für Thermoplaste aus Cu wegen guter Wärmeleitung und Stahl aus Verschleißgründen. Die Bohrung wird nachträglich eingebracht.

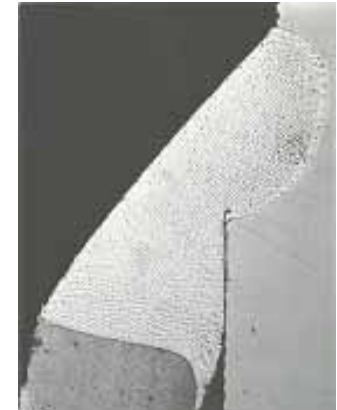
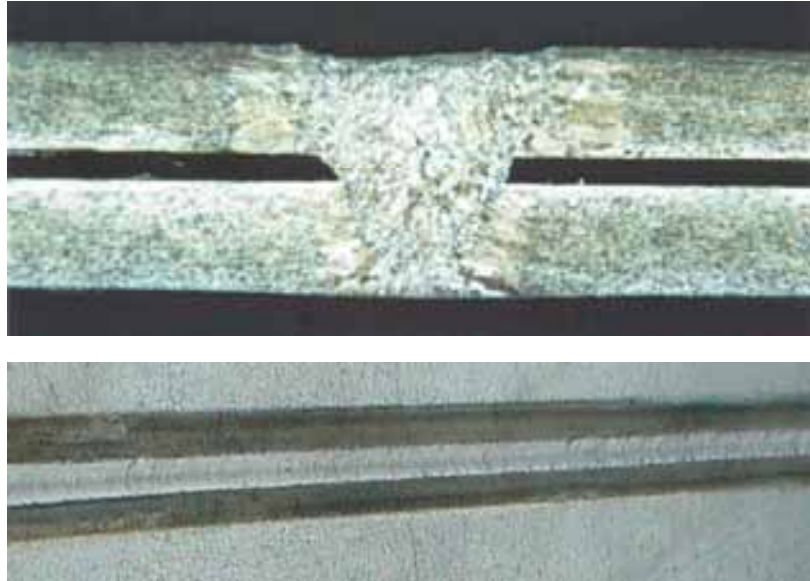


Abb. 114, 115, 116: Selbst Stahl- Stellite (li.) oder Kupfer-Aluminium-Verbindungen (re: Schliff.) sind schweißbar.

Das Elektronenstrahl-Schweißen oberflächenbeschichteter Bauteile, wird im allgemeinen nicht empfohlen, zumindest dann, wenn die Fügeflächen selbst beschichtet sind, und diese Schicht bei niedriger Temperatur verdampft, wie dies z.B. bei verzinkten Blechen im Autokarosseriebau der Fall ist. Bei Einhaltung eines Spaltes von z.B. 0,2 mm zum Abdampfen lassen sich jedoch sehr gute Nähte erzielen.

Abb. 117, 118:
Verzinktes
Karosserieblech aus
Feinkornstahl, Schliff
und Draufsicht.



Verbundwerkstoffe



Abb. 119: Stahl-
Kupfer Verbund mit
Ungängen im
Übergangsbereich.

In Fällen des großflächigen Fügens von 2 Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften werden diese z.B. durch Walzen oder Sprengplattieren hergestellt. Werden diese Verbundwerkstoffe weiter verarbeitet, stellt sich auch die Frage, wie sie gefügt werden können. Im Falle der Gleitlagerschalen aus Aluminiumbronze auf Stahl wird nur der Stahl geschweißt, weil eine Aluminiumbronze-Stahl Verbindung keine gute Festigkeit aufweist. Bei der Kupferplattierten Stahlplatte lässt sich durch das Kupfer in den Stahl schweißen, ohne merkliche Durchmischung. Schweißt man jedoch durch den Stahl in das Kupfer, entstehen Poren und Risse. Eine Erklärung könnte in der Umkehr der Strömungsrichtung in der beim Schweißen entstehenden Dampfkapillare gefunden werden.

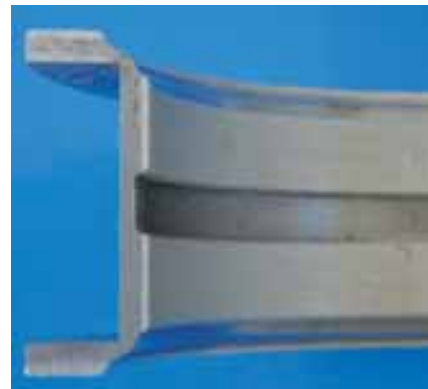
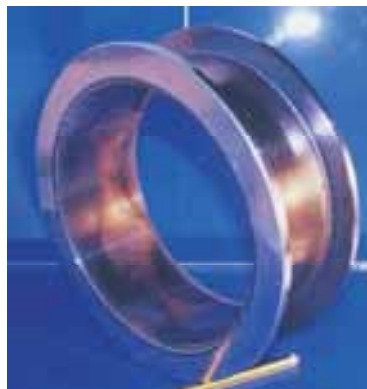


Abb. 120, 121: Lager-
schalen aus Stahl-
Aluminiumbronze.

Elektronenstrahl-Löten

Im Zusammenhang mit Mischverbindungen sei auch an das Elektronenstrahl-Löten erinnert: hierbei wird nur der niedriger schmelzende Verbundpartner aufgeschmolzen, der dann in einer Art Diffusions-Löt-Schweißen (Schwöten) sich mit dem höher schmelzenden verbindet.

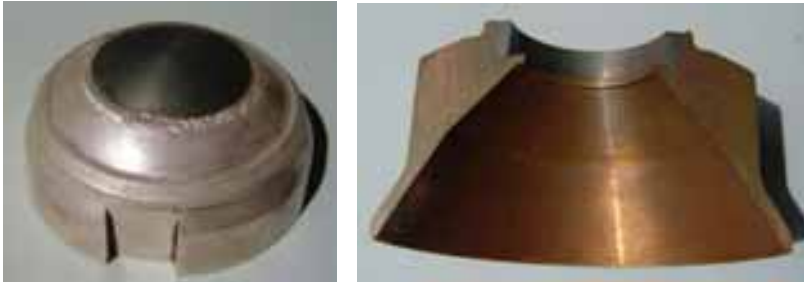


Abb. 122, 123: Wolfram-Kupfer-Verbindungen, bei denen das Wolfram nicht aufgeschmolzen wird.

Dies kann entweder durch Erwärmen des höher schmelzenden Fügepartners bis zur Schmelztemperatur des niedriger schmelzenden erfolgen, der dann bei gutem Wärmekontakt (Andrücken) anschmilzt (z.B. W-Cu, Stahl - Aluminium) oder, indem die Schweißnaht im niedriger schmelzenden Partner direkt neben der Fügestelle ausgeführt wird. Unter Produktionsbedingungen ist letzteres nur bei dünnwandigen Bauteilen unter Einhaltung einer hohen Positionsgenauigkeit realisierbar. Bei großen Fügequerschnitten besteht die Gefahr, dass nicht die ganze Tiefe genau bis an die Fügefläche aufgeschmolzen wird, oder dass auch der nichtlegierende Partner anschmilzt. Im ersten Fall gibt es eine Kaltverschweißung oder Bindefehler, im zweiten Fall eine spröde Phase.

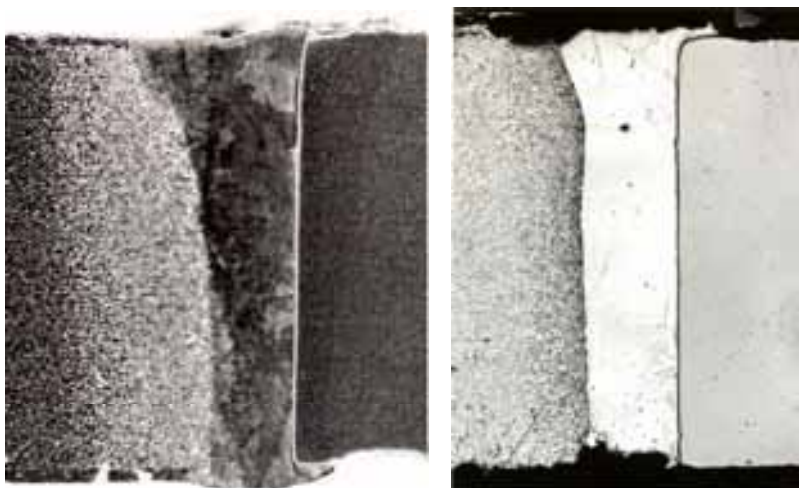


Abb. 124, 125: Lötverbindung zwischen Stahl und Hartmetall, links ohne und rechts mit Kobalt-Zwischenlage.



Abb. 126: Werkzeug aus Stahlträger mit Hartmetallring.

Natürlich gibt es auch das „normale“ Löten, wo statt des konventionellen Vakuumofens der EB als Wärmequelle genutzt wird. Das Löten erfolgt durch Zufügen eines dritten Partners, dessen Schmelzpunkt niedriger liegt, als der der beiden zu fügenden Werkstoffe.

Abb. 127, 128: Lötverbindung Kupfer – Titan mit Silberlot.



Abb. 129: Messing-Kupfer-Verbindung mit Silberlot. Die Größe der Bruchfläche dient zur Qualitätskontrolle.

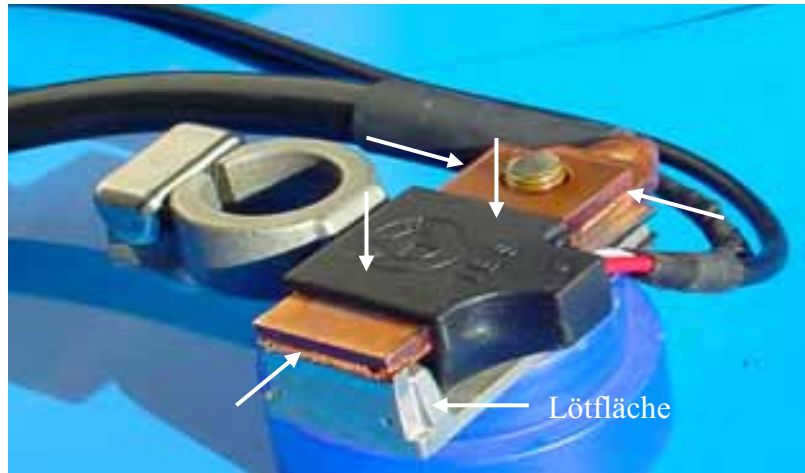


Abb. 130: Batteriekabel mit 5 EB-Schweißungen und einer EB-Lötung.

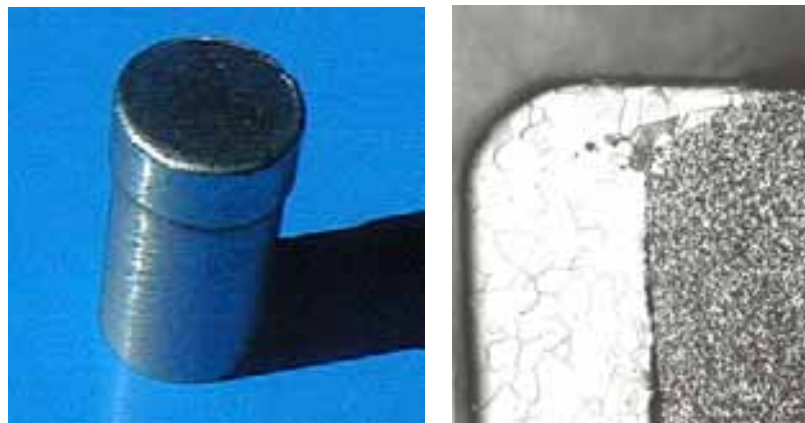


Abb. 131, 132: Katode, Molybdän- Gehäuse mit Graphit-Scheibe verlötet .

Elektronenstrahl-Schweißen unter verschiedenen physikalischen und konstruktiven Gesichtspunkten *

Geringe Wärmeeinbringung

Das wichtigste Kriterium zur Anwendung des Elektronenstrahl-Schweißens ist die geringe Wärmeeinbringung im Vergleich zu anderen Schmelzschweißverfahren und insbesondere auch im Vergleich zum Laserstrahl-Schweißen. Daraus resultiert nicht nur die geringe Wärmebelastung des geschweißten Werkstoffes, sondern, was zu einer häufigen Anwendung führt, von temperaturempfindlichen Bauteilen, die sich in der Nähe der Schweißnaht befinden. Also z.B. das Einhausen von Elektronikpaketen, wie bei Herzschrittmachern (Abb. 86, 134), die nicht über 100 °C warm werden dürfen oder die Dehnmessflächen von Drucksensoren, die 180° C nicht übersteigen dürfen und die sich nur 4 mm neben der Schweißnaht befinden.



Abb. 133: Infrarot-Küvette. Beim Schweißen darf die Innenvergoldung nicht heiß werden und nicht bedampfen. Dies wurde durch Reduzierung der Wandstärke im Schweißbereich erreicht.



Abb. 134, 135: Ein-gehauster Herzschrittmacher (li.) oder Datenträger (re.).

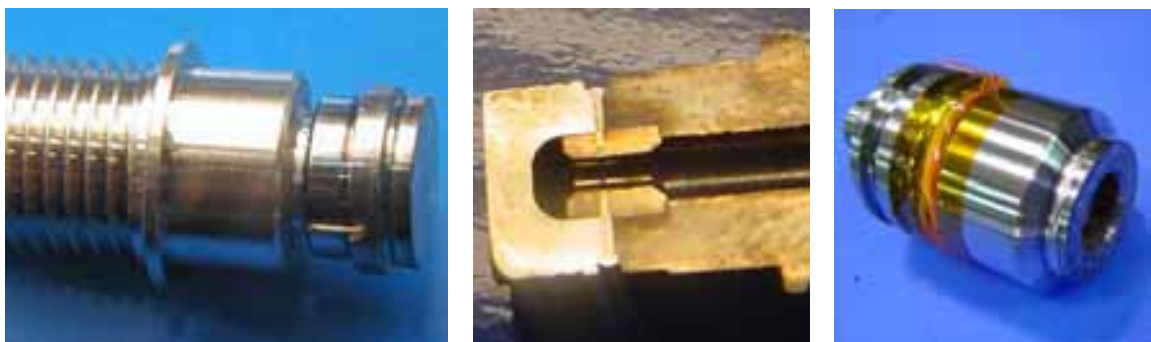


Abb. 136, 137, 138: Eine Vielzahl von Sensoren von Kfz-Einspritzsystemen bis zu Off-Shore-Anwendungen werden EB-geschweißt.

* Siehe hierzu auch den Band „Das Verfahren und seine industrielle Anwendung“

Ein anderes Beispiel sind Kollektorfahnen von Elektromotoren, die sich direkt neben temperaturempfindlichem Isolationsmaterial befinden (Abb. 139, 140), oder kalt verfestigtes Kupfer, das trotz mehrerer Schweißnähte nicht über 120° C warm werden darf, um seine Festigkeit nicht zu verlieren (Abb. 141).

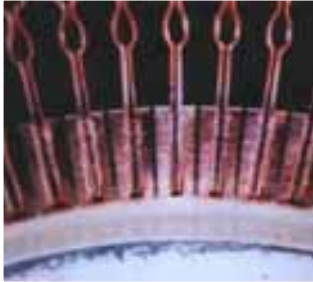


Abb. 139: Detailansicht zu Abb. 140.



Abb. 140: 8 mm tiefe, gepulste Schweißnähte fügen Kollektorfahnen dicht neben Isolationsmaterial.



Abb. 141: Kaltverfestigtes Kupfer darf bei 4 Schweißungen seine Härte nicht verlieren.



Abb. 142, 143: Damit wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungen zwischen Isolator und Metall keine Risse entstehen, muss mit geringster möglicher Wärmeeinbringung geschweißt werden.

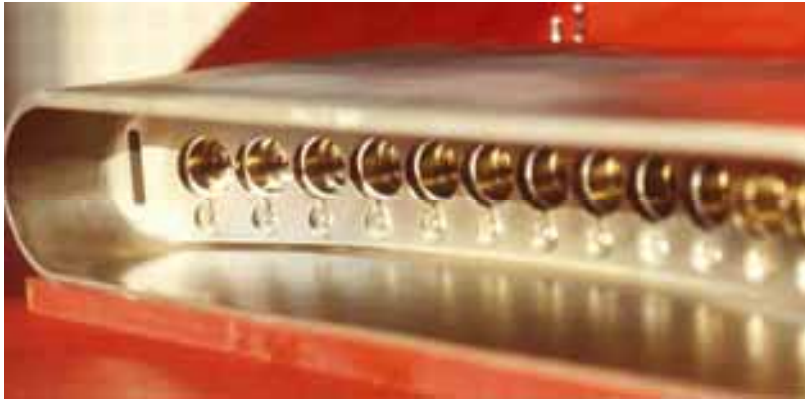


Abb. 144: Heliumdichte elektrische Vakuum-Durchführungen.

Extrem schlanke Nähte bedeuten minimale Wärme- einbringung (Abb. 27, 32, 47), die natürlich die Gefahr in sich bergen, dass bei ungenauer Positionierung des EB-Strahls Bindefehler entstehen können. Selbstverständlich kann man mit der Elektronenstrahl-Schweißtechnik durch Defokussieren oder Oszillieren des Strahls breite, ja sogar sehr breite Schweißnähte herstellen (Abb. 29, 145). Da dies nur selten angewandt wird, muss auf diese Möglichkeit ausdrücklich hingewiesen werden. Falls bei großen Schweißtiefen die Leistung der vorhandenen Anlage für eine breite Schweißnaht nicht ausreicht, lässt sich die Naht auch durch mehrere nebeneinanderliegende Nähte verbreitern (Abb. 146, 147).

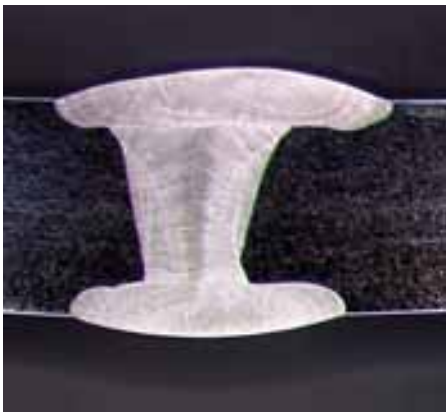


Abb. 145, 146: Beispiele für große Wärme einbringung:
Links: Rohrschweißung mit Deck- und Wurzellage aus Gründen des Korrosionsschutzes und der Regelwerke.
Rechts: Hinterachsstummel mit angeschweißtem Bremsflansch mit 3 nebeneinander liegenden Nähten zur Vergrößerung des tragenden Querschnittes.

Abb. 147: LKW-Achse zu EB-Nähten aus Abb. 146.

Verzugsarmut

Bei Verzugsarmut sind 3 Arten zu unterscheiden: Winkelverzug, Längs- und Querschrumpfung. Die Möglichkeit, parallele Schweißnähte auszuführen, bewirkt, dass der Winkelverzug zumindest bei Durchschweißungen gegen Null gehen kann, da die abkühlende Schmelze über den gleichbleibenden Querschnitt gleichmäßig schrumpft. Die Querschrumpfung ist pro-

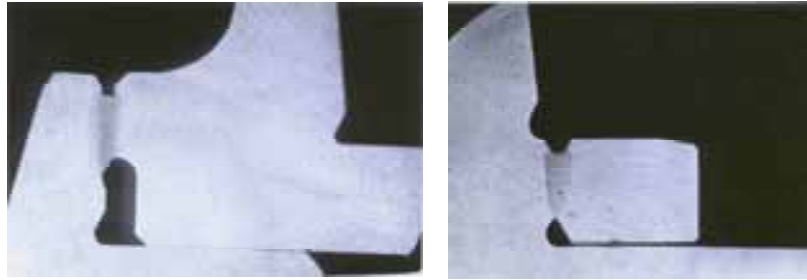


Abb. 148, 149: Zahnradkombination mit parallel durchgeschweißter Naht (li.) ohne Winkelverzug, konische Naht (re.) führt zu Winkelverzug.

Abb. 150: Selbst die Summe vieler, parallel laufender Schweißnähte führt nur zu minimaler Unebenheit der Platte.



portional zur Breite der Schweißnaht und ist bei gegebener Bauteilgeometrie und konstanten Strahldaten sehr genau reproduzierbar. Das heißt eine experimentell ermittelte Querschrumpfung einer Schweißnaht kann den zu fügenden Teilen als Aufmaß zugegeben werden, so dass nach dem Schweißen eine hohe Genauigkeit des fertigen Bauteils eingehalten werden kann (Abb. 151, 152, 153). Die Längsschrumpfung ist im allgemeinen von untergeordneter Bedeutung.



Abb. 151, 152, 153: Genau auf Maß geschliffene Messbänder. Zur Einhaltung der Maßgenauigkeit wird von 2 Seiten geschweißt, die Messfläche bleibt ungeschweißt.



Abb. 154: Schäumformen zur Herstellung von Styropor-Rohrisolierungen. Sowohl Rundheit wie Winkelverzug der Stegbleche werden genau eingehalten.

Unter dem Gesichtspunkt von Schrumpfspannungen sind Radialnähte immer zu bevorzugen, da diese bei Durchschweißungen nicht schrumpfbehindert sind; Achsparallele Nähte dagegen sind grundsätzlich schrumpfbehindert, insbesondere dann, wenn nicht durchgeschweißt wird.



Abb. 155, 156: Planetenträger mit Antriebsrad eines LKW-Getriebes mit radialen EB-Nähten.





Trotzdem werden im Getriebebau achsparallele Nähte bevorzugt, da die Schweißungen kostengünstiger ausgeführt werden können. Um gleichmäßige Schrumpfung zu erreichen und damit den Achsver-satz zu unterdrücken, kann symmetrisch mit drei Strahlen gleichzeitig geschweißt werden.

*Abb. 157:
3-Strahl-Technik.*



*Abb. 158, 159: Schalt-
rad in 3-Strahl-Technik
EB-geschweißt.*



Abb. 160, 161: Das Schweißen von Getrieberädern in allen Größen ist wegen der Ver-zugsarmut weltweit die Hauptanwendung des Elektronenstrahl-Schweißens.

*Abb. 162: Hauptspin-
deln von Werkzeug-
maschinen werden
wegen der Innenbear-
beitung zweiteilig ge-
fertigt und laufen nach
dem Schweißen auf
0,05 mm/m genau.*



Bei Werkstoffen, die zur Aufhärtung oder Versprödung neigen, können die kumulierten Eigenspannungen bei Schrumpfbinderung zu Rissen führen. Es sind deshalb besonders schlanke Nähte, die mit geringer Leistung langsam geschweißt werden, zu bevorzugen.

Einsparen von Zerspanungsarbeit

Ziel dieses konstruktiven Ansatzes ist es, Werkstücke aus standardmäßig vorhandenen Halbzeugen, die einfach bearbeitet oder aus Blech umgeformt werden können, zusammenzufügen, z.B. indem Rohre unterschiedlichen Durchmessers durch eine Zwischenplatte gefügt werden (Abb. 163), oder indem ein kompliziertes Bauteil, statt aus dem Vollen zu fräsen, aus Plattenmaterial hochgenau gefügt wird (Abb. 164).



Abb. 163: Kolbenstange aus 2 Rohren und einer Scheibe mit 2 EB-Nähten gefertigt.



Abb. 164: Mikroskop-Gehäuse aus Aluminium-Platten präzisionsgeschweißt, statt aus dem Vollen gefräst.

Abb. 165: Kombination eines Drehteils, eines Umformteils als Zahnrad und eines Bleches mit Butzen, EB-geschweißt.

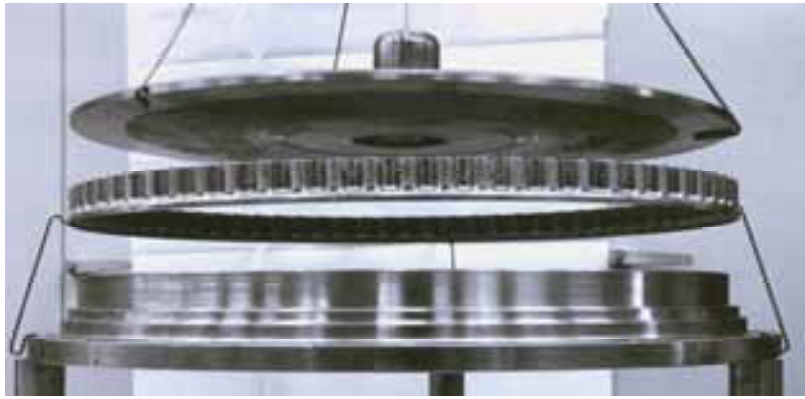


Abb. 166: Hohlwelle aus zwei lasergeschnittenen Umformteilen und 2 Endflanschen mit zwei radialen und einer axialen EB-Naht gefügt.



Abb. 167: Kompliziertes Bauteil aus Innenring, Außenring und 2 Segmenten, alle als Drehteile gefertigt, mit 3 EB-Nähten gefügt.
Links: Halbzeug,
Rechts: fertig bearbeitet.



Abb. 168, 169: Gehäuse für Doppelschnecken-Extruder. Es werden sowohl die Längsnähte, als auch die brillenförmigen Axialnähte EB-geschweißt.



Abb. 170: Hochstrom-Katode aus Wolframspitze mit Kupfer vergossen, daran 4 gestanzte FüÙe aus Kupferblech geschweiÙt.

Ein weites Spektrum solcher konstruktiver Überlegungen bietet der Getriebebau, wo Schmiederohlinge zerspant und dann gefügt werden, während bei der Fertigung aus einem Teil der Auslauf für die StoÙ- oder Fräswerkzeuge vorhanden sein muss und die Teile deshalb größer bauen (Abb. 173).

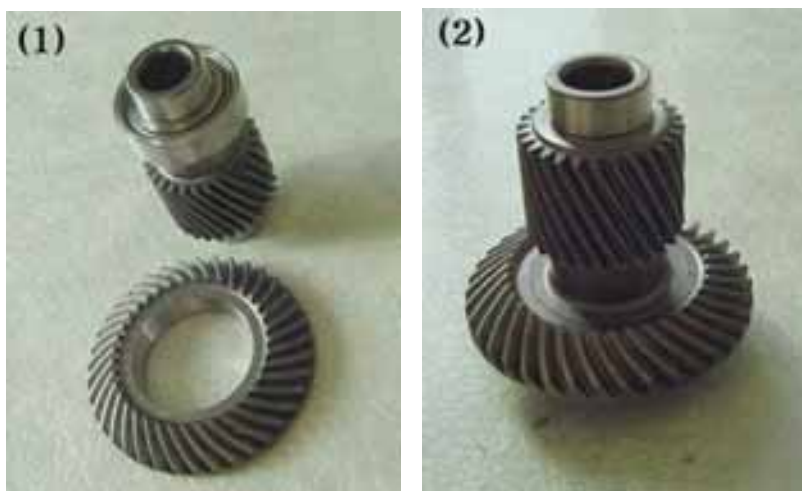


Abb. 171, 172: Kombination zweier verzahnter Schmiedeteile.

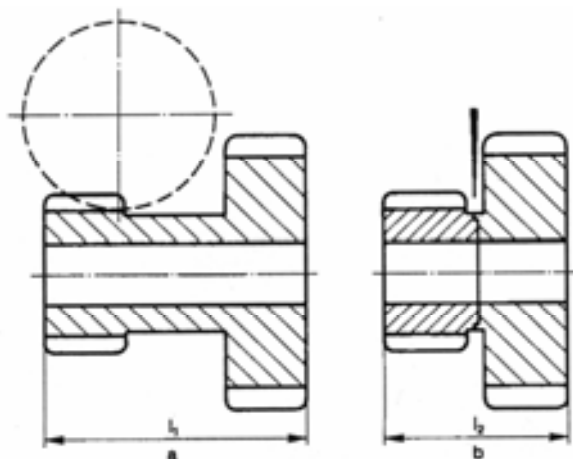


Abb. 173: Schema der Schweißkonstruktion zu Abb. 158 bis 161.

Abb. 174: Aus 2 Zylindern und einem Ring zusammengesetzte Baugruppe.



Abb. 175: Außenansicht von Abb. 174.



Abb. 176: Aus zwei dünnen Scheiben gefertigte Zahnradkombination.



Abb. 177: Das gleiche Prinzip wie Abb. 167, jedoch mit zusätzlich angeschweißtem Rohr.

Durch gefügte Konstruktionen können gekrümmte Formen oder Hinterschneidungen hergestellt werden, die durch zerspanende Bearbeitung oder selbst durch Funkenerodieren nicht herstellbar sind (Abb. 178, 180). Das Gießen ohne verlorenen Kern oder das Schmieden erlaubt keine Hinterschneidungen. Das gebaute Teil ist eine wirtschaftliche Alternative (Abb. 182).

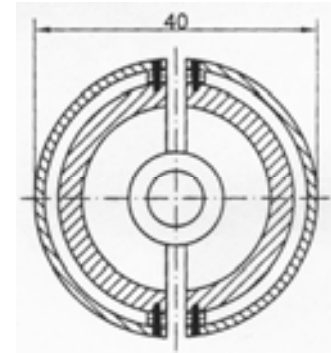


Abb. 179: Schema zu Abb. 178

Abb. 178: Eine nochmalige Weiterentwicklung des Prinzips von Abb. 177 ist das Einführen gekrümmter Formen. Zusätzlich wurden hier noch Flansch und Rohr angeschweißt.



Abb. 180, 181: Mischkopf, der zerspanend so nicht herstellbar ist. Zwei Radialnähte machen es möglich.

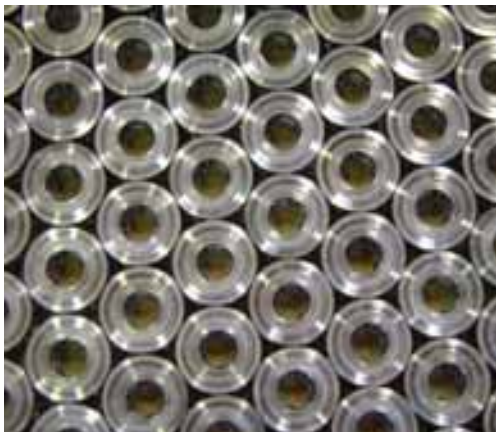


Abb. 182, 183: Familien von CrNi-Stahlarmaturen als Feinguss mit eingeschweißtem Ring ist wirtschaftlicher als das Gießen mit verlorenem Kern.



Abb. 184: Schliff zu nebenstehenden Abb.

Materialeinsatz entsprechend der Funktion

Es gibt unzählige Werkstücke, die an verschiedenen Stellen durch unterschiedliche Belastungen beansprucht werden. Das klassische Beispiel ist das Bi-metall-Sägeband, dessen Zähne hohem Verschleiß unterliegen und deshalb aus Schnellarbeitsstahl gefertigt werden, während das Trägerband einer hohen Biege-Wechselbelastung unterliegt und deshalb aus Federstahl gefertigt wird. Frühere Sägebänder komplett aus Schnellarbeitsstahl verbrauchen nicht nur 80% mehr von dem teuren HSS, sondern sie verschleiben durch Ermüdungsbruch und nicht durch Stumpfwerden.

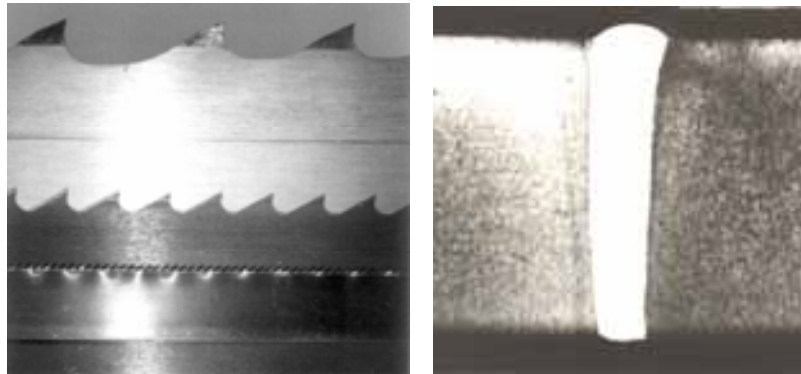


Abb. 185, 186: Sägebänder aus Schnellarbeitsstahl mit Federstahl verschweißt. Schliff: Nahttiefe 1mm.

Ein anderes Beispiel sind Kaltsägen (Abb. 101), deren Nutzvolumen aus HSS bis zu den Befestigungsnieten nachgeschliffen werden können, deren innere Hälfte jedoch aus billigem Kohlenstoffstahl leichter zerspannt werden kann. Ein weiteres Beispiel sind Kipphebel (Abb. 107), deren Verschleißfläche aus serienmäßigen, halbierten Wälzlagerrollen aus 100 Cr6 schon die gute Oberfläche mitbringen, während der Kipphebel aus Kohlenstoffstahl besteht.

Abb. 187: Webschiffchen mit innenliegender Greifzange.



Wieder ein anderes Beispiel verbindet gleich drei Werkstoffe mit einer Schweißnaht, nämlich das

Schiffchen eines Webstuhls. Hier ist die Nase aus Schnellarbeitsstahl, die Zange aus Federstahl und der restliche Körper aus Baustahl gefertigt. Ein größeres Marktsegment stellen Schneckenräder dar, bei denen der Verzahnungsbereich aus Bronze und der Kern aus Gusseisen oder Stahl hergestellt werden.



Abb. 188, 189: Bronze mit guten Gleiteigenschaften verbunden mit preiswertem Stahl.

Da die Bronze wesentlich teurer ist als Stahl, wird die Wanddicke des Bronzerings auf seine erforderliche Tragfähigkeit reduziert. Verzahnt wird erst nach dem Schweißen. (Abb. 110)

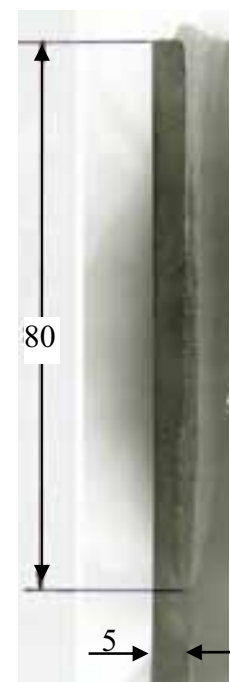


Abb. 190, 191: Schnitt durch einen Dampfturbinen-Stator mit 80 bis 140 mm tiefen Schweißnähten bei 5 bis 8 mm Wanddicke der Plattierung.

Abb. 192:
3D-Schweißung einer
Dampfturbinen-
schaufel mit Fokus,
Strom und Geschwin-
digkeitssteuerung.



Bei größeren Werkstücken spielen auch geringere Preisunterschiede von Stählen unterschiedlicher Eigenschaften eine wirtschaftliche Rolle.

So werden z.B. Statorringe von Dampfturbinen (Abb. 190), deren Oberfläche aus Heißkorrosionsgründen aus 8% oder 10%-igem Chromstahl bestehen muss, in zwei große Ringe aus Kesselblech eingeschweißt. Da hierbei auch die Schaufelprofile gleichzeitig miteingeschweißt werden können, ergibt sich ein doppelter Nutzeffekt, da das alternative Schweißen des gezogenen Profils an geschmiedete Füße (Abb. 192) ohne Einbrandkerben machbar, aber schwierig ist.



Abb. 193:
Einspritzdüsen.

Einspritzdüsen von Kunststoffspritzmaschinen werden durch hohe mechanische Schließkräfte belastet, während gleichzeitig sichergestellt werden muss, dass der Kunststoff am Weg zur Form nicht abkühlt und damit zu Verstopfungen führt. Dies wird erreicht, indem ein langer Kupferzylinder mit einer Spitze aus austenitischem Stahl verschweißt wird (Abb. 112, 113, 193).

An Hochstromkontakten setzt der beim Ausschalten entstehende Lichtbogen auf der Wolframoberfläche auf, während das angeschweißte Kupfer für gute Strom- und Wärmeleitung sorgt (Abb. 122, 123, 194).

Die im Abschnitt Mischverbindungen unter werkstofflichen Aspekten beschriebenen Beispiele sind na-

türlich auch funktionsbedingt. Das Auftragsschweißen von Funktionsschichten wird im Band Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung der Firma pro-beam beschrieben.



*Abb. 194:
Materialkombination
entsprechend der
Beanspruchung eines
Hochstromkontaktes
aus Wolfram-Kupfer-
Legierung und Kupfer.*

Zugänglichkeit für Strahl und Werkzeug

Es gibt Schweißnähte, die in engen Spalten ausgeführt werden müssen und hier erlaubt der kleine Aperturwinkel des Elektronenstrahls von z.B. 0,6 Grad Schweißlösungen, die mit anderen Schmelzschweißverfahren nicht realisierbar sind. Auch kann durch leichtes Schrägstellen des Strahls nahe am Fuß eines hochstehenden Bauteils geschweißt werden.

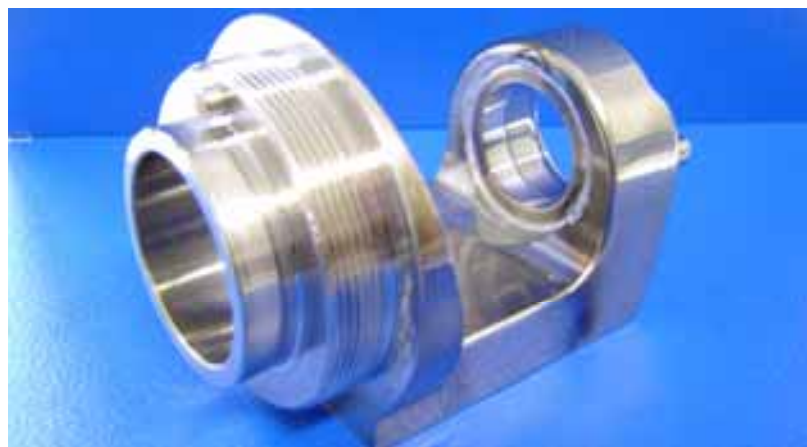


*Abb. 195, 196: Zahn-
radkombinationen mit
schwer zugänglichen
Schweißpositionen.*

Abb. 197, 198: Das Gewinderohr am Beifahrer-Airbag und die Schweißung im Inneren des Ventilgehäuses sind mit dem schlanken Elektronenstrahl möglich.

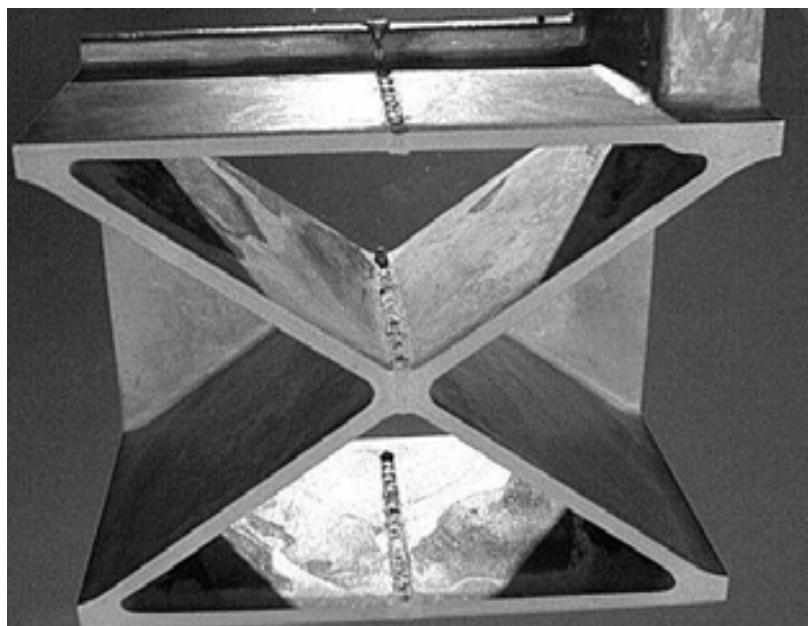


Abb. 199: Das Einschweißen eines Stützringes erfolgt durch die linke Öffnung.



Schließlich können gänzlich unzugängliche Schweißnähte durch eine darüber liegende Decklage hindurchgeschweißt werden, ohne dass der Strahl zu einer merklichen Aufweitung neigt.

Abb. 200: Die drei Nähte in Magnesium wurden durch alle drei Ebenen gleichzeitig geschweißt.



Eine andere konstruktive Schwierigkeit der Zugänglichkeit, bezieht sich nicht auf den Elektronenstrahl, sondern auf die Zugänglichkeit mit mechanischen Werkzeugen. Indem das Bauteil konstruktiv getrennt wird, erreicht man eine einfache Zugänglichkeit für das Drehen oder Fräsen von beliebigen Konturen und das Verschließen mit einer Stichnaht (Abb. 201), bzw. auch durch eingesetzte Passstücke (Abb. 202). Dies wird bei einer Vielzahl von Bauteilen insbesondere zum Herstellen von Kühlkanälen angewandt (Abb. 48, 65, 150). Beispiel hierfür sind Hohlleiter-Antennen von Satelliten, die im Inneren eine sehr glatte Wandung benötigen, die durch Feingießen nicht erreicht wird.

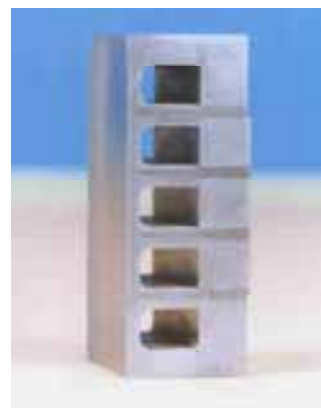


Abb. 201: Kühlkanäle wurden in den Innenring einer Wirbelstrombremse eingedreht und anschließend durch einen Außenring verschweißt.



Abb. 202: Zugänge zur Innenbearbeitung werden mit EB-Schweißen verschlossen.

Es wird deshalb eine Öffnung herausgetrennt, die den Zugang von Fräs-, Schleif- und Polierwerkzeugen erlaubt und nach der Bearbeitung wieder zugeschweißt wird.



Abb. 203, 204: Mit Stichnähten durch den Deckel auf den Steg geschweißte Konturnähte.



Abb. 205: Abgedeckte Wasserzuführungen eines Dampfbügeleisens.



Abb. 206, 207: Das Schweißen mittels Stichnähten eröffnet eine Vielfalt von konstruktiven Möglichkeiten.

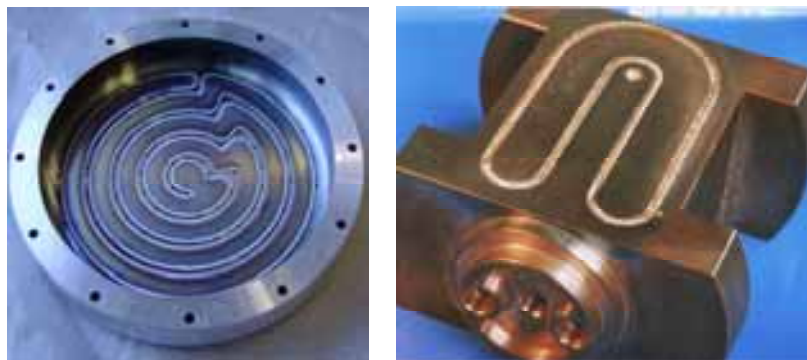


Abb. 208, 209: Beliebige Konturen werden in den Grundkörper gefräst und durch genaue Passteile verschlossen.



Abb. 210, 211: Spindeln für Großbohrwerke mit Innenbearbeitung.

Spindeln von großen Fräsmaschinen mit bis zu 6 m Länge und mit umfangreichen Innenbearbeitungen können nicht in einem Stück gefertigt werden, weil es z.B. Stoßmaschinen zur Nutherstellung in dieser Abmessung nicht gibt. Die Wellen werden deshalb in 3 Teilstücken gefertigt und zum Schluss mit 2 Umfangsnähten gefügt.

Dick-dünn Verbindungen

Die wohl anschaulichste Demonstration einer dick-dünn Verbindung ist das Aufschweißen der Schneide einer Rasierklinge auf einem soliden Metallblock aus den 50iger Jahren. Dies zeigt, dass mit der hohen Energiedichte in einem sehr feinen Auftreffpunkt des Strahls sowohl der dünne, wie der massive Werkstückteil gleichzeitig aufgeschmolzen werden können. Bei Wärmequellen mit geringerer Leistungsdichte schmilzt die dünne Komponente weg, während die dicke kalt bleibt, sodass es statt einer Fügeverbindung zu einem Loch kommt.

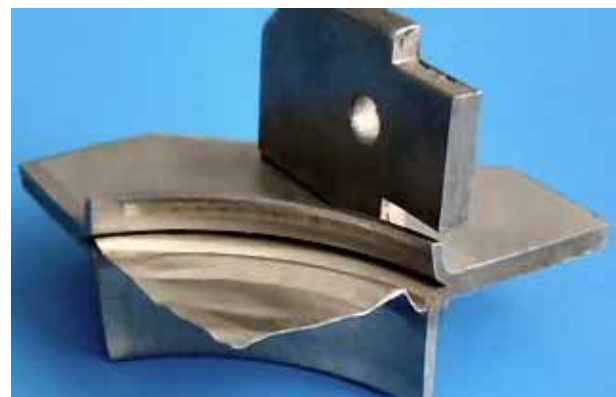


Abb. 212, 213, 214, 215: Das Verschweißen von dünnen Membranen für unterschiedliche Anwendungen ist mit dem Elektronenstrahl möglich.

Das fehlerfreie Schweißen solcher dick-dünn Verbindungen, ebenso wie das Verbinden zweier dünner Folien funktioniert allerdings nur, wenn zwischen beiden ein Wärmekontakt besteht; also spaltfreies Spannen muss sichergestellt sein.

Um die Produktionssicherheit zu verbessern wird häufig die Folie zwischen eine Auflage gespannt und gemeinsam mit dieser verschweißt. Diese konstruktive

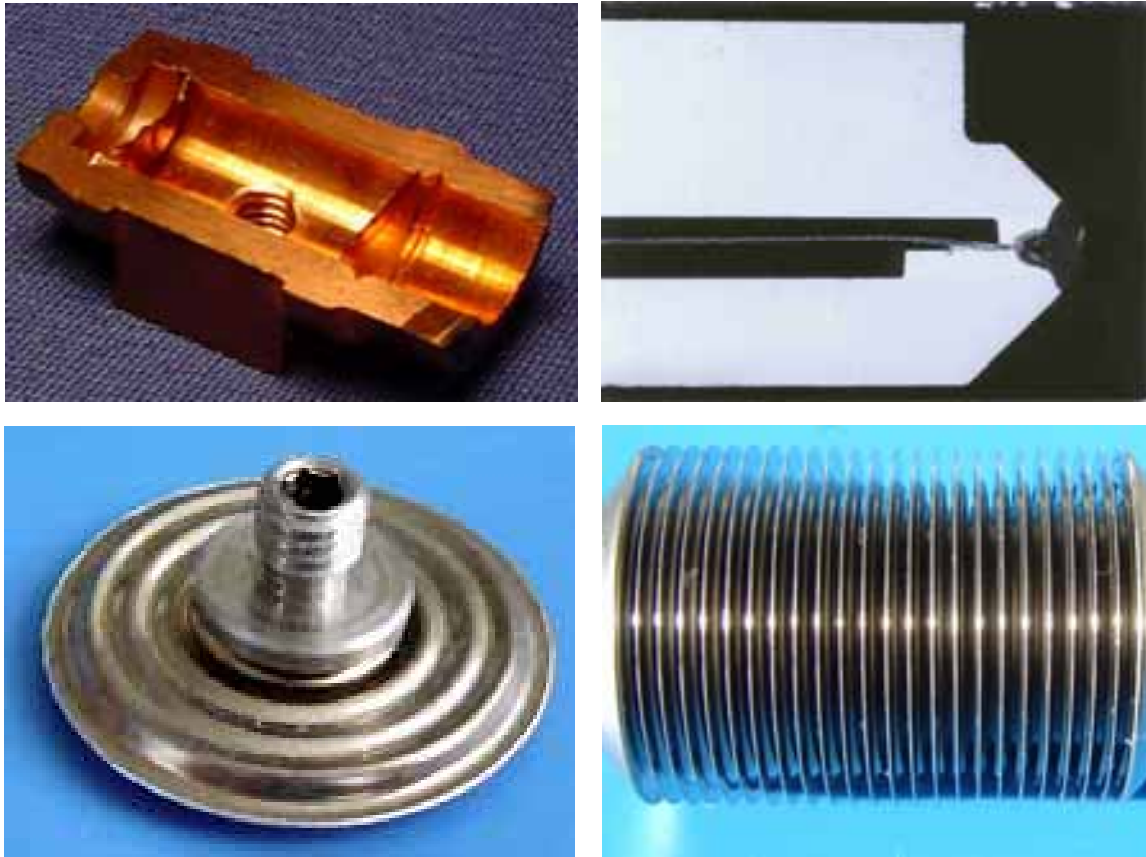


Abb. 216, 217: 20 μm dünne Folien als Berstsicherungen oder Messmembrane eingeschweißt.

Abb. 218, 219: Dünn-dünn-Verbindung an Messdose und Faltenbalg.

Variante wird zum Beispiel bei der Herstellung von Sollbruchstellen (Abb. 213, 216) oder beim Fügen von Membranen zum Druck - oder Temperaturmessen (Abb. 215, 217) verwendet.

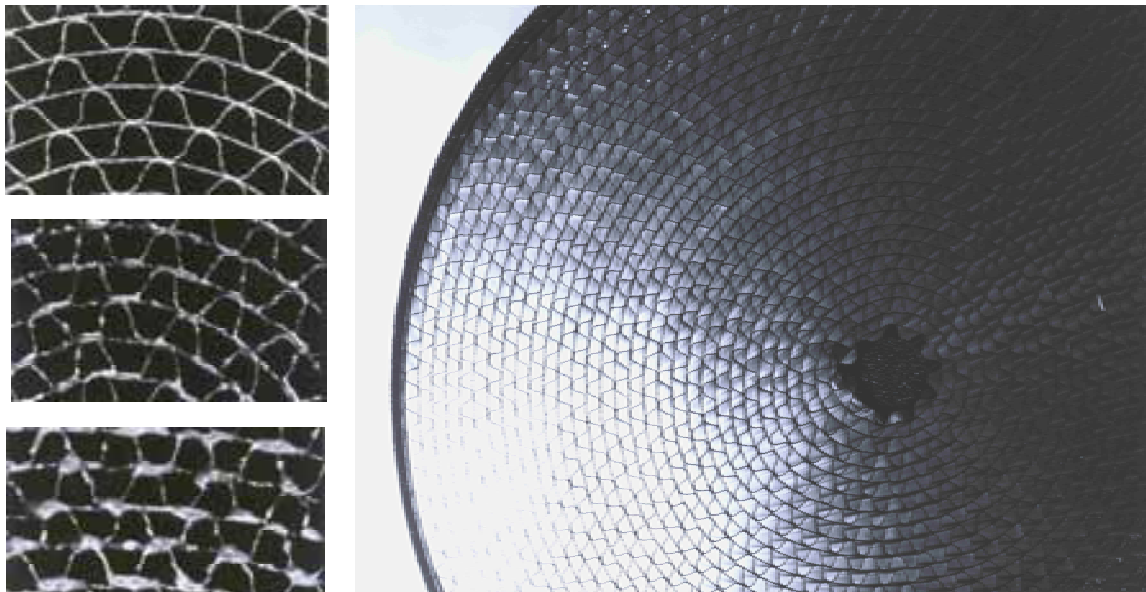


Abb. 220, 221, 222, 223: Katalysatorträger mit unterschiedlichen Leistungen geschweißt.

Wenn es aufgrund der Teilegeometrie nicht möglich ist, die Fügeposition einzeln zu programmieren, dann besteht auch die Möglichkeit, die gesamte Fläche auf der sich Fügestellen befinden, mit einem in 2 Achsen schnell gerastertem Strahl abzufahren, sodass jeder beliebige Punkt mit ausreichend Schmelzenenergie beaufschlagt wird. Die ca. 3000 Fügepunkte an Abgaskatalysatoren aus 50 μm dicker Stahlfolie werden flächig innerhalb von 3 Sekunden geschweißt (Abb. 223).



Abb. 224: 30 μm dickes Spannband mit 70 μm dickem Endstück verbunden.

Kleinteile

Das Elektronenstrahl-Schweißen von Kleinteilen spielte in der Vergangenheit eine große Rolle, wurde aber heute weitgehend durch das Laserstrahl-Schweißen abgelöst.



Abb. 225: Filtergehäuse mit drei Radialnähten gefügt.

Nur wenn besondere Anforderungen an geringe Wärmeeinbringung, schlanke Schweißnaht (kleiner 0,2 mm) oder bei reaktiven Werkstoffen, wo das Vakuum vorteilhaft zum Tragen kommt, wird das Elektronenstrahl-Schweißen auch heute noch eingesetzt.



Abb. 226, 227: Gewindeschraube, stirnseitig EB-geschweißt.



Abb. 228: Schließsystem mit 4 EB-Nähten.



Abb. 229: 0,2 mm breite Sensornäht.



Abb. 230, 231: Sensoren sind besonders temperatur- und verzugsempfindlich.

Weiter sind Fälle interessant, bei denen die Strahlpositionierung durch Rückstreuelektronen erreicht wird, und so ein automatisierter Schweißprozess bei großen Stückzahlen wirtschaftlich ausgeführt werden kann. Hier kommt die schnelle und genaue Ablenkung des Strahls zum Tragen: die Schweißungen werden nur durch Strahlbewegung ausgeführt, womit das genaue Positionieren und Bewegen der kleinen Bauteile entfällt.



Abb. 232: Relaisgehäuse mit temperaturempfindlichen Glasdurchführungen.

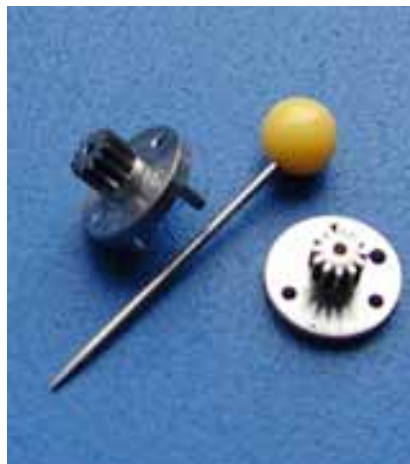


Abb. 233, 234: Ritzel und Planetenträger einer Handprothese mit 17 EB-Nähten.



Abb. 235: Excenter-Befestigung für Leiterplatten, 6 mm lang.



Abb. 236: Schnitt durch Abb. 235

Großbauteile

Je größer die Bauteile sind, desto wirtschaftlicher ist das Fügen mit Elektronenstrahlen. Zum einen, weil die Materialersparnisse und die Reduzierung der Zerspanungsarbeit auf großen Maschinen erhebliche Einsparungen mit sich bringt, zum anderen, weil das Elektronenstrahlschweißen mit zunehmender Schweißtiefe im Vergleich zu anderen Schweißverfahren immer kostengünstiger wird (Abb.241, 242).



Abb. 237: Welle einer Kraftwerksturbine. Die Einzelsegmente können auf kleineren Maschinen bearbeitet werden.

So werden große Wellen z.B. für Schiffsantriebe oder Turbinen aus Einzelsegmenten zusammengefügt. Große Gehäuse mit 1 bis 2 m Durchmesser für den Apparatebau werden aus gerolltem Blech Längs- und Umfangsnaht geschweißt, oder in einem anderen Fall wird die Trommel aus Einzelsegmenten Längsnaht geschweißt und zusätzlich werden Kontaktfahnen angebracht (Abb. 243).



Abb. 238, 239: Hochdruck-Hydraulikzylinder, bis 15.000 kN Druck, Schweißtiefen bis 95 mm.

Abb. 240: Lange Kolbenstangen aus kurzen Einzelrohren EB-geschweißt.



Abb. 241, 242: Beim Vergleich zwischen einer 150 mm tiefen EB-Naht und einer gleich tiefen UP-Naht wird ersichtlich, dass das EB-Schweißen aufgrund seiner hohen Schweißgeschwindigkeit wirtschaftlich vorteilhaft abschneidet:

Schweißzeit für 1 m EB-Naht: 8,3 min.
Schweißzeit für 1 m UP-Naht: 314 min,
in 152 Lagen mit 32 kg Zusatzwerkstoff.

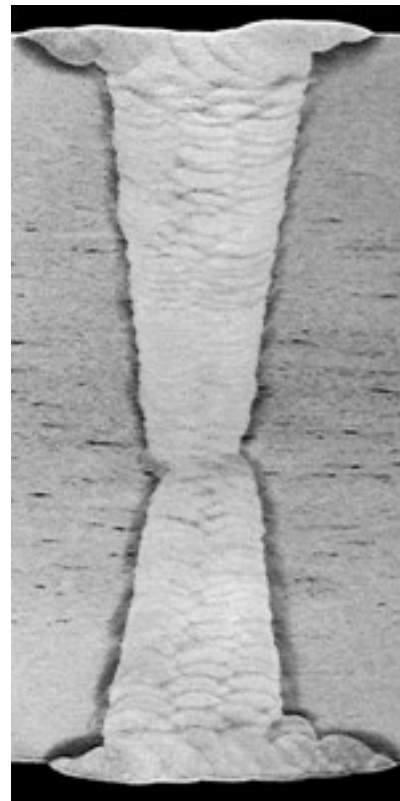
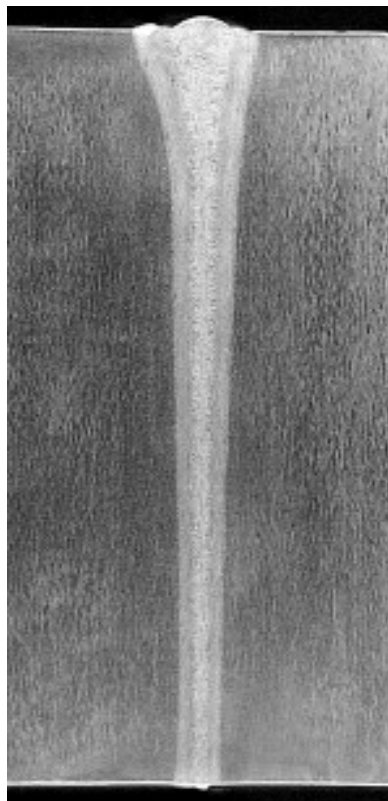


Abb. 243: Kupfertrommel mit Kontaktfahnen aus dem Apparatebau mit 1,6 m Durchmesser.





Abb. 244, 245, 246: Teile eines Ofens zum Sprengen von Alt-Munition, geschweißt in einer EB- Vakuumkammer mit 20 m³.

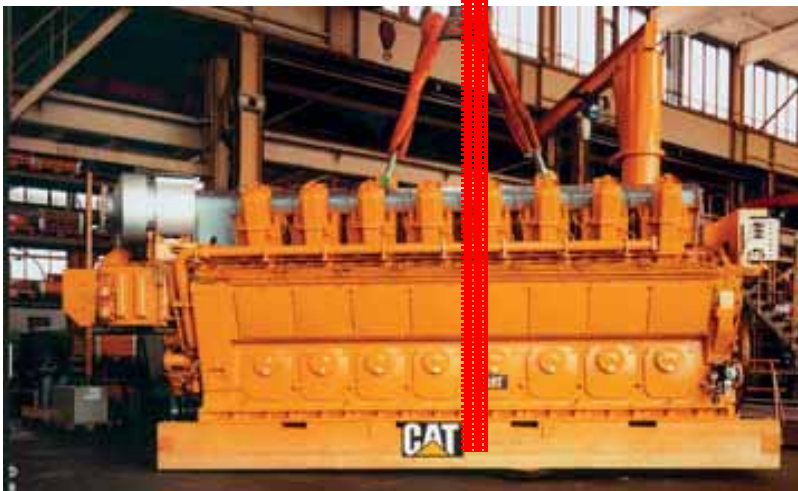


Abb. 247: Großmotoren aus dem Schiffbau mit bis zu 140 Tonnen werden mit EB-geschweißten Traglaschen gehoben.



Abb. 248: Traglasche.



Abb. 249: Naht an der Lasche, rechts wie geschweißt, links zusätzlich verschliffen zur Röntgenprüfung.



Abb. 250: dazugehöriger Schliff.

Reparaturschweißen mit dem Elektronenstrahl

Resultierend aus den oben beschriebenen Eigenschaften in Bezug auf geringe Wärmeeinbringung und minimalen Verzug und der Fähigkeit, die unterschiedlichsten Werkstoffe zu fügen, eignet sich das Elektronenstrahl-Schweißen vorzüglich für Reparaturlösungen. Meist geht es um wertvolle Einzelteile, die durch Verschleiß oder Bruch die Produktion eines ganzen Betriebes lahm legen. Die Neufertigung könnte Wochen oder Monate dauern. Deshalb ist eine Reparatur unter teilweiser Verwendung von Neuteilen eine vollwertige, wirtschaftlich höchst interessante Lösung.



Abb. 251, 252: Verschlissenes Ventilgehäuse aus 42 Cr Mo 4 wurde durch Einsetzen einer neuen Buchse instand gesetzt. Schweißtiefe: 55 mm.

Abb. 253, 254: Reparaturschweißung einer gebrochenen Rotorwelle eines Elektromotors durch Ansetzen eines Neuteils.



*Abb. 255:
Verschlissene Teile
eines Turbinenrades
wurden durch Neuteile
ersetzt.*

Manchmal ist die Modifizierung von Serienteilen aus Kostengründen sogar einer Neufertigung vorzuziehen. Und schließlich gibt es Fälle, wo auch große Serien durch EB-Schweißen instand gesetzt werden.



*Abb. 256: Zündkerzen
einer Großserie wer-
den aufgetrennt und
durch Einschweißen
eines Zwischenstücks
für eine Spezialanwen-
dung modifiziert.*

*Abb. 257: Detailan-
sicht aus Abb. 258.*



*Abb. 258: 52 Tonnen
schwerer Läufer einer
Gasturbine.*

Ein riesiger Gasturbinenläufer hat am gesamten Umfang Verschleißerscheinungen, die durch EB-Schweißen repariert werden können. Der Läufer wird abgedreht und die Stege neu aufgeschweißt (Abb. 258).

Bei der Reparatur von Hohlwellenlagergehäusen handelt es sich um eine ganze Serie von Bauteilen die nachgearbeitet werden müssen, da die ursprünglich ausgeführte Schweißnahtgestaltung nicht dauerhaft ist. Diese Reparaturlösung rettet die wertvollen Gussgehäuse aus dem Werkstoff GS-16 Mn 5, indem auf beiden Seiten neue Lagerringe angeschweißt werden. Die Anforderungen an die Qualität der Verbindung und an den Verzug sind hier besonders hoch.



Abb. 259, 260, 261: Reparatur von Hohlwellenlagern von Lokomotiven.

Abb. 262: Nahtwurzel.

Die Winkelstellung der Lagerringe zueinander, die Toleranz der Innenbohrung für die Lager und die Gesamtlänge des Reparaturteils müssen den Forderungen der Zeichnungsvorgaben entsprechen, wobei die ursprüngliche Zeichnung natürlich von einer Komplettbearbeitung nach dem Schweißen ausgeht. Bei der Instandsetzung mit dem Elektronenstrahl werden die Radsätze ohne weitere Bearbeitung montiert (Abb. 263 bis 264).



Abb. 263, 264: Montage und Einbausituation der regenerierten Hohlwellenlager.



Elektronenstrahl-Schweißen von Serien als Dienstleistung



Abb. 265:
Waschanlage.



Abb. 266:
Röntgenprüfanlage.



Abb. 267:
Schwingprüfung.

Das Schweißen im Lohn von großen Serien löst beim Betrieb organisatorische Veränderungen aus, wie den Aufbau von Einkauf, Logistik, Zertifizierung mit Schulung von QS Personal und Gesprächspartnern für Auditierungen. Der Lieferumfang, der früher im Wesentlichen allein aus der Schweißleistung bestand, hat sich erheblich erweitert. Das beginnt bei der Materialbeschaffung mit Eingangskontrolle, dem Reinigen und Entmagnetisieren der Teile und deren Montage. Hierzu, und zum Schweißen selbst, müssen serientaugliche Vorrichtungen und Arbeitsabläufe geplant, gefertigt und installiert werden. Dann folgt das Elektronenstrahlschweißen mit automatischer oder manueller Bestückung und Entnahme der Teile aus Werkstückträgern. Ein wesentlicher Baustein ist eine sinnvolle, sichere und möglichst online Qualitätskontrolle und deren Dokumentation, um eine 100%-tige Rückverfolgbarkeit der Fertigung zu gewährleisten. Häufig besteht diese allerdings aus nachgelagerten Prozessen, wie Ultraschall- oder Röntgenprüfung, sofern eine einfache Sichtkontrolle mit dem Auge oder der Kamera nicht ausreicht. Statistisch werden meist auch zerstörende Prüfungen durchgeführt, dokumentiert und die Proben werden gelagert oder dem Kunden übergeben.

Die Kosten für diese „Nebenarbeiten“ übersteigen manchmal die Kosten der Schweißarbeit.

Turbinenleitkränze

Leitkränze für Gasturbinen von Hubschraubern oder Kleinflugzeugen werden aus einem inneren Führungsring, in den die Schaufeln lose eingelegt werden und einen Außenring aus gestanztem Blech in einer massiven Spannvorrichtung montiert. Die Schweißung der Schaufeln aus Feinguss erfolgt nach einem Schweißplan der eine symmetrische Wärmeinbringung und damit eine gleichmäßige Verteilung der Schrumpfspannungen bewirkt. Zunächst werden die mit einem Spannring fixierten Schaufeln durch zwei umlaufende Nähte geheftet und anschließend der Spannring entfernt. Es wird z.B. bei 103 Schau-

feln (immer eine Primzahl) jede 20-ste Schaufel geschweißt, so dass mit immer gleichen Abständen weitergetaktet wird, bis alle Schaufeln auf einer Seite geheftet sind. Dann folgt die Gegenseite mit voller Durchschweißung und schließlich die erste nur geheftete Seite. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die aus 309 Schweißungen in geringem Abstand entstehenden Schrumpfspannungen zu beherrschen. Ein geschickter Monteur kann die Montage gerade in der Zeit durchführen, die zum Schweißen erforderlich ist. Das sind 45 bis 55 Minuten je nach Schaufelzahl. Schließlich wird der Leitkranz überdreht und beidseitig werden zwei Schulterringe angeschweißt.



*Abb. 268:
Fertiger Leitkranz
mit angeschweißten
Schulterringen.*



Abb. 269 bis 272: Spannvorrichtung, Schaufelmontage mit Hilfswerkzeug, Entfernen des Spannringes und Detail der Schaufelschweißung.

EB-Schweißen von IHU-Nockenwellen



Abb. 273:
Fügestation mit Kraft-
Weg-Messung.

Das Besondere am Schweißen von Serien für die Automobilindustrie und deren Zulieferer liegt in der Datenverkettung der einzelnen Bearbeitungsschritte, so dass über den erfassten Code die Personal-, Material- und Schweißdaten dem einzelnen Bauteil zugeordnet werden können. Nur so ist die von der Automobilindustrie geforderte 100% Rückverfolgbarkeit gewährleistet. Die Schweißnähte liegen im Bereich der Lagersitze, die bei der Endbearbeitung geschliffen werden. Die Oberflächen müssen danach absolut fehlerfrei sein. Mit dem EB-Schweißen wird eine Fehlerquote kleiner 50 ppm erreicht.



Abb. 274:
Mit Data-Matrix-Code
und Klartext gekenn-
zeichnete Nockenwel-
len werden angeliefert.



Abb. 275, 276:
Die Identität jeder
Welle wird mit dem
Laserscanner an jeder
Station vor der Bear-
beitung erfasst.

Die Bearbeitung beginnt mit dem Waschen und der Erfassung der Datenmatrix über einen Laserscanner, dann erfolgt die Montage mit Aufzeichnung von Presskraft und -Weg. Nach dem Schweißen auf einer 5-spindeligen Drehvorrichtung in einer Schleusen-Shuttle-Maschine erfolgt die Qualitätskontrolle mit Rundlaufprüfung. Auf jeder dieser Stationen wird der Code neu eingelesen. Schließlich werden die Teile verpackt und versandt.

Die Vergabe von Großserien an einen Lohnschweißer ist für die Automobilindustrie und deren Zulieferer

wegen der hohen Liefersicherheit besonders interessant, da der Dienstleister im Falle von Defekten oder Fertigungsspitzen auf weitere Anlagen ausweichen kann.



Abb. 277: Bestücken und Schweißen auf einer Schleusen-Shuttle-Anlage.



Abb. 278: Automatischer Wechsel der 5-spindligen Drehvorrichtung.



Abb. 279, 280: Nockenwellen nach dem Schweißen (jeweils oben) und nach der Fertigbearbeitung (jeweils unten).



Abb. 281: Prüfung auf Rundlaufgenauigkeit nach dem Schweißen und Dokumentation.



Abb. 282: Versand.



Abb. 283: Verpackung.

Schlussbemerkung:

Schon vor Drucklegung hat das vorliegende Büchlein seinen Spitznamen weg:

„Elektronenstrahl-Schweißer's Briefmarkensammlung“
Ich wünsche Ihnen, dass Sie diese Kollektion durch Hinzufügen eigener Anwendungen erfolgreich und kontinuierlich fortführen werden.

Der Herausgeber dieses Buches:

Die Firma pro-beam wurde 1974 als Elektronenstrahl-Lohnbearbeiter gegründet. Mit zwei Mitarbeitern und zwei gebrauchten Maschinen, eine zum Schweißen und eine zum Bohren, begannen die Aktivitäten. Zehn Jahre später wurden erste Laseranlagen angeschafft.

Heute, nach 33 Jahren kontinuierlichen Wachstums, beschäftigt die pro-beam-Gruppe 225 Mitarbeiter an fünf inländischen und drei ausländischen Standorten. Sie betreibt 32 EB-Schweißmaschinen, fünf EB-Perforationsanlagen und fünf Laser. Die EB-Anlagen haben Strahlleistungen im Bereich von 1 bis 60kW und Kammergrößen von 0,05 bis 630 m³. Die Nd: YAG- und CO₂-Laser werden im Leistungsbereich von 150 W bis 12 kW betrieben. pro-beam bearbeitet an bis zu sieben Tagen in der Woche im Dreischichtbetrieb Aufträge für seine Kunden. Damit ist pro-beam der größte EB-Lohnbearbeiter weltweit und die einzige Firma, die jahrzehntelange Erfahrung in den möglichen Anwendungsgebieten Schweißen, Bohren, Schneiden und der Veredelung von Oberflächen durch Härten, Umschmelzen und Auflegieren mittels Laser- und Elektronenstrahl-Technik hat. pro-beam bearbeitet dabei sowohl Einzelteile als auch Großserien.

Aus den Erfahrungen der Vielfalt der Anforderungen im Bereich der Lohnanwendungen hat pro-beam in den letzten zehn Jahren eigene EB-Anlagen bis zur Serienreife entwickelt und im eigenen Lohnbetrieb getestet. Seit 2000 ist pro-beam mit seiner Tochter pro-beam Anlagen GmbH, Chemnitz, auch als Maschinenlieferant positioniert.

Derzeit entwickelt die pro-beam-Gruppe mit 30 Ingenieuren und einer Reihe externer Institute und Firmen eine neue Generation von Anlagen und Verfahren, um dem Elektronenstrahl weitere Anwendungsfelder zu erschließen. Ziel ist es, die technologische Spitzenstellung des EB-Schweißens, -Bohrens, der EB-Randschichttechnologien und als Anlagenlieferant auszubauen und zugleich die Marktführerschaft der Firmengruppe zu festigen. pro-beam ist in den einschlägigen Arbeitskreisen des DVS und des DIN vertreten.

pro-beam ist zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2000, ISO/TS 16949:2002 Automobil, DIN EN 9100 Luft- und Raumfahrt, DIN 6700-2 Bahn, WTD 61 Wehrtechnik Marine, HP0 Druckbehälter, DIN EN 729-3 QS und seine Anlagen nach DIN EN ISO 14744:2006, sowie das Prüfpersonal nach DIN EN 473 und die Anlagenbediener nach DIN EN 1418 für EB- und Laseranlagen.

pro-beam AG & Co.KGaA

Behringstr. 6

D-82152 Planegg

Tel. 089/ 89 92 33-0

Fax 089/89 92 33-11

E-Mail info@pro-beam.de

www.pro-beam.de

Danksagung:

Mein Dank gilt den Maschinenbedienern, die an den verschiedenen pro-beam-Standorten die gezeigten Muster im Laufe der Jahre geschweißt haben, vor allem den altgedienten Betriebsleitern Herrn Franz Rappold, Herrn Florin Schlögl und Herrn Jochen Preul, von denen fast alle Beispiele erarbeitet wurden. Bedanken möchte ich mich auch bei den Herren Helmut Schultz und Johannes Koy für anregende Diskussionen während dreier Jahrzehnte und für die Korrekturlesung des vorliegenden Bandes. Ganz besonders bedanke ich mich bei Herrn Tobias Böhme für die mühevollen Erstellung der Manuskriptvorlage.

Dietrich von Dobeneck

