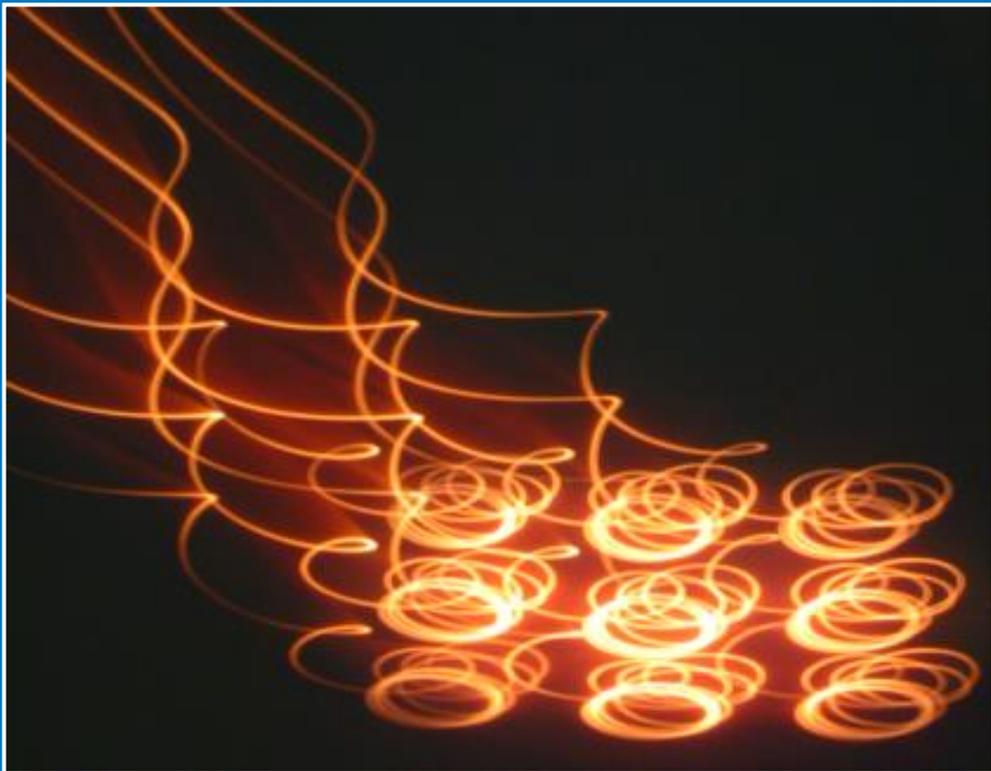


# ELEKTRONENSTRAHL- SCHWEISSEN

Eine Schlüsseltechnologie im Fahrzeugbau für  
Straße, Schiene, Wasser, Luft und Weltraum

Dietrich v. Dobeneck



pro:beam



# Elektronenstrahl- Schweißen

Eine Schlüsseltechnologie im Fahrzeugbau für  
Straße, Schiene, Wasser, Luft und Weltraum

Dietrich v. Dobeneck



pro beam

Dietrich v. Dobeneck:  
Elektronenstrahl-Schweißen  
Eine Schlüsseltechnologie im Fahrzeugbau für  
Straße, Schiene, Wasser, Luft und Weltraum

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

## **Inhalt:**

<b>Einführung</b> .....	<b>4</b>
<b>Automobilindustrie</b> .....	<b>10</b>
Motor- und Motorkomponenten .....	12
Treibstoff- und Verbrennungs-Management .....	22
Antriebsstrang .....	28
Fahrwerk .....	29
Zusatzaggregate .....	33
Zahnräder und Getriebe .....	39
<b>Luft- und Raumfahrtindustrie</b> .....	<b>47</b>
Fluggerät und Komponenten.....	48
Flugtriebwerke .....	51
Treibstofftanks .....	55
Raketenantriebe.....	59
<b>Eisenbahnindustrie</b> .....	<b>62</b>
Züge.....	62
Schienen.....	65
<b>Schiffbauindustrie</b> .....	<b>69</b>
<b>Herausgeber</b> .....	<b>71</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>72</b>

## Einführung

Der durch internationalen Wettbewerb ständig wachsende Druck, bessere Qualität zu niedrigeren Preisen in kürzeren Lieferzeiten zu produzieren, führt zur Anwendung spezialisierter Prozesse, wo immer ein kleiner Vorteil zu erspähen ist. Dies gilt für eine Vielzahl von Produktionstechnologien, einschließlich des Schweißens. Da viele dieser spezialisierten Fertigungsprozesse sehr spezifisches und detailliertes Wissen erfordern, das gewöhnlich in den Fertigungsbetrieben nicht zur Verfügung steht, wird die Fremdvergabe immer beliebter. Ein anderer Grund für das „Outsourcing“ ist das hohe Startkapital, das zur Investition in einige dieser Prozesse erforderlich ist. Und nicht zuletzt muss hochpreisige Maschinenausrüstung rund um die Uhr arbeiten. Da gewöhnlich das Produktionsvolumen sich nicht mit der Maschinenkapazität deckt, ist die gemeinsame Nutzung der Maschinen mit anderen interessierten Fertigungsbetrieben eine geeignete Lösung.



*Abb. 1:  
Hochproduktive Schleusen-Shuttle Maschine zum Elektronenstrahlschweißen von Drucksensoren. Automatisches Be- und Entladen mit einem Portal unter Reinraumbedingungen.*

Überträgt man diese Philosophie auf das Elektronenstrahlschweißen (EBW), so gibt es einen weiteren Grund, um Maschinenkapazität gemeinsam zu nutzen: Da die Größe, die Leistung, die Steuerungsmöglichkeiten und die Werkstückbewegung genau den Anforderungen jeder Anwendung entsprechen müssen, können nur Zulieferer mit einer Vielfalt von verschiedenen Maschinen und einem starken finanziellen Rückhalt, um die Spanne zwischen der Produktentwicklung und dem Beginn der Produktion zu überbrücken, diese Anforderungen erfüllen. Der Zulieferer seinerseits versucht möglichst flexible Maschinenausrüstung einzusetzen, um sie für nachfolgende andere Aufträge weiter nutzen zu können. Die neue Generation von Schleusen-Maschinen erfüllt all diese Anforderungen. Sie sind, verglichen mit der früheren Generation von Kammermaschinen, drei- bis viermal produktiver und sie können für jede Art von Werkstückträgern mit einfacher oder mehrfacher Bestückung verwendet werden. Diesbezüglich sind sie viel flexibler als die Taktmaschinen (Bild Seite 1), die bisher vorwiegend bei der Automobilindustrie im Einsatz sind. Die exakte Reproduzierbarkeit von Prozessparametern und verbesserte Methoden der Online-Prozesskontrolle erlauben es, höchste Produktqualität einschließlich Dokumentation zu vernünftigen Preisen zu erzeugen.

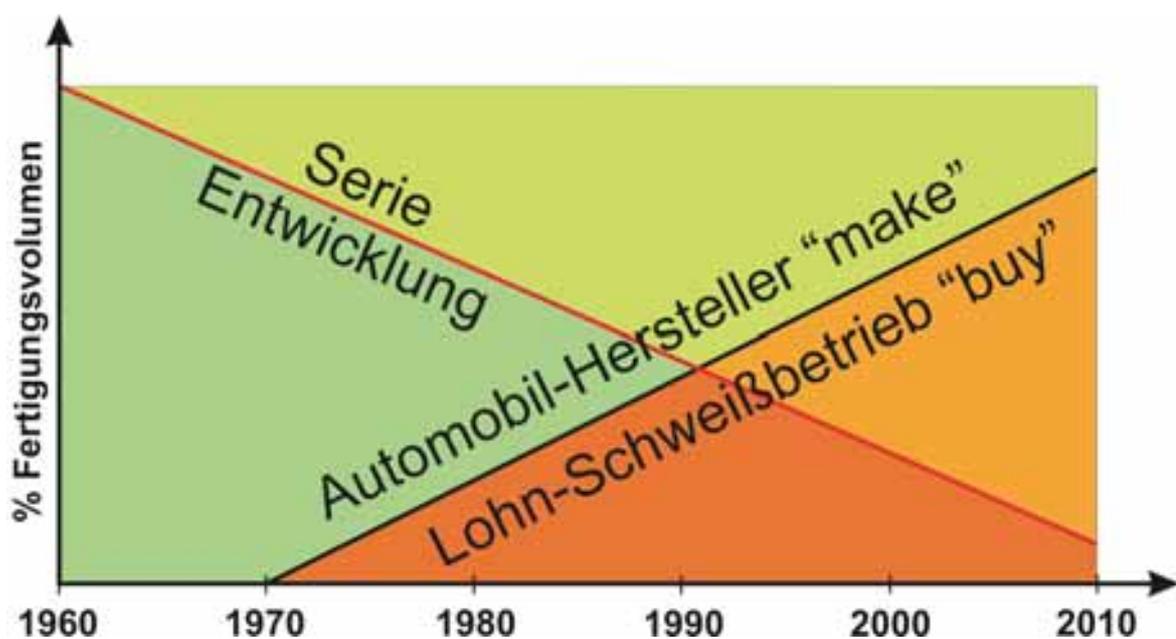


Abb. 2:

*In dem Maße wie das Produktionsvolumen und die Fremdvergabe wachsen, reduziert die Automobilindustrie eigene Elektronenstrahl-Entwicklungen und die zugehörige Produktion.*

Heutige Anforderungen zur Qualitätssicherung, basierend auf ISO 9000, ISO 9100 oder TS 16949, gelten mehr oder weniger für alle Industriezweige, aber dennoch gibt es kleine Unterschiede. Da in der Luft- und Raumfahrtindustrie die Werkstücke extrem teuer sind, wird gewöhnlich nach jedem Fertigungsschritt eine Zwischenkontrolle eingefügt, wohingegen die Automobilindustrie mit hohen Produktionsvolumina versucht, zwischen den hohen Kosten für die Kontrolle und den Kosten für eventuelle Ausschussteile zu optimieren. Am Ende bestehen alle Gruppen darauf, mit einer Null-Fehler-Fertigung beliefert zu werden, unabhängig davon ob fehlerhafte Teile laufend aussortiert werden oder erst am Ende der Fertigungskette. Indem man die „Intelligenz“ des Elektronenstrahls nutzt und online Überwachungsfähigkeiten zur Justierung des Strahls oder zum Aussortierung von Teilen unmittelbar vor dem Schweißen einsetzt, können wertvolle Teile innerhalb von Sekundenbruchteilen gerettet werden.

Abb. 3:  
Dokumentation von  
Schweißparametern.

Messpunkte: 409  
Ib Spitzen: 4  
HV Fehler: 0  
IL Fehler: 0  
Integral Ib: 1986,9  
Integral HV: 53228,599999  
Integral IL: 795116

Ib Istwert Sollwert  
IL Istwert Sollwert  
Ablenkung X Y  
HV Istwert Sollwert = 130kV

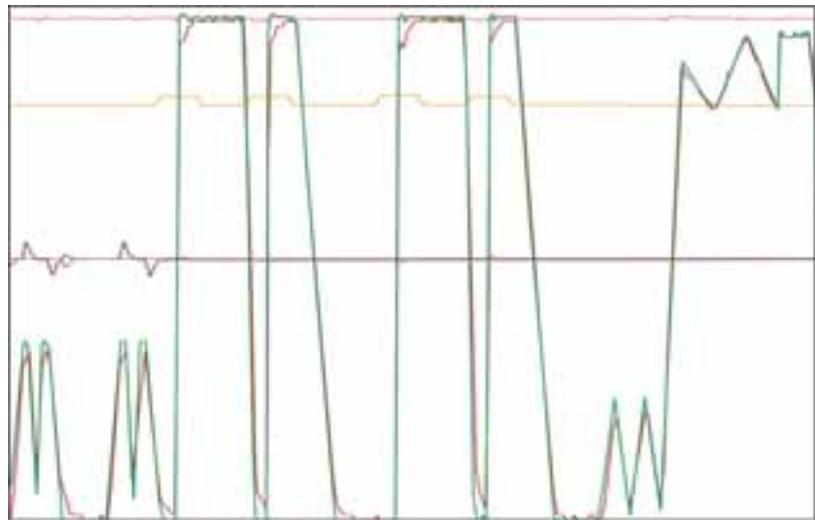
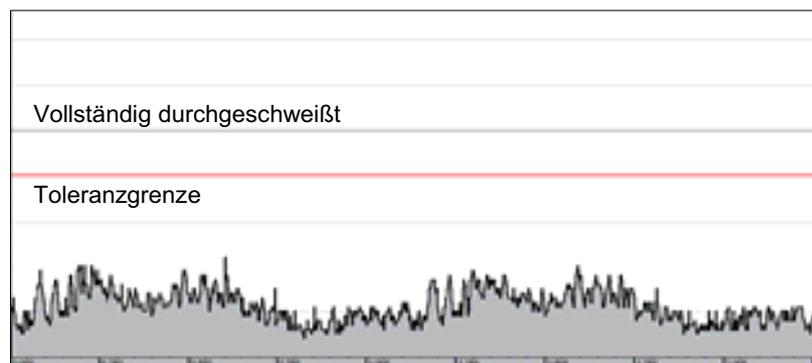


Abb. 4:  
Ultraschallprüfung  
des Wurzelspikings  
einer Schweißnaht.



---

Der Trend zur Fremdvergabe der Fertigung an starke Zulieferer wird anhalten, da es immer noch ein großes Potential zur Weiterentwicklung der Elektronenstrahltechnologie in Richtung höherer Produktivität gibt, das durch verbesserte oder neue Prozesse zur Kostenreduzierung führen wird. Zurzeit ist die Automobilindustrie zurückhaltend, eigenes Geld zu investieren. Dies ebnet den Weg zur Fremdvergabe des Elektronenstrahlschweißens, was zum Vorteil auch aller anderen Industriezweige ist. Durch das „Outsourcen“ seiner Produktion verlagert der OEM jedoch auch die damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Risiken auf den Zulieferer.

Elektronenstrahlmaschinen haben ein fast unbegrenztes Leben. Nur wenn es nach 30 oder 40 Jahren keine Ersatzteile mehr gibt, werden sie vielleicht verschrottet. Das Prinzip: „Never change a running system“ ist jedoch in zweierlei Richtungen kontraproduktiv: Die Betreiber alter Maschinen haben nicht teil an dem wirtschaftlichen Nutzen neuer Entwicklungen von hochautomatisierten und schnelleren Ausrüstungen, die sich wirtschaftlich selbst rechnen. Zum anderen ist der Eindruck auf außenstehende Personen der einer altmodischen Technik, statt der eines hochwissenschaftlichen und modernen Produktionsprozesses. Junge Ingenieure bevorzugen es, im weißen Mantel in einer attraktiven Umgebung mit zeitgemäßen Maschinen zu arbeiten. Dies sollte berücksichtigt werden, um qualifizierte und motivierte Mitarbeiter anzuziehen.

Die Bedeutung der Automobilindustrie für die Entwicklung des Elektronenstrahlschweißens wird durch die Tatsache unterstrichen, dass zwei Drittel der in den letzten fünf Jahren verkauften 590 EB-Maschinen an die Automobilindustrie verkauft wurden, vor allem an Zulieferer von Aggregaten und Komponenten. Es ist ebenfalls bemerkenswert, dass mehr als 50% dieser Maschinen in Asien investiert wurden. Dies hat einen einfachen Grund: die Kosten für Elektrizität sind vor allem in Japan viel höher als in Europa oder Amerika. Aufgrund des wesentlich geringeren Energieverbrauchs von Elektronenstrahl-

maschinen einschließlich der Vakuumerzeugung, verglichen mit z.B. einem 4kW Festkörperlaser, können pro Jahr mehr als 50.000 Euro in Europa und das doppelte in Japan gespart werden, unabhängig von zusätzlichen Kosten für Schutzgase, die bei Lasern benötigt werden. Dies ist der Grund, warum Elektronenstrahlschweißen, vor allem im Getriebebau bei Anwendungen auf denen beide Technologien im Wettbewerb stehen, in asiatischen Ländern dominiert.

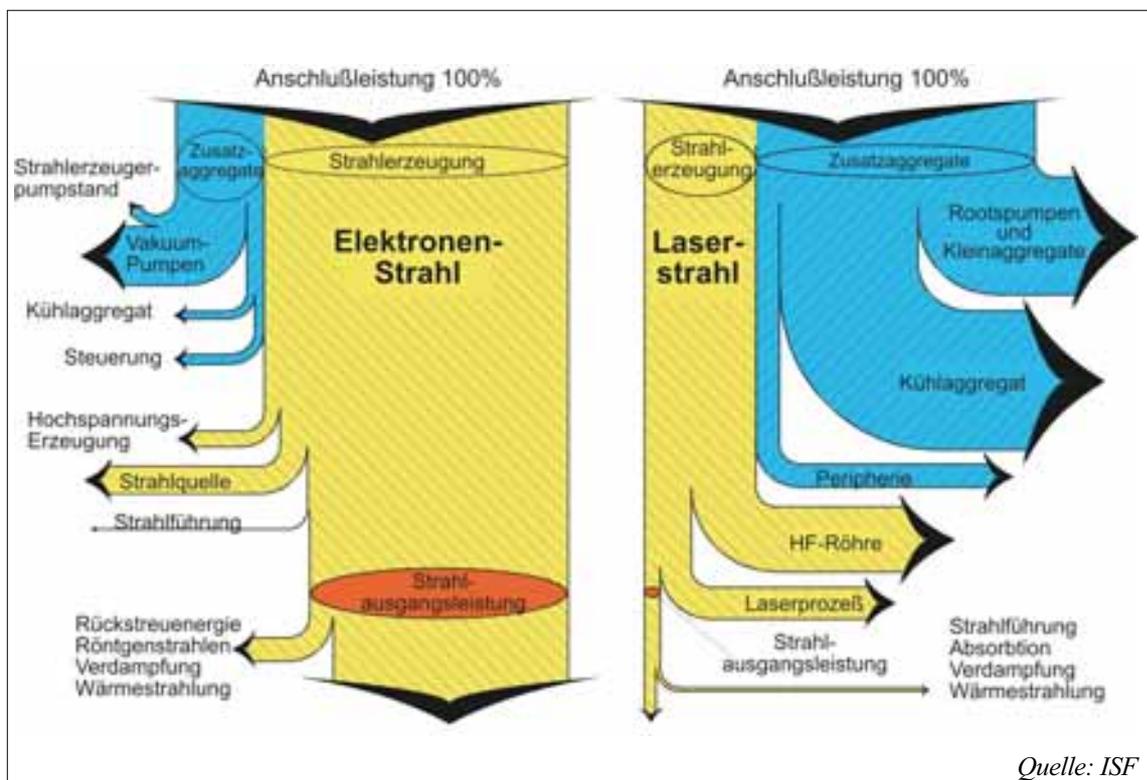


Abb. 5:

Vergleicht man den Wirkungsgrad von Elektronenstrahl- und Laserstrahlquellen, so ist offensichtlich, dass die Betriebskosten von Lasern weit höher sind als die des Elektronenstrahls. Es ist weiter zu berücksichtigen, dass bei gleicher Leistung die Schweißtiefe des Elektronenstrahls doppelt so hoch ist wie die des Lasers und dass Vakuum billiger ist als Schutzgas. Neueste Laserentwicklungen wie Scheiben- und Faserlaser machen hier Boden gut.

Eine Statistik der weltweiten Verteilung von Elektronenstrahlanlagen und deren Alter, die die letzten 50 Jahre abdeckt, zeigt klar die Verschiebung der Nutzung des Elektronenstrahls von den alten Industrienationen zu den schnell wachsenden Märkten Asiens. Über dem ehemaligen COMECON-Bereich gibt es wenig Informationen.

Gesamtzahl installierter Anlagen bis 2005  
(Anlagen in der Region = gefertigt - exportiert + importiert seit 1950) abzüglich  
der verschrotteten Maschinen oder im heutigen Bestand stillgelegten Maschinen,  
davon **neu** seit 1990.

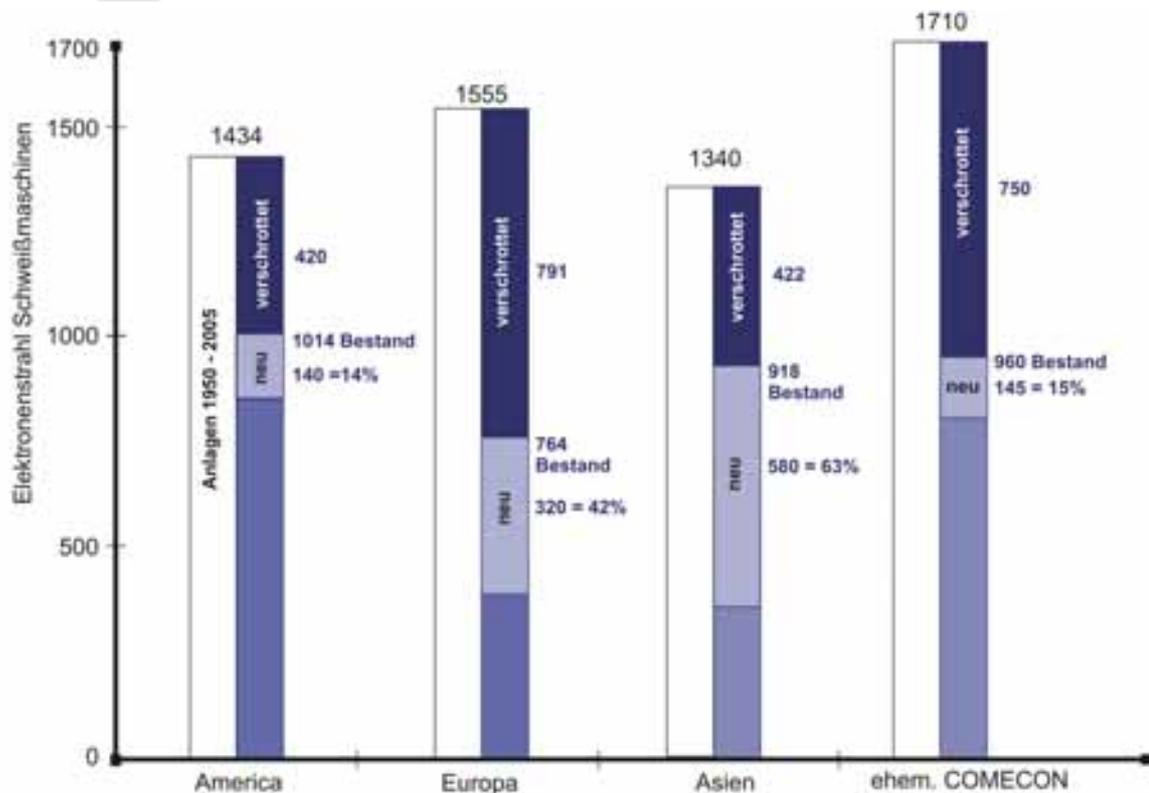


Abb. 6:  
Der Markt für Elektronenstrahlanlagen verschiebt sich von Amerika nach Asien.

Für die Zukunft des Elektronenstrahlschweißens von großen Stückzahlen wird die Frage zu beantworten sein, ob es effektiver ist, z.B. fünf identische billige Maschinen für eine hochvolumige Produktion laufen zu lassen, wovon vier die Fertigungskapazität abdecken und eine in Bereitschaft steht für Kapazitätsspitzen, für Wartungsarbeiten oder aus Gründen der Sicherheit, so wie es in den 70iger Jahren in der amerikanischen Getriebefertigung üblich war, oder ob es besser ist, zwei hochproduktive Maschinen (natürlich zu höheren Investitionskosten je Einheit) einzusetzen?

Dabei gilt es zu bedenken, dass gegen höhere Produktionssicherheit bei mehr Maschinen größerer Flächenbedarf, mehr Energieverbrauch, mehr Ersatzteile und Servicebedarf stehen.

## Automobilindustrie

Alle Anwendungen des Elektronenstrahlschweißens im Automobilbereich beziehen sich auf das Fahrwerk, den Antriebsstrang, das Getriebe oder den Motor und eine Reihe von Nebenaggregaten wie z.B. Teile der Elektrik und Sensoren oder Wärmetauscher usw. Es gibt keine Anwendung im Bereich der Karosserie, welche die Domäne des Laserstrahlschweißens darstellt.

*Abb. 7:  
Elektronenstrahl-  
schweißen wird in  
der Automobilindustrie  
intensiv genutzt,  
sowohl für die Serien-  
produktion, als auch  
für den Rennsport.*



Ein Grund, warum das Elektronenstrahlschweißen statt anderer Füge-technologien verwendet wird, ist die hohe Produktivität und die gute Automatisierbarkeit für die Serie verbunden mit der Fähigkeit zur Überwachung der Prozessparameter, ebenso wie die hohe Flexibilität für den Prototypenbau.

*Abb. 8:  
Die alte Generation  
von Taktmaschinen  
mit automatischer  
Bestückung wird  
trotz ihrer hohen  
Produktivität nicht  
mehr benützt. Diese  
Maschine hat einst-  
mals 1100 Zünd-  
verteilerfinger pro  
Stunde geschweißt.*



Schon in den 1970er Jahren waren Schweißmaschinen in Benützung, die in der Lage waren, 1000 Teile und mehr pro Stunde zu schweißen. Es überrascht, dass die heutige Automobilindustrie so zurückhaltend ist

dieses Potential zu nutzen, oder zumindest warum es die letzte Alternative bei der Auswahl einer Fertigungstechnologie darstellt? Mehrfach wurden Elektronenstrahlanlagen erst nach mehreren Jahren erfolgloser Experimente mit Lasern gekauft. Kurz vor dem Serienanlauf erinnerte man sich an das Elektronenstrahlschweißen. Die Fähigkeit unserer Lohnbetriebe, die volle Produktion über einen gewissen Zeitraum aufzufangen, bis eine neue Maschine konstruiert, gefertigt und geliefert werden konnte, brachte den Elektronenstrahl noch ins Geschäft. Manchmal war es allerdings zu spät, da die Investition in einen weniger geeigneten Prozess bereits getätigt war. Welcher Angestellte würde in einer solchen Situation zu seinem Vorgesetzten gehen und gestehen, dass er einen geeigneteren Fertigungsprozess fand, dass neu investiert und die gerade angeschaffte Maschinenausrüstung stillgelegt werden müsse? Die meisten der europäischen und amerikanischen Automobilgesellschaften sind so stark auf den Laser fokussiert, dass sie große Gruppen von Laserspezialisten, einschließlich gut ausgerüsteter Laboratorien betreiben und keinen einzigen Experten mehr besitzen, der den Elektronenstrahl voranbringt, oder zumindest einen Blick auf seine Fähigkeiten wirft.

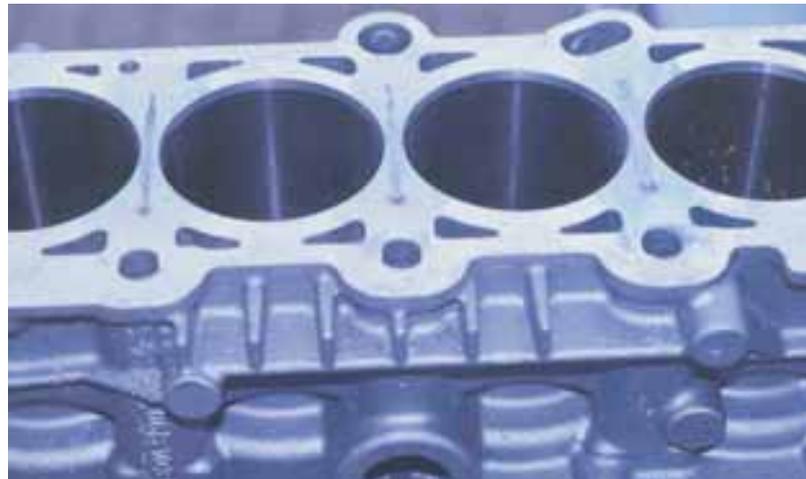


*Abb. 9, 10, 11:  
Produktionslinien be-  
stehen typischerweise  
aus 12 Stationen: Be-  
ladung, Teileerkennung,  
Waschstrecke, Füge-  
station mit Kraft-Weg-  
Messung, Entmagne-  
tisieren, Vorwärmen,  
Bestücken, Schweißen,  
Abkühlen, Bürsten,  
Ultraschallprüfen und  
Entladen.*

Im Gegensatz zu asiatischen Gesellschaften sind viele unserer europäischen Konstrukteure und Produktionsmanager nicht auf dem neuesten Stand der laufenden Elektronenstrahlentwicklung. Dies könnte jedoch zur Lösung ihrer Fügeprobleme hilfreich sein. Kurz gesagt: der Mangel an „Sexappeal“ eines Elektronenstrahls wird konfrontiert mit der übertriebenen Begeisterung für den Laserstrahl. Selbst Experten sind sich nicht wirklich der Tatsache bewusst, dass ein typisches europäisches Auto etwa 20 bis 25 EB-Nähte aufweist, ein luxus SUV sogar 120. Die Gründe, warum und wann das EB-Schweißen statt anderer Füge Technologien eingesetzt wird, sind so vielfältig, dass sie am besten durch Anwendungsbeispiele erklärt werden:

### **Motor und Motorkomponenten**

Drei verschiedene Anwendungsbereiche des Elektronenstrahlschweißens werden an PKW-Motoren aus Aluminium-Legierungen beobachtet: verbessertes Kühlverhalten, das wegen Leistungssteigerung der Motoren erforderlich wird, eine „closed deck“-Konstruktion, die das Gießen erleichtert und die Steifigkeit verbessert und die Verwendung von unterschiedlichen Legierungen entsprechend ihrer Funktion.



*Abb. 12, 13, 14: In den Steg zwischen 2 Laufbuchsen wird ein Schlitz gefräst und mit einem Formblech verschlossen, das mit 2 EB-Nähten abgedichtet wird. Längs- und Querschliff durch den Kühlwasserschlit.*

Dem Fall eins liegt die Idee zugrunde, den Hubraum eines existierenden Motors zu vergrößern, ohne den Abstand der Zylinderachsen zu verändern. Dadurch verringert sich die Stegbreite zwischen den Zylinderlaufbuchsen und als Folge wird eine verbesserte Kühlung erforderlich. Ein Spalt von 0,8 mm Breite wird in den verbleibenden 2,3 mm breiten Steg aus Aluminium gefräst, direkt neben den Laufbuchsen aus Gusseisen. Der Spalt wird mit einem Blechsegment verschlossen, das auf beiden Seiten mit 16 mm tiefen EB-Nähten abgedichtet wird. Wenn die Schweißnähte das Gusseisen anschmelzen, entstehen intermetallische Phasen mit Rissen, die zu Undichtigkeiten führen, so dass sich Kühlwasser mit Motoröl mischt. Das Problem dabei ist, dass die Toleranzen, die beim Gießen eingehalten werden können, viel größer sind, als für das Schweißen zulässig. Deshalb wurde eine automatische Nahtsuche erforderlich. Die Arbeit würde mit Schleusen-Transfer Maschinen bewältigt, die eine Taktzeit von 49 Sekunden für die 4-Zylinder Maschine mit 6 EB-Nähten und von 52 Sekunden für den 6-Zylinder Motor mit 8 EB-Nähten aufweisen.



*Abb. 15:  
Das Schweißproblem entstand durch den Versatz des Schlitzes wegen Gusstoleranzen.*



*Abb. 16: Schleusen-Transfermaschine zum Elektronenstrahlschweißen von 4-Zylinder Kurbelgehäusen.*

Während der letzten 15 Jahre ist immer wieder die Idee aufgetaucht, „closed deck“ Kurbelgehäuse zu fertigen, bei denen einfachere Gussteile Verwendung finden, in die ein passgenaues Deck eingesetzt wird und mittels NC gesteuertem Elektronenstrahl konturgenau verschweißt wird. Feinguss und selbst Druckguss von Aluminiumlegierungen in Verbindung mit Elektronenstrahlschweißen wurden getestet.



Abb. 17, 18: Kurbelgehäuse als „closed deck“ Konstruktion, links offen, rechts verschweißt.

Mit zunehmender Leistung der Motore wurde offensichtlich, dass die Verwendung der gleichen Legierung für Zylinderwandungen und Kurbelgehäuse nicht gut ist. Deshalb wird viel experimentiert, um die Gefügestruktur oder die mechanischen Oberflächeneigenschaften von Zylinderlaufbuchsen entweder durch Wärmebehandlung oder durch Auflegieren, zu beeinflussen. Manchmal ist dies mit dem kompletten Motorblock schwierig; es kann einfacher sein, nur die Laufbuchse zu drehen, um z.B. eine innere Oberflächenbehandlung durchzuführen und diese dann in den Motorblock einzuschweißen oder noch einfacher, gleich ein Material zu verwenden, das die geforderten Eigenschaften aufweist.

Da Aluminiumlegierungen mit einem hohen Siliziumgehalt gute Gleit- und Verschleiß Eigenschaften aufweisen, werden sie gerne für Zylinderlaufbuchsen verwendet. Jedoch erfüllen diese übereutektischen Legierungen nicht die Anforderungen an Steifigkeit und Festigkeit, die für ein Kurbelgehäuse eines Hochleistungsmotors erforderlich sind. Deshalb werden unterschiedliche Legierungen für Laufbuchsen und Kurbelgehäuse durch Elektronenstrahlschweißen der Buchse im Motorblock eingefügt.



Abb. 19, 20, 21, 22: Motorblöcke mit eingesetzten Laufbuchsen, „closed deck“ (oben) und „open deck“ (unten).

Eine Kuriosität aus dem Bereich der Prototypfertigung war der Wunsch, einen 18-Zylinder Motor für den Bugatti zu fertigen. Das Fahrzeug sollte mit eigenem Motor auf dem Genfer Automobilsalon vorgefahren. Zunächst wurden ein Zylinder eines Standard 4-Zylinder Motors abgeschnitten und durch EB-Schweißen zweier Abschnitte zu einem 6-Zylinder Reihenmotor gefügt. Drei von solchen Motoren wurden dann in Form eines W-Motors gefügt. Der Job war erfolgreich; Der Motor erzeugte ein wundervoll röhrendes Geräusch.



Abb. 23:  
Der einmalige 18-Zylinder Bugatti Motor mit Distanzplatten gefügt.

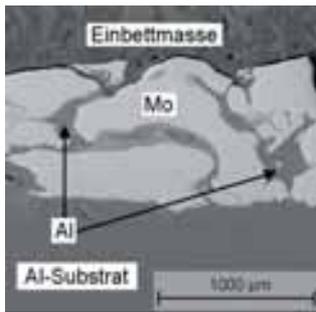


Abb. 24:  
Einschmelzgefüge von  
Molybdän in Alumi-  
nium.

Eine interessante und neuartige Technologie ist das Dispersionslegieren der inneren Oberfläche von Zylinderlaufbuchsen durch Aufsprühen von Molybdän oder Wolframtröpfchen durch Zentrifugalkräfte. Ein im Zentrum eines Zylinders mit 5.000 bis 40.000 UpM rotierender Stab aus Molybdän oder Wolfram wird an seinem Ende mit einem intensiven Elektronenstrahl über Schmelztemperatur erhitzt. Die Teilchengröße der flüssigen Schwermetalle, bei Temperaturen, die zweimal so hoch sind wie der Schmelzpunkt von Aluminium, ist abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit. Die Teilchen dringen tief in den Liner ein. Nach dem Hohen ist die Oberfläche hart und verschleißfest.

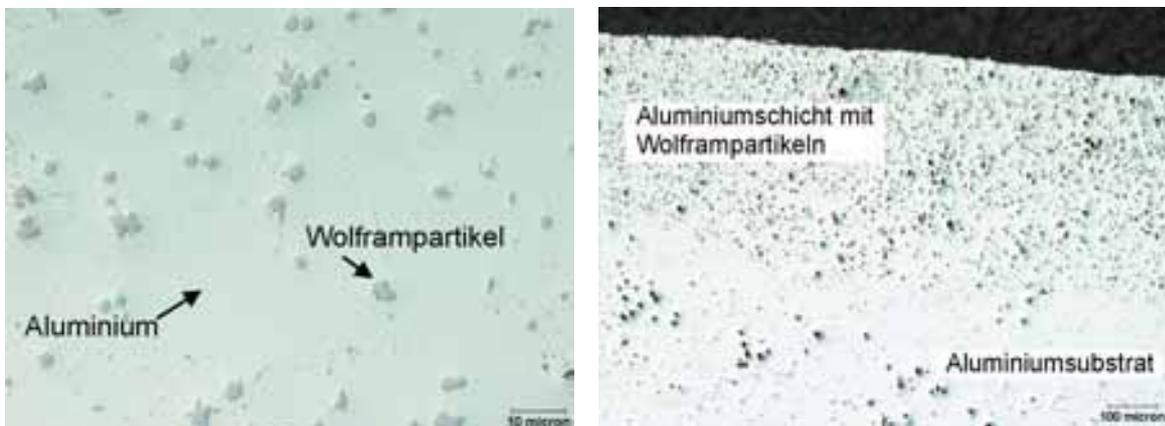


Abb. 25, 26: Feine Wolframeilchen in Aluminium dispergiert.

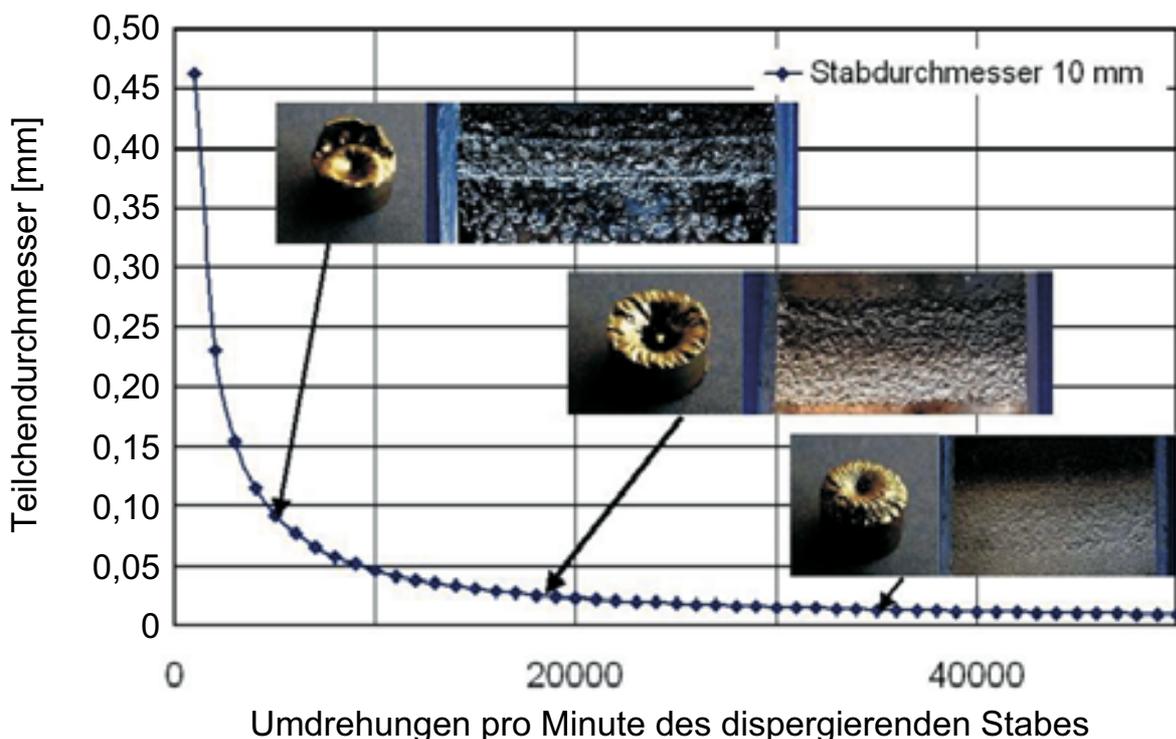


Abb. 27: Teilchengröße in Abhängigkeit von Rotationsgeschwindigkeit und zugehörige Dispersionsoberfläche.



*Abb. 28:  
Laufbuchse aus einer  
übereutektischen  
Aluminiumlegierung  
wird mit dem EB ge-  
gen eine Legierung  
mit höherer Steifigkeit  
geschweißt.*

Viele Kolben werden aus Aluminium-Siliziumlegierungen hergestellt. Da der Stützring aus Stahl für den Kolbenring eingegossen werden muss ist dieses Segment aus einer Aluminium-Gusslegierung, während der Rest als Schmiedeteil hergestellt wird. Durch Elektronenstrahlschweißen der beiden Teile ist es möglich, gleichzeitig den Kühlringkanal herzustellen, ohne einen Gusskern zu benötigen. Bei den gezeigten Beispielen von größeren LKW- oder Schiffskolben wird zunächst die Umfangsnaht, die freies Schrumpfen ohne größere Spannungen aufzubauen erlaubt, ausgeführt. Die zweite Axialnaht muss möglichst schlank sein, da die verwendeten Legierungen wenig Duktilität aufweisen und deshalb empfindlich für Spannungsrisse sind. Eine anschließende Wärmebehandlung ist erforderlich. Für kleinere Kolben werden konstruktiv zwei parallele Axialschweißnähte vorgesehen, da sie in einer Aufspannung ausgeführt werden können und so die Fertigungskosten, im Vergleich zu zwei Schweißungen in unterschiedlicher Richtung, reduzieren.



*Abb. 29:  
Die schlanken EB-  
Nähte ermöglichen es,  
den Kühlkanal ohne  
verlorenen Gusskern  
zu fertigen.*



*Abb. 30: Bei kleineren Kolben  
ohne Stützring wird der Kühl-  
kanal durch 2 parallele  
Schweißnähte hergestellt.*



*Abb. 31, 32:  
Die konstruktive Verbindung von Schmiede- und Guss-  
legierung erfordert die Fähigkeit des Elektronenstrahl-  
schweißens.*



Die Randschichtbehandlung an Nockenwellen aus Gusseisen kann auf zweierlei Weise erfolgen: die Nockenoberflächen werden entweder durch Umschmelzen der Randschicht in eine Tiefe von etwa 1 mm mit Selbstabschreckung und nachfolgendem Schleifen, oder sie werden durch Umwandlungshärten mit einer Tiefe von etwa 0,7 mm, hergestellt. Je nach Anzahl der Nocken die bearbeitet werden müssen, beträgt die Zykluszeit in einer Doppelkammermaschine zwischen 35 bis 55 Sekunden.



Abb. 33 und 34: Verschiedene Nockenwellen mit 6 bis 12 Nocken.



Abb. 35: Doppelkammermaschinen zur Randschichtbehandlung von Nocken.

Neuere Nockenwellen sind gewichtsreduziert. Durch Innen-Hochdruck-Umformen (IHU) wird ein Rohr an die exzentrischen Nockenringe aus Einsatzstahl angepresst. Die beiden offenen Enden des Rohres werden durch EB-Schweißen mit Endstücken verbunden.



*Abb. 36:  
Hohle Nockenwellen  
mit EB-geschweißten  
Endstücken.*



*Abb. 37  
Produktionslinie zum  
Elektronenstrahl-  
schweißen von IHU  
Nockenwellen mit vor-  
und nachgelagerten  
Prozessen.*



*Abb. 38:  
Versuch der Gewichtsreduzierung  
an Kurbelwellen.*

Eine Kuriosität zur Gewichtsreduzierung war der Versuch, eine LKW-Kurbelwelle mit Hohlräumen zu gestalten. An jedem Lagersitz wurde das Bauteil getrennt und das innere Material auf ausreichende Wanddicke herausgefräst, ehe die Teile durch Elektronenstrahlschweißen wieder gefügt wurden. Diese Idee könnte eines Tages durch Innen-Hochdruck-Umformen wieder zum Leben erweckt werden. Elektronenstrahlhärten von Kurbelwellen als Serienproduktion mag schon viel früher erfolgen. Das Problem ist das Auftreffen des Strahls unter flachem Winkel, und dabei eine ausreichende Härtetiefe, zu erreichen.

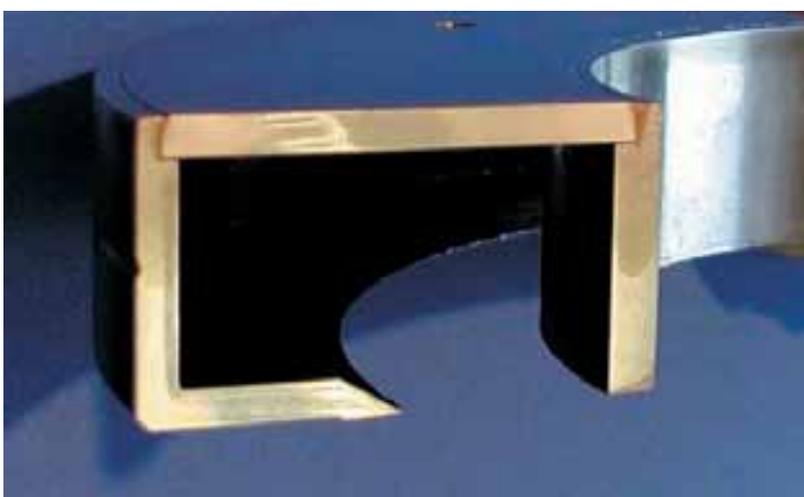


*Abb. 39:  
Elektronenstrahlhärten von Kurbelwellen.*

Ein weiteres Produkt, das seit nahezu vier Jahrzehnten elektronenstrahlgeschweißt wird, sind Viskose-Schwingungsdämpfer in verschiedenen Größen bis zu Durchmessern von 800 mm. Da es sich um ein großes Produktionsvolumen handelt und jeder Dämpfer zwei relativ lange Schweißnähte aufweist, würden diese am wirtschaftlichsten in einer Schleusen-Transfer-Maschine geschweißt werden, jedoch sind Taktmaschinen heute die typischen Fertigungsanlagen. Da die Werkstoffkombination aus Gusseisen, in Verbindung mit einem Deckel aus Weicheisen, langsames Schweißen erfordert, ist die Unterdrückung der Nebenzeiten der Schlüssel zur Wirtschaftlichkeit.



*Abb. 40, 41:  
Viscose-Schwingungs-  
dämpfer, Ansicht von  
oben und Querschliff  
der zwei Nähte eines  
anderen Modells.*



Das EB-Schweißen bietet für experimentielle Zwecke und für das Fertigen von Prototypen eine hohe Flexibilität. Die freie Programmierbarkeit beliebiger Schweißbahnen erlaubt dem Konstrukteur seine Gedanken umzusetzen.

Für Rennfahrzeuge wurden Konstruktionsvarianten erprobt, hohle Pleuelstangen aus Titanlegierungen zu fertigen, jedoch ohne Erfolg. Die spannungsfreie Variante mit zwei längs geteilten Halbschalen wartet noch auf die Erprobung.

Zu Versuchszwecken werden Pleuelstangen auch mal in ihrer Länge, unter Verwendung von Serienteilen, verändert.



*Abb. 42:  
Hohle Pleuel aus Titan.*



*Abb. 43:  
Verkürztes Pleuel.*

Hochleistungsmotoren, insbesondere für den Rennsport, verwenden Natrium gekühlte Ventile zur verbesserten Wärmeableitung aus dem Ventilkopf. Verschließt man den Ventilteller durch EB-Schweißen ergibt sich der Vorteil, dass Vakuum im Inneren des Ventils herrscht, was das Natrium vor Kontamination schützt.



Abb. 44:  
Ventiltellerkühlung durch das  
Heatpipe Prinzip.



Abb. 45:  
Leichtventil das innen hohl ist, mit um  
schmelzveredelter Dichtkante.

### Treibstoff- und Verbrennungs-Management

Viele Zusatzaggregate zum Motor werden ebenfalls elektronenstrahlgeschweißt. Drucksensoren für Common-Rail-Einspritzsysteme erfordern tiefe Schweißnähte, die einem Druck bis zu 2000 bar standhalten. Gleichzeitig muss die Wärmeeinbringung auf die nahe der Naht liegende, temperaturempfindliche Halbleiterschicht möglichst gering sein. Die einzige Möglichkeit, diese widersprechenden Anforderungen zu lösen, ist eine sehr schlanke Naht. Ein Aspektverhältnis Tiefe zu Breite von 12 wird erreicht.



Abb. 46:  
Drucksensor für Common-Rail-  
Einspritzsysteme.

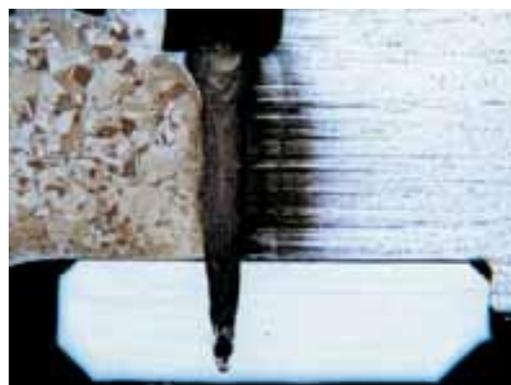


Abb. 47:  
Schliff durch die Schweißnaht mit  
0,2 mm Breite und 2,3 mm Tiefe.  
Drei unterschiedliche Werkstoffe.

Eine weitere Anforderung ist, dass Teile die mit einem Plan- oder Rundschlag montiert, oder die innerhalb der Drehvorrichtung ungenau bestückt sind, nicht geschweißt werden dürfen. Dies wird durch eine unmittelbar vor dem Schweißen eingeschobene Qualitätskontrolle mittels Rückstreuelektronen erreicht. Mit 20 Scans pro Umdrehung muss die Abwicklung eine gerade Linie ergeben, um ein Gutteil auszuweisen. Ist die Abweichung von der Geraden mehr als  $\pm 10 \mu\text{m}$  werden die Teile nicht geschweißt und können neu montiert werden. Auf diese Weise werden teure Halbleiter erhalten. Die Drucksensoren werden in Schleusen-Shuttle Maschinen (Abb. 1) mit einer automatischen Portal Be- und Entladung auf 20-spindligen Drehvorrichtungen produziert. Die Taktzeit beträgt 1,5 Min. für 20 Teile.

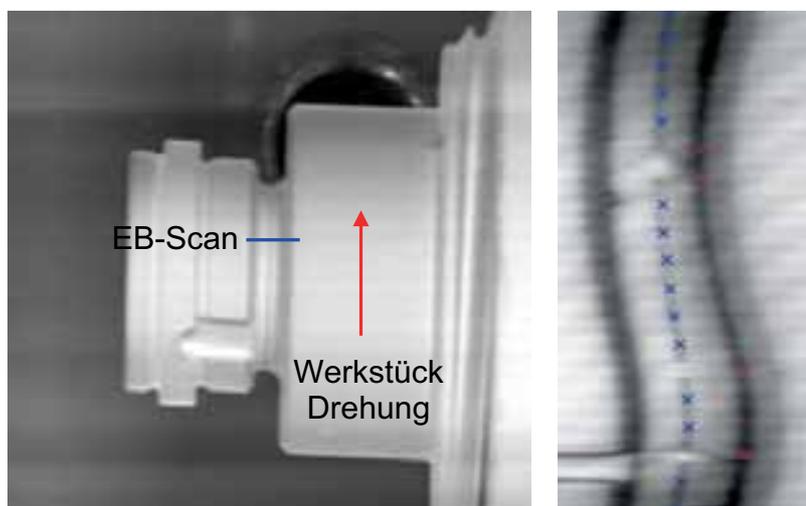


Abb. 48, 49:  
Links: Drucksensor abgebildet durch Rückstreuelektronen und rechts: Abwicklung der Schweißnaht. Eine fehlerfreie Montage zeigt eine gerade Linie der Messpunkte ohne Abweichungen.



Abb. 50:  
Beladevorrichtung mit einem 4-fach Greifer.



Abb. 51, 52:  
Für spezielle Größen von Sensoren werden angepasste Vorrichtungen verwendet.



Abb. 53:  
Produktionsvorrichtung zum Schweißen von Einspritzdüsen.



Abb. 54: Solenoid  
Direkteinspritzdüse.

Kürzlich entwickelte Solenoid Direkteinspritzdüsen (SDI) für Benzin, ergeben eine reduzierte CO<sub>2</sub> Emission und ein verbessertes Kaltstartverhalten. Drei rohrförmige Körper werden zentrisch ineinander gesteckt und unter einem Winkel von 20° mit zwei Nähten geschweißt. Die Werkstückträger sind 8-spindlige Drehvorrichtungen. Durch den flachen Einstrahlwinkel resultiert aus Rundlauf Fehlern eine dreifach höhere Abweichung der Schweißposition und diese wiederum in geringerer Einschweißtiefe. Um eine reproduzierbare Schweißqualität zu erreichen, wird eine automatische Nahtpositionierung verwendet, die die exakte Fügestelle in zwei verschiedenen vertikalen Positionen detektiert. Laden und Beladen erfolgt von Hand. Zur Qualitätssicherung wird ein Helium Lecktest bei 120 bar Druck eingesetzt.

Das durch Innen-Hochdruck-Umformen hergestellte Teil einer Treibstoffeinspritzleitung wird mit einem Rohr durch eine Umfangsnaht verschweißt, die eine hohe Zuverlässigkeit erfordert.

Abb. 55:  
Treibstoffeinspritz-  
leitung.



Weniger spektakulär sind die Laufräder von Turboladern, da sie seit mehr als 3 Jahrzehnten elektronenstrahlgeschweißt werden. Aber natürlich gib es auch hier Verbesserungen – im Wesentlichen bei der Auswahl der Werkstoffe. Für das Laufrad werden Werkstoffe höherer Festigkeit bei höheren Temperaturen verwendet und für den Schaft zähere und härtere Stähle; jedoch ist die Werkstoffauswahl durch ihre Schweißbarkeit begrenzt. Superlegierungen auf Nickel- oder Kobaltbasis mit erhöhten Titan- und Aluminiumgehalten neigen zu Mikrorissbildung in der Wärmeeinflusszone die während des Betriebs fortschreiten könnten. Deshalb ist besondere Sorgfalt zur Vermeidung solcher Mikrorisse erforderlich.

Eine andere automobiler Anwendung, die das Elektronenstrahlschweißen aus Gründen der Werkstoffauswahl erfordert, sind Klappenteller für Turbolader. Das Material ist eine Hochtemperaturlegierung, die zur Rissbildung neigt. Die Kreisnaht mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Tiefe von 5 mm ist schrumpfbegünstigt. Deshalb muss eine sehr schlanke Naht erzeugt werden, um die Schrumpfspannungen zu minimieren. Eine Naht mit einer durchschnittlichen Breite von 0,5 mm erfordert eine Positionstoleranz des Strahls auf der Fugestelle von 0,05 mm. Bei größeren Toleranzen könnte sich sonst an der Nahtwurzel ein Bindefehler ergeben. Die exakte Positionierung des Strahls wird automatisch erreicht, indem man einen gerasterten Elektronenstrahl benutzt, der ein Abbild der Fügeanten des Werkstücks durch Rückstreuelektronen erzeugt. Dies erlaubt das mannlose Schweißen. Da aufgrund der Werkstückgeometrie keine Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung besteht, muss man

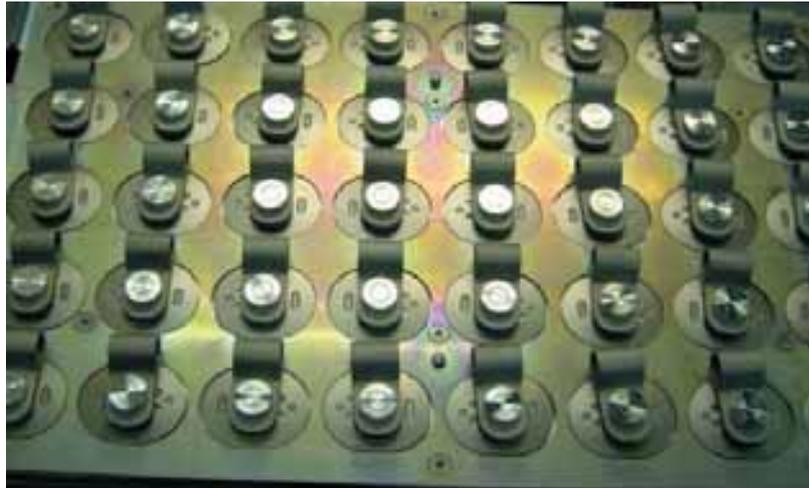


Abb. 56:  
Turbolader: Laufrad aus einer Hochtemperatur Superlegierung, Schaft aus Einsatzstahl.



Abb. 57, 58:  
Klappenteller (Ladedruckregelklappe) und zugehöriger Schliff.

Abb. 59:  
Schweißvorrichtung  
für Klappenteller.



sich auf die exakte Reproduzierbarkeit des Schweißergebnisses verlassen. Die Produktion erfolgt auf einer Schleusen-Shuttle-Maschine mit Werkstückträgern, die es erlauben je nach Typ bis zu 50 Teile in einer Charge zu bearbeiten. Der Energieverbrauch liegt unter 25 kWh für 1000 Teile.

Der justierbare Einlauftring eines Turboladers aus einer Hochtemperaturlegierung wird heute mit WIG oder Plasma geschweißt. Die Montage in einer Vorrichtung, so dass alle Flügel exakt in die richtige Position ausgerichtet sind, ist ebenso zeitraubend wie das heutige Schweißverfahren. Elektronenstrahlschweißen mit einer Mehrstrahl-Flashtechnologie in Verbindung mit einer automatischen Bilderkennung der Schweißpositionen ist ein Weg, die Produktionsgeschwindigkeit erheblich zu steigern.



Abb. 60, 61:  
Einlauftring eines  
Turboladers, Vorder-  
und Rückseite.



Im Verlauf der Auspuffleitung kann je nach Motortyp ein Abgaskatalysator oder ein Partikelfilter eingesetzt werden. Die Stahlträger mit der großen Oberfläche für den Katalysator werden manchmal aus Edelstahlwellblech hergestellt. Da alle Positionen, an denen sich die Folien berühren, zu verschweißen sind, aber unregelmäßig verteilt sind, erfolgt das Schweißen mit einem in zwei Richtungen mit hoher Frequenz oszillierenden Strahl. Auf diese Weise wird jede Fügestelle getroffen.

Im Gegensatz hierzu erfordert das Schweißen von Partikelfiltern ein präzises Springen des Strahls auf die 60 radialen Fügelinien. Hierbei springt der Strahl so schnell, dass er 1000-mal je Sekunde auf alle 60 Schweißpositionen zurückkehrt und so 60 Taschen mit geringer Geschwindigkeit gleichzeitig geschweißt werden. Diese ist erforderlich, da das Streckmaterial, das den Katalysator trägt, bei höheren Geschwindigkeiten nicht gleichmäßig fließt, sondern ein intensives Spritzen und Funkeln erzeugt. Um die Produktivität hoch zu halten, ist gleichzeitiges Schweißen aller Nähte eine sehr attraktive Lösung.

Die gesamte Schweißzeit beträgt 16 Sekunden verglichen mit 16 Minuten beim WIG-Schweißen.

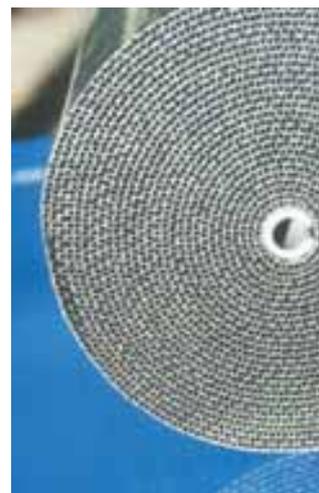


Abb. 62:  
Katalysatoroberfläche,  
die mit einem geraster-  
ten Strahl innerhalb  
3 Sekunden bei 65 mm  
Teiledurchmessern  
geschweißt wird.



Abb. 63:  
Detail von Abb. 62.

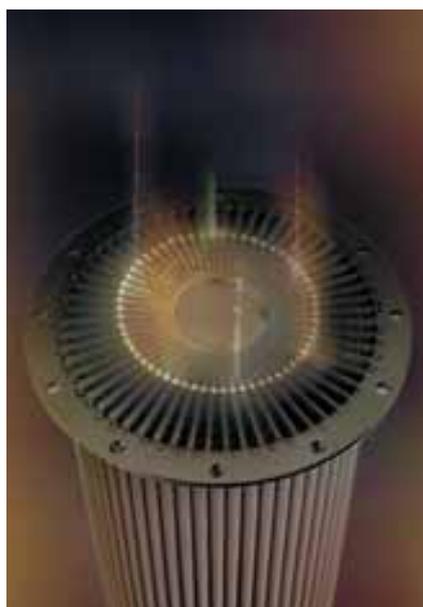


Abb. 64:  
Partikelfilter mit 60 gleichzeitig  
geschweißten Filtertaschen.



Abb. 65:  
Schliff durch die 4-lagige Bördelnaht des Partikelfilters.

### Antriebsstrang

Von der Antriebswelle geht die Kraftübertragung über die Kardanwelle, bei Rennautos aus Titan, zum Differentialgetriebe. Das Differentialgehäuse ist eines der aktuellen Schweißprobleme, wobei das Fügen von Gusseisen mit Einsatzstahl, ohne Vorwärmen und ohne Zwischenlagematerial eine große Herausforderung darstellt. Wenn Gusseisen mit einem Kohlenstoffgehalt über 4% mit einem typischen Zahnradstahl wie 16MnCr5 gefügt werden soll, entsteht in der Schweiß-

*Abb. 66:  
Abtriebswelle eines  
Geländewagens.  
Die Schweißnaht mit  
40 mm Tiefe muss  
ein Drehmoment von  
750 Nm übertragen  
(Siehe Abb. 135, 136).*



*Abb. 67:  
EB-geschweißte Kar-  
danwelle aus Titan.*



zone ein extrem hartes und sprödes Gefüge, selbst wenn die Einsatzschicht vorher entfernt wurde. Bei einer Schweißtiefe von 25 mm ist die Schmelze mindestens 1 mm breit. Beim Abkühlen werden die Schrumpfspannungen durch Mikrorisse abgebaut. Diese sind kleiner als die Größe der Kohlenstofflamellen, so dass sie eigentlich keine Gefahr darstellen. Eine Wärmenachbehandlung ist nicht möglich, da der Zahnkörper bereits fertig bearbeitet und gehärtet ist. Gegenwärtig ist die Verwendung eines Zwischenlagematerials und lokales Vorwärmen die Lösung. Der EB hat gute Chancen, ohne diese Vorkehrungen auszukommen.



Abb. 68: Differentialgehäuse aus Grauguss und Einsatzstahl.

### Fahrwerk

Elektronenstrahlschweißen von Achsen, für LKW und PKW wird unter verschiedenen konstruktiven Aspekten ausgeführt. Z.B. werden zwei Halbschalen einschließlich des Differentialgehäuses über ihre volle Länge mit zwei gegenüberliegenden EB-Nähten gefügt. Die EB-Schweißkanonen sind so gegeneinander montiert, dass sie sich im Fall einer Schweißung ohne Werkstück nicht gegenseitig zerstören. Bei einer anderen Konstruktion wird die rohrförmige Achse durch einen Achsstummel verlängert, wobei bei einer Variante auch der Bremsflansch in einer Aufspannung mit angeschweißt wird.



Abb. 71: Zwei Halbschalen einer Achse (Probestück für Schweißversuche).

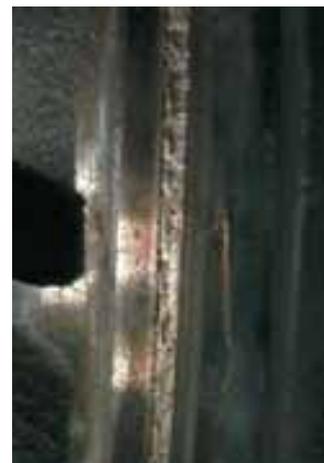


Abb. 69, 70: Der Lösungsansatz mit geringer Einschweißtiefe ohne Zusatzwerkstoff und mit Einsatzschicht ist erfolgreich.



Fig. 72: Achsen für Anhänger.



*Abb. 73, 74: Ein Achsstummel einer LKW-Achse wird mit der oberen Schweißnaht an die Achse geschweißt. Der Bremsflansch wird mit mehreren nebeneinander liegenden Schweißnähten an der Achse befestigt, um den tragenden Querschnitt zu vergrößern.*

Auch diese Schweißungen werden gleichzeitig mit zwei Strahlkanonen ausgeführt, ebenso wie die folgende Radaufhängung eines SUV-Fahrzeugs.



*Abb. 75: SUV-Achse aus zwei Schmiedeteilen und einem umgeformten Rohr hergestellt.*

Es gibt eine Reihe von verschiedenen Designs für Autofelgen die, zur Gewichtsreduzierung nicht gefederter Massen, aus Aluminium oder Magnesium, gefertigt werden. Manchmal werden sie durch Umfangsnähte oder Axialnähte gefügt, in anderen Fällen wird die Speichenkontur entsprechend einem NC Programm geschweißt. In allen Fällen sind die Schweißungen sicherheitsrelevant und sie müssen bei schlauchlosen Reifen leckdicht sein. Solche Felgen werden für Motorräder, Trikes, PKWs und Rennautos gebaut.



Abb. 76: Motorradfelge aus Aluminium-Druckguss.

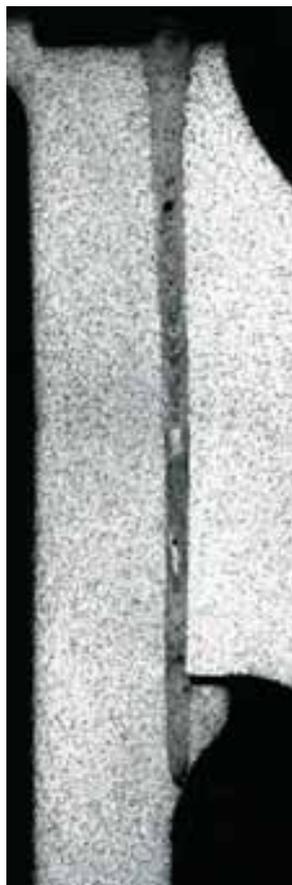


Abb. 77, 78, 79:  
Felgen für Rennautos aus geschmiedeter Magnesiumlegierung. Schweißtiefe 20 mm.



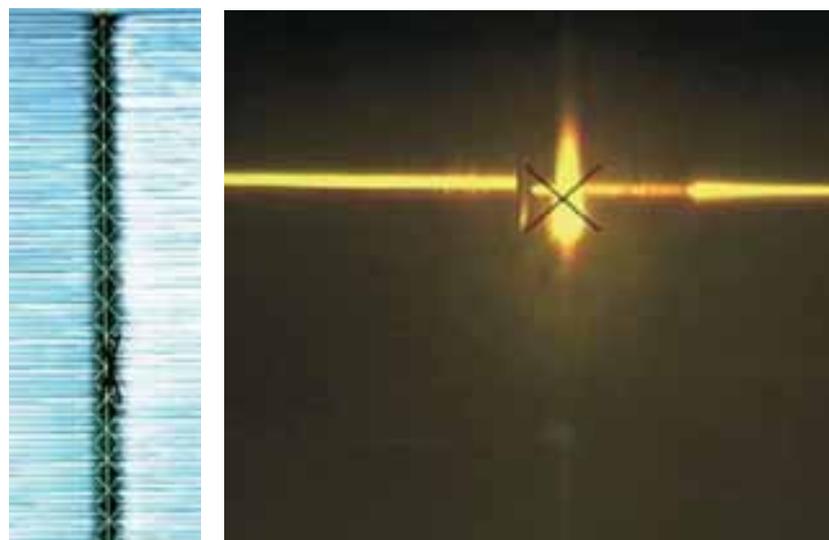
Abb. 80:  
Felge mit geschweißten Speichen (links).

Elektronenstrahlschweißen von Stoßdämpferkolben scheint eine einfache Aufgabe zu sein, doch gibt es auch hier eine Reihe von Fertigungsschritten, die präzise ausgeführt werden müssen. Wie immer vor dem Elektronenstrahlschweißen ist sorgfältiges Reinigen wesentlich, um Poren oder Auswürfe zu vermeiden, die durch Restverunreinigungen z.B. durch Schneidschmierstoffe entstehen. Bei der Montage ist auf spaltfreies Zusammenfügen zu achten, da Restspalte einen Nahtfall bewirken. Es ist wichtig, dass die beiden Teile nicht verkantet montiert werden, was zu einem Taumelschlag führen würde.

Um solche Fehler zu erkennen, wird eine Qualitätsprüfung am gesamten Umfang durch Elektronenstrahlscannen ausgeführt. Wenn der Befund gut ist, wird anschließend an der automatisch gefundenen Nahtposition lokal vorgewärmt und geschweißt und das Teil, zur Rückverfolgbarkeit der Produktionsdaten, beschriftet. Anschließend erfolgt eine erneute Rundlaufvermessung und eine Ultraschallprüfung auf Poren und Bindefehler. Alle Prüfwerte werden in einem integrierten Datenerfassungssystem dokumentiert.



*Abb. 81:  
Kolbenstange eines Stoßdämpfers mit Schweißnaht und Identifizierung durch Elektronenstrahlbeschriften.*



*Abb. 82, 83:  
Elektronenstrahlscanner überprüft den Rundlauf (links) ehe geschweißt wird (rechts).*

### Zusatzaggregate:

Ein elektronenstrahlgeschweißtes Produkt hoher Stückzahlen sind Membranspeicher für Hydrauliksysteme in verschiedenen Ausführungen. Sie haben gemeinsam, dass nahe an der Schweißstelle eine Gummimembran an einen Stützring befestigt ist, der mit demselben Schweißumlauf dicht gefügt werden muss, mit dem die zwei Halbschalen verbunden werden. Dies bedeutet, dass der I-Stoß zwischen den Halbschalen einem hohen Druck standhalten muss und die Überlappnaht mit dem Ring an der Wurzel des I-Stoßes leckdicht ausgeführt sein muss. Gleichzeitig muss die Wärmeeinbringung so gering gehalten werden, dass der Gummi nicht schmilzt.



*Abb. 84: Membranspeicher für Hydrauliksysteme.*



*Abb. 85: Schweißwurzel am Stützring.*

Lenksäulen wurden vor 40 Jahren in großen Stückzahlen elektronenstrahlgeschweißt. Neueren Datums ist eine Lenksäule die für das Lenkradschloss eine Verstärkung benötigte. Mit einer Manschette wurde die Säule gedoppelt.



*Abb. 86.  
Lenksäule mit Verstärkung für das Schloss.*

Konstruktionen für Rennfahrzeuge ändern sich sehr schnell und die zu schweißenden Teile sind typischerweise einmalig. So z.B. die Schaltgestänge aus Titan für einen Formel 1 Rennwagen.



*Abb. 87: Schaltgestänge.*

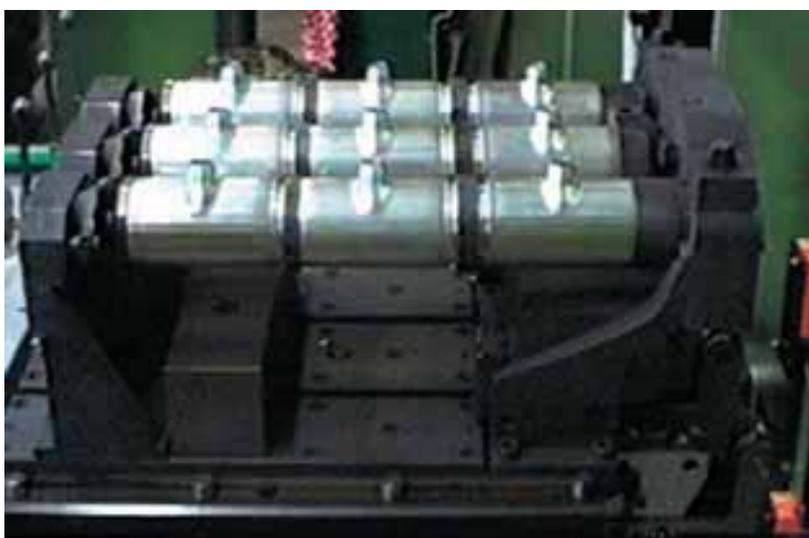
Die verstellbare Rückenlehnenbefestigung für den Fahrer- und Beifahrersitz existiert in sehr vielen unterschiedlichen Ausführungen was den Befestigungsflansch betrifft, während das Taumelgelenk für die Verstellung immer dasselbe bleibt. Deshalb ist es sinnvoll, dieses Stanz- Umformteil auf einer kleinen Maschine in hohen Stückzahlen mit einfachen Werkzeugen zu fertigen und die Befestigungsflansche in ihrer Vielfalt an Formen durch Elektronenstrahlschweißen zu fügen.



*Abb. 88:  
Taumelgelenk zur Rückenlehnenverstellung an PKW-Sitzen.*



*Abb. 89:  
Gasgeneratoren für  
Fahrer-Airbags mit  
fünf konzentrischen  
Schweißnähten.*

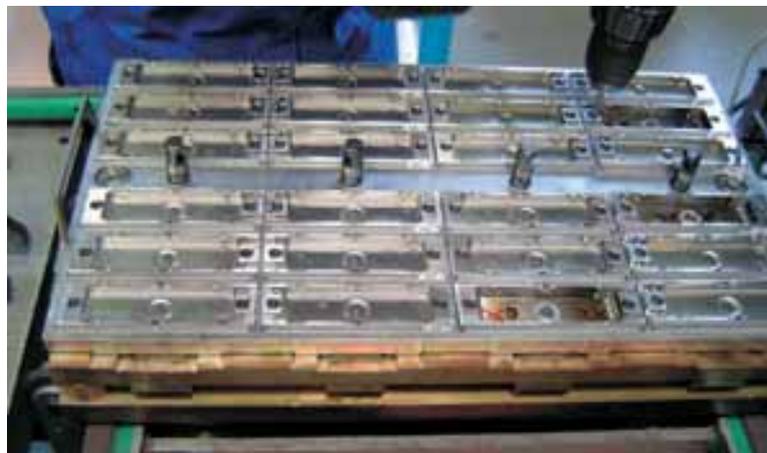


*Abb. 90:  
Gasgeneratoren für  
Beifahrer-Airbags  
mit einer achsialen  
und zwei radialen  
EB-Schweißnähten.*

Elektronenstrahlschweißen von Gasgeneratoren für Fahrer- und Beifahrer-Airbags war lange Zeit üblich. Der Grund für das EB-Schweißen ist die geringe Wärmeeinbringung, da die Verschlussnähte mit der Sprengstofffüllung erfolgten. Der Gasgenerator würde sowohl bei zu hoher Temperatur zünden, als auch wenn der Strahl direkt oder über Spritzer den Treibstoff treffen würde.

Neuerdings verlangen Gesetze, dass der Druck innerhalb des Ballons an das Gewicht und die Sitzposition des Beifahrers angepasst wird. Der Sitz wird über vier Kraftsensoren befestigt, die signalisieren, ob ein Kind oder eine schwere Person nahe an der Windschutzscheibe oder weit hinten sitzt. Sie steuern die Gasfüllung des Ballons entsprechend. Drei Schweißnähte fügen die Feder mit dem Gehäuse bzw. der Befestigungsschraube des Sensors und acht weitere Heftnähte

befestigen einen Deckel. Da die Schweißnähte sicherheitsrelevant sind und das Material für Spannungsrisse empfindlich ist, wird intensiv geprüft. Jeder Sensor ist über einen Data Matrix Code identifiziert. Nach dem Reinigen der drei Teile werden Gehäuse, Feder und Schraube montiert, in einer Spannvorrichtung fixiert und elektronenstrahlgeschweißt. In einem zweiten Durchlauf wird der Deckel montiert und festgeschweißt. Dann erfolgt ein 100%iger Biegetest und eine 100%ige Röntgenkontrolle. Das Biegen verbessert die Festigkeitswerte des Werkstoffs durch Kaltumformen.



*Abb. 91, 92:  
Kraftsensor zur Erfassung der Sitzposition und des Gewichts von Fahrer und Beifahrer. Spannpalette zum Schweißen von 24 Sensoren.*

Eine Standheizung bei Benzin- und Dieselfahrzeugen wärmt den Motor nach vorgegebener Zeit vor. Der notwendige Treibstoff darf nach Vorschrift nicht aus dem Tank entnommen werden, sondern aus einem Zusatzbehälter mit beschränktem Volumen. Dieser wird aus Al-Druckguss hergestellt und muss Helium

leckdicht sein. Deshalb ist in der Schweißnaht keine Porosität zulässig. Durch Mehrstrahlschweißung, z.B. indem drei Strahlen kurz hintereinander geführt werden, lässt sich das erreichen. Der zugehörige Wärmeübertrager, auch als Zusatzheizung bei Dieselfahrzeugen, wird EB-dicht geschweißt.



*Abb. 93:  
Zwischenspeicher und Wärmeübertrager einer Zusatzheizung.*

Es gibt nur wenige aber manchmal wesentliche Elektronenstrahlschweißnähte an der Automobilelektrik. Die Batterieklemme mit integrierter Überwachungselektronik erfasst den Ladezustand und den Stromfluss der Batterie über einen Messwiderstand und Elektronik. In ihr befinden sich fünf EB-Schweißnähte und eine EB-Lötung.

Temperaturempfindliche Elektronikbauteile, die in der Nähe des Motors befestigt werden müssen, benötigen Kühlung und Schutz vor Schmutz und Öl. Deshalb wird die Platine in ein Aluminiumgehäuse mit guter Wärmeleitung eingebaut und durch EB-Schweißen abgedichtet.



*Abb. 94: Batteriekabel-Klemme.*



*Abb. 95: Gehäuse für Elektronik-Platine.*

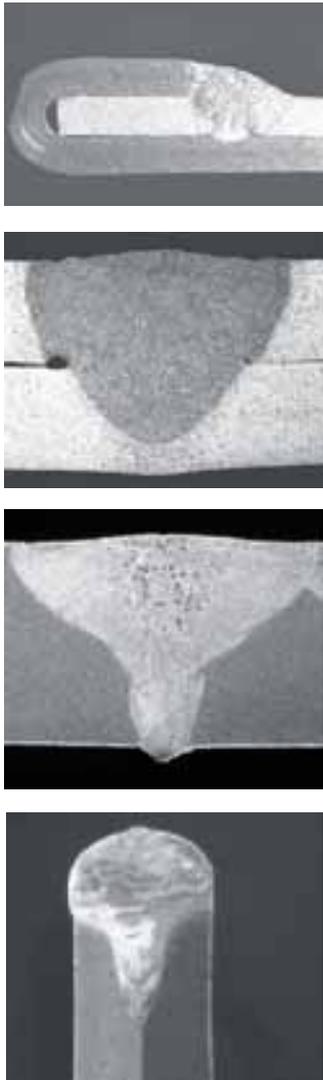


Abb. 96, 97, 98, 99:  
In einer Entfernung von 2,5 m durch Strahl-  
ablenkung geschweißte  
Nähte: Kehlnaht, Über-  
lappnaht, I-Stoß und  
Bördelnaht.

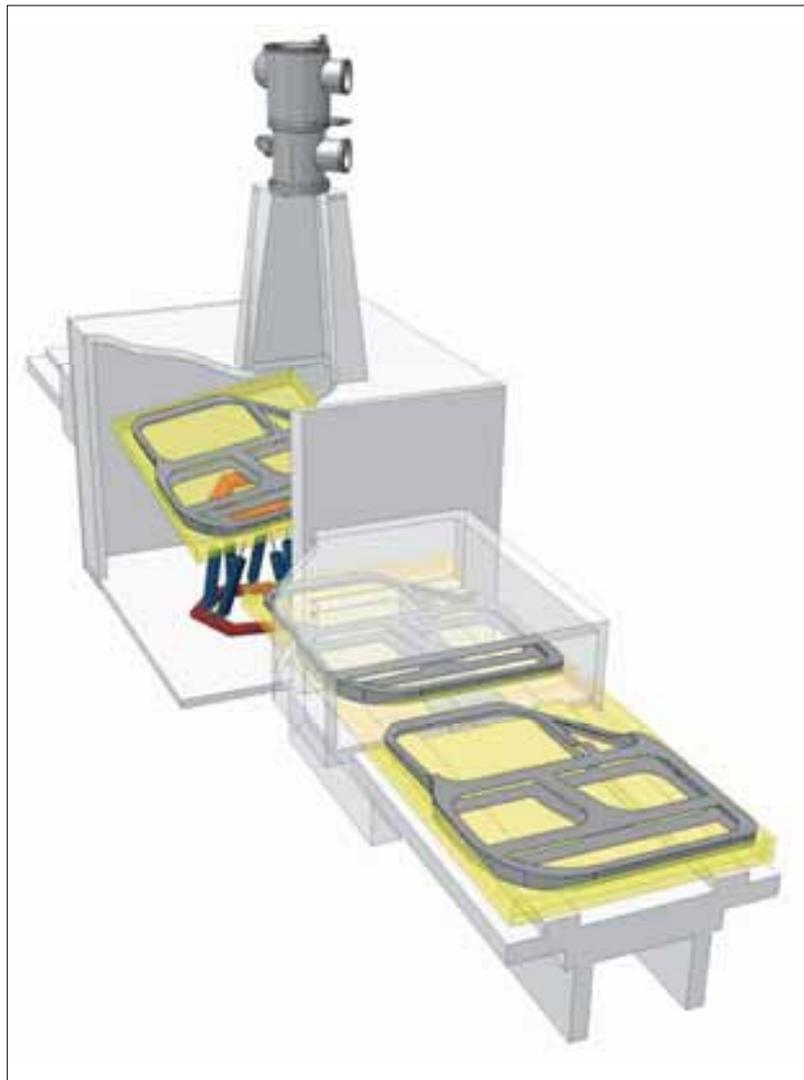


Abb. 100:  
Das Prinzip des Remote-Schweißens einer Autotüre in  
einer Schleusen-Shuttle Maschine.

Im Vorwort zu diesem Kapitel wird erwähnt, dass das Elektronenstrahlschweißen nicht an der Karosserie verwendet wird. Dennoch ist das Potential zum „Remote-Schweißen“ von Blechen recht gut, sowohl für verzinkte Stahlbleche, als auch für Leichtmetalle wie Aluminium oder Magnesium. Die Schweißnähte sind glatt ohne Einbrandkerben und optisch perfekt. Die Schweißnähte werden nur durch Strahlableitung in einer Entfernung bis zu 2,5 m ausgeführt. Der wesentliche Vorteil gegenüber dem Laserstrahlschweißen ist das Vakuum, da die Verwendung von Schutzgas, sofern erforderlich, ein Problem beim Laser-Remote-Schweißen darstellt. Genaues Spannen ist wesentlich. Durch Verwendung einer Schleusenmaschine beträgt die Taktzeit für eine 4 m lange Schweißnaht an einer Autotüre etwa 1 Minute.



*Abb. 101: Tailored blank als Auflage für den Stoßdämpfer. Eine 2 mm dicke Scheibe wird in das 1 mm dicke Blech für den Radkasten eingeschweißt und anschließend umgeformt.*

### **Zahnräder und Getriebe**

Schweißen von Getrieberädern ist die Anwendung innerhalb der Automobilindustrie, die die meisten Elektronenstrahlmaschinen beschäftigt. Sie beruht auf der Möglichkeit, fertig bearbeitete Zahnräder untereinander oder Zahnräder an Wellen oder Flansche als letzten Arbeitsschritt zu fügen. Dies macht das Elektronenstrahlschweißen attraktiv. Der Verzug der beim Abkühlen des Schmelzbades entsteht ist so gering, dass das Fertigprodukt innerhalb der erforderlichen



*Abb. 102:  
Der Synchronring mit geringer Masse und das Zahnrad mit großer Masse erwärmen und dehnen sich unterschiedlich schnell. Dies ist die typische Schweißsituation zum Fügen von Synchronringen mit Zahnrädern.*

Toleranzen gehalten werden kann. Die verbleibende Exzentrizität bewegt sich innerhalb von hundertstel Millimetern und beeinflusst die Funktion des Getriebes nicht. Dennoch wird das Geräuschniveau durch minimale Unrundheit beeinflusst und deshalb ist es vorteilhaft durch eine symmetrische Wärmeeinbringung mit einem, gleichzeitig an mehreren Stellen schweißenden Elektronenstrahl, den Verzug weiter zu reduzieren. Dadurch wird ein Versatz der Rotationsachsen der Bauteile vermieden. Weiter ergibt sich neben der Geräuschreduzierung eine Kostenreduzierung aufgrund der kürzeren Bearbeitungszeit. Die zu schweißenden Zahnräder können bereits gehärtet sein, jedoch ist es notwendig, die Einsatzschicht im Schweißbereich vorher zu entfernen.



Abb. 103, 104: Drei Schweißstrahlen mit um  $120^\circ$  versetzter symmetrischer Wärmeeinbringung verhindern Achsversatz.

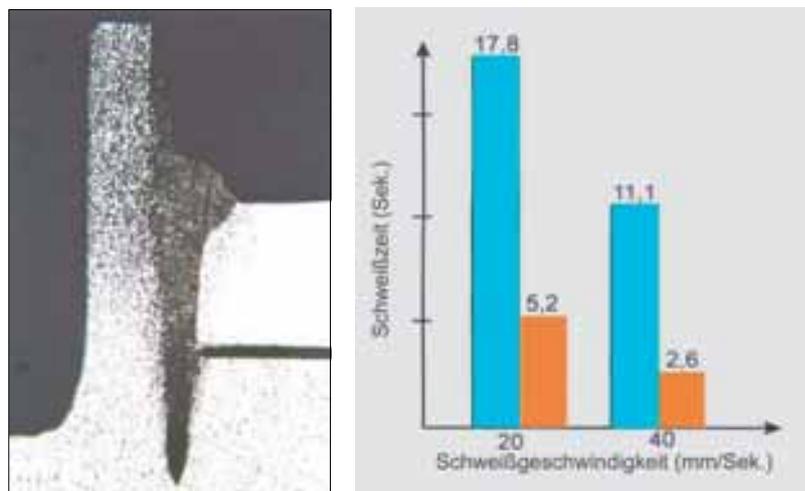


Abb. 105, 106: Die Serienfertigung von Zahnrädern wird durch die Mehrstrahltechnik verbessert: Verringerung des Verzugs durch symmetrische Wärmeeinbringung und schlanke Nähte; Rechts: Reduzierung der Schweißzeit da die Heftnaht entfällt und sich die Nahtlänge für jeden Strahl verkürzt.



Abb. 107, 108, 109, 110: Eine Auswahl von Zahnradkombinationen für Autogetriebe.



Abb. 111, 112: Kegelräder und Dreifachverzahnungen werden vorteilhaft gefertigt, indem die Bauteile einzeln zerspanend bearbeitet werden. Das anschließende Fügeverfahren erfordert einen Prozess mit geringer Wärmeeinbringung, da die Teile häufig schon gehärtet sind und nur geringster Verzug zulässig ist, um die spezifizierten Toleranzen einzuhalten.

Es ist die Grundidee der Konstruktion von elektronenstrahlgeschweißten Zahnradern, das Schmieden und Bearbeiten zu erleichtern, was mit Einzelkomponenten offensichtlich einfacher und wirtschaftlicher der Fall ist, als bei einem Monoblock. Da die Werkzeuge zum Bearbeiten der Zähne Platz zum Auslauf benötigen, ist eine aus einem Stück gefertigte Zahnpaarung immer

größer als eine gefügte. Letztere führt nicht nur zur Gewichtsreduktion der einzelnen Zahnradpaarungen, sondern auch des gesamten Getriebes einschließlich Wellen und Gehäuse. Die kompakte und steife Anordnung reduziert zusätzlich Schwingungen. Und letztlich eröffnet das Elektronenstrahlschweißen, die Möglichkeit Konstruktionen aus umgeformten Blechteilen und



*Abb. 113: Gesinterte Kuppelstrommel an umgeformte Zahnscheibe und Welle geschweißt.*



*Abb. 114: Fügen von geschmiedeten und zerspannten Zahnkörpern.*



*Abb. 115: Radiale EB-Schweißnähte zwischen Flanschen und Zahnkörpern.*



*Abb. 116: Tiefgezogenes Blechteil mit Hohlwelle einer Kupplung.*

pulvermetallurgischen Komponenten einzuführen, wie sie heute in Automatik-Getrieben höchst erfolgreich sind.



Abb. 117, 118: Zahnräder mit radialen und axialen Schweißnähten.

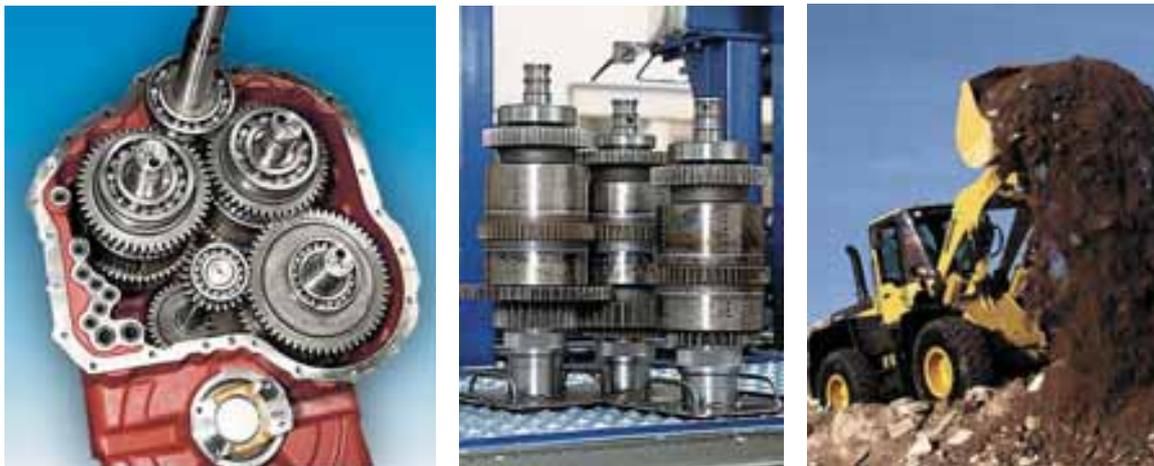


Abb. 119, 120, 121: Getriebeeinheit für einen Radlader.

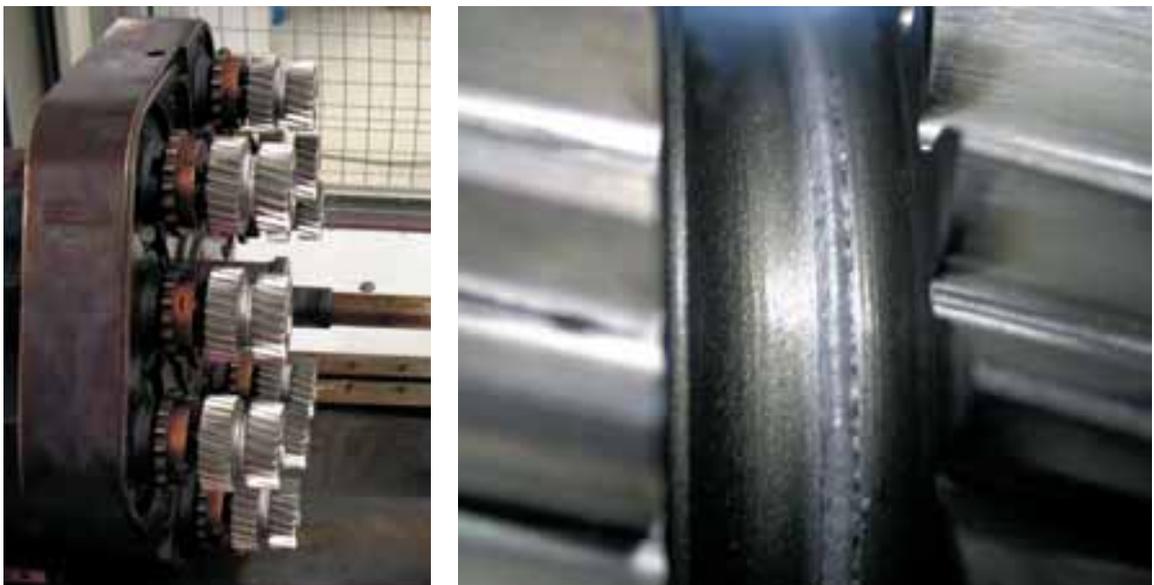


Abb. 122: Viel-Spindel-Dreh-  
vorrichtung zum wirtschaftlichen  
Schweißen von Zahnrädern in  
kleineren Stückzahlen.

Abb. 123: Schweißnahtdetail der Schweißung 122.

Das Gehäuse für Planetenträger ist ein weiteres typisches Beispiel für das Elektronenstrahlschweißen. Die Käfige können aus Schmiedeteilen für LKWs oder aus umgeformten Blechteilen für PKWs bestehen. Sowohl das kontinuierlich schaltende Multitronik Getriebe CVT (continuous variable transmission), für den Längseinbau und das Doppelkupplungsgetriebe DCT (dual clutch transmission) für quer eingebaute Motoren werden auf Produktionslinien für automatisches, manloses Elektronenstrahlschweißen gefertigt



*Abb. 124, 125:  
Der dreieckige Querschnitt der Füße eines LKW-Planetenträgers muss über die gesamte Fläche kerbfrei verschweißt werden.*



*Abb. 126: Achstrommel für homokinetisches Getriebe.*

*Abb. 127: Kettenrad für Nockenwellen.*





Abb. 128, 129, 130, 131: Planetenträger mit drei Radialnähten (oben) und mit Antriebsrad, das durch die Öffnung hindurch geschweißt wird. Es ist Teil eines Getriebes mit kontinuierlicher Geschwindigkeitsverstellung (CVT).

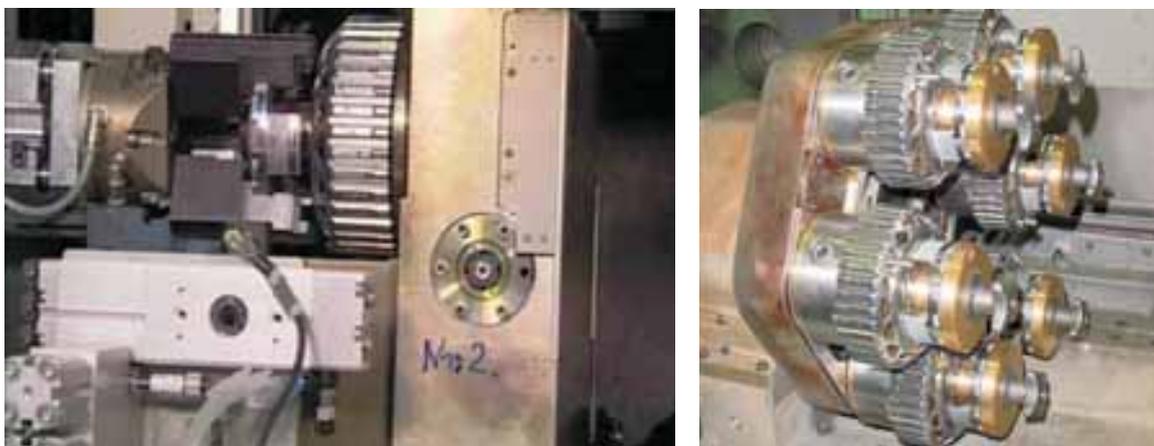
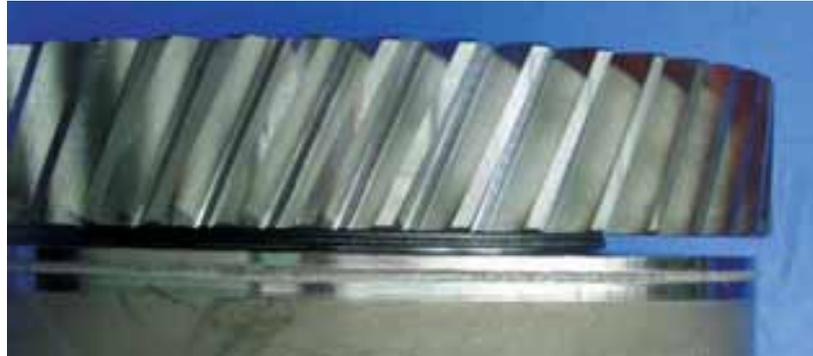


Abb. 132, 133: Roboterunterstützte Bestückung der Schweißmaschine für mannlose Produktion (links) und 6-Spindel-Vorrichtung mit manueller Bestückung für kleinere Stückzahlen des obigen CVT-Getriebes.

Ein weiterer Grund, der für das EB-Schweißen spricht, ist die Zugänglichkeit zur Füge­stelle mit dem extrem schlanken Strahl, ebenso wie die Fähigkeit auch nahe an einer Kante tiefe, parallele Schmelzbäder auszuführen, was Zahnräder zu schweißen erlaubt, die ein hohes Drehmoment zu übertragen haben.

*Abb. 134:  
Zahnradkonstruktion  
mit schwierigem Zugang  
zur Schweißstelle am  
Grunde des Spaltes.*



*Abb. 135, 136:  
Querschliiff der An-  
triebswelle mit 35 mm  
Nahttiefe zur Über-  
tragung von hohen  
Drehmomenten.  
Schweißposition nahe  
der Welle.*



Aktuelle Entwicklungen für neue Automobil-Anwendungen sind Startergeneratoren, Brennstoffzellen oder Wasserstofftanks. Die Ergebnisse sind erfolgversprechend, aber noch vertraulich

Wenn man diese Auswahl von typischen Anwendungen des EB-Schweißens im Automobilbau zusammenfasst, so ist ersichtlich, dass der Konstrukteur sich der Fähigkeiten und Möglichkeiten des EB-Schweißens bewusst sein muss, um konzeptionelle Lösungen vorschlagen zu können. Diese sind minimale Wärmeeinbringung im Vergleich zu allen Schmelzschweißverfahren, was zu geringer Schrumpfung und minimalem Verzug führt. Durch Fügen unterschiedlicher Werkstoffe, entsprechend ihrer Funktion, können wesentliche Kosten eingespart und gleichzeitig die Eigenschaften verbessert werden. Gewichtsreduzierte Konstruktionen, werden durch das EB-Schweißen unterstützt. Bei steigenden Kosten für Rohstoffe und Energie und fallenden Kosten pro Stück für das Schweißen durch verbesserte Prozesse, wird die Attraktivität des Elektronenstrahl-Schweißens weiter zunehmen.

## Luft- und Raumfahrtindustrie



*Abb. 137  
An der Ariane Rakete  
gibt es zahlreiche  
Elektronenstrahl-  
schweißnähte.*

Die Luft- und Raumfahrtindustrie hat schon Mitte der 1960iger Jahre mit dem EB-Schweißen begonnen, da die Schutzgase zum Schweißen reaktiver Werkstoffe, wie Titan und seine Legierungen, noch nicht rein genug waren, um gute Schweißnähte zu liefern. Wasserstoffversprödung war das Hauptproblem neben der Verunreinigung durch Sauerstoff und Stickstoff. Alle hochfesten Werkstoffe reagieren empfindlich auf Veränderungen der Gefügestruktur. Deshalb wird ein Schweißprozess mit geringer Wärmeeinbringung und kleiner Wärmeeinflusszone bevorzugt, um qualitätsreduzierende Einflüsse auf den Werkstoff zu minimieren, wie z.B. Verzug, Wärmebeeinflussung oder Restspannungen. Das EB-Schweißen ist der bevorzugte Prozess zum Fügen von Nickelbasis-Superlegierungen oder Titanlegierungen und selbst Stahl- oder Aluminium-

strukturen im Flugzeug werden mit sehr guten Ergebnissen EB-geschweißt. Darüber hinaus ist die schlanke und parallele Schweißnahtgeometrie gut geeignet für eine zerstörungsfreie Prüfung. Da einige der zu schweißenden Bauteile sehr groß waren, z.B. der Flügelkasten des MRCA Flugzeuges oder die Triebwerksverkleidungen der Concorde, wurden große Elektronenstrahlmaschinen gebaut, wie z.B. die berühmte Clamshell oder die Tunnelmaschinen, von denen einige immer noch in Betrieb sind. Die drei wesentlichen Kriterien für die Konstruktion von Fluggeräten, die eng mit der Werkstoffauswahl und der Fähigkeit des Schweißprozesses in Verbindung stehen, sind statische Festigkeit, Flugelastizität und Ermüdungsdauer.

### Fluggeräte und Komponenten



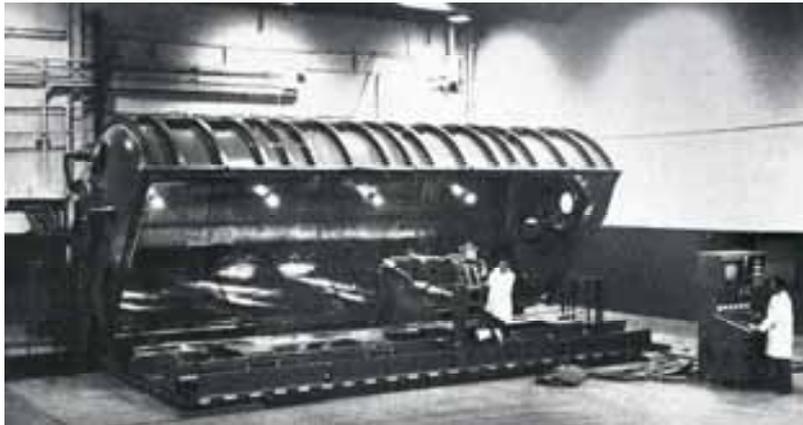
*Abb. 138:  
Ein sicherheitskritisches Bauteil, das aus vier geschmiedeten Titansegmenten mit EB geschweißt wurde. trägt die Rotorblätter des Cheyenne Hubschraubers.*



*Abb. 139: MRCA Flügelkasten.*



*Abb. 140: Überschallflugzeug Concorde mit den EB-geschweißten Triebwerksverkleidungen.*



*Abb. 141:*

*Die „Clamshell“ war mit einem Volumen von nahezu 100 m<sup>3</sup> die größte Elektronenstrahl-Schweißmaschine in den 1970ern.*

Entwürfe der Concorde Triebwerksverkleidungen als stabile, selbsttragende Strukturen wurden erprobt. Die gewellte Rippe wurde auf ein Band gelötet und dann im Schweiß-Abstand bis zu 2,3 m an die Innen- und Außenhaut EB-geschweißt.



*Abb. 142: Studie einer Triebwerksverkleidung aus Titan.*

Eines der aktuellen Themen des Elektronenstrahl-schweißens im Flugzeugbau sind die Armlehnen für verschiedene Fluglinien. Die hohlen Armlehnen sind eine Leichtgewichtskonstruktion aus Aluminium Druckguss. Die Anforderungen an das Schweißen sind eine optisch perfekte Naht auf der Unterseite, da diese für den Passagier sichtbar ist, während die Oberseite mit einer Polsterung abgedeckt wird. Es handelt sich um ein großes Produktionsvolumen und deshalb wird eine Mehrfach- Schwenkvorrichtung verwendet, die es erlaubt in einer Evakuierung von allen vier Seiten zu schweißen.



*Fig. 143: Armlehne von der Ober- und Unterseite.*



*Abb. 144: Mehrfachvorrichtung zum Schweißen der Armlehnen von vier Seiten.*

Hohlkugeln in verschiedenen Größen werden wegen ihres geringen Gewichts zum Fördern von Paletten innerhalb des Flugzeuges verwendet. Die Schweißnaht erfordert eine tragende Verbindung und keine Einbrandkerben an der Oberfläche, da die Kugeln oberflächenpoliert werden und keine Dellen aufweisen dürfen.



*Abb. 145: Hohlkugeln zur Beladung von Flugzeugen mit Frachtpaletten.*



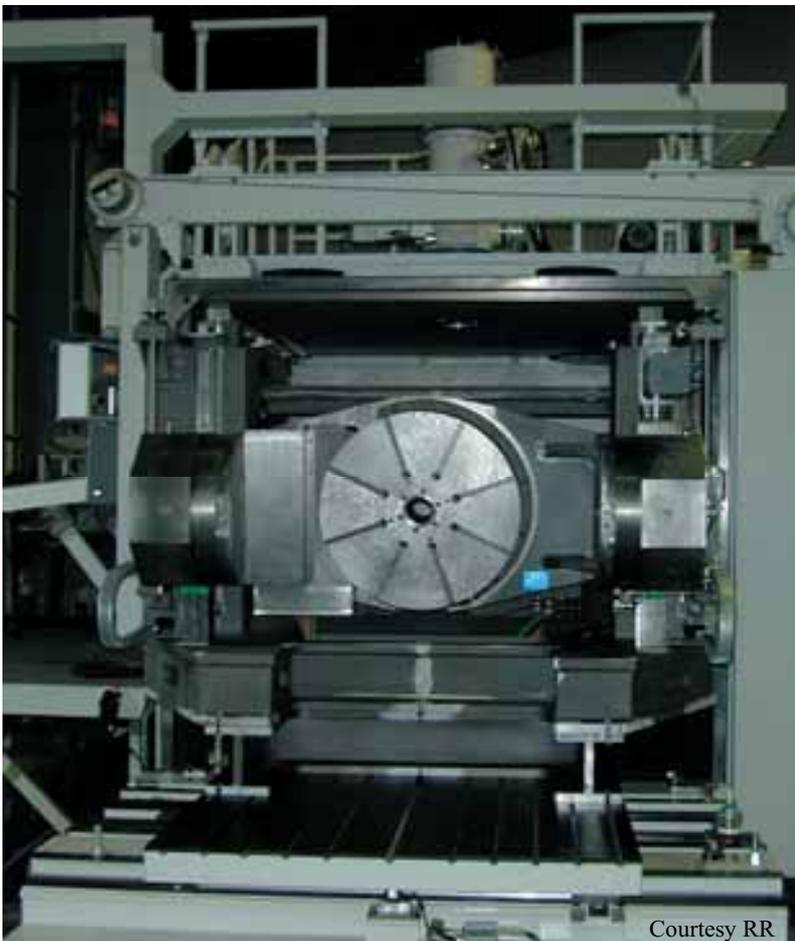
*Abb. 146, 147: Tragarm mit Schweißvorrichtung und geschweißter Kantenkontur.*

Ein Tragarm aus hochfestem Aluminium kommt bei Hubschraubern zum Einsatz. Die dreidimensionale Gussstruktur wird mit einem Deckel verschlossen, der entlang der Profilkante EB-geschweißt wird.

### Flugtriebwerke



*Abb. 148: 10 m<sup>3</sup> EB Anlage zum Schweißen von Triebwerkskomponenten voll CNC gesteuert.*



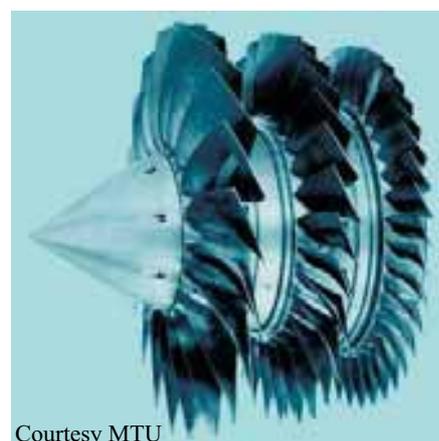
*Abb. 149: 4-Achsenmanipulator obiger Maschine: x-y-Tisch mit Dreh-Schwenk-Vorrichtung.*

Bereits in die dritte Maschinengeneration investiert derzeit die Flugtriebwerksindustrie. Sie betreibt eine große Anzahl von mittelgroßen Elektronenstrahlmaschinen mit Vakuumkammern zwischen 10 und 20 m<sup>3</sup>. Im Gegensatz zur Automobilindustrie verwenden die Triebwerkhersteller höchst anspruchsvolle Anlagen mit allen technischen Einrichtungen, die eine sichere Produktion von manchmal extrem teuren Bauteilen wie z.B. Turbinenrotoren oder Blisks (bladed disks) ermöglicht. Es ist kennzeichnend für diesen Industriezweig, dass Schweißparameter die einmal entwickelt und auf einer bestimmten Maschine zertifiziert sind, für die gesamte Lebensdauer dieser Produktion eingefroren werden. Weder die Maschine noch die Schweißspezifikation darf ohne eine kostenträchtige neue Entwicklung und Zertifizierung der Schweißanweisung geändert werden. Der wesentliche Grund für diese Sicherheitsmaßnahme ist, dass Werkstoffe wie z.B. Nickelbasis Superlegierungen, wie sie typischerweise im Turbinenbau verwendet werden,

*Abb. 150:  
Rotor einer Flugturbinen aus einzelnen Scheiben gefügt.*



*Abb. 151, 152: Blisks (bladed disks) sind Bauteile der höchsten Sicherheitsklasse. Sie werden aus zwei unterschiedlichen Titanlegierungen gefertigt und in der Hochdruckstufe des Kompressors eingesetzt. Die Schaufeln sind integraler Bestandteil der Scheiben, die über Umfangsnähte zur Rotortrommel verschweißt werden.*



zuverlässig bei sehr hohen Temperaturen arbeiten müssen. Da diese Kategorie von Superlegierungen heißrissempfindlich ist, müssen alle Prozessparameter einschließlich der Wärmevor- und Nachbehandlung sorgfältig erarbeitet und genau eingehalten werden. Es bleibt der Wunsch, dass sich durch die kürzlich eingeführte Online Strahlanalyse, die es erlaubt einen Strahl exakt zu beschreiben und mit anderen Strahlen von verschiedenen Maschinen zu vergleichen, diese Relikte älterer Maschinengenerationen erübrigen wird. Die Grundidee dabei ist, dass zwei Elektronenstrahlen von verschiedenen Maschinen oder von der gleichen Maschine zu unterschiedlichen Zeiten erzeugt, genau die gleiche Schweißnaht her-

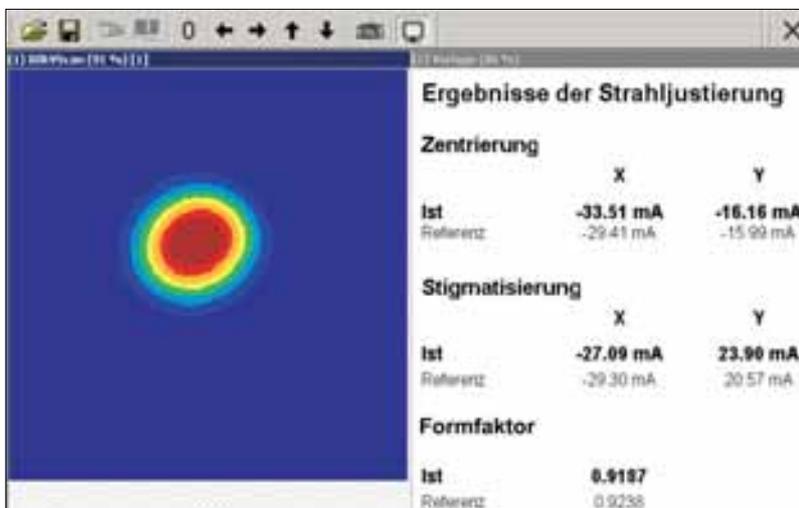


Abb. 153: Die automatische Strahljustierung beinhaltet Fokussierung, Zentrierung und Stigmatisierung. Aus der Analyse des Strahls ergibt sich ein Formfaktor.

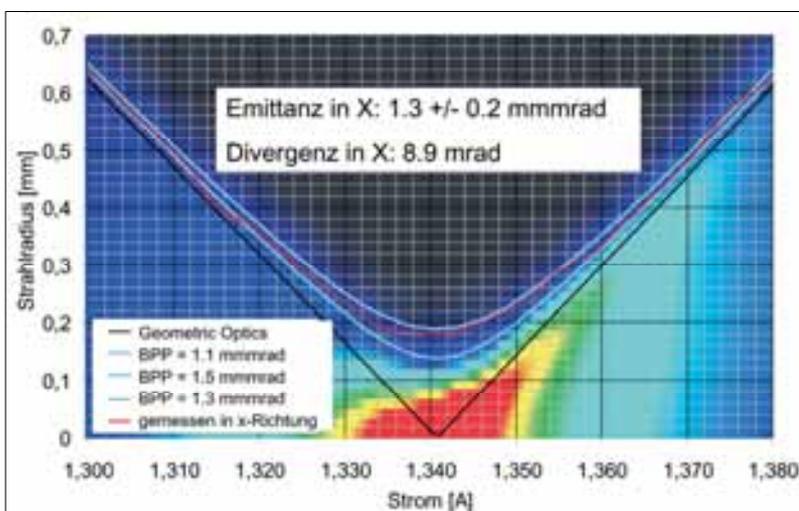


Abb. 154: Das Strahlparameterprodukt (BPP) ist abhängig von der Geometrie der Triode und der Qualität der optischen Elemente und ist eine Funktion der Strahlleistung.

vorrufen unter der Bedingung, dass die Strahlleistung und seine Leistungsdichteverteilung identisch sind. Physiker würden sagen: zwei Strahlen mit identischem Strahlparameterprodukt ( $\text{mm} \times \text{mrad}$ ) und gleicher Leistung erzeugen identische Schweißnähte. Diese Art der Qualitätskontrolle ist viel genauer und zeitsparender im Vergleich zu den üblichen Keilproben oder alternativen zerstörenden Testmethoden.

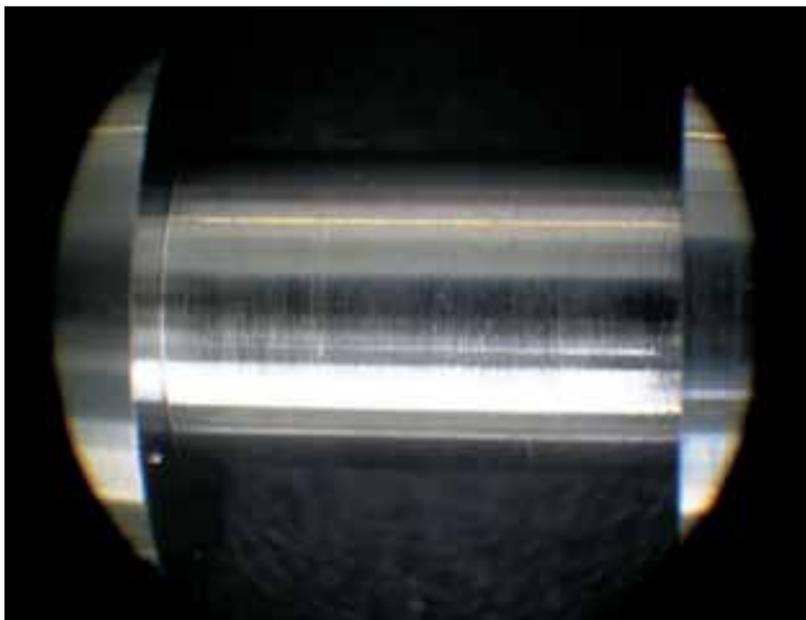


All gears by courtesy of P&W.

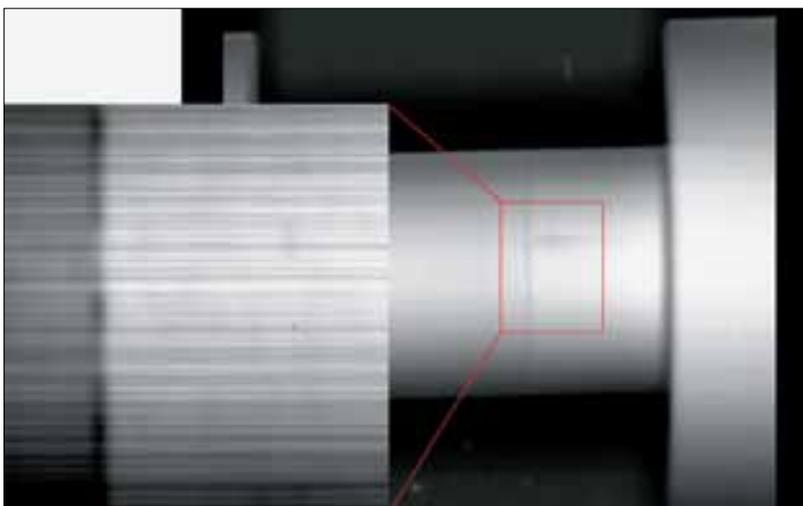
Abb. 155, 156, 157, 158, 159, 160: Getrieberäder einer Gasturbine.

### Treibstofftanks

Ein weiterer großer Fortschritt ist die jüngste Entwicklung in der automatischen Nahtfolge. Frühere Nahtfolgesysteme erforderten genau definierte Fügekanten, um den Strahl exakt in die richtige Schweißposition zu führen. Heute ist es möglich, Fügestöße zu detektieren, die manchmal mit dem Auge und selbst mit dem Teleskop nicht zu erkennen sind und trotzdem den Strahl mit hoher Genauigkeit zu positionieren.



*Abb. 161:  
Mit einem Presssitz gefügte und überdrehte Titanteile. Die Fügestelle ist nicht erkennbar.*



*Abb. 162:  
Beim Scannen mit einem Elektronenstrahl erkennt man nicht nur die Fügestelle sondern das Bild zeigt, dass es sich um zwei verschiedenen Legierungen handelt, was mit dem Auge nicht sichtbar ist.*

Ein typisches Produkt, das diese Fähigkeit benötigt, sind Satellitentanks, da die Halbschalen so genau bearbeitet sind, dass es manchmal schwierig ist, die Stoßfuge zu erkennen. Durch Verwendung von Rückstreuungselektronen wird die Information zum genauen Positionieren verbessert.



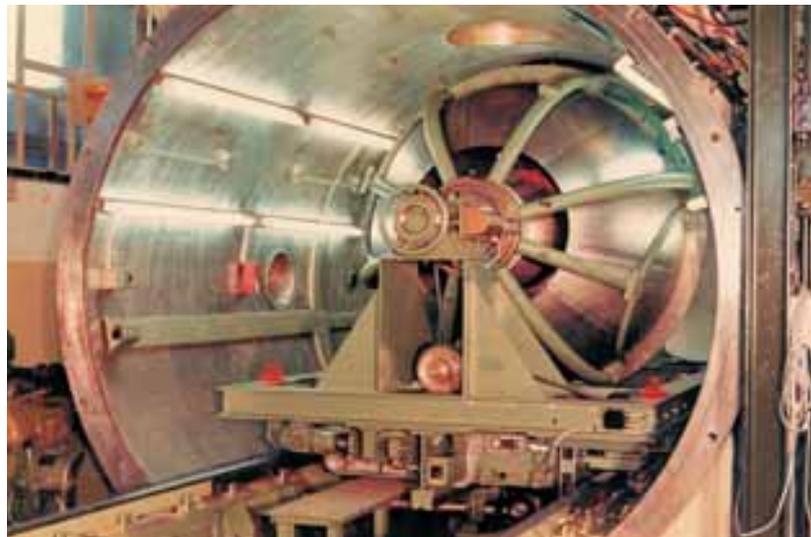
Abb. 163, 164, 165, 166:

Treibstofftanks aus Titan in verschiedenen Größen mit Umfangs-, Pol- und Innennähten.

All tanks by courtesy of EADS.



Abb. 167, 168:  
Alter Titantank von  
1965 mit meridionalen  
Schweißnähten.



Treibstofftanks für Satelliten und Raketen werden in Größen von wenigen  $\text{cm}^3$  bis zu einigen  $\text{m}^3$  gefertigt. Früher wurden die großen Tanks aus vorgeformten Blechsegmenten zusammengesetzt, die in meridionaler Richtung geschweißt werden, während sie heute aus zerspannten Schmiedeteilen in azimuthaler Richtung geschweißt werden. Neben den Schweißnähten an der Außenhaut gibt es eine Reihe von innen liegenden Schweißnähten, vor allem für die Struktur des Treibstoffmanagement-Systems, oder bei den Ein- und Auslassventilen. Eine schwierig auszuführende EB-Naht befindet sich am Pol des Tanks, weil sie in einem Abstand bis zu 2 m von innen her erfolgen muss. Nur ein Strahl mit sehr guter Qualität ist in der Lage, in einem so großen Abstand genau zu treffen und tief zu schweißen. Da einige Teile des Treibstoffmanagement Systems sehr empfindlich auf Druckunterschiede reagieren, muss für das Verschließen des Tanks bei der letzten Naht sehr langsam evakuiert und später wieder belüftet werden. Ein maximaler Druckunterschied von 4 mbar pro Minute ist zulässig, was bei großen Tanks zu Pumpzeiten und Belüftungszeiten bis zu jeweils 10 Stunden führt. Deshalb baut pro-beam eine Maschine mit einer Zusatzvakuumkammer zum Pumpen und Belüften. Dies erlaubt, die Maschine selbst für andere Schweißarbeiten zu benutzen und so die Wirtschaftlichkeit erheblich zu steigern. Die Maschine hat eine vertikale und eine horizontale Strahlkanone, die um 500 mm vertikal verschoben werden kann. Es ermöglicht Schweißungen in verschiedenen Positionen auszuführen, ohne das Hochvakuum, das zum Schweißen von Titanlegierungen erforderlich ist, zu unterbrechen.



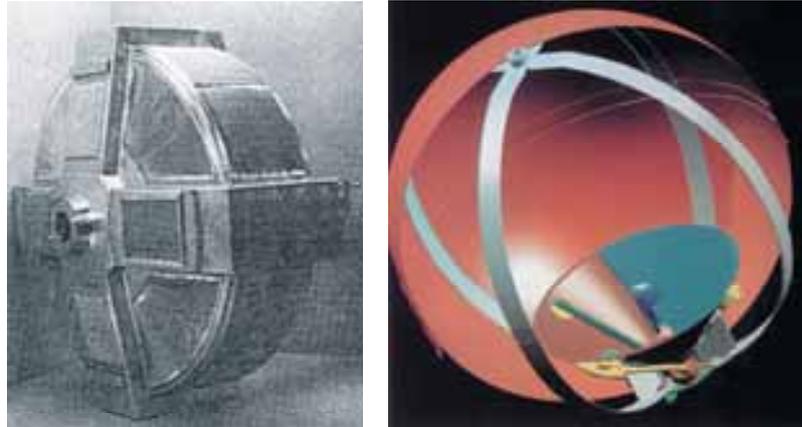
*Abb. 169:  
Polstück eines Tanks  
von außen ange-  
schweißt.*



*Abb. 170:  
Große Elektronen-  
strahlmaschine spe-  
zialisiert zum  
Schweißen von  
Treibstofftanks.  
Kammervolumen  
45  $\text{m}^3$ , Zusatzkammer  
10  $\text{m}^3$ . Der Tank-  
transfer erfolgt unter  
Volumen.*

Oberflächenspannungs-Treibstoff-Managementsysteme dienen dazu, freies Gas von Flüssigkeiten zu trennen, indem mikroporöse Membrane benetzt werden. Anwendungen dieser Systeme reichen von der gezielten Flüssigkeitszufuhr aus Vorratstanks von Raumfahrzeugen, die ohne Schwerkraft arbeiten, ebenso wie Treibstoffe, die unter hohen Beschleunigungsmanövern von Flugzeugen oder Raketen betrieben werden. Die Membrane zum Trennen sind entweder feine Gewebe aus Draht oder elektronenstrahlperforierte Siebe.

*Abb. 171, 172:  
Oberflächenspannungs-Treibstoff-  
Managementsysteme  
mit EB-geschweißten  
Sieben.*



*Abb. 173, 174:  
Tank für das Haupt-  
triebwerk und die  
Oberstufe der Ariane  
Rakete, geschmiedet  
aus zusammen-  
geschweißten Platten  
und anschließend  
zerspant.*





Abb. 175, 176:  
Schweißwurzel und  
Makroschliff durch die  
Schweißnaht mit Gegen-  
schweißung bei Druck-  
behältern erforderlich.



Abb. 177:  
Die Platte mit 6 m  
Durchmesser passt  
gerade in die Vakuum-  
kammer.



Abb. 178:  
Zum Versand ist ein  
Spezialtransport erfor-  
derlich.

Hochdrucktanks, für das Haupttriebwerk und die Oberstufe bestehen aus Kalotten. Da 70 mm dicke Al-Platten nicht in der geforderten Breite gefertigt werden, werden sie aus schmalere Streifen mit dem Elektronenstrahl zusammenschweißt. Dann werden sie in die gewünschte Form des Domes geschmiedet und das Material zwischen den Rippen, die zur Versteifung erforderlich sind, zur Gewichtsreduzierung herausgefräst.

### **Raketenantriebe**

Schubdüsen gibt es in sehr kleinen bis zu sehr großen Abmessungen. Die kleinen dienen zur Lagekontrolle von Satelliten im Weltraum und weisen bis zu 20 Elektronenstrahlschweißnähte einschließlich der Ventile auf. Die Schubtriebwerke der Ariane für das Haupttriebwerk als auch für die Oberstufe haben jeweils 4 Schweißnähte.

*Abb. 179:  
Schubdüsen zur Lage-  
kontrolle von Satelliten  
im Raum.*



*Abb. 180:  
Schubdüse der Ariane.  
Der LOX-Dom befindet  
sich oberhalb der Düse.*



Das Einspritzsystem für die Hauptstufe, der sogenannte LOX-Dom wird mit 3 Elektronenstrahlnähten gefügt, an die höchste Qualitätsanforderungen gestellt werden.



Abb. 181, 182:  
Treibstoffeinspritzsystem des Haupttriebwerkes der Ariane in zwei verschiedenen Schweißpositionen.

Das Elektronenstrahlschweißen wird nicht nur bei Produkten angewandt, die im Weltraum zum Einsatz kommen, sondern auch als eine Methode im Weltraum selbst zu schweißen. Das vorhandene gute Vakuum erlaubt eine einfache handgeführte Ausrüstung. Es werden keine Pumpen benötigt, jedoch muß die Beschleunigungsspannung der Elektronen reduziert werden, um die Astronauten vor harten Röntgenstrahlen zu schützen. Typischerweise werden 15 kV verwendet. Das Elektronenstrahlschweißen im Weltraum mit handgeführten Geräten wurde sowohl von den Amerikanern als auch von den Russen entwickelt und es wird zur Installation von Antennenmasten und für die Reparatur der Aussenhaut der Raumstation im Falle von Schäden durch Meteoriteneinschläge verwendet.

Das Arbeiten mit dem Elektronenstrahl in der Luft- und Raumfahrtindustrie ist besonders interessant, da die Art und Vielfalt der Werkstoffe höchste Ansprüche stellen und die Bauteile von kleinsten bis zu riesigen Abmessungen von ausserordentlichem Wert sind. Fast alle Schweißnähte sind sicherheitsrelevant. Daraus resultieren hohe Anforderungen an die Stabilität, Reproduzierbarkeit, Zuverlässigkeit und Kontrolle aller Prozesse einschließlich der Qualitätssicherung. Der Elektronenstrahl ist in der Lage diese Anforderungen zu erfüllen.



Abb. 183, 184:  
Amerikanische und russische Astronauten mit handgeführten Elektronenstrahlkanonen.

## Eisenbahnindustrie

*Abb. 185:  
Der ICE Hochgeschwindigkeitszug wurde unter den Gesichtspunkten der Verbesserung von Wirtschaftlichkeit und Komfort konstruiert.*



Man sagt die Eisenbahnindustrie sei konservativ in ihrer Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsprozessen. Jedoch hat sich dies mit der Entwicklung der Hochgeschwindigkeitszüge geändert. Die Reduzierung von Gewicht und Fahrgeräusch ist ebenso wichtig geworden wie in der Automobilindustrie, um Energie einzusparen und Fahrkomfort zu erhöhen. Die Verwendung von verschleißfesten Werkstoffen vergrößert die Lebensdauer von Rädern und Schienen und natürlich bringt auch hier der Zwang zur Kostenreduzierung neue Fertigungstechnologien in die Produktion.

### Züge

*Abb. 186, 187:  
Einbausituation des EB-geschweißten Obergurtes im Waggon.*



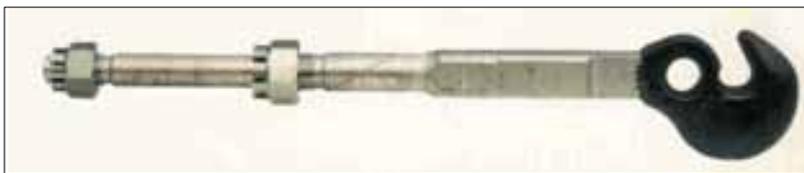
*Abb. 188:  
Gurtprofil mit zwei EB-Nähten 35 bzw. 40 mm tief.*

*Abb. 189:  
Makroschliff der Schweißnähte.*

Der Obergurt eines Wagenkastens wird aus extrudierten Aluminiumprofilen hergestellt. Da diese Profile zu groß sind, um sie in einem Stück zu extrudieren und da die beiden Schenkel verschieden lang sind, werden sie mit dem Elektronenstrahl mit zwei gegenüberliegenden Nähten gefügt. Wenn ein Zug beschleunigt, hängt seine gesamte Masse an diesem Querträger.



*Abb. 190, 191:  
Kupplungen zwischen  
Eisenbahnwaggons.*



*Abb. 192, 193:  
Haken einer Lokomotive (oben) und Schliff durch die beiden  
gegenüberliegenden Nähte.*

Der Zug wird an die Lokomotive gehängt und die Waggons sind mit Kupplungen verbunden. Beide, der Zughaken und die Kupplungen sind EB-geschweißt. Die Idee dieses Konzepts ist Kosteneinsparung. Der Haken und die Augen sind Standardprodukte, die in größeren Stückzahlen geschmiedet werden. Die jeweiligen Verlängerungen werden entsprechend der Anforderung unterschiedlich konstruiert, für die Untergrundbahn von Shanghai bis zum deutschen ICE Zug.



*Abb. 194: Lokomotive wartet auf den Achsaustausch.*



*Abb. 195: Hohlwellenlager werden an den gegossenen Achskörper geschweißt.*

Beim Austausch von Hohlwellen- Lagerringen für Lokomotiven wird das zentrale Gussgehäuse wieder verwendet. Es gibt höchste Genauigkeitsanforderungen in Bezug auf Winkelstellung, Toleranz der Innenbohrung und Gesamtlänge. Im Gegensatz zur Originalfertigung gibt es keine zerspanende Endbearbeitung mehr.

*Abb. 196, 197:  
Biegeweiche und  
torsionssteife  
Membrankupplung.*



*Abb. 198:  
Zwischenwelle mit  
zwei EB-Nähten.*

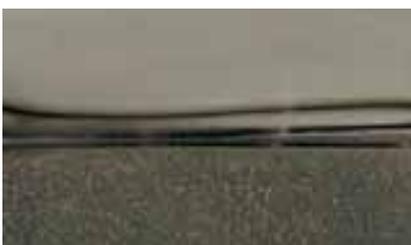


Die Konstruktion einer flexiblen Kupplung sieht das Fügen von Federplatten durch EB-Schweißen vor, wodurch ein torsionssteifes, flexibles Kupplungselement entsteht. Es gleicht zulässige Toleranzen zwischen dem Motor und dem Antriebssystem aus, während die Zwischenwelle in allen Richtungen steif ist.

### Schienen



*Abb. 199:  
Weichenzunge mit  
Schienennetz.*



*Abb. 200, 201, 202:  
Die Oberfläche einer Weichenherzspitze wird durch verschleißfesten Stahl verstärkt. Schweißnahttiefe 100 mm.*

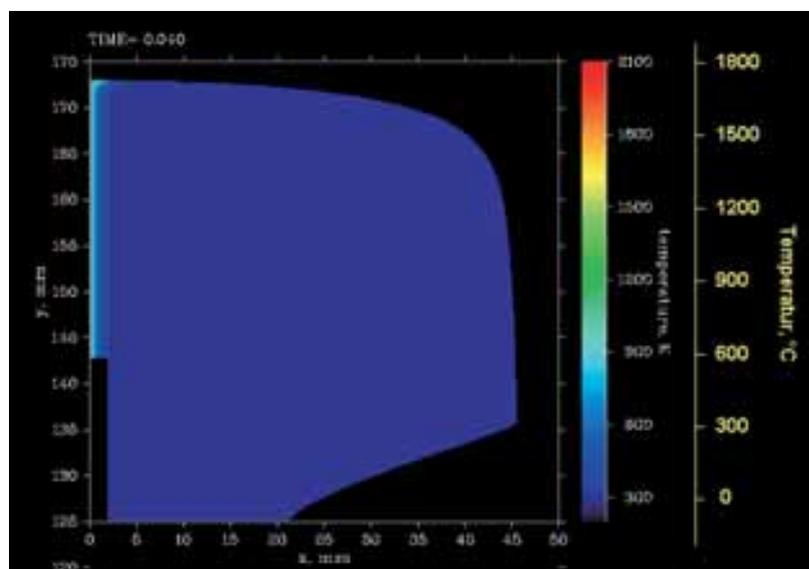
Eine der großen Herausforderungen für das Elektronenstrahlschweißen sind Weichenherzen. Der zentrale Bereich unterliegt starkem Verschleiß, da die Räder der Züge teilweise nicht aktiv gelenkt werden, sondern durch Reibung in die neue Richtung geschoben werden. Bis heute wird die Oberfläche durch Aufschweißen einer Platte von Maragingstahl verstärkt und dieser Block wird anschließend zerspanend bearbeitet, um die Zungenspitze zu formen. Die Idee, Standardschienen zu schärfen und zu verschweißen ist alt, aber wegen des hohen Kohlenstoffgehalts von 0,8% endeten die Schweißversuche in Rissen und Auswürfen.

*Abb. 203, 204, 205: Risse die bei der Selbstabschreckung der Schmelze entstehen und Auswürfe sind das Ergebnis beim Schweißen von Standardschienen mit falscher Temperaturführung.*



Die heutigen Möglichkeiten der Computersimulation machten es möglich, ein enges Band der Prozesstemperatur zu finden, das eine akzeptable Härte ergab und das die perlitische Struktur der Schiene erhielt.

*Abb. 206: Simulierte Temperaturverteilung einer EB-Schweißung. Man erkennt die auf einem engem Raum begrenzte Erwärmung der Schmelze.*



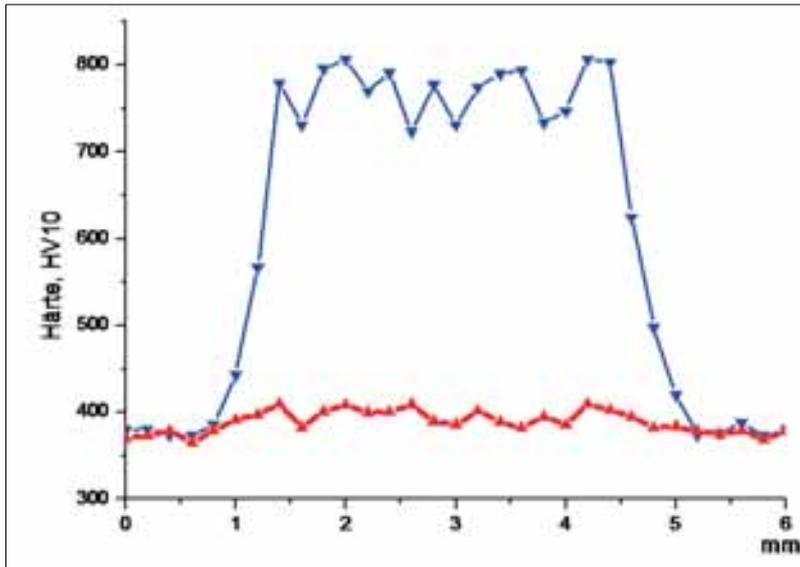


Abb. 207:  
Härteverteilung mit  
und ohne korrekter  
Temperaturführung.

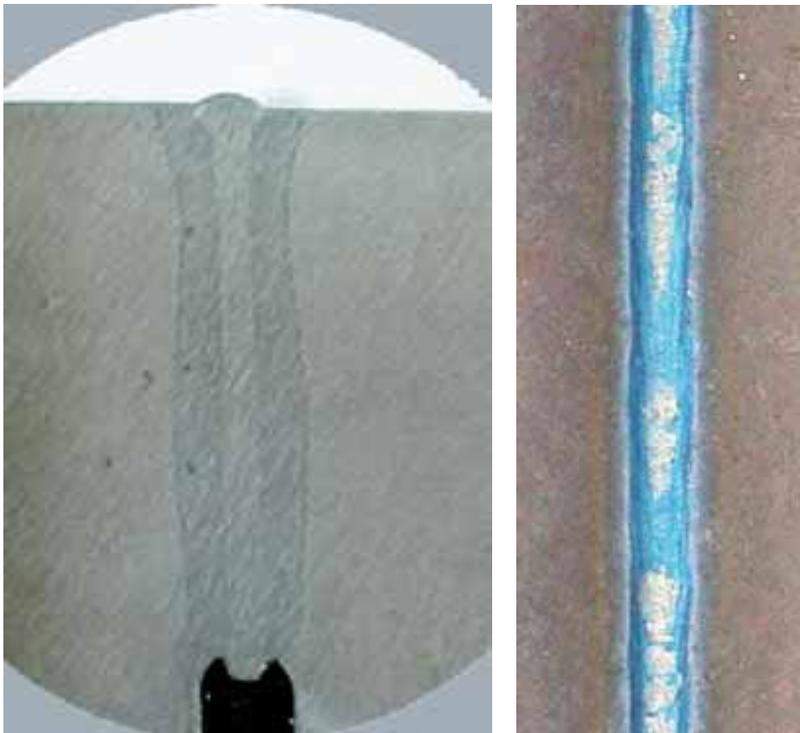


Abb. 208, 209: Schliff  
durch eine korrekt ge-  
schweißte Schiene und  
Oberraupe.

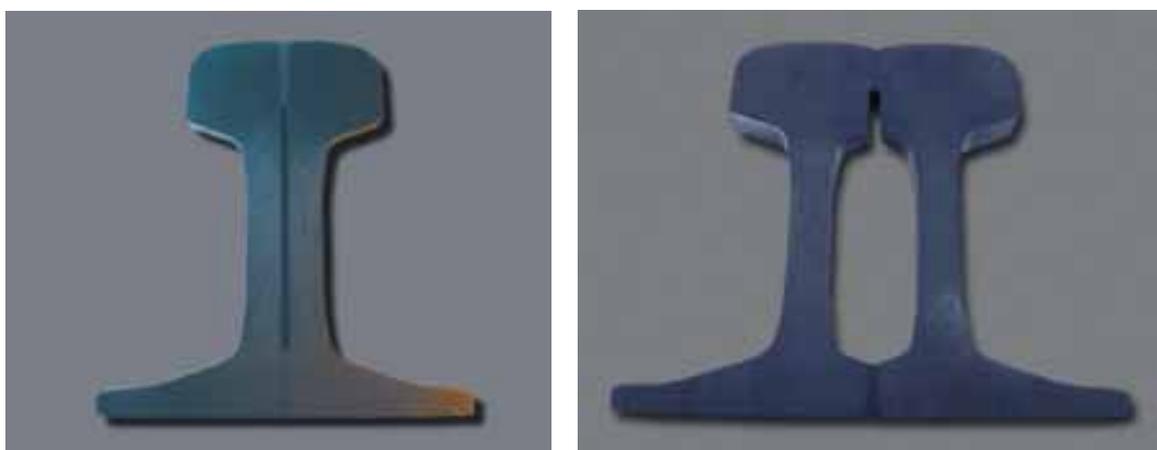
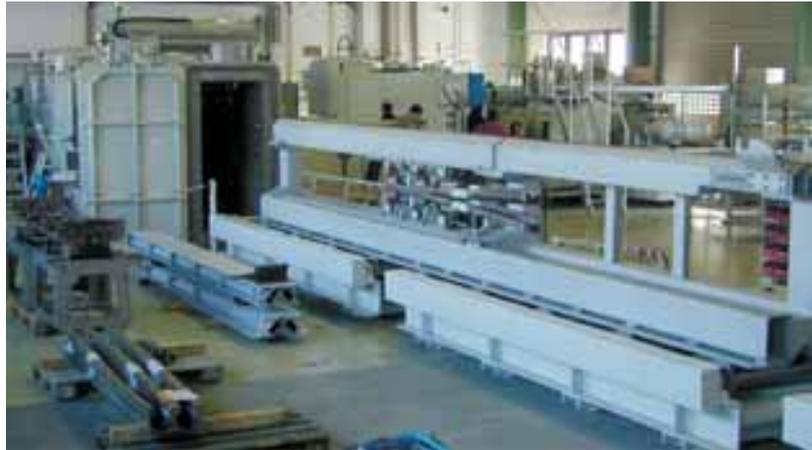


Abb. 210, 211: Querschliffe in unterschiedlichem Abstand von der Weichenspitze.

*Abb. 212:  
Die Elektronenstrahl-  
schweißmaschine mit  
dem Spannloch.*



Eine Schlüsselfunktion zu diesem Schweißprozess übernimmt die schnelle und einheitliche Erwärmung, die keinen Temperaturgradienten in den Schienen aufweist. Dies wurde durch Verwendung des UMH Prozesses erreicht (Uniform Magnetic Heating).



*Abb. 213: Vier Weichen-  
herzen zum Test.*



*Abb. 214: UMH Anlage.*



*Abb. 215:  
Prüfstand für  
Biegewechsel-  
belastung.*

Die spezifizierten 2 Mio. Lastwechsel mit einer Last von 320 kN wurde bei weitem überschritten; bei 5,5 Mio. Wechseln mit einer Endlast von 570 kN erfolgte der Bruch. Das positive Schweißergebnis führte zu einer voll automatisierten Produktionslinie einschließlich Montage und Spannwerkzeuge, Vorwärmen, EB-Schweißen, Wärmenachbehandlung, Qualitätskontrolle und Dokumentation.

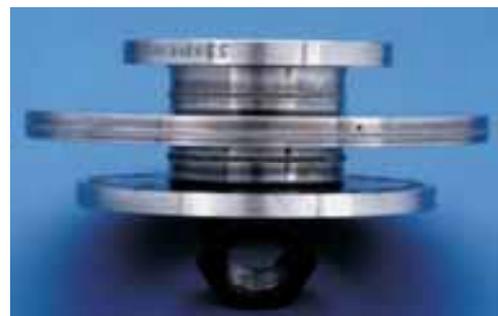
Das Elektronenstrahlschweißen von Weichenherzen ist ein Beispiel für die erfolgreiche Zusammenarbeit von Experiment und Computersimulation, die in einem attraktiven Produkt geendet hat.

## Schiffbau



*Abb. 216:  
U-Bootkörper werden  
in großen Vakuum-  
kammern elektronen-  
strahlgeschweißt.*

Das Elektronenstrahlschweißen im Schiffbau hat nur wenige Anwendungen. Die bekannteste ist das Schweißen von Rumpfsektionen von U-Booten. Es gibt zwei große Elektronenstrahlanlagen mit Vakuumkammer Durchmessern von 10 bzw. 12 m, die in der Lage sind, Stahl und Titan bis zu einer Dicke von 100 mm zu verschweißen. Leider gibt es keine zugänglichen Informationen über weitere Anwendungen an diesen Maschinen. Wir könnten uns vorstellen, dass Ruderblätter oder deren Lagerungen mit Schweißtiefen zwischen 50 und 100 mm in Frage kämen.



*Abb. 217, 218, 219: Kupplungsnabe und Membrankupplungen.*

Der Motor wird über eine Kupplungsnahe über Membrankupplungen an die Antriebswelle gekoppelt. Die Membrankupplung weist 3 EB-Nähte auf. Ihre Aufgabe ist es, die Vibrationen des Motors zu kompensieren. Marine Antriebe zeigen ähnliche, nur größere Schweißungen, wie bei Lastwagen an Kolben, Einspritzdüsen und Zahnrädern auf. Zum Transport von großen Schiffsmotoren werden Hebelaschen EB-geschweißt.

Abb. 220, 221:  
Kolbenboden eines Dieselmotors für Schiffe und Makroschliff der die EB-Härtung der Nutflanke für den Kolbenring zeigt.



Abb. 222, 223:  
Hebelaschen für Schiffsmotoren (links), Dieseleinspritzdüse für Schiffsmotoren (rechts).



Abb. 224:  
Schwinge zum Steuern des Schleppers aus Abb. 225.



Abb. 225: Ein Hightech-Antriebssystem für Schlepper mit verstellbarem Vorschub in Kraft und Richtung erlaubt es, das Boot auf der Stelle zu drehen.

## **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 m<sup>3</sup>. Die Nd: YAG- und CO<sub>2</sub>-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 Anlagelieferant 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](mailto:info@pro-beam.de)  
[www.pro-beam.de](http://www.pro-beam.de)

## Danksagung

Es ist nicht möglich, ein solches Buch zu schreiben, ohne auf eine Fülle von Bildern und Anwendungen zurückgreifen zu können. Deshalb gilt mein besonderer Dank unseren Kunden, die über einen sehr langen Zeitraum ihre Produkte zum EB-Schweißen zu pro-beam gebracht haben.

Ich hoffe, dass sie im Gegenzug angeregt und ermutigt werden, aus den gezeigten Beispielen Nutzen zu ziehen.

Weiter gilt mein herzlicher Dank meinen beiden Kollegen, die für viele der gezeigten Produkte verantwortlich waren: Herr Franz Rappold, der 25 Jahre lang die Produktion leitete und Herr Manfred Müller, dem 20 Jahre lang die Konstruktion und der Vertrieb unterstanden. Beide sind jetzt im wohlverdienten Ruhestand.

Dietrich von Dobeneck



*Von links: Manfred Müller, Franz Rappold, Dietrich von Dobeneck.*

