

**Lasertechnik**

Christian Weingarten

**Laserbasierte Formkorrektur  
von optischen Gläsern**

**SHAKER  
VERLAG**

# **Laserbasierte Formkorrektur von optischen Gläsern**

## **Laser-based Form Correction of Optical Glass**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christian Bernd Weingarten

Berichter:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung:  
18.12.2017



Berichte aus der Lasertechnik

**Christian Weingarten**

**Laserbasierte Formkorrektur von optischen Gläsern**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5838-3

ISSN 0945-084X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Gewidmet dem Cusanushaus in Bonn-Mehlem.

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen. Im Folgenden möchte ich einigen Personen danken, die mich direkt und indirekt bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Vielen Dank an Herrn Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A. für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke für die Übernahme des Korreferats und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Jacobs für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein großer Dank geht an Kurt Wissenbach, in dessen Kompetenzfeld ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Masterand tätig war und der mich durch viele interessante Diskussionsrunden und hilfreiche kritische Durchsichten bei meiner wissenschaftlichen Arbeit unterstützt hat. Ebenfalls bedanke ich mich bei meinem Gruppenleiter Edgar Willenborg und meinem Mitarbeiter Sebastian Heidrich. Beiden danke ich für die gemeinsamen Diskussionen und die vielen Dinge, die ich von ihnen lernen durfte. John Flemmer danke ich für die große Hilfe bei all meinen Software-Fragen.

Ein weiterer großer Dank geht an meine vielen studentischen MitarbeiterInnen. Namentlich möchte ich mich bei Emrah Uluz, Julian Kirsch und Benedikt Schober bedanken. Vielen Dank an die Kollegen und Kolleginnen am ILT, besonders aus der Gruppe Laserpolieren. Vielen Dank an meine Bürokollegin Susanne Wollgarten für die stetige Motivation und das angenehme Büroklima.

Des Weiteren möchte ich mich beim Cusanuswerk für die Unterstützung während des Studiums und die geistige und geistliche Förderung während der Promotion bedanken. Mein Dank gilt insbesondere dem Cusanushaus in Bonn-Mehlem und seinem Dauerbewohner Siegfried Kleymann. Danke, dass ich nahezu meine gesamte Dissertation in diesem Haus verschriftlichen durfte.

Ich danke ganz besonders meiner Familie (Mama, Papa, Peter, Anja, Julia, Jojo, Simone und Philipp), meiner Lerngruppe (Patrick, Philipp, Lutz) und der PleaseMühle für die Unterstützung und Ablenkung neben der Promotion.

Als letztes danke ich meiner Frau Rebecca, dass sie mich immer wieder während der Promotion motiviert hat und mich jeden Tag mit einem Lächeln zur Arbeit verabschiedet.

Aachen im Januar 2018

Christian Weingarten

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>4</b>
3.1	Laserbasierte Prozesskette zur Optikfertigung	4
3.1.1	Lasergröbtabtrag zur Formherstellung	5
3.1.2	Laserpolieren	7
3.1.3	Feinstabtrag zur Formkorrektur	10
3.2	Konventionelle Korrekturpolitur-Verfahren	12
3.3	Für die laserbasierte Formkorrektur relevante Eigenschaften von Glas	15
<b>4</b>	<b>Zielsetzung und Ablauf der Arbeit</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Anlagen-, Messtechnik und Probenmaterial</b>	<b>21</b>
5.1	Verwendete Laserstrahlquelle	21
5.2	Versuchsaufbau	23
5.3	Auswertemethodik	26
5.3.1	Verwendete Messgeräte	26
5.3.2	Ermittlung der Abtragtiefe	26
5.3.3	Ermittlung der Rauheit	28
5.4	Glaswerkstoffe und Probenmaterial	29
<b>6</b>	<b>Grundlagen zum Feinstabtrag von optischen Gläsern</b>	<b>32</b>
6.1	Verfahrensprinzip	32
6.2	Einzelpulsabtrag	33
6.2.1	Pulsform	33
6.2.2	Effektiver Strahldurchmesser	37
6.3	Variation der Verfahrensparameter	39
6.3.1	Pulsdauer	40
6.3.2	Laserintensität (Pulsspitzenleistung)	46
6.3.3	Laserintensität (Laserstrahldurchmesser)	51
6.3.4	Repetitionsrate	54
6.3.5	Scanvektorenlänge	56
6.3.6	Puls- und Spurbstand	57
6.3.7	Anzahl der Lagen	60
6.3.8	Einfallswinkel	62
6.4	Reproduzierbarkeit	65

6.4.1	Einfluss der Leistungsschwankungen	67
6.4.2	Einfluss der Position im Scanfeld	71
6.5	Einfluss Temperzyklus auf die Abtragtiefe	72
6.6	Einfluss der thermischen Vorgeschichte auf den Feinstabtrag	74
<b>7</b>	<b>Anwendung des Feinstabtrags auf optische Gläser</b>	<b>76</b>
7.1	Quarzglas	76
7.2	Ultra-Low Expansion Glas (ULE)	78
7.3	Zerodur	79
7.4	BK7	81
<b>8</b>	<b>Entwicklung einer Prozesskette zur laserbasierten Formkorrektur</b>	<b>85</b>
8.1	Ortsselektiver Feinstabtrag	85
8.2	Software	87
8.3	Kennlinie	88
8.4	Laserbasierte Formkorrektur auf laserpolierten Oberflächen	89
8.4.1	Erprobung der laserbasierten Formkorrektur (N = 1)	89
8.4.2	Iteration der laserbasierten Formkorrektur	95
8.5	Vorheizeffekte	98
8.5.1	Abtrag von Rechteckstrukturen	99
8.5.2	Abtrag von Sinusstrukturen	101
8.5.3	Simulation des Vorheizeffektes	104
8.5.4	Auswirkungen des Vorheizeffektes auf die laserbasierte Formkorrektur	106
8.6	Laserbasierte Formkorrektur auf gekrümmten Oberflächen	108
<b>9</b>	<b>Einfluss der laserbasierten Formkorrektur auf optische und mechanische Eigenschaften</b>	<b>110</b>
9.1	Brechungsindex	110
9.2	Eigenspannungen	111
9.3	Härte	112
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>114</b>
<b>11</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>118</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b>	<b>121</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>125</b>