

Verlängern von Verdichterschaufeln durch Laser-Pulver-Auftragschweissen

B. Stimper, München

1 Einleitung

In den zurückliegenden Jahren haben sich völlig neue Kooperationsformen zwischen Luftfahrtunternehmen und Instandsetzungsbetrieben für das fliegende Gerät entwickelt. Ausgehend von Vereinbarungen, wie beispielsweise „fly by hour“, sind die Betreiber von Triebwerken heute nur noch bedingt bereit, Ersatzteilkosten separat zur Überholung der Triebwerke zu übernehmen. Anders als in der Vergangenheit zwingt diese Situation die Instandsetzungsbetriebe heute an Stelle des Zukaufs von Ersatzteilen verstärkt auf die preiswertere Instandsetzung zu setzen. Unter diesem Aspekt ist es von Interesse das Thema der Reparatur verschlissener Verdichterschaufeln neu zu betrachten.



Bild 1. Integralrotor bzw. Blisk
(Kunstwort – Blade + Disk = Blisk)

Neben dem aktuellen Bezug ist das Thema der Verdichterschaufelreparatur im Hinblick auf Instandsetzung zukünftiger Triebwerkstypen von Bedeutung. Bedingt durch die in die Triebwerksprojekte der nächsten Generation nach und nach einfließende Blisktechnologie entfallen zukünftig alle konventionellen Möglichkeiten zum Schaufeltausch, *Bild 1*. Um in diesem Zusammenhang eine geeignete Instandsetzungslösung zur Verlängerung abgenutzter Verdichterschaufeln anbieten zu können, müssen die derzeitigen Aufgaben bereits mit Blick auf zukünftigen Bedarf gelöst werden.

Nachfolgend werden Ergebnisse präsentiert, die bezüglich der Reparatur abgenutzte Schaufelspitzen von Verdichterschaufeln durch Laser-Pulver-Auftragschweissen aktuell vorliegen. Um eine bessere Einordnung

der Untersuchungsergebnisse zu ermöglichen, werden dazu vor und nachgeordnete Prozesse mit betrachtet. Da die Untersuchungen zum Laser-Pulver-Auftragschweissen von Verdichterschaufeln überwiegend empirisch durchgeführt wurden, sind zunächst die allgemein gewonnenen Erkenntnisse dargestellt. Im sich dann anschließenden Abschnitt werden die Ergebnisse bewertet und miteinander verglichen.

2 Vorgehensweise

Die Reparatur beschädigter Verdichterschaufeln konzentriert sich üblicherweise auf das manuelle Nacharbeiten der Eintritts- und Austrittskanten bzw. das Verlängern an der Schaufelspitze abgenutzter Schaufeln. Je nach Art und Einsatzcharakteristik des Triebwerkes kann der Verschleiss der abgenutzten Schaufelspitze weniger als ein bis zu mehr als fünf Millimetern betragen. Unabhängig vom Abnutzungsgrad werden zum Rekonditionieren der Verdichterschaufeln meist die gleichen Techniken eingesetzt. Diese Techniken sind:

- Reinigen der Schaufelspitze
- Aufschweißen
- Nacharbeiten
- Überprüfen des Reparaturergebnisses

Während zum Reinigen mechanische oder chemische Verfahren zum Einsatz kommen haben sich in der Vergangenheit zum Aufschweißen die Lichtbogenschweißverfahren etabliert. Um den notwendigen Materialauftrag zu realisieren, werden die Lichtbogenschweißverfahren, bevorzugt WIG- oder WPL-Schweißen, in Verbindung mit Zusatzdraht zur Anwendung gebracht. Der durch das Auftragschweißen erzeugte Materialauftrag wird in der dem Schweißprozess nachgeordnetem mechanischen Bearbeitung an die Schaufelkontur angepasst. Sowohl für die Schweißoperationen als auch für die Nachbearbeitung können manuelle oder automatisierte Prozesse eingesetzt werden. Zu berücksichtigen ist in jedem Fall das eine geometrische Individualität der Bauteile nach dem Triebwerkseinsatz vorhanden ist.

Entsprechend den weltweit unterschiedlichen Fertigungskosten gilt es dieser Individualität durch manuelle Bearbeitung oder durch Sensor gestützte Prozessadaption bzw. Hybridlösungen gerecht zu werden. Unabhängig welche Vorgehensweise zur Realisierung gelangt, vor dem Hintergrund der Individualität der Verdichterschaufeln bleiben die Möglichkeiten die Reparatur effizienter und daher kostengünstiger zu gestalten begrenzt.

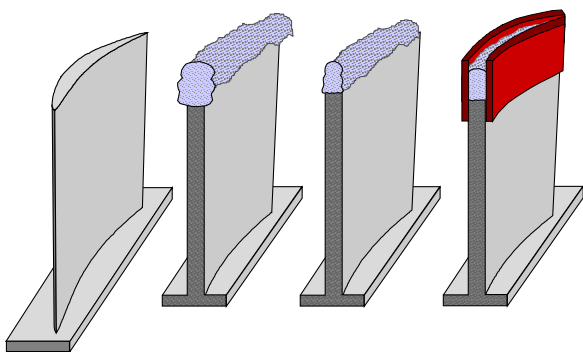


Bild 2. Verdichterschaufeln in unterschiedlichen Bearbeitungszuständen. Von links nach rechts – Ausgangszustand, WPL-, LPA, LPAiK-Geschweisst

Eine der wenigen Perspektiven eröffnet in dieser Hinsicht die Anwendung des Laser-Pulver-Auftragschweißens. Getragen durch die mit dem Verfahren umsetzbaren Schweißgeschwindigkeiten, diese liegen etwa um den Faktor 10 über den bisher mit den Lichtbogenschweißverfahren reali-

sierten Werten, tritt die Individualität der Schaufeln in den Hintergrund. Neben der Verkürzung des Schweißprozesse und damit der Maschinenbelegungszeit erschliesst der Einsatz des Verfahrens Laser-Pulver-Auftragschweißen noch weitere Einsparungspotentiale. Diese eröffnen sich im Bezug auf die dem Schweißen nachgeordnete mechanische Bearbeitung der Auftragschweißung. Da es möglich ist, die Auftragschweißung unter Verwendung einer das Schweißbad stützenden Kokille ohne nennenswerten Überstand, d.h. konturnah, zur Schaufel aufzutragen, läßt sich der Nachbearbeitungsaufwand wie die Schweißzeit deutlich reduzieren oder ganz einsparen, *Bild 2*.

Trotz der skizzierten Vorteile die mit Einsatz des Laser-Pulver-Auftragschweißens verbunden sind, blieb deren Anwendung zur Schaufelreparatur in Deutschland bisher auf das forschungsnah Umfeld beschränkt. Der nicht vollzogene Wechsel in die industrielle Landschaft hat vermutlich mehrere Gründe. Einerseits standen bisher kaum industrietaugliche Anlagen und Geräte zur Verfügung, die es erlauben, das Verfahren einzusetzen und andererseits charakterisiert sich das Verfahren durch eine beachtliche Komplexität.

3 Technologie des Laser Pulver Auftragschweißens

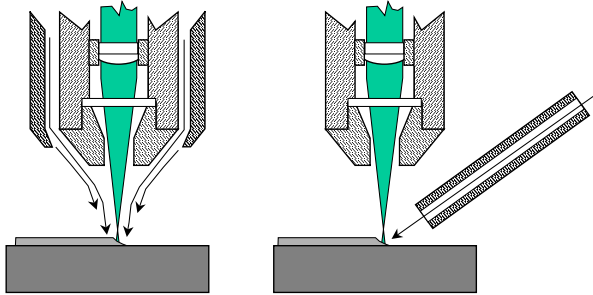
Laser-Pulver-Auftragschweißen, dass ist ein komplexes Verfahren, welches durch eine Vielzahl von Prozessparametern gekennzeichnet ist. Die wichtigsten dieser Parameter sind:

- Laserleistung
- Fokuslage
- Vorschubgeschwindigkeit
- Pulverfördermenge
- Pulvergasmenge
- Pulverkorn-Durchmesser
- Werkstoffkennwerte

Da das Verfahren sowohl mit CO₂- als auch mit Nd:Yag-Lasern eingesetzt werden kann, spielt auch die Auswahl der geeigneten Strahlquelle ein Rolle.

Entsprechend anderer industrieller Anwendung und Erfahrungen hat sich für das Laser-Pulver-Auftragschweißen der Einsatz von Festkörperlasern als vorteilhaft erwiesen. Einer der Vorteile resultiert aus der mit 1.06 µm vergleichsweise kurzen Wellenlänge der Festkörperlaser. Diese kurze Wellenlänge ermöglicht eine gute Absorbtion der Laserstrahlung durch das zu schwei-

ssende Material, den Grund- und Zusatzwerkstoff. Ein anderer Vorteil den die Anwendung von Festkörperlasern mit sich bringt, ist die Möglichkeit die Laserenergie vom Resonator zum Bearbeitungskopf mit einer Glasfaser übertragen zu können.



Auf die zu schweisende Oberfläche wird

Bild 3. Laser-Pulver-Auftragschweißen in den Varianten Koaxiale Pulverzuführung (links) Seitliche Pulverzuführung (rechts)

die über die Glasfaser transportiert Laserstrahlung mit einer **bipolaren Optiken** übertragen Für das Laser-Pulver-Auftragschweißen haben sich dazu je nach zu erforderlicher Strahlform Optiken mit Brennweiten zwischen 80 und 300 mm bewährt. Das zum Erzeugen der Auftragschweißung erforderliche Zusatzmaterial läßt sich dem Strahl auf unterschiedliche Weise zuführen. Gebräuchlich sind entweder die seitliche oder die koaxiale Art der Pulverzuführung,

Bild 3. Kombiniert mit den verschiedenen Optiken können dann, ähnlich wie mit einem Baukasten, Bearbeitungsköpfe entsprechend den Anforderungen der zu lösenden Schweißaufgabe zusammengestellt werden.

3.1 Freie Auftragschweißung

Die verbreitetste Konfiguration zum Durchführen freier Auftragschweißungen sind jene mit seitlicher Pulverzuführung und ca. 150 mm Brennweite. Im Bezug auf das freie Auftragschweißen der Verdichterschaukeln hat sich jedoch die Verwendung koaxialer Pulverdüsen als geeigneter erwiesen. Gegenüber einer Reihe von Vorteilen, die mit dieser Art der Pulverzuführung verbunden sind, bleibt fest zu stellen, dass der Grad der Pulverausnutzung bei Verwendung der koaxialen Pulverzuführung etwa um den Faktor 5 hinter der einer punktgenau eingestellten seitlichen Pulverzuführung zurückbleibt. Der Grund weshalb die koaxialen Pulverdüse dennoch eingesetzt wird, verbirgt sich im nicht einheitlichen Verschleiß der instanzzusetzenden Verdichterschaukeln.

Üblicherweise differieren die aufzuschweisenden Schaufeln in Ihrer Ausgangslänge um 0,1 bis 2mm. Aus diesem Grund ist es bei Anwendung der externen Pulverdüse notwendig den gesamten Arbeitskopf der Längenänderung von Schaufel zu Schaufel nach zu führen. Sprich, die Arbeitspunkte von Laser- und Pulver-Strahl müssen mit einer Präzision von $\pm 0,2$ mm auf der Werkstückoberfläche deckungsgleich gehalten werden. Unter Praxisbedingungen ist dieser Zustand nur mit aufwendigen Vorrichtungen oder Sensorik beherrschbar.

Auf derartige Funktionalitäten kann bei Verwendung eines koaxialen Pulverkopfes weitgehend verzichtet werden. Dank der koaxialen Anordnung von Laser- und Pulver-Strahl treffen sich beide in einem vergleichsweise langen Arbeitbereich. Abweichungen in der Bauteillänge gleicht ein koaxialer Pulverkopf daher wesentlich besser aus als eine seitlich angebrachte Pulverdüse. Zudem vereinfacht sich durch diese Pulverzuführungsmethode der Programmieraufwand, infolge der Richtungsunabhängigkeit, mit der Laser- und Pulverstrahl ausgestattet sind. Der mit einer koaxialen Pulverdüse erreichbare Grad der Prozessstabilität ist damit wesentlich höher als der mit einer seitlich angebrachten Pulverdüse.

Neben der Auswahl geeigneter Prozessrandbedingungen muß die Verfahrensdurchführung unter dem Aspekt bauteilspezifischer Erfordernisse betrachtet werden. Aus dieser Perspektive gilt es die Verdichterschaukelreparatur in Richtung eines möglichst geringen Wärmeeintrages in das aufzuschweisende Schaufelprofil zu optimieren. Gelingt dies, dann ist der Festigkeitsrückgang infolge der beim Schweißen unvermeidlichen Gefügeumwandlung gering und wie bereits angedeutet steigt mit weniger Energieeintrag die Prozesssicherheit.

Demnach sollte nur soviel Laserenergie verwendet werden wie zum Anschmelzen der Schweißsstelle und zum Aufschmelzen des in Pulverform zugeführten Zusatzwerkstoffes gerade notwendig ist. Die je Schaufeltyp und Schweißposition eingestellten Laserleistung beträgt daher nur etwa 500-800 W. Bei einer Schweißgeschwindigkeit zwischen 300 und 500 mm/min ist die wirkende Streckenenergie ebenfalls gering. Aus der Perspektive der zu erreichenden Schweißqualität ist diese Art der Prozessgestaltung ebenfalls zu begrüßen. Der niedrige Energieeintrag ist neben der Vermeidung turbulenter Gaströmungen Garant dafür, daß auch der Anteil von Poren in der Auftragschweißung gering bleibt. Zudem

vermeidet der geringe Energieinput eine Überhitzung der Schmelzbades und damit dessen unkontrolliertes auseinanderfließen, was in Bezug auf die herzustellende Schweißnahtgeometrie meist vorteilhaft ist.

Die mit der gerade noch ausreichenden Energiemenge aufgetragenen Einzelschichten weisen üblicherweise eine Höhe von 0,3-0,5 mm auf. Aus diesem Grund ist es teilweise notwendig mehrere Auftragschweißungen durchzuführen und übereinander zu legen um die erforderliche Verlängerung der Schaufeln zu erreichen.

Unter diesem Gesichtspunkt, aber auch bezüglich der Reproduzierbarkeit, ist es unvermeidlich, das Laser-Pulver-Auftragschweißen an den Verdichterschaukeln zu automatisieren. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass der programmierte Lagenversatz und die tatsächlich erzeugte Schichthöhe voneinander abweichen können. Dies hat zur Folge, dass sich bei Verwendung einer seitlichen Pulverzuführung Pulver- und Laserauftreffpunkt zueinander verschieben. Die Fehlpositionierung schlägt sich schliesslich in fehlerhaften oder nicht erzeugten Auftragschweißungen nieder. Auch in dieser Hinsicht bietet die Verwendung koaxialer Pulverzuführung Vorteile, weil durch deren großer Arbeitsbereich die genannte Schwachpunkte selbstregelnd ausgeglichen werden.

Wie bei den meisten Schmelzschweißprozessen so lässt sich auch hinsichtlich des Laser-Pulver-Auftrag-Schweißens ein signifikanter Zusammenhang zwischen atmosphärischen Bedingungen und Schweißqualität feststellen. Aus diesem Grund erweist sich die Verwendung einer zusätzlichen Schutzgasdüse, welche den Schweißbereich insgesamt abschirmt, als prozessstabilisierend. Dies gilt für die meisten Schaufeltypen als auch untersuchten Werkstoffe wie Nickelbasis- und Titan-Legierungen. Sowohl für das Schutzgas als auch für Sperr- und Pulverförgas ist die Verwendung von Argon ausreichend. Ein formierender Einfluß anderer Gase oder Gasgemische ist nicht bekannt.

3.2 Laser-Pulver-Auftragschweißen in Kokille (LPAiK)[®]

Laser-Pulver-Auftragschweißen in Kokille ist eine Technologie, die zum Verlängern einer zu kurz gewordenen Verdichterschaukel eine dem Profil der Verdichterschaukel entsprechenden Kupferform benutzt, um das Schaufelblatt durch Auftragschweißen mit dem Laser bei Verwendung von Pulver als

Zusatzmaterial ohne nennenswerten Überstand wieder herzustellen. Die dieser Technologie zu Grunde liegende Idee, den im Anschluss an das Auftragschweißen notwendigen Nachbearbeitungsaufwand zu senken oder einzusparen ist nicht neu.

Bereits früher gab es Überlegungen, durch Laser-Pulver-Auftragschweißen erzeugte Schichten noch vor der Erstarrung d.h. im teigigen Zustand mit Hilfe von Rollen in Form zu bringen./1/ Auch die Verwendung von festen Kupferbacken zum Erzeugen einer Form in Verbindung mit dem Laser-Pulver-Auftrag-Schweißen ist zur Herstellung von Honleisten bekannt./2/

Laser-Pulver-Auftragschweißens in Kokille, das ist ein sich selbst steuernder Prozess, der auf der Basis eines Ressourcenüberschusses abläuft. Erst wo der Prozess zu entarten droht, ist es notwendig, Ressourcen wie Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit anzupassen. Getragen von dieser Modellvorstellung ist es möglich, Prozessparameter zu ermitteln, die es gestatten, kontinuierliche Auftragschweißungen bei einem wechselnden Breite zu Höhe Verhältnis von 2/1 bis 1/10 durchzuführen.

Die Kontrolle des Schweißprozesses im Bereich der Schaufelkanten, ist dabei aufgrund des extremen Breite zu Höhe Verhältnis von 1/10 am schwierigsten zu kontrollieren. Bedingt durch die Individualität der Schaufeln kann in diesem Bereich nicht immer ein Kontakt zwischen Schaufel und der standardisierten Kokille gewährleistet werden. Der damit nicht sicher gegebene Wärmeübergang zwischen Schaufel und Kokille führt dann zu Instabilitäten im Schweißprozeß. Mit Hilfe iterativer Modifikation gelingt es aber auch in diesem Bereich die Keilform soweit der Schaufelform anzunähern das ca. 95 % aller Verdichterschaukeln eines Typs mit optimierten Kokillen geschweisst werden können.

Der starke Einfluss der Kupferkokillen auf den Schweißprozess resultierte aus deren Wärmeleitfähigkeit und deren Wärmekapazität. Bei der Parameterfestlegung muss dies berücksichtigt werden, d.h. dem Prozess muß soviel mehr an Streckenenergie zur Verfügung gestellt werden, daß der in die Kokillen abfließende Wärmestrom den Schweißprozess nicht aus dem Gleichgewicht bringt. Wie für die freien Auftragschweißungen so hat es sich für das Schweißen in der Kokille bewährt, die kleinstmögliche Einstellung der Streckenenergie auszuwählen. Nur so kann vermieden werden, daß keine Verschmelzungen

von Auftragschweißung und Kokille auftreten. Um bei Beachtung dieser Randbedingung auch im Bereich der Schaufelkanten noch eine ausreichende Streckenenergie gewährleisten zu können empfiehlt es sich in diesem Bereich konsequent mit Fokusslage ± 0 zu arbeiten.

Großer Einfluß für das Gelingen des Laser-Pulver-Auftragschweißens in Kokille geht von der Art der Pulverzuführung aus. Für das Schweißen in Kokille ist die seitliche Pulverzuführung die geeignetste Variante. Bedingt durch deren Flexibilität hinsichtlich Düsendurchmesser und Anstellwinkel sind mit dieser Methode für jeden Schaufeltyp optimale Einstellwerte bestimmbar. Die Anordnung der Pulverdüse vor dem Laserstrahl stellte zudem einen schleppenden Schweißvorgang sicher, wodurch dem Prozess während aller Phasen ausreichend Pulver vor dem Laserstrahl zur Verfügung steht. Dies ist speziell im Bereich der Schaufelkanten wichtig, weil hier der weitaus größte Teil der verfügbaren Energie zum Aufschmelzen des Zusatzmaterials verwendet wird. Steht an diesen Stellen kein Pulver zur Verfügung, dann wird die Verdichterschaufel irreparabel beschädigt und damit wäre die Instandsetzung gescheitert.

3.3 Vergleich der Verfahren

Der Vergleich der Laser-Schweißverfahren zur Reparatur von Verdichterschaufeln ist unvollständig, ohne eine Gegenüberstellung realisierter Schweißergebnisse. Da mit der Einführung der Laserverfahren ein Techno-

logiesprung vollzogen wird, werden zum Vergleich Schweißungen des bisher überwiegend eingesetzten WPL-Verfahrens in der Betrachtung berücksichtigt.

Die dargestellten Auftragschweißungen unterstreichen, dass es mit den Verfahren WPL-Schweißen, Laser-Pulver-Auftragschweißen und Laser-Pulver-Auftragschweißen in Kokille möglich ist, Verdichterschaufeln instand zu setzen, *Bild 4*. Aufgrund der geometrischen Schaufeldimensionen gehören die präsentierten Ergebnisse zu den am schwierigsten durchzuführenden Arbeiten in diesem Bereich. Die Ausprägung der Auftragschweißungen entspricht den an die Verfahren geknüpften Erwartungen. Die Nahtbreite der WPL- und LPA geschweißten Schaufeln ist vergleichbar. Deutlich schmaler und nahezu der Kontur der Schaufel entsprechend präsentiert sich die LPAiK geschweißte Schaufel.

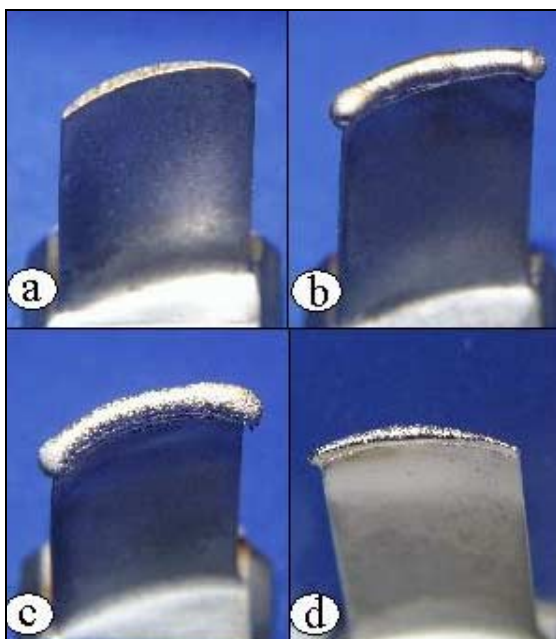


Bild 4. Verdichterschaufeln, Werkstoff Nimonin 90 in unterschiedlichen Zuständen
a) Abgenutzt b) WPL-Geschweisst
c) LPA-Geschweisst, d) LPAiK-Geschweisst

c) LPAiK

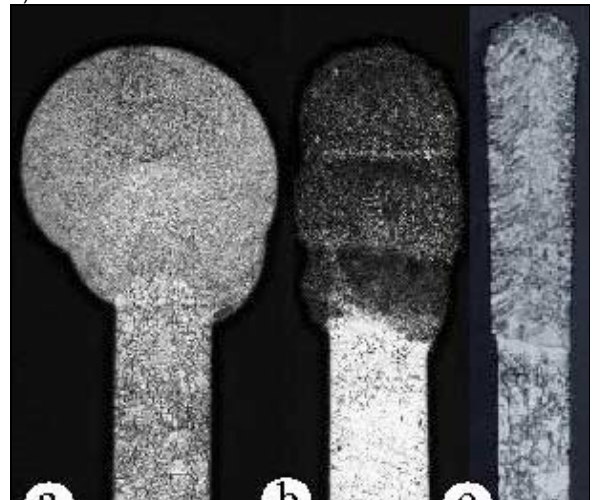


Bild 5. Metallographie zu den in Bild 4 gezeigten Verdichterschaufeln a) WPL b) LPA

Dieser Zustand bildet sich auch in den Schliffbildern ab, *Bild 5*. Die gezeigten Schliffe sind repräsentative Schnitte aus dem mittleren Bereich der aufgeschweißten Schaufeln. Die äußere Form der Aufschweißungen bzw. die Gefügeübergänge lassen die Anzahl der je Schaufel aufgetragenen Schweißlagen erkennen. Danach sind auf der WPL-Geschweißten Schaufel zwei Lagen, der LPA-Geschweißten Schaufel drei Lagen und der LPAiK-Geschweißten Schaufel eine Lage aufgetragen, um die erforderliche Verlängerung der Verdichterschaufeln sicher zu stellen. Der Zustand des durch die drei unterschiedlichen Verfahren aufgetragenen Materials ist ansonsten vergleichbar. Alle Schweißungen sind

durch eine kerbfreie Anbindung zum Grundwerkstoff gekennzeichnet. Der Anteil an inneren Schweißfehlern ist gering. Bedingt durch die schnelle Schweissgeschwindigkeit und der damit verbundenen schnellen Schweissnahtstarrung sind in den Laser-geschweissten Schaufeln vereinzelt Poren vorhanden. Diese sind weit unterhalb der zulässigen Grenzwert einzuordnen und daher nicht kritisch.

In den Ergebnissen der Microhärteprüfung spiegeln sich ebenfalls die Einflüsse der unterschiedlichen Schweissverfahren wieder, *Bild 6*. Ausgehend von der relativ hohen Härte der durch schmiedeten kaltverfestigten Schaufeln ist über die Wärmeeinflusszone zum Schweißbereich bei allen drei angewendeten Verfahren ein deutlicher Härteabfall fest zu stellen. Die dafür verantwortliche Grobkornbildung infolge von Rekristallisation ist bei den mit dem WPL-Verfahren geschweissten Schaufeln besonders ausgeprägt. Erwartungsgemäss ist der Bereich des Übergangs zwischen Grundwerkstoff und Schweißbereich wegen der kurzen Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Werkstoff bei den Lasergeschweissten Schaufeln kleiner. Ein Einfluss der Kokillen auf die Ausprägung des Gefügeübergangs ist nicht nachweisbar.

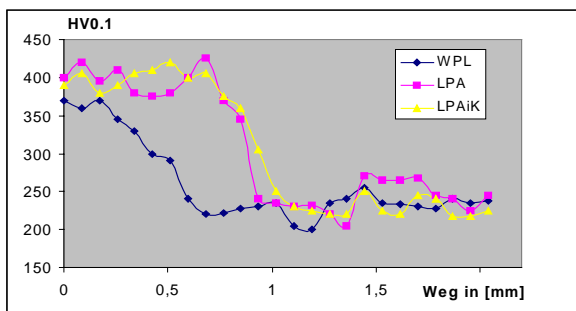


Bild 7. Härteverlauf über die in Bild 1 gezeigten Verdichterschaukeln

Obgleich eine Entfestigung in allen Fällen der durchgeführten Auftragschweißungen festzustellen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Schaufeln ordnungsgemäss instandgesetzt sind. Diese These stützt sich auf Untersuchungen die bezüglich der Biege-Wechsel-Festigkeit reparaturgeschweisster Verdichterschaukeln bereits vorliegen. Demnach stellt die aufzuschweisende Tipkontur keinen spannungskritischen Bereich dar. Die Richtigkeit die-

ser Behauptung und der eingangs formulierten These wird durch mehrer Biege-Wechsel- Versuche an aufgeschweissten Schaufeln bzw. durch mehrjährige Triebwerkserfahrung bestätigt.

*
*
*
*
*

4 Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse unterstreichen, welches Potential in der Anwendung des Auftragschweißens mit Laser im Hinblick auf die Verdichterschaukel-Instandsetzung vorhanden ist. Mit der Darstellung der Untersuchungsergebnisse zum freien Laser-Pulver-Auftragschweissen wird eine bekannte Methode im Kontext mit der Verdichterschaukelreparatur angewendet. Die Vorstellung der Technologie des Laser-Pulver-Auftragschweißens in Kokille repräsentiert die logische Weiterentwicklung des konventionellen Verfahrens. Der am Ende angestellte Vergleich zwischen den Verfahren unter Einbeziehung der üblicherweise angewendeten Lichtbogenschweißverfahren zur Verdichterschaukelreparatur, zeigt die Überlegenheit der Methode des Laser-Pulver-Auftragschweißens in Kokille. Zugleich wird auch deutlich das die technologische Komplexität ein hohes Mass an Wissen voraussetzt um den Prozess steuerbar zu machen.

5 Literatur

/1/ Haferkamp; E., Gerken; J.: Verschlossene Bauteilstirnflächen durch konturnahes Auftragschweissen mit Laserstrahl instandsetzen; Der Praktiker 7/94, S. 346-351

/2/ Lang, A.: Laserstrahlspritzen von Schneidbelägen, Universität Erlangen-Nürnberg – Dissertation, Erlangen 1995

Laser-Pulver-Auftragschweissen in Kokille (LPAiK)[®] ist ein eingetragenes Markenzeichen der MTU-München