

HVG-Mitteilung Nr. 2106

Fügen von Glas und Metallbauteilen mittels Laserstrahlung
(AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14414 N)
L.Richter, U.Stute, Laser Zentrum Hannover e.V.

1. Einleitung

Die Verbindung von Gläsern mit Metallen findet in immer weiteren Produktgebieten aufgrund der speziellen Eigenschaften der einzelnen Fügepartner Anwendung. Mit einer zukünftigen noch stärkeren Marktetablierung der Produkte ist deshalb zu rechnen. Die dazu heute eingesetzten Produktionsverfahren sind ebenso vielfältig wie die Anwendungen der Produkte selbst. So kommt neben dem Kleben, Löten sowie Ultraschallfügen immer noch die traditionelle Technologie des Anglasens zum Einsatz. Dieses thermische Verfahren eignet sich besonders für rotationssymmetrische Verbindungen von Stoffpaarungen geringer Unterschiede des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Vorteile des Verfahrens und der erzeugten Verbindung sind Hochvakuumtauglichkeit, UV-Beständigkeit, gute Recyclbarkeit sowie Temperaturstabilität. Derzeit wird das Verfahren in wenig oder nur teilautomatisierter Fertigung in Kombination mit den konventionellen Brenntechniken eingesetzt. Eine Prozessüberwachung findet dabei kaum statt. Ein wesentlicher Erfolgs- und Qualitätsfaktor ist hierbei die Fachkraft, deren Erfahrung maßgebend für die Lebensdauer des Produktes ist. Da die Produkte sich auf dem kostendrückenden und qualitätsfordernenden Weltmarkt behaupten müssen, ist eine Weiterentwicklung der Prozesstechnologie notwendig.

Zur umfassenden Deckung des Weiterentwicklungsbedarfes wird ein neuartiger Ansatz verfolgt. Das Fügeverfahren soll durch Einsatz von modernen Komponenten höchster Präzision weiter automatisiert und in der Qualität gesteigert werden. Dabei sollen wellenlängendifferente Laserstrahlquellen zur Erwärmung der Werkstoffe eingesetzt werden und den Gasbrenner substituieren. Der Vorteil der Lasertechnologie gegenüber der Brenner-technik ist u.a. die Prozessreinheit, was das Produktspektrum bis in den medizinischen Bereich erweitert. Der Beitrag zeigt das Konzept zur lasergestützten Automatisierung der Fügeprozesse zwischen Glas und Metall sowie die ersten Ergebnisse.

2. Systemtechnik

Zur systemseitigen Bewältigung der Aufgabe kommen ausgewählte Hochleistungskomponenten in einem traditionellen Maschinenkonzept zum Einsatz, welche ihre Industrietauglichkeit in jüngerer Vergangenheit bewiesen haben. Die Systemtechnik gliedert sich in folgende Hauptbestandteile: das Handhabungssystem, die Strahl- und Messtechnik sowie das Softwaresystem. Nachfolgend werden die Einzelkomponenten erläutert.

2.1 Handhabungssystem

Die Handhabung der Bauteile wird von einem flexiblen Maschinenkonzept in Form einer Gleichlaufmaschine übernommen. Zwei gegenüberliegende Spannfüter können Bauteile bis zu einem Durchmesser von $d=150$ mm ebenso wie Bauteile vom Durchmesser $d=1$ mm aufnehmen. Die kinematischen Komponenten sind durch moderne Rotations- und linear direkt angetriebene Translationsachsen umgesetzt. Diese Komponenten garantieren eine hohe Dynamik und eine hochgradige Präzision während der Bearbeitung. Die Besonderheit ist die getrennte rotatorische Ansteuerung der Spannfüter, so dass theoretisch ungleiche Drehzahlen- und Drehrichtungen an den Spannfütern möglich sind. Die Synchronisation der Spannfüter für eine Gleichlaufbearbeitung erfolgt elektronisch. Bild 1 zeigt das Maschinenkonzept.

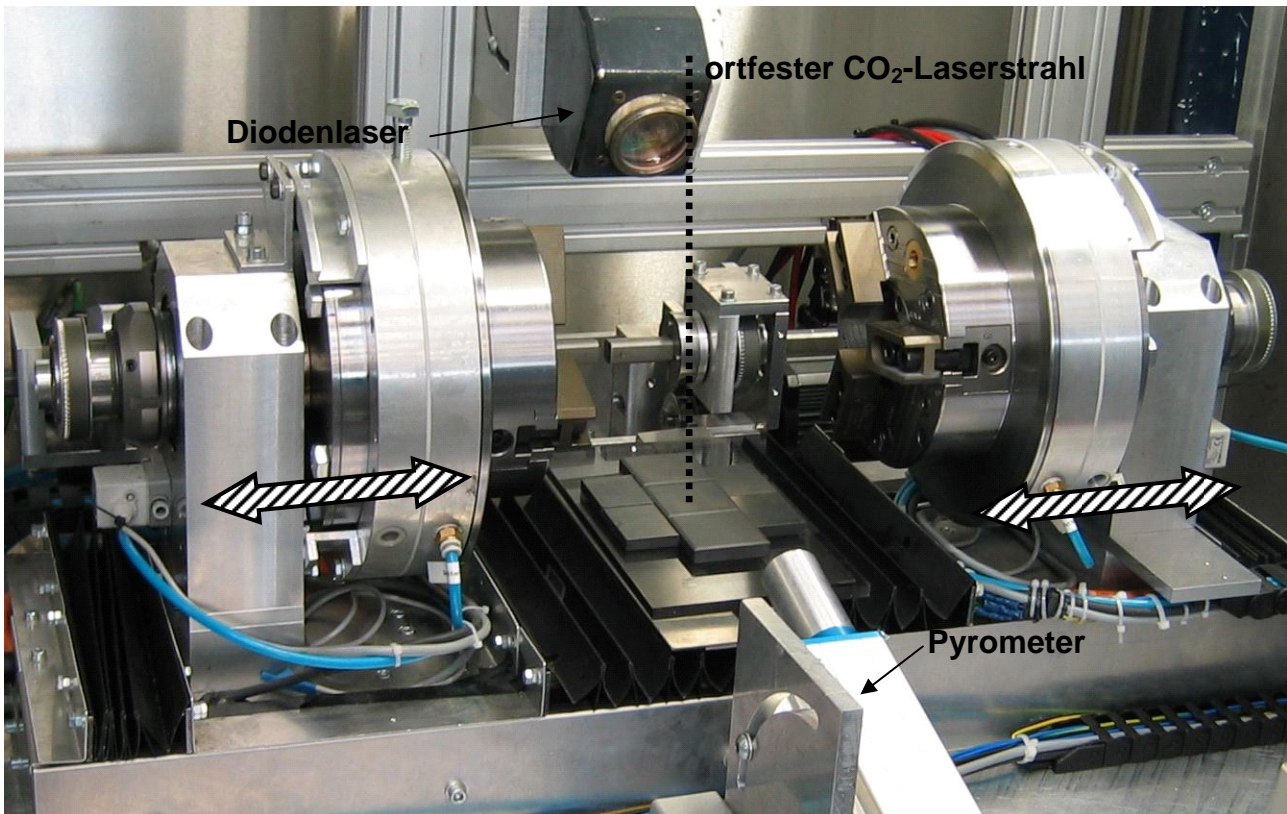


Bild 1: Entwicklungsstand für Glas-Metall-Verbindungen.

2.2 Lasersystemtechnik

Insbesondere die Auswahl der Laserstrahlquellen erfolgte unter dem Gesichtspunkt, dass die Ergebnisse der Forschungsarbeit im Anschluss in die industrielle Praxis transferiert werden können. Es werden für die Erwärmung der Bauteile zwei unterschiedliche Lasertypen eingesetzt, so dass es sich um ein kombiniertes Laserverfahren handelt. Zum einen ein CO₂-Laser zum anderen ein Diodenlaser. Der wesentliche Unterschied der Laserstrahlquellen ist die Wellenlänge der emittierten Strahlung. So wird durch den CO₂-Laser der ferne infrarote Bereich (FIR) bei $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ abgedeckt. In Bezug auf den Werkstoff Glas, kommt es hier zu einer Vollabsorption an der Glasoberfläche. Die Erwärmung findet innerhalb einer Eindringtiefe von $d_{\text{ein}} \sim 10 \mu\text{m}$ statt. Eine Volumenerwärmung von Gläsern deren Wandstärke über der Eindringtiefe liegt erfolgt durch Wärmeleitung. Im Vergleich dazu ist die Wechselwirkung von Diodenlaserstrahlung, deren Wellenlänge von $\lambda = 940 \text{ nm}$ im nah infraroten Bereich (NIR) zu finden ist, gegenüber Gläsern als eher transparent zu beschreiben. Es werden lediglich geringe Anteile der Strahlung im Glas absorbiert. Die beschriebenen Effekte lassen sich mittels Bild 2 visualisieren und fußen auf dem Kirchhoff'schen Gesetz [1]. Die Reflexionsanteile der Laserstrahlung an Glasoberflächen sind als gering zu betrachten. Der Zusammenhang vereinfacht sich somit auf die Anteile der Absorption und Transmission.

$$100\% = \text{Absorption} + \text{Reflexion} + \text{Transmission}$$

[1]

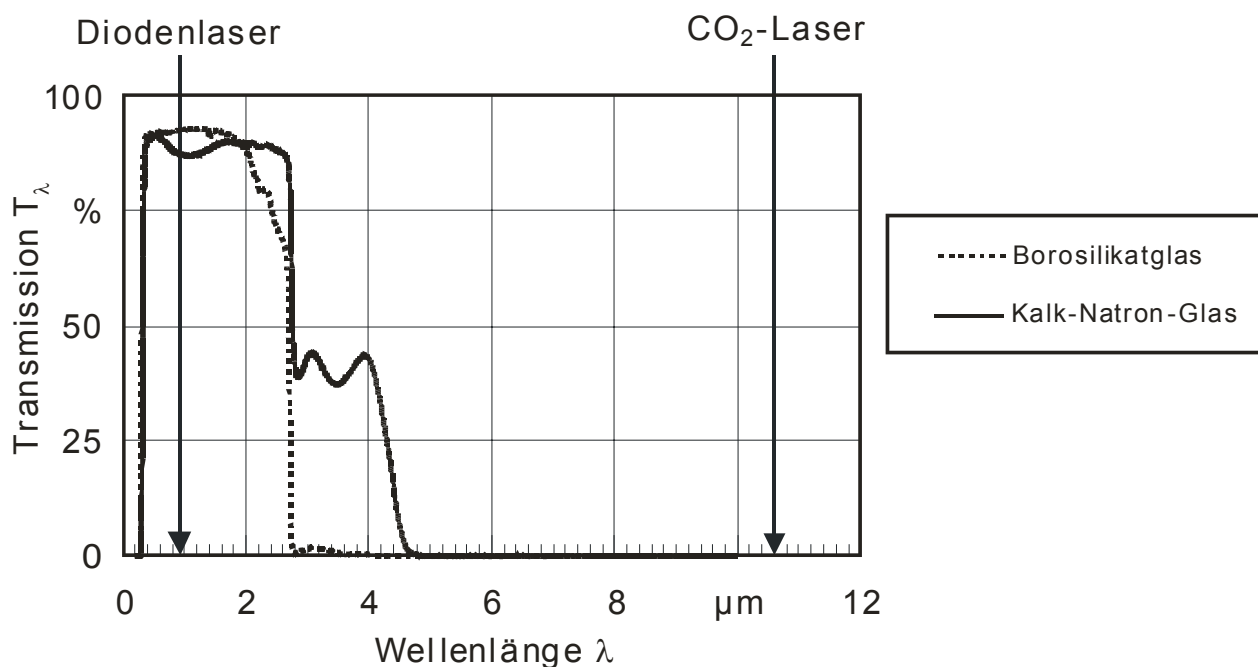


Bild 2: Transmissionsdiagramm der marktüblichen Gläser; $d = 4$ mm.

Die geringe Absorption lässt sich prozesstechnisch mit NIR-Laserstrahlung gezielt nutzen. Es ist möglich in die direkte Übergangszone zwischen Glas und Metall mit dem Diodenlaser Wärme durch Strahlabsorption am Metallbauteil einzutragen. Vorteil ist eine direkte Umsetzung der Strahlung in Wärme in der Fügezone ohne zeitlichen Verzug wie bei der Wärmeleitung durch die Glaswandung. Weiterhin lassen sich die gewünschten Temperaturfelder in den Fügezonen der Materialien gezielt einstellen. Der Grund dafür ist ein definiertes Strahlprofil und ein definierter Strahldurchmesser des Laserstrahles gegenüber der streuenden Flamme. Somit sind zukünftig filigrane Fügezonen wesentlich präziser herzustellen im Vergleich zur konventionellen Flammtechnologie.

2.3 Messtechnik

Um die durch die Laser erzeugte Temperatur zu erfassen, kommt die berührungslose optische Pyrometrie zum Einsatz. Dabei werden den Laserwellenlängen ähnlich, die Messwellenlängen der Pyrometer materialspezifisch gewählt. Bild 3 visualisiert die Bearbeitungsanordnung der Laser und Pyrometer. Zur Erfassung von Glastemperaturen ist eine Wellenlänge oberhalb $\lambda = 4,9 \mu\text{m}$ zu wählen, hier sind Gläser als opak zu betrachten (siehe Bild 2). Es erfolgt eine Oberflächentemperaturerfassung des Glases. Metallische Werkstoffe lassen sich demgegenüber in einem großen Wellenlängenbereich messen. Für den Fügeprozess zwischen Glas und Metall wird die Messwellenlänge für die Metalle mit $\lambda = 1,4 \dots 1,7 \mu\text{m}$ gewählt. Die Messung der Metalltemperatur geschieht ebenfalls an dessen Oberfläche aufgrund der opaken Eigenschaften von Metallen im Messspektrum optischer Pyrometrie. Bedeutsam ist dabei, dass die Erfassung der Metalltemperatur durch die Glaswandung hindurch erfolgen kann, da Glas stark transmissiv für diese Messwellenlänge ist. Somit ist eine direkte Erfassung der Temperatur in der Wechselwirkungszone zwischen Glas und Metall möglich. Beide Pyrometer verfügen über einen Messfleckdurchmesser von $d_{\text{MF}} = 2,5$ mm und einer Tastfrequenz von $f_{\text{Py}} = 200$ Hz. Die resultierende Temperaturaktualisierung im Intervall von $\Delta t = 5$ ms garantiert eine hohe Messdynamik. Die

erfassten Temperaturen werden mittels Auswerteeinheit in ein normiertes Spannungssignal von $U_T = 0 \dots 10 \text{ V}$ überführt. Durch die Normierung kann eine Weiterverarbeitung der Temperaturwerte in Regelkreisen erfolgen, was die Möglichkeit der gezielten Temperaturführung beider Fügepartner schafft. Die Anordnung der Pyrometer erfolgt orthogonal zur Rotationsachse um einen durchmesserunabhängigen Messaufbau zu realisieren (Bild 3). Folglich kommt es zur Erfassung einer Umfangszone der Bauteile, die durch die Rotation nahezu homogen erwärmt wird.

2.4 Steuer- und Regelsoftware

Bedingt durch eine angestrebte automatisierte Lösung wird eine eigenständige Software zur Steuerung der Systemkomponenten und Regelung der Verarbeitungstemperaturen auf Basis der Entwicklungssoftware LabView™ geschaffen. Die Hauptkomponenten der Software sind die Dualtemperaturregelung, eine universelle Temperaturverlaufsprogrammierung, die Maschinensteuerung für das Handhabungssystem sowie eine Programmierereinheit für automatisierte Programmabläufe. Nachfolgend werden die Einzelkomponenten in ihren signifikanten Details erläutert. Im Dualregelungssystem werden die Temperaturen für den Glaskörper und das Metallbauteil getrennt voneinander beherrscht. Der Vorteil besteht in einer entkoppelten hochflexiblen Temperaturführung für den Fügeprozess. Beide Regler sind als PI-Regler ausgelegt und von der analogen in die diskrete Form überführt worden. Den Reglern wurde eine Temperaturverlaufsteuerung vorgeschaltet, so dass eine Sollwertbeeinflussung während des aktiven Regelprozesses stattfinden kann. Mit dieser Maßnahme wurde eine Erweiterung der Temperaturführung von Sollwertsprüngen zu linearen Steigungen und exponentiellen Verläufen vorgenommen. Diese Verläufe sind in Einzelschritte unterteilt, sog. Ereignisse, um einen nahezu frei programmierbaren Temperaturverlauf zu erreichen. Ein Ereignis beschreibt die zu erreichende Solltemperatur und den Verlauf zum Erlangen dieser. Weiterhin können die Regelparameter zwischen den Ereignissen variiert werden. In Bild 4 sind die Verlaufsmöglichkeiten sowie die Ereignisteilung für den linearen Verlauf dargestellt.

Zum Ablauf eines stabilen Prozesses ist ein zeitlich flexibler Temperaturverlauf sinnvoll. Das bedeutet, dass der Temperaturverlauf mit anderen Größen des Prozesses verknüpft sein muss. Diese Verknüpfung wird durch die integrale Lösung der Steuer- und Regelsoftware erzielt. Eine Programmierereinheit für einen automatischen Programmablauf ist so gestaltet, dass alle kinematischen und thermischen Größen gesteuert werden können. Die Umsetzung erfolgt durch eine zeilenförmige Programmierung ähnlich einer CNC-Steuerung. Mittels dieser Befehlszeilen werden die kinematischen Achsen einzeln oder auch paketweise angesprochen. Vervollständigend können von der zeilenförmigen Programmierung die Ereignisse zur Temperatursteuerung aufgerufen werden. Um eine Rückkopplung innerhalb der Prozessgrößen zu erreichen werden Schleifen benutzt, die z.B. von der Isttemperatur aufgehoben werden können. Somit entsteht eine Schleife, die solange den Prozessfortschritt verzögert, bis die notwendige Verarbeitungstemperatur erreicht ist. Vorteil hierbei ist, dass die Prozessentwicklung zeiteffizient umgesetzt werden kann, da z.B. die massespezifische Erwärmungszeit, abhängig von der Glaswandstärke, automatisiert ermittelt bzw. einflusslos wird. Gegensätzlich dazu ist eine Rückkopplung der kinematischen auf die thermischen Größen ebenso möglich. Äquivalent kommt eine Warteschleife zum Einsatz, die von kinematischen Werten z.B. der Rotationsgeschwindigkeit gelöst wird.

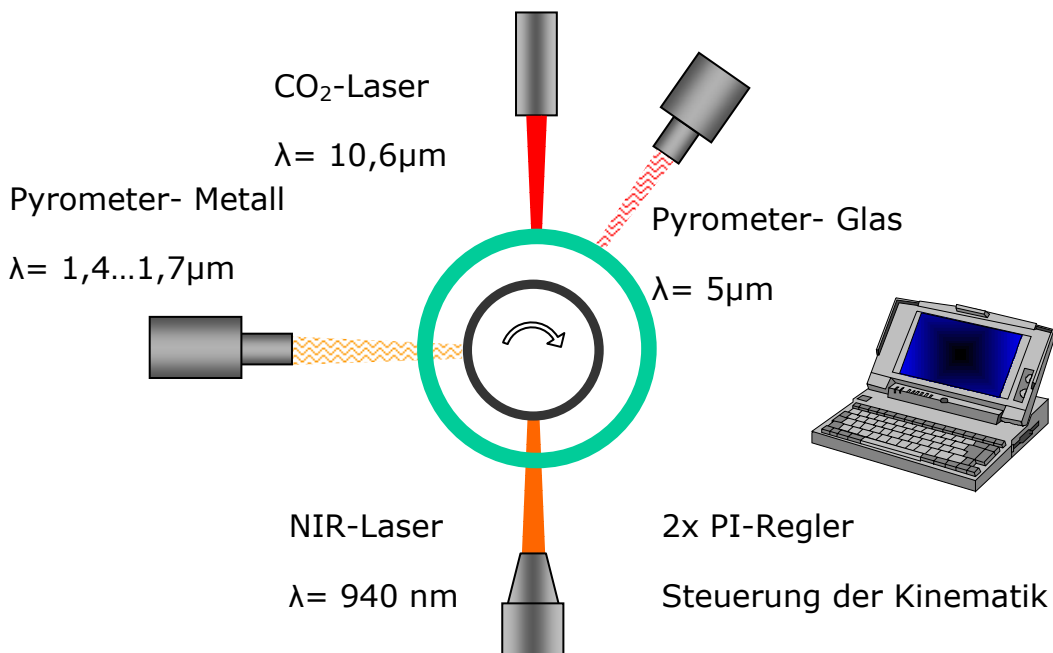


Bild 3: Bearbeitungsschema.

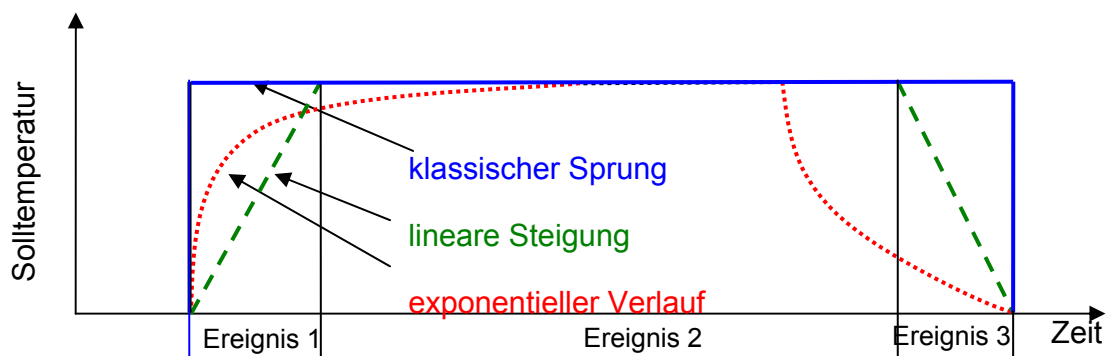


Bild 4: Möglichkeiten des Solltemperaturverlaufes.

3. Untersuchungen und Ergebnisse

Die Untersuchungen zur Erzeugung einer Glas-Metall-Verbindung ohne Zusatzwerkstoff wurden bisher an einer neuartigen Materialkombination durchgeführt. Auf metallischer Seite handelt es sich um den hochlegierten Stahl 1.4305 sowie glasseitig um Fiolax. Signifikant ist der Unterschied der Ausdehnungskoeffizienten α der beiden Fügepartner. So kann ein $\alpha_{\text{Glas}} = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ des Glaswerkstoffen und ein $\alpha_{\text{Metall}} = 19,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ am metallischen Fügepartner beziffert werden. Eine prozesssichere Anglasung muss aufgrund der unterschiedlichen Längenausdehnung der Werkstoffe bei Erwärmung als anspruchsvoll eingestuft werden. Die Geometrie der Verbindung kann als rotationssymmetrische Einglasung beschrieben werden. Dabei wird das zylindrische metallische Bauteil mit einem Außendurchmesser von $d_M = 0,4 \text{ mm}$ vom Glaskörper, dessen Bohrung $d_G = 0,45 \text{ mm}$ beträgt, umhüllt. Der Fügeprozess an dieser Geometrie wird unter Rotation durchgeführt, indem der Glaskörper im Spannfutter eingespannt ist. Das Metallbauteil wird lose in der Bohrung

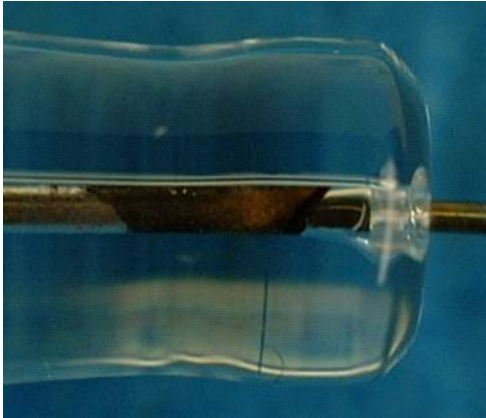


Bild 5: Fügezone.

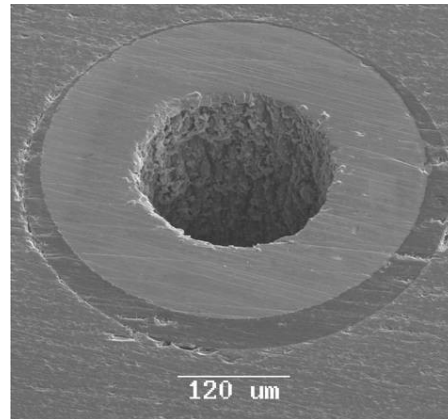


Bild 6: REM-Aufnahme der Fügezone.

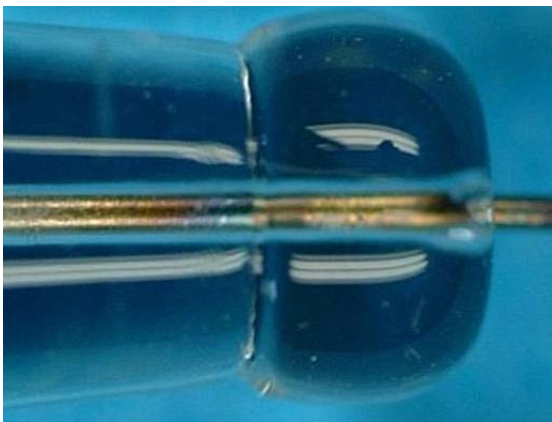


Bild 7: Optimierte Fügezone.

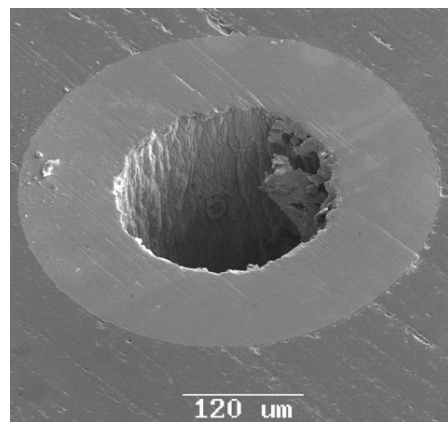


Bild 8: REM-Aufnahme.

mit einer Einschublänge von $s_{\text{ein}} = 7 \text{ mm}$ des Glaskörpers positioniert. Der Energieeintrag zur Erwärmung wird durch einen CO_2 -Laser realisiert, so dass das Metallbauteil allein durch Wärmeleitung erwärmt wird. In ersten Versuchen mit konstanten Laserparametern konnte bei einer Prozesszeit von $t = 240 \text{ s}$ eine haltbare Verbindung erzeugt werden. Die Fügezone zwischen Glas und Metall weist jedoch anschließend eine Verfärbung auf (Bild 5). Bild 6 zeigt eine REM-Aufnahme des verfärbten Fügebereiches als Querschliff.

Durch Einsatz einer geregelten Oberflächentemperatur von $T_0 = 1000^\circ\text{C}$ kann in $t = 14 \text{ s}$ ein optimierter Fügeprozess erreicht werden. Bild 7 zeigt eine optimierte Verbindung ohne Verfärbung. Weiterhin ist die Verformung des Glaskörpers durch die kürzere Einwirkdauer der Laserstrahlung geringer. Zur Überprüfung der Qualität der Anglasung wurde ein Querschliff erzeugt und unter dem Raster-Elektronen-Mikroskop analysiert (siehe Bild 8). Dabei konnte eine spaltfreie Fügezone ermittelt werden.

Zur Untersuchung der Festigkeit der Verbindung wurde eine zerstörende Prüfung durchgeführt. Bedingt durch die Geometrie ist ein Zugversuch mit der konstanten Ziehgeschwindigkeit von $v_{\text{Zieh}} = 0,5 \text{ mm/min}$ gewählt worden. Das ermittelte Ergebnis erlaubt eine Aussage zur Haltekraft des Metallbauteils im Glaskörper. Zum Vergleich der Verbindung wurde die bewährte Verbindungstechnik des UV-Klebens als Referenz untersucht. Prinzipiell zeigt die neuartige Verbindung zwischen den Materialien eine um den Faktor 3,5 höhere Festigkeit. Bild 9 zeigt die Vergleichswerte der aus 10 Bauteilen gemittelten Werte. Von Interesse sind hierbei die Maximalwerte dargestellt durch die Punkte C und D.

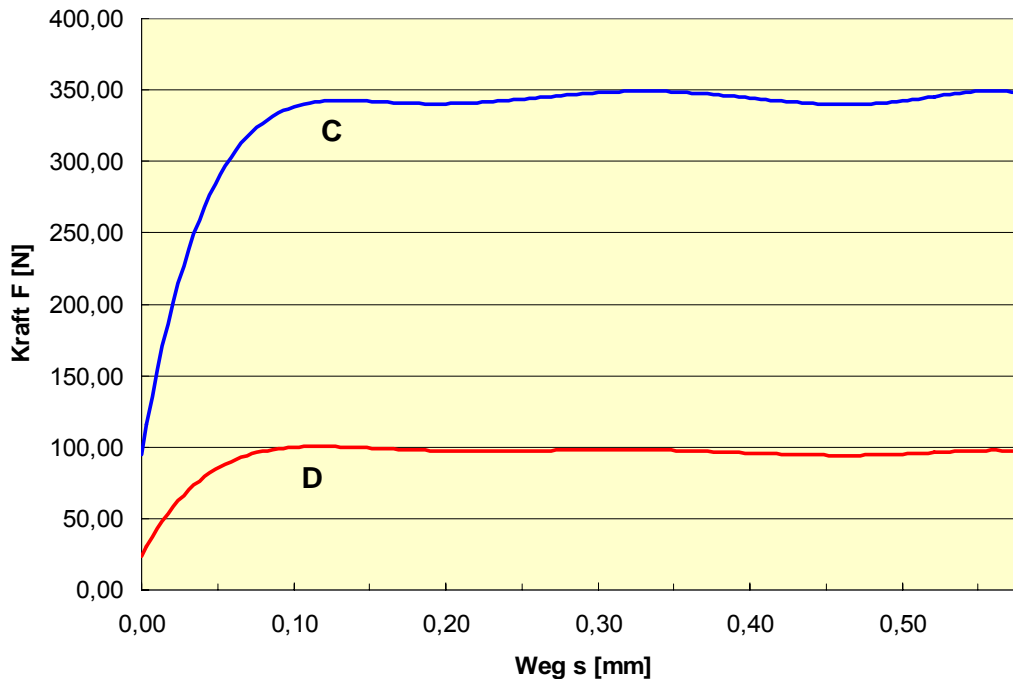


Bild 9: Zugfestigkeit im Vergleich.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Weiterentwicklung der Technologie für die Herstellung von Glas-Metall-Verbindungen ist durch den Einsatz von Laserstrahltechnologie und modernen kinematischen Komponenten erfolgreich umgesetzt worden. Es wurde eine integrale Lösung der Strahl- und Anlagentechnik erreicht und eine präzise Prozessführung umgesetzt. Insbesondere die Beherrschung der thermischen Größen ermöglichte eine Weiterentwicklung der Verbindungstechnologien. Mit den ersten erfolgreichen Verbindungen von Stahl und Fiolax konnte der Stand der Technik deutlich erweitert werden.

Zukünftig sollen neben weiteren neuartigen Stoffkombinationen die bekannten herkömmlichen Glas-Metall-Verbindungen mittels Laserstrahlung realisiert werden. So ist bei diesen Verbindungen zukünftig mit einer erheblichen Prozesszeitminderung gegenüber der Flammtechnologie zu rechnen. Ebenso ist eine Qualitätssteigerung durch eine gezielte Prozessführung zu erwarten bei Reduktion der Ausschussrate. Resultierend soll aus den Vorteilen des neuen Verfahrens eine Gesamtkostenreduzierung möglich sein.

5. Dank

Für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes „Fügen von Glas und Metallbauteilen mittels Laserstrahlung (AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14414 N)“ gilt der Dank dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF). Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss sowie dem technischen Ausschuss der FTG für die Unterstützung bei den Arbeiten.

