

Holger Kreilkamp

Analyse der Einflüsse auf die Gestaltabweichung gepresster Glasoptiken beim nicht-isothermen Blankpressen



Analyse der Einflüsse auf die Gestaltabweichung gepresster Glasoptiken beim nicht-isothermen Blankpressen

Analysis of Influences on Form Deviations of Molded Glass Optics in Non-Isothermal Blank 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

Holger Kreilkamp

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Bernhard Karpuschewski

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Juli 2018

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Holger Kreilkamp

Analyse der Einflüsse auf die Gestaltabweichung
gepresster Glasoptiken beim nicht-isothermen
Blankpressen

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 32/2018



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.

Holger Kreilkamp:

Analyse der Einflüsse auf die Gestaltabweichung gepresster Glasoptiken beim nicht-isothermen Blankpressen

1. Auflage, 2018

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

Apprimus Verlag, Aachen, 2018
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 978-3-86359-659-0

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Vorwort

Preamble

Diese Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Projekt- und Gruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen entstanden.

Ich danke Herrn 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 RWTH Aachen University, dafür, dass er mir diese Arbeit ermöglicht und mit hohem Engagement unterstützt hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Bernhard Karpuschewski, Direktor des Leibniz-Instituts für Werkstofforientierte Technologie IWT und des Labors für Mikrozerpannung LFM in Bremen, gilt mein Dank für die kurzfristige Übernahme des Koreferats. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs für die Übernahme des Prüfungsbeisitzes.

Bei der Erstellung dieser Arbeit haben mich weitere Personen unterstützt, denen ich an dieser Stelle meinen besonderen Dank aussprechen möchte. An erste Stelle gilt mein Dank meinen HiWis Matthäus Birkle und Timo Waßer für ihre tatkräftige Unterstützung, auf die ich mich stets verlassen konnte. Für die Gewährung der Freiräume, die zur Erstellung dieser Arbeit notwendig waren, danke ich Herrn Dr.-Ing. Olaf Dambon ebenso wie für seine persönliche und fachliche Unterstützung. Darüber hinaus danke ich allen wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und Technikern der Abteilung Feinbearbeitung und Optik, die gemeinsam dazu beigetragen haben, dass ich gerne und mit Freude an die Zeit am IPT zurückdenke. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Benjamin Kleber für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung, Anh Tuan Vu für die vielen wertvollen Diskussionen sowie Gang Liu für seine Hilfe bei Fragestellungen im Umfeld der Abaqus-Software. Für die kritische Durchsicht der Arbeit und die hilfreichen Anmerkungen danke ich Paul-Alexander Vogel und Marius Doetz.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern. Sie haben mir mein Studium ermöglicht und mich bei all meinen Entscheidungen unterstützt. Ich konnte mir ihrer Unterstützung zu jeder Zeit sicher sein.

Schließlich gilt meiner lieben Frau Julia mein größter Dank. Nicht nur für das 1A-Lektorat, sondern dafür, dass sie mich immer wieder motiviert und mir während der gesamten Zeit meiner Dissertation den Rücken freigehalten hat. So hat sie maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Danke!

Holger Kreilkamp

Greven, Juli 2018

Inhaltsverzeichnis

Table of contents

Kurzdarstellung	V
Formelzeichen und Abkürzungen	VII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik in Forschung und Industrie	5
2.1 Werkstoff Glas	5
2.1.1 Struktur des Glases	5
2.1.2 Rheologie des Glases	7
2.1.3 Weitere umformungsrelevante Eigenschaften von Glas	13
2.2 Prozesse der Glasoptikreplikation	16
2.3 Modellierung und Simulation nicht-isothermer Warmumformprozesse	21
2.4 Gestaltabweichungen bei warmumgeformten Gläsern	25
2.4.1 Formabweichung	26
2.4.2 Welligkeit	28
2.4.3 Rauheit	30
2.5 Zwischenfazit	31
3 Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	33
4 Systembeschreibung und -analyse	35
4.1 Prozessbeschreibung und Systemabgrenzung	35
4.2 Beschreibung der Systemkomponenten	37
4.2.1 Umformmaschine	37
4.2.2 Heiztopf	38
4.2.3 Formwerkzeuge	39
4.2.4 Glasrohling	42
4.3 Messtechnik	43
5 Entwicklung eines empirischen Modells	49
5.1 Auswahl von Modelleingangsgrößen	49
5.2 Auswahl von Modellergebnisgrößen	51
5.3 Ableitung eines empirischen Modellansatzes	52
5.4 Versuchsplanung und -durchführung	53
5.5 Versuchsauswertung	55

5.5.1	Einflüsse der Modellfaktoren auf die Formabweichung.....	56
5.5.2	Einflüsse der Modellfaktoren auf die Welligkeit.....	63
5.5.3	Einflüsse der Modellfaktoren auf die Rauheit	69
5.6	Zwischenfazit	75
6	Aufbau und Validierung eines numerischen Modells.....	77
6.1	Problembeschreibung.....	77
6.2	Systembeschreibung und Abstraktion	78
6.3	Mathematische Beschreibung	81
6.3.1	Mechanisches Verhalten.....	82
6.3.2	Thermisches Verhalten	83
6.4	Bestimmung relevanter Eingangsgrößen.....	85
6.5	Validierung des Modells.....	90
6.6	Zwischenfazit	95
7	Modellbasierte Ursachenanalyse.....	97
7.1	Analyse der Formabweichungen	97
7.1.1	Analyse der Entstehungsursachen.....	97
7.1.2	Einfluss der Modellfaktoren	102
7.1.3	Einfluss weiterer Größen	105
7.2	Analyse der Welligkeit	108
7.2.1	Analyse der Entstehungsursachen.....	108
7.2.2	Einfluss der Modellfaktoren	110
7.2.3	Einfluss weiterer Größen	116
7.3	Analyse der Rauheit.....	118
7.3.1	Analyse der Entstehungsursachen.....	118
7.3.2	Einfluss der Modellfaktoren	122
7.4	Zwischenfazit	126
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
	Literaturverzeichnis.....	133
	Abbildungsverzeichnis.....	A
	Tabellenverzeichnis.....	F
	Anhang	G

A	Formelanhang.....	G
B	Bilderanhang.....	H
C	Tabellenanhang	N

Kurzdarstellung

Abstract

Glas ist einer der ältesten von Menschen hergestellten Werkstoffe. Seit seiner Entdeckung vor mehr als 7000 Jahren hat sich der Werkstoff Glas rasant weiterentwickelt und ist aufgrund der Vielfalt seiner Eigenschaften heute für viele Anwendungen unersetzlich. Auch im stark wachsenden Anwendungsgebiet der Beleuchtungsoptik stellt Glas mittlerweile einen festen Bestandteil dar.

Mit der Erschließung neuer Anwendungsfelder im Bereich der Beleuchtungsoptik steigen nicht nur die Anforderungen an den Werkstoff selbst, sondern insbesondere auch die Anforderungen an Glasartikel und deren korrespondierende Fertigungstechnik. Komplexe Geometrien und hohe Genauigkeiten bei gleichzeitig niedrigen Herstellkosten stellen die größte Herausforderung dar. Glasumformverfahren, speziell das nicht-isotherme Blankpressen, bieten vor diesem Hintergrund viele Vorteile gegenüber konventionellen Schleif- und Polierprozessen. So skalieren die Herstellkosten bei replikativen Umformverfahren stark mit dem Produktionsvolumen, jedoch nur schwach mit der Komplexität der Produkte. Dies ermöglicht es, komplexe Optiken zu niedrigen Stückkosten herzustellen.

Trotz dieser Vorteile, die die Glasumformung potentiell bietet, ist die Nutzung der Technologie mit großen Herausforderungen verbunden. In der industriellen Praxis stellt die Erfüllung der hohen Anforderungen an die Gestaltabweichung das bedeutendste Problem für Optikproduzenten dar. Die Gestaltabweichung gepresster Optiken wird von einer Vielzahl potentieller Größen beeinflusst, deren Wirkungsweisen bisher nur unzureichend bekannt sind und oftmals nur auf subjektivem Erfahrungswissen basieren.

Daher widmet sich die vorliegende Arbeit der Frage, welche Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zur Gestaltabweichung beim nicht-isothermen Blankpressen führen. Hierzu wurde zunächst ein empirisches Modell zur Beschreibung der Zusammenhänge entwickelt. Diese Zusammenhänge wurden anschließend erfolgreich in einem FE-Modell abgebildet. Durch die Rückführung auf physikalische Grundgrößen konnten so schließlich die Entstehungsursachen von Gestaltabweichungen erklärt werden. Die Arbeit leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Transformation der derzeit vorherrschenden erfahrungsbasierten Prozessauslegung hin zu einer wissenschaftsbasierten Prozessauslegung.

Abstract

Kurzdarstellung

Glass is one of the oldest man-made materials. Since its discovery more than 7000 years ago, glass developed quickly. Nowadays, glass is an essential part of many applications due to its diverse properties. Especially in the rapidly growing field of lighting optics, glass plays an important role.

As new fields of application emerge, the requirements for both, the glass material and the glass article itself are growing. Ensuring complex geometries, high accuracies and low manufacturing costs at the same is the biggest challenge for the manufacturing technology in use. Against this background, glass molding – especially non-isothermal glass molding – offers many advantages compared to conventional grinding and polishing technology: The costs in glass molding technology scale strongly with production volume but only slightly with product complexity. This enables companies to manufacture complex glass optics at reasonable costs.

Despite those advantages the technology offers, the practical application of glass molding processes poses a major challenge. Meeting the strong requirements in terms of surface accuracy is the biggest challenge for optics manufacturers. Many potential factors influence the optics surface accuracy; while, the effects have not yet been understood and are primarily based on individual practical experience.

Against this background, the thesis at hand addresses the question, which cause-and-effect relations lead to surface deviations in non-isothermal glass molding. For answering this question, an empirical model was developed that describes the cause-and-effect relations on a phenomenological basis. Afterwards, a finite element model was developed that successfully represented the observed cause-and-effect relations. Within this model, the origin of surface deviations were explained by tracing them back to basic physical values. Thus, this work contributes to the transformation of process development from an experience-based to a knowledge-based approach.

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbols and abbreviations

Große Buchstaben

A	[mm ²]	Spanungsquerschnitt
B	[μm]	Maximale Umkehrspanne
C ₁	[-]	Konstante der WLF-Funktion
C ₂	[K]	Konstante der WLF-Funktion
E	[Nmm ²]	Elastizitätsmodul
E	[J]	Energie
E	[m]	Systematische Positionsabweichung
F	[N]	Kraft
G	[Nmm ⁻²]	Schubmodul
K	[Nmm ⁻²]	Kompressionsmodul
M	[Nm]	Moment
OPD	[nm]	Optische Weglängendifferenz
Pa	[μm]	Arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten
Pku	[-]	Kurtosis des Primärprofils
Psk	[-]	Schiefte des Primärprofils
PSm	[mm]	Mittlere Rillenbreite des Primärprofils
Pt	[μm]	Gesamthöhe des Primärprofils
Q̇	[W]	Wärmestrom
R	[μm]	Wiederholpräzision
Ra	[nm]	Arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten
Rku	[-]	Kurtosis des Rauheitsprofils
Rsk	[-]	Schiefte des Rauheitsprofils
RSm	[mm]	Mittlere Rillenbreite des Rauheitsprofils
Rt	[μm]	Gesamthöhe des Rauheitsprofils
Sa	[μm]	Mittlere arithmetische Höhe der Oberfläche
Sku	[-]	Kurtosis der Oberfläche

Smr	[%]	Materialtraganteil
Ssk	[-]	Schiefe der Oberfläche
Sz	[μm]	Maximale Profilhöhe der Oberfläche
T	[$^{\circ}\text{C}$]	Temperatur
ΔT	[K]	Temperaturänderung
dT / dt	[Ks^{-1}]	Abkühlgeschwindigkeit
dT / dx	[Km^{-1}]	Temperaturgefälle
Wa	[nm]	Arithmetischer Mittelwert der Profilorдынaten
Wku	[-]	Kurtosis des Welligkeitsprofils
Wsk	[-]	Schiefe des Welligkeitsprofils
WSm	[mm]	Mittlere Rillenbreite des Welligkeitsprofils
Wt	[μm]	Gesamthöhe des Welligkeitsprofils

Kleine Buchstaben

b	[$\text{JKm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$]	Thermische Effusivität
c_p	[$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Isobare Wärmekapazität
c_v	[$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Isochore Wärmekapazität
d	[mm]	Abstand
e	[J]	Spezifische thermische Energie
h	[$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	Kontakt-Wärmeübergangskoeffizient
h	[Jkg^{-1}]	Spezifische Enthalpie
Δh	[mm]	Geometrische Abweichung
k	[-]	Index
l	[mm]	Länge
n	[-]	Brechungsindex
n_d	[-]	Brechungsindex bei Fraunhofer-Linie d
p	[Nmm^{-2}]	Druck
\dot{q}	[Wm^{-2}]	Wärmestromdichte
r	[m]	Radius
t	[s]	Zeit

t_g	[°C]	Transformationstemperatur
u_n	[-]	Zustandsgrößen
v	[ms ⁻¹]	Geschwindigkeit
x	[m]	Koordinatenrichtung
x_i	[-]	Eingangsgrößen
y	[m]	Koordinatenrichtung
y_m	[-]	Ergebnisgrößen
z	[m]	Koordinatenrichtung
z	[m]	Höhe
z_j	[-]	Störgrößen
Δz	[μ m]	Höhenabweichung

Griechische Buchstaben

α	[K ⁻¹]	Ausdehnungskoeffizient
α	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Wärmeübergangskoeffizient
α_{Vg}	[K ⁻¹]	Wärmeausdehnungskoeffizient Glas, fest
α_{Vl}	[K ⁻¹]	Wärmeausdehnungskoeffizient Glas, flüssig
γ	[m ⁻¹]	Absorptionskoeffizient
γ	[-]	Scherung, Schiebung
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Zeitliche Änderung der Scherung, Schiebung
ε	[-]	Dehnung, Emissionsgrad
ε_m	[-]	Residuum
$\dot{\varepsilon}$	[s ⁻¹]	Zeitliche Änderung der Dehnung
λ	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit
λ_{eff}	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Effektive Wärmeleitfähigkeit
λ_l	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Wahre Wärmeleitfähigkeit
λ_L	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit von Luft
λ_{st}	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Strahlungsleitfähigkeit
μ	[-]	Reibungskoeffizient
ν	[-]	Querkontraktionszahl

v_d	[-]	Abbe-Zahl bei Fraunhofer-Linie d
η	[Pas]	Viskosität
η_0	[Pas]	Konstante der Arrhenius-Gleichung
η_c	[Pas]	Kritische Viskosität
η_{f1}	[Pas]	Viskosität bei Verarbeitungstemperatur
η_{f2}	[Pas]	Viskosität bei Erweichungstemperatur
η_{f3}	[Pas]	Viskosität bei oberer Kühltemperatur
η_{f4}	[Pas]	Viskosität bei unterer Kühltemperatur
η_{tg}	[Pas]	Viskosität bei Transformationstemperatur
ϑ_{f1}	[°C]	Verarbeitungstemperatur
ϑ_{f2}	[°C]	Erweichungstemperatur
ϑ_{f3}	[°C]	Obere Kühltemperatur
ϑ_{f4}	[°C]	Untere Kühltemperatur
σ	[Nmm ⁻²]	Spannung
σ	[Wm ⁻² K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmann Konstante
σ_V	[Nmm ⁻²]	Vergleichsspannung nach von Mises
ρ	[kgm ⁻³]	Dichte
τ	[s]	Relaxationszeit
τ	[Nmm ⁻²]	Schubspannung
τ	[-]	Transmissionsgrad
ω	[-]	Gewichtungsfaktor
$\dot{\omega}$	[Wm ⁻²]	Quellendichte

Abkürzungen

3D	dreidimensional
Al	Aluminium
ANOVA	Varianzanalyse (engl. <u>A</u> nalysis of <u>V</u> ariance)
As	Arsen
B	Bor
Ba	Barium

bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
ca.	circa
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
dia	diamantzerspant
DIN	Deutsches Institut für Normung
engl.	englisch
et al.	und andere
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FWZ	Formwerkzeug
Ge	Germanium
gla	glaskugelgestrahlt
HM	Hartmetall
K	Kalium
Li	Lithium
LED	Leuchtdiode (engl. <u>L</u> ight <u>E</u> mitting <u>D</u> iode)
Mg	Magnesium
min	Minute
Mn	Mangan
Na ₂ O	Natriumoxid
Ni	Nickel
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor, Punkt, Primär
PID	Proportional, Integral, Differentiell - Regler
R	Rauheit
S	Schwefel
Si	Silizium

SiO ₂	Siliziumdioxid
SiC	Siliziumcarbid
Si ₃ N ₄	Siliziumnitrid
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
u. a.	unter anderem
UV	Ultraviolett
v. Chr.	vor Christus
vgl.	vergleiche
W	Welligkeit
WLF	Williams, Landel und Ferry
WC	Wolframcarbid
Zn	Zink

Indizes

0	Referenzzustand
A	Aufheiz
ca.	circa
D	Dämpfer
DS	Dilatometrischer Erweichungspunkt
E	Entformung
eff	Effektiv
F	Formwerkzeug, Feder
FWZ	Formwerkzeug
G	Glas
ges	gesamt
H	Halten, Heiztopf
I	Fluid
K	Kern
L	Luft
max	Maximum