

Daniel Wächter

Wirkweise des Poliermittelträgers beim Polieren optischer Gläser



Wirkweise des Poliermittelträgers beim Polieren optischer Gläser

Mode-of-Action of the Polishing Pad in Polishing 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

Daniel Hubertus Wächter

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Oktober 2017

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Daniel Wächter

Wirkweise des Poliermittelträgers
beim Polieren optischer Gläser

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 38/2017



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Daniel Wächter:

Wirkweise des Poliermittelträgers beim Polieren optischer Gläser

1. Auflage, 2017

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2017

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-582-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Vorwort und Danksagung

Preamble and Acknowledgment

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen.

Ich danke Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke, Leiter des Fraunhofer IPT und Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule RWTH, dass er mir diese Promotion ermöglicht und wohlwollend betreut hat. Mein Dank gilt ebenfalls Univ.-Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Leiter des Fachgebiets Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF der Technischen Universität Berlin und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, für die Übernahme des Koreferats und die Durchsicht der Dissertation. Weiterhin spreche ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Johannes Schleifenbaum meinen Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes aus.

Dr.-Ing Olaf Dambon und Udo Schneider danke ich für die wertvollen Anregungen und konstruktiven Diskussionen während der gesamten Entstehung sowie für die kritische Durchsicht des Manuskripts, ebenso Dr.-Ing. Kyriakos Georgiadis hierfür. Für das Korrekturlesen gilt mein Dank Heinz und Ingrid Ziegeldorf.

Weiterhin möchte ich mich sehr herzlich bei den Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IPT, insbesondere aus der Abteilung Feinbearbeitung und Optik, für die hervorragende Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch bedanken. Für die Unterstützung bei der Versuchstätigkeit danke ich Rene Kaulhausen und Achim Fourné für die technische Betreuung der Maschinen, Martina Vizcay Rodriguez für die REM-Untersuchungen, den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt und den Mitarbeitern aus den anderen Dienstleistungsbereichen des Instituts. Meinen studentischen Mitarbeitern danke ich für ihren motivierten und engagierten Einsatz bei den Versuchen und Ergebnisauswertungen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich stets unterstützt haben. Außerdem bedanke ich mich bei meiner Familie, meinem Bruder und meinen Freunden für den Rückhalt während der Entstehung dieser Arbeit. In besonderem Maße gilt dieses für meine Frau, die mir die notwendigen Freiräume bedingungslos eingeräumt und mich sowohl liebevoll als auch tatkräftig unterstützt hat.

Abschließend wünsche ich eine aufschlussreiche Lektüre und erhoffe mir, dass die Ergebnisse die Weiterentwicklung von Polierverfahren in der industriellen Praxis fördern.

Aachen, im Dezember 2017

Daniel Wächter

Zusammenfassung

Summary

Optische Systeme mit Präzisionsoptiken sind in vielen alltäglichen und technischen Anwendungen ein Schlüsselement. Die Ausweitung der Anwendungen und das Nutzen des Innovationspotenzials erfordern jedoch eine Leistungssteigerung bei der Fertigung von Präzisionsglasoptiken, insbesondere bei den notwendigen Polierverfahren. Das Polieren mit chemo-mechanischem Wirkmechanismus unter Verwendung eines Poliermittelträgers ist das am meisten eingesetzte Polierverfahren und zentraler Bestandteil der Prozesskette. Den kurzen Polierzeiten und geringen Prozesskosten steht jedoch eine geringe Prozessstabilität entgegen. Das Einhalten sehr hoher Qualitätsanforderungen erfordert zudem den konsekutiven Einsatz zusätzlicher Polierverfahren. Ein maßgeblicher Hebel für Leistungssteigerungen in der direkten Optikfertigung ist somit die Weiterentwicklung dieses Verfahrens.

Das Prozessergebnis wird durch die Interaktionen zwischen dem Poliermittelträger, den Polierkörnern und der Werkstückoberfläche bestimmt. Während zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der Prozessstellgrößen und des Poliermittels vorliegen, wurde der Einfluss des Poliermittelträgers trotz seiner zentralen Bedeutung bislang nicht systematisch untersucht. Die Gestaltung der Poliermittelträger beruhte vor allem auf Erfahrungswissen.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Beschreibungsmodells über die Interaktionen im Wirkspalt und über die Wirkweise von Polyurethan-Poliermittelträger beim chemo-mechanischen Polieren optischer Gläser, um daraus prozessrelevante Eigenschaften zu bestimmen und stabilitätssteigernde Maßnahmen abzuleiten. Dazu erfolgt die theoretische Betrachtung der Interaktionen im Wirkspalt in Analogie zu einem hydrodynamischen Reibsystem. Die ermittelten prozessrelevanten Eigenschaften und Erkenntnisse über das Prozessverhalten werden anhand des Polierens planer Optiken überprüft und erweitert.

Das Beschreibungsmodell erklärt a) die Wirkung der Prozessstellgrößen Druck und Relativgeschwindigkeit, b) der Poliermittelträgereigenschaften Porosität, Steifigkeit, Mikrorauheit und c) der Geometrie der Werkstückkante auf den Kontakt der Poliermittelkörner und des Poliermittelträgers mit der Werkstückoberfläche. Bei den Poliermittelträgereigenschaften verringert eine hohe offene Porosität den Fluiddruckaufbau. Die Hinzugabe eines Füllstoffs besitzt keinen positiven Effekt auf die Abtrage oder die Oberflächenrauheit. Das zeitliche Prozessverhalten wird durch zwei Verschleißphänomene beeinflusst. Zum einen werden die Rauheitsspitzen des Poliermittelträgers durch mechanische Belastung abgetragen und zum anderen verändern Glasanhaftungen die Oberfläche des Poliermittelträgers, welches insbesondere durch die Verwendung von Poliermittel als Füllstoff begünstigt wird.

Die vorgenommene Charakterisierung der Poliermittelträgertypen erweitert die Kenntnisse über eine zentrale Komponente des Poliersystems. Die vorgestellten Messmethoden bieten dabei eine allgemeine Richtlinie. Die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Poliermittelträgereigenschaften und Prozessergebnis ermöglicht die gezielte Auswahl eines geeigneten Poliermittelträgers und die Gestaltung innovativer Poliermittelträger. Das dargestellte Beschreibungsmodell bietet zudem einen Orientierungsrahmen zur Analyse von Polierprozessen. Die vorgestellten Ergebnisse zum Verschleißverhalten der Poliermittelträger und zur Stabilisierung der Materialabtrage unterstützen abschließend die Steigerung der Leistungsfähigkeit des Polierprozesses.

Summary

Zusammenfassung

Optical systems with precision optics present a key in various fields of application. In order to expand the fields of application and to use the potential for innovations, a further increase in the performance on the part of manufacturing technology is necessary, particularly in polishing. The so-called pad polishing using a polishing pad and a chemo-mechanical removal mechanism is the most widely used technology and an essential part of the manufacturing sequence. It features short polishing times and low process costs, but it also shows a limited process stability. The specifications, met by pad polishing, require often the application of further, more expensive polishing technologies. The keys to success for further development of direct manufacturing of optics are advances in pad polishing.

The interactions between the polishing pad, the polishing grits and the specimen surface determine the process results. A number of investigations exist with focus on process parameters and polishing slurry, but a comprehensive consideration of the polishing pad has not yet taken place despite its significant influence on the process as a central component of the polishing system. The selection and design of polishing pads is largely based on practical knowledge.

This thesis aims for the development of a descriptive model about the interactions in the process area and the mode-of-action of polyurethane polishing pad in chemo-mechanical polishing of optical glass in purpose to determine pad properties relevant to the process and actions to increase the process stability. The theoretical description of the interactions in the process area is based on the similarity to a hydrodynamic friction system. The determined pad properties and findings about the process behavior are validated and extended in practical experiments on polishing plano optics.

The descriptive model explains a) the effect of the manipulated variables pressure and relative velocity, b) of the characteristics of the polishing pad porosity, stiffness, micro roughness and c) of the geometry of the workpiece edges on the extent of contact between the polishing grains and the polishing pad with the workpiece surface. Regarding the pad properties, the open porosity reduces the fluid pressure build-up. The addition of a filler does not have a positive effect on the material removal rate or surface roughness. Two categories of wear phenomena influence the process behavior. On the one hand, the roughness peaks are removed by mechanical wear. On the other hand, adhesion by glass components alters the pad surface, which is promoted by a filler of a polishing agent.

The characterization of polishing pad types increases the so far little knowledge of a central component of the polishing system and the introduced measurement methods present a template for characterizing polishing pads. The model describing the connection between the characteristics of the polishing pad and the process results allows a targeted selection of a suitable polishing pad and the development of innovative pad designs. The model serves as an orientation framework for the analysis of polishing processes, as well. Last but not least, the presented results on the wear phenomena of the polishing pads and the presented actions for stabilizing the material removal rate support the derivation of measures to improve the performance of the pad-polishing process.

Inhaltsverzeichnis

Table of Contents

Formelzeichen und Abkürzungen	v
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Erkenntnisse	9
2.1 Prozesstechnologische Grundlagen.....	9
2.1.1 Begriffliche Definitionen	9
2.1.2 Grundlagen des Polierprozesses	11
2.1.3 Grundsätzliche Wirkmechanismen.....	13
2.2 Polieren optischer Gläser	14
2.2.1 Charakteristika der Werkstoffgruppe.....	15
2.2.2 Eingesetzte Polierverfahren.....	18
2.2.3 Prozesstechnologische Untersuchungen über das chemo-mechanische Polieren	20
2.3 Poliermittelträger.....	24
2.3.1 Übersicht verschiedener Poliermittelträgerarten	25
2.3.2 Herstellung und chemische Struktur von Polyurethanschäum	26
2.3.3 Polyurethanschäume als Poliermittelträger.....	27
2.4 Modellierungsansätze für das Polieren	28
2.4.1 Polieren als Tribosystem	29
2.4.2 Modelle für die Interaktionen im Wirkspalt	30
2.5 Zusammenfassung des Stands der Erkenntnisse	33
3 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise	35
4 Charakterisierung der Poliermittelträger	39
4.1 Eigenschaften nach Herstellerangaben.....	40
4.2 Bestimmung der relevanten Eigenschaften	41
4.2.1 Makro- und Mikrotopographie	41
4.2.2 Mechanische Eigenschaften	44
4.2.3 Porosität, Füllstoffe und physikalische Eigenschaften.....	48
4.3 Zusammenfassung der Eigenschaften	51

5	Theoretische Betrachtung und Analogieversuche	53
5.1	Systembeschreibung, Betrachtungsziel und Abstraktion	53
5.1.1	Problembeschreibung und Zieldefinition	54
5.1.2	Abstraktion und Modellierungsansatz	55
5.1.3	Gegenüberstellung der Eigenschaften der Systemkomponenten	58
5.2	Beschreibung der Teilzusammenhänge	59
5.2.1	Reibsystem unter Flüssigkeitsschmierung	60
5.2.2	Wirkmechanismus	63
5.2.3	Korneinbettungsverhalten	64
5.2.4	Hydrodynamische Phänomene	68
5.3	Zusammenführung zum Beschreibungsmodell und Zwischenfazit	70
5.4	Empirische Evaluierung und Modellerweiterung	74
5.4.1	Versuchsaufbau und Vorgehensweise	74
5.4.2	Einfluss der Stellgrößen	77
5.4.3	Einfluss der Poliermittelträgereigenschaften	81
5.4.4	Einfluss der Poliersuspension	84
5.4.5	Zusammenfassung	87
6	Anwendung des Prozessmodells für die Prozessgestaltung	89
6.1	Versuchsplanung und -aufbau	89
6.1.1	Versuchsaufbau und Vorgehensweise	89
6.1.2	Definition der Ergebnisgrößen	91
6.2	Validierung und Diskussion des Prozessmodells	92
6.2.1	Einfluss der Prozessstellgrößen und des Poliermittelträgers	92
6.2.2	Einfluss der Poliersuspension	95
6.2.3	Quantitativer Einfluss der Stellgrößen auf die Ergebnisgrößen	98
6.2.4	Einfluss der Suspensionseigenschaften	100
6.3	Prozessrelevante Eigenschaften des Poliermittelträgers	104
6.3.1	Einfluss der Materialeigenschaften auf das Polierverhalten	104
6.3.2	Einfluss des Oberflächenzustands auf das Polierverhalten	111
6.4	Zusammenfassung und Diskussion der Wirkweise des Poliermittelträgers	113

7	Prozessbedingte Veränderungen des Poliermittelträgers	115
7.1	Veränderungen der Abtragate.....	116
7.2	Veränderungen des Poliermittelträgers während der Verwendung.....	118
7.2.1	Untersuchung auf abrasiven Verschleiß	119
7.2.2	Untersuchung hinsichtlich Glasanhaftungen	121
7.3	Diskussion und Ableitung von Maßnahmen	125
8	Zusammenfassung, Reflexion und Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	A
A	Anhang	I

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbols and Abbreviations

Große Buchstaben

A	[mm ²]	Fläche
A _s	[mm ²]	Durchdringungsfläche
C _{0,1,2,3}	[-]	Konstanten
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
E'	[MPa]	Speichermodul
E''	[MPa]	Verlustmodul
F _x	[N]	Kraft entsprechend Index
F _{Fluid}	[N]	Fluidtragkraft
F _{Korn}	[N]	Gesamtkraft im Polierkornkontakt
F _{PMT}	[N]	Gesamtkraft im Poliermittelträgerkontakt
F _{Prozess}	[N]	Gesamte Prozesskraft
F _{Reib}	[N]	Reibkraft
K _p	[-]	Preston-Konstante
M _R	[Nm]	Reibmoment
M _{Roll}	[Nm]	Rollmoment
R _z	[nm]	gemittelte Rautiefe
S _q	[nm]	quadratische Rautiefe
S _z	[nm]	gemittelte Rautiefe
T _g	[°C]	Glasübergangstemperatur
U	[m/s]	Geschwindigkeit
V	[mm ³]	Volumen
V _{oH}	[mm ³]	Volumen ohne Hohlräume
ΔV	[mm ³]	Abtragsvolumen
W _q	[nm]	Welligkeit
ϕ	[mm]	Durchmesser

Kleine Buchstaben

c ₀	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit
c _p	[J/gK]	Wärmekapazität
d	[mm]	Korndurchmesser
dz	[m]	Änderung der Werkstückhöhe
f _{Gleit}	[-]	Gleitreibungszahl
f _x	[-]	Reibzahl Festkörper- bzw. Flüssigkeitsreibung

h_{kr}	[μm]	kritische Spalthöhe
h_{Wirk}	[μm]	Wirkspalthöhe
h_x	[μm]	Eindringtiefe der Komponente x
n_{Akt}	[-]	Anzahl wirksamer Körner
n	[-]	Brechungsindex
n_f	[-]	Brechungsindex für Licht bei blauer Cd-Linie
n_c	[-]	Brechungsindex für Licht bei roter H-Linie
p	[kPa]	Druck
p_{Polier}	[kPa]	Polierdruck
p_{Fluid}	[kPa]	Fluiddruck
r_s, r_w	[m]	Radius in Kugelkoordinaten
Δs	[mm]	Wegstrecke
$\tan \Delta$	[rad]	Phasenverschiebung
dt	[s]	Änderung der Polierzeit
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_{min}	[m/s]	Geschwindigkeit bei kleinstem Reibmoment
v_{rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit

Griechische Buchstaben

α	[-]	Einfallswinkel
$\alpha_{30/70}$	[1/K]	Wärmeausdehnungskoeffizient
Φ	[-]	offene Porosität
φ	[rad]	Winkel in Kugelkoordinaten
ρ	[g/dm ³]	Dichte
ρ_0	[g/dm ³]	Rohdichte
σ	[-]	Standardabweichung
η	[Pa·s]	Viskosität
τ	[N/mm ²]	Schubspannung
μ	[-]	Haftreibungskoeffizient
μ	[-]	Querkontraktionszahl
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
Λ	[-]	Schmierfilmdickenparameter
v_e	[-]	Abbe-Zahl