

Insitu Charakterisierung von Absorptionsverlusten und Degradationseffekten in Quarzglas: Photothermie & Spannungsdoppelbrechung (BMW-Projekt PoliLas)

A. Bayer, U. Leinhos, B. Schäfer, M. Schöneck, K. Mann

Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Hans-Adolf-Krebs-Weg 1, 37077 Göttingen

<mailto:armin.bayer@llg-ev.de>

Präzise Absorptionsmessungen, die in die Beiträge der Oberfläche und des Volumens aufgespalten werden können, werden mit Hilfe der am LLG entwickelten Photothermie (Wellenfrontänderung eines Testlasers) durchgeführt. Darüber hinaus wird die mechanische Kompaktierung unter Einfluss von UV Excimer-Laser Strahlung mit Hilfe der Spannungsdoppelbrechung untersucht.

1 Einleitung

Quarzglas ist eines der am häufigsten verwendeten Materialien in der optischen Industrie. Die hohe Transparenz über einen extrem weiten Spektralbereich, die geringe thermische Ausdehnung sowie die hohe chemische Beständigkeit erlauben verschiedenartigste Anwendungen von der Infrarotspektroskopie über Faseroptiken in der Telekommunikation bis hin zu qualitativ höchstwertigen Objektiven in der Fotografie oder der UV-Lithographie.

Das InnoNet-Projekt **PoliLas** beschäftigt sich mit der Politur optischer Präzisionsoberflächen aus Quarz oder Polycarbonat (PC) unter Verwendung von Laserstrahlung. Abb. 1 zeigt das Prinzip der Oberflächenglättung (vgl. Bildunterschrift).

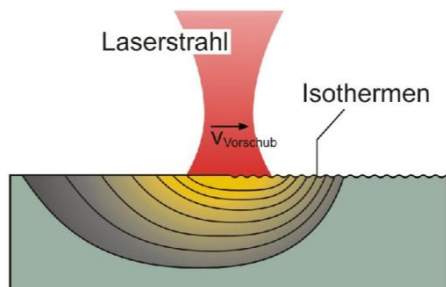


Abb. 1 Prinzip der Laserstrahlpolitur: das Substrat wird oberflächennah angeschmolzen; Mikrorauheit glättet sich dank der Oberflächenspannung der Schmelze.

Das Teilprojekt des Laser-Laboratorium Göttingen e.V. hat dabei die *Charakterisierung* der beim Projektpartner RWTH-TOS (Aachen) polierten Proben zum Schwerpunkt, wobei das Hauptaugenmerk auf den für die spätere optische Performance wichtigen Größen wie Oberflächenrauheit, Formtreue und insbesondere auch Absorption und Spannungsdoppelbrechung liegt.

Im vorliegenden Beitrag sollen aufgrund des begrenzten Umfangs ausschließlich die Experimente zur Trennung der Absorptionsanteile von Oberfläche und Volumen vorgestellt werden. Das verwendete Verfahren nutzt die Wellenfrontdeformation

eines Testlasers durch Absorption des Anregungslasers (thermische Linse, Photothermie)[1].

2 Theorie

Die transiente Temperaturänderung $\delta T(\mathbf{r}, t)$ einer quaderförmigen Probe G (vgl. Abb. 2) unter Bestrahlung durch einen runden Laserstrahl in z -Richtung kann durch Lösung der Wärmeleitungsgleichung mit Randbedingungen auf ∂G erhalten werden [2]:

$$c_p \rho \partial_t \delta T(\mathbf{r}, t) + \nabla \cdot (\lambda \nabla \delta T(\mathbf{r}, t)) + \mu \cdot I_p(\mathbf{r}, t) = 0 \quad r \in G \quad (1)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla \delta T(\mathbf{r}, t) + \kappa \delta T(\mathbf{r}, t) \mathbf{n} - \beta I_p(\mathbf{r}, t) \mathbf{e}_z) = 0 \quad r \in \partial G$$

In Gleichung (1) stehen die Größen μ für den Volumen- und β für den Oberflächenabsorptionskoeffizienten. $I_p(\mathbf{r}, t)$ ist die Laser-Leistungsdichteverteilung, κ der Wärmeübergangskoeffizient, λ die Wärmeleitfähigkeit, c_p die spezifische Wärmekapazität, ρ die Massendichte und \mathbf{n} die Oberflächennormale. Da $\mu \cdot l_s \ll 1$ und $\beta \ll 1$ kann für δT folgender Ausdruck gefunden werden:

$$\delta T(x, y, z, t) \stackrel{\mu, \beta \ll 1}{=} P [\mu \cdot V(x, y, z, t) + \beta \cdot S(x, y, z, t)] \quad (2),$$

wobei P die mittlere Laser-Leistung ist und V , S Volumen- bzw. Oberflächenformfunktionen bezeichnen, die nicht von P , μ und β abhängen und für beliebige (x, y, z, t) aus Gl. (1) bestimmbar sind.

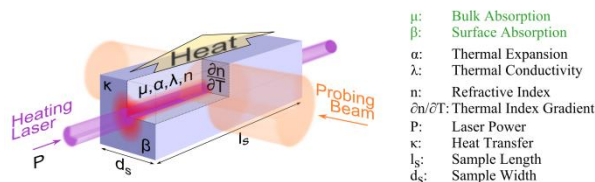


Abb. 2 Geometrie & Bezeichnung der relevanten Größen zur Charakterisierung orthorhombischer, optischer Elemente unter Laser-Bestrahlung

Damit ergibt sich für die Änderung der Wellenfront eines Testlasers der folgende Ausdruck:

$$\delta w(x, z, t) = \int_0^{d_s} (n-1) \frac{\partial u_y}{\partial y}(x, y, z, t) + \frac{\partial n}{\partial T} \delta T(x, y, z, t) dy \quad (3),$$

$$\sim \overset{\text{linearity}}{P[\mu V'(x, z, t) + \beta S'(x, z, t)]}$$

wodurch gezeigt ist, dass die auf die Leistung normierte Wellenfrontänderung proportional zur Absorption ist. n ist hierbei der Brechungsindex bei Raumtemperatur, d_s die Probenbreite (vgl. Abb. 2) und V' , S' aus S und V berechenbare, modifizierte Formfaktoren. Der Verschiebungsvektor $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)^T$ bestimmt sich aus dem elastischen Gleichgewicht.

3 Experiment

Um den Anteil der Oberfläche an der Gesamtaborption bestimmen zu können, wurde der in Abb. 3 schematisch dargestellte Aufbau realisiert. Die senkrechte Orientierung von Heiz- und Teststrahl (vgl. auch Abb. 2) erlaubt die räumliche Trennung der jeweiligen Signale. Das Gehäuse ist mit Stickstoff gespült, um Verfälschungen der Ergebnisse durch Ozonbildung zu vermeiden. Zur Anregung wird ein kollimierter 193 nm Excimerlaser (Novaline A2010, Coherent/Lambda Physik) verwendet; die Proben müssen quaderförmig sein und sind zur besseren thermischen Isolierung auf vier Polamid-Schrauben gelagert.

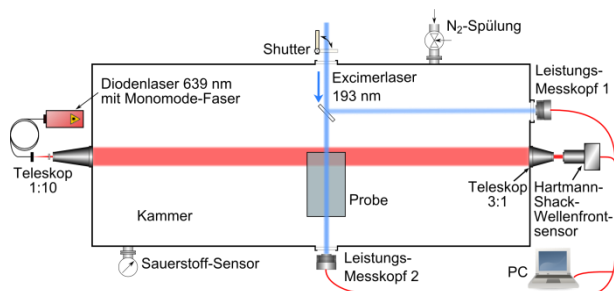


Abb. 3 Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der durch die thermische Linse verursachten Wellenfrontdeformation.

Der zur Ermittlung der thermischen Linse genutzte Diodenlaser (639 nm) wird stark aufgeweitet (1:10), durchstrahlt die Probe von der Seite, wird im Durchmesser wieder reduziert (3:1) und anschließend von einem Hartmann-Shack Wellenfrontsensor detektiert. Die Wellenfront wird mit Hilfe einer Entwicklung in Legendre-Polynome rekonstruiert. Die auf die einfallende Leistung des Heizlasers normierte Wellenfrontdeformation ist direkt proportional zur Absorption.

4 Ergebnisse

Abb. 4 zeigt die gemessenen Wellenfronten zweier Quarzproben unter Bestrahlung durch einen 193 nm Laser mit 20 ns Pulsdauer und einer Wiederholfrequenz von 800 Hz bei 0,59 W (8,3 W/cm²)

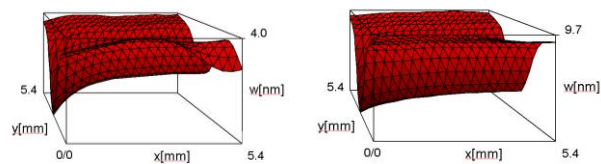


Abb. 4 Laser-induzierte Wellenfrontdeformation zweier 25x25x45 mm³ großer Quarzproben mit unterschiedlicher Absorption (einfallende Fluenz ~ 10,4 mJ/cm²)

Die Wellenfronten zeigen ein ausgeprägtes Tal (Volumenabsorption) und an der linken Seite eine deutlich verstärkte Eintiefung, die der Absorption an der Oberfläche der Probe zugesprochen werden kann. Der Querschnitt der Wellenfronten entlang der Talsohle ist für beide Proben in Abb. 5 dargestellt, wobei hier die Absolutwerte der optischen Weglängendifferenz genutzt werden. Hierdurch ist es möglich eine mathematische Anpassung gemäß Gleichung (3) durchzuführen, wobei sich eine hervorragende Übereinstimmung ergibt ($R^2 > 99\%$).

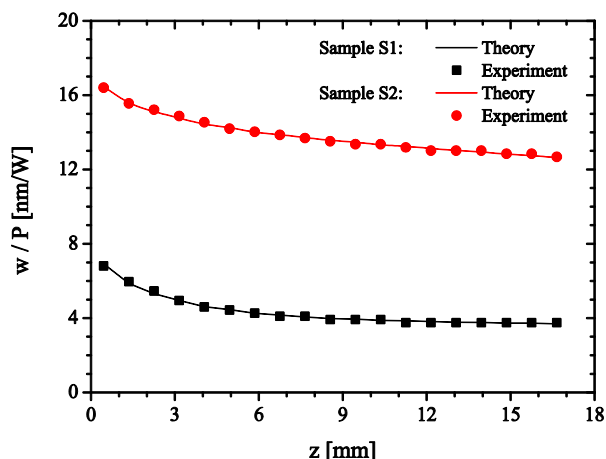


Abb. 5 Auf die einfallende Lichtleistung normierte optische Weglängendifferenz

Literatur

- [1] B. Schäfer, J. Gloger, U. Leinhos, K. Mann: *Photo-thermal measurement of absorptance losses, temperature induced wavefront deformation and compaction in DUV-optics*, Opt. Express 17 (25), 23025-23036 (2009)
- [2] B. Schäfer, M. Schöneck, A. Bayer, K. Mann: *Absolute measurement of surface and bulk absorption in DUV optics from temperature induced wavefront deformation*, Opt. Express, akzeptiert (2010)