

Tim Grunwald

Modellierung des Werkzeugverschleißes bei der Quarzglasumformung



Modellierung des Werkzeugverschleißes bei der Quarzglasumformung

Modeling of Tool Wear during Fused Silica Molding

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

vorgelegt von

Tim Grunwald

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Mai 2021

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Tim Grunwald

Modellierung des Werkzeugverschleißes
bei der Quarzglasumformung

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 16/2021



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Tim Grunwald:

Modellierung des Werkzeugverschleißes bei der Quarzglasumformung

1. Auflage, 2021

Apprimus Verlag, Aachen, 2021

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

ISBN 978-3-86359-981-2

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

für Jannis, Louis und Jenny

»Approximavit sidera«

Vorwort und Danksagung

Preface and Acknowledgement

»Approximavit sidera – Er hat uns das Licht der Sterne nähergebracht«¹ Dieses für lange Zeit verwendete Motto der Fraunhofer-Gesellschaft unterstreicht den besonderen Einfluss der Optik in der Wissenschaftsgeschichte. Umso mehr ist es mir eine Ehre, mit der vorliegenden Arbeit ein Teil dieser Geschichte zu werden und das Erbe JOSEPH VON FRAUNHOFERS fortzuführen.

Die vorliegende Dissertation entstand im Verlauf meiner Tätigkeit als Gruppen- und Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen.

Zu höchstem Dank verpflichtet fühle ich mich Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA, Direktionsmitglied des Fraunhofer IPT und Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, der sich für die Betreuung dieser Arbeit bereit erklärt hat und mir als mein Vorgesetzter stets Gehör, Orientierung und Ziel geboten hat.

In gleicher Weise möchte ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, Leiterin des Instituts für Oberflächentechnik der RWTH Aachen, für die Übernahme der Mitberichterschaft bedanken.

Darüber hinaus haben weitere Personen einen signifikanten Anteil an der Entstehung dieser Dissertation, denen ich auf diesem Weg danken möchte.

An erster Stelle sind hier zunächst Herr Dennis Patrick Wilhelm, Herr Hamidreza Paria und Herr Matthäus Birkle erwähnt, auf deren fleißige Mitarbeit ich mich stets verlassen konnte. Sie haben immer mitgedacht und in eigener Verantwortung zielstrebig gehandelt. Damit waren sie mir eine hervorragende Unterstützung.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen der Abteilung Feinbearbeitung und Optik des Fraunhofer IPT, allen voran Herrn Paul-Alexander Vogel, die mich ebenfalls tatkräftig unterstützten und deren gewichtige Denkanstöße mir stets Aufgabe und Motivation waren.

Für die Unterstützung in der chemischen Analyse und der mathematischen Modellbildung danke ich Herrn Prof. Jochen M. Schneider PhD und Herrn Dr. Stephan Prünte des MCh der RWTH Aachen, Herrn Prof. Dr. Thomas Höche und Herrn Dr. Christian Patzig des Fraunhofer IMWS sowie Herrn Dr. Torsten Trimborn des IGPM der RWTH Aachen.

Für die kritische Durchsicht meiner Arbeit, verbunden mit hilfreichen Anmerkungen möchte ich mich bei meiner Schwester Stefanie, Herrn Dr.-Ing. Olaf Dambon und Herrn Thomas Theis bedanken.

Großer Dank gebührt ebenfalls meinen Eltern, auf deren Unterstützung ich mich stets verlassen konnte und kann. Ohne ihre liebevolle Erziehung und offene Art würde ich heute nicht an dieser Stelle stehen. Entsprechend dem Credo »Das Beste kommt zum Schluss« bin ich zutiefst dankbar für die Liebe und Zuneigung meiner Familie, meiner Frau Jenny und meinen Sonnenscheinen Janis und Louis. Ohne diesen Rückhalt wäre es nicht möglich gewesen, eine solche Arbeit zu verfassen. Da mit der Fertigstellung der Dissertation eine entbehrensreiche Zeit für sie endet, möchte ich ihnen diese Arbeit widmen.

¹ Inschrift auf dem ursprünglichen Grabstein JOSEPH VON FRAUNHOFERS (1787 – 1826).

Zusammenfassung

Summary

Die Optik als Herzstück der Photonik (Wissenschaft über die Kontrolle des Lichts) wird als Schlüsseltechnologie der Zukunft angesehen. Sie ermöglicht eine Vielzahl von Produkten in den verschiedensten Endverbraucherbranchen – von nachhaltiger Energietechnik und Lebensmittelsicherheit über digitale und reale Medizin und Sicherheit bis hin zu intelligenten Verkehrs-, Gebäude- und Kommunikationssystemen. Quarzglas als hochbelastbarer Werkstoff zur Laserstrahlformung oder zur optischen Kommunikation nimmt eine unersetzliche Rolle in der Zukunft der Optik ein. Die konventionellen, direkten Fertigungsverfahren zur Herstellung von Quarzglas-Optiken, wie bspw. Schleifen und Polieren, stoßen zunehmend an Effizienz- und Komplexitätsgrenzen hinsichtlich einer Skalierbarkeit der Fertigung respektive der Herstellung komplexer Geometrien.

Das Präzisionsblankpressen von Quarzglas zu präzisen Optiken kann diese Grenzen überwinden, steht jedoch selbst vor Herausforderungen, die eine bedeutende industrielle Verbreitung des Verfahrens verwehren. Dazu zählt vorrangig der Verschleiß der Formwerkzeuge, welcher durch die extremen Prozessbedingungen, wie Temperaturen von bis zu 1400 °C und hohen Umformspannungen, hervorgerufen wird. Der Werkzeugwerkstoff, welcher dem Anforderungsprofil am ehesten gerecht wird, ist Glaskohlenstoff. Wissenschaftliche Arbeiten der jüngeren Vergangenheit leisteten Pionierarbeit in der Qualifizierung und der Untersuchung des Verschleißverhaltens von Glaskohlenstoff während der Quarzglasumformung. Die vorliegende Arbeit schließt sich an diese Vorarbeiten an und modifiziert, bzw. erweitert die bestehenden Erkenntnisse.

Dabei steht die umfängliche Betrachtung der gesamten Prozesskette des Präzisionsblankpressens von Quarzglas im Fokus der Arbeit. Angefangen von Bearbeitungsversuchen und -analysen von Glaskohlenstoff zum Einsatz als Umformwerkzeug, über die Umformung und die Beobachtung des Schädigungsfortschritts, bis hin zur tiefgehenden messtechnischen Qualifikation etwaiger Defekte. Das Wissen über die Interaktion des Werkzeugs und des Glaswerkstoffs vor dem Hintergrund des Verschleißes kann signifikant ausgebaut und in Form von fünf Verschleißinterpretationen kategorisiert werden.

Der Anwendungsbezug der Arbeit wird durch ein mathematisches Simulationsmodell erzielt, welches eine hinreichend genaue Modellierung der Verschleißphänomene ermöglicht und eine industrielle Verwendbarkeit aufweist. Aufbauend auf der Beschreibung *was* im Prozess passiert, werden vier Abhilfemaßnahmen präsentiert, *wie* der Verschleiß während der Quarzglasumformung mit Glaskohlenstoffwerkzeugen reduziert werden kann.

Mit den erzielten Fortschritten werden wichtige Voraussetzungen geschaffen, sodass die Umformung die direkte Bearbeitung ersetzen bzw. zur mittelbaren Effizienzsteigerung in die konventionelle Fertigungsprozesskette implementiert werden.

Summary

Optics as the heart of photonics (the science of controlling light) is considered to be a key technology of the future. It enables a wide range of products in a variety of end user industries - from sustainable energy and food safety, digital and real medicine and security to intelligent traffic, building and communication systems. Fused silica as a highly durable material for laser beam shaping or optical communication plays an irreplaceable role in the future of optics. The conventional, direct manufacturing processes for the production of fused silica optics, e.g. grinding and polishing, are increasingly reaching the limits of efficiency and complexity concerning the scalability of production or the production of complex geometries.

The Precision Glass Molding of fused silica into precise optics can overcome these limits, but faces challenges that prevent it from becoming a significant industrial application. These include primarily the wear of the molding tools, which is caused by the extreme process conditions such as temperatures of up to 1,400 °C and high forming stresses. The mold material which meets the requirement profile best is glassy carbon. Recent scientific work has obtained pioneering achievement in the qualification and investigation of the wear behavior of glassy carbon during the fused silica molding process. The present thesis follows on from this preliminary work and modifies or extends the existing knowledge.

The focus of this thesis is on a comprehensive consideration of the entire process chain of Precision Glass Molding of fused silica. Starting with machining tests and analyses of glassy carbon for its use as molding tools, through molding and observation of the progress of wear, to in-depth metrological qualification of possible defects. The knowledge about the interaction of the mold and the glass material against the background of wear can be significantly expanded and categorized in the form of five wear interpretations.

The application of the work is achieved by a mathematical simulation model, which allows a sufficiently exact modeling of the wear phenomena and has an industrial applicability. Based on the description of *what* happens in the process, four remedies are presented *how* to reduce wear during fused silica molding with glassy carbon tools.

With the progress achieved, important prerequisites are being created so that forming can replace direct machining or be implemented in the conventional manufacturing process chain to increase efficiency indirectly.

Inhaltsverzeichnis

Table of Content

1	Einleitung und Motivation	1
2	Stand der Erkenntnisse	7
2.1	Replikative Fertigung hochpräziser Glasoptiken	7
2.1.1	Prozesskette des Präzisionsblankpressens	10
2.1.2	Werkstoff Quarzglas	13
2.2	Herstellung von Werkzeugen für die Glasumformung	15
2.2.1	Glaskohlenstoff als Werkzeugwerkstoff	16
2.2.2	Bearbeitungsverfahren für optische Oberflächen	17
2.3	Verschleiß von formgebenden Werkzeugen	22
2.3.1	Tribologie und Verschleiß	22
2.3.2	Verschleiß- und Korrosionsmechanismen	23
2.3.3	Verschleißbetrachtungen für Glasumformprozesse	29
2.3.4	Erkenntnisse im Werkzeugverschleiß bei der Quarzglasumformung	32
2.4	Oberflächencharakterisierung	36
2.4.1	Auswirkungen der Werkzeugschädigung auf umgeformte Glasoptiken	36
2.4.2	Messtechnische Oberflächenbeschreibung	37
2.5	Zwischenfazit	40
3	Zielsetzung und Hypothese	41
4	Methodik	45
4.1	Theorie der Prozesssignatur	45
4.2	Abgrenzung und Systembeschreibung	47
4.2.1	Werkstoff- und Prozessauswahl	48
4.2.2	Beschreibung der Systemkomponenten	50
4.3	Messtechnik zur Charakterisierung der Versuchsbeobachtungen	53
4.3.1	Messtechnik zur qualitativen Oberflächenanalyse	53
4.3.2	Messtechnik zur quantitativen Oberflächenanalyse	55
4.3.3	Messtechnik zur qualitativen Mikrostrukturanalyse	58
4.3.4	Messtechnik zur quantitativen Mikrostrukturanalyse	59
4.4	Versuchsplanung	61
5	Werkzeugbearbeitung und Werkstoffcharakterisierung	65
5.1	Schleifbearbeitung von Glaskohlenstoffformwerkzeugen – Analyse von Randzonenschädigungen	65
5.2	Evaluierung von Poliersuspensionen hinsichtlich des erzielbaren Materialabtrags von Glaskohlenstoff	68
5.3	Erzielung optischer Oberflächengüten	70
5.4	Herstellung unterschiedlicher Oberflächentopografien	74
6	Verschleiß und Korrosion im Realexperiment	79
6.1	Versuchsdurchführung	79

6.2	Phänomenologische und strukturelle Schädigungsbeobachtung	80
6.3	Chemisch-analytische Schädigungsbeobachtung	89
6.4	Zwischenfazit	97
7	Interpretation und Modellierung der Schädigung.....	99
7.1	Methodik der Modellbildung	99
7.2	Interpretation der chemischen Interaktion	100
7.3	Modellierung der mechanischen Interaktion	104
7.3.1	Modellaufbau	105
7.3.2	Analyse des dreidimensionalen Simulationsmodells	106
7.3.3	Aufbau und Analyse der Mehrskalensimulation	107
7.3.4	Zusatzbetrachtung von Fall B	110
7.4	Mathematische Modellierung der Interaktion	112
7.4.1	MONTE-CARLO-Algorithmus	112
7.4.2	Ziel und Training des Simulationsmodells	115
7.4.3	Auswertung des Simulationsmodells	119
8	Strategien zur Verschleiß- und Korrosionsunterdrückung.....	123
8.1	Rückführung der Erkenntnisse zur Prozessoptimierung	123
8.1.1	Unterdrückung des Kohlenstoffübergangs	123
8.1.2	Unterdrückung der Anhaftungsbildung.....	125
8.1.3	Unterdrückung von Stickstoff-Reaktionen	127
8.1.4	Unterdrückung der Kranzbildung.....	128
8.2	Übertragbarkeit auf andere Produktionsprozesse.....	129
9	Zusammenfassung und Ausblick	133
10	Literaturverzeichnis.....	137
11	Anhang	151

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Großbuchstaben

A	m^2	Fläche
C	1	Konstante
E	J, eV	Energie
E	Pa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
G	J	freie Enthalpie, GIBBS-Enthalpie
\mathcal{G}	$\mathbb{R}^{200 \times 10}$	MOGA-Gen (Parametermatrix)
H	J	Enthalpie
H	1	Härte
H	1	Funktionswert einer Histogramm-Verteilung
\mathcal{H}	1	Laufvariable der MOGA-Evolutionsschleife
K	$m^2 \cdot N^{-1}$	empirische Konstante der PRESTON-Hypothese
K	1	Konvergenzkonstanten der FEM-Simulation
K_{IC}	$Pa \cdot m^{0,5}$	Spannungsintensitätsfaktor, Bruchzähigkeit
\mathcal{K}	1	Komparatorfunktion
L	m	Länge, Distanz
R	m	Radius
Ra	m	arithmetischer Mittenrauwert
Rq	m	quadratischer Mittenrauwert
S	$J \cdot K^{-1}$	Entropie
Sa	m	arithmetischer Mittenrauwert (flächig)
Sq	m	quadratischer Mittenrauwert (flächig)
T	$^{\circ}C, K$	Temperatur
Tg	$^{\circ}C$	Transformationstemperatur
V	m^3	Volumen
V	eV	LENNARD-JONES-Potential
W	m^3	Verschleißvolumen
W_f	J	Arbeit (Arbeitsfunktion)
W_k	m^2	Verschleißkoeffizient

Kleinbuchstaben

c	ct/l, at.-%	Konzentration
d	1	Differenzialinkrement
d	m	Länge, Distanz
e	1	Einheitsraumvektor
f	s ⁻¹	(zeitliche) Frequenz
g	1	Ausbruchskoeffizient der MONTE-CARLO-Simulation
h	m	Höhe, vertikaler Abstand
h _{cu}	m	unverformte Spannungsdicke
k	m ⁻¹	Raumfrequenz
k	1	Laufvariable
k	1	Interaktionswahrscheinlichkeit
k _B	1	BOLTZMANN-Konstante ($k_B = 1,38649 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)
m	1	Laufvariable
m	1	Anhaftungskoeffizient der MONTE-CARLO-Simulation
n	1	Brechungsindex (n_d)
n	1	Teilchenanzahl
n	1	Laufvariable; Anzahl der MONTE-CARLO-Iterationen
p	N · m ⁻²	Druck
p	1	Wahrscheinlichkeit
s	m	Länge, Distanz, Abstand
t	s	Zeit
v	m · s ⁻¹	Geschwindigkeit
x	1	Raumkoordinate (Abszisse)
y	1	Raumkoordinate (Ordinate)
z	1	Raumkoordinate

Griechische Großbuchstaben

Γ	1	Topografie-Parameter
Δ	1	Differenz
Θ _S	°	Polarwinkel
Σ	1	Operator der Summenbildung
Φ _S	°	Azimutalwinkel
Ω	s ⁻¹	Rotationsgeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit

Griechische Kleinbuchstaben

α	K^{-1}	thermischer Ausdehnungskoeffizient
γ	$^{\circ}$	Spanwinkel
δ	m	simulierter Abstand, Kontaktkriterium
ε	$1 \text{ (m} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$	Dehnung
ε	eV	Tiefe der Potentialmulde des LENNARD-JONES-Potentials
η	$N \cdot m^{-1} \cdot s$	Dynamische Viskosität
λ	m	Wellenlänge
μ	1	COULOMBScher (Gleitreibungs-)Koeffizient
ϑ	1	Frequenzfaktor
ν	1	ABBE-Zahl (ν_d)
π	1	Kreiszahl, $\pi \approx 3,141592$
ρ	$g \cdot cm^{-3}$	Dichte
ρ	m	Dicke der Reaktionsschicht
σ	$N \cdot m^{-2}$	(Normal-)Spannung
τ	$N \cdot m^{-2}$	(Schub-)Spannung
τ	s	(Relaxations-)Zeitkonstante
τ	m	Korrelationslänge der Autokorrelationsfunktion
φ	J	Bindungsenergie der Nachbarpartikel
χ	1	Operator der χ^2 -Verteilung
ω	s^{-1}	Rotationsgeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit

Chemische Elementsymbole und ausgewählte Verbindungen

Al_2O_3	Aluminiumoxid, i.S. Korund
B	Bor
BN	Bornitrid
Br	Brom
C	Kohlenstoff
Cl	Chlor
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Ga	Gallium
Ir	Iridium