

**Entwicklung eines  
Laserstrahlpolierverfahrens für  
Quarzglasoberflächen**

Kerstin Hecht



Universitätsverlag Ilmenau  
2012

# Impressum

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 27. Februar 2012

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. oec. Dagmar Hülsenberg  
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner  
(Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena)
3. Gutachter: Dr.-Ing. Hartmut Müller  
(Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung,  
Jena)

Tag der Verteidigung: 4. Juli 2012

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

**ISSN** 1868-6532 (Druckausgabe)

**ISBN** 978-3-86360-041-9 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000220

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzzusammenfassung</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	7
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	9
<b>Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen</b> .....	13
<b>1 Einleitung</b> .....	17
<b>2 Ziel und Vorgehensweise</b> .....	19
<b>3 Grundlagen</b> .....	21
3.1 Überblick .....	21
3.2 CO <sub>2</sub> -Laser und CO <sub>2</sub> -Laserstrahlung .....	22
3.2.1 Funktionsprinzip .....	22
3.2.2 Aufbau und Funktion der verwendeten Laseranlagen.....	24
3.2.3 Eigenschaften der verwendeten CO <sub>2</sub> -Laser .....	27
3.2.4 Wechselwirkung Laserstrahl - Werkstoff.....	33
3.3 Quarzglas – Werkstoffeigenschaften und prozessrelevantes Verhalten .....	37
3.4 Temperaturerfassung – Methoden, Messgeräte, Einsatzkriterien .....	41
3.4.1 Prinzip der berührungslosen Temperaturmessung am Beispiel Pyrometer .....	41
3.4.2 Flächenhafte Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera .....	45
3.4.3 Zur Temperaturmessung verwendete Geräte .....	46
3.5 Mechanisches Polieren von Glasoberflächen.....	47
3.5.1 Beschreibung des Verfahrens .....	47
3.5.2 Definition einer polierfähigen Oberfläche .....	49
3.5.3 Mechanische Vergleichs-Politur.....	50
3.6 Laserstrahlpolierprozess – Ausgangsbedingungen und Modellbeschreibung.....	51

3.6.1	Funktionsprinzip.....	51
3.6.2	Simulation der Laserstrahlpolitur .....	53
3.6.3	Thermische Nachbehandlung (Kühlkurve) der Proben nach der LSP.....	57
3.6.4	Einfluss von Viskosität und Oberflächenspannung ....	59
3.6.5	Betrachtungen zum Materialabtrag durch die Laserstrahlpolitur .....	61
<b>4</b>	<b>Laserstrahlpolieren – experimenteller Aufbau .....</b>	<b>64</b>
4.1	Anforderungen an den experimentellen Aufbau.....	64
4.2	CO <sub>2</sub> -Laser mit Galvo-Scannersystem .....	66
4.2.1	Aufbau der Versuchsanlage.....	66
4.2.2	Scankonzepte – Strahlführung auf der Quarzglasoberfläche .....	67
4.2.3	Ermittlung relevanter Laserstrahlparameter .....	71
4.3	CO <sub>2</sub> -Laser mit neu entwickeltem Piezo- Scannersystem.....	72
4.3.1	Aufgabenstellung für Piezo-Scannersystem .....	72
4.3.2	Spezielle Systemanforderungen .....	73
4.3.3	Auswahl, Entwicklung und FEM-Analyse des Piezoscansystems .....	74
4.3.4	Umsetzung und Erprobung des neuen Scannersystems.....	78
<b>5</b>	<b>Experimente .....</b>	<b>80</b>
5.1	Ablauf der Experimente.....	80
5.2	Probenvorbereitung durch Läppen .....	81
5.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide .....	82
5.3.1	Begründung der Vorbearbeitung durch Schleifen .....	82
5.3.2	Statistische Versuchsplanung .....	83
5.3.3	Schleifen ebener Proben - Ergebnisse .....	85
5.3.4	Form- und Profilschleifen von 2½D Konturen und Makrostrukturen.....	96
5.4	Laserstrahlpolieren.....	99

5.4.1	Erprobung und Optimierung der Temperaturerfassung .....	99
5.4.2	Versuchsplanung für das Laserstrahlpolieren .....	107
5.4.3	Ergebnis der Laserstrahlpolitur in den Probengruppen A, B und C.....	109
5.4.4	Optimierung der Laserstrahlpolitur für Gruppe C.....	119
5.4.5	Nomogramme – kombinierter Einfluss von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit .....	124
<b>6</b>	<b>Weitere Untersuchungen polierter Proben und Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>126</b>
6.1	Begründung für weitere Messungen an den Oberflächen.	126
6.2	Zusammenhang zwischen polierfähigen Oberflächen und Ergebnissen der LSP.....	127
6.3	Zusätzliche Charakterisierung und Bewertung der Oberflächen nach der LSP.....	129
6.3.1	Darstellung des Oberflächenprofils.....	129
6.3.2	Beeinflussung der Oberflächenqualität durch Fremdstoffe.....	138
6.3.3	Materialspannungen.....	142
6.4	Einfluss der LSP auf mechanische Eigenschaften der Quarzglasproben .....	146
6.4.1	Begründung der Untersuchungen.....	146
6.4.2	Oberflächenhärte.....	146
6.4.3	Biegebruchfestigkeit .....	148
6.5	Temperaturverteilungsanalyse .....	151
6.5.1	Zielstellung des Vergleichs der angewendeten Temperaturmessverfahren.....	151
6.5.2	Punkt- und linienförmige Temperaturmessung.....	151
6.5.3	Flächenhafte Temperaturmessung.....	153
6.5.4	Rückschlüsse von den Ergebnissen der Kameramessung auf die Pyrometrie .....	155

6.5.5	Möglichkeit eines temperaturgesteuerten Laserpolierprozesses.....	162
<b>7</b>	<b>Verfahrensmodell.....</b>	<b>164</b>
7.1	Prozessmodell und Einflussgrößen – erreichbare Qualität und Grenzen.....	164
7.2	Vergleich des Laserstrahlpolierens mit anderen Polierverfahren .....	167
<b>8</b>	<b>Ausgewählte Applikationen.....</b>	<b>169</b>
8.1	Prozesskette Linsenarray.....	169
8.2	Prozesskette Spritzgusswerkzeug-Formeinsatz .....	170
8.2.1	Test mit Probegeometrie aus Schleifuntersuchungen	170
8.2.2	Formeinsatz zum Spritzgießen von MID aus CNT-haltigen Polymerblends.....	172
8.3	LSP mit neu entwickeltem Piezoscanner.....	176
8.3.1	Untersuchungen auf ebenen Oberflächen .....	176
8.3.2	Laserstrahlpolitur von Prismen.....	180
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>182</b>
<b>10</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>186</b>
10.1	Literatur .....	186
10.2	Betreute Arbeiten .....	191
<b>11</b>	<b>Verzeichnis der Abbildungen.....</b>	<b>192</b>
<b>12</b>	<b>Verzeichnis der Tabellen.....</b>	<b>198</b>