

# PaLas

Entwicklung eines mehrdimensionalen  
Laserhybridschweißsystems zur Steigerung der Effizienz und  
Qualität der Arbeiten im  
Paneellinienbereich des Schiffbaus

## **Teilprojekt:**

Untersuchungen zur Anpassung des Verfahrens an die  
besonderen Bedingungen des schiffbaulichen  
Fertigungsprozesses

Autoren des Berichtes: Thomas Witolla, Guido Pethan, Frank Boekhoff

Papenburg, September 2008



- Öffentliche Version -

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SX205D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## 1. Einleitung

Im Rahmen des nationalen Forschungsprojektes „PaLas“ werden Anwendungsmöglichkeiten für ein robotergeführtes Laser-MSG-Hybridschweißsystem unter den rauen Bedingungen des Schiffbaus erschlossen.

Die Bearbeitung der schiffstypischen Strukturen mit einem Schweißroboter ist durch die fortschreitende Entwicklung der Festkörperlaser im Hochleistungsbereich und der kompakter werdenden funktionalen Schweißköpfe möglich geworden. Hinzu kommt, dass dank aktueller Nahtverfolgungsmethoden und Offline- Programmiersystemen auch in der Bearbeitung von dreidimensionalen Strukturen Nutzungsmöglichkeiten gegeben sind. Dies konnte im Projekt in praktischen Untersuchungen nachgewiesen werden.

Das gemeinsam mit dem ISF der RWTH Aachen als Verbundprojekt durchgeführte Vorhaben war unterteilt in die Teilvorhaben:

- 1) Untersuchungen zum Einsatz des Laser-MSG-Hybridschweißverfahrens für Steig- und Eckennähte
- 2) Untersuchungen zur Anpassung des Verfahrens an die besonderen Bedingungen des schiffbaulichen Fertigungsprozesses

In diesem Bericht wird im Wesentlichen auf die Arbeiten des zweiten Teils eingegangen.

## 2. Beschreibung des Vorhabens

Auf der Paneellinie der MEYER WERFT wurden ca. 50% aller Schweißnähte eines Kreuzfahrtschiffes mit der Laserhybridtechnik geschweißt. Blechplatten werden mittels Stumpfnähten an Quer- und Längsschweißstationen zu einem Decksteil zusammengeschweißt und Spanten, die dieses Decksteil versteifen, werden mittels Kehlnähten mit Vollanschluss aufgeschweißt. Durch die Anwendung der Laserhybridtechnik sind die Decksteile nach dem Verlassen der Steifenaufsetzstation noch sehr eben.

An der nachfolgenden Fertigungsstation (Igfelfeld) werden die Rahmenbalken und Unterzüge mittels konventioneller Schutzgasschweißtechnik aufgeschweißt und untereinander verschweißt. Dabei treten im Bereich der konventionellen Nähte erhebliche Beulungen auf, die durch Schrumpfspannungen hervorgerufen werden.

Um diese Beulen und damit die Eigenspannungen zu verringern, sollen auch diese Nähte zukünftig mit Hilfe eines 3D-Robotersystems laser-MSG-hybridgeschweißt



werden. Dazu sollen neue Laserstrahlquellen mit alternativer Lichtübertragung (Lichtleitfasern), die wesentlich kompakter als die bisher eingesetzten CO<sub>2</sub>-Laser aufgebaut und mittlerweile auch in hohen Leistungsklassen verfügbar sind, Anwendung finden.

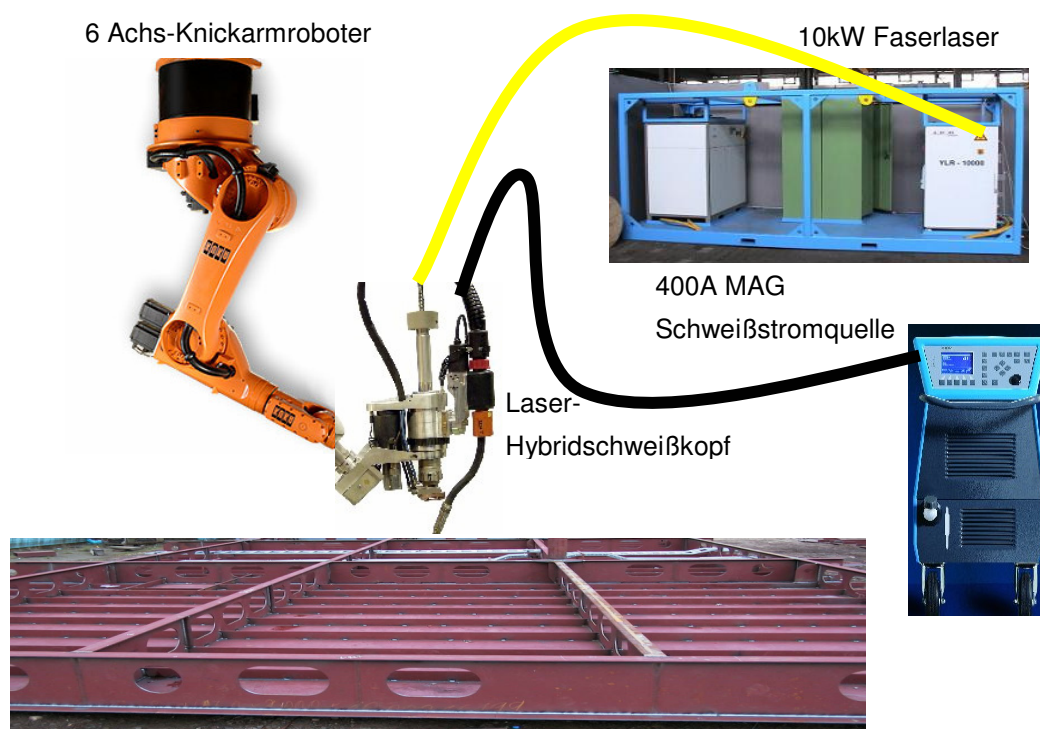
Ziel des Vorhabens ist es, die Produktionskosten zur Herstellung von Flachsektionen durch das Ersetzen konventioneller Schweißverfahren durch Laserhybridtechnik zu senken und die Aufwendungen (Verringerung der Ausgleichsmasse) und Arbeiten (Minimierung der Richtarbeiten) der nachfolgenden Gewerke drastisch zu reduzieren sowie Prozessabläufe zu optimieren (Verbesserung der Vorausrüstung).

Zudem soll gleichzeitig eine Steigerung der Schweißnahtqualität mit der Einführung dieser Technik verbunden werden, so dass mit der möglichen Dickenreduzierung eine Reduzierung des Gesamtgewichts des Schiffes verbunden ist.

### 3. Gerätetechnik

Die zu erfüllende Schweißaufgabe lässt sich nicht mit herkömmlichen Linienportalen und in der Geometrie der Einzelprozesse zueinander fixierten Hybridschweißköpfen bewerkstelligen. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit muss mit einem Roboter gearbeitet werden, um alle Schweißstellen erreichen zu können. Darüber hinaus werden hohe Anforderungen an den Laser-MSG-Hybridschweißkopf gestellt, denn die Fügeaufgabe ist ein dreidimensionales Problem, weswegen der Schweißkopf möglichst viele Freiheitsgrade besitzen sollte. Um Kollisionen mit dem Werkstück zu vermeiden, muss insbesondere auf die Anstellung des MSG-Brenners zum Laserstrahl geachtet werden.

Aufgrund der Restriktionen, die sich durch die Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Lasers ergeben würden, wurde für die Schweißaufgabe ein Faserlaser mit einer Ausgangsleistung von 10 kW ausgewählt. Der Strahl wird durch einen Lichtwellenleiter mit einem Durchmesser von  $d = 200 \mu\text{m}$  geleitet und über einen Kollimator und einer Fokussierlinse fokussiert. In Abb.1 sind die im Projekt eingesetzten Geräte dargestellt.

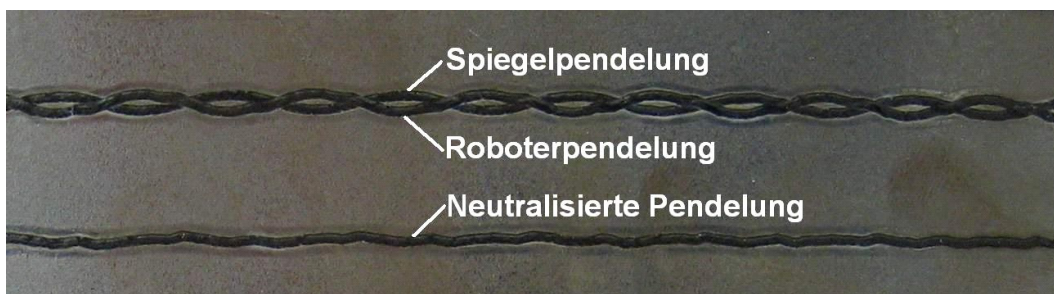


**Abb. 1: Im Projekt eingesetztes Equipment**

Der Hybridschweißkopf wird geführt von einem Roboter, welcher hängend an einem C-Portal im Versuchsfeld befestigt ist. Unter dem Roboter befindet sich ein verfahrbarer Maschinentisch, so dass der Arbeitsbereich des Roboters deutlich erweitert werden kann. Weiterhin kommt eine MAG- Schweißstromquelle zum Einsatz.

Zur Nahtanfangsfindung wird ein herkömmlicher taktiler Gasdüsenensor eingesetzt, während bei der Nahtverfolgung mit einem Lichtbogensensor gearbeitet wird. Wird jedoch beim Hybridschweißverfahren die herkömmliche Lichtbogensensorik, die eine Pendelbewegung des Roboters voraussetzt, angewandt, so entstehen Fehler in der Nahtwurzel der vollangeschlossenen Kehlnaht. Der Laserstrahl ist im Hybridkopf fest an den MSG-Brenner gekoppelt, eine Auslenkung des Hybridkopfes zum Gurt oder zum Steg führt zu einer Fehlpositionierung des Laserstrahls. Die Folge ist ein periodisch auftretender Wurzelfehler.

Daher wurden Laserstrahl und der MSG-Prozess voneinander entkoppelt. Das heißt, der MSG-Brenner wird durch den Roboter pendelnd über die Schweißnaht geführt, der Laserstrahl wird über einen Scannerspiegel, der in den Strahlengang integriert ist, in seine Idealposition zurückgedreht.



**Abb. 2: Neutralisierung der Pendelung**

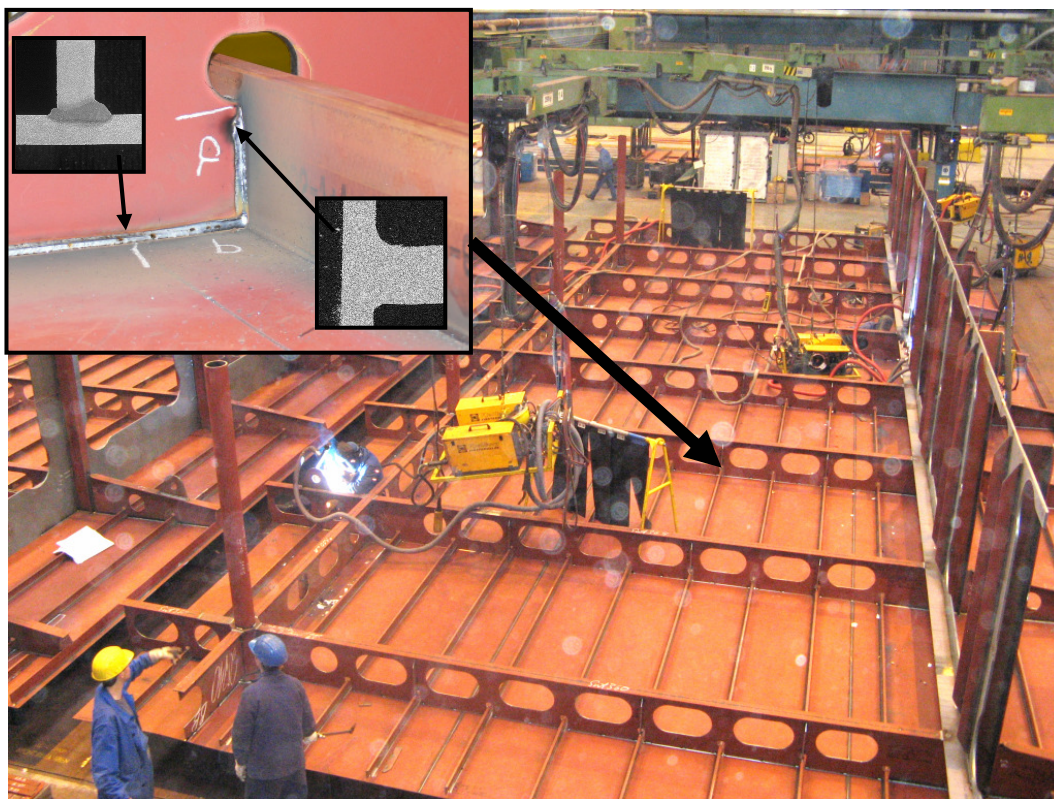
Abbildung 2 zeigt die einzelnen Pendelungen und die Überlagerung der beiden Bewegungen. Es kann eine gerade verlaufende Bahn des Laserstrahls trotz Pendelbewegung des Roboters erzeugt werden. Die Abweichungen von einer ideal geraden Linie liegen im Toleranzbereich.



## 4. Schweißtechnik

Die Anforderung „Schweißen von T-Stößen“ ist die zentrale Anwendung in dem Projekt. Dabei wird unterschieden zwischen dem Verschweißen von Unterzügen bzw. Rahmenbalken auf Deck, sowie untereinander und dem Verschweißen von Spantdurchführungen.

Eine immer wiederkehrende Schweißaufgabe in L-Form wird in einem Stück durchgeführt. Sie setzt sich aus einer horizontalen (PB) und einer vertikalen (PG) Teilnaht zusammen (siehe Abbildung 3). Diese Schweißaufgabe wurde im Rahmen von „PaLas“ verstärkt untersucht, da sämtliche anderen zu untersuchenden Aufgaben in dieser enthalten sind.



**Abb. 3: Schweißaufgabe**

Aufgrund des Bauraums des Hybridschweißkopfes ist es notwendig, diesen „in die Ecke“ zu drehen. Das bedeutet, dass sich die geometrische Anstellung des Schweißprozesses relativ zum Werkstück ändert. In Vorversuchen wurde ermittelt, dass diese geometrischen Parameter einen großen Einfluss auf das Nahtergebnis haben. Am Anfang der Schweißaufgabe (Fallnaht, Position PG) wird vom Laserstrahl aus betrachtet „schleppend“ geschweißt. Die Anstellung geht schließlich von „neutral“ über in „stechend“ in der Ecke. Das gleiche passiert bei der anschließenden Naht in Position PB. Der Kopf dreht aus der Ecke heraus (schleppend) und gelangt schließlich über die

neutrale Anstellung (Laser 90° zum Werkstück) ins Stechende. Diese Umorientierung des Schweißkopfes ist in Abbildung 4 exemplarisch für die Position PB dargestellt.



**Abb. 4: Umorientierung des Schweißkopfes**

Die sich daraus ergebenden sechs unterschiedlichen Schweißpositionen stellten eine besondere Herausforderung dar. Die vorher in der laufenden Produktion ermittelten Luftspalte zeigen, dass die Luftspalttoleranzen mit ca. 0,2mm beim Zusammenbau der Komponenten so realisierbar sind, dass die Laser-MSG-Hybridtechnik eingesetzt werden kann. Lediglich beim Stoß zwischen Rahmenbalken und Unterzug ist dieser derzeit noch unzulässig hoch.

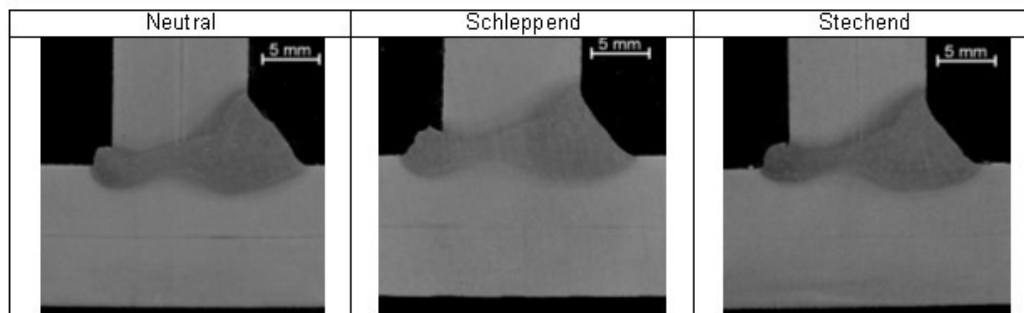
In einigen Vorversuchen wurden zunächst systembedingt feststehende Prozessparameter ermittelt. Mit der Methode der statistischen Versuchsplanung wurde sodann für das Schweißen von Kehlnähten ein statistisches Prozessmodell entwickelt, das Aussagen über die Qualitätsmerkmale (z.B. Aufhärtung, Nahtgeometrie) in Abhängigkeit von den Prozessparametern erlaubt. Die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen und somit die Richtigkeit der Modelle konnte später durch Schweißtests am Sektionsmodell nachgewiesen werden.

Über diese zur Prozessbeherrschung dienenden Versuche hinaus waren vor der Einführung des robotergeführten Laser-Hybridschweißsystems in die Fertigung schiffbaulicher Konstruktionen auch Dauerfestigkeitsnachweise zu erbringen. Im Testfeld der MEYER WERFT wurden Probeschweißungen angefertigt, die bei der TU Braunschweig untersucht wurden (siehe folgendes Kapitel).

Das Hauptblechdickenspektrum für diese Anwendung, das sich im Bereich von 5 und 7mm bzw. 10 und 12mm befindet, wurde dabei intensiv untersucht. Die dazwischen liegenden Blechstärken sollen bei ausreichender Genauigkeit der ermittelten Parameter mittels einer Interpolierung bestimmt werden. Außerdem kann bei Durchführung einer Verfahrensprüfung für Schweißverbindungen mit diesen vier Blechstärken der gesamte Blechdickenbereich von 4-12mm abgedeckt werden.



In Abb. 5 sind exemplarisch die Ergebnisse in Form von Makroschliffbildern für die mit dem vorhandenen Equipment maximal zu verschweißende Stegdicke von 12mm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in allen Schweißpositionen vergleichbare Ergebnisse und eine hohe Schweißnahtqualität erreicht werden konnte.



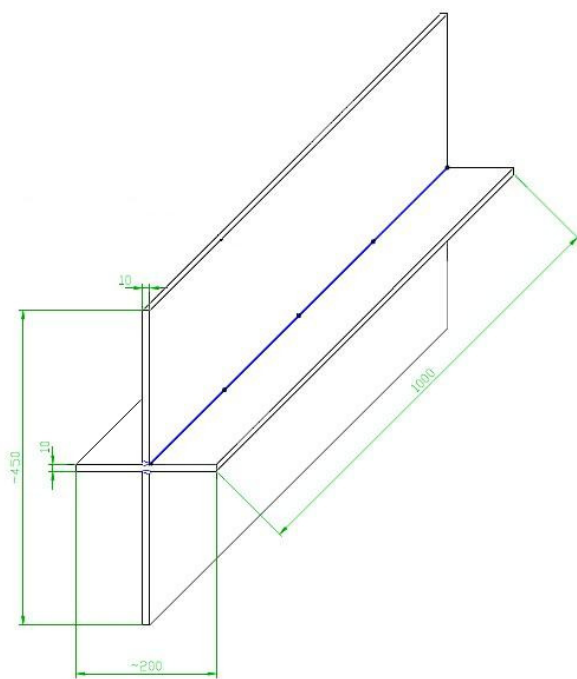
**Abb. 5: Ergebnisse der Parameteroptimierung bei der Stegdicke 12mm**

Die Position PG stellt nur einen geringen Teil der abzuarbeitenden Schweißnahtlängen dar, weshalb in diesem Fall auf eine Untersuchung der unterschiedlichen Schweißkopforientierungen verzichtet wurde (schleppend, neutral, stechend). Nach Abarbeitung und Auswertung der statistischen Versuchsreihen für die Schweißposition PB stellte sich heraus, dass ab einer Blechstärke von über 7mm keine reproduzierbare Naht mehr erreicht werden konnte. Aus diesem Grund wurde für diesen Blechdickenbereich eine zweite Versuchsreihe durchgeführt. Auch dieser Versuch führte jedoch zu keiner der Norm entsprechenden Qualität bzw. Reproduzierbarkeit. Daher liegen lediglich optimierte Parameter für die Blechstärken 5 und 7mm in der Position PG vor.

Da der Anteil der Schweißnähte und vor allem der Schweißnahtlängen in der Position PG in den in PaLas enthaltenen Aufgaben gering ist, wird zunächst von einer einseitigen Verschweißung ohne Laser in dieser Position ab einer Blechdicke von 8mm ausgegangen um eine reproduzierbare Schweißnahtqualität gewährleisten zu können. Die andere Seite wird im Anschluss manuell verschweißt.

## 5. Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Während des Projektes PaLas wurden Gespräche mit der Klassifizierungsgesellschaft DNV zur Zulassung des in PaLas entwickelten Schweißverfahrens geführt. Da dieses Verfahren lediglich eine Variante des bereits seit mehreren Jahren auf der MEYER WERFT eingesetzten Laser- Hybridschweißens darstellt, wurden für eine erfolgreiche Zulassung neben den obligatorischen Verfahrensprüfungen Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Kreuzstoßproben verlangt, da dieser Fall mehrere einfache Kerbfälle abdeckt. In folgender Abbildung 6 ist die Zeichnung einer solchen Kreuzstoßprobe dargestellt.



**Abb. 6: Kreuzstoßprobe**

Die Einschweißseite wurde bei beiden Nähten gleich gewählt um den ungünstigsten Fall in Form einer Biegung um die beiden Wurzeln darzustellen. Somit ist eine differenzierte Betrachtung der beiden Fälle möglich. Die Untersuchungen wurden durchgeführt vom „Institut für Füge- und Schweißtechnik“ (ifs) der Technischen Universität Braunschweig.

### Versuchsdurchführung

Die Schwingfestigkeitsversuche wurden als einstufige Biegeschwellversuche mit einem Spannungsverhältnis  $R=0.1$  durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde eine servohydraulische Prüfmaschine mit einer maximalen Prüflast von  $\pm 50$  kN eingesetzt. Für die Schwingversuche wurden aus den geschweißten Blechen Blechstreifen von 60

mm Breite herausgesägt. Auf eine Taillierung der Proben konnte nach anfänglichen Vorversuchen verzichtet werden, da die Brüche ausschließlich von den Nahtübergängen ausgingen.

Die Schwingversuche erfolgten unter Vierpunktbiegung in einer auf die Versuchskörper abgestimmten Biegevorrichtung in zwei Positionen (siehe untenstehende Abbildung 7).

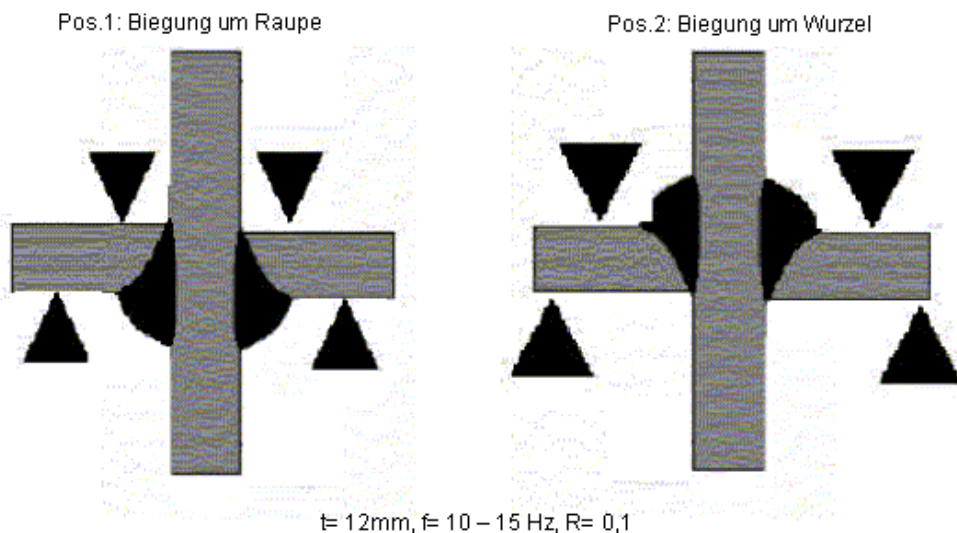


Abb. 7: Vierpunktbiegeversuch

Die Versuche wurden wegkontrolliert (konstante Wegamplitude des Hydraulikzylinders) bei anfänglicher konstanter Dehnungsamplitude durchgeführt. Die Kontrolle der Dehnungsamplitude bzw. der daraus resultierenden Biegespannungen erfolgte mittels auf jeder Probe applizierter Dehnungsmessstreifen (DMS). Diese waren innerhalb der inneren Biegedorne im Bereich konstanten Biegemomentes soweit vom Nahtübergang im Grundwerkstoff angebracht, dass die Nenndehnungen im Grundwerkstoff ermittelt werden konnten.

Die Proben wurden je hälftig so geprüft, dass die höchstbeanspruchten Randbereiche zum einen auf der Decklagenseite (Einschweißseite) und zum Anderen auf der Wurzelseite lagen. Somit konnten die Brüche jeweils einheitlich auf der Nahtober- bzw. -unterseite erzwungen und eine unabhängige Auswertung der Schwingfestigkeiten vorgenommen werden.

Als Grenzlastspielzahl, bei der die Proben als Durchläufer gewertet werden, wurden  $5 \cdot 10^6$  Lastwechsel festgelegt. Bei den im Zeitfestigkeitsgebiet geprüften Proben wurden die Versuche nach einem einheitlichen Steifigkeitsabfall als Brüche gewertet. Hierbei wurden die während der Versuche kontinuierlich mittels DMS gemessenen Dehnungen

herangezogen. Als Versagenskriterium wurde ein Abfall der Randdehnungen in Folge fortgesetzten Rissfortschritts von 20% der anfänglichen Dehnungsamplitude festgelegt.

## Untersuchungsergebnisse

Abbildung 8 und 9 zeigen die ermittelten Bruchlastspielzahlen und die daraus für den jeweiligen Belastungsfall berechneten Wöhlerlinien für 10%, 50% und 90% Überlebenswahrscheinlichkeit. Die Schwingfestigkeiten (ertragbare Oberspannungen) ergeben sich daraus zu 230 N/mm<sup>2</sup> (Bruch von der Oberseite) und 141 N/mm<sup>2</sup> (Bruch von der Unterseite). Bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{u}}=95\%$  beträgt die Oberspannung 180 N/mm<sup>2</sup> (Oberseite) und 111 N/mm<sup>2</sup> (Unterseite). Bei  $5 \cdot 10^6$  Lastwechseln ergeben sich damit ertragbare Doppelamplituden von 162 N/mm<sup>2</sup> (Oberseite) und 100 N/mm<sup>2</sup> (Unterseite).

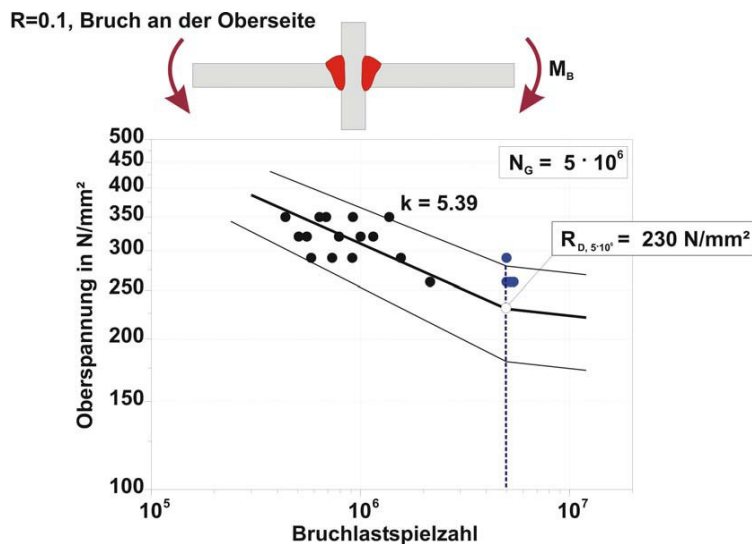


Abb. 8 Bruch an der Oberseite bei Grenzlastspielzahl  $5 \cdot 10^6$

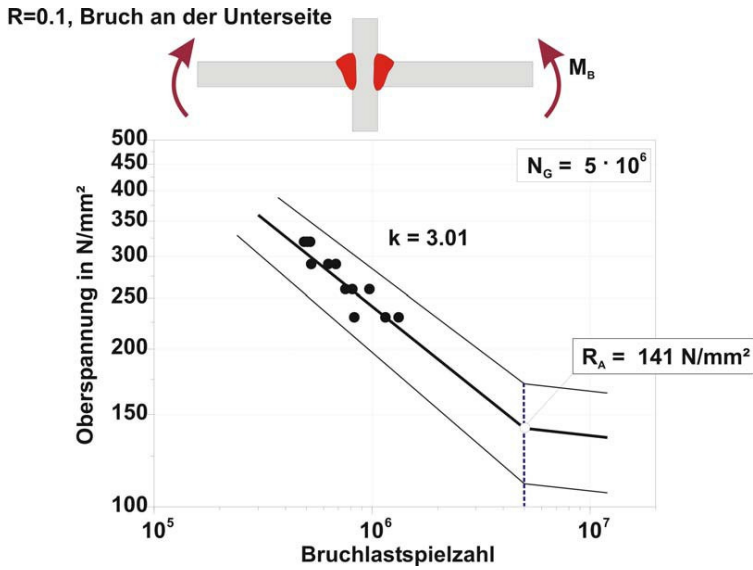


Abb. 9: Bruch an der Unterseite bei Grenzlastspielzahl  $5 \cdot 10^6$

Aus den Wöhlerdiagrammen können folgende für die FAT- Klassenzuordnung maßgebende Kennwerte bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln abgeleitet werden:

- Bruch von der Oberseite:  $\Delta\sigma = 174 \text{ N/mm}^2$  (Abbildung 10)
- Bruch von der Unterseite:  $\Delta\sigma = 135 \text{ N/mm}^2$  (Abbildung 11)

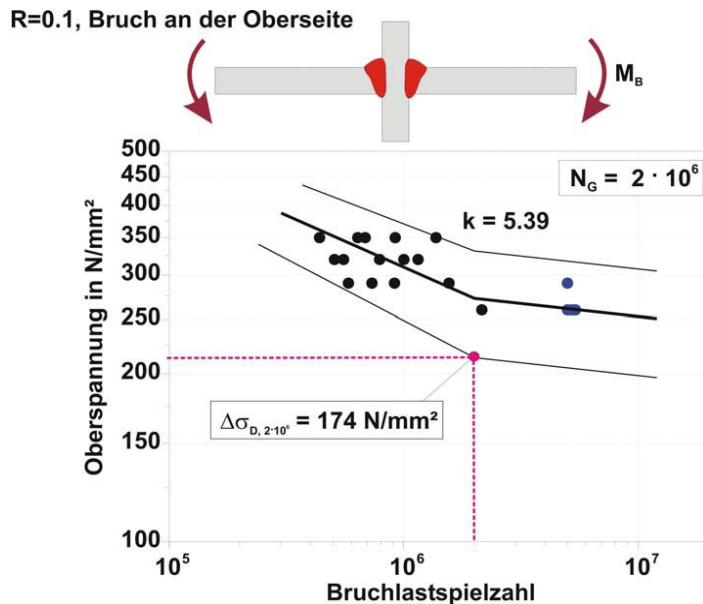


Abb. 10: Bruch an der Oberseite bei Grenzlastspielzahl  $2 \cdot 10^6$



R=0.1, Bruch an der Unterseite

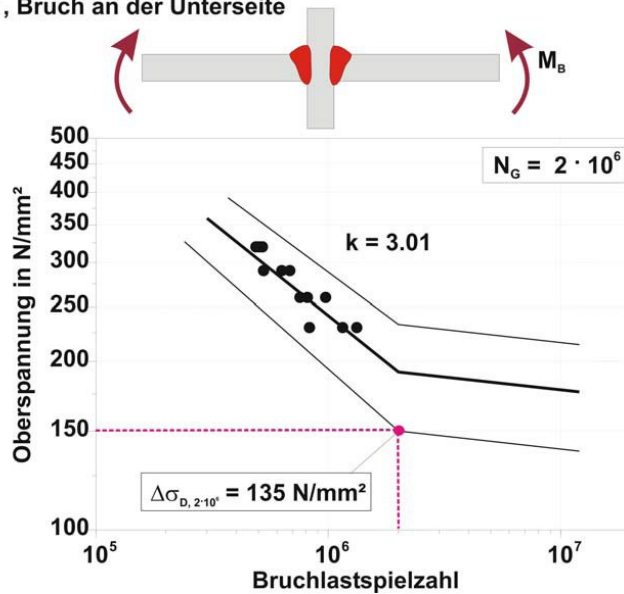


Abb. 11: Bruch an der Unterseite bei Grenzlastspielzahl  $2 \cdot 10^6$

Eine direkte Umrechnung von Schwingfestigkeitswerten aus Biegeschwingversuchen auf korrespondierende Angaben unter Axialbeanspruchung ist zwar nicht exakt möglich. Eine konservative Abschätzung (Axial ca. 40% niedriger als Biegung) führt aber zu einer FAT- Klasse nach IIW von ca.81 (Bruch von der Unterseite). Diese liegt damit um ca. 10  $N/mm^2$  höher als die einseitig lasergeschweißte Kreuzstoßverbindung mit Vollanschluss und Bruchausgang von aussenseitigen Nahtübergängen gemäß „IIW-recommendations for fatigue design“.

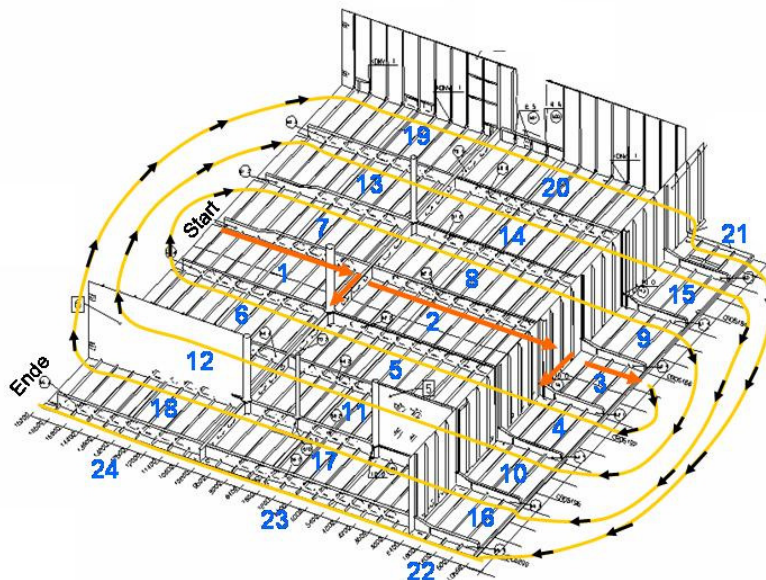
Die niedrigere Schwingfestigkeit der von der Unterseite gebrochenen Proben erklärt sich logischerweise aus der dort vorliegenden größeren Kerbschärfe. Die Nahtübergangskerbe auf der Wurzelseite ist erfahrungsgemäß durch den Schweißprozess weniger gut zu beeinflussen als an der Oberseite, da das entscheidende Qualitätskriterium wohl die sichere Erreichung des Vollanschlusses ist.

## 6. IT- Anbindung

Zeit und Aufwand für die Erstellung der Roboterprogramme sowie die Fehlermöglichkeiten bei der Geometriedefinition lassen sich wesentlich reduzieren, wenn die im CAD- System ohnehin vorhandenen, geometrischen Werkstückdaten direkt zur NC- Programmierung verwendet werden können. Voraussetzung für diese Datenkopplung sind einheitliche Datenschnittstellen am CAD- und am Programmiersystem.

Hierzu wird zunächst ein Programm für die Arbeitsvorbereitung (AV) erstellt, welches die Aufgabe hat, ein komplettes 3D-Volumenmodell der zu verschweißenden Sektion einzulesen, die Stöße der Schweißaufgaben zu markieren und die geometrischen bzw. verfahrenstechnischen Daten zu ermitteln.

Dazu gehört die Ermittlung einer Abarbeitungsreihenfolge der einzelnen Schweißnähte auf dem Deck (siehe Abb. 12). Das Deck wird zunächst in durch Rahmenbalken und Unterzüge begrenzte Parzellen unterteilt. Diese Parzellen enthalten eine unterschiedliche Anzahl an Schweißaufgaben. Die abzuarbeitende Reihenfolge der Parzellen auf einem Deck wurde auf die Minimierung von Bauteilverzug ausgelegt (Spiralenform von innen nach außen). Innerhalb einer Parzelle liegt das Hauptaugenmerk auf einer möglichst schnellen Bearbeitungszeit. Es ergibt sich ein auf jedes Schiffbaudeck anwendbares Abarbeitungsschema.



**Abb. 12: Ermittlung einer Abarbeitungsreihenfolge der Schweißaufgaben auf einem Schiffbaudeck**

Sämtliche vom AV-Programm ermittelten Daten werden schließlich an ein Offline-Programmiersystem übergeben, welches die abzuarbeitenden Schweißbahnen und –



konturen ermittelt und virtuell in die Schweißanlage importiert. Diese Konturen werden zu einem Gesamtbewegungsablauf zusammengefügt.

Anschließend werden die erstellten Programme in Echtzeit simuliert. Die Simulation der Programme ist notwendig, da die Bauteile (Sektionen) im Schiffbau sehr komplex und teilweise schwer zugänglich sind. Eine mit der Simulation einhergehende Zugänglichkeitsprüfung reduziert die Gefahr einer Kollision des Roboters bzw. des Effektors mit dem Bauteil z.B. beim Umorientieren des Schweißkopfes erheblich.

Nach erfolgreicher Simulation des Programms wird dieses an die Robotersteuerung übertragen und kann abgearbeitet werden.



## **7. Zusammenfassung**

Wie sich zeigte, sind durch „PaLas“ die grundlegenden technischen Voraussetzungen für den Einsatz robotergeführter Laserhybridschweißtechniken im Schiffbau erarbeitet worden. Zu den unterschiedlichen Anwendungsfällen konnten weitestgehend die für den praktischen Einsatz erforderlichen Fertigungs- und Arbeitsvorbereitungsfragen im Labor und für die Anwendung auf Werften geklärt werden.

Die guten Ergebnisse der Dauerschwingfestigkeitsuntersuchungen sind neben der normgerechten Ausführung der Schweißnähte entscheidend für eine erfolgreiche Qualifizierung des Verfahrens.

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird von den Partnern z.B. in der fortgesetzten Untersuchung des Nahtverfolgungssystems im erweiterten Anwendungsgebiet gesehen.

Um das von den Projektpartnern erworbene Know-how gemeinsam weiterzuentwickeln und die Verbreitung des Einsatzes dieser flexiblen verzugsarmen Schweißmethode im Schiffbau zu forcieren, wird mittelfristig über die Erschließung weiterer Anwendungspotentiale auf der Werft nachgedacht.

## **8. Danksagung**

Die Autoren bedanken sich beim Projektpartner, dem ISF in Aachen, für die fruchtbare und angenehme Zusammenarbeit und beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung der Untersuchungen (Förderkennzeichen 03SX205D).