

Antragsskizze zur Projektförderung im Rahmen des Verbundprojektes Green Factory Bavaria:

<b>Projekt</b>					
<b>Akronym: ERIS</b>					
<b>Thema: Energieeffizientes Remoteschweißen von Karosseriewerkstoffen mittels innovativer Strahlquellen</b>					
Vorgesehene Förderung: Green Factory Bavaria	<table border="1"> <tr> <td>Maximale Laufzeit:</td> <td>24 Monate</td> </tr> <tr> <td>Kostenrahmen:</td> <td>166 TEUR</td> </tr> </table>	Maximale Laufzeit:	24 Monate	Kostenrahmen:	166 TEUR
Maximale Laufzeit:	24 Monate				
Kostenrahmen:	166 TEUR				
<b>Projektpartner aus der Wissenschaft</b>					
Initiator des Themas (Name, Tel, E-Mail)	Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, 09131 85-23456, michael.schmidt@lpt.uni-erlangen.de				
<b>Projektpartner aus der Industrie</b>					
AUDI AG, Ingolstadt; DirectPhotonics Industries GmbH, Berlin; Scanlab AG, Puchheim; TeraDiode Inc., Wilmington (USA); TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen; Sill Optics GmbH & Co. KG, Wendelstein; H.I.B Systemtechnik GmbH, Friedberg					
<b>Projektbeschreibung</b>					
<p><i>Der hohe Wirkungsgrad von Direkt-Diodenlaser im Vergleich zu konventionellen Strahlquellen stellt in Kombination mit Strahloszillationsstrategien und der Laserleistungsmodulation ein enormes Potential dar den Energiebedarf beim Remote-Laserstrahlschweißen in der industriellen Fertigung, beispielsweise der Automobilfertigung, nachhaltig zu senken. Die Scanlab AG stellt in Zusammenarbeit mit der Sill Optics GmbH &amp; Co. KG hierzu ein Scannersystem mit Breitbandbeschichtung für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung. Dieses System wird im Rahmen des Projekts durch notwendige Komponenten wie Kühlung, Faserankopplung, Kollimation, Crossjet und Temperaturüberwachung weiterentwickelt. Anschließend wird mit diesem Scannersystem das Remoteschweißen mit multi-kW Direkt-Diodenlasern hoher Strahlqualität untersucht. Die DirectPhotonics Industries GmbH, die TeraDiode Inc. sowie die TRUMPF GmbH + Co. KG beteiligen sich als innovative Laserhersteller an diesem Projekt und stellen jeweils einen Direkt-Diodenlaser im Leistungsbereich von 2 bis 4 kW mit einer Strahlqualität zwischen 4 und 10 mm*mrad zur Verfügung. Ein Scannersystem im Wellenlängenbereich von 900 bis 1000 nm sowie zur Verfügung stehende multi-kW Direkt-Diodenlaser mit hoher Strahlqualität erlauben erstmals Grundlagenuntersuchungen für den Einsatz von Diodenlasern zum Remote-Laserstrahlschweißen. In den experimentellen Untersuchungen soll das Prozessfenster zum effizienten Remote-Laserstrahlschweißen von Stahlwerkstoffen bestimmt werden. Die Direkt-Diodenlaser emittieren aufgrund des Wavelength-Combining Konzepts mehrere Wellenlängen, die zu einer gleichen Anzahl an Fokussagen führen. Der Einfluss dieser mehreren Fokussagen, auf die Prozessdynamik sowie die Schweißnahteigenschaften wird ebenso untersucht werden. Bei einer verwendeten Brennweite von 500 mm kann die Maximalabweichung zweier Fokussagen mehr als 1 mm betragen und damit bei im Karosseriebau typischen Blechstärken von ca. 1 mm den Schweißprozess beeinflussen. Der Einfluss wird im Rahmen von ERIS quantifiziert und die optimale Position der Fokussagen ermittelt damit das Remote-Laserstrahlschweißen mit Direkt-Diodenlasern ermöglicht wird. Strahloszillationsstrategien in Kombination mit einem kleineren Fokusradius ermöglichen Energieeffizienzsteigerungen durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und Reduktion der Wärmeleitungsverluste. Die Prozessdynamik und die Schweißnahteigenschaften bei Verwendung von Strahloszillationen werden untersucht. Versuche mit konventionellen Strahlquellen sollen bei allen experimentellen Untersuchungen mit Direkt-Diodenlasern zum Vergleich der Prozesseffizienz dienen. Des Weiteren sollen gerätespezifische Größen wie die Laserleistung, die Strahleigenschaften, die elektrische Leistungsaufnahme und die Stabilität der Strahlquellen über längere Betriebszeiträume gemessen werden. Mit diesen Größen lässt sich neben dem Steckdosenwirkungsgrad auch die Zuverlässigkeit der Strahlquellen bewerten. Der Steckdosenwirkungsgrad sowie die Zuverlässigkeit sind ausschlaggebend für die Produktivität in der industriellen Fertigung und bestimmen damit die Effizienz der Strahlquelle. Die hohe Anzahl an Parametern, vor allem bei der Verwendung von unterschiedlichen Strahloszillationsstrategien, erfordert den Einsatz computergestützter Methoden zur gezielten Untersuchung effizienter Parameterpaarungen. Des Weiteren werden systemtechnisch noch nicht verfügbare Laserleistungen, Strahloszillationsfrequenzen oder auch –strategien durch numerische Prozesssimulationen untersucht und das Potential von zukünftigen Entwicklungen in der Lasertechnik dargestellt.</i></p>					

Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt

30.06.2015

NAME

Datum /Stempel / Dienststelle

# 1 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

## Stand der Forschung

### Laserstrahlschweißen im Automobilbau

Der Einsatz von Laserstrahlung als Produktionswerkzeug gewinnt seit Jahren an Bedeutung. Insbesondere das Laserstrahlschweißen konnte sich dabei zunehmend in der industriellen Fertigung etablieren. Das Laserstrahlschweißen zeichnet sich durch eine hohe Leistungsdichte aus, die durch die Verwendung fokussierter Laserstrahlung als Wärmequelle erreicht wird. Damit kann im Vergleich zu alternativen Schweißverfahren, insbesondere auch den lichtbogenbasierten Verfahren, eine deutliche Reduzierung der Wärmeeinflusszone und des Schweißverzugs erzielt werden. Durch die präzise Energieeinbringung werden darüber hinaus hohe Prozessgeschwindigkeiten möglich. Neben den genannten Vorteilen ergibt sich das Potential des Laserstrahlschweißens für die industrielle Fertigung insbesondere aus der guten Automatisierbarkeit des Verfahrens und der hohen Flexibilität bezüglich Materialien und Bauteilgeometrien.

Lediglich mit dem alternativen Strahlverfahren Elektronenstrahlschweißen können noch schmalere Nähte als beim Laserstrahlschweißen erzeugt werden. Allerdings muss dieser Prozess, zur Vermeidung der Streuung des Elektronenstrahls an Luftmolekülen, im Vakuum stattfinden, wodurch die Anlagenkosten erhöht werden und die Produktivität deutlich reduziert wird.

Ein wichtiges und stetig wachsendes Anwendungsfeld des Laserstrahlfügens ist der Automobilbau. Hier wird das Laserstrahlschweißen derzeit unter anderem zum Fügen von Türen, Seitenwandrahmen und Schwellern im Karosseriebau eingesetzt. Das Laserstrahlschweißen weist hinsichtlich des Fügens von Karosseriebauteilen zahlreiche Vorteile im Vergleich zu den alternativen thermischen Fügeverfahren Widerstandspunktschweißen und Lichtbogen- bzw. Plasmaschweißen auf. So ermöglichen die linienförmigen Schweißverbindungen beim laserbasierten Schweißen höhere Naht- und Strukturfestigkeiten als die punktförmigen Schweißverbindungen des Widerstandspunktschweißens, wobei im Vergleich zu Lichtbogen- oder Plasmaschweißen eine deutlich Reduktion der Wärmeeinflusszone und des Verzugs möglich ist. Verglichen mit den lichtbogenbasierten Verfahren sind mit dem Laserstrahlschweißen höhere Prozessgeschwindigkeiten und eine bessere Nahtqualität erzielbar. Eine weitere positive Eigenschaft des Laserstrahlschweißens ist, dass im Gegensatz zum Widerstandspunktschweißen eine einseitige Zugänglichkeit der Schweißstelle ausreichend ist. Darüber hinaus kann mit dem Einsatz von Roboter-adaptierten Scannersystemen die Fahrzeiten verkürzt und die Ausbringung erhöht werden. Brennweiten von 0,5 m bis über 1 m ermöglichen den Schutz der optischen Elemente und verringern die Kollisionsgefahren bei Verwendung weiterer Handhabungssysteme. Große Bearbeitungsräume erlauben das effiziente Fügen von 3-dimensionalen Bauteilen.

Sowohl das Laserstrahlschweißen, als auch das Widerstandspunktschweißen zeichnen sich durch eine gute Automatisierbarkeit aus, welche Voraussetzung für eine effiziente Anwendung in der Serienfertigung ist.

Bedeutendster Nachteil des Laserstrahlschweißens sind die hohen Investitionskosten, welche auf vergleichsweise teure Laseranlagen und Systemtechnik zurückzuführen sind. Weiterhin stellt der hohe Energieverbrauch der derzeit eingesetzten Laseranlagen ein Einsatzhemmnis dar. Es sind daher energieeffizientere und kostengünstigere Laseranlagen notwendig, um das Laserstrahlschweißen für weitere Applikationen im Automobilbau wirtschaftlich zu machen.

### Direkt-Diodenlaser hoher Strahlqualität

In letzter Zeit ist es gelungen, Direkt-Diodenlaser im multi-kW Leistungsbereich zu entwickeln, deren Strahlqualität den Anforderungen des Remote-Laserstrahlschweißens erfüllt. Ausschlaggebend für diese Entwicklung ist neben Verbesserungen der Laserdioden selbst bezüglich Divergenz und Energieeffizienz, dass mit Hilfe neuer Technologien die Kombination der Strahlung einzelner Dioden zu einem hochbrillanten Laserstrahl möglich ist. Dabei wird die Strahlung mehrerer Laserdioden überlagert. Die emittierte Leistung skaliert mit der Zahl der verwendeten Dioden, wobei die Strahlqualität der einzelnen Dioden annähernd beibehalten werden kann. Es kommt also im Gegensatz zu früheren Ansätzen wie dem Side-by-Side Beam-Combining nicht zu einer Verringerung der Strahlqualität bei einer Erhöhung der Zahl der verwendeten Dioden [1]. Die Hochleistungs-Direkt-Diodenlaser der Firma TeraDiode Inc.

erreichen Strahlqualitäten von bis zu 4 mm\*mrad und Leistungen bis 4 kW und sind damit bisher verfügbaren Diodenlasern deutlich überlegen [2]. Direkt-Diodenlaser sind momentan mit Leistungen im multi-kW Bereich für den industriellen Einsatz verfügbar, haben jedoch nur eine unzureichende Strahlqualität von mehr als 24 mm\*mrad [3] und eignen sich damit nicht zum Remote-Laserstrahlschweißen. Die im Projekt ERIS zur Verfügung stehenden Direkt-Diodenlaser besitzen mit 4 bis 10 mm\*mrad eine ausreichende Strahlqualität und können damit für das besonders flexible und produktive Remote-Laserstrahlschweißen eingesetzt werden.

Für das Laserstrahlschweißen kommen bisher Festkörper-, Scheiben- und Faserlaser zum Einsatz [4]. Direkt-Diodenlaser besitzen gegenüber diesen konventionellen Strahlquellen entscheidende Vorteile. Sie weisen nicht nur eine hohe Zuverlässigkeit, eine besonders kompakte Bauweise und relativ geringe Kosten auf, sondern verfügen insbesondere auch über eine deutlich höhere Energieeffizienz als alternative Lasersysteme. So erreichen Faserlaser eine Steckdoseneffizienz von maximal 30 % und Scheibenlaser eine Steckdoseneffizienz von etwa 20 %, während Direkt-Diodenlaser Steckdoseneffizienzen von über 40 % erzielen können [1]. Im Vergleich zu den derzeit in der industriellen Fertigung eingesetzten Strahlquellen wird mit Direkt-Diodenlasern daher eine Energieersparnis von mindestens 30 % erreicht. Diese Effizienzsteigerung konnte im Rahmen vom Projekt ELIS („Energieeffizientes Laserstrahlfügen von Karosseriewerkstoffen mittels innovativer Strahlquellen“) des Verbundprojekts Green Factory Bavaria an einem Prototyp eines DirectProcess900 Direkt-Diodenlasers der DirectPhotonics Industries GmbH nachgewiesen werden. Im Rahmen des beantragten Projekts ERIS wird erstmals ein Scannersystem mit der notwendigen Optik für den Wellenlängenbereich von Direkt-Diodenlasern und deren verfügbare hohen Strahlqualitäten entwickelt. Daher ermöglicht erst das Projekt ERIS die Untersuchung vom Remote-Laserstrahlschweißen mit Direkt-Diodenlasern im multi-kW Bereich und die Bestimmung der Effizienzsteigerung des Laserstrahlschweißens durch diese Strahlquellen. Erst die dann zur Verfügung stehenden hohen Laserleistungen lassen eine repräsentative Zuverlässigkeitsanalyse dieser Strahlquellen zu.

### **Strahloszillation**

Der Laserstrahlschweißprozess kann durch Modulation der eingestrahlt Leistung beeinflusst werden. Mit Hilfe von Scannern kann die eigentliche Vorschubbewegung mit oszillierenden Bewegungen des Laserspots überlagert werden, wodurch eine örtliche Leistungsmodulation möglich wird [5].

Einer der Vorteile von überlagerten Strahloszillationen ist die Minimierung von Anzahl und Größe auftretender Poren, wie in [6] für das Schweißen von Aluminiumlegierungen gezeigt werden konnte. Darüber hinaus können Strahloszillationsstrategien dazu verwendet werden, die Oberflächenrauheit der Schweißnaht zu reduzieren [6, 7].

In [8] wird die Auswirkung von spiralförmigen Strahloszillationen auf den Laserstrahl-tiefschweißprozess analysiert. Gegenüber dem Schweißen ohne örtliche Leistungsmodulation kommt es zu einer deutlichen Steigerung des Nahtquerschnitts. Es kann also eine wesentlich geringere Laserleistung verwendet werden, um den notwendigen Nahtquerschnitt zu erzielen, wodurch deutliche Energieeinsparungen ermöglicht werden. Die Auswirkungen örtlicher Leistungsmodulationen auf das Laserstrahl-Mikroschweißen werden in [9] untersucht. Ein erhöhtes Schmelzvolumen bei der Anwendung von Strahloszillationsstrategien zeigt auch hier die Möglichkeit zur Steigerung der Prozesseffizienz auf. Als Ursache dafür wird angegeben, dass durch die Oszillationsbewegungen ein Teil der beim regulären Schweißen anfallenden Wärmeleitungsverluste zur Schmelzbadbildung verwendet werden kann, so dass zum Aufschmelzen des gleichen Schweißnahtvolumens eine geringere Laserleistung ausreichend ist. Genauere Analysen zu den Möglichkeiten der Effizienzsteigerung mittels Leistungsmodulation fehlen jedoch, insbesondere ist die Auswirkung der einzelnen Prozessparameter und der verschiedenen möglichen Strahloszillationsstrategien auf die Effizienz nicht ausreichend untersucht, so dass diese Möglichkeit zum energiesparenden Laserstrahlschweißen bisher in der industriellen Fertigung nicht genutzt wird.

### *Gesamtziel*

Das Energieeinsparpotential von multi-kW Direkt-Diodenlasern mit hoher Strahlqualität lässt sich bisher nicht beim Remote-Laserstrahlschweißen im Karosseriebau ausnutzen. Es fehlen Grundlagenuntersuchungen zu den Prozessparametern und den erzielbaren Schweißnahtqualitäten als auch die notwendige Systemtechnik. Im Rahmen dieses Projektes soll diese Lücken geschlossen werden indem ein Scannersystem zum Remote-Laserstrahlschweißen entwickelt als auch das Prozessfenster für das Remote-Laserstrahlschweißen von Stahlwerkstoffen bestimmt wird. Der mögliche Einsatz eines Scannersystems mit Breitbandbeschichtung zum Remote-Laserstrahlschweißen mit konventionellen Scheiben- und Faserlaser als auch hochbrillanten Direkt-Diodenlaser wird hierbei untersucht. Die Direkt-Diodenlaser emittieren aufgrund ihres internen Aufbaus mehrere Wellenlängen, die zu einer gleichen Anzahl an Fokuslagen führen. Der Abstand dieser Fokuslagen hängt von der Brennweite der Optik ab. Im Remote-Laserstrahlschweißen übliche hohe Brennweiten vergrößern die Abstände dieser Fokuslagen. Mit experimentellen Untersuchungen wird der Einfluss auf die Prozessdynamik sowie die Schweißnahteigenschaften festgestellt. Es erfolgen zusätzlich Schweißversuche mit konventionellen Strahlquellen die einen direkten Vergleich der Schweißergebnisse möglich macht. Durch die festgestellten Unterschiede in den Schweißnahteigenschaften und der Messung der notwendigen elektrischen Leistung kann die Effizienzsteigerung aufgrund des Einsatzes von Direkt-Diodenlasern quantifiziert werden. Zusätzlich werden Strahloszillationen dazu genutzt, eine Effizienzsteigerung durch Laserstrahlung höherer Intensität zu erreichen. Die experimentellen Untersuchungen an konventionellen Strahlquellen und Direkt-Diodenlasern ermöglichen die Validierung des ersten Scannersystems zum Remote-Laserstrahlschweißen im Wellenlängenbereich von 900 bis 1070nm hinsichtlich seines Aufbaus und seiner Breitbandbeschichtung. Numerische Simulationen gewährleisten die Anzahl an experimentell zu untersuchenden Strahloszillationsstrategien gering zu halten. Darüber hinaus können experimentell kaum erfassbare Wirkprinzipien simulationsbasiert analysiert werden und die Schweißergebnisse von noch nicht verfügbaren höheren Laserleistungen bestimmt werden.

## Eigene Vorarbeiten

### Hochgeschwindigkeitsbasierte Prozessanalyse des Laserstrahlschweißens

Am Lehrstuhl für Photonische Technologien wurde im Rahmen des BMBF geförderter Projekt ProSpeed („Verbesserung des Verständnisses von Remote-Laserstrahlprozessen zur Materialbearbeitung durch stereoskopische und simultane Hochgeschwindigkeitsaufnahmen“, Förderkennzeichen 13N12134) der Laserstrahlschweißprozess mit Hilfe von hochgeschwindigkeitskamerabasierten Prozessuntersuchungen analysiert. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse zum experimentellen Aufbau als auch der bildverarbeitenden Analyse lassen sich in diesem Projekt gewinnbringend einsetzen.

### Experimentelle und simulationsbasierte Untersuchungen zum Schweißen mit Direkt-Diodenlaser

Im Projekt ELIS („Energieeffizientes Laserstrahlfügen von Karosseriewerkstoffen mittels innovativer Strahlquellen“) des Verbundprojekts Green Factory Bavaria wurden erste experimentelle und simulationsbasierte Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen mit Direkt-Diodenlaser durchgeführt. Die DirectPhotonics Industries GmbH hat für die Untersuchungen einen Prototyp ihres DirectProcess900 Direkt-Diodenlasers zur Verfügung gestellt. Ein experimenteller Aufbau zum Schweißen mit einem Bearbeitungskopf mit Festoptik und diesem Direkt-Diodenlaser wurde umgesetzt. In Abbildung 1 ist das gemessene Strahlprofil des Direkt-Diodenlasers abgebildet.

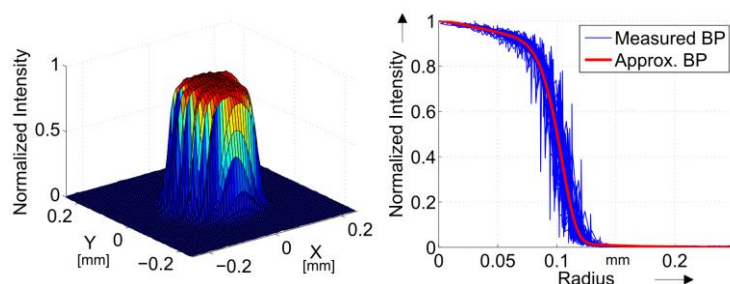


Abbildung 1: Strahlprofil eines Prototyp vom DirectProcess900 Direkt-Diodenlaser der DirectPhotonics Industries GmbH.

Die rote Kurve stellt eine approximierte Funktion dar, die für die numerischen Simulationen genutzt wurde. Anhand dieser Funktion lässt sich der flache Verlauf des Strahlprofils in der Nähe der Profilachse erkennen. Dieser bewirkt einen gleichmäßigen Energieeintrag über den radialen Verlauf und ist damit von Vorteil beim Laserstrahlschweißen. Die gemessene Strahlqualität ist  $8.324 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  und entspricht damit der typischen Strahlqualität beim Laserstrahlschweißen mit konventionellen Strahlquellen wie Scheiben- oder Faserlaser. Damit wird auch die Strahlqualität bisher verfügbarer Direkt-Diodenlaser von mehr als  $24 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  übertroffen [3].

Der Prototyp hat derzeit eine maximale Laserleistung von 369 W. Der Wirkungsgrad der Strahlquelle beträgt bis zu 38% was dem in der Literatur angegebenen Wirkungsgrad für Direkt-Diodenlaser von ca. 40% entspricht [10]. Damit ergibt sich eine Effizienzsteigerung von ca. 30 % zu momentan verfügbaren konventionellen Strahlquellen. Zudem ist durch die Weiterentwicklung der Strahlquelle eine weitere Steigerung der Effizienz zu erwarten. In Abbildung 2 ist beispielhaft jeweils 1 Schliff für die Stahlwerkstoffe 22MnB5 und DX56 abgebildet. Es handelt sich aufgrund der Schweißnahtform um eine Kombination aus Tiefschweißen und Wärmeleitungsschweißen. Die Vorschubgeschwindigkeit kann aufgrund der momentan noch begrenzten Laserleistung nicht weiter erhöht werden. Dies führt zu einem breiten Schmelzbad und damit einer breiten Schweißnaht. Grundlegend lässt sich jedoch der Beginn des Tiefschweißens aufgrund der Verjüngung der Schweißnaht mit zunehmender Einschweißtiefe feststellen. Zusammenfassend konnte in den experimentellen Untersuchungen gezeigt werden, dass Laserstrahlschweißen von hochfesten Karosseriewerkstoffen wie 22MnB5 und DX56 möglich ist. Das Folgeprojekt ERIS eignet sich aufgrund dieser Grundlagenuntersuchungen daher hervorragend weitere Untersuchungen mit höheren Leistungen und dem Einsatz von Scannersystemen statt einem Bearbeitungskopf mit Festoptik, wie es im Projekt ELIS der Fall war, durchzuführen.

Eine hohe Laserleistung von 4 kW sowie der Einsatz eines Scannersystems erweitern die Anwendungsgebiete dieser innovativen Strahlquelle und machen das Energieeinsparpotential der Industrie zugänglich.



Abbildung 2: Metallografische Schiffe einer Schweißnaht eines hochfesten 22MnB5 Stahlwerkstoffs mit Aluminium-Silizium-Beschichtung (AlSi) und einer Materialstärke von 2mm (links) und einer Schweißnaht eines verzinkten DX56 Stahlwerkstoffs mit einer Materialstärke von 0,75 mm (rechts). Prozessparameter des DirectProcess900 Direkt-Diodenlaser Prototyp:  $P_L=252$  W,  $z=0$  mm,  $v_f=1$  m/min,  $w_f=200$   $\mu$ m. WEZ: Wärmeeinflusszone.

Die experimentellen Untersuchungen wurden durch Prozesssimulationen unterstützt. Das hierzu verwendete Prozessmodell wurde am Lehrstuhl für Photonische Technologien entwickelt [11, 12, 13] und im Rahmen von ELIS hinsichtlich der Werkstoffmodelle und eines optischen Moduls zum Abbilden der Wellenlängen  $< 1\mu$ m erweitert. Noch nicht verfügbare Laserleistungen als auch kürzere Wellenlängen konnten dadurch untersucht werden. Die experimentellen Ergebnisse zeigen generell gute Übereinstimmung mit den numerischen Simulationen. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die Ergebnisse der numerischen Simulationen für einen Stahl- und Aluminiumwerkstoff zusehen. Vor allem für Aluminium ist bei hohen Leistungen eine Erhöhung des Nahtquerschnitts bei geringeren Wellenlängen festzustellen. Die Absorption der Laserleistung steigt mit geringerer Wellenlänge und führt zu einer Verringerung der Leistungsverluste und damit einer Energieeffizienzsteigerung des Laserstrahlprozesses. Zur Projektlaufzeit verfügbare Direkt-Diodenlaser emittieren Wellenlängen im Bereich von 900 bis 1000 nm. Grundsätzlich sind jedoch noch kürzere Wellenlängen realisierbar. Die im Projekt ERIS zur Verfügung stehenden Laserleistungen mit bis zu 4 kW erlauben eine Validierung des Modells über einen größeren Laserleistungsbereich. Das validierte und erweiterte Modell eignet sich anschließend ausgezeichnet zur Simulation von Strahloszillationsstrategien. Noch nicht verfügbare Laserleistungen als auch systemtechnisch noch nicht realisierbare Prozessparameter können im Modell abgebildet werden und damit Aussagen zu möglichen weiteren Energieeinsparpotentialen aufzeigen.



Abbildung 3. Experimentelle und numerische Ergebnisse für den Stahlwerkstoff 22MnB5 bei Variation der Laserleistung. Prozessparameter:  $z=0$  mm,  $v_f=2$  m/min,  $w_f=200$   $\mu$ m; Verwendetes Strahlprofil siehe Abbildung 1.

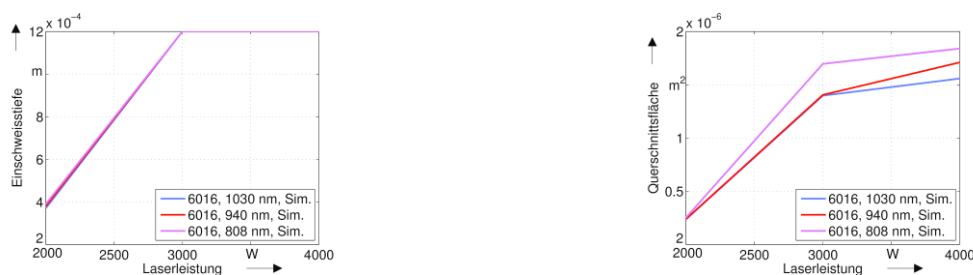


Abbildung 4: Ergebnisse der Prozesssimulation für den Aluminiumwerkstoff ENAW6016 bei Variation der Laserleistung und Wellenlängen von 1030 nm (Scheibenlaser), 940 nm (Prototyp Direkt-Diodenlaser) und 808 nm. Prozessparameter:  $z=0$  mm,  $v_f=4$  m/min,  $w_f=400$   $\mu$ m; Verwendetes Strahlprofil siehe Abbildung 1.

## 1.1 Projektbezogene Publikationen

### 1.1.1 Veröffentlichte Arbeiten aus Publikationsorganen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung, Buchveröffentlichungen sowie bereits zur Veröffentlichung angenommene, aber noch nicht veröffentlichte Arbeiten

Schmidt, M.; Otto, A.; Kägeler, C.: Analysis of YAG Laser Lap-Welding of Zinc Coated Steel Sheets. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 57/1, 2008, S.213-216

Brock, C.; Tenner, F.; Klämpfl, F.; Hohenstein, R.; Schmidt, M.: Detection of weld defects by high speed imaging of the vapour plume. In: Lasers in Manufacturing Conference 2013, Physics Procedia Vol. 41, 2013, S. 532-536

Otto, A.; Koch, H.; Leitz, K.-H.; Schmidt, M.: Numerical simulations – a versatile approach for better understanding dynamics in laser material processing. In: Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, München, S. 11-20

### 1.1.2 Andere Veröffentlichungen

Kägeler, C.; Grimm, A.; Otto, A.; Schmidt, M.: Frequency-modulated zero-gap laser beam welding of zinc-coated steel sheets in an overlap joint configuration. In: Proceedings of LiM 2009, S. 1-8

Koch, H.; Leitz, K.-H.; Otto, A.; Schmidt, M.: Process Analysis of Laser Beam Welding Steel Sheets in Overlap Configuration by Using a 3D Transient Simulation Model. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. 2009, S. 777-782

Koch, H.; Leitz, K.-H.; Otto, A. und Schmidt, M.: Simulation of Wavelength Dependent Effects in Laser Deep Penetration Welding. In: Proceedings of the 6th International Conference on Beam Technologies and Laser Application, 2009

Leitz, K.-H.; Dobler, M.; Kohl, S.; Koch, H.; Otto, A.; Schmidt, M.: Process Simulation in laser Material Processing – State of the Art and Outlook. In: Proceedings EALA – European Automotive Laser Applications 2012

Otto, A.; Schmidt, M.: Towards a Universal Numerical Simulation Model for Laser Material Processing. Physics Procedia, Band 5, 2010, S. 35-46

Schmidt, M.; Dobler, M.; Kohl, S.; Gürtler F.-J.; Leitz, K.-H.; Otto, A.: Multi-Physical Modeling of Laser Processing – Process Analysis and Optimization. In: Proceedings of the FISC 2012 – International Laser Symposium Fiber & Disc, 2012

Schmidt, M.; Grimm, A.; Kägeler, C.: Laser-Remote-Schweißen im Automobilbau. Ingenieurspiegel, 2008, S. 70-72

Schmidt, M.; Kägeler, C.: Prozessuntersuchung zum Laserstrahlschweißen verzinkter Karosseriebleche. In: Tagungsband Strahltechnik Band 36 – Laserbearbeitung: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends. Beiträge zum 6. Laser-Anwenderforum. 2009, S. 165-180

Tenner, F.; Brock, C.; Hohenstein, R.; Zalevsky, Z.; Schmidt, M.: Remote Optical Detection of the Fusion State in Laser Deep Penetration Welding. Physics Procedia, Band 41, 2013, S. 508-512

### 1.1.3 Patente

Entfällt – Derzeit keine vorhabenbezogenen Patente.

## 2 Ziele und Arbeitsprogramm

### 2.1 Voraussichtliche Gesamtdauer des Projekts

### 2.2 Ziele

Eine Projektlaufzeit von 2 Jahren ermöglicht das Energieeinsparpotential beim Remote-Laserstrahlschweißen durch die Verbindung von Direkt-Diodenlasern mit hoher Strahlqualität und im Vergleich zu konventionellen Strahlquellen hohem Steckdosenwirkungsgrad mit Scannersystemen zu erforschen und industriell nutzbar zu machen.

### 2.3 Arbeitsprogramm inkl. vorgesehener Untersuchungsmethoden

#### 2.3.1 AP1: Validierung eines Scannersystems zum Remoteschweißen mit Direkt-Diodenlaser hoher Strahlqualität

Im Projekt ERIS sollen Direkt-Diodenlaser mit einer hohen Strahlqualität zum Remote-Laserstrahlschweißen eingesetzt werden. Die Industriepartner TRUMPF GmbH + Co. KG, Teradiode Inc. und DirectPhotonics Industries GmbH stellen hierzu einen Direkt-Diodenlaser mit hoher Strahlqualität bzw. einem Strahlparameterprodukt  $< 10\text{mm} \cdot \text{mrad}$  zur Verfügung. Die Scanlab AG beteiligt sich mit einem Scanner-System, dessen Strahlführungssystem eine spezielle Breitbandbeschichtung für Direkt-Diodenlaser besitzt. Die Sill Optics GmbH & Co. KG wird die, auf den Wellenlängenbereich von Direkt-Diodenlaser abgestimmten, F-Theta Objektive für dieses Scanner-System fertigen und zur Verfügung stellen. Dieser Prototyp eines Scanner-Systems besitzt bei Auslieferung keinen Faseranschluß zum Anschluß einer Lichtleitfaser sowie keine Kollimation. Diese Weiterentwicklung hinsichtlich eines funktionierenden Scanner-Systems erfolgt innerhalb des Projekts. Daneben sollen die Strahlquellen aufgebaut und hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisiert werden. Relevante zu messende Kenngrößen sind hierbei die Laserstrahlleistung, die Strahleigenschaften wie Strahlprofil und Strahlparameterprodukt und der Steckdosenwirkungsgrad. Bei dem System erfolgt das Scannen vor einem F-Theta Objektiv, das den abgelenkten Strahl immer in der gleichen Ebene fokussiert. Die Laserstrahlleistung als auch die Strahlqualität sollen daher exemplarisch an einer Strahlquelle in Abhängigkeit der Position des Laserstrahls gemessen werden um Verluste in der Strahlführung oder auch Komponentenfehler im Scanner-System zu Beginn des Projekts feststellen zu können. Darüber hinaus soll nach der Faser als auch nach der Optik die Laserstrahlleistung bestimmt werden. Abschließend wird die Schein-,Wirk- und Blindleistung der Systeme bei unterschiedlichen Laserleistungen bestimmt. Das ermöglicht die Berechnung des Steckdosenwirkungsgrads anhand der Scheinleistung als auch der Wirkleistung. Je nach Anwender dieser Systeme kann die Blindleistung aufgrund firmeninterner vorhandener oder nicht vorhandener Blindleistungskompensation eine Rolle spielen und damit die Effizienz beeinflussen. Zusätzlich wird der Wirkungsgrad des, von der H.I.B Systemtechnik GmbH zur Verfügung gestellten, Kühlgeräts bestimmt damit anschließend der Gesamtwirkungsgrad der Anlage berechnet werden kann. Dieser Gesamtwirkungsgrad erlaubt die Bestimmung der maximalen Energieeinsparnis durch Einsatz effizienter Strahlquellen und Kühlgeräte im Vergleich zu bisher eingesetzten Geräten. Nach Validierung des Scannersystems und der Strahlquellen zum generellen Einsatz beim Remote-Laserstrahlschweißen werden experimentelle Untersuchungen zur Analyse der Fokuslagen der einzelnen wellenlängenspezifischen Diodenmodule durchgeführt. Parallel dazu wird das multiphysikalische Simulationsmodell um Module ergänzt, damit unterschiedliche Wellenlängen und deren Fokuslagen in der Prozesssimulation abgebildet werden können. Die Auswertung der Messdaten kann Unterschiede und mögliche Probleme aufzeigen. Darüber hinaus können die Daten zur Validierung der Simulation genutzt werden. Die Simulation bei noch höheren momentan nicht verfügbaren Leistungen kann das Potential über die zu erzielenden Schweißergebnisse aufzeigen.

**Meilenstein:** In AP1 wird die Weiterentwicklung eines Scannersystems und dessen Validierung für das Remote-Laserstrahlschweißen mit Direkt-Diodenlaser im Bereich von 900 bis 1000 nm erfolgt sein. Darüber hinaus wird experimentell der Einfluss mehrerer Fokuslagen bzw. Wellenlängen in einer Strahlquelle auf das Schweißergebnis untersucht sein. Numerische Simulationen dienen hierbei zur Bestimmung des Einflusses bei noch nicht verfügbaren höheren Laserleistungen.



### 2.3.2 AP2: Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Direkt-Diodenlaser zum Remoteschweißen

In AP2 werden experimentelle Untersuchungen zum Remoteschweißen durchgeführt. Metallografische Untersuchungen als auch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dienen zur Analyse der Schweißnahtqualität als auch der Prozessdynamik von konventionellen Strahlquellen und den in diesem Projekt verwendeten Direkt-Diodenlasern. Unterschiede als auch Gemeinsamkeiten können somit bestimmt werden. Die metallografischen Untersuchungen lassen die Berechnung von Kennwerten zur Charakterisierung der Energieeffizienz im Bezug zu den gewählten Prozessparametern und der gewählten Strahlquelle zu. Der Quotient aus benötigter Steckdosenleistung und erreichtem Nahtvolumen ergibt eine unter den Strahlquellen vergleichbare Größe. Außerdem soll durch die Variation der Prozessgrößen wie Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit das Prozessfenster zum Schweißen von Automobilwerkstoffen bestimmt werden. Blindschweißungen können in metallografischen Untersuchungen durch die Einschweißtiefe als auch das Nahtvolumen bzw. die Querschnittsfläche der Schweißnaht charakterisiert werden. Die Anbindungsbreite ist bei Überlappstößen, welche u.a. im Automobilbau eine gängige Stoßart zum Fügen zweier Bauteile darstellen, eine wichtige Größe zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht. Diese Größe dient als zusätzlicher Indikator für die Feststellung einer energieeffizient erzeugten Schweißnaht. Die AUDI AG wird bei der Bewertung der Schweißergebnisse mitwirken. Darüber hinaus dienen die experimentellen Ergebnisse zum Abgleich der Simulation. In AP4 werden unterschiedliche Strahloszillationsstrategien hinsichtlich einer möglichen Effizienzsteigerung analysiert. Dies erfolgt an einem Modell zur Prozesssimulation, das mit experimentellen Ergebnissen aus AP2 validiert wird.

**Meilenstein:** Mit Beendigung von AP2 werden Unterschiede oder auch Gemeinsamkeiten beim Remote-Laserstrahlschweißen mit Direkt-Diodenlasern zu konventionellen Strahlquellen aufgezeigt sein. Die Ergebnisse liefern ebenso das mögliche Energieeinsparpotential durch den Einsatz von Direkt-Diodenlaser. Darüber hinaus soll das Prozessfenster für das Remote-Laserstrahlschweißen von AUDI zur Verfügung gestellter Karosseriewerkstoffe mit Direkt-Diodenlasern bestimmt sein. Des Weiteren soll das Simulationsmodell mit den experimentellen Daten validiert sein um eine Grundlage für die Untersuchungen bezüglich der Strahloszillation in AP4 zu bilden.

**Abbruchmeilenstein:** Das Energieeinsparpotential wird durch die Strahlquelle, das Strahlführungssystem sowie die Prozessstrategie bestimmt. Nach einem Jahr Projektlaufzeit ist das Energieeinsparpotential der Strahlquelle, bedingt durch einen höheren elektrischen Wirkungsgrad im Vergleich zu konventionellen Strahlquellen, bestimmt. In diesem Zusammenhang ist ein Scannersystem zum Remoteschweißen von Automobilwerkstoffen entwickelt und in Betrieb genommen. Damit werden experimentelle Untersuchungen zum Remoteschweißen mit Direkt-Diodenlasern durchgeführt. Der Einfluss der Fokuslagen auf das Schweißergebnis und die optimale Fokusposition werden durch experimentelle und numerische Analysen bestimmt sein. Mit diesen grundlegenden Erkenntnissen kann ein Abbruchmeilenstein, bei Beendigung der Förderung zum 31.12.2016, gesetzt werden, der eine Aussage über die Einsatzmöglichkeit von Direkt-Diodenlasern zum Remoteschweißen zulässt. Die Ermittlung des Energieeinsparpotentials der Prozessstrategie durch Ausnutzung von Strahloszillationen und die Beurteilung der Strahlquellen zur Bestimmung der Produktivität und damit der Effizienz des Fertigungsprozesses kann nicht durchgeführt werden.

### 2.3.3 AP3: Beurteilung der Strahlquellen in Anlehnung an OEM-Beurteilungskriterien

Bei den experimentellen Untersuchungen in AP1 und AP2 werden grundlegende Untersuchungen zum Schweißprozess durchgeführt. In AP3 sollen dagegen verschiedene Tests in Anlehnung an die OEM-Beurteilungskriterien durchgeführt werden um die Strahlquelle bzw. das Strahlführungssystem bestehend aus Faser und Scanner-System zu bewerten. Eine zuverlässige Strahlquelle mit hoher Leistungsstabilität erhöht die Produktivität und damit die Effizienz des Fertigungsprozesses. Hierzu sollen grundlegende Größen wie z.B. die Kurzzeitstabilität, die maximale Laserleistung und die Strahlqualität gemessen werden. Die Kurzzeitstabilität trifft eine Aussage über die Variation der Laserleistung nach dem Einschalten innerhalb eines definierten Zeitfensters. Vor allem bei kurzen Schweißnähten



<b>AP 2:</b> Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Direkt-Diodenlaser zum Remoteschweißen							
<b>AP 3:</b> Beurteilung der Strahlquellen in Anlehnung an OEM Beurteilungskriterien							
<b>AP 4:</b> Experimentelle und simulationsbasierte Untersuchungen zur Effizienzsteigerung durch reduzierten Fokusradius und Strahloszillation							

### 3 Beantragte Module/Mittel

#### 3.1 Basismodul

##### 3.1.1 Personalmittel

Jahr	Qualifikation	Vergütung	Dauer (Monate)
1	1 wissenschaftliche/r Mitarbeiter/Mitarbeiterin	TV-L E13	1x12
	1 technische/r Angestellter/Angestellte	TV-L E10	1x2
	1 studentische Hilfskraft	ca. 12 h/Woche	1x12
	Summe	74.920 €	
2	1 wissenschaftliche/r Mitarbeiter/Mitarbeiterin	TV-L E13	1x12
	1 technische/r Angestellter/Angestellte	TV-L E10	1x2
	1 studentische Hilfskraft	ca. 12 h/Woche	1x12
	Summe	74.920 €	

Für die erfolgreiche Bearbeitung des umfangreichen Forschungsvorhabens wird ein/e wissenschaftliche/r Mitarbeiter/in benötigt. Sie/Er ist für die Planung und Durchführung der in Abschnitt 2 (Ziele und Arbeitsprogramm) formulierten Arbeitspunkte verantwortlich. Ihr/Ihm obliegt Planung, Durchführung und Überwachung der Forschungstätigkeiten, der theoretischen, simulationsbasierten und experimentellen Untersuchungen sowie der sich anschließenden Auswertungen und Interpretationen der Ergebnisse. Zudem koordiniert sie/er die Umsetzung der geplanten Aufbauten. Der/die technische Angestellte ist für die Aufbauten und die Erprobung der Testsysteme zuständig. Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Durchführung der Arbeiten insbesondere durch Recherche-, Implementierungs-, Versuchs- und Dokumentationsaufgaben.

##### 3.1.2 Sachmittel

Pos.	Kostenpunkt	Jahr 1	Jahr 2
1	Optomechanische Bauteile <sup>1</sup>	3.700 €	2.500 €
2	Mess- und Steuerungsrechner	1.200 €	-
3	Messtechnik (Miete) <sup>2</sup>	800 €	2.500 €
4	Metallographiebedarf/Probenanfertigung	1.000 €	1.500 €
5	Externe Festplatten zum Backup der Simulationen	800 €	1.000 €
6	Verbrauchsmaterialien	500 €	500 €
<b>Summe</b>		<b>8.000 €</b>	<b>8.000 €</b>

<sup>1</sup>Kollimatoreinheiten, Adapter, Blechverkleidung, Anbauteile, Normteile und weitere optomechanische Bauteile

<sup>2</sup>Messtechnik für Strahldiagnostik und Leistungsmessung der optischen und elektrischen Leistung

## 4 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

### 4.1 Angaben zur Dienststellung

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt  
Ordinarius des Lehrstuhls für Photonische Technologien  
Lehrstuhl für Photonische Technologien  
Konrad-Zuse-Straße 3/5  
D-91052 Erlangen  
Telefon: 09131/85-23456  
Fax: 09131/85-23234  
E-Mail: michael.schmidt@lpt.uni-erlangen.de

### 4.2 Angaben zu Projektbeteiligten

Die TRUMPF GmbH + Co. KG, TeraDiode Inc. und die DirectPhotonics Industries GmbH beteiligen sich aufgrund Ihrer Vorreiterrolle bei der Entwicklung und Herstellung von Direkt-Diodenlasern am Projekt. Sie unterstützen das Projekt durch Zurverfügungstellung jeweils eines Direkt-Diodenlasers im multi-kW Bereich mit hoher Strahlqualität. Die Beteiligung von drei Strahlquellenlieferanten ist aufgrund zweier zu untersuchender Besonderheiten bei Direkt-Diodenlasern notwendig. Zum einen soll damit die Leistungsfähigkeit der Breitbandbeschichtung des Scannersystems und damit die Einsatzfähigkeit bei unterschiedlichen Wellenlängenbereichen untersucht werden. Dabei kann durch Vergleich der Laserleistung vor und nach dem Scannersystem eine Aussage über die Transmissionseigenschaften der verbauten Strahlführungselemente bei unterschiedlichen Wellenlängenbereichen getroffen werden. Zum anderen können Einflüsse der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche auf das Schweißergebnis untersucht werden. Hierzu sollen Vergleichsschweißungen bei gleichen Prozessparametern Unterschiede oder auch Gemeinsamkeiten aufzeigen.

Die Scanlab AG beteiligt sich als Scannerhersteller in Zusammenarbeit mit der Sill Optics GmbH & Co. KG mit der Entwicklung eines Scanners zum Remoteschweißen mit Direkt-Diodenlasern. Sie wird hierzu ein Basissystem eines Scanners zur Verfügung stellen, das mit einer Breitbandbeschichtung versehen ist. Hinzukommend liefert Scanlab eine Lösung zur Ansteuerung des Scanners. Scanlab profitiert als bayerisches Unternehmen von der Validierung Ihres Scannersystems zum Remote-Laserstrahlschweißen mit Direkt-Diodenlasern.

Die H.I.B Systemtechnik GmbH beteiligt sich mit einem Kühlsystem an den experimentellen Untersuchungen. Das Kühlsystem ist für den Betrieb der Strahlquellen unverzichtbar. Der Wirkungsgrad des Kühlsystems beeinflusst den anlagentechnischen Gesamtwirkungsgrad und ist damit für die Bestimmung der insgesamt erreichbaren Energieeinsparung notwendig.

Die AUDI AG als Automobilhersteller verwertet die Projektergebnisse unmittelbar. Gewonnene Erkenntnisse hinsichtlich der möglichen Effizienzsteigerungen beim Remote-Laserstrahlschweißen können in der Produktion zur Senkung der benötigten elektrischen Energie in Bayern genutzt werden.

### 4.3 Zusammensetzung der Projektarbeitsgruppe

Die Projektarbeitsgruppe besteht neben drei Herstellern von Direkt-Diodenlasern und einem Hersteller von Scannersystemen zum Remoteschweißen auch aus einem direkten Anwender. Diese Zusammenarbeit ermöglicht die Verwertung der Ergebnisse bei den Lieferanten der Systeme als auch deren Anwender.

Der das Forschungsprojekt bearbeitende wissenschaftliche Mitarbeiter wird durch den Antragsteller Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt wissenschaftlich betreut. Der Projektbearbeiter ist in eine interdisziplinäre Forschungsgruppe bestehend aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern mit unterschiedlichem ingenieur- und naturwissenschaftlichem Hintergrund eingebunden:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt:

Prof. Michael Schmidt ist Ordinarius des Lehrstuhls für Photonische Technologien und Geschäftsführer der Bayerischen Laserzentrum GmbH. Er ist verantwortlich für die wissenschaftliche Betreuung und Anleitung des das Projekt bearbeitenden Doktoranden.

Artur Laukart, M.Sc.:

Herr Artur Laukart ist Gruppenmitglied der Gruppe Simulation und Modellierung am Lehrstuhl für Photonische Technologien. Er beschäftigt sich derzeit mit numerischen und experimentellen Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen mit Direkt-Diodenlasern hoher Strahlqualität und wird das Projekt bearbeiten.

Dipl.-Phys. Stefanie Kohl:

Frau Stefanie Kohl ist Gruppenmanagerin der Gruppe Simulation und Modellierung am Lehrstuhl für Photonische Technologien und beschäftigt sich derzeit neben der Modellierung thermomechanischer und fluiddynamischer Wechselwirkungen beim Laserstrahl-tiefschweißen. Sie wird den Wissenschaftler bei simulationsbasierten Analysen unterstützen.

Dipl.-Ing. Felix Tenner:

Herr Felix Tenner ist Gruppenmanager der Gruppe Sensorik, Regelung und Echtzeitsysteme am Lehrstuhl für Photonische Technologien und beschäftigt sich mit der stereoskopischen Prozessbeobachtung des Laserstrahlschweißens. Er wird den Wissenschaftler bei der Prozessanalyse durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen unterstützen.

Dipl.-Ing., Florian Hugger:

Herr Florian Hugger ist Gruppenmanager der Gruppe Prozesstechnik Metalle und internationaler Schweißfachingenieur am Bayerischen Laserzentrum und beschäftigt sich mit dem konventionellen als auch remotebasierten Laserstrahlschweißen von Metallen. Er wird den Wissenschaftler beratend bei den Untersuchungen zum Remoteschweißen unterstützen.

---

## 4.4 Budgetplanung

Budgetplanung über die gesamte Laufzeit von 2 Jahren mit den beantragten Mitteln sowie Leihgebühren und Materialkosten die während der Projektlaufzeit anfallen würden. In den kalkulierten Werten sind keine Anschaffungskosten sondern reine Leihgebühren enthalten. Die gesamte Industriebeteiligung beträgt 243.072 € pro Jahr, dies entspricht einer Förderquote von 25 %.

Institutsausgaben	1. Projektjahr	2. Projektjahr
Personalkosten	75.000 €	75.000 €
Sachmittel	8.000 €	8.000 €
<b>Aufwendungen für Gerätemiete</b>		
Scanlab AG (Puchheim, Bayern) (Leihgabe eines Scannersystems inklusive Ansteuerung und Software)	19.332 € (1.611 € pro Monat)	19.332 € (1.611 € pro Monat)
H.I.B Systemtechnik GmbH (Friedberg, Bayern) (Leihgabe eines Kühlungssystems für Laseranlagen)	6.240 € (520 € pro Monat)	6.240 € (520 € pro Monat)
Sill Optics GmbH & Co. KG (Wendelstein, Bayern) (Leihgabe von F-Theta Objektiven unterschiedlicher Brennweiten)	7.500 € (625 € pro Monat)	7.500 € (625 € pro Monat)
TeraDiode Inc. (Leihgabe eines multi-kW Direkt-Diodenlaser)	(kein deutsches Unternehmen)	(kein deutsches Unternehmen)
DirectPhotonics Industries GmbH (Leihgabe eines multi-kW Direkt-Diodenlaser)	85.000 € (7.083 € pro Monat)	85.000 € (7.083 € pro Monat)
TRUMPF GmbH + Co. KG (Leihgabe eines multi-kW Direkt-Diodenlaser)	110.000 € (9.167 € pro Monat)	110.000 € (9.167 € pro Monat)
<b>Versuchsmaterialien und fachliche Beratung</b>		
AUDI AG (Ingolstadt, Bayern) (Bereitstellung von Versuchsmaterialien und Bewertung der Versuchsergebnisse)	15.000 €	15.000 €
<b>Aufwendungen der Industriepartner</b>	<b>243.072 €</b>	<b>243.072 €</b>
<b>Beantragte Fördermittel des Instituts (Förderquote)</b>	<b>83.000 € (25 %)</b>	<b>83.000 € (25 %)</b>

<b>Summe der Aufwendungen bei den Industriepartnern und dem Institut</b>	326.072 €	326.072 €
--	-----------	-----------

## 5 Eigenevaluation

Der Zeitpunkt und Inhalt von Meilensteinen ist im Arbeitsplan in Abschnitt 2.3 integriert.

## 6 Ergänzende Erklärungen

### 6.1 Antrag an anderer Stelle

Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn wir einen solchen Antrag stellen, werden wir darüber unverzüglich informieren.

## 7 Literatur

- [1] S. Heinemann, H. Fritsche, B. Kruschke, T. Schmidt, and W. Gries. Compact high brightness diode laser emitting 500 w from a 100  $\mu\text{m}$  fiber. *Proc. SPIE*, 8605, 2013.
- [2] R. K. Huang, B. Chann, J. Burgess, and M. Kaiman. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, co2, and solid state lasers. *High-Power Diode Laser Technology and Applications*, (Proc. SPIE 8241), 2012.
- [3] G. C. Rodrigues, H. Vanhove, and J. R. Dufloy. Direct diode lasers for industrial laser cutting: a performance comparison with conventional fiber and co2 technologies. *Physics Procedia*, 56:901–908, 2014.
- [4] M. Graudenz and M. Heitmanek. Laser tools in the manufacturing process - joining technology trends in body manufacturing at audi. *Laser Technik Journal*, 4:24–27, 2012.
- [5] F. Schmitt. *Laserstrahl-Mikroschweißen mit Strahlquellen hoher Brillanz und örtlicher Leistungsmodulation*. PhD thesis, RWTH Aachen, 2012.
- [6] O. Berend, H. Haferkamp, O. Meier, and L. Engelbrecht. High-frequency beam oscillating to increase the process stability during laser welding with high melt pool dynamics. *Proceedings of the 24th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2005.
- [7] R. Poprawe and F. Schmitt. Systemtechnik zur örtlichen leistungsmodulation beim laserstrahl-mikroschweißen. *4. Kolloquium Mikroproduktion*, 2009.
- [8] C. Thiel, R. Weber, J. Johannsen, and T. Graf. Stabilization of laser welding process against focal shift effects using beam manipulation. *Physics Procedia*, 41:209–215, 2013.
- [9] M. Schweier, J. F. Heins, M. W. Haubold, and M. F. Zäh. Spatter formation in laser welding with beam oscillation. *Proceedings of LiM*, pages 11–20, 2013.
- [10] B. Kruschke, H. Fritsche, H. Kern, T. Hagen, U. Pahl, R. Koch, A. Grohe, and W. Gries. Beam combining techniques for high-power high-brightness diode lasers. *Proc. SPIE*, 9346, 2015.
- [11] A. Otto, H. Koch, K.-H. Leitz, and M. Schmidt. Numerical simulations - a versatile approach for better understanding dynamics in laser material processing. *Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing (München)*, pages 11–20, 2011.

- [12] H. Koch, K.-H. Leitz, A. Otto, and M. Schmidt. Process analysis of laser beam welding steel sheets in overlap configuration by using a 3d transient simulation model. *Proceedings of the 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, pages 777–782, 2009.
  - [13] K.-H. Leitz, M. Dobler, S. Kohl, H. Koch, A. Otto, and M. Schmidt. Process simulation in laser material processing - state of the art and outlook. *European Automotive Laser Applications*, 2012.
  - [14] J. P. Bergmann, A. Patschger, and A. Bastick. Enhancing process efficiency due to high focusing with high brightness lasers - applicability and constraints. *Physics Procedia*, 12, 2011.
-