

1 Kurzzusammenfassung

Bei der Laserpolitur wird die Glasoberfläche mittels CO₂-Laserstrahlung erwärmt und im erweichten Zustand durch die Oberflächenspannung eine Materialumverteilung erzeugt. Hierbei werden bereits Rauheiten erreicht, die denen kommerzieller Optiken entsprechen. Gleichzeitig sind die Prozesszeiten im Vergleich zur mechanischen Politur signifikant kürzer. Der industrielle Einsatz der Laserpolitur wird jedoch noch durch auftretende Formfehler sowie Oberflächenwelligkeiten limitiert. In dieser Arbeit werden Ursachen und Einflussgrößen dieser Fehlerbilder durch Untersuchung des Temperatur-Zeit-Verlaufs des Gesamtprozesses aus Vorheizen, Laserbearbeitung und Tempern erarbeitet.

Als kritische Einflussgröße des Formverzugs wird die Homogenität der Energieeinbringung während des Vorheizprozesses identifiziert. Durch Anpassung dieser wird für N-BK7 eine signifikante Reduktion des Formfehlers auf ein Niveau erreicht, das mit kommerziellen Asphären vergleichbar ist.

Die Welligkeit kann in induzierte (durch die Laserpolitur erzeugte) und residuale (unzureichend geglättete) Anteile unterteilt werden. An Quarzglas wird ein temperaturabhängiger Abtragprozess unterhalb der eigentlichen Verdampfungstemperatur nachgewiesen, durch den infolge von Schwankungen der Prozesstemperatur ein ungleichmäßiger Abtrag und folglich eine Welligkeit induziert wird. Diese kann durch eine PID-Regelung reduziert, jedoch nicht vollständig vermieden werden. Da die Reduktion vorhandener Strukturen viskositäts- und somit temperaturabhängig ist, folgt hieraus ein Trade-Off zwischen induzierter und residualer Welligkeit. Für den industriellen Einsatz ist daher die Betrachtung der Laserpolitur innerhalb der Gesamtprozesskette erforderlich.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird am Beispiel der beiden Materialien N-SF6 und S-FPL53 ein Vorgehen für den Übertrag der Laserpolitur auf weitere Glassorten erarbeitet. Abschließend erfolgt die Betrachtung der Ausheilung von Sub-Surface Damage, der z. B. durch Formgebungsprozesse entsteht. Bereits bei einsetzendem Poliereffekt wird eine Ausheilung in Tiefen nachgewiesen, die die maximale anzunehmende SSD-Tiefe um das bis zu 40-Fache übersteigen.

Durch die vorliegenden Ergebnisse wird somit erstmals die Laserpolitur von Glas mit Form- und Oberflächenqualitäten demonstriert, die denen kommerzieller Optiken entsprechen. Gleichzeitig werden technische Anforderungen für die nächste Generation an Laserpolieranlagen für Glasoptiken definiert.

Abstract

For laser polishing of glass, the glass surface is heated using CO₂-laser radiation, and in the resulting state of reduced viscosity, a redistribution of material is achieved through the inherent surface tension. For laser-polished glass surfaces a roughness comparable to that of commercial optics is already achievable. In addition, the process times – especially for aspheres and freeform optics – are significantly shorter than with mechanical polishing. However, the industrial application of laser polishing of glass is still limited due to form deviations and waviness on the polished surfaces. Therefore, this work aims to develop an understanding of the influencing factors behind these errors by investigating the temperature-time profile of the overall process, consisting of preheating, laser processing, and annealing.

The primary cause of the form deviation is found to be the homogeneity of heat input during the preheating process. By adjusting the preheating process, a significant reduction in shape distortion to a level comparable to commercial aspheres is demonstrated for N-BK7.

The waviness after laser polishing can be separated into induced (caused by the laser polishing process) and residual (insufficiently smoothed) components. For fused silica, a temperature-dependent removal process is observed even below the evaporation temperature. Due to fluctuations in the process temperature, inhomogeneous ablation occurs and as a result a waviness-like structure is induced into the glass surface. By using a PID-based process control, the induced waviness can be reduced, but not fully avoided. As the reduction of existing structures is also determined by the viscosity of the glass and thus by the process temperature, a trade-off between induced and residual waviness is inherent for laser polishing. As a result, when implementing laser polishing in production, it is necessary to evaluate the laser polishing process in the context of the full process chain.

Based on these findings and using the two materials N-SF6 and S-FPL53 as examples, a procedure for transferring laser polishing to other glass types is developed. Finally, the effect of laser polishing on sub-surface damage induced by the form generation process is addressed. In laser polishing, whenever a polishing effect can be observed, the healing depth of SSD already exceeds the maximum observable SSD depth after grinding. For example, for fused silica, depending on the laser parameters, a safety factor of up to 40 is achieved.

Thus, the feasibility of laser polishing of glass with shape accuracy and surface qualities comparable to commercial optics is demonstrated. In addition, insights into the technical requirements for the next generation of laser polishing systems are given.

2 Einleitung

Die Bedeutung des Wirtschaftszweigs der Photonik hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Durch die Lasermaterialbearbeitung werden zunehmend konventionelle Fertigungsverfahren abgelöst. Gleichzeitig ist durch neue Trends, wie z. B. Industrie 4.0, autonomes Fahren oder die Quantentechnologien der Bedarf an optischer Sensortechnik und zugehörigen optischen Systemen fortwährend gestiegen. Die eingesetzten Systeme sollen dabei stets kleiner, leichter und gleichzeitig leistungsfähiger werden. Um dies zu erreichen, können komplexe optische Systeme, bestehend aus einer Vielzahl von sphärischen Einzellinsen, durch ein System aus wenigen asphärischen Linsen oder einigen wenigen Freiformoptiken ersetzt werden. [1, 2]

Während sphärische Optiken mit vergleichsweise einfacher Anlagentechnik im Voll- bzw. Linienkontakt geschliffen und poliert werden können, bedarf die Bearbeitung von asphärischen oder Freiformoberflächen einer aufwendigen Anlagentechnik und einer Bearbeitung im Punkt- bzw. Linienkontakt. Hierdurch ist die mechanisch abtragende Herstellung nicht-sphärischer Optiken mit einem hohen Zeit- und Kostenfaktor verbunden, welche mit dem aktuellen Stand der Technik häufig die eines Mehrlinsensystems aus sphärischen Linsen übersteigen. Aus diesem Grund ist die Anwendung von mechanisch gefertigten asphärischen und Freiformoptiken bisher i. d. R. auf kostspielige Sonderlösungen beschränkt. [1, 2]

Alternativ zur mechanisch abtragenden Herstellung können solche Linsengeometrien ebenfalls durch thermisches Umformen erzeugt werden. Hierbei kann eine signifikant kürzere Durchlaufzeit und folglich eine kostengünstigere Linse erreicht werden. Jedoch ist die Herstellung der Formwerkzeuge mit hohen Kosten verbunden (i. d. R. > 20 000 €), da diese in der Oberflächenqualität und Formgenauigkeit der späteren Optik gefertigt werden müssen und nur Standzeiten im Bereich einiger 1000 Optiken erreichen [3, 4]. Zudem werden durch dieses Verfahren nicht die Oberflächenqualitäten und Formgenauigkeiten erreicht, die mit einer abtragenden Fertigung erreichbar sind. Hierdurch ist dieses Verfahren auf großvolumige Märkte beschränkt und nicht für die Herstellung von individualisierbaren Produkten oder Höchstleistungsoptiken geeignet. Gepresste Linsen werden daher z. B. im Automobilbau angewendet (Head-up-Displays, Scheinwerferlinsen etc.). [4, 5]

Bei der konventionellen abtragenden Herstellung von Optiken entfällt bereits für plane Substrate (z. B. Spiegel oder optische Fenster) und sphärische Linsen mit niedrigen optischen Anforderungen ca. die Hälfte der Bearbeitungszeit auf das Polieren [6]. Um diese Zeit bei der Herstellung nicht-optischer Glasoberflächen, welche dennoch ein transparentes Erscheinungsbild haben sollen (z. B. Trinkgläser, Glasflaschen etc.), einzusparen, wird die sogenannte Flammpolitur angewendet. Hierbei wird die Oberfläche des Glasbauteils mittels einer Flamme, zumeist eines Wasserstoff-Sauerstoff-Brenners, aufgeheizt. Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität des Glases und dieses kann unter Einwirkung der durch die Oberflächenspannung hervorgerufenen Kraft fließen und eine Glättung der Mikrorauheit erreichen. Da der Energieeintrag hierbei jedoch sehr großvolumig und nur bedingt kontrollierbar stattfindet, wird durch dieses Verfahren ebenfalls eine Veränderung der Bauteilgeometrie hervorgerufen. Diese kann für die individuelle Anwendung gewünscht sein (z. B. Abrunden von Bauteilkanten), ist jedoch für die Optikherstellung ein Ausschlusskriterium. [7]

Durch die Entwicklung der ersten Laserstrahlquellen in den 1960-er Jahren und die fortlaufende Laserforschung wird ein neues Werkzeug in der Industrie etabliert, mit dessen Hilfe ein lokal begrenzter, kontrollierbarer Energieeintrag in verschiedene Materialien möglich ist. Seit Mitte

der 1980-er Jahre wird untersucht, wie ein auf der Glättung durch die Oberflächenspannung basierendes Polierverfahren mit dem Einsatz eines Laserstrahls als „Flamme“ umgesetzt werden kann. Hierbei wird zumeist eine CO₂-Laserstrahlquelle verwendet, deren Laserstrahlung ($\lambda_{\text{opt}} = 10,6 \mu\text{m}$) z. B. in Quarzglas bei senkrechtem Einfall zu ca. 80 % in das Material eingekoppelt und bei Raumtemperatur in einer Tiefe von ca. 30 μm absorbiert wird [8]. Hierdurch kann die Oberfläche mit Temperaturgradienten von typischerweise um die 1000 K/s innerhalb weniger Sekunden aufgeheizt und geglättet werden. Hierbei wird ein Erweichen des Materials auf oberflächennahe Schichten begrenzt (optische Eindringtiefe CO₂-Laserstrahlung bei 1800 °C = 4 μm [8]) und der Formverzug durch Materialumverteilung fast vollständig unterbunden. Dabei können durch diese Art der Politur auf optischen Oberflächen Mikrorauheiten erreicht werden, die im Bereich konventioneller Fertigungsverfahren liegen ($S_a < 1 \text{ nm}$). Jedoch zeigen bisherige Untersuchungen, dass durch die Laserpolitur ein thermischer Verzug induziert wird, dessen Abhängigkeit von den Prozessbedingungen nicht untersucht ist. Zudem wird durch den Prozess in vielen Untersuchungen eine Welligkeit im Bereich der Ortswellenlänge mittelfrequenter Fehler (MSFE, $80 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 2500 \mu\text{m}$) induziert. Die Ursache für diese induzierte Welligkeit wird vielfach in Schwankungen der Oberflächentemperatur vermutet, ausführliche Untersuchungen hierzu liegen jedoch nicht vor. Diese beiden Fehlerbilder sind primäre Ursache, warum das Verfahren der Laserpolitur von Glas in der Industrie trotz vieler Vorteile nicht etabliert bzw. auf einzelne Sonderfälle beschränkt ist (z. B. konventionell nicht polierfähige Oberflächen wie Mikrolinsenarrays [9]). Zusätzlich sind in der aktuellen Literatur nur vereinzelt Studien zur Laserpolitur von Glassorten abseits des Quarzglases zu finden. Quarzglas wird allerdings aufgrund hoher Kosten und eines vergleichsweise geringen Brechungsindex nur vereinzelt als Rohmaterial für Optiken im Consumer-Markt verwendet. Durch den im Vergleich zu anderen Glassorten geringeren Ausdehnungskoeffizienten wird Quarzglas jedoch vielfach als Rohmaterial für anspruchsvolle Anwendungen (z. B. in der Lasertechnik) eingesetzt.

In der hier vorliegenden Arbeit werden die Fehlerbilder des Formverzugs und der Welligkeit ausführlich dokumentiert und mögliche Einflussgrößen analysiert. Hierzu wird basierend auf bisherigen Veröffentlichungen eine systematische Analyse der publizierten Ergebnisse durchgeführt und um eigene Untersuchungen ergänzt. Abschließend werden die gesammelten Erkenntnisse auf die Übertragbarkeit auf weitere Glassorten untersucht und ein Einfluss der Werkstoffkennwerte auf das Polierergebnis abgeleitet. Zur Einordnung der erzielten Ergebnisse werden typische Industriestandards verschiedener Optikgüteklassen herangezogen.