

# **Grundlagen- und Anwendungsuntersuchungen verschiedener Laserstrahlschweißverfahren mit diodengepumpten Festkörperlasern**

Grupp, M.; Grube, R.; Kohn, H.

BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik

Klagenfurter Strasse 2

28359 Bremen

## **1. Zusammenfassung**

Am Bremer Institut für angewandte Strahltechnik BIAS wurde ein diodengepumpter Festkörperlaser mit einer Ausgangsleistung bis 4,4 kW für verschiedene Schweißverfahren und Anwendungen eingesetzt. Die Schwerpunkte lagen hierbei bei den Hybridverfahren Laser-Plasma und Laser-MIG, der Doppelfokustechnik und dem Multispotschweißen. Bei diesen Verfahren konnten die Vorteile der hohen Strahlqualität diodengepumpter Systeme herausgearbeitet und umgesetzt werden. Durch die langen Brennweiten von  $f=200$  mm können vor allem für die Hybrid- und Multispotverfahren Vorteile für die Zugänglichkeit der Bearbeitungsstellen und die Gestaltung der Bearbeitungsköpfe erzielt werden.

## **2. Zielsetzung**

Ziel dieses Vorhabens war die Erprobung von diodengepumpten Festkörperlasern mit hohen Ausgangsleistungen und Strahlqualitäten im Automobil- und Schienenfahrzeugbau an relevanten Stoßgeometrien, sowie die Untersuchung verschiedener Schweißtechniken wie das Vielpunkt-, Doppelfokus- und Hybridschweißen zur Erweiterung der Einsatzgebiete dieser neuen Strahlquellen. Im Schienenfahrzeugbau werden für moderne Fahrzeuge wie z.B. den ICE 3 Strangpressprofile aus Aluminiumlegierungen zum Bau des Wagenkastens verwendet. Diese werden mit einem MIG-Verfahren miteinander verbunden. Aufgrund der dabei verwendeten hohen Streckenenergien ergeben sich starke

Verzüge, die die Weiterverarbeitung dieser Profile erschweren. Daher wurden in einem früheren Vorhaben Versuche zum Laserstrahlschweißen durchgeführt und das Potenzial dieses wärmearmen Verfahrens aufgezeigt. Nachteil dieser Untersuchungen war der Einsatz eines CO<sub>2</sub>-Lasers, der für das Schweißen der langen Profile im Schienenfahrzeugbau aufgrund seiner starren Strahlführung über Spiegeloptiken nur eingeschränkt für eine Produktionsanlage in Frage kommt. Daher wurde in diesem Vorhaben der Einsatz neuester Festkörperlaser erprobt werden, die aufgrund ihrer Leistung und Strahlqualität grundsätzlich für das Fügen von Aluminiumstrangpresslegierungen geeignet schienen. Aufgrund der Möglichkeit des Einsatzes von flexiblen Fasern als Strahlführung erscheint damit eine Produktionsanlage mit überschaubarem Investitionsaufwand möglich.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Optimierung der Vielpunkt-Laserstrahlschweißtechnik, was als eine Art Ersatz bzw. Übertragung des Widerstandspunktschweißens auf den Werkstoff Aluminium und das Werkzeug Laser angesehen werden kann. Einige Nachteile des Widerstandspunktschweißens, z.B. geringe Flexibilität, geringe Verbindungsfestigkeit, hoher Wärmeeintrag, erforderliche zweiseitige Zugänglichkeit konnten dabei an Stahl in Vorversuchen durch Einsatz des Vielpunkt- (Multispot-) Laserstrahlschweißens mit konventionellen Festkörperlaser ausgeräumt werden.

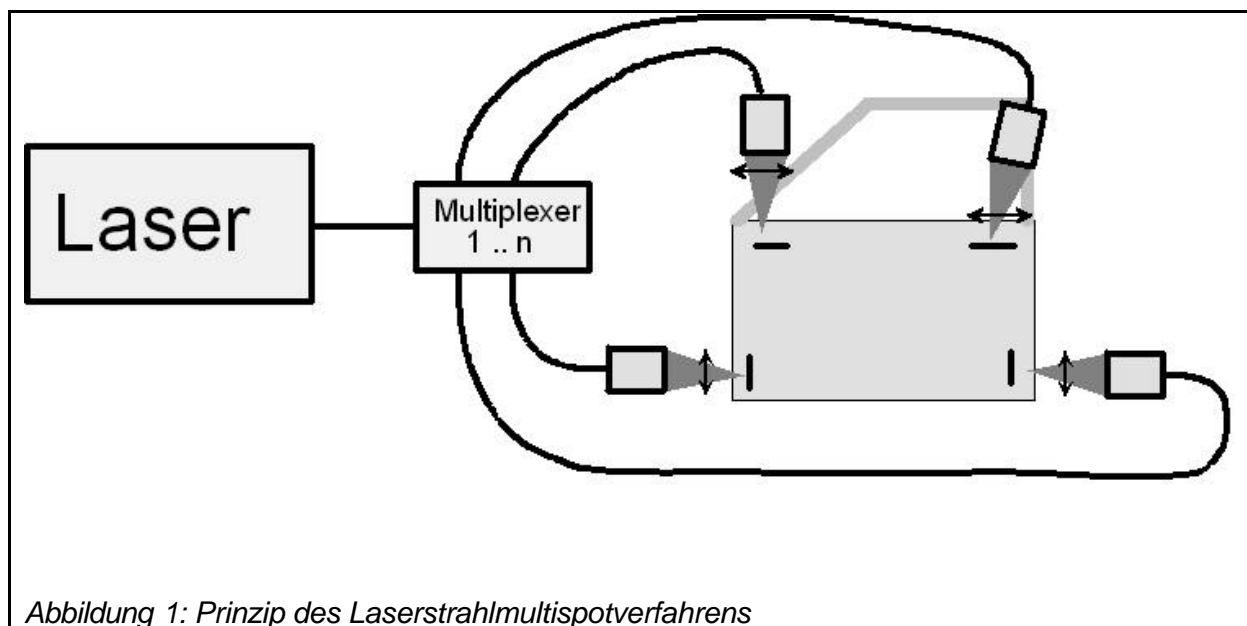
Durch das Vielpunkt-Laserstrahlschweißen mit Lasersystemen der neuesten Generation, zu denen die diodengepumpte Festkörperlaser gezählt werden, wird erwartet, daß aufgrund der deutlich höheren Strahlqualität die Fügetechnik Laserstrahlschweißen in neue Anwendungen in der Serienproduktion umgesetzt werden kann. Neben den technologischen ergeben sich auch wirtschaftliche Vorteile durch geringere Betriebskosten bei gleichzeitig höherer Prozesseffizienz.

In diesem Vorhaben wurden die Möglichkeiten, die dieser neue Lasertyp aufgrund seiner hohen Strahlqualität bietet, näher untersucht. Hierzu zählen auf der einen Seite größere Brennweiten und der Einsatz der Doppelfokustechnik, die bisher aufgrund zu geringer Intensitäten im Fokus nicht sinnvoll eingesetzt werden konnten. Beim Einsatz kürzerer Brennweiten können auf der anderen Seite höhere Schweißgeschwindigkeiten erzielt werden, die auf ihre Auswirkungen auf den Schweißprozess hin untersucht werden sollten.

### 3. Schweißtechnische Untersuchungen verschiedener Laserstrahlverfahren

#### 3.1 Multispot

Durch das Laserstrahlmultispotverfahren sollen die Verfahren des Widerstandspunktschweißens bzw. die mechanischen Fügeverfahren wie das Stanzen durch die Laserstrahlschweißtechnik ersetzt werden. Nachteilig beim Laserstrahlschweißen von kurzen und über das Bauteil verteilten Schweißnähten sind die hohen Nebenzeiten, die durch das Positionieren des Roboters entstehen. In diesen Zeiten wird das investitionsintensivste Werkzeug Laser nicht genutzt, so dass die Einschaltzeiten oftmals deutlich unter 50% liegen. Wird für jede Bearbeitungsstelle ein Bearbeitungskopf in die Spanntechnik integriert, so kann durch schnelles sequentielles Umschalten zwischen den Köpfen die Lasernutzung deutlich erhöht und gleichzeitig die Taktzeit reduziert werden.



Am BIAS wurde eine von Rofin Sinar und Optoskand (ehem. Permanova) entwickelte Multispotbearbeitungsoptik erprobt und in einen Multispotdemonstrator mit pneumatischem Spannhebel integriert. Die Optik verfügt über eine Linearachse, die Schweißnahtlängen bis zu 100 mm ermöglicht. In die Optik ist eine Steuerungslogik zur Verarbeitung von Ein- und Ausgangssignalen für Prozessstart und -ende integriert. Im Demonstrator werden diese Signale zusammen mit Endlagensignalen des Spannhebels und den Schaltsignalen des Lasers in einer übergeordneten

Steuereinheit verknüpft. Für die im Projekt eingesetzte Laserleistungsklasse bis 4,4 kW wurden die Optiken auf Basis von 2-Zoll Linsen aufgebaut. Für geringere Laserleistungen kann durch Verwendung von 1-Zoll-Linsen Gewicht und Störkontur der Optiken deutlich reduziert werden.

Die Bearbeitungsoptik wurde am BIAS weiterhin mit einer Schutzglaskassette und einer Zufuhr von Schutzgas und Zusatzmaterial ausgestattet. Durch die Verwendung von Standardbauteilen für die Fokussierung und Kollimierung des Laserstrahls können identische Abbildungen wie in herkömmlichen Laserschweißsystemen realisiert und somit zuvor erarbeitete Prozessparameter übernommen werden. Die Schweißuntersuchungen erstreckten sich in erster Linie auf das Erarbeiten von Prozessfenstern für das Schweißen von Aluminium ohne Zusatzdraht, da eine zusätzliche Integration einer Drahtfördereinheit pro Bearbeitungsstelle die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verschlechtern würde. In der Demonstrationsanwendung wurde das Multiplexing des Strahls über die laserinterne 6-Wege-Strahlweiche realisiert. Eine weitere Erhöhung der Anzahl der Bearbeitungsstellen würde eine externe Lösung mit Faser-Faser-Koppelung erfordern.

In den Untersuchungen konnten verschiedene Schwachstellen der eingesetzten Systemtechnik aufgedeckt und verbessert werden. Ein noch nicht behobenes Problem ist die zu geringe Dynamik der eingesetzten Multispotbearbeitungsköpfe, die die Leistungsfähigkeit des Lasergerätes nicht ausschöpft.

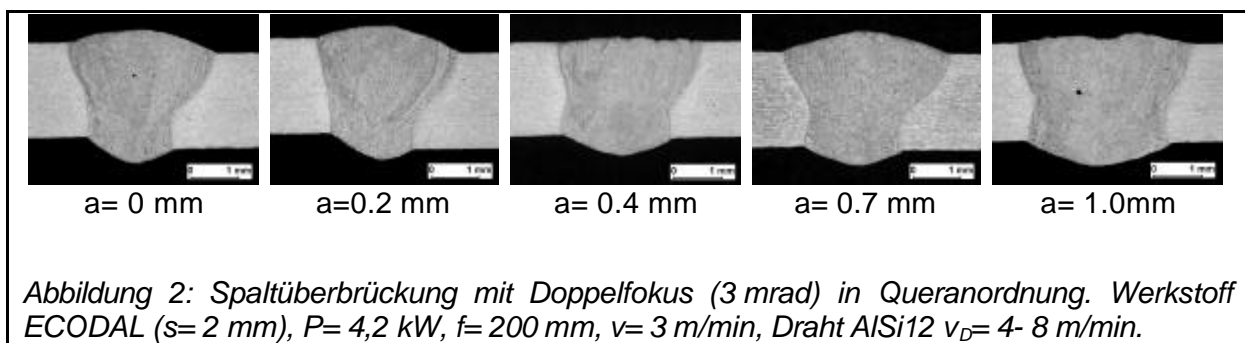
Die Untersuchungen zum Multispotschweißen im Verbundprojekt wurden in enger Zusammenarbeit zwischen der AUDI AG, Rofin Sinar und dem BIAS durchgeführt. Erarbeitete Erkenntnisse und aufgedeckte Mängel flossen in die Systementwicklung zurück und konnten dort Verbesserungen bewirken.

### **3.2 Doppelfokusschweißuntersuchungen**

Die Schweißuntersuchungen mit Doppelfokus wurden zunächst mit einer Optik mit variablem Fokusabstand durchgeführt. Aus den Ergebnissen konnte daraus ein optimierter Fokusabstand ermittelt und dieser auf Strahlteileroptiken mit definierter Leistungsaufteilung und Fokusabstand der Firma Rofin Sinar übertragen werden. Bei Brennweiten von  $f=200$  mm bildete sich eine sehr gleichmäßige Oberraupenschuppung aus und die Porenanzahl konnte stark reduziert werden.

Durch den Einsatz von Doppelfokustechniken lässt sich die Nahtqualität auf Kosten der Einschweißtiefe deutlich verbessern. Hier wurden gute Ergebnisse bei Fokusabständen von ungefähr dem 1,5-fachen Fokusdurchmesser erzielt. Kleinere Abstände führten zu keiner wesentlichen Qualitätsverbesserung und größere Abstände reduzierten die Einschweißtiefe zu sehr. Bei kürzeren Brennweiten und den daraus resultierenden geringeren Fokusabmessungen konnten nur geringfügige Verbesserungen der Schweißnahtqualität erzielt werden.

Durch die Doppelfokustechnik wird die Schweißnaht verbreitert, woraus sich Vorteile für das Schweißen von I-Stößen ergeben. Hierbei können größere Spalte überbrückt werden. Die Anordnung der Foki in oder quer zur Schweißrichtung hat kaum Einfluss auf die Nahtqualität, jedoch auf den Querschnitt der Naht. Durch die Queranordnung können flachere und breitere Nähte erzeugt werden, was zu einer besseren Spaltüberbrückbarkeit oder der Vergrößerung der Anbindungsbreite bei Überlappverbindungen führt.



### 3.3 Laser-MIG-Hybridschweißen

Unter dem Laser-Hybrid-Schweißen versteht man die Zusammenführung des Laserstrahlschweißens mit dem Lichtbogenschweißen. Das Laserstrahlschweißen zeichnet sich durch eine hohe Schweißgeschwindigkeit und Einschweißtiefe aus, erlaubt aufgrund des kleinen Fokusdurchmessers aber nur einen geringen Spalt im Nahtstoß. Genau umgekehrt ist es beim Lichtbogenschweißen. Dieser Prozess zeichnet sich durch eine sehr gute Spaltüberbrückbarkeit aus, kann aber nur bei einer gegenüber dem Laserschweißen sehr geringen Schweißgeschwindigkeit genutzt werden. Durch die Zusammenführung beider Technologien ergeben sich neue Möglichkeiten.

Entscheidender Faktor für den Einsatz des Hybridschweißprozesses ist die Wechselwirkung der Einzelprozesse. Das Laserstrahlschweißen hat als charakteristisches Kennzeichen den Tiefschweißeffekt, bei dem durch die konzentrierte Energieeinbringung Metall verdampft und sich schließlich ein Metaldampfplasma bildet, dessen Druck eine Dampfkapillare (Keyhole) im Werkstück erzeugt. Dieses Plasma hat gleichzeitig Einfluss auf den Lichtbogenprozess, denn der kontinuierlich erzeugte Metaldampf des Lasers hat einen höheren Ionisierungsgrad als das Prozessgas Argon. Dadurch wird die Leitfähigkeit des Plasmas erhöht und der Lichtbogen hat eine leichtere Zündfähigkeit bei gleichzeitiger Stabilisierung des Lichtbogens.

### **3.3.1 Weiterentwickelter Hybridkopf**

Im Rahmen des Projektes ist ein im BIAS vorhandener Laser-MIG-Hybridkopf weiterentwickelt worden (Abbildung 2). Als wesentliche Verbesserung ist die Verstellmöglichkeit des MIG-Brenners über drei lineare Verstelleinheiten anzusehen, die es ermöglichen, den Brenner in x-, y- und z-Richtung zu verstellen und somit auf den Laserprozess einzustellen. Ein weiterer Vorteil ist die Integration des Cross-Jets auf der Grundplatte des Hybridkopfes, sowie die Schutzglasschublade, die ebenfalls auf der Grundplatte mit integriert worden ist und nach oben eine hermetische Abdichtung zur Bearbeitungsoptik besitzt. Ein weiterer Vorteil liegt in dem modularen Aufbau des Hybridkopfes, in dem auf einer Grundplatte die schon erwähnten Schutzeinrichtungen wie Schutzglashalter und Cross-Jet sowie Brennerhalter mit Verstelleinheit und die Optik mit Abdichtung zum Schutzglas integriert ist. Durch diesen Aufbau ist es möglich den Bearbeitungskopf für den reinen Laserprozeß, als auch nur für den Lichtbogenprozeß einzusetzen.

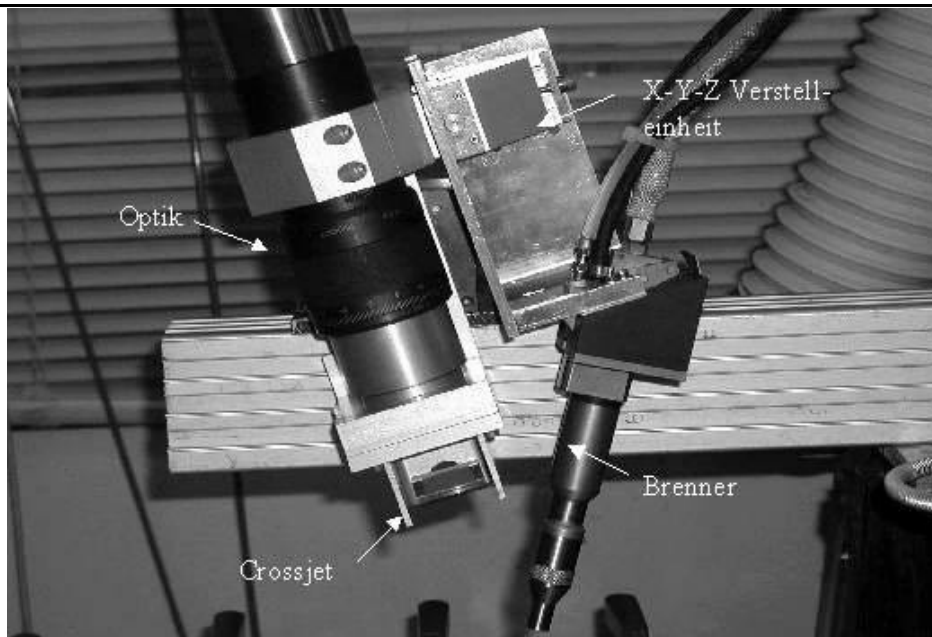


Abbildung 2: Weiterentwickelter Laser-MIG-Hybridkopf

### 3.3.2 Schweißergebnisse

Ziel dieser Arbeit war es, Schweißparameter für das Hybridschweißen zu ermitteln, welche das Schweißen von 3 und 4 mm dicken Aluminium-Blechen (AA 6082) in Überlappverbindung und I-Stoß (Abbildung 3) ermöglichen. Zusätzlich sollten diese Parameter auf verschiedene, durch den Lichtbogenprozess eingebrachte Zusatzwerkstoffe ausgedehnt werden.

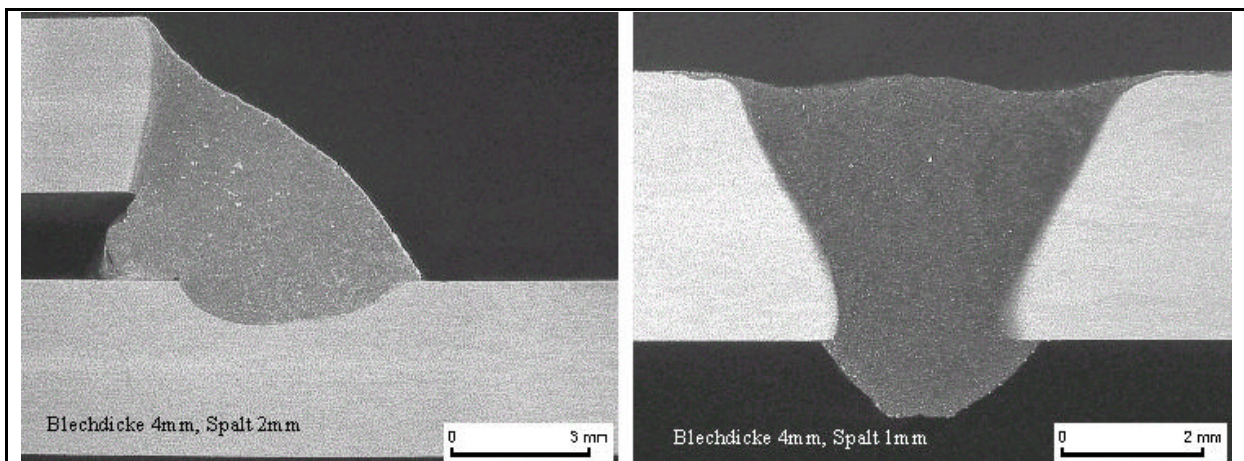


Abbildung 3: Überlapp- und I-Stoß Verbindung

Die Bewertung der Schweißergebnisse wurde mittels einer Sichtprüfung und metallografischen Schliffen im BIAS durchgeführt. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften wurden bei Bombardier Transportation untersucht.

## 4. Ausblick

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse stellen Grundlagen und ausgewählte Anwendungen für die beschriebenen Verfahren dar. Der Einsatz der Doppelfokustechnik zur Prozessstabilisierung wird in vielen Fällen schon in Industrieanwendungen mit hohen Ansprüchen an die Schweißnahtqualität, z.B. bei Dichtnähten, umgesetzt. Das Multispotverfahren wird bisher nur in einzelnen Anwendungen eingesetzt. Das liegt in erster Linie an den Kosten für die Systemkomponenten, die sich pro Bearbeitungsstelle ergeben. Trotz des hohen zeitlichen Einsparpotentials, das für die Einhaltung vorgegebener Taktzeiten von Bedeutung ist, ist eine wirtschaftliche Umsetzung des Verfahrens nur gegeben, wenn die anteiligen Kosten pro Bearbeitungsstelle und somit die Kosten pro Nahtlänge gesenkt werden können.

Bisherige Untersuchungen zum Hybridschweißen haben gezeigt, dass durch die Kopplung der Verfahren Synergieeffekte erzielt werden können, bei denen die Schweißmöglichkeit, Schweißignung und Schweißsicherheit für viele Werkstoffe und Konstruktionen erhöht werden können. Dies konnte insbesondere auch für Aluminiumlegierungen gezeigt werden. Die wissenschaftliche Untersuchung der Synergieeffekte muss noch vertieft werden, um gezielter auf praktische Anwendungen beim Hybridschweißen eingehen zu können. Ferner sollten Anlagen- und Hybridkopfkonzeppte für die 3D-Bearbeitung entwickelt werden, damit auch komplexere Geometrien sicher bearbeitet werden können.

Für bestimmte Anwendungen, wie dem Schienenfahrzeugbau, stellt das Laser-MIG-Hybridverfahren schon heute eine interessante Variante zum Schweißen von Aluminiumlegierungen dar.

## 5. Anhang

Veröffentlichungen:

M. Grupp, T. Seefeld, G. Sepold: *Laser Beam Welding of Aluminum Alloys with Diode Pumped Nd:YAG Lasers*. In: Proc. of 20<sup>th</sup> International Conference on Applications of Laser and Electro-optics 2001 (ICALEO), October 15-18, 2001, Jacksonville, FL.