

HVG-Mitteilung Nr. 2085

Fügen und Formen von Rohrgläsern mittels CO₂-Laserstrahlung (AiF-Nr. 13501 N2)

A.Ostendorf, U.Stute, L.Richter, Laser Zentrum Hannover e.V.

Vortrag auf der DGG-Jahrestagung am 25. Mai 2005 in Würzburg

1. Einleitung

Die Fertigung von Präzisionsthermometern und Aärometern erfolgt heutzutage im Großteil in Handarbeit durch erfahrene Fachkräfte. In Anbetracht der zukünftig weltweit stärker konkurrierenden Fertigungsräume ist eine Überführung der manuellen Fertigung in einen automatisierten Prozess zwingend erforderlich. Durch diese produktionstechnische Weiterentwicklung ist eine Kostensenkung zur Stärkung des Produktionsstandortes Deutschland möglich.

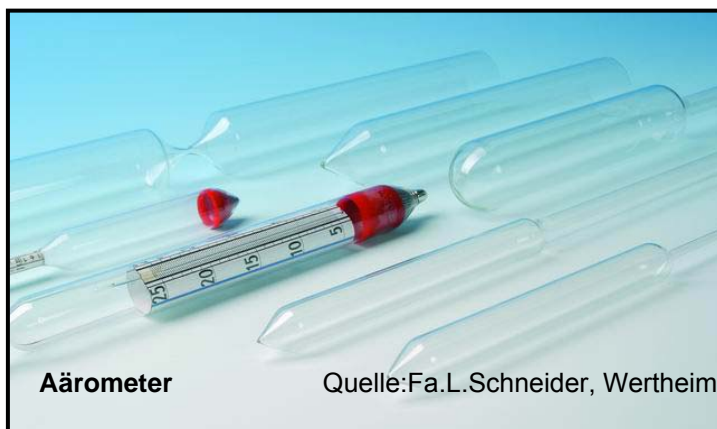


Bild 1: Aärometer.

Ausgangspunkt ist die Substitution der konventionellen Brennertechnik durch das hochpräzise und gut automatisierbare Werkzeug Laser. Systembedingte Vorteile der Lasertechnologie, wie die Erzeugung definierter Temperaturfelder, führen zu einem qualitativ und quantitativ verbesserten Bearbeitungsprozess. Insbesondere die gute Regelbarkeit der Strahlleistung, die emissionsfreie Wärmeerzeugung und die damit verbundene Prozessreinheit bieten für den industriellen Einsatz weiteres Entwicklungspotential. Die prozessrelevante Glastemperatur wird durch Einsatz einer Regelung sowie einer individuellen Steuerung des Temperaturverlaufs dem Bearbeitungsprozess angepasst. Die kinematischen Parameter zur Fertigung technischer Glasbauteile werden durch ein neuartiges Maschinenkonzept umgesetzt. Dieses beinhaltet Komponenten zur Umsetzung von rotatorischen und translatorischen Bewegungen. Mit diesen mechanischen Antriebseinheiten können sowohl Formprozesse, wie das Verjüngen von Glasrohren, als auch Fügeprozesse zum Verbinden unterschiedlicher Rohrgeometrien realisiert werden.

Dieser Beitrag zeigt die Überführung der Fertigungsprozesse in eine automatisierte Fertigung. Insbesondere wird das neuartige Maschinenkonzept vorgestellt und die Möglichkeiten der Rohrglasbearbeitung mittels Laser im Bereich Formen und Fügen aufgezeigt.

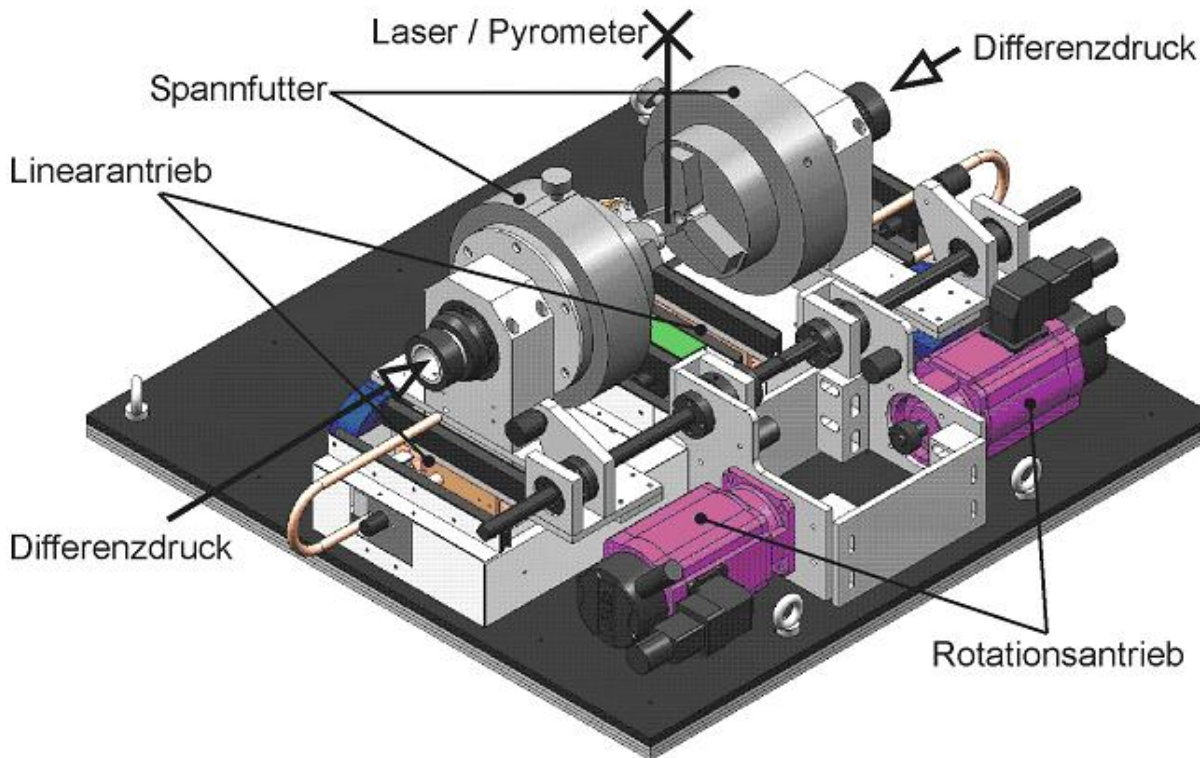


Bild 2: Maschinenkonzept.

2. Systemtechnik/Versuchstechnik

Zur Umsetzung dieses neuartigen Ansatzes zur automatisierten Rohrglasbearbeitung ist die Entwicklung eines flexiblen Maschinenkonzeptes notwendig, wie in Bild 2 dargestellt. Dabei kommen bevorzugt Komponenten hoher Dynamik und Präzision zum Einsatz.

Zur Realisierung der Translationsbewegungen werden zwei linear direkt angetriebene Achsen verwendet, deren Hubweg jeweils $s_{\text{hub}}=80\text{mm}$ beträgt. Die Anordnung erfolgt hintereinander in gleicher Wirkungslinie, um eine synchrone oder asynchrone Bewegung zu ermöglichen. Bauartspezifisch realisieren diese Achsen hohe Beschleunigungen auf kurzen Verfahrwegen, bei sehr guter Positionier- und Wiederholgenauigkeit. Zur Umsetzung der Rotationsbewegung werden Asynchronmotoren eingesetzt, welche mit den Spannfuttern verbunden sind. Die maximale Drehzahl an den Spannfuttern beträgt $n=350\text{ min}^{-1}$. Es werden jeweils ein Translationsmotor, ein Rotationsmotor sowie ein Spannfutter zu einer Einheit zusammengefasst. Durch koaxial angeordnete Spannfutter ist ein Einspannen der Rohrgläser an den Rohrenden gewährleistet. Somit wird ein Stauchen oder Strecken der eingespannten Rohrgläser während des Prozesses unter Rotation möglich. Um eine Beschädigung oder Zerstörung der Rohrgläser während des Spannvorganges und der Bearbeitung zu vermeiden, müssen die Spannkraften am Futter definiert vorgeben werden können. Dies geschieht durch Einsatz einer verstellbaren Federspanneinrichtung. Dadurch werden reproduzierbare Spannvorgänge gewährleistet und die Verarbeitung von Rohrgläsern bis zu minimalen Wandstärken von $s_{\text{min}}=0,25\text{ mm}$ erlaubt. Der Außendurchmesser kann in einem Bereich von $d_a=3\dots37\text{ mm}$ variieren.

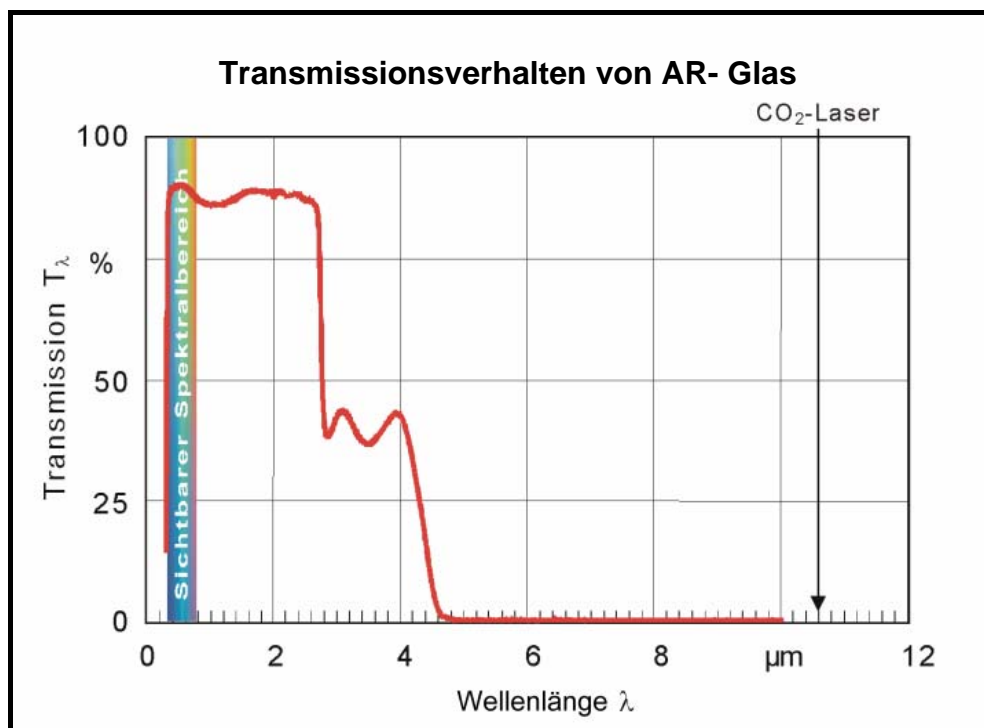


Bild 3: Prinzipielles Transmissionsverhalten von AR- Glas in Bezug zur Wellenlänge.

Die Auswahl eines CO₂-Lasers erfolgte aufgrund seiner emittierten Wellenlänge von $\lambda=10,6\mu\text{m}$. Diese Wellenlänge wird an der Oberfläche der Glasbauteile absorbiert, so dass es zu einer Erwärmung an der Oberfläche kommt. Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Transmission. Die Erwärmung der Rohrgläser, insbesondere der gesamten Wandstärke, erfolgt dann durch Konvektion der Wärme von der Oberfläche in das Glasvolumen.

Als Energiequelle für die Erwärmung der Rohrgläser kommen Sealed Off CO₂-Laser mit Strahlleistungen bis $P_{av}=500\text{ W}$ zum Einsatz. Durch ihre kompakte Bauart, den kostengünstigen Betrieb und geringe Investitionskosten zählen sie zu den Lasern mit dem größten Potential für die Glasbearbeitung. Kompakte Lasersysteme erweisen sich für dieses Einsatzfeld als besonders geeignet. Es handelt sich hierbei um Lasersysteme, deren Pulsfolgefrequenz in weiten Grenzen verstellbar ist. So kann die emittierte Leistung P_{av} optimal auf die Glasapplikationen abgestimmt werden. Das von der Laserstrahlquelle emittierte Strahlprofil ist gaussverteilt und bietet dadurch sehr gute Voraussetzungen für den Einsatz spezieller optischer Komponenten. Für die Strahlformung werden Zylinderlinsen eingesetzt, die den Strahl so formen, dass eine spannungsunkritische Erwärmung realisiert werden kann. Dadurch wird die Energieverteilung einer konventionellen Gasflamme weitgehend nachgebildet und verbessert. Im Vergleich dazu unterscheidet sich die konventionelle Gasbrennertechnik aufgrund erheblicher Wärmeverluste durch nicht absorbierte Energieanteile der Flamme im Glasrohr von der Lasererwärmung. Die durch den Laserstrahl erzeugte Temperatur wird prozessbedingt durch optische Pyrometrie erfasst. Eine berührende Erfassung der Temperatur durch Thermolemente ist durch die Werkstückbewegung nicht möglich. Es wird werkstoffspezifisch ein Pyrometer der Wellenlänge $\lambda=5,6\mu\text{m}$ mit einer Messgenauigkeit von $\Delta T=1\%\pm 1\text{ K}$ eingesetzt, um die Temperatur an der Glasoberfläche zu erfassen. Spektrale Emissionen werden in diesem Wellenlängenbereich aufgrund der Transmission von der Glasoberfläche emittiert, siehe Bild 3. Der Messbereich des Pyrometers beträgt $T=500\dots 2500\text{ }^\circ\text{C}$. Dieses Messintervall ermöglicht

das Verarbeiten verschiedenster Rohrglastypen und gewährleistet die Flexibilität der Anlage. Durch Verknüpfen der Systemkomponenten mit einem Leitreechner entstand ein komplexes Bearbeitungszentrum für Rohrgläser. Dieses erlaubt die Automatisierung der Prozesse durch die Möglichkeit einer Ablaufprogrammierung der einzelnen Prozessschritte. In den automatisierten Ablauf können alle Prozessparameter integriert werden, so dass ein flexibles Prozesshandling umgesetzt werden kann. Weiterhin wurde ein Temperaturregelkreis mit den Komponenten CO₂-Laser, Pyrometer, Steuereinheit und Glasrohr erstellt und in das Maschinenkonzept integriert. Über das Erfassen der Temperaturwerte im Prozess wird die Viskosität als signifikanter Prozessparameter während der Form- und Fügevorgänge in der Bearbeitungszone kontrolliert und beeinflusst. Dieser Regelkreis erlaubt die Beherrschung eines kontinuierlichen temperaturgeregelten Prozesses, der die nicht lineare Prozessgröße Viskosität steuert.

3. Prozessentwicklung

Die Untersuchungen werden an den Handarbeitsprozess des Glasbläfers angelehnt. Dabei werden die Glasrohre gegenüberliegend in den Spannfütern arretiert und unter Rotation durch den ortsfesten Laserstrahl definiert erwärmt. Der Laserstrahl wird geformt und der zu formende Bereich am Glasrohr erwärmt. Der Temperaturregelkreis hält die gewünschte Bearbeitungstemperatur nahezu konstant. Anschließend wird die Verformung durch die voreingestellten kinematischen Parameter umgesetzt. Darüber wird durch symmetrisches Verfahren der Translationsachsen ein Strecken und somit Verjüngen des Glasrohres erreicht (Bild 4).

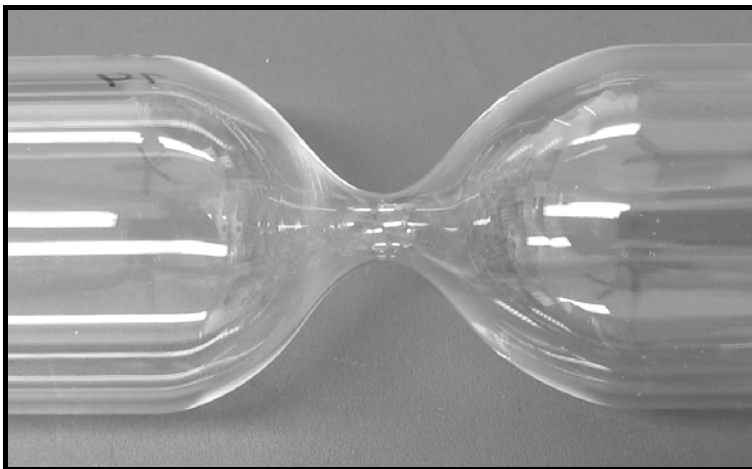


Bild 4: Verjüngung an d=36 mm AR-Glas.

Der definierte einzustellende Verjüngungsdurchmesser $d_{VJÜ}$ wird experimentell iterativ ermittelt. Hierüber wird ein Prozessfenster ermittelt, aus dem später die Parameterzusammenhänge abgeleitet werden. Die Definition eines Solldurchmessers ergibt sich dann nach einer Funktion, die durch die Temperatur, den Ziehweg und den Ziehgeschwindigkeit beschrieben wird. Beispielhaft wird der linearere Zusammenhang zwischen Ziehweg und erreichten Verjüngungsdurchmesser $d_{VJÜ}$ in Bild 5 gezeigt.

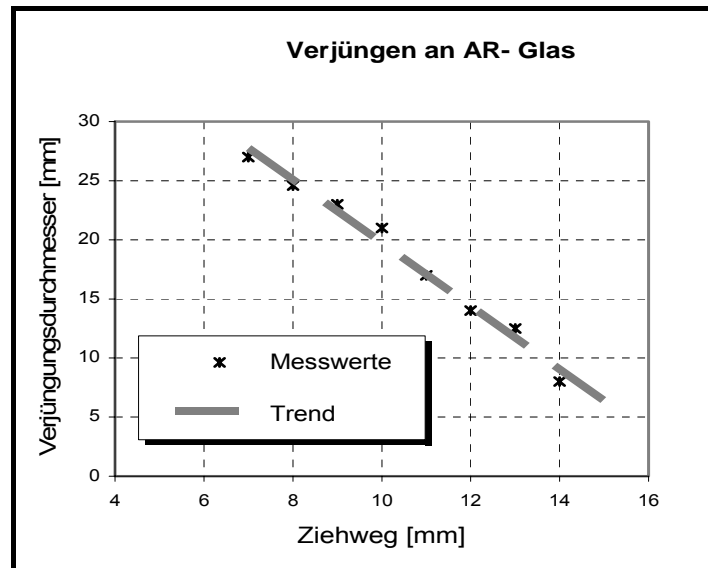


Bild 5: Parameterzusammenhang an Verjüngungen.

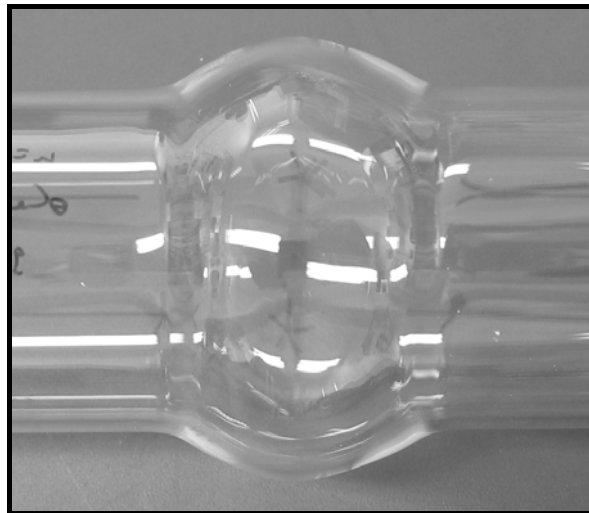


Bild 6: Durchmessererweiterung an AR- Glas $d=36$ mm.

Mit diesem Maschinenkonzept können Bereiche vergrößerter Volumen an einem Glasrohrabschnitt erzeugt werden, wie in Bild 6 dargestellt. Dabei werden entstehende Fliehkräfte gezielt ausgenutzt. Die niederviskose Glasmasse wird bei hohen Drehzahlen nach außen getrieben. Eine Anpassung des Temperaturprofils führt zu einer definierten Form und Größe der Durchmessererweiterung.

Die Ausbildung eines Rohrglasabschlusses in Form eines Kugelbodens vervollständigt das Spektrum der Formprozesse. So kann an Rohrglas mit $d=18$ mm ein halbkugelförmiger Rohrabschluss erzeugt werden. Ausgangspunkt ist ein niederviskoser, nahezu planer Rohrboden. Durch Eintauchen des Rohrendes in den Laserstrahl kann die Viskosität in einem verarbeitungsfähigen Bereich gehalten werden. Eine Innendruckbeaufschlagung des Rohres ermöglicht dann eine Formung des Rohrbodens, Ergebnisse sind in Bild 7 dargestellt. Die Variation von Druck und Zeit während der Beaufschlagung lassen dabei eine definierte Kugelausbildung zu.

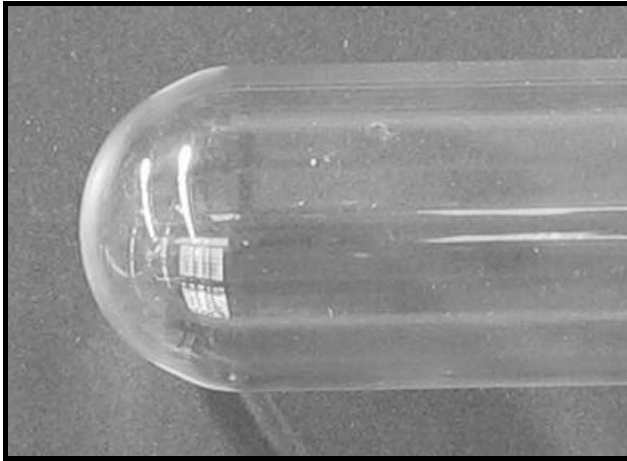


Bild 7: Kugelboden an AR- Glas d= 18 mm.

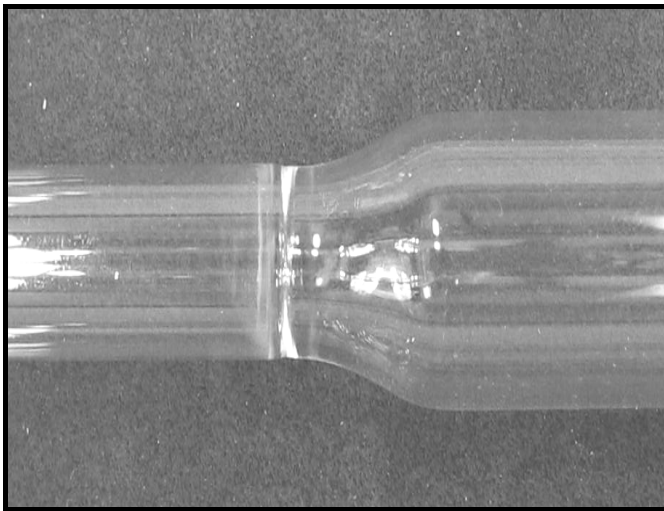


Bild 8: Fügeverbindung geometrisch differenter Rohrgläser.

Um eine vollständige Produktherstellung mit diesem Maschinenkonzept umsetzen zu können, ist neben den Formprozessen die Entwicklung von Fügeprozessen unabdingbar. Hierbei ist vor allem das Verbinden geformter Glasrohre unterschiedlicher Durchmesser von Interesse (Bild 8).

Nach dem Prozessschritt der Formung werden die Gläser durch Laserstrahlung getrennt. Die entstehende Trennkante ist verrundet, rissfrei und weist einen hohen Ebenheitsgrad auf. Diese Ebenheit ist zum maschinellen Fügen von Rohrgläsern unerlässlich, da Abweichungen der Rohrkante maschinell nicht ausgeglichen werden können. Die Folge sind Undichtheiten und inhomogene Wandstärken im Fügebereich. Der Fügevorgang wird ebenfalls unter Rotation im defokussierten Laserstrahl durchgeführt. Da bei Prozessstart eine Temperaturerfassung im Füge-spalt unmöglich ist, muss ohne Temperaturregelung eine Verbindung der beiden Rohrhälften erfolgen. Die beiden Rohrhälften werden zu Beginn symmetrisch in den Laserstrahl positioniert, ohne sich zu berühren. Dadurch werden beide Rohrenden vorerwärmt. Mit Erreichen des verarbeitungsfähigen Temperaturbereiches werden die Glasrohre zum Einleiten des Fügeprozesses weiter aufeinander zu bewegt. Um eine stoffschlüssigen Verbindung zu erreichen, werden die Rohre über ihren Berührungspunkt hinaus aufeinander zu bewegt. Es kommt zur Verschmelzung der Rohr-

enden. Die dadurch bedingte Deformation führt zu einer Durchmessererweiterung, welche durch Strecken der Fügezone ausgeglichen werden kann. Dieser Prozessschritt wird durch Einsatz der Temperaturregelung kontrolliert.

4. Zusammenfassung

Die aufgezeigte Maschinenkonzeption sowie die damit umgesetzten glastechnischen Prozesse geben einen Einblick in die Möglichkeiten, die durch die Lasertechnologie und moderne kinematische Komponenten möglich sind. Es konnten die Kernprozesse eines Handarbeitsprozesses in eine automatisierte Fertigung überführt werden. Durch die Entwicklung eines Temperaturregelkreises wird der in der Heißglasbearbeitung kritische Prozessparameter Viskosität beherrscht. Eine automatisierte Kombination von thermischen und kinematischen Prozessgrößen ermöglicht einen reproduzierbaren Prozessablauf. Speziell das Formen von Glasrohren sowie die Umsetzung von Fügeprozessen für die Fertigung von Aärometern konnten gezeigt werden. Resultierend aus den Ergebnissen ist die Überführung weiterer Rohrglasprodukte in eine automatisierte Fertigung denkbar. So ist das Verbinden von Rohrglas mit Flachglasbauteilen im chemischen oder im Architekturbereich denkbar. Darüber hinaus kann die Erstellung neuer, komplexer Produktgeometrien durch Ableitung und Übertrag der erarbeiteten Erkenntnisse als realistisch eingestuft werden.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des AiF-Projektes FüFo „Fügen und Formen von Rohrgläsern zur Herstellung von technischen Glasbauteilen mit Hilfe von CO₂-Laserstrahlung“ (AiF- Projektnummer:13501N2) durchgeführt. Die Autoren danken dem Projekträger, den Mitgliedern des technischen Ausschuss der FTG (Forschungsgemeinschaft Technik und Glas e.V.) sowie den Partnern des projektbegleitenden Ausschuss.

