

Schweißen in der Luftfahrtindustrie

Grünendick, T.

Schweißverbindungen nehmen in der Luftfahrt zur Neuteilfertigung und Instandsetzung von Bauteilen eine feste Stellung als Verbindungselemente ein, und erfüllen in vielen Fällen die Anforderungen des Leichtbaus bei gleichzeitiger hoher Zuverlässigkeit. Der Artikel gibt einen Überblick über die in der Luftfahrtindustrie angewendeten Schweißverfahren.

Welding joints hold a safe position used as joining elements in the aviation for new component fabrication and for maintenance of components. In most cases they meet the demands regarding lightweight construction as well as for operational dependability. This article gives a general prospect of the most frequently used welding processes in the aviation industry.

1 Einleitung

Man muß in das 18. Jahrhundert zurückblicken, um die Anfänge des Schmelzschweißens zu finden. So geschah es dann auch eher zufällig, daß das Lichtbogenschweißen 1782 mit künstlicher Elektrizität und künstlichem Lichtbogen von Georg Christoph Lichtenberg angewendet wurde. Um 1839 gelang es dann dem Franzosen Desbassayns de

Wasserstoffflamme zu verbinden. Zum Schmelzen von Eisenwerkstoffen reichte diese Flammentemperatur jedoch nicht aus. Erst als Carl von Linde (1895) die Luftverflüssigung erfand, und damit Luft als Verbrennungsbeschleuniger durch Sauerstoff ersetzt werden konnte, wurde dies möglich. Zu diesem Zeitpunkt glaubte jedoch noch niemand daran, daß diese Entwicklungsanfänge zu einer Technologie führten, ohne die die Luftfahrt des 20. Jahrhunderts nicht möglich wäre.

Heute ist das Schweißen, das einen großen Entwicklungsschub durchlaufen hat, kaum mehr wegzudenken. Sein Vorteil liegt in der hohen Übertragungsfähigkeit der Kräfte und des geringen Raumbedarfs. Es ermöglicht somit das Erreichen der immer höher werdenden Forderungen nach Leistung und Betriebszuverlässigkeit. Auch für die Reparatur von Luftfahrzeugbauteilen ist das Schmelzschweißen sehr wirtschaftlich. Es hilft Ressourcen einzusparen und verschlissene Präzisionsteile zu rekonstruieren.

Einen Überblick über die Anwendung der Schmelzschweißverfahren erhält man durch **Bild 1**.

Luftfahrzeugzelle: Verbindungselemente, Cockpit, Reparatur von Rissen in der Außenhaut, usw.



Triebwerk: Verdichter- und Turbinengehäuse, Verdichter- und Turbinenläufer, Schaufeln, Brennkammer, Anbauteile, Abgasrohr, usw.

Bild 1: Anwendungen der Schmelzschweißverfahren, /6/
Richemont erstmals, zwei Bleche aus Blei mit einer

2 Schmelzschweißen

Um den verschiedensten Anforderungen, welche an die Schmelzschweißverfahren gestellt werden, gerecht zu werden, z. B. Verbinden spezieller dünnwandiger Werkstoffe (Titan, Molybdän) oder schwer zugänglicher Bauteile, benutzt man in der Luftfahrtindustrie speziell für die Anwendung ausgesuchte Verfahren. Die Wichtigsten und Bekanntesten sollen hier vorgestellt werden. Angewendet werden die Schmelzschweißverfahren manuell oder vollautomatisch zur Neuteilfertigung, Beseitigung von Produktionsfehlern und Instandsetzung von Bauteilen mit Beschädigungen oder Materialabtrag, die durch den betrieblichen Einsatz verursacht werden. Vereinzelt örtlich begrenzte Beschädigungen werden fast ausschließlich durch manuelles Schweißen beseitigt.

Zum manuellen Schweißen in der Neufertigung und Instandsetzung an Luft- und Raumfahrtgeräte sind nur Schweißer mit einer gültigen Schweißerprüfung nach DIN 29 591 zugelassen. Außerdem muß der Betrieb über eine ordnungsgemäße Ausstattung und eine vom Luftfahrtbundesamt oder Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung anerkannte Schweißaufsichtsperson (Schweißfachingenieur) verfügen.

2.1 WIG

Das Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) wurde in den 40er Jahren in den USA entwickelt und wird wegen seiner hohen Qualität bevorzugt in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Beim WIG-Schweißen brennt der Lichtbogen in einer Schutzgasatmosphäre zwischen einer nichtabschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück. Der Lichtbogen schmilzt den Grundwerkstoff und gegebenenfalls den Zusatzwerkstoff auf. Dabei schützt die Schutzgasatmosphäre, bestehend aus einem inerten Gas wie Argon, Helium oder ihre Gemische die Wolframelektrode und das Schmelzbad vor den Einflüssen der umgebenden Atmosphäre. Metallurgische Veränderungen im Schmelzbad werden dadurch verhindert. Selbst Werkstoffe wie Titan, Tantal, Zirkon und Molybdänlegierungen können mit diesem Verfahren geschweißt werden.

Eine sehr definierte Beeinflussung der Form und Größe des Schmelzbades durch die getrennte Führung von Wärmequelle und Zusatzwerkstoff ermöglicht das Auftrags- und Verbindungsschweißen, insbesondere dünnwandiger Werkstücke.

Bei der Instandsetzung von Triebwerksbauteilen nutzt man diesen Vorteil aus. So werden z. B. an Triebwerksverkleidungen aus Titan, die als Verdichtergehäuse oder Strahlrohrgehäuse bis zu einer Temperatur von ca. 350°C je nach Ti-Legierung eingesetzt werden, Reparaturschweißungen durchgeführt. Als Beschädigungen treten kleine Einbeulungen oder Risse auf. Aber auch Modifikationen können dazu führen, daß Durchführungen durch diese Verkleidungen entfernt und durch Flickchen geschlossen werden müssen. Beim Flickenschweißen müssen die Flickchen vorgebeult werden (1-2% der Öffnungsbreite, **Bild 2**), damit die Schrumpfung im Bauteil ausgeglichen und die Beule in die Ebene gezogen wird, /1/. Die richtige Heft- und Schweißfolge unterstützt diesen Prozeß, **Bild 3**.

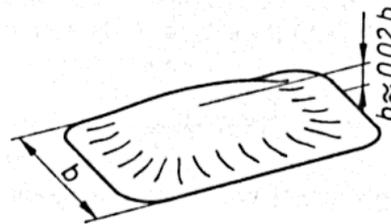


Bild 2: Vorgebeulter Flickchen, /1/

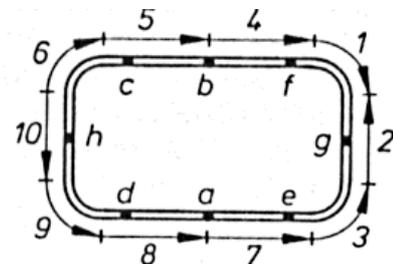


Bild 3: Heft- und Schweißfolge; Heftfolge a-h, Schweißfolge 1-10, /1/

Das oben genannte Strahlrohrgehäuse besteht aus einer α -Titanlegierung, die bei guter Formbarkeit, Schweißbarkeit und mit einem spezifischen Gewicht von ca. 4,7 g/cm³ (Stahl: 7,8 g/cm³) etwa gleiche Festigkeitswerte aufweist wie Stahl. Bei Temperaturen oberhalb etwa 300°C neigt dieser Werkstoff durch Aufnahme der atmosphärischen Gase, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff zum Verspröden. Es kommt zur Rißbildung. Das Schweißen kann deshalb nur unter Schutzgasabschirmung oder Vakuum erfolgen. Als Schutzgasabschirmung wird eine Gasschlepe, d.h. eine zusätzliche Nachlaufdüse, oder ein Schutzgaszelt verwendet, **Bild 4**. Anschließend muß ein Entspannen des Titanwerkstoffes bei 400°C durchge-

führt werden. Zur Sicherung der Qualität ist entsprechend der Sicherheitsklassen eine Prüfung durchzuführen. Das Strahlrohrgehäuse gehört zur Sicherheitsklasse II und wird einer Rißkontrolle mit fluoreszierenden Eindringstoffen unterzogen.

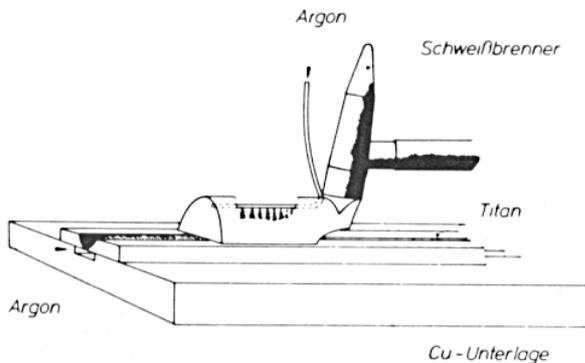
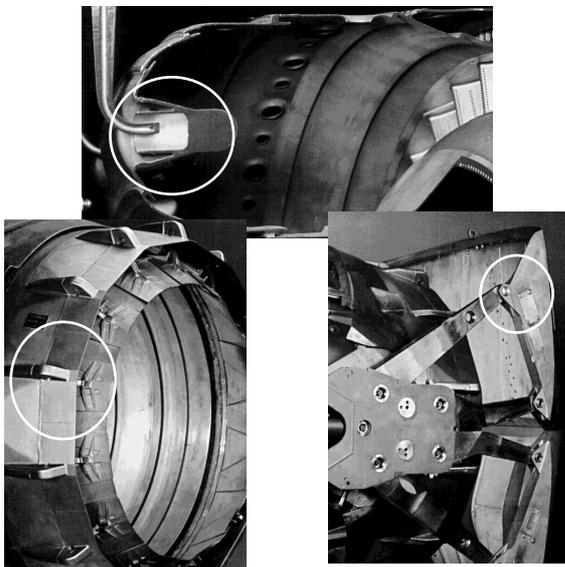


Bild 4: Nachlauf- oder Schleppdüse, /7/

Andere Anwendungen sind im gesamten Bereich des Flugzeugbaus und der Triebwerkstechnik zu finden. So werden defekte Turbinenleit- und Laufschaufelsegmente gewechselt, Risse geschweißt und schadhafte Unterbaugruppen ersetzt, **Bild 5**.

Einschweißen von Verdampfern
(Brennkammer)



Einschweißen von Segmenten
(Schubdüse)

Reparaturschweißen von Rissen
(Schubumkehrklappen)

Bild 5: Beispiele aus der Triebwerkstechnik, /6/

2.2 Laserstrahlschweißen

Als besonders wirtschaftlich haben sich in der Fertigungstechnik Kohlendioxid - Laser (CO₂-Laser) für die Großserienfertigung und Neodym - YAG - Laser

(Nd-YAG-Laser) zum Verschweißen von Feinblech erwiesen. Das Laserlicht wird über Glasfaser-Kabel zur Schweißstelle geleitet und sehr genau fokussiert. Der so auftreffende heiße Strahl bringt das Metall auf Verdampfungstemperatur. Es entsteht ein Metaldampfkanal im Schmelzbad, der ein tiefes Eindringen des Strahls ermöglicht und zur Ausbildung schmaler und tiefer Nähte führt (Tiefschweißeffekt). Zusätzlich bildet sich ein Oberflächenplasma, das einen Teil der Laserenergie absorbiert, aber durch reaktionsträge Edelgase (Argon oder Helium) klein gehalten werden kann, **Bild 6**. Durch die Bewegung des Strahls über die zu schweißende Naht werden die Stoßkanten ohne die Zugabe von Zusatzwerkstoff und unter atmosphärischen Bedingungen verbunden.

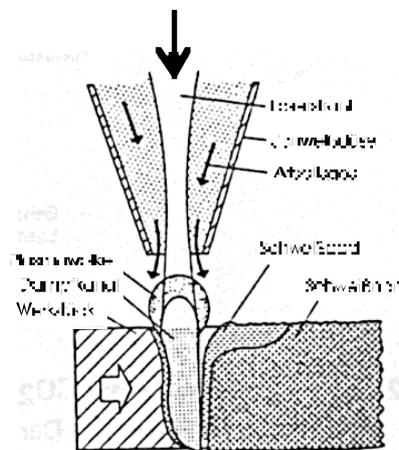


Bild 6: Verbinden mit dem Laserstrahl, /8/

Die wesentlichen Vorteile der Lasertechnologie sind:

- Geringere Rißgefahr durch Beibehaltung der Plastizität.
- Festigkeit der Schweißnaht in Höhe des ungeschweißten Grundwerkstoffes.
- Gegenüber anderen Schweißverfahren sehr geringer Verzug der Konstruktion.
- Ausbildung schmaler und tiefer Nähte sowie sehr geringe Wärmeeinflußzone.
- Gut automatisierbar.

Diese Vorteile nutzt die Luftfahrtindustrie, um kompliziert geformte Bauteile, bei denen es wichtig ist, daß sich das Material nicht verzieht, zu verbinden, /4/. Aber nicht nur zum Verbindungsschweißen wird die Lasertechnologie angewendet, sondern auch zum Auftragsschweißen. Hierzu ein Beispiel:

Turbinenleit- und Laufschaufeln gehören zu den thermisch, chemisch und dynamisch höchstbelasteten Bauteilen eines Triebwerks. Sie sind Tempe-

raturen bis zu 1400°C ausgesetzt. Deshalb werden diese Bauteile aus hochwarmfesten polykristallinen, aber auch einkristallinen Superlegierungen hergestellt und aufwendigen Bearbeitungen unterzogen (z.B. lasergebohrte Kühlluftleitungen). Trotzdem lassen sich Beschädigungen an der Schaufelprofilhinter- und -vorderkante sowie im Blattbereich nicht verhindern. Die Schadensursachen an Schaufeln reichen von Erosion, thermischer Ermüdung über Fremdkörpereinschläge bis hin zur Materialabnutzung durch Verschleiß.

Erlaubt die Beschädigung eine Wiederherstellung der Schaufel und kostet diese weniger als die Neuteilfertigung, wird eine Auftragsschweißung durchgeführt. Hierzu ist ein Wiederaufbau der abgenutzten Flächen nötig, z.B. des Blattbereiches. Wird ein CO₂-Laser hoher Leistungsklasse zum Regenerieren verwendet, lassen sich Beschichtungsraupen mit einer Breite von 1-10 mm und einer Höhe von 0,5-2 mm erzeugen. Der Einsatz von Nd-YAG-Lasern mittlerer Leistungsklassen ermöglicht eine Minimierung des Wärmeeintrags und hochpräzise Beschichtungen mit einer Schichtdicke von 0,1-0,5 mm. Damit lassen sich nicht nur die beschädigten polykristallinen Schaufeln in einen neuwertigen Zustand zurückversetzen, sondern auch Schaufeln aus modernstem Materialgefüge (gerichtete erstarrte Kristalle oder aus einem einzigen Kristall bestehende), **Bild 7**, /2/. Da der Laserantrag auf wenige Zehntelmillimeter genau erfolgen kann, ist nur eine geringe Nachbearbeitung nötig.

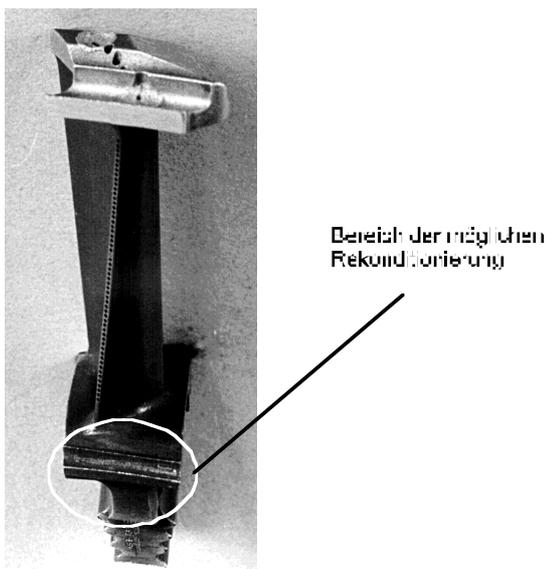


Bild 7: Turbinenschaufel mit Einkristallstruktur

2.3 Elektronenstrahlschweißen

Während beim Laserstrahlschweißen Werkstoffe mit einer Dicke bis ca. 10 mm industriell miteinander verbunden werden, können mit dem Elektronenstrahlschweißen Einschweißiefen bis zu 100 mm und tiefer erreicht werden. Ähnlich wie beim Laserstrahlschweißen tritt hier durch Entstehung eines Metaldampfkanals im Schmelzbad der Tiefschweißeffekt auf. Verursacht wird dies durch die hohe Leistungsdichte des zu einem Fokus von weit unter 1 mm Durchmesser gebündelten Elektronenstrahls. Die Elektronen werden beschleunigt und prallen auf das Werkstück, dabei wird die kinetische Energie zum größten Teil in Wärme umgewandelt. Der Elektronenbeschuss ist jedoch so intensiv, daß die Verdampfungstemperatur des Metalls erreicht wird und sich ein kleines Loch (Dampfkanal) bildet. Wandert der Elektronenstrahl zwischen zwei sich berührenden Stirnflächen, so bleibt eine schmale Naht zurück. Damit es nicht zur Ablenkung des Elektronenstrahles kommt und dies zu Fehlschweißungen führt, müssen alle magnetischen Teile der Vorrichtung und die Bauteile entmagnetisiert werden.

Die extrem hohe Leistungsdichte im Elektronenstrahl von ca. 10⁸ W/cm² schafft die Voraussetzung für eine extrem gezielte Wärmeeinbringung und damit für ein verzugsarmes Schweißen mit schmalen Schmelz- und Wärmeeinflußzonen. Dies wird zum Beispiel bei der Herstellung von fertig bearbeiteten Getrieberädern bzw. Antriebswellen, die ohne mechanische oder thermische Bearbeitung eine Rundlaufgenauigkeit von 2µm erreichen, ebenso ausgenutzt wie bei der Herstellung von Präzisionsteilen, **Bild 8**.

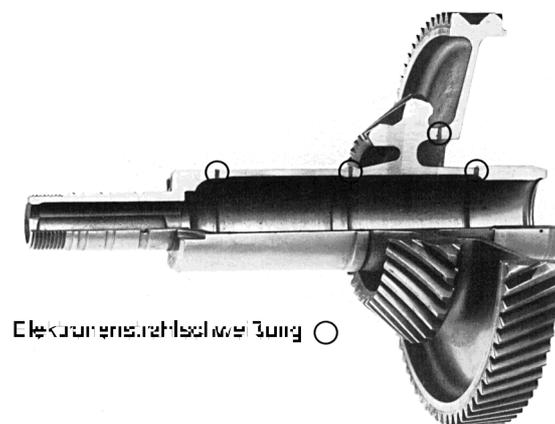


Bild 8: Elektronenstrahlgeschweißte Welle, /5/

Beim Elektronenstrahlschweißen von Verdichterro-toren, **Bild 9** zeigt einen Verdichterro-tor aus einer

Titanlegierung, werden weitere Vorteile dieses Verfahrens ausgenutzt.

So eignet sich das Elektronenstrahlschweißen zum Schweißen geometrisch schwieriger Werkstücke wie Hohlkörper, I-Profile oder von Werkstücken mit engen Spalten und schwer zugänglichen Schweißkanten. Der oft beim Elektronenstrahlschweißen als Nachteil betrachtete Zwang, im Vakuum zu schweißen, wird beim Verbinden gasempfindlicher Werkstoffe wie Titan, Tantal, Zirkon zum wichtigen Vorteil.



Bild 9: Verdichterrotor, /5/

Am IMW werden derzeit Dauerfestigkeitsversuche an elektronenstrahlgeschweißten Membrankupplungen durchgeführt, **Bild 10** und **Bild 11**. Diese statisch und dynamisch hoch beanspruchten Werkstücke wurden, ohne daß eine nennenswerte Beeinträchtigung der mechanischen Gütewerte vorliegt, geschweißt.

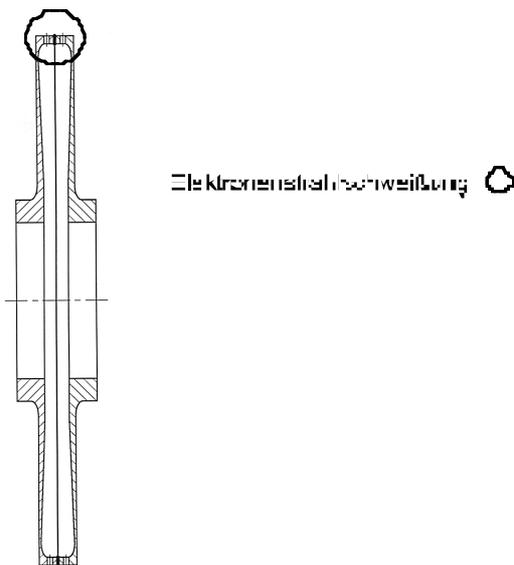


Bild 10: Membrankupplung

2.4 Mikroplasmenschweißen

Das Mikroplasmenschweißen gehört genauso wie das WIG- oder Plasmaschweißen zur Gruppe der Schutzgasschweißverfahren. Es wird zum Verbindungs- und Auftragsschweißen von komplizierten und dünnwandigen Bauteilen eingesetzt. Bei diesem Verfahren brennt ein Hilfslichtbogen zwischen der nichtabschmelzenden Wolframelektrode und der gekühlten Kupferdüse. Der Hilfslichtbogen wird vom Plasmagas (meist Argon) umströmt und durch die Düsenöffnung gedrückt. Der Hauptlichtbogen kann somit sicher und mit niedrigem Schweißstrom gezündet und auf das Werkstück übertragen werden. Die Einschnürung dieses Plasmalichtbogens gewährleistet eine hohe Leistungsdichte, die schmale Schweißnähte und geringe Wärmeinflußzonen ermöglichen. Ein verzugsarmes Schweißen ist damit durchführbar.

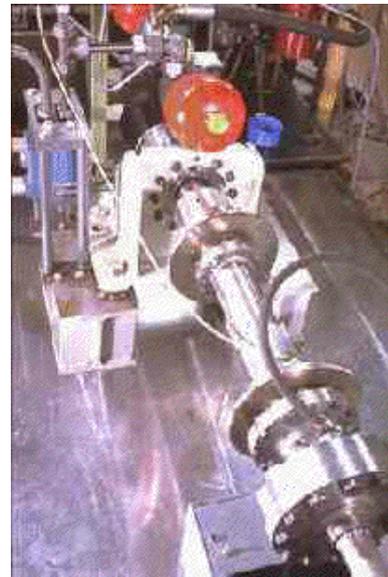


Bild 11: Membrankupplung in einem Torsionsschwingprüfstand

In der Luftfahrtindustrie wird das Mikroplasmenschweißen überwiegend vollautomatisiert mit einem Handhabungssystem, bestehend aus einem Drehtisch, einer Bewegungseinrichtung für den Schweißbrenner und einer Mikroplasmenschweißanlage durchgeführt. Damit können komplizierte Bauteile, wie z.B. Turbinenschaufeln, auftragsgeschweißt werden. Bei Turbinenschaufeln werden Labyrinthdichtstege und Schaufelkonturen, die im Betrieb verschleifen, wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückversetzt. Dabei wird in mehreren auftragsgeschweißten Lagen die alte Kontur aufgebaut und anschließend durch eine Nachbearbeitung in die neuwertige Form gebracht.

Ein gutes Kosten/Leistungsverhältnis erreichen Mikroplasma-schweißanlagen bei der Wiederherstellung von rotationssymmetrischen Bauteilen, wie z.B. bei Labyrinthdichtungen der Turbinen- und Verdichterlauf-scheiben. Bestehen diese Bauteile aus Titan, Cr-Ni-Stählen oder Nickellegierungen, darf ein Formieren nicht vergessen werden, d.h. eine Schutzgasvorrichtung schützt das Bauteil vor den atmosphärischen Gasen. Es kommt ansonsten zur Versprödung bzw. Zunderbildung. Nach dem Auftragsschweißen und anschließender Nachbearbeitung werden die Labyrinthdichtstege mit einem thermischen Metallspritzverfahren beschichtet. Die Bauteile sind danach genauso hochwertig, wie sie es als Neuteil waren, **Bild 12**.

Eine weitere Besonderheit ist das Schweißen von Folien und extrem dünnen Blechen. **Tabelle 1** zeigt das Leistungsspektrum des Mikroplasma-schweißverfahrens /3/.

| Verbindungsschweißen | |
|----------------------|--------------------------|
| Stromstärke A | Mikroplasma-schweißen |
| 0,1 ... 10 | Folien 0,05 ... 0,2 mm |
| 1 ... 20 | Dünnblech 0,2 ... 0,5 mm |
| 5 ... 40 | Dünnblech 0,5 ... 1 mm |

Tabelle 1: Arbeitsbereiche, /3/

Diese positiven Eigenschaften machen das Mikroplasma-schweißverfahren zu einem in der Luft- und Raumfahrttechnik beliebten Verfahren.

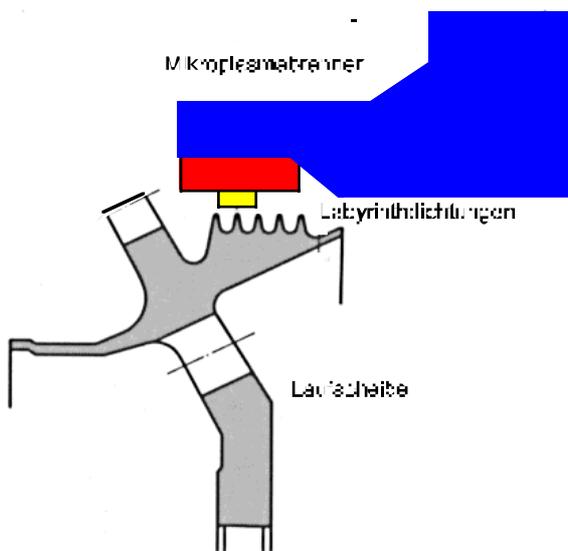


Bild 12: Mikroplasmaauftragsschweißen von Labyrinthdichtungen

3 Zusammenfassung

Hohe Betriebszuverlässigkeit und hoher Wirkungsgrad bedeuten oft hohen und kostenintensiven Fertigungsaufwand. Sie machen eine Rekonditionierung von Bauteilen lohnenswert.

In der Luftfahrtindustrie nutzt man deshalb die unterschiedlichen Einsatzspektren und Vorteile der oben genannten Schweißverfahren zielgerichtet aus. Damit gelang es unter anderem, auch Leichtbaukonzepte zu realisieren. Durch optimale Gestaltung, Reduzierung der Dichte (Ti, Al) oder Steigerung der Festigkeit (höherfeste Stähle) können in Zusammenhang mit diesen Schweißverfahren Baugruppen geschaffen werden, die den modernen ökologischen und ökonomischen Anforderungen entsprechen.

4 Literatur

- /1/ Instandsetzung durch Schmelzschweißen in der Luft- und Raumfahrt, DVS Merkblatt 2708
- /2/ Bieler, H.: Einkristalle reparieren, Sulzer Technical Review, 2/1997
- /3/ Aichele: Leistungskennwerte für Schweißen, DVS-Verlag, 1980
- /4/ Ehrhardt, A.: Flexibles Laserstrahlschweißen für den innovativen Leichtbau, DVS Berichte 186, 1997
- /5/ Elektronenstrahlschweißen, MTU, 1983
- /6/ Das Flugtriebwerk, MTU, 1993
- /7/ Stenke, V.: Formieren - unbedingt notwendig? Sonderdruck 14/93, Linde AG, 1993
- /8/ DVS-Lehrgang Schweißfachingenieur, SLV München, 1995