

Fügen von Glas und Metallbauteilen mit Hilfe von Laserstrahlung (AiF-Nr. 14414 N)

L. Richter, Laser Zentrum Hannover e.V

Vortrag im Fachausschuss IV der DGG am 11. Oktober 2007 in Würzburg

### 1. Einleitung

Im Bereich der Glasverarbeitung ist das Fügen von stofflich unterschiedlichen Partnern funktionsbedingt erforderlich. Bisher erfolgt die Fertigung solcher Bauteile in weitestgehend manuellen Arbeitsschritten durch den Glasapparatebauer. Aufgrund dieser händischen Fertigungsmethode und der Werkstoffeigenschaften des Glases sind in der Produktion trotz des qualifizierten und erfahrenen Fachpersonals deutliche Schwankungen in der Produktqualität und -quantität zu verzeichnen. Um den Anforderungen hinsichtlich Wettbewerb, Qualität und Kosten in Zukunft gerecht zu werden, muss der manuelle und bisher kaum automatisierte Prozess weiterentwickelt werden. Dieser Forschungsbedarf wurde von der Forschungsgemeinschaft Technik und Glas e.V. Bronnbach erkannt. Zusammen mit dem Laser Zentrum Hannover e.V. hat man sich dieser Aufgabe gestellt, um das Produktionsverfahren zu analysieren und in einem nächsten Schritt zu automatisieren. Dabei erfolgte die Substitution des Gasbrenners durch industrietaugliche Laserstrahlquellen sowie einer prozessoptimierten Strahlführung und -formung. Die Nachteile des Gasbrenners wie Kondenswasserniederschlag, schwankender Energieeintrag, ungenaue Erwärmungszone, hohe Wärmestrahlung und für den Glasapparatebauer gesundheitsschädliche UV-Strahlung können so eliminiert werden. Durch die Verknüpfung von Strahlquelle und den gesteuerten Handhabungssystemen wurde eine Prozessentwicklung zur Überführung des Handarbeitsprozesses in eine automatisierte Fertigung ermöglicht. Mit dieser Entwicklungsumgebung konnten verschiedene Applikationen aus dem Bereich der Rohr- und Flachglasverarbeitung, wie z.B. für die Herstellung von Solarthermiekollektoren untersucht werden.

### 2. Energiequellenvergleich Laser und Flamme

Für die Überführung der Fügetechnologie von der Flamme - zur Lasererwärmung ist eine Gegenüberstellung der beiden Energiequellen notwendig. Dazu erfolgt die Betrachtung reduziert auf die Erwärmung von Glasmaterialien.



Abbildung 1: Flammenerwärmung

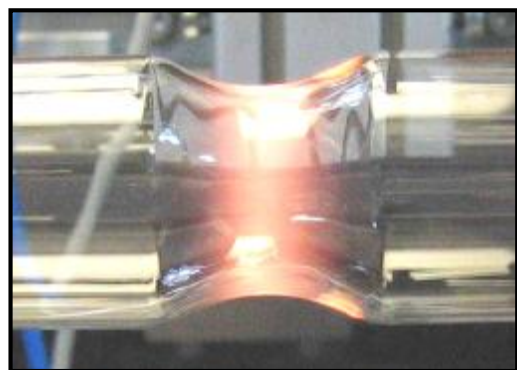


Abbildung 2: Lasererwärmung

Bei der direkten Gegenüberstellung ergeben sich vorteilhaft für die Lasererwärmung eine:

- reduzierte Emission während der Erwärmung
- geringere Verluste am Werkstück bei der Erwärmung
- keine chemische Beeinflussung der Bauteile (Kondenswasser, Ruß)
- präzise Temperaturkontrolle und -führung
- definierter Erwärmungsbereich
- steuerbare Intensitätsverteilung
- keine UV-Streustrahlung

### 3. Fügen von Solarreceivern

Die Verbindungstechnologie von Glas und Metall ohne Zusatzwerkstoffe ist eine, insbesondere im Bereich ausdehnungsangepasster Werkstoffkombinationen, bekannte Technologie. Aktuell sind solche Verbindungen an Solarreceivern, Abb. 3, für Parabolrinnenkraftwerke, Abb. 4, zu finden, mit dem Anspruch einer hochvakuumtauglichen Verbindung mit einer Standzeit von 20 Jahren.

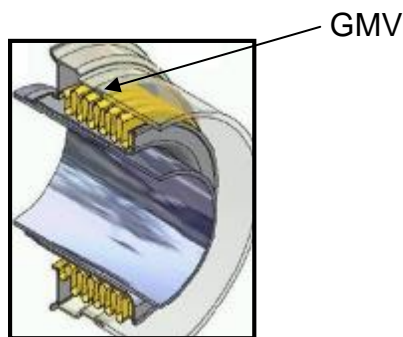


Abbildung 3: Solarreceiver



Abbildung 4: Receiverstation

Die Grundlage dieser Glas-Metall-Verbindung bildet eine oxydische Direktverbindung zwischen dem Glas 8800 und der FeNi- Legierung Kovar. In Tabelle 1 wird ein Überblick über die thermisch relevanten Werkstoffeigenschaften gegeben.

Tabelle 1: Werkstoffspezifikation Solarreceiver

	thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha \cdot [10^{-6} K^{-1}]$	Transformationstemperatur [ $T_{10}^4$ ]
Kovar 1.3981	20 °C ...300 °C: 5,4 20 °C ...600 °C: 8,0	425 °C (Curiepunkt)
Glas 8800	20 °C ...300 °C: 5,5	ca. 565 °C ca. 1175 °C

Des Weiteren sind die geometrischen Verhältnisse von Interesse. Das Glasrohr hat einen Außendurchmesser von  $d = 125 \pm 2$  mm und eine Wandstärke von  $s = 3$  mm. Der metallische Fügepartner weist einen Außendurchmesser von  $d = 123 \pm 0,2$  mm und eine Wandstärke von  $s = 1$  mm auf. Die Verbindung soll durch stirnseitiges Fügen des Metallringes in das Glasrohr mit einer axialen Überlappung von ca.  $x \approx 3$  mm erfolgen.

Zur Umsetzung des Fügeprozesses muss das Glas, unabhängig von der Energiequelle, in einen niederviskosen aber geometrisch stabilen Zustand überführt werden. Anschließend dringt der metallische Partner in das Glas ein. Abschließend ist die Kühlung der Verbindung auf Raumtemperatur ein wesentlicher Bestandteil des Prozesses um eine spannungsreduzierte Verbindung sowie ein lagerfähiges Glasbauteil zu erreichen.

Die Entwicklung laserbasierter Glas-Metall-Verbindungen wird durch eine äußerst präzise Systemtechnologie realisiert. Dazu wird eine pyrometrische Temperaturüberwachung beider Werkstoffe eingesetzt, welche die Regelung der Prozesstemperatur ermöglicht und die Weiterentwicklung des Fügeverfahrens von der Flamme zur Laserstrahlung erlaubt. Die Bauteilhandhabung wird durch eine Glasdrehbank mit lineardirektangetriebenen Translationsachsen sowie mechanisch gekoppelter Spannfutter für die Rotation umgesetzt. Die Steuerung der Anlage erfolgt durch eine Software, welche sowohl die Bewegungsachsen als auch die regelungstechnischen Komponenten beinhaltet.

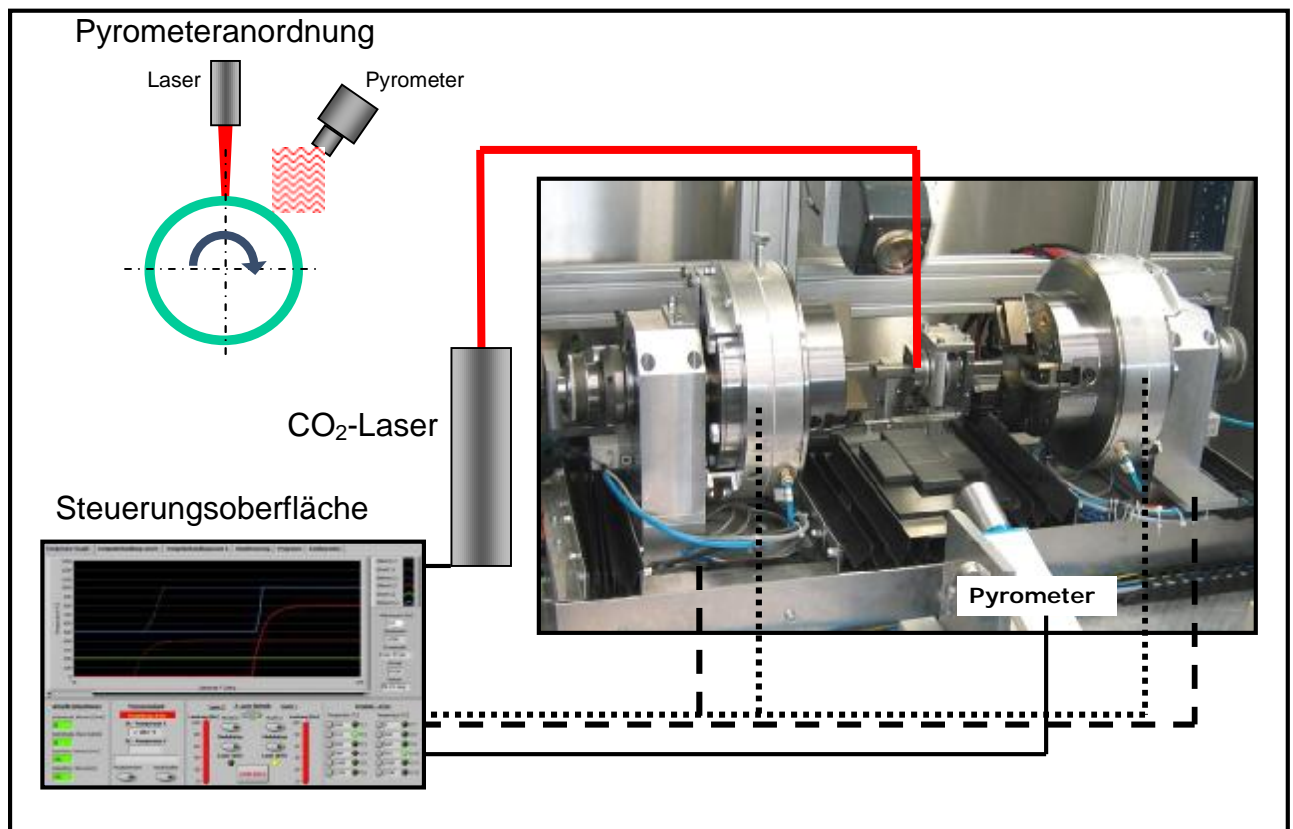
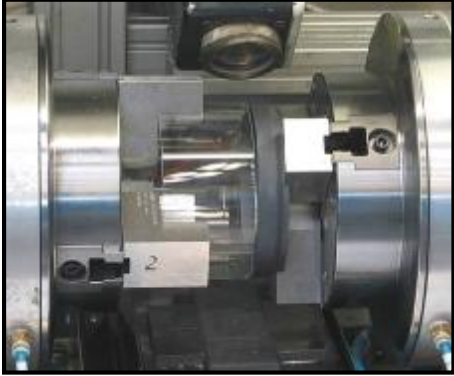
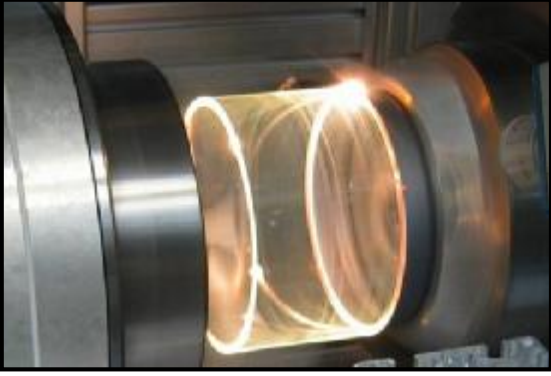
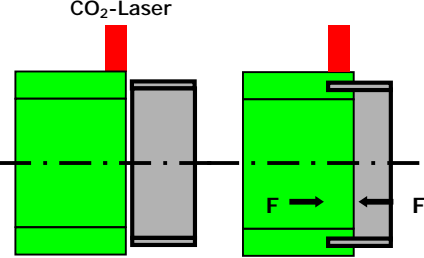

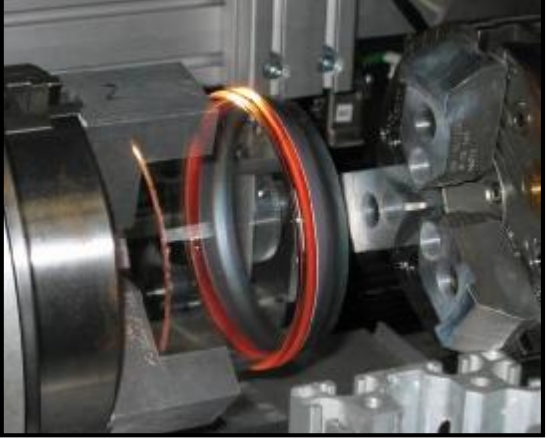


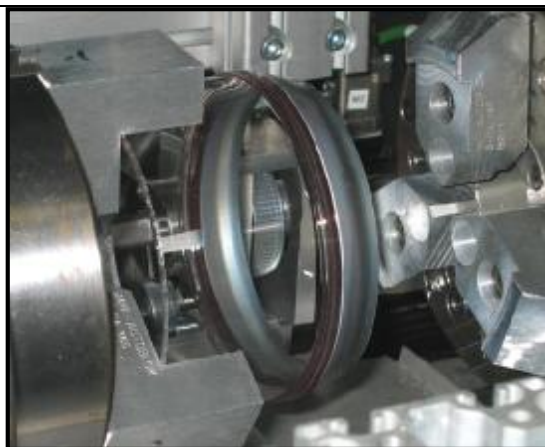
Abbildung 5: Bearbeitungsanordnung

Nachfolgend wird der Prozessablauf anhand von Momentaufnahmen der signifikantesten Prozessschritte mit einer kurzen Erläuterung gezeigt.

<p>Ausgangssituation</p>	<p>Erwärmen des Rohrglases unter Rotation auf Verarbeitungstemperatur</p>
	
<p>Kontaktieren der Partner bei konstanten Prozessbedingungen und Fügen beider Bauteile.</p> <p>CO<sub>2</sub>-Laser</p> 	
<p>Reduktion der mechanischen Spannungen durch einseitiges Lösen des Spannfutters. Definierte Kühlung des Bauteiles zur Reduktion der Kühlspannungen im Glaskörper.</p>	



Bauteil nach Kühlung bei Raumtemperatur.



Nachfolgende Abbildung zeigt eine erfolgreich lasererzeugte Verbindung für Solarreceiver.



Abbildung 6: lasergefügte Solarreceiverkappe

#### 4. Fügen von Floatglas

Die Verbindungen von Floatgläsern und Metallen ist aus der Historie als meist thermisch angepasste Bandeinschmelzung bekannt und häufig durch großflächige Erwärmungsquellen wie Induktion oder lokale Erwärmung (z.B. Flammen) umgesetzt. Die Glasbauteile müssen insgesamt erwärmt und damit in einen spannungsarmen Zustand versetzt werden. An dieser Stelle zeichnet sich ein Problemfeld ab, da eine solche Bearbeitung in entsprechend temperaturangepasster Umgebung stattfinden muss. Bisher kommen dazu Öfen oder leistungsstarke Brennersysteme zum Einsatz. Im vorliegenden Fall wird ein Ofensystem zur Vorwärmung nahe der Transformationstemperatur herangezogen. Materialeitig kommen in der Regel Flachgläser mit definierter thermischer Dehnung wie beispielsweise Borofloat oder elektromagnetisch hochtransparente Gläser zum Einsatz. Ziel bei der Umsetzung von Glas-Metall-Verbindungen unter Einwirkung von Laserstrahlung war hier der Einsatz des Massenglases „Standardfloat“ bei Variation der metallischen Partner. Dabei sind die wichtigsten Prozessparameter die Einschmelzzeit und die Festigkeit der Verbindung, bei hinreichender Reproduzierbarkeit. Weiterhin steht der Erhalt bzw. die möglichst geringe Veränderung der aus dem Floatprozess vorhandenen Oberfläche mit sehr geringer Rauheit und Welligkeit im Vordergrund. Für die angestrebten Glas-Metall-Verbindungen können dabei die vielfältigsten Einsatzgebiete von der Architektur als Fassadenanker bis zur Dichtung von Schaugläsern lokalisiert werden.

Der Einschmelzpartner für die laserbasierte Verbindung ist eine Fe-Ni-Legierungen welche oxydbildend eingesetzt werden. Der thermische Ausdehnungskoeffizient befindet sich in der Größenordnung von Floatglas, so dass diese Metalle mit Kalk-Natron-Silikatglas zu fügen sind. Es findet bei allen nachfolgend erläuterten Untersu-

chungen keine gesonderte Voroxidation der Metalle statt. Sie werden im blanken gereinigten Zustand in den Ofenraum gebracht und unter Stickstoffatmosphäre auf 520 °C erwärmt. Eine unkontrollierte Oxidation der Metalle kann dabei weitgehend verhindert werden. Tabelle 2 zeigt die Eigenschaften der Paarung.

Tabelle 2: Werkstoffspezifikation 2.4480-Floatglas

	Therm. Ausdehnungskoeffizient $\alpha [10^{-6}K^{-1}]$	Transformationstemp. [T <sub>10</sub> <sup>4</sup> ]
Metall – 2.4480	20 °C ...100 °C: 10,3 20 °C ...600 °C: 11,2	475 °C Curiepunkt
Floatglas	20 °C ...100 °C: 7,8 20 °C ...550 °C: 9,1	ca. 525 °C ca. 1040 °C

Die Verbindung wird bei dieser Materialkombination mit einem Laserscannersystem und einem Yb:YAG –Laser realisiert. Die Laserleistung wird mit maximal  $P_{av} = 500 \text{ W}$  mit Blick auf die Investitionskosten limitiert. Die emittierte Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1030 \text{ nm}$  wird zur Erwärmung des metallischen Fügepartners eingesetzt, an dessen Oberfläche eine nahezu vollständige Absorption stattfindet. Vorteil bei dieser Bearbeitungsanordnung ist ein großer Bearbeitungsabstand von bis zu 1000 mm zum Schutz der Laseroptiken vor hohen Umgebungstemperaturen bei Verfahrensgeschwindigkeiten auf den Bauteilen von bis zu  $500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  @1000 mm. Insbesondere für den Schritt der Positionierung zwischen einzelnen Einschmelzungen ist diese Geschwindigkeit relevant, da der Gesamtproduktionsdurchsatz durch Minimieren der „Strahl-Aus-Zeiten“ erhöht wird.

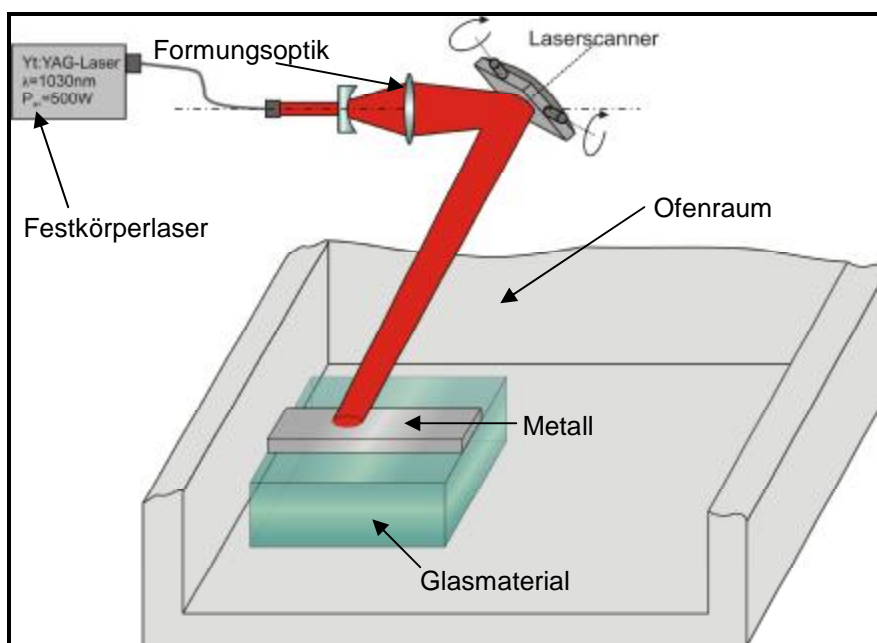


Abbildung 7: Applikationsanordnung schematisch

Durch die Variation der Streckenenergie kann die Charakteristik der Verbindung stark variiert werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einen Ergebnissauszug für die Verbindung von 4 mm dicken Floatglas und 1,5 mm dicken Metall.

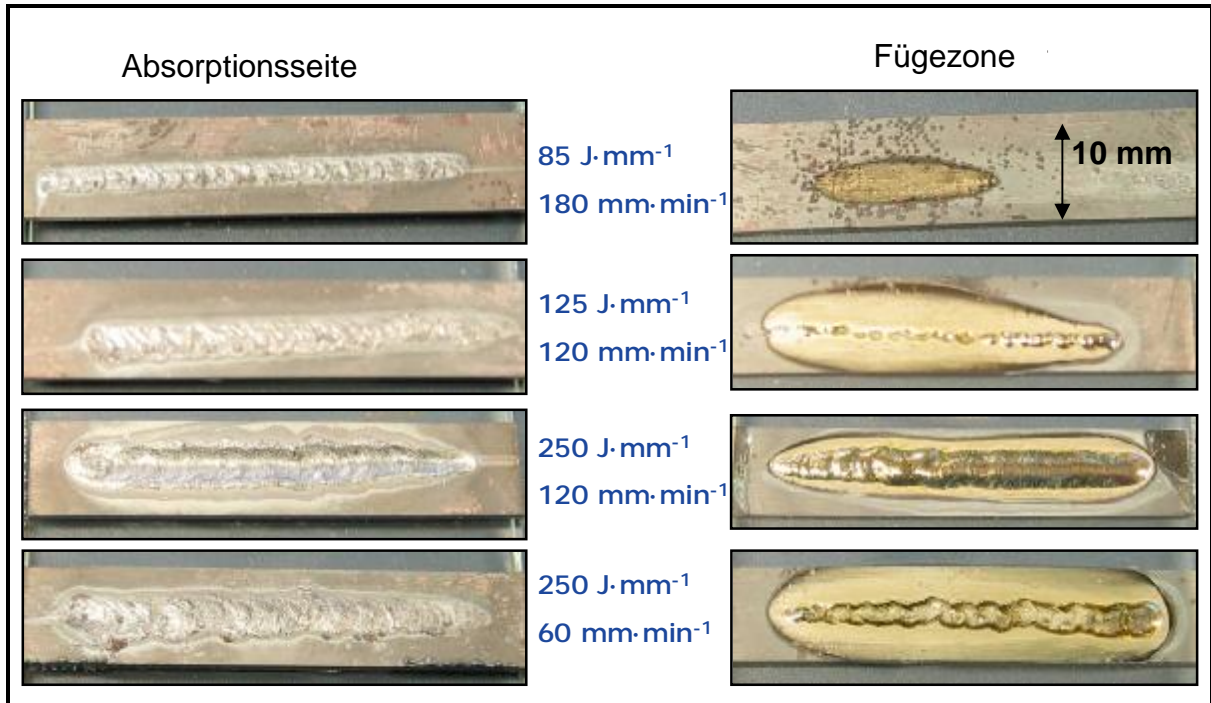


Abbildung 8: Ergebnisse der Parameterstudie

Zur Überprüfung der mittels Lasertechnologie erreichten Verbindungsfestigkeiten wurden normierte Glas-Metall-Verbindungen im Druckschertest geprüft. Hierzu wurde eine metallische Ronde  $d=14\text{ mm}$  vollflächig mit dem Glasmaterial verbunden. Der Prozess wird innerhalb einer Einschmelzzeit von  $t=5\text{ s}$  realisiert, wobei Spitzentemperaturen am Metallwerkstoff von  $T=1200\dots1250\text{ °C}$  erreicht werden. Der Prozessfortschritt ist in Abb. 9 visualisiert.

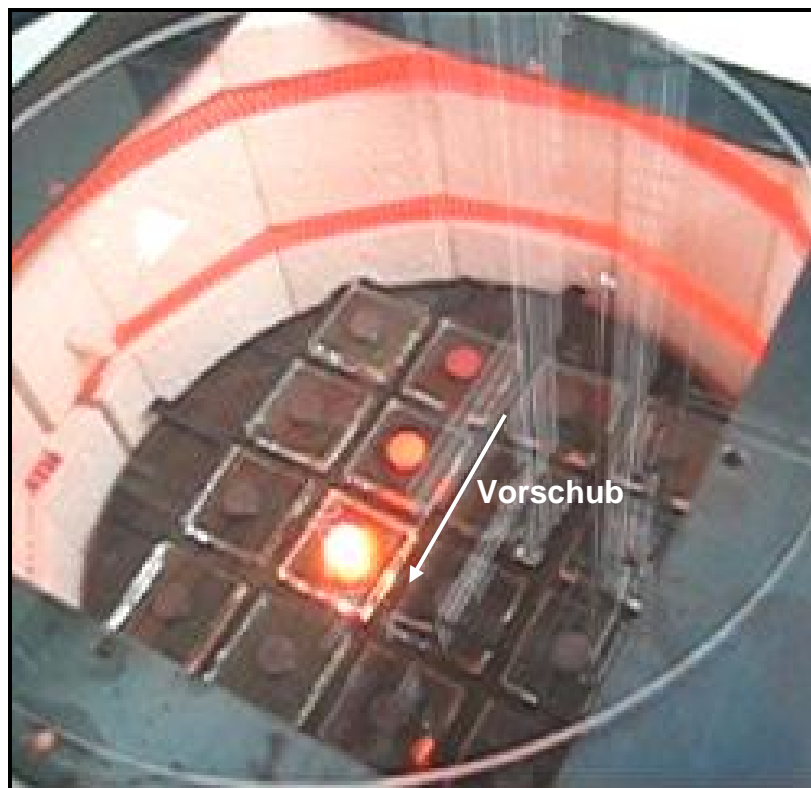


Abbildung 9: Einschmelzvorgang

Beispielhaft ist in Abb. 10 und Abb. 11 eine Verbindung gezeigt. Es wird deutlich, dass die Verbindungszone eine helle Verfärbung für eine angeglaste Verbindung zeigt. Die erreichten Verbindungen wurden dann im Druckscherversuch mit dem Vorschub  $v = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  bis zum Bruch belastet.

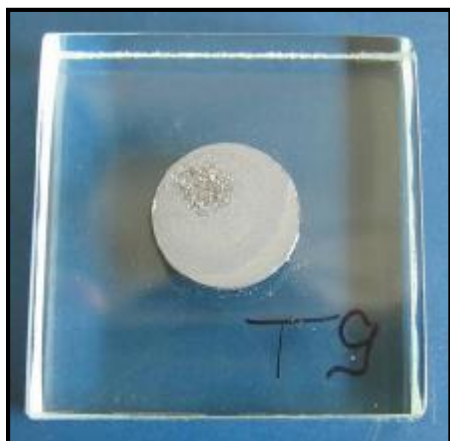


Abbildung 10: Absorptionsseite

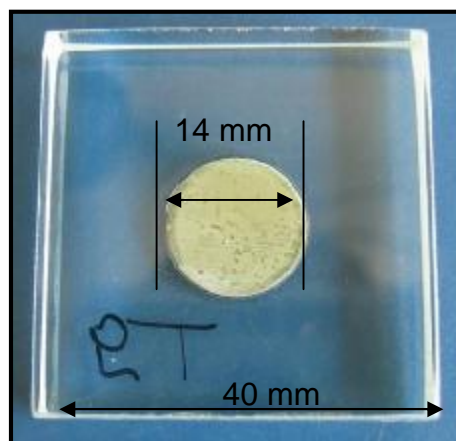


Abbildung 11: Fügezone

Im nachfolgenden Druckscherversuch konnte ein sprödbrechiges Verhalten, Abb. 12 detektiert werden, da das Versagen idR im Glasmaterial stattfand, Abb. 13.

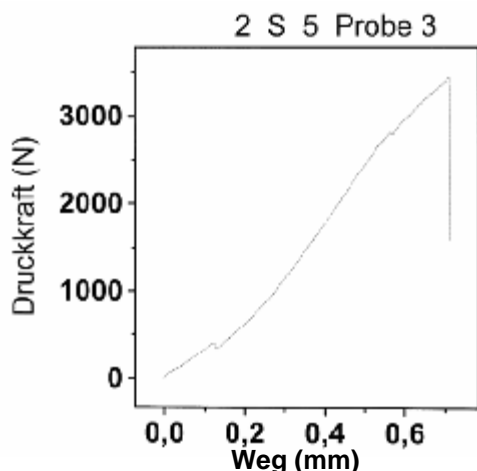


Abbildung 12: Kraft-Weg-Verlauf



Abbildung 13: Bruchbild

## 5. Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes war die Substitution der herkömmlichen Energiequelle durch Laserstrahlung und die Automatisierung der Handarbeit bzw. der halbautomatischen Prozesse zum Fügen von Glas und Metallbauteilen, sowohl im Bereich zylindrischer als auch ebener Glasbauteile. Hierbei erfolgte die Betrachtung an thermisch angepassten Verbindungen sowie Materialkombinationen unterschiedlicher thermischer Dehnung.

Zum Fügen von Halbzeugen rotationssymmetrischer Geometrie wurde eine Werkstoffkombination mit angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten im Bereich von  $\alpha = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ausgewählt. Der bisherige industrielle Prozess wurde analysiert und erfolgreich in eine laserbasierte automatisierte Fertigungsstrategie überführt. Eine CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquelle ermöglicht eine effiziente und präzise temperaturgeführte Erwärmung und in Kombination mit einer kinematischen Einheit die reproduzierbare Verbindung der heterogenen Partner. Dabei konnte eine Zeitersparnis von ca. 50% am Praxisbeispiel von Kollektorkappen für solarthermische Kraftwerke er-



zielt werden. Die Analyse der Bindungsmechanismen von Glas-Metall-Verbindungen war nicht Bestandteil der produktionstechnisch orientierten Forschungsaufgabe.

Im Bereich von Flachgläsern wurden Verbindungen insbesondere mit kostengünstigem Floatglas und ausdehnungsangepassten FeNi- Legierungen erreicht. Unter Einsatz von Festkörperlaserstrahlung wurde die Abbildungsschärfe des Lasers in Kombination mit einer zur Spannungsreduktion angepassten Umgebungstemperatur genutzt. Die erreichten Verbindungen sind im Vergleich zur herkömmlichen Fertigung geometrisch definierter und weisen eine Festigkeit limitiert durch den Glaswerkstoff auf. Es wurden sowohl Punkt- als auch Linienverbindungen realisiert, ähnlich denen der metallischen Schweißtechnik mit Vorschüben bis zu  $v_f = 300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Die mittels laserbasierter Fertigung erreichten Verbindungen können mit herkömmlichen Energiequellen wie Flammen nicht erreicht werden. Insbesondere für Bauteile deren Temperaturbelastung lokal nur begrenzt zulässig ist bzw. die hohe Anforderungen an die Formstabilität haben, ist das Laserverfahren überlegen.

Eine Übertragung der Forschungsergebnisse mit ausdehnungsangepassten Werkstoffen ist als kurzfristig umsetzbar einzustufen. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit Floatglas zeigen die Machbarkeit und Möglichkeiten des Laserverfahrens für Bandeinschmelzungen. Es stehen die forschungsbasierten Grundkenntnisse zur Verfügung, so dass die Entwicklung von Endprodukten unter Einsatz dieser Erkenntnisse begonnen werden kann und eine mittelfristige Integration in die Fertigung auch hier zu erwarten ist.