

LASERFÜGEN

Lasertechnik trifft Glasbläser

von Thomas Schmidt

Fügen von Gläsern und sprödharten Werkstoffen mit CO₂-Laserstrahlung

Das Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung (ifw Jena) ist Experte auf dem Gebiet der Entwicklung und Implementierung fertigungstechnischer sowie fügetechnischer Lösungen. Zu den Kompetenzen des ifw Jena gehören Lasermaterialbearbeitung von Makro bis Mikro, Ofenprozesse (Diffusionsschweißen, Löten, Wärmebehandlung), Kleben, Additive Fertigung, Lichtbogenschweißprozesse, Sensortechnik sowie Aufbau- und Verbindungstechnik. Im akkreditierten Werkstoffprüflabor können zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen realisiert werden. Das ifw Jena führt darüber hinaus Audits auf der Basis von DIN EN ISO 9001, DIN EN ISO 3834 und DIN EN 1090-1 durch.

Ein Spezialgebiet des ifw Jena ist das Fügen und die Bearbeitung von Gläsern und sprödharten Materialien. Dies kann mit vielfältigen Verfahren – Kleben, Ofenprozessen oder Laserprozessen – umgesetzt werden.

Kleben

Aufgrund ihrer Sprödigkeit und hohen Kerbempfindlichkeit lassen sich Gläser mit sich selbst oder mit anderen Materialien sehr gut durch den Einsatz der Klebtechnik verbinden. Je nach Anwendungsbereich können Gläser durch organische oder anorganische Klebstoffe miteinander verbunden werden. Organisch basierte Klebstoffe

kommen meist dann zum Einsatz, wenn Verbindungen angestrebt werden, die die optischen Eigenschaften von Glas berücksichtigen (brechzahlangepasstes Kleben) oder wenn Materialien mit anderer thermischer Ausdehnung mit Glas verbunden werden sollen. Anorganisch basierte Klebstoffe rücken in den Fokus der Anwender, wenn sich die Nutzung organischer Klebstoffe zum Beispiel aufgrund hoher Einsatztemperaturen ausschließt. Typische Beispiele für Glasverklebungen sind im konstruktiven Glasbau, in der optischen Industrie, in der Haushaltsgerätetechnik, in der Solartechnik, im Maschinenbau und in der Medizintechnik zu finden.

Ofenlöten

Ein Fügeverfahren, das hohe Alterungsbeständigkeit und Dichtigkeit garantiert, ist das Ofenlöten. Zwischen den zu verbindenden Gläsern wird ein Lot aufgebracht, welches in einem Ofenprozess aufgeschmolzen wird und somit eine Verbindung zwischen den beiden Teilen herstellt. Die dafür erforderlichen Lote sind speziell für den Werkstoff Glas angepasst und ermöglichen eine qualitativ hochwertige Verbindung.

Diffusionsschweißen

Während beim Ofenlöten artfremde Materialien für das Verbinden der Glasbauteile zum Einsatz kommen, kann beim Diffusionsschweißen eine dauerhafte Verbindung



Kleben, Löten (Kovar-Pyrex), Diffusionsschweißen (BK7)

ohne zusätzliche Werkstoffe erzeugt werden. Unter Einwirkung von Temperatur und Druck kommt es hierbei an der Grenzfläche beider Gläser zu einem Austausch der oberflächennahen Moleküle. Gitterstrukturen werden aufgebrochen und neu vernetzt. Dafür ist allerdings eine sehr gute Vorbereitung der Fügeflächen erforderlich.

Laserprozesse

Bei den vorgestellten Ofenprozessen sind Temperatur und Prozesszeit die relevanten Parameter. Beim Fügen sprödharter Werkstoffe mit Laserstrahlung müssen darüber hinaus noch weitere Einflussgrößen betrachtet werden. Eine wichtige Eigenschaft ist dabei die Laserwellenlänge. Für die Bearbeitung von Gläsern fällt die Wahl sehr schnell auf den CO₂-Laser mit seiner Wellenlänge von 10,6µm. Diese Wellenlänge kommt übrigens auch im Spektrum eines Gasbrenners vor. Je nach Oberfläche beträgt die Absorption am Glas 80 bis 90 Prozent und ist damit deutlich höher als bei herkömmlichen Brennern. Prinzipiell existieren einige Parallelen zwischen diesen beiden „Werkzeugen“. Beide können das Glas erwärmen bzw. schmelzen und sind hinsichtlich Einwirkzone und Energiedichte einstellbar. Aus der Sicht des Glasbläfers hat die Laserstrahlung aber drei Nachteile: die Laserstrahlung ist nicht sichtbar, sie ist quasi unendlich und sie ist scharf begrenzt. Die letztgenannte Eigenschaft erzeugt im Material sehr starke Temperaturgradienten und muss bei den Fügeprozessen beachtet werden. Trotzdem ist der CO₂-Laser für

die Glasbearbeitung prädestiniert, was die folgenden Beispiele belegen.

Laserlöten

Das Laserlöten basiert auf einem ähnlichen Prinzip wie das oben beschriebene Ofenlöten. Laserlöten kommt immer dann zum Einsatz, wenn die zu bearbeitenden Bauteile für den Ofenraum zu groß sind oder bereits weitere Bauteile montiert wurden, die den hohen Temperaturen beim Ofenlöten nicht ausgesetzt werden dürfen. Ein Beispiel ist das Verschließen von Al₂O₃-Keramikröhrchen, in denen ein Thermoelement eingebaut ist. Der hier enthaltene Sensor kann nur kurzzeitig einer Maximaltemperatur von 1050°C ausgesetzt werden, beim Ofenlöten entstehen allerdings Temperaturen bis zu 1250°C. Dieses Problem kann also nur mittels Lasertechnik gelöst werden.

Der Rohstrahl des Lasers hat einen Durchmesser von 15 bis 20mm und besitzt, wie Gasbrenner auch, eine gaussförmige Energieverteilung. Dieser Strahl wird nun durch eine spezielle Optik in Kombination mit einem Kegelspiegel so geformt, dass er gleichmäßig entlang der Fügezone auf die Keramik trifft. Pyrometrische Temperaturmesstechnik regelt den Prozess hinsichtlich Aufheiz- und Abkühlrampen, Temperaturen und Haltezeiten. Im Ergebnis entstehen vakuumdichte und belastbare Verbindungen. Der Fügeprozess ist auch auf Gläser und Saphir anwendbar.



Laserlöten, Versuchsaufbau und Prozess



Glasrohrfügen

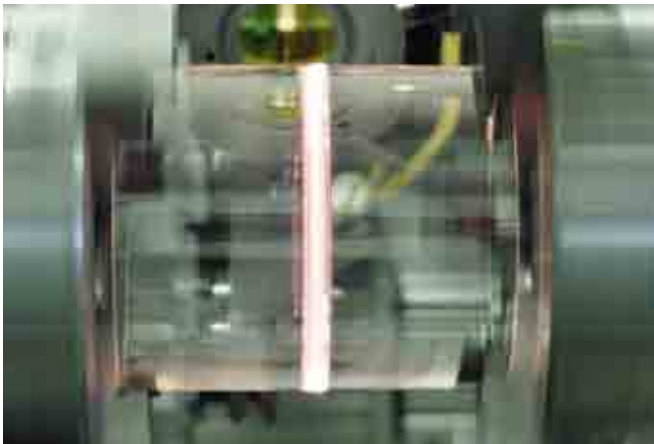
Der Glasrohrfügeprozess besitzt die meisten Parallelen zur klassischen Arbeit eines Glasbläfers. In eine CNC-gesteuerte „Glasmacherdrehbank“ werden die beiden Rohre eingespannt, in synchrone Rotation versetzt und mit einer auf die Rohrdimension angepasster CO₂-Laserstrahlung bestrahlt. Die beiden Rohrenden werden zunächst aufgeschmolzen und verrundet, anschließend gefügt und leicht gestreckt. Prinzipiell ist der Prozessablauf identisch mit der Arbeit eines Glasapparatebauers. Mit der am ifw Jena vorhandenen maximalen Laserleistung von 3500W ist das Fügen von Borosilikatglasrohren mit Durchmessern bis zu 150x5 mm möglich. Auch Quarzglasrohre bis 2mm Wandstärke lassen sich mit diesem Verfahren verbinden. Das Fügen von Soda-Lime-Gläsern stellt aufgrund des hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten eine besondere Herausforderung dar. Die temperatur- und zeitgesteuerte Laserleistungsregelung ist hier unabdingbar. Sie erlaubt sogar das partielle Spannungsfreiglühen der Fügezone. Zur Reduzierung des Temperaturgradienten kann das Glasrohrfügen auch als Hybridprozess gestaltet werden. Dabei erwärmt ein Gasbrenner das Glas auf den Temperaturbereich der Transformationstemperatur. Der eigentliche Schweißprozess wird nach wie vor durch den Laser realisiert. Auf diese Weise können die induzierten Spannungen erheblich reduziert werden. Die wichtigsten Vorteile des Laserverfahrens sind der hohe Automatisierungsgrad und die kurze Prozesszeit. So werden Borosili-

katglasrohre mit einem Durchmesser von 100mm in weniger als einer Minute gefügt.

Der Prozess des Glasrohrfügens ist auch auf Flachglas übertragbar. Dafür muss das komplette Bauteil auf die Entspannungstemperatur erwärmt werden, da es sonst zu einer unsymmetrischen Spannungsbildung kommt, die das Glas zerstört.

Quarzglasschweißen

Das Fügen von Quarzglas stellt aufgrund der für das Schweißen ungünstigen Materialeigenschaften, wie der hohen Verarbeitungstemperatur oder der schlechten Wärmeleitfähigkeit, eine große Herausforderung dar, insbesondere im Dickenbereich über 2mm. Um dickere Gläser zu schweißen, muss ein Tiefschweißverfahren angewendet werden. Sowohl das Laserlöten als auch das Rohrglasfügen sind, wie die glasbläserische Arbeit selbst, Wärmeleitungsprozesse. Das Tiefschweißen allein mit stark fokussierter Laserstrahlung bewirkt aber nur eine Feuerpolitur beider Kanten. Die geringe Wärmeleitung des Materials verhindert ein ausreichend großes Schmelzvolumen. Die Oberflächenspannung der Schmelzhaut auf den Fügeflächen hemmt das Zusammenfließen. Beim Quarzglasschweißen muss also die Wärmeleitung des Quarzglases deutlich erhöht werden. Dies geschieht durch eine Erwärmung des Materials. Schon bei einer Temperatur von 1000°C hat sich die Wärmeleitung auf 2,7W/m²K verdoppelt. Ein zweiter Laserstrahl erwärmt also den Bereich um die



Glasrohrfügen, Prozess und Ergebnis



Fügezone in einem Durchmesser von etwa 20mm auf oberflächlich etwa 2000°C. Dadurch kann der fokussierte Schweißstrahl mehr Schmelzvolumen erzeugen, wodurch die Bauteile miteinander verbunden werden können. Die Energiedichte des Laserstrahls liegt dabei in einem kaum vorstellbaren Bereich von $>108\text{W}/\text{cm}^2$. Hierbei wird zwangsläufig Material abgedampft, was durch eine automatische Quarzstaubzuführung wieder ausgeglichen wird. Mit einer Laserleistung von 1500W beim Vorwärmen und 1000W beim Schweißen können bis zu 20mm dicke Schweißnähte realisiert werden. Die gängige Nahtdicke liegt beim Quarzglas zwischen 5 und 8mm und kann mit Geschwindigkeiten zwischen 50 und 20mm/min gefügt werden. Am häufigsten wird dieses Verfahren für dickere Quarzgläser und Reparaturen beschädigter oder gerissener Bauteile angewendet.

Glas-Metall-Verbindungen

Die Verbindung von Glas und Metall stellt die „Königsdisziplin“ unter den glasbläserischen Arbeiten dar. Ein elastisch und plastisch verformbares Metall soll mit dem sprödharten Werkstoff Glas verbunden werden. Der große Nachteil des Glases ist hierbei die fehlende plastische Verformbarkeit. Folglich sind hierfür ein spezielles Glas sowie ein spezielles Metall, mit aufeinander abgestimmten thermischen Ausdehnungskoeffizienten entwickelt worden. Mit diesen Werkstoffen allein kann jedoch noch keine Fügeverbindung erzeugt werden, denn ein blankes Metall

geht mit Glas keine Verbindung ein. Es fehlt ein spezielles Oxid, welches zur atomaren Struktur des Glases passt. Damit das Oxid gut auf dem Metall haftet, ist zunächst eine gründliche Vorreinigung notwendig. Anschließend folgt der klassische Anglasprozess, wie ihn der Glasapparatebauer an der Drehbank durchführt. Mit geometrisch angepasster Laserstrahlung wird das Glas auf Verarbeitungstemperatur gebracht.



Quarzglasschweißen, Prozess und Rissreparatur



Glas-Metall-Verbindung, Prozess und Verbindungszone



Das Metall dringt in diese zähe Glasmasse ein. Dabei wirkt das Oxid als Benetzungshilfe und löst sich nach einer bestimmten Haltezeit im Glas auf. EDX-Aufnahmen beweisen die stoffschlüssige Verbindung. Das Metall diffundiert bis zu 30µm in das Glas hinein. Auch sogenannte unangepasste Glas-Metall-Verbindungen sind unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Statt des speziellen Glases und Metalls kommen hier kostengünstigere Standardmaterialien zum Einsatz. Die Verbindung von Kupfer und Borosilikatglas wurde so bereits realisiert.

Zusammenfassung

Die Lasertechnik bietet hervorragende Möglichkeiten für das Fügen von Gläsern und sprödharten Werkstoffen. Der CO₂-Laser ist mit einer Wellenlänge von 10,6 µm das geeignetste Werkzeug für den Werkstoff Glas. Der Laser arbeitet verschleißfrei, reproduzierbar und ist sehr gut zu regeln bzw. zu automatisieren.

Im Gegensatz zum Gasbrenner übt er keinen Druck auf das Glas aus und bringt keine Fremdstoffe wie Ruß oder Brennerpartikel in den Prozess ein.

In diesem Beitrag konnten die Fügeverfahren, die mit Laserstrahlung möglich sind, nur kurz vorgestellt werden. Die Möglichkeiten der Lasertechnik sind im Hinblick auf Trennverfahren sowie auf das komplette Materialspektrum von Kunststoffen bis zu Metallen noch vielfältiger. Zum nächsten Fortbildungsseminar des VDG in Jena sind daher alle Interessenten herzlich eingeladen, sich einen Überblick über die Potenziale und Verfahren der Lasertechnik zu verschaffen, hier vorgestellte Prozesse live zu erleben und auch selbst Glasbläserarbeiten mit Hilfe von Laserstrahlung umzusetzen.

Weitere Informationen:
ifw Jena – Günter-Köhler-Institut
für Füge-technik und Werkstoffprüfung GmbH
www.ifw-jena.de

