Institut für Füge- und Schweißtechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Dilger
Institutsleiter

Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik
Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen
Institutsleiter

AiF-Forschungsvorhaben-Nr. 16.517 N | DVS-Nr. 06.071
Statusbericht zur FA 6-Sitzung am 21.03.2012

Themenlaufzeit: **01.06.2010 - 31.05.2012**
Berichtsdatum: **08.03.2012**

1 Forschungsthema

Einsatz der Mehrfokustechnik beim Laser- und Elektronenstrahlschweißen zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik am Beispiel ausscheidungshärtender heißrissempfindlicher Nickelbasis-Superlegierungen (FokuWob)

2 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse

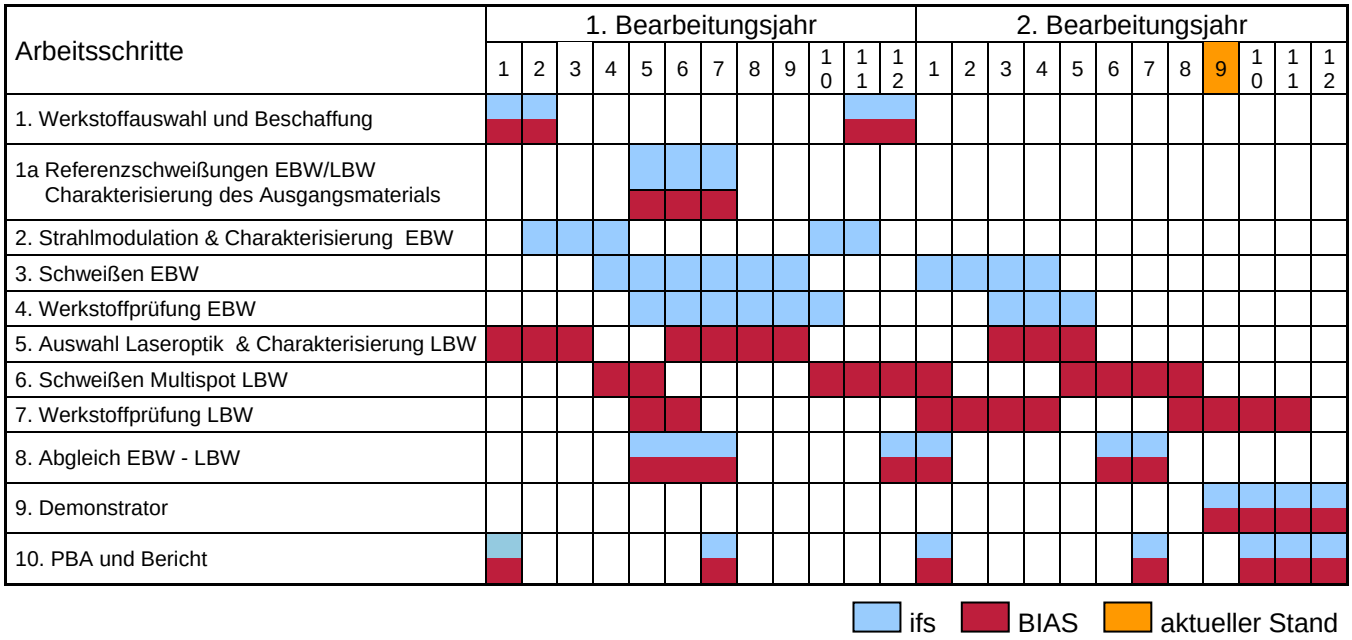
2.1 Forschungsziel

Durch den Einsatz einer Mehrfokustechnik beim Laser- und Elektronenstrahlschweißen, das heißt mehrere in Strahlausbreitungsrichtung angeordnete Fokusse im gleichen Schmelzbad, soll die Schmelzbaddynamik so beeinflusst werden, dass ausscheidungshärtende Nickelbasis-Superlegierungen prozesssicher gefügt werden können. An diesen Werkstoffen soll nachgewiesen werden, dass die Rissempfindlichkeit mit Hilfe dieser modernen Technologie verringert wird. Durch Wahl einer geeigneten Schmelzbadmorphologie sollen die vor allem in z-Richtung starken thermischen Gradienten minimiert werden, da hierdurch die auftretenden kritischen Dehnungen bzw. Dehngeschwindigkeiten in der Umgebung der Erstarrungsfront vermieden werden können.

2.2 Lösungsweg

Zum Erreichen des Forschungsziels sind die in Tabelle 1 aufgeführten Arbeitsschwerpunkte geplant. In Absprache mit dem PBA wurden das Arbeitsprogramm und der dazugehörige Zeitplan der Bearbeitung geändert und erweitert. Im Rahmen eines zusätzlichen Arbeitspaketes 1a wurden fünf weitere Nickelbasis-Superlegierungen ausführlich auf ihr Heißrissverhalten untersucht, um daraufhin einen geeigneten Werkstoffs für die Untersuchung der Mehrfokustechnik auszuwählen.

Tabelle 1: Arbeitsplan



2.3 Ergebnisse

Elektronenstrahlschweißen

Die ersten positiven Erkenntnisse der Nutzung der Mehrfokustechnik beim Elektronenstrahlschweißen heißrissempfindlicher Nickelbasislegierungen am Versuchsmaterial alloy 602 CA wurden bereits auf der letzten Fachausschuss-Sitzung vorgestellt. Hierbei konnte deutlich gezeigt werden, dass es nicht zielführend ist, mit den anlagentechnisch möglichen Fokushüben bis 200 mm zu arbeiten. Dies hat eine kontraproduktive Wirkung auf das Rissverhalten zur Folge. Durch die stärkere Defokussierung wird der Werkstoff einer höheren Wärmebelastung ausgesetzt, die dazu führt, dass mehr Material aufgeschmolzen wird und die Nahtbreite ansteigt. Die Folge sind höhere eingebrachte Spannungen im Werkstoff, die dieser nicht ertragen kann. Dadurch kommt es zur spannungsbedingten Heißrissbildung. Die Heißrisse liegen als Erstarrungsrisse in Form von Querrissen in der Schweißnaht vor. Demgegenüber ist es als zielführend anzusehen, mit kleinen Fokushüben zu arbeiten. In den Versuchen, in denen erste Verbesserungen bei der schweißtechnischen Verarbeitung zu erkennen sind, wurde der Fokushub auf 10 mm festgelegt. Weiterhin zeigte sich, dass die Frequenz, mit der der Fokushub realisiert wird, in einem relativ geringen Bereich um 500 Hz liegen sollte. Diese Parametereinstellung wurde in den anschließenden Versuchen statistisch abgesichert.

Im weiteren Verlauf erfolgten EB-Versuche als Durchschweißung, um eindringlich die Wobbelfrequenz in einem Bereich von 100 bis 1000 Hz bei einem Fokushub von 10 mm zu untersuchen. Es zeigte sich, dass in diesem Bereich die Frequenz keinen entscheidenden Einfluss auf die Heißrissbildung ausübt. Die Schweißnähte weisen durchweg ein positives Rissverhalten auf. Ähnlich den optimierten Einstellungen zeigen auch diese Nähte in Quer- und Längsschliffe nur wenige Heißrisse.

In einem nächsten Schritt wurden weitere Versuche als Einschweißungen in 16 mm dickem Material (alloy 602 CA) vorgenommen. Die untersuchten Parameter wurden analog des zuvor beschriebenen Arbeitspakets gewählt. Demzufolge wurde die Frequenz variiert, der Fokushub von 10 mm wurde beibehalten. Alle weiteren Parameter blieben unverändert. Durch die verschärften Spannungsbedingungen im Vergleich zu einer Durchschweißung treten erheblich mehr Risse auf. Diese Risse liegen wiederum als Erstarrungsrisse quer zur Naht vor. Zusätzlich dazu treten über die gesamte Naht Defekte im Bereich der Wurzel auf, sog. Spiking-Poren, die typisch für Einschweißungen mit fokussiertem EB-Strahl sind. Mit einer Pendelung kann dem entgegengewirkt werden, jedoch wird dadurch mehr Wärme ins Material eingetragen, was zu einer erhöhten Heißrissbildung führt. Weitere untersuchte Strahlfiguren (Rechteck, Kreis) der Mehrfokustechnik zeigten ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der erhöhten Rissproblematik.

In einem nächsten Arbeitspaket erfolgte die Erprobung einer weiteren anlagentechnischen Möglichkeit, die sich als absolut zielführend herausgestellt hat. Durch die Überlagerung einer Strahlpendelung in Form eines Rechtecks im Zusammenspiel mit einer dynamischen Fokusänderung konnten bemerkenswerte Veränderungen beobachtet werden. Zum einen wird weniger Material aufgeschmolzen und die Nahtbreite wird kleiner. Zum anderen werden die Erstarrungsbedingungen positiv beeinflusst, so dass die Körner im Schweißgut sich sehr klein ausbilden, was als äußerst zielführend zu bewerten ist, Abbildung 1 links. Eine merkliche Kornfeinung im Schweißgut konnte dadurch eingestellt werden, die dazu führt, dass kaum bzw. keine Risse mehr auftreten. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass diese Parametereinstellung zu einem deutlich kleineren Dendritenarmstand führt, Abbildung 1 rechts. Der Dendritenarmabstand korreliert mit der Erstarrungsgeschwindigkeit und belegt die veränderten Erstarrungsbedingungen durch Nutzung der Mehrfokustechnik.

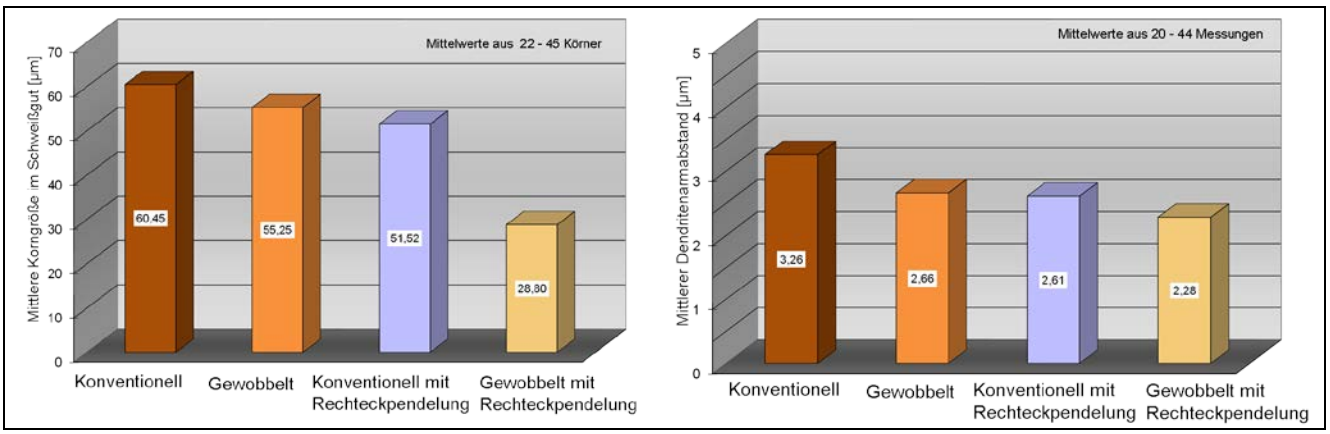


Abbildung 1: Vergleich der Korngröße und Dendritenarmabstand im Schweißgut verschiedener Parameter

Laserstrahlschweißen

Es wurden mehrere Lösungsansätze mit Strahlmodulation verfolgt. Zum einen erfolgte die Erprobung eines Prototyps, mit dem der Fokus hochdynamisch verändert wird. Die Einschweißtiefe fällt durch den Einsatz dieses Geräts deutlich ab und die Nähte werden gegenüber der Referenzschweißung ohne Reflektor deutlich breiter. Als Ursache dieses ungünstigen Schweißverhaltens wurden erhebliche Abbildungsfehler des Laserstrahls identifiziert. Die Schweißnähte weisen ein gesteigertes Rissverhalten auf. Die Risse liegen als Erstarrungsrisse in Form von Querrissen vor. Darüber hinaus konnten vermehrt Mittenlängsrisse beobachtet werden. Aufgrund der Tatsache, dass das Wobbeln zu einer Zunahme der Querrisse und dem zusätzlichen Aufkommen von Mittenlängsrissen führt, ist die Methode des dynamischen Fokus beim Laserstrahlschweißen zumindest mit dem eingesetzten Prototyp-Scanner als nicht zielführend im Sinne der Arbeitshypothese zu bewerten.

Eine weitere Strahlmodulation wurde über einen Doppelteilerspiegel realisiert, so dass praktisch zwei Fokusse in einem Schmelzbad untereinander angeordnet sind. Die Nutzung dieses Spiegels ging mit Verlusten der Strahlqualität einher, wodurch ca. 1,5 mm Einschweißtiefe verloren ging. Das Heißrissverhalten konnte mit Hilfe dieser Modulation nicht verbessert werden. Risse treten häufig im Nahtgrund und im unteren Bereich des Nagelkopfs bei allen Geschwindigkeiten auf. Bei geringeren Schweißgeschwindigkeiten sind zudem Poren identifiziert worden. Die Veränderung des Abstands der zwei untereinander angeordneten Fokusse sowie der Fokuslage lieferte keine signifikanten Veränderungen. Insbesondere das Rissverhalten zeigt keine Abhängigkeit von den Fokussiermöglichkeiten. Die Modulation mit statischem Multifokus mit Hilfe des Doppelteilerspiegels ist ebenso nicht geeignet im Sinne der Arbeitshypothese.

Als weitere Option der Strahlmodulation wurde ein fehlbeleuchteter Rotationsversatzspiegel genutzt. Die Strahlvermessung zeigt zwei Intensitätsmaxima, die in Schweißrichtung hintereinander angeordnet sind. Mit zunehmender Amplitude wird der Abstand der beiden Fokusse größer. Die Schweißnähte zeigen einen Verlust der Einschweißtiefe um ca. 1,5 mm im Vergleich zur monofokalen Referenz bei Verwendung des Rotationsversatzspiegels. Heißrisse treten häufig im Nahtgrund und im unteren Bereich des Nagelkopfs auf. Jedoch fällt die Heißrissigkeit deutlich geringer aus als bei den bisher angewandten Methoden und auch gegenüber Referenz! Bei Variation der Fokuslage ist das Einschweißverhalten deutlich verbessert gegenüber dem Doppelteilerspiegel. Tendenziell eignet sich diese Möglichkeit der Strahlmodulation eines statischen Multifokus am besten, um die Rissproblematik zu bekämpfen. Diese beschriebene Variante mit zwei hintereinander angeordneten Fokussen in Schweißrichtung stellt eine ähnliche Möglichkeit dar, wie die genutzte Rechteckpendelung in Schweißrichtung beim EB-Schweißen, die auch dort zu aussichtsreichen Ergebnissen hinsichtlich der Rissvermeidung geführt hat.

Darüber hinaus kam ein Faserlaser (YLR8000S) mit langer Brennweite (f = 480 mm) und kleinem Fokusdurchmesser zum Einsatz. Damit konnten sehr schlanke Nähte erzeugt werden, die eine ähnliche Geometrie wie die EB-Nähte aufweisen. Beim monofokalen Laserstrahlschweißen entstehen relativ wenige Heißrisse, ähnlich dem konventionellen EB-Schweißen. Von daher ist es geeignet, den Wärmeeintrag zu minimieren, die dadurch entstehenden Spannungen gering zu halten und schmale Nähte zu erzeugen. Mit den Erkenntnissen, dass eine Strahlmodulation in Schweißrichtung heißrissvermeidend wirkt und der Verwendung eines hochbrillanten Faserlasers, besteht für den Laser weiteres Potential bei der Optimierung der Rissproblematik.

3 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen

Viele der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse können nach Abschluss des Projektes mit geringem Aufwand von den Anwendern übernommen werden. Dies betrifft die Prozesstechnik beim Schweißen von hochtemperaturbeständigen Bauteilen wie z. B. Turbinenteile, sowie die Fertigung von multifokalen Spiegeln für die Lasertechnik. Weiterhin haben Zulieferer und Anwender anderer Branchen einen direkten Nutzen dieser Technologie. Die für den pbA vorgesehenen Firmen zeigen höchstes Interesse an den zu erwartenden Ergebnissen für die Umsetzung. Anlagenhersteller können sehr einfach die neue Technologie umsetzen. Hersteller von Strahldiagnosegeräten werden einen erweiterten Funktionsumfang mit angepassten Auswertealgorithmen auf den Markt bringen.

Die angestrebten Ergebnisse lassen sich zunächst auf alle Bereiche anwenden, bei denen kritisch zu schweißende Werkstoffe schweißtechnisch verarbeitet werden sollen. Mit den neu entwickelten Optiken für das Festkörperlaserschweißen und neuen Strahlmodulationskonzepten für das Elektronenstrahlschweißen wird den Anwendern ein Werkzeug zur Verbesserung fehlerkritischer Schweißaufgaben bereitgestellt, dass sich ohne großen Aufwand in bestehende Anlagen integrieren lässt. Die jetzt mögliche Regenerierung von Triebwerkskomponenten hilft den Herstellern kosten- und ressourcensparend zu arbeiten und eröffnet flexiblen kmU neue Märkte im Dienstleistungsbereich.

4 Transfer und Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Ein schneller Transfer der Forschungsergebnisse in den Markt sowie die Umsetzung und Anwendung dieser ist durch die im projektbegleitenden Ausschuss beteiligten Firmen gewährleistet. Ein besonderes Instrument des Kenntnistransfers sind spezielle Industrieseminare, wie sie am Institut für Füge- und Schweißtechnik und am BIAS regelmäßig stattfinden und weiter vorgesehen sind. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse in allen üblichen Formen, wie Vorträgen auf Fachtagungen und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften sowie bei Firmenberatungen veröffentlicht werden. Der Deutsche Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. bietet hierfür mit seinen Veranstaltungen eine gute Basis. Die Ergebnisse des Projekts wurden auf dem 2. EB-Kolloquium in Freiberg einem breitem Fachpublikum vorgestellt. Eine Veröffentlichung erscheint auf der 2. IEBW, die vom 26.03. – 30.03.12 in Aachen stattfindet. Beide Forschungsstellen übernehmen die Projektergebnisse in die akademische Lehre und binden auch Studien- und Diplomarbeiter in das Projekt ein, wodurch eine Multiplikation des Ergebnistransfers erreicht wird, da die Studierenden nach Abschluss des Studiums die Ergebnisse in die Industrie tragen. Die Funktionsmuster, die zur Überprüfung der Projektergebnisse zum Ende des Projekts gefertigt werden, werden in den Forschungsstellen ausgestellt und dienen zur Erläuterung der Technologie für Studierende und Industriekontakte.

Die fünfte und abschließende Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses findet am 31.05.2012 beim pbA-Mitglied Manufacturing Engineering & Technologies Rolls-Royce Deutschland in Oberursel statt.

Tabelle 2: Projektbegleitender Ausschuss

Mitglieder	**Firma (kursiv = KMU)**	**PBA-Sitzungen**			
		21.09.10 BIAS	16.02.11 IFS	11.10.11 BIAS	23.02.12 IFS
Dr.-Ing. V. Pavlyk Dr.-Ing. I. Aretov	Eisenbau Krämer GmbH, Kreuztal	X -	- X	X -	X -
Dipl.-Ing. A. G. Arlt	*ILV Ingenieurbüro für Lasertechnik und Verschleißschutz, Schwalbach am Ts.*	X	X	X	X
Dr. K.-H. Richter	MTU Aero Engines GmbH, München	-	X	X	-
Dr. O. Märten	*Primes GmbH & Märten Opto Consulting MOC, Pfungstadt*	X	-	-	-
Dr.-Ing. T. Krüssel *Dipl.-Ing. G. Fischer* *Dipl.-Ing. A. Richter*	*pro-beam technologies GmbH, Burg*	X X -	X X -	- - -	- - X
Dr. K.-R. Schulze *Dipl.-Ing. K. Leeb*	*PTR Präzisionstechnik GmbH, Maintal/Dörningheim* *SST Steigerwald Strahltechnik GmbH*	X -	- X	- X	- -
Dipl.-Ing. T. Melzer-J. Dipl.-Ing. N. Arjakine	Siemens AG Energy, Sector Fossil Power Generation Division	X -	- X	- X	- X
Dr.-Ing. T. Harrer	TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH	X	X	-	-
Dr.-Ing. M. Wolf	ThyssenKrupp VDM GmbH	-	-	-	X
Dipl.-Ing. T. Gilles Dr.-Ing. S. Longerich	Manufacturing Engineering & Technologies Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG	- -	- -	- X	- X
Dr.-Ing. T. Krüssel	*Krüssel Engineering*	-	-	-	X

5 Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1:
Technische Universität Braunschweig
Institut für Füge- und Schweißtechnik
Langer Kamp 8
38106 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 - 391 7820
Fax: +49 (0)531 - 391 5834
Email: ifs-bs@tu-bs.de
Leiter der FS: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Dilger
Projektleiter: Dr.-Ing. H. Pries
Projektbearbeiter: Dipl.-Wirtsch.-Ing. C. Börner

Forschungsstelle 2:
BIAS
Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik
Klagenfurter Str. 2 D
28359 Bremen
Tel.: +49 (0)421 - 218 580 00
Fax: +49 (0)421 - 218 580 63
E-Mail: info@bias.de
Leiter der FS: Prof. Dr.-Ing. F. Vollertsen
Projektleiter: Dr.-Ing. T. Seefeld
Projektbearbeiter: Dr.-Ing. S. Neumann