

Julia Dukwen

# Verschleiß der Umformwerkzeuge beim Präzisionsblankpressen von Quarzglas



Verschleiß der Umformwerkzeuge  
beim Präzisionsblankpressen von Quarzglas

Wear of Molding Tools  
while Precision Molding of Quartz Glass

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

vorgelegt von

Julia Dukwen, geb. Keller

Berichter:

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

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

Tag der mündlichen Prüfung: 08. November 2019



# ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

**Julia Dukwen**

Verschleiß der Umformwerkzeuge beim  
Präzisionsblankpressen von Quarzglas

**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 1/2020



**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.

Julia Dukwen:

Verschleiß der Umformwerkzeuge beim Präzisionsblankpressen von Quarzglas

1. Auflage, 2020

Apprimus Verlag, Aachen, 2020  
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien  
an der RWTH Aachen  
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen  
Internet: [www.apprimus-verlag.de](http://www.apprimus-verlag.de), E-Mail: [info@apprimus-verlag.de](mailto:info@apprimus-verlag.de)

ISBN 978-3-86359-837-2

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

---

## Vorwort

### *Preamble*

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen. In dieser Zeit habe ich große Unterstützung von vielen Menschen erfahren, bei denen ich mich ganz herzlich bedanke.

Zuerst danke ich Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke für die Ermöglichung und die Betreuung dieser Arbeit sowie seine stete Hilfsbereitschaft. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA danke ich für die Übernahme des Korreferats. Beim Prof. Dr. rer. nat. Ronald Gebhardt bedanke ich mich für den Vorsitz und beim Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe für den Beisitz meiner mündlichen Prüfung.

Meinem Oberingenieur Dr.-Ing. Olaf Dambon und Tim Grunwald danke ich für die fachliche Durchsicht der Arbeit sowie die wertvollen Anregungen.

Dr.-Ing. Gang Liu und Minjie Tang danke ich für die Unterstützung bei der Simulation. Dr.-Ing. Gang Liu danke ich außerdem für die wertvollen Diskussionen und Hilfestellungen bei der Entwicklung des Modells zur Beschreibung der Verschleißmechanismen.

Bei meinen studentischen Mitarbeitern Conny Rojacher, Lukas Eilers, Ludger Bußwinkel, Teja Wrobel, Igor Poluschkin und Stefan Gruber bedanke ich mich ganz herzlich für die tatkräftige Unterstützung.

Meiner Arbeitskollegin Frau Dr. rer. nat. Ulrike Krüger danke ich für das Lektorat des Manuskripts. Ich danke Dr.-Ing. Thomas Bletek für die Durchsicht des Dissertationsvortrages.

Nicht zuletzt danke ich allen Assistenten und Technikern der Abteilung Feinbearbeitung und Optik für die gute Zusammenarbeit, freundschaftliche Atmosphäre und die lustigen Momente. Ebenfalls bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Fraunhofer IPT für die angenehme Zusammenarbeit und schöne Zeit.

Ein großer Dank gebührt ebenso meiner Familie. Alle meine Erfolge verdanke ich meinen Eltern. Meinem Mann Viktor danke ich für die Aufmunterung und die Ablenkung während der Erstellung dieses Manuskripts. Ich danke ihm, dass er nicht wenige einsame Wochenenden überstanden hat. Und zu guter Letzt danke ich ganz besonders meinem Sohn Michael, dass er mir den Freiraum für diese Arbeit eingeräumt hat.

Julia Dukwen



---

# Inhaltsverzeichnis

## *Table of content*

1	Einleitung und Motivation.....	1
2	Prozesstechnologische Grundlagen und aktueller Stand.....	9
2.1	Präzisionsblankpressen .....	9
2.1.1	Prozesstechnologische Grundlagen.....	9
2.1.2	Präzisionsblankpressen von Quarzglas .....	13
2.2	Verschleiß der Umformwerkzeuge beim Präzisionsblankpressen.....	15
2.2.1	Verschleißmechanismen.....	16
2.2.2	Verschleißuntersuchungen beim Präzisionsblankpressen .....	23
3	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	31
4	Systemkomponenten.....	33
4.1	Quarzglas .....	33
4.1.1	Eigenschaften des Quarzglases.....	33
4.1.2	Ausgasungsverhalten des Quarzglases.....	41
4.2	Werkstoffe für die Umformwerkzeuge zum Präzisionsblankpressen von Quarzglas .....	45
4.2.1	Glaskohlenstoff .....	45
4.2.2	Siliziumkarbid .....	47
4.2.3	Wolframkarbid .....	49
5	Analyse der prinzipiellen Eignung ausgewählter Werkstoffe .....	51
5.1	Heiztests bei verschiedenen Atmosphären.....	51
5.2	Oberflächenenergie der Werkstoffe .....	53
5.3	Heiztests mit Glaskontakt im Vakuum.....	59
6	Simulation des Prozesses Präzisionsblankpressen .....	61
6.1	Finite-Elemente-Methode .....	61
6.2	Mathematische Beschreibung .....	62
6.3	Vier-Punkt-Biegeversuch zur Bestimmung der Spannungsrelaxation des Quarzglases .....	66



6.4	Ring-Stauch-Versuch zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten .....	68
6.5	Analyse der thermomechanischen Belastungen im Werkzeug .....	70
7	Verschleiß von Glaskohlenstoff beim Pressen von Quarzglas .....	75
7.1	Zeitliche Entwicklung des Verschleißes .....	75
7.2	Zeitliche Entwicklung der Glasanhaftungen .....	78
7.3	Untersuchung der Diffusion .....	80
7.4	Topografie der Werkzeugoberfläche nach Presstests .....	81
7.5	Einfluss der Prozessparameter .....	86
7.5.1	EDX-Analyse .....	86
7.5.2	ESMA-Analyse .....	88
8	Qualitatives Modell zur Beschreibung der Verschleißmechanismen .....	95
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	99
	Literaturverzeichnis .....	107
	Anhang .....	A

---

# Abbildungsverzeichnis

## *Table of figures*

Abbildung 1-1: Entwicklung und Erwartung des deutschen Produktionsvolumens und der Beschäftigten der Photonik-Branche [VDMA17] .....	1
Abbildung 2-1: Übersicht über die Herstellungstechnologien für optische Komponenten, in Anlehnung an [HERI06] .....	10
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung des Präzisionsblankpressprozesses .....	11
Abbildung 2-3: Zeitlicher Verlauf der Temperatur, Werkzeugposition und der Presskraft beim Pressen von Quarzglas .....	12
Abbildung 2-4: (a) REM Bilder von Quarzglasoberflächen geprägt bei (a, b) $T = 1330\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P = 0.22\text{ MPa}$ , $t = 300\text{ s}$ , (c) $T = 1315\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P = 0.22\text{ MPa}$ , $t = 100\text{ s}$ , (d) $T = 1305\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P = 0.22\text{ MPa}$ , $t = 400\text{ s}$ , aus [YOUN06].....	14
Abbildung 2-5: REM-Bilder von binären Quarzglasoberflächen gepresst mit lithografisch strukturiertem Presswerkzeug aus Glaskohlenstoff bei $T = 1395\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P = 3\text{ kN}$ , $t = 120\text{ s}$ .....	15
Abbildung 2-6: Verschleißmechanismen: Übersicht über Stoff- und Formänderungsprozesse unter tribologischer Beanspruchung [CZIC10]..	17
Abbildung 2-7: Arten der Abrasion [ZUMG87].....	18
Abbildung 2-8: Grübchenbildung an Zahnflanke durch Oberflächenzerrüttung [SOMM14] .....	20
Abbildung 2-9: Mögliche Wechselwirkungsmechanismen beim Präzisionsblankpressen, aus [GEOR15] .....	26
Abbildung 2-10: Verschleißmodell für eine Platin-Iridium-Beschichtung in Kontakt mit B270-Glas, aus [BERN16] .....	28
Abbildung 2-11: REM-Bilder von Glasstrukturen, die mit Formen geprägt wurden, die unterschiedliche Rauheit von Strukturseitenwänden aufweisen. Die Oberflächenrauheit ( $R_a$ ) der Strukturseitenwände betrug $70\text{ nm}$ für die Probe (a) bzw. $150\text{ nm}$ für die Probe (b), aus [YOUN06].....	29

Abbildung 4-1: $sp^3$ -Hybridorbitale des Siliziumatoms und $SiO_4$ -Tetraedermodell, in Anlehnung an [VOGE92].....	34
Abbildung 4-2: Struktur von kristallinem Quarz (a), Quarzglas (b) und Na-Silikatglas (c) [ILSC10] .....	34
Abbildung 4-3: Viskosität von Lithosil Q1, B270 und L-BAL42 in Abhängigkeit von der Temperatur [SCHO04, SCHO06, OHAR17].....	36
Abbildung 4-4: Volumenänderung beim Erstarren bzw. bei Kristallisation einer Glasschmelze [HUNK09].....	37
Abbildung 4-5: Fixpunkte im Viskositätsverlauf des Glases [TESC13].....	38
Abbildung 4-6: Ausgasung von $H_2$ , $H_2O$ und $CO$ aus SQ1, SQ2 und Suprasil 300 .....	44
Abbildung 4-7: TEM-Aufnahme von Glaskohlenstoff (links) und Modell für die Struktur von Glaskohlenstoff (rechts) [HARR04].....	47
Abbildung 5-1: REM-Bilder von Werkstoffen nach Heizztest in Sauerstoffatmosphäre .....	53
Abbildung 5-2: Messung des Kontaktwinkels .....	54
Abbildung 5-3: Oberflächenenergien von SiC, WC und GC poliert und nach Heizztests in Sauerstoffatmosphäre bei verschiedenen Temperaturen und nach verschiedenen Haltezeiten.....	55
Abbildung 5-4: Oberflächenenergien von SiC, WC und GC poliert und nach Heizztests in Stickstoffatmosphäre bei verschiedenen Temperaturen und nach verschiedenen Haltezeiten.....	56
Abbildung 5-5: Oberflächenenergien von SiC, WC und GC poliert und nach Heizztests in Argonatmosphäre bei verschiedenen Temperaturen und nach verschiedenen Haltezeiten.....	56
Abbildung 5-6: Polarer Anteil der Oberflächenenergien von SiC, WC und GC poliert und nach Heizztests in Sauerstoffatmosphäre bei verschiedenen Temperaturen und nach verschiedenen Haltezeiten.....	57

---

Abbildung 5-7: Polarer Anteil der Oberflächenenergien von SiC, WC und GC poliert und nach Heiztests in Stickstoffatmosphäre bei verschiedenen Temperaturen und nach verschiedenen Haltezeiten.....	58
Abbildung 5-8: Polarer Anteil von Oberflächenenergien von SiC, WC und GC poliert und nach Heiztests in Argonatmosphäre bei verschiedenen Temperaturen und nach verschiedenen Haltezeiten .....	58
Abbildung 5-9: Werkstoffproben nach Heiztests (SiC und WC nach 5 Heiztests, GC nach 10 Heiztests).....	59
Abbildung 5-10: REM-Bilder von WC nach Heiztest .....	60
Abbildung 6-1: Zeitlicher Verlauf der Spannungsrelaxationsfunktion und der Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit der Relaxation, in Anlehnung an [ANAN08].....	64
Abbildung 6-2: Einfluss der Reibung am Beispiel der Stauchung eines Zylinders, aus [HUEN14].....	65
Abbildung 6-3: Vier-Punkt-Biegemessvorrichtung zur Bestimmung von Relaxationskraft (links) und das Messprinzip .....	67
Abbildung 6-4: Messung und Kurvenanpassung von Spannungsrelaxation bei verschiedenen Temperaturen .....	68
Abbildung 6-5: Prinzip des Ring-Stauch-Versuchs zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten sowie die gemessenen und simulierten Daten .....	69
Abbildung 6-6: Simulierte Geometrien .....	70
Abbildung 6-7: Simulation der Spannungen in sechs Punkten auf der Werkzeugoberfläche im Laufe des Pressprozesses bei 1360 °C und 5 kN (links) und das dazugehörige Simulationsbild; das Werkzeug hat eine plane Oberfläche, der Glasrohling ist kugelförmig .....	71
Abbildung 6-8: Verlauf der Spannungen im Werkzeug für zwei Temperaturen (1 kN Presskraft).....	72

Abbildung 6-9: Verlauf der Spannungen im Werkzeug für zwei Presskräfte (1360 °C Presstemperatur).....	72
Abbildung 6-10: Verlauf der Spannungen im Werkzeug für zwei Geometrien (1360 °C, 3 kN) .....	73
Abbildung 7-1: Entwicklung einer Stelle auf dem Presswerkzeug: poliert, nach 10 und 20 Pressungen (von links nach rechts) und diese Stelle in verschiedenen Vergrößerungen (von oben nach unten).....	76
Abbildung 7-2: Simulation der Spannungen in einer Vertiefung: hohe Zugspannungen an den Flanken, hohe Druckspannungen am Rand der Vertiefung .....	77
Abbildung 7-3: Glasanhaftung in einer Vertiefung im Presswerkzeug (links) und die gleiche Vertiefung nach 22 Pressungen ohne Glasanhaftung (rechts).....	78
Abbildung 7-4: Menge an Glasanhaftungen mit der Anzahl der Pressungen .....	79
Abbildung 7-5: ESMA-Scan entlang der Kalotte im Presswerkzeug .....	80
Abbildung 7-6: Die drei untersuchten Bereiche auf der Glaskohlenstoffprobe: das Zentrum mit Glaskontakt (Zentrum), der Rand des Glaskontakts (Mitte) und der Bereich ohne Glaskontakt (Rand).....	81
Abbildung 7-7: AFM-Scans in der Mitte, am Rand der Glaskontaktzone und im Bereich ohne Glaskontakt sowie die Position der gemessenen Linienprofile.....	82
Abbildung 7-8: Profilmessungen in der Mitte, am Rand der Glaskontaktzone und im Bereich ohne Glaskontakt .....	83
Abbildung 7-9: Modell der Glasumformung .....	84
Abbildung 7-10: ESMA von oberen Presswerkzeugen nach Presstests bei verschiedenen Prozessparametern.....	90
Abbildung 7-11: ESMA von oberen Presswerkzeugen nach Presstests bei verschiedenen Prozessparametern.....	90

---

Abbildung 7-12: Differenz der ESMA-Daten des oberen und unteren Presswerkzeugs (links) und die simulierte Spannung im Glas an der Kontaktzone zum Presswerkzeug für die vier Versuchsreihen (rechts).....	92
Abbildung 8-1: Modell für Verschleißmechanismen des Glaskohlenstoffs beim Pressen von Quarzglas.....	97
Abbildung A-1: Simulierte Spannungen im planen Presswerkzeug beim Pressen eines Zylinderrohlings bei 1360 °C .....	B
Abbildung A-2: Simulierte Spannungen im planen Presswerkzeug beim Pressen eines Zylinderrohlings bei 1400 °C .....	C
Abbildung A-3: Simulierte Spannungen im planen Presswerkzeug beim Pressen eines Kugelrohlings bei 1360 °C.....	D
Abbildung A-4: Simulierte Spannungen im planen Presswerkzeug beim Pressen eines Kugelrohlings bei 1400 °C.....	E
Abbildung A-5: Simulierte Spannungen im konkaven Presswerkzeug beim Pressen eines Kugelrohlings bei 1360 °C.....	F
Abbildung A-6: Simulierte Spannungen im konkaven Presswerkzeug beim Pressen eines Kugelrohlings bei 1400 °C.....	G
Abbildung A-7: ESMA-Analysen der oberen Presswerkzeuge.....	H
Abbildung A-8: ESMA-Analysen der unteren Presswerkzeuge.....	I



---

## Tabellenverzeichnis

### *Table of tables*

Tabelle 4-1:	Verunreinigungen für die Quarzglassorten SQ1, SQ2 und Suprasil 300 [HERA11, SICO18].....	40
Tabelle 4-2:	Temperatur der Gläser SQ und Suprasil 300 für drei Viskositäten [HERA11, SICO18].....	41
Tabelle 4-3:	Einige Kennwerte von ausgewählten Werkstoffen [CERA10, CERA15, COOR16, HTW18a, ZUNK11] .....	45
Tabelle 5-1:	EDX-Ergebnisse von Werkstoffen nach den Heitztests in verschiedenen Atmosphären.....	52
Tabelle 6-1:	In der Simulation verwendete Materialkennwerte.....	66
Tabelle 6-2:	Für die Simulation ermittelten Parameter <b>Gi</b> und <b>ti</b> .....	68
Tabelle 7-1	Rauheitswerte in drei untersuchten Bereichen und von der polierten Probe zum Vergleich.....	82
Tabelle 7-2:	Quotient aus Presszeit, Glasmenge und Verschleißvolumen in bestimmten Punkten Pi und Punkt P1.....	86
Tabelle 7-3:	EDX-Ergebnisse von oberen Presswerkzeugen aus Glaskohlenstoff nach Presstests mit Quarzglas SQ1 bei 1360 °C und 1 kN, 2 kN und 3 kN Presskraft .....	87
Tabelle 7-4:	EDX-Ergebnisse von unteren Presswerkzeugen aus Glaskohlenstoff nach Presstests mit Quarzglas SQ1 bei 1360 °C und 1 kN, 2 kN und 3 kN Presskraft .....	87
Tabelle 7-5:	EDX-Ergebnisse von oberen Presswerkzeugen aus Glaskohlenstoff nach Presstests mit Suprasil 300 und SQ1 bei 1360 °C und 2 kN Presskraft.....	88
Tabelle 7-6:	EDX-Ergebnisse von unteren Presswerkzeugen aus Glaskohlenstoff nach Presstests mit Suprasil 300 und SQ1 bei 1360 °C und 2 kN Presskraft.....	88
Tabelle 7-7:	Prozessparameter der vier Versuchsreihen.....	89