

Frank Bernhardt

Entwicklung eines Verschleiß- modells auf Basis der Degradations- mechanismen von Platin-Iridium- Beschichtungen beim Glaspressen



Entwicklung eines Verschleißmodells auf Basis der
Degradationsmechanismen von
Platin-Iridium-Beschichtungen beim Glaspressen

Development of a Wear Model Based on
Degradation Mechanisms of Platinum-Iridium
Coatings During Glass 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

Frank Bernhardt

(geb. Müller)

Berichter:

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Konstantinos-Dionysios Bouzakis

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 2015

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Frank Bernhardt

Entwicklung eines Verschleißmodells auf Basis der
Degradationsmechanismen von Platin-Iridium-
Beschichtungen beim Glaspresen

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 10/2016



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.

Frank Bernhardt:

Entwicklung eines Verschleißmodells auf Basis der Degradationsmechanismen von Platin-Iridium-Beschichtungen beim Glaspressen

1. Auflage, 2016

Apprimus Verlag, Aachen, 2016
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 978-3-86359-414-5

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Inhaltsverzeichnis

Table of Contents

Kurzdarstellung.....	III
Formelzeichen und Abkürzungen	V
1 Ausgangssituation und Motivation.....	1
2 Stand der Erkenntnisse	7
2.1 Prozesstechnologische Grundlagen des Präzisionsblankpressens.....	7
2.1.1 Begriffsklärung und Einordnung.....	7
2.1.2 Verfahrensprinzip.....	8
2.1.3 Prozesskette	9
2.1.4 Anlagen in der industriellen Fertigung	11
2.2 Die Kontaktpartner im eingesetzten Werkstoffsystem.....	13
2.2.1 Kontaktverhältnisse bei Heißumformprozessen	13
2.2.2 Pressbare optische Gläser	18
2.2.3 Gesputterte Edelmetall-Beschichtungen.....	22
2.3 Einflüsse und Mechanismen des Verschleißes	27
2.3.1 Thermo-chemische Verschleißmodelle für das Präzisionsblankpressen	28
2.3.2 Einfluss des Glaswerkstoffs.....	30
2.3.3 Thermo-chemische Mechanismen in Edelmetallbeschichtungen.....	36
2.3.4 Die Rolle der Haftsichten	37
2.3.5 Einfluss des Formwerkstoffs	40
2.3.6 Einfluss der Prozessbedingungen	43
2.4 Zusammenfassung	44
3 Zielsetzung und Aufgabenstellung	47
4 Vorbereitungen	49
4.1 Auswahl eines Referenz-Werkstoffsystems aus der industriellen Praxis.....	49
4.2 Analogie-, Prüf- und Messverfahren.....	53
5 Charakterisierung von Korrosions- und Glasanhaftungsphänomenen	59
5.1 Vorbetrachtungen	59
5.2 Das Schadensbild der Schichtdegradation	66
5.2.1 Makroskopische und mikroskopische Mechanismen.....	66
5.2.2 Ausbreitungscharakteristik der radialen Zonen	71

5.3	Das Schadensbild der Glasanhaftungen.....	73
5.3.1	Makroskopische und mikroskopische Mechanismen.....	73
5.3.2	Ursachen der Gasblasenentwicklung.....	75
5.3.3	Dynamik der Glasanhaftungsphänomene im Zeitverlauf	78
6	Prozesseinflüsse auf die Ausprägung der kritischen Schadensphänomene.....	83
6.1	Vorbetrachtungen und Vorbereitung der statistischen Versuchsplanung.....	83
6.2	Auswertung der Verschleißphänomene auf verschlissenen Formstempeln	86
6.3	Bewertung durch Haupteffektdiagramme	88
6.4	Korrelationsanalyse zur Identifikation von Zusammenhängen zwischen Prozessbedingungen	95
6.5	Korrelationsanalyse zwischen Prozessbedingungen und Schadensausprägungen ...	102
7	Analyse von thermo-chemischen Mechanismen in der initialen Phase der Werkstoffschädigung.....	111
7.1	Diffusionsvorgänge der Haftschrift.....	111
7.2	Diffusionspfade zur Probenoberfläche.....	115
7.3	Änderungen der chemischen Oberfläche durch Auslagerung	120
8	Analyse von thermo-mechanischen Mechanismen mittels Finite-Elemente- Simulation.....	127
8.1	Charakteristischer Verlauf der thermo-mechanischen Kenngrößen	129
8.2	Analyse des Einflusses geometrischer Größen auf die lokalen Belastungen	135
8.3	Analyse des Einflusses des Reibwerts zwischen Glas und Formeinsatz auf die lokalen Belastungen	137
9	Zusammenfassung und Ausblick	143
	Literaturverzeichnis.....	149
	Anhang	A
A	Formelanhang.....	A
B	Bilderanhang.....	A
C	Tabellenanhang	K

Kurzdarstellung

Abstract

Die Technologie des Präzisionsblankpressens wird für die Herstellung hochgenauer und komplex geformter optischer Komponenten aus Glas eingesetzt. Dem permanenten Kostendruck bezüglich opto-elektronischer Bauteile kann hier insbesondere durch die Erhöhung der Standzeit der Formwerkzeuge begegnet werden. Die komplexen Interaktionen zwischen heißem Glas und den eingesetzten Formeinsatzbeschichtungen konnten bisher nicht im Detail aufgeschlüsselt werden. Daher konnte noch kein ganzheitliches Verschleißmodell abgeleitet, kritische Schadensphänomene erklärt und grundlegend wissenschaftliche Ansätze in der Weiterentwicklung von Schutzbeschichtungen entworfen werden. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, die Degradationsmechanismen einer Platin-Iridium-Beschichtungen im Kontakt mit B270®-Glas (Schott AG) genau zu verstehen und zu einem neuen Verschleißmodell zu entwickeln.

Mittels detaillierter Analyse der beiden kritischen Schadensphänomene Glasanhaftung und Haziness (flächige Korrosionsausprägung am Formstempel) konnte erstmals die Abfolge der Degradationsschritte vom ersten Einsatz bis zur Ablösung der Beschichtung nachvollzogen werden. Durch den Ansatz aus statistischer Versuchsplanung und Korrelationsanalysen hatten sich Einflussgrößen in der Press- und Kühlphase als tragend bei der Entstehung von Glasanhaftungen herauskristallisiert. In Bezug auf die Degradation der Beschichtung durch Diffusionsprozesse konnte erstmals die Korngrenzdiffusion von Haftschihtelementen nachgewiesen und deren Dynamik quantifiziert werden. Hochbenetzende Glasbestandteile und freiliegende Iridium-Anteile spielen bei der Degradation der Beschichtung eine zusätzliche, schadensverstärkende Rolle. Zudem wurden thermo-mechanische Mechanismen identifiziert, für die sich das Zusammenspiel aus Normal- und Tangentialspannung als treibend für die Ausprägung von Glasanhaftungen gezeigt hat.

Die Anwendung eines neuartigen, kombinierten Ansatzes aus hoch auflösender Messtechnik und der Nutzung von mehrstufigen Korrelationsanalysen führte damit zur Entwicklung eines durchgängigen, detaillierten Verschleißmodells. Das Zusammenspiel der drei Kernmechanismen der Diffusion in der Phase der initialen Werkstoffschädigung, der Glasbenetzungsdynamik an der Beschichtungsoberfläche und der Kontaktspannungsverteilung sind dabei maßgeblich für die Entstehung von Glasanhaftungen und Haziness verantwortlich. Eine signifikante Standzeiterhöhung der Formeinsätze könnte mit der Beachtung der folgenden drei Aspekte erreicht werden: mit der Meidung von Glasbenetzungsphasen im Prozess, mit der Reinigung der Formeinsätze zwischen den Pressphasen sowie mit Beschichtungen die sowohl eine diffusionsarmen Haftschiht als auch eine phasenstabilen Deckschiht besitzen.

Abstract

The technology of Precision Glass Molding is employed for the fabrication of high-accuracy and highly complex optical components made of glass. Here, the permanent cost pressure regarding opto-electronic components can be faced by the increase of the standard life-time of the molding tools. However, the complex interactions between hot glass and the mold coatings employed could not sufficiently be described in detail, till now. Hence, it was not possible to deduce a holistic wear model to explain critical damage phenomena and to set up a fundamental scientific approach for the enhancement of protective coatings. Therefore, the aim of this thesis was to understand the degradation mechanisms of a platinum-iridium coating in contact with B270® glass (Schott AG) in detail and to deduce a new wear model.

By detailed analysis of the critical wear phenomena glass adhesion and haziness (an aerial corrosion characteristic at molding tools) the succession of degradation phases could be retraced from the first employment till the ablation of the coating. By using a joint approach of Design of Experiments and correlation analysis, influence parameters of the pressing and cooling phase were identified to be leading in the evolvement of glass adhesions. With regards to the degradation of the coating by diffusion processes, grain boundary diffusion of intermediate layer elements could be verified for the first time and the related dynamics could be described. Super-wetting glass components and exposed iridium contents are found to play an additional, wear-reinforcing role in the degradation of the coating. Furthermore, thermo-mechanical mechanisms have been identified, showing that the interaction of normal and tangential stresses to be a determining factor regarding the peculiarities of glass adhesions.

The employment of the novel, combined approach of using high-resolution analysis techniques and multi-level correlation analysis led to the development of a consistent, detailed wear model. The interplay of the three core mechanisms diffusion in the phase of the initial material damage, glass wetting at the coating surface and contact stress distribution are found to be primarily responsible for the evolvement of glass adhesions and haziness. A significant increase of the standard life-time of the molding tools could therefore be gained by taking into account the three following aspects: the avoidance of glass wetting phases during the process, the cleaning of the forming tools between the pressing phases and coatings with both, a diffusion-stable adhesion layer and phase-stable cover layer.

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbols and Abbreviations

Große Buchstaben

$\varnothing$	mm	Durchmesser
A $\varnothing$	mm	Außendurchmesser
AP	°C	Oberer Kühlpunkt (engl.: Annealing Point)
D	m ² s ⁻¹	Diffusionskonstante
D _{Ni-Atm}	m ² s ⁻¹	Diffusionskonstante des Haftschichtelements Ni an die Oberfläche
D _{Ni-B270}	m ² s ⁻¹	Diffusionskonstante des Haftschichtelements Ni an die Oberfläche (unterhalb eines aufgelegten Glases)
D _{B270/O2-Schicht}	m ² s ⁻¹	Diffusionskonstante von Glasbestandteilen in Deck- und Haftschicht (ggf. auch begleitet von Sauerstoffdiffusion)
D _{B270-Oberfl}	m ² s ⁻¹	Diffusionskonstante von Glasbestandteilen an der Probenoberfläche
F	N	Kraft
G	J	Gibbs'sche freie Energie
H	mm	Höhe
H _m	J	Aktivierungsenthalpien der atomaren Migration
I $\varnothing$	mm	Innendurchmesser
MW	-	Mittelwert
Q	J	Aktivierungsenergie
Q _L	J	Aktivierungsenergie für Gitterdiffusion (L für lattice, engl.: Gitter)
Q _D	J	Aktivierungsenergie für Versetzungsdiffusion (D für dislocations, engl.: Versetzungen)
Q _{GB}	J	Aktivierungsenergie für Korngrenzdiffusion (GB für grain boundaries, engl.: Korngrenzen)
Q _s	J	Aktivierungsenergie für Diffusion an Oberflächendefekten (S für surface defects, engl.: Oberflächendefekte)
R	8,3144598 Jmol ⁻¹ K ⁻¹	Universelle Gaskonstante

R^2	-	Bewertungsmaß für Trendlinie
S	J	Entropie
SA	-	Standardabweichung
SP	°C	Erweichungspunkt (engl.: Softening Point)
StP	°C	Unterer Kühlpunkt (engl.: Strain Point)
T	°C	Temperatur
T_D / A_t	°C	Dilatometrischer Erweichungspunkt
TL_a	-	Anstieg der Trendlinie $f(x) = ax + b$
TL_b	-	Absolutwert der Trendlinie $f(x) = ax + b$
Tg	°C	Glasübergangstemperatur
T_{press}	°C	Presstemperatur
V_s	V	Substrat-Bias

Kleine Buchstaben

c	m^{-3}	Konzentration (Teilchendichte)
j_D	$cm^{-2}s^{-1}$	Flussdichte (Teilchen durch einen Festkörper)
k_B	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	Boltzman-Konstante
n	min^{-1} / RPM	Drehgeschwindigkeit
n_d	-	Brechungsindex
p	mbar	Prozesskammerinnendruck
p_{O_2}	mbar	Sauerstoffpartialdruck
r	mm	(Krümmungs-)Radius
z	mm	Weg in z-Richtung (Hub)

Griechische Buchstaben

Δ	-	Delta: Änderung einer Größe im Betrachtungszeitraum
$\partial / \partial t$	-	Partielle Ableitung nach der Zeit
η	-	Reibkoeffizient
ν_d	-	Abbe-Zahl
∇	-	Nabla-Operator (vollständige Ortsableitung)
ρ	g/cm^3	Dichte

σ	N	Normalspannung (Bezeichnung in ABAQUS®: 'normal contact force')
τ	N	Tangentialspannung (Bezeichnung in ABAQUS®: 'frictional contact force')

Abkürzungen

Ar		Argon
Atm.		Atmosphäre
	At%	Elementkonzentration in EXD-Messungen in Atomprozenten
	a.u.	Unskalierte Einheiten (engl.: arbitrary units)
BHT		Abmaße: Breite x Höhe x Tiefe
BSE		Rückstreuelektronen (engl.: Back-Scattering Electrons)
bzw.		Beziehungsweise
Cr		Chrom
Co		Kobalt
CVD		Chemische Gasphasenabscheidung (engl.: Chemical Vapor Deposition)
DOE		Statistische Versuchsplanung (engl.: Design-of-Experiments)
DSC		Dynamische Differenzkalorimetrie (engl.: Differential Scanning Calorimetry)
EDX		Energiedispersive Röntgenspektroskopie (engl.: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
ESMA/EPMA		Elektronenstrahlmikroanalyse (engl.: Electron Probe Micro Analysis)
engl.		aus dem Englischen bzw. auf Englisch
FIB		Focused Ion Beam (engl.: fokussierter Ionenstrahl, auch: Ionenfeinstrahl)
GA		Glasanhaftungen
GDOS		Glimmentladungsspektroskopie (engl.: Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy)
GK		Glaskristalle

GS		Glasschleier
HM		Hartmetall
Ir		Iridium
IPT		(Fraunhofer-)Institut für Produktionstechnologie
K		Kalium
MCP		Micro Channel Plate (engl.: Mikrokanalplatte)
MPIE		Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH
Na		Natrium
Ni		Nickel
NiP		Nickel-Phosphat
O ₂		Sauerstoff
Ox.		Oxide eines Elements
PGM		Präzisionsblankpressen (engl.: Precision Glass Molding)
Pt		Platin
PV		Rauheitskennwert für den maximalen Erhebungsunterschied auf einer Messfläche bzw. -strecke (engl.: Peak-to-Valley)
PVD		Physikalische Gasphasenabscheidung (engl.: Physical Vapor Deposition)
Ra		Arithmetischer Mittenrauwert
REM/SEM		Rasterelektronenmikroskopie (engl.: Scanning Electron Microscopy)
SE		Sekundärelektronen (engl.: Secondary Electrons)
Si		Silizium
SZM		Strukturzonenmodell
Ta		Tantal
TEM		Transmissionselektronenmikroskopie
TGA		Thermogravimetrische Analyse
ToF-SIMS		Flugzeit-Massenspektroskopie (engl.: Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy)
U _{dc}	V	Gleichstromspannung

vgl.		Vergleiche mit
V_O		Volumensignalsumme des Haftschichtelements an der Oberfläche (auch: $V_{\text{Oberfläche}}$)
V_H		Volumensignalsumme des Haftschichtelements zwischen Deckschicht und Substrat (auch: $V_{\text{Haftschicht}}$)
W		Wolfram
WC		Wolframcarbid
XPS		Röntgenphotoelektronenspektroskopie (englisch: X-Ray Photoelectron Spectroscopy)

Indizes

0		Beginn
Extrema		Extremwerte (Minimum oder Maximum)
H		Herausziehen
K		Kontakt
M		Metall
max		Maximum
mittel		Mittelwert
min		Minimum
NP		Nachpressen
P		Pressen
real		Ist-Wert
soll		Soll-Wert

Sonderzeichen

$\sim$		proportional zu
$\approx$		ungefähr gleich

1 Ausgangssituation und Motivation

Initial Situation and Motivation

Neue, hoch anspruchsvolle optische Komponenten aus Glas nehmen eine Schlüsselstellung für die erfolgreiche Erschließung der aktuellen Wachstumsmärkte der Medizin- und Lasertechnik ein. Insbesondere Deutschland ist im Bereich der optischen Industrie weltweit wettbewerbsfähig aufgestellt.

New, highly demanding optical components made of glass are key elements for the successful exploitation of current growth markets in medicine and laser technology. Especially Germany is in a competitive position in optical industry.

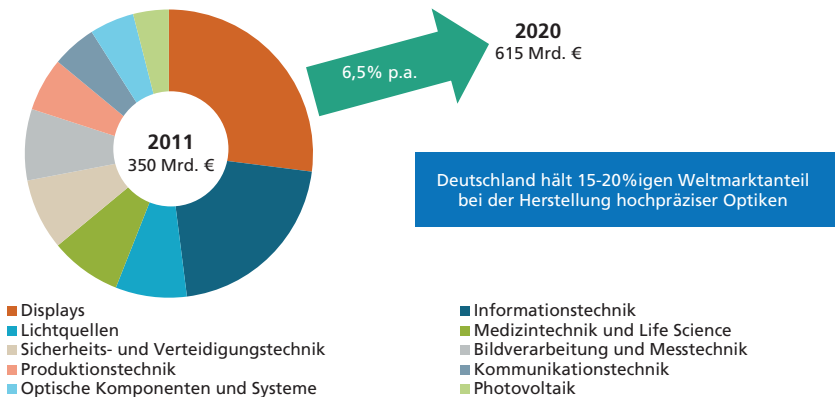


Abbildung 1: Marktkennzahlen und Segmente der Optikbranche [nach SPECT13]

Figure 1: Market figures and segments of the optical industry

In den in Abbildung 1 genannten Anwendungsbereichen werden optische Komponenten mit teils großer geometrischer Komplexität und sehr hohen Genauigkeitsanforderungen benötigt. Derartige Komponenten sind mit den heute verfügbaren Fertigungstechnologien wie Schleifen und Polieren, wirtschaftlich und technisch nur sehr eingeschränkt beziehungsweise gar nicht herstellbar. Das **Präzisionsblankpressen** ist ein sehr geeignetes Fertigungsverfahren für Herstellung dieser Komponenten, da es die nachbearbeitungsfreie **Herstellung von opto-elektronischen Bauteilen** aus Glas in einem effizienten Prozess erlaubt (Abbildung 2).

In the application areas from figure 1, optical components with high geometric complexity and very high accuracy demands are needed. In parts, such components may not be fabricated with traditional manufacturing technologies, such as grinding and polishing. Precision Glass Molding (PGM) is currently the most promising technology for providing such components, since it allows the fabrication of opto-electrical components made of glass in an efficient way, without the need for a final finish step (compare figure 2).

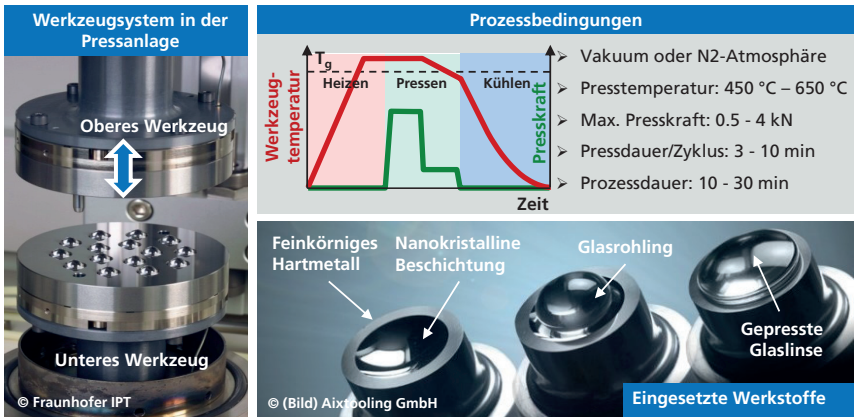


Abbildung 2: Das Prinzip des Präzisionsblankpressens

Figure 2: The principle of Precision Glass Molding

Hierbei werden zwei Formeinsätze zusammen mit einem eingelegten Glasrohling auf die Umformtemperatur erwärmt und das Glas wird anschließend mit geeigneter Kraftsteuerung in die Stempel gepresst. Nach dem Abkühlen hat das Glas die Endgeometrie für die Nutzung im optischen System – ohne Nachbearbeitungsschritte. Wichtig ist dies in verschiedenen Anwendungen, bei denen die Entwicklung zur Miniaturisierung oder zu einem höheren Integrationsgrad des optischen oder opto-elektronischen Produkts führen soll. Das betrifft beispielsweise Kameraobjektive, Laseroptiken und auch Halbleiteranwendungen. Gleichzeitig erhöht sich damit die Anforderung an die **Präzision** der freigeformten Linse und, damit einhergehend, auch die Anforderung an die Formgenauigkeit des Formwerkzeugs – **über mehrere hundert Presszyklen**.

In PGM processes, two forming tools and a glass gob are heated up in the process chamber for subsequently molding the glass into the forming tools by applying appropriate pressing forces. After cooling down, the glass got the final geometry for the application in the optical system – without any finishing steps. This is of great interest for applications where developments should lead to miniaturization or increased degree of integrability at the optical or opto-electrical system. This applies e.g. to camera lenses, laser optics or semiconductor applications. As a result, tolerance constraints tighten regarding precision of such free-formed lenses. Hence, also the tolerance constraints on the form accuracy of the forming tools increase – and need to hold for several hundred pressing cycles.

Die Formwerkzeuge können nur benutzt werden, solange ihre Oberflächen den sehr hohen Genauigkeitsanforderungen für optische Komponenten genügen. Allgemeine, industrieübliche Anforderungen an die eingesetzten Oberflächenbeschichtungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

The forming tools can only be used as long as their surfaces satisfy the high accuracy requirements for optical components. Typical requirements in industrial practice are listed in table 1.

Tabelle 1: Anforderungen an die Beschichtungen des Formeinsatzes

Table 1: Requirements for tool coatings

Toleranzen der Beschichtung	Beständigkeit	Qualitätsmerkmale, Formtoleranzen
Rauheitserhöhung nach Plasmaätzen: $\Delta Ra, \Delta Sa < 1 \text{ nm}$	Thermische Beständigkeit: Prozesstemperaturen bis 700°C	Defektverteilung Z.B. Defektdichte von $< 1 \text{ cm}^{-1}$ bei max. Partikelgröße von $20 \text{ }\mu\text{m}$: (entspricht $5/NxA = 5/1 \times 0,02$ nach [DIN09])
Erhöhung der Rauheit durch Beschichten $\Delta Ra^*, \Delta Sa^* < 1 \text{ nm}$	Mechanische Beständigkeit - Flächendruck: bis zu 2 kNcm^{-2} - Lokale Druckspitzen bis zu 300 GPa	
Formabweichung von der initialen Oberfläche $< 50 \text{ nm}$	Chemische Beständigkeit ... - bezüglich der flüchtigen Glasbestandteile - gegenüber Oxidation mit Umgebungsluft (während bzw. nach dem Prozess) - gegenüber Schichtdiffusion	Rauheit Z.B. $Ra, Sa < 5 \text{ nm}$
Gesamtdicke der Schicht $< 600 \text{ nm}$	Wechselbelastungsbeständigkeit: 15-20 min Heizzyklusdauer; davon ca. 5 min. Aufheizen, 3 min. langsames Abkühlen, 5 min schnelles Abkühlen 3-5 min Pressdauer; davon ca. 2-3 min. Formpressen, 1-2 min. Nachpressen	Standzeit aktuell < 1000 Zyklen

Die Rauheit und Defektverteilung auf den Formeinsatzes sind entscheidende **Qualitätskriterien**, die in engen, vorgegebenen Grenzen liegen müssen. In optischen Systemen führen kleine Defekte oder flächige Rauheitserhöhungen an der abgeformten Oberfläche der Glaslinsen zur Streuung des transmittierten Lichtstrahls und damit zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Abbildungseigenschaften. In den Anwendungsbereichen der durch das Präzisionsblankpressen hergestellten Linsen bedeuten diese mit dem Auge kaum erkennbaren Schädigungen bereits den Ausschuss der hergestellten Produkte.

The roughness and the defect distribution on the forming tool surfaces are under tight restrictions, as they are the key quality criteria. In optical systems, small defects or areal roughness increases at the molded surfaces of the glass lenses lead to undesired diffusions of light beams and, hence to a significant impairment of the imaging quality of the optical device. In application areas of PGM, this leads to situations where products are to be discarded – due to damages that can only be faintly seen with the bare eye.

Den aufgetragenen **Beschichtungen** kommt in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit eine entscheidende Rolle zu, da die Hauptkosten durch die teuren, sehr aufwändig zu produzierenden Formwerkzeuge verursacht werden. Da es sich hier um ein replikatives Verfahren ohne andere Ver-

schleißteile handelt, hängen die Stückkosten der gepressten optischen Komponenten maßgeblich von der Standzeit der benutzten Formwerkzeuge ab. Obwohl die Reproduzierbarkeit der Beschichtungen sehr hoch ist (steuerungsbedingte Fluktuationen der Prozessgrößen während des Beschichtungsprozesses <5%), treten je nach Anwendungsfall und spezifischen Pressbedingungen teils große Eigenschaftsunterschiede auf, wodurch die Formeinsätze ihr Standzeitende ungleichmäßig schnell erreichen.

The coatings applied on the mold tool surface are of major importance with respect to economic efficiency, since the bulk costs arise in the extensive production effort for providing the forming tools. Due to the fact that PGM is a replicative technology without further wear parts, unit costs of the optical components rely on the standard lifetime of the forming tools. Although the reproducibility of the coatings is very high (process-related fluctuations during the coating process are less than 5%), major differences in the coating performance are present and the forming tool's standard lifetimes can differ strongly.

Flächige, nanoskopische Oberflächenaufrauungen (im industriellen Umfeld auch **Haziness** bezeichnet) und lokale, **mikroskopische Glasanhaftungen** sind die beiden Schadensfälle, die meist das Standzeitende auslösen (siehe Abbildung 3). Es führen schon geringste Glasanhaftungen oder Korrosionspunkte bereits zum Aussondern und aufwändigen Überarbeiten der Formeinsätze und führen dazu, dass der Prozess damit unwirtschaftlich werden kann.

Areal, nanoscopic surface roughening (also named Haziness in industrial practice) and local, microscopic glass adhesions are the two failure types leading to end of service lifetime of the forming tools (compare figure 3). Already minimal glass adhesions of corrosive spots can lead to the discard or labor-intensive refurbishment of the forming tools and can render the manufacturing process inefficient.

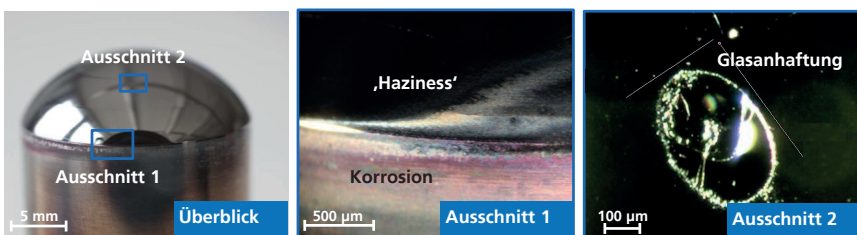


Abbildung 3: Kritische Schadensfälle beim Präzisionsblankpressen

Figure 3: Critical failure modes in Precision Glass Molding

Die hauptsächlich eingesetzten **Edelmetallbeschichtungen** sind auf die Anforderungen für die spezifischen Einsatzbedingungen beim isothermen Glaspressen optimiert. Diese sollen die Werkzeugoberflächen insbesondere vor Degradation der Formeinsätze schützen und somit die Standzeit der Werkzeuge erhöhen. Die Beschichtungen müssen dabei den **mechanischen** (z.B. aufgrund von Pressdruck oder von Reibung des Glases auf der Beschichtung) und **thermischen**

Belastungen (z.B. Temperaturwechselbelastung oder unterschiedlicher Wärmemaisdehnung der kontaktierenden Werkstoffe) widerstehen, aber auch eine große **chemische Widerstandsfähigkeit** besitzen (z.B. gegenüber Oxidation oder Korrosionsmechanismen). Eine bestmögliche Anpassung des Schichtsystems und des zugehörigen Beschichtungsprozesses an die jeweilige Glassorte wird dabei als ausschlaggebend für eine Maximierung der Lebensdauer betrachtet [GEOR15, CHAO10].

Hieraus ergibt sich die Motivation für die vorliegende Arbeit. Bisher existieren zu wenige Ansatzmöglichkeiten zur wissensbasierten Schichtentwicklung, da die Verschleißentwicklungen noch nicht ausreichend verstanden bzw. durchgängig nachgewiesen sind. Bevor eine wissensbasierte Schichtentwicklung erfolgen kann, müssen die Ursachen und Mechanismen in Bezug auf die Bildung von Glasanhaftungen und Haziness besser verstanden sein. Erst daraus können geeignete Entwicklungsstrategien für Schutzbeschichtungen abgeleitet werden, seien es Anpassungen der Schichtzusammensetzung, des Schichtsystems, der Schichtmikrostruktur oder anderer Eigenschaften, die den Kontakt zwischen Glas und Beschichtung beeinflussen.

Precious metal coatings, which are most commonly applied in industry, are optimized to the demands imposed by isothermal glass molding processes. They should protect the forming tool surfaces from degradation and should lead to an increase in standard lifetime. The coatings need to resist mechanical (imposed e.g. by pressing forces or friction of the glass on the coating), thermal (imposed e.g. by temperature load changes of differences in the coefficients of thermal expansion) and chemical loads (regarding e.g. oxidation and corrosion mechanisms). The adjustment of the coating system and the corresponding coating process to the respective glass type is regarded to be most critical for the optimization of the standard lifetime [GEOR15, CHAO10].

This is the motivation of the thesis presented here. Up to now, approaches for knowledge-based coating developments are lacking, since the wear evolution is either barely understood or insufficiently proven. Prior to being able to execute knowledge-based coating developments, causes and mechanisms regarding the formation of glass adhesions and haziness need to be understood. Based on this, improvement strategies for coatings can be laid out, which could include the change of coating composition, of coating microstructure or of other properties that may influence the contact between glass and coating.

