

**Hannes Scheibe**

**Aktiv-adaptive Polierwerkzeuge zur Herstellung  
rotationssymmetrischer Asphären**

Berichte aus dem  
INSTITUT FÜR MASCHINEN- UND  
GERÄTEKONSTRUKTION (IMGK)

Herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente),  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska (Feinwerktechnik) und  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (Konstruktionstechnik)  
aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) an  
der TU Ilmenau.

Band 28

Diese Reihe setzt die „Berichte aus dem Institut für  
Maschinenelemente und Konstruktion“ fort.

# **Aktiv-adaptive Polierwerkzeuge zur Herstellung rotationssymmetrischer Asphären**

Hannes Scheibe



Universitätsverlag Ilmenau  
2017

# Impressum

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 28. April 2016  
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska  
(Technische Universität Ilmenau)  
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner  
(Ernst Abbe Hochschule Jena)  
3. Gutachter: Dr.-Ing. Eckhard Roth  
(Carl Zeiss Jena GmbH)  
Tag der Verteidigung: 05. Oktober 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

### **Herstellung**

readbox unipress  
in der readbox publishing GmbH  
Am Hawerkamp 31  
48155 Münster  
<http://unipress.readbox.net>

### **Druck und Bindung**

CCC Druck und Medien GmbH, Münster

**ISSN** 2191-8082 (Druckausgabe)

**ISBN** 978-3-86360-147-8 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000551

---

## Geleitwort der Herausgeber

Die Konstruktion von Maschinen und Geräten sowie die zugehörigen Methoden und Werkzeuge sind seit den frühen 1950er Jahren ein profilbildender Schwerpunkt an der Technischen Universität Ilmenau und ihren Vorgängerinstitutionen. Es war daher ein nahe liegender Schritt, dass die drei konstruktiv orientierten Fachgebiete der Fakultät für Maschinenbau – Maschinenelemente, Feinwerktechnik/Precision Engineering, Konstruktionstechnik – im Mai 2008 das Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) neu gegründet haben. Das IMGK steht in der Tradition einer Kette ähnlicher Vorgängerinstitute, deren wechselnde Zusammensetzung hauptsächlich durch sich über der Zeit ändernde Universitätsstrukturen bedingt war.

Zweck des Institutes ist es, die Kompetenzen und Ressourcen der beteiligten Fachgebiete zu bündeln, um Forschung und Lehre zu verbessern und erzielte wissenschaftliche Ergebnisse gemeinsam in die Fachöffentlichkeit zu tragen.

Ein wesentliches Instrument hierzu ist die Schriftenreihe des Instituts für Maschinen- und Gerätekonstruktion. Sie führt eine erfolgreiche Schriftenreihe des im Jahr 1991 gegründeten unmittelbaren Vorgängerinstitutes IMK (Institut für Maschinenelemente und Konstruktion) fort.

In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die am Institut entstandenen Dissertationen, daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen.

Der vorliegende Band 28 ist als Dissertation am Fachgebiet für Maschinenelemente unter der wissenschaftlichen Betreuung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska entstanden. Die Herausgeber wünschen sich reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn sie zum fruchtbaren Dialog in Wissenschaft und Praxis beitragen würde.

Ilmenau, im November 2016

Univ. Prof. Dr. Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente)

Univ. Prof. Dr. Ing. René Theska (Feinwerktechnik)

Univ. Prof. Dr. Ing. Christian Weber (Konstruktionstechnik)



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als Entwickler und Projektleiter im Bereich Entwicklung Optiksyste­me der Carl Zeiss Jena GmbH, in enger Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet für Feinwerktechnik der Technischen Universität Ilmenau. Mein besonderer Dank für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit gilt daher Dr.-Ing. Eckhard Roth sowie Dr.-Ing. Volkmar Giggel als Verantwortliche der Carl Zeiss Jena GmbH. Nichtweniger danke ich dem Leiter des Fachgebiets für Feinwerktechnik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska, für die Betreuung meiner Arbeit.

Für die langjährige fachliche Förderung sowie wissenschaftliche Betreuung seit Beginn meines Masterstudiums für Feinwerktechnik und Optik danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska insbesondere. Er trug wesentlich zur Schaffung der Rahmenbedingungen für mein Promotionsvorhaben seitens der Technischen Universität Ilmenau bei, nicht zuletzt aufgrund der langjährigen Zusammenarbeit zwischen seinem Fachgebiet für Feinwerktechnik und dem Bereich Entwicklung Optiksyste­me der Carl Zeiss Jena GmbH. Während der Bearbeitung stand er mir für regelmäßige Fachdiskussionen zur Verfügung und lieferte eine Vielzahl konstruktiver Anregungen und Anmerkungen bei der kritischen Durchsicht meines Manuskripts.

Für die Möglichkeit der beruflichen und persönlichen Weiterentwicklung danke ich meinem Abteilungsleiter Dr.-Ing. Eckhard Roth. Er unterstützte mein Promotionsvorhaben seit Anbeginn und setzte sich stets für die Durchführung des seitens ZEISS dahinterstehenden Entwicklungsprojekts ein.

Dr.-Ing. Volkmar Giggel danke ich für sein Wirken als fachlicher Mentor, das Teilen seines umfassenden Fachwissens zur Optikfertigung, den damit verbundenen überaus hilfreichen Denkanstößen sowie der fachlichen Einführung zu Beginn in das für mich seinerzeit völlig entfremde Themengebiet.

Für die Erstellung der Gutachten danke ich Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner, Dr.-Ing. Eckhard Roth sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska.

Weiterhin danke ich den Kollegen der Carl Zeiss Jena GmbH für die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich dabei Dr.-Ing. Mario Sondermann sowie Dr.-Ing. Stefan Frank. Ihre Aufwände zur fachlichen Betreuung während meiner Zeit als Student sowie dem anschließenden Mentoring als Berufseinsteiger schätze ich sehr.

Meine Eltern möchte ich an dieser Stelle natürlich nicht unerwähnt lassen. Sie gaben und geben mir stets Rückhalt – nicht zuletzt trugen sie durch ihre fortwährende Förderung zu dem von mir eingeschlagenen Weg maßgeblich bei. Meiner Freundin Christina danke ich nichtweniger für ihre Unterstützung und Geduld bei der Anfertigung dieser für mich persönlich sehr wichtigen Arbeit. Speziell ihr Verständnis für die teils entbehrungsreichen Zeiten sowie ihr behutsames Einbremsen meines zeitweisen Übereifers weiß ich sehr zu schätzen.

Jena, im April 2016

Hannes Scheibe

## Kurzfassung

Optische Technologien sind einer der wesentlichen wirtschaftlichen Treiber des 21. Jahrhunderts. Aus heutiger Sicht besteht speziell für die wirtschaftliche Einzelteilfertigung asphärischer Optikkomponenten als auch optischer Freiformelemente steigender Handlungsbedarf. Diese sind in der geforderten Qualität zwar herstellbar, jedoch verhindern zeitintensive und aufwändige Fertigungsprozesse ihren breiten Einsatz. Der Miniaturisierung und Integration zusätzlicher Funktionalitäten sind unter ausschließlicher Verwendung sphärischer Optikkomponenten enge Grenzen gesetzt, an denen sich heutige Technologien bewegen. Der Einsatz asphärischer Optikkomponenten erlaubt hingegen eine Reduzierung der Anzahl optischer Bauelemente, welche den Bauraumbedarf, das Gewicht, den konstruktiven Aufwand und somit auch die gesamte Komplexität des optischen Systems zu verringern vermag.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine spürbare Kostensenkung für die Herstellung asphärischer Optikkomponenten zu realisieren. Die dazu erforderliche Weiterentwicklung aktueller Fertigungsprozesse setzt dabei eine tiefgründige wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Themenkomplex heutiger Optiktechnologien im Allgemeinen sowie der Optikfertigung im Speziellen voraus. Den Einstieg dafür bildet die systematische Analyse bestehender Prozesse zur Herstellung asphärischer Optikkomponenten. Darin wird der Vorpolierprozess als wesentlicher Kostentreiber der Asphärenfertigung identifiziert. Ursachen dafür sind drei wesentliche prozess- und technologiebedingte Nachteile, deren Auswirkungen es zur Realisierung einer kosteneffizienten Fertigung mindestens zu reduzieren, idealerweise zu beseitigen gilt. Darauf aufbauend erfolgt eine Erarbeitung und Vorstellung dreier Lösungsansätze. Deren Vergleich und Bewertung zeigt, dass vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeuge die größten Erfolgsaussichten versprechen. Im Folgenden wird dieser Lösungsansatz durch die Erarbeitung des Lösungsraums untersetzt. Die sukzessive Überführung und Ausgestaltung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs hin zu einem Konstruktionsentwurf erfolgt in Anlehnung an die Systematik der Ilmenauer Konstruktionslehre. Den Abschluss der Arbeit bilden der praktische Verfahrensnachweis des entwickelten Werkzeugs, eine Einflussgrößenanalyse, eine Abschätzung des Einsparpotentials sowie Empfehlungen zur Weiterentwicklung.



## Abstract

Optical technologies are considered a major economic growth driver of the 21<sup>st</sup> century. Today's optical industry calls more than ever for manufacturing technologies that enable a cost-efficient production of precision optics. These are producible in terms of admissible form deviations, surface roughness, material homogeneity and stress birefringence in general. However, cost and time consuming manufacturing processes preclude their general use in cost-sensitive applications.

The demand for a perpetual miniaturization as well as an integration of additional functionalities is severely restricted by the exclusive use of spherical optics. Today's mechanical designs are already close to that border. However, the use of aspherical optics enables a significant reduction of the total number of optical elements which causes significantly positive effects in terms of required installation space, system weight, mechanical design effort and overall total system complexity.

This thesis aims to attain an appreciable manufacturing cost cutback for aspherical optics production. The required enhancement and optimization of state-of-the-art manufacturing technologies presupposes a profound systematic analysis of today's optical technologies in general and, in particular, the field of optics production. A systematic breakdown of the existing process chain identifies the prepolishing process as the major cost driver in aspherical optics production. Reasons therefor can be found in three technology-related and process-related downsides of state-of-the-art polishing technologies. The realization of a cost-efficient manufacturing process requires a significant reduction of these downsides or an overall elimination in best case. Based thereupon, this thesis presents three approaches to be compared and evaluated. Though, the approach of a full aperture active-adaptive polishing tool promises the greatest success for this application. Furthermore, a systematic development and gradual finalization from a general approach to a detailed design model is given, based on the procedural method of the 'Ilmenau School of Design'. Subsequent practical tests provide a proof of principle as well as recommendations for further research, optimization and development.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Abgrenzung des Bearbeitungsfeldes .....</b>	<b>7</b>
3.1 Klassifikationsmöglichkeiten technischer Optiken.....	7
3.1.1 Nach Art der optischen Funktion .....	7
3.1.2 Nach Geometrie der optisch wirksamen Fläche.....	8
3.1.3 Genauigkeitsklassen optischer Systeme.....	10
3.2 Grundlagen.....	12
3.2.1 Vor- und Nachteile sphärischer sowie asphärischer Optiken.....	12
3.2.2 Kenngrößen und Beschreibung optischer Bauelemente .....	14
3.2.3 Gestaltabweichungen.....	17
3.2.4 Preston Hypothese und Abtragsarbeit .....	22
3.3 Begriffe.....	23
<b>4 Fertigungsverfahren optischer Bauelemente.....</b>	<b>27</b>
4.1 Einführung und Einschränkung .....	27
4.2 Prozesskette zur Herstellung von Präzisionsoptiken .....	28
4.2.1 Bohren und Sägen.....	28
4.2.2 Vorschleifen, Feinschleifen und Feinstschleifen.....	29
4.2.3 Vor- und Durchpolieren .....	30
4.2.4 Glättpolieren .....	35
4.2.5 Korrekturpolieren .....	37
4.2.6 Waschen, Reinigen und Beschichten .....	42
4.3 Bewertung und Ableitung eines Handlungsbedarfs.....	42
<b>5 Lösungsansätze für die Politur rotationssymmetrischer Asphären.....</b>	<b>45</b>
5.1 Prozessparameteroptimierung für eine gesteigerte Materialabtragsrate	45
5.2 Multiwerkzeuganordnung mit simultanem Eingriff mehrerer Polierköpfe.....	46
5.3 Vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeuge .....	48
5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Lösungsansätze .....	50

<b>6 Realisierung eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs</b>	<b>53</b>
6.1 Einführung .....	53
6.2 Aufgaben und Ziele .....	53
6.3 Prinzipphase .....	54
6.3.1 Funktionsstruktur .....	54
6.3.2 Lösungsraum .....	58
6.3.3 Technische Prinzipie .....	67
6.3.4 Zusammenfassung .....	73
6.4 Gestaltungsphase .....	73
6.4.1 Gestaltförderungsplan/grafischer Forderungsplan .....	74
6.4.2 Konstruktionsentwurf .....	86
6.4.3 Zusammenfassung .....	91
<b>7 Aufbau &amp; Justage vollaperturiger, aktiv-adaptiver Polierwerkzeuge</b>	<b>93</b>
7.1 Montage .....	93
7.2 Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts .....	96
7.3 Festlegung Prozessparameter .....	102
<b>8 Politur mittels vollaperturiger, aktiv-adaptiver Werkzeuge</b>	<b>103</b>
8.1 Verfahrensnachweis .....	103
8.1.1 Werkzeug und Werkstück .....	103
8.1.2 Vorgehensweise und Durchführung .....	105
8.1.3 Auswertung und Interpretation .....	105
8.2 Einflussgrößen und deren Wirkverhalten .....	109
8.2.1 Einflussgrößen flächiger Polierprozesse .....	109
8.2.2 Variation der Poliermittelträgerbelegung .....	111
8.2.3 Variation Drehzahlverhältnis von Werkstück zu Werkzeug .....	113
8.2.4 Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks .....	115
8.2.5 Zusammenfassung .....	117
8.3 Eigenschaften vollaperturiger, aktiv-adaptiver Polierwerkzeuge .....	118
8.3.1 Charakteristische Gestaltabweichungen .....	118
8.3.2 Potentiale und Grenzen .....	124
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>127</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>143</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>147</b>
<b>Anhang</b>	<b>149</b>

## Abkürzungen und Formelzeichen

### *Lateinische Großbuchstaben*

$A_K$	Flächeninhalt Kontaktzone
AFM	Atomic Force Microscope
APPJ	Atmospheric Pressure Plasma Jet
$A_{x..z}$	Lagerreaktion des Lagers A in x-, y- oder z-Richtung
BEMRF	Ball End MagnetoRheological Finishing
CCP	Computer Controlled Polishing
CGH	Computer Generiertes Hologramm
CNC	Computer Numeric Control
COC	Cyclo Olefin Copolymer
COP	Cyclic Olefin Polymer
$D_{Führ}$	Durchmesser Zylinderführung
$D_K$	Kugeldurchmesser
$D_{Nadel}$	Nadeldurchmesser
DOE	Diffraktives Optisches Element
$D_T$	Tastkugeldurchmesser
$D_{Wst}$	Werkstückdurchmesser
$D_{Wstmax}$	Maximaler Werkstückdurchmesser
$D_{Wstmin}$	Minimaler Werkstückdurchmesser
E	E-Modul
F	Auf Stirnfläche der Nadel wirkende Kraft
FG	Freiheitsgrad
FJP	Fluid Jet Polishing
GPS	Geometrische ProduktSpezifikation
IBF	Ion Beam Figuring
$I_z$	Flächenträgheitsmoment um z-Achse
HyDRa	HydroDynamic Radial Polishing
KEP	Konstruktiver EntwicklungsProzess
KMM	KoordinatenMessMaschine
$M_{bzn}(x)$	Biegemoment, um z-Achse wirkend im Bereich n
$M_{zA}$	Schnittmoment um z-Achse an der Lagerstelle A
MGA	Mittelfrequente Gestaltabweichungen

---

MP	MessPunkt
MPD	MessPunktDichte
MSF	Mid Spatial Frequency
MRF	MagnetoRheological Finishing
MR JET	MagnetoRheological JET finishing
PC	PolyCarbonat
PM	PolierMittel
PMMA	PolyMethylMethAcrylat
PMT	PolierMittelTräger
PSD	Power Spectral Density
PUF	PolyUrethanFolie
PV	Peak-to-Valley
RB	RandBedingung
$R_{ers}$	Sphärischer Ersatzradius
$R_a$	Arithmetischer Mittenrauwert
$R_q$	Quadratischer Mittenrauwert
$R_z$	Rautiefe
RFK	Relative FlächenKippung
RMA	Relativer MaterialAbtragskoeffizient
RMR	Rand-Mitte-Rand
RMS	Root Mean Square
SR	SchnittReaktion
SSD	SubSurface Damage
STS	Slow Tool Servo
TCP	Tool Center Point
TIF	Tool Influence Function
U	Unfreiheit
ÜB	ÜbergangsBedingung
UMCF	Ultrasonic-Magnetorheological Compound Finishing
UP	UltraPräzision
UVAP	Ultrasonic Vibration Assisted Polishing
$W_a$	Abtragsarbeit
$W_q$	Quadratische Mittenwert der Welligkeit

*Lateinische Kleinbuchstaben*

$a_K$	Abstand zweier sphärischer Luftlager Elemente
arcsec	Winkelsekunde
arcmin	Winkelminute
$b_{\max}$	Maximale, virtuelle Führungslänge
c	Federrate
$c_n$	Integrationskonstante n
$\overrightarrow{e_{x..z}}$	Einheitsvektor in x-, y- oder z-Richtung
$g_n$	Größtspiel der Spielpassung n
h	von $R_{\text{ers}}$ abhängiger Nadellängenanteil
$h_{\text{ÜPlan}}$	Überstand Unterseite Führung und Planfläche
$h_{\text{ÜSph}}$	Überstand Oberseite Führung und sphärischer Fläche
k	Preston Konstante
$l_0$	Nulllänge einer Schraubendruck oder -zugfeder
$l_{\text{Fn}}$	Führungslänge der Führung n
$l_{\text{Feder}}$	Federlänge eingebaut in Ruhelage
$l_{\text{Seg}}$	Nadellänge bei segmentiertem Führungsarray
$l_{\text{Ein}}$	Nadellänge bei einfachem Führungsarray
n	Drehzahl in Umdrehungen/Minute
p	Polierdruck
t	Bearbeitungszeit
$v(t)$	Geschwindigkeit
$v_{\text{rel}}$	Relativgeschwindigkeit
$v_n(x)$	Durchbiegung an der Stelle x im Bereich n
$v_n'(x)$	Anstieg der Biegelinie an der Stelle x im Bereich n
$v_n''(x)$	Krümmung der Biegelinie an der Stelle x im Bereich n

*Griechische Buchstaben*

$\alpha$	Schwenkwinkel des Werkstücks
$\beta(g_n)$	maximaler Kippwinkel in Abhängigkeit von $g_n$
$\Delta b$	Abtragshöhe
$\Delta b_{min}$	Minimale Abtragshöhe
$\Delta b_{max}$	Maximale Abtragshöhe
$\lambda$	Wellenlänge
$\mu$	Reibzahl
$\Sigma$	Summe

# 1 Einleitung

Optische Technologien verzeichnen seit Anbeginn<sup>1</sup> ein weltweit stetiges Wachstum und genießen kontinuierlich steigende Bedeutung. Speziell im europäischen, japanischen und amerikanischen Handelsraum konnten sie sich als essentieller Wirtschaftszweig und -motor etablieren. Optische Technologien umfassen nach [Bac02] die Gesamtheit physikalischer, chemischer und biologischer Naturgesetze und Technologien zur Erzeugung, Formung, Übertragung, Messung und Nutzbarmachung von Licht.

[Rie90] datiert die Geburtsstunde optischer Technologien oder vielmehr der optischen Industrie auf die kommerzielle Vermarktung des holländischen Fernrohrs sowie einfacher Mikroskope zu Beginn des 17. Jahrhunderts, frühestens jedoch um 1608.

In den zurückliegenden zwei Jahrzehnten erlebte die optische Industrie einen bisher nie dagewesenen Wachstumsschub, getrieben durch eine signifikant gesteigerte Nachfrage nach optischen Analyse- und Projektionsgeräten für professionelle Anwendungen [Fra06]. Nicht ohne Grund trägt das 21. Jahrhundert den Beinamen ‘Jahrhundert des Photons’ [Bun10]; [Sie00]. Die massive Nachfragesteigerung lässt sich zum einen durch die stetige Miniaturisierung elektronischer Schaltkreise und somit dem Bedarf an neuen, leistungsfähigeren Projektionssystemen zur Massenfertigung dieser begründen. Zum anderen durchlebt die Gesellschaft spätestens seit der Jahrtausendwende eine Digitalisierung, sodass Mobiltelefone/Smartphones, Laptops/Tablets sowie Kompaktkameras/Spiegelreflexkameras mit Abbildungsoptiken heute in nahezu jedem europäischen und amerikanischen Haushalt zu finden sind [Sta13]. Kurzum, die Nutzung optischer Technologien ist für unsere alltägliche Arbeit und Freizeit nicht mehr wegzudenken.

Innovationen und Neuentwicklungen in der optischen Industrie besitzen ihren Ursprung in der Regel in Europa, Nordamerika oder Japan. Der dort bestehende technologische Vorsprung ermöglicht und fördert die Entwicklung zukünftiger Fertigungstechnologien. Häufig sind dies Schlüsseltechnologien<sup>2</sup> zur Herstellung bisher nicht fertiger Einzelteile und Funktionsgruppen bis hin zur Erschließung gänzlich neuer Geschäftsfelder und Märkte. Die Beherrschung und Bereitstellung solcher Technologien setzt eine tiefgründige wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik voraus.

---

<sup>1</sup> Mit Ausnahme der Weltwirtschaftskrise zur Zeit der Weimarer Republik sowie beider Weltkriege.

<sup>2</sup> Im Englischen kommen die Bezeichnungen ‘Enabling Technology’ oder ‘Key Enabling Technology’ dem Begriff der Schlüsseltechnologie am nächsten.

Neben den Technologien sind es auch die (Prüf-) Geräte, Fertigungsmaschinen und Werkzeuge, die eine kontinuierliche Weiterentwicklung erfordern. Hier kommt der Konstruktion eine Schlüsselrolle zu.

Die Herstellung präzisionsoptischer Bauelemente ist ein klassisches Beispiel für die Abfolge einer Vielzahl hochspezialisierter Prozessschritte – ein Großteil davon sind Schlüsseltechnologien. Jeder Bearbeitungsschritt in sich erfordert dabei tiefgründiges Verständnis technologischer Randbedingungen und Einflussparameter sowie die Beherrschung jedes Einzelprozesses selbst. Für die Herstellung asphärischer Optikkomponenten besteht eine deterministische Prozesskette, obgleich die zur Fertigung erforderlichen Zeitaufwände bisweilen den breiten Einsatz von Asphären in kostensensitiven Anwendungen verhindern. Zur Erfüllung wirtschaftlicher Forderungen bedarf es daher einer signifikanten Aufwands- und Kostensenkung.

Die vorliegende Arbeit setzt an dieser Stelle mit einer Analyse des aktuellen Standes der Technik zur Herstellung asphärischer Optikkomponenten an. Der Polierprozess wird darin als wesentlicher Kostentreiber identifiziert. Da die Politur in der Herstellkette qualitativ hochwertiger Optikkomponenten einen essentiellen Prozessschritt darstellt, lässt sich daraus ein Handlungsbedarf zur Weiterentwicklung und/oder Optimierung aktuell angewandter Verfahren ableiten. Die konzeptionelle Erarbeitung verschiedener Lösungsansätze sowie deren systematische Ausgestaltung erweitern den aktuellen Stand der Technik und liefern somit einen wissenschaftlichen Beitrag. Ferner stellen sie einen wichtigen Schritt zur wirtschaftlichen Fertigung und somit dem breiten Einsatz asphärischer Optikkomponenten dar.

## 2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Den Ausgangspunkt dieser Arbeit bildet die Divergenz einer stetigen Weiterentwicklung optischer und optomechatronischer Systeme, welche außer einer Steigerung der Abbildungsleistung die Integration zusätzlicher Funktionen und Funktionselemente in gleiche oder kleinere Bauräume, unter paralleler Senkung der Herstellkosten fordert. Diese Entwicklungstendenz verlangt kompakte Optikdesigns – realisierbar durch den Einsatz asphärischer Optikkomponenten und/oder optischer Freiformelemente. Aktuelle Herstellkosten asphärischer Optiken oder Freiformelemente verhindern dabei den Einsatz in kostensensitiven Anwendungen mittlerer bis großer Stückzahlen.

Das vergangene Jahrzehnt zeichnete sich speziell durch Entwicklungen der Fertigungs- und Montageprozesse aus, welche eine Herstellkostensenkung für optische Hochleistungssysteme unter Verwendung sphärischer Optikkomponenten erlaubten. Aus technologischer Sicht ist die Herstellung hochgenauer Asphären als auch optischer Freiformelemente zum Aufbau optischer und optomechatronischer Systeme abgesichert, obgleich nach aktuellem Stand der Technik nicht wirtschaftlich.

Zielstellung dieser Arbeit soll folglich sein, die bestehende Prozesskette so weiterzuentwickeln, dass eine spürbare Senkung der Einstiegshürde den Einsatz asphärischer Optikkomponenten erlaubt. Diese Arbeit beschränkt sich dabei auf die Entwicklung/Optimierung eines Prozessschritts in der Herstellkette asphärischer Optiken. Damit dieser einen hinreichend großen Hebel zur Kostensenkung bietet, ist eine Analyse aktuell genutzter Fertigungstechnologien unumgänglich. Den wissenschaftlichen Anspruch schöpft diese Arbeit dabei nicht ausschließlich aus der verfahrenstechnischen Entwicklung, Konstruktion oder Simulation als Einzeldisziplin. Vielmehr ist es eine über die Grenzen dieser Einzeldisziplinen hinausgehende sinnvolle Verknüpfung hin zur Entwicklung einer neuen Verfahrenstechnologie.

Kapitel 3 steigt inhaltlich mit der Einschränkung des Bearbeitungsfelds sowie der Vermittlung für die Bearbeitung der Thematik relevanten Grundlagen, Klassifikationsmöglichkeiten technischer Optiken, Aufschlüsselung von Gestaltabweichungen sowie Begriffsdefinitionen ein.

Die Herstellung von Präzisionsoptiken erfordert das schrittweise Durchlaufen einer deterministischen Prozesskette, bestehend aus einer Reihe von Einzelprozessschritten. Einer Vorstellung und Analyse all dieser Schritte dient Kapitel 4. In einer anschließenden Bewertung wird der Durchpolierprozess als wesentlicher Kostentreiber in der Prozesskette zur Herstellung von Asphären und

optischen Freiformelementen identifiziert. Eine detaillierte Betrachtung des Prozesses zeigt, dass die Politur mittels subaperturigen Werkzeugen zu drei wesentlichen Nachteilen führt, deren Reduzierung und bestenfalls Beseitigung einen inhaltlichen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet.

In Kapitel 5 erfolgt die Erarbeitung und Vorstellung dreier Lösungsansätze unter der Zielstellung, diese drei, in Kapitel 4 genannten, wesentlichen Nachteile zu beseitigen und somit einen kosteneffizienten Durchpolierprozess für Asphären zu ermöglichen. Eine Gegenüberstellung der Ansätze sowie anschließende Bewertung anhand festgelegter Kriterien dient der Ermittlung charakteristischer Vor- und Nachteile. Ergebnis dieses Abschnitts ist der präferierte Lösungsansatz der Politur mittels eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeugs. Die Erfüllung aller damit verbundener technologischer Anforderungen und Randbedingungen wie die Realisierung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs, die Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts, die Maschinenintegration, die Maschinenjustage sowie die Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts bilden Schwerpunkte des weiteren Verlaufs der Arbeit.

Die nachfolgende systematische Entwicklung vom Lösungsansatz zum ausgestalteten Konstruktionsentwurf beschreibt Kapitel 6. Zur Senkung des Entwicklungsrisikos und des konstruktiven Aufwands wird das zu entwickelnde Polierwerkzeug in eine bestehende und bekannte Maschinenbasis aus der Sphärenpolitur<sup>3</sup> integriert. Die Erarbeitung erfolgt in Anlehnung an den Konstruktiven Entwicklungsprozess (KEP), einen mehrphasigen Leitfaden der Ilmenauer Konstruktionslehre. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der schrittweisen Einschränkung des Lösungsraums in mehreren Abstraktionsstufen. So werden je Abstraktionsstufe Varianten technischer Lösungen erarbeitet, auf Prinzipbasis skizziert und beschrieben. Nachfolgende Vergleiche und Bewertungen der Lösungen erlauben eine sukzessive Konkretisierung des Ansatzes eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs.

Eine weitere Teilaufgabe, obgleich geringerer Komplexität, besteht in der Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts. Die Erarbeitung des Lösungsraums sowie dessen anschließende systematische Einschränkung vollzieht sich analog des zu entwickelnden Polierwerkzeugs. Als Ergebnis steht das Technische Prinzip einer in Richtung der Rotationsachse geführten und translatorisch nachgiebigen Ringschneide. Der gewählte Ansatz unterscheidet sich hinsichtlich seiner Eigenschaften grundlegend von bekannten Lösungen aus der Politur von Sphären, Asphären und Freiformoptiken. Mit den bevorzugten Technischen Prinzipien zu beiden Teilaufgaben schließt die Prinzipphase ab.

---

<sup>3</sup> Diese Maschinenbasis nutzt die Synchrospeed-Kinematik und entspricht dem aktuellen Stand der Technik.

Die darauf aufbauende Gestaltungsphase nimmt eine Konkretisierung der jeweils erarbeiteten Lösungsansätze vor und überführt diese in einen Gestaltungsplan. Zur Senkung der Aufgabenkomplexität werden funktionsrelevante Schlüsselstellen des Werkzeugaufbaus sowie der Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts vorab separat diskutiert und bewertet. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Vorstellung je eines Konstruktionsentwurfs für beide Teilaufgaben.

Kapitel 7 behandelt den Aufbau, die Justage und die Inbetriebnahme des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. Schwerpunkt der Betrachtung liegt dabei auf der Ermittlung prozessrelevanter Lage- und Positionierfehler. Für die Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts wird eine geeignete Vorgehensweise unter Nutzung invarianter und innozenter Anordnungen vorgestellt und diskutiert. Mit einer Definition für den Verfahrensnachweis einzustellender Prozessparameter schließt die Vorbereitung und Inbetriebnahme ab.

Die Politur mit vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugen ist Schwerpunkt des 8. Kapitels. Im Rahmen des Verfahrensnachweises wird die Wirksamkeit des Verfahrens durch die vollaperturige Politur einer feingeschliffenen Probeteilgeometrie belegt. Eine Analyse des Abtragsprofils dient dabei dem Rückschluss auf das Abtragsverhalten des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. In einer nachfolgenden Betrachtung der Einflussgrößen flächiger Polierprozesse wird die Änderung des Abtragsprofils bei einer Variation der Poliermittelträgerbelegung, einer Änderung des Drehzahlverhältnisses von Werkstück zu Werkzeug sowie einem Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks untersucht. Eine Analyse charakteristischer Gestaltabweichungen für die Politur mit vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeugen dient dem direkten Vergleich mit der Referenztechnologie des Bonnet Polishing. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Abschätzung der erreichbaren Bearbeitungszeitverkürzung sowie eine Analyse des mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug bearbeitbaren Produktspektrums.

Die vorliegende Arbeit schließt im 9. Kapitel mit einer Zusammenfassung geleisteter Arbeiten und betrachteter Inhalte. Weiterhin werden Ansätze und Vorschläge für weiterführende Entwicklungsaufgaben im Themenfeld der vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphärenflächen benannt.



### 3 Abgrenzung des Bearbeitungsfeldes

Diese Arbeit erfordert eine klare Abgrenzung des Bearbeitungsfeldes. Die in der Zielstellung formulierte Beschränkung auf die Entwicklung kosteneffizienter Fertigungstechnologien für rotationssymmetrische Asphären bedarf einer weiteren Einschränkung zu leistender Inhalte. Ziel der Arbeit kann es folglich nicht sein, die gesamte Prozesskette zur Herstellung rotationssymmetrischer Asphären in all ihren Schritten weiterzuentwickeln. Vielmehr zielt diese Arbeit auf die Analyse des Istzustands sowie der darauf aufbauenden Ableitung erforderlicher Aktivitäten und deren Umsetzung für eine kostengünstige Fertigung asphärischer Optikkomponenten ab. Weitere inhaltliche Einschränkungen erfolgen im Rahmen des jeweiligen Abschnitts.

Ferner dient dieses Kapitel der Vorstellung wesentlicher Klassifikationsmöglichkeiten technischer Optiken sowie der Einführung und Definition zentraler Begriffe. Den Abschluss bildet die Vermittlung erforderlicher Grundlagen sowie der Verweis auf weiterführende Literatur.

#### 3.1 Klassifikationsmöglichkeiten technischer Optiken

Im Folgenden sollen drei gängige Kriterien zur Klassifizierung optischer Bauelemente als auch optischer Systeme vorgestellt werden. Weitere Möglichkeiten zur Einordnung bilden keinen Schwerpunkt dieser Arbeit.

##### 3.1.1 Nach Art der optischen Funktion

Optische Bauelemente und Systeme lassen sich als Black Box zur Änderung der Eigenschaften von Licht modellieren. [Kra00] sowie [Nau14] bieten eine prägnante Zusammenfassung zur Klassifizierung optischer Bauelemente nach Art ihrer optischen Funktion. So dienen diese:

1. Der Strahlableitung durch **Brechung** oder **Reflexion** mit Hilfe von Einzellinsen, Kittgliedern (verkittete Linsengruppen), Prismen und Spiegeln unterschiedlicher Form (plan, sphärisch, asphärisch, freiform);
2. Der Intensitäts-, Phasen- und Richtungsänderung durch **Absorption**, **Polarisation**, **Streuung** und **Beugung** mit Hilfe von Mattscheiben, Filtern, Trübgläsern, Polarisatoren, diffraktiven optischen Elementen (DOE), Dispersions- und Polarisationsprismen sowie Reflexions- und Transmissionsgittern;
3. Als Träger von Zeichen und Marken durch Fadenkreuze, Skalen, Maßstäbe, Nonien, Strichplatten und Teilkreisen;

4. Als Hüll- und Schutzfunktion durch Küvetten und Abdeckgläser;
5. Als Begrenzung des Lichtquerschnitts durch Blenden mit unterschiedlichen Querschnitten (rund, eckig, sektor- und spaltförmig).

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die Herstellung optischer Bauelemente zur Strahlableitung durch Brechung. Das parallele Auftreten parasitärer Absorptions-, Polarisations- und Streueffekte sei im weiteren Verlauf vernachlässigt.

### 3.1.2 Nach Geometrie der optisch wirksamen Fläche

Die nachfolgende Klassifizierung technischer Optiken nimmt Bezug auf optische Bauelemente zur Strahlableitung durch Brechung oder Reflexion (vgl. Kap. 3.1.1). Die Geometrie der optisch wirksamen Fläche oder eines Bereichs der optisch wirksamen Fläche wird in erster Linie durch die zu leistende optische Wirkung des Bauelements oder eines Bereichs des Bauelements bestimmt. Diese kann:

1. Konvergent (sammelnd);
2. Divergent (zerstreuend);
3. Neutral (keine Änderung)

sein. Die Erfüllung der optischen Wirkung setzt die mechanische Stabilität sowie Herstellbarkeit des optischen Elements voraus, dessen geometrisch stoffliche Auslegung Aufgabe des Optikdesigns ist.

Reflektive optische Elemente zeichnen sich durch mindestens eine optisch wirksame Fläche aus, wohingegen brechende Optikkomponenten in der Regel über zwei<sup>4</sup> optisch wirksame Flächen verfügen.

Zur Beschreibung der Geometrie optischer Bauelemente sind die folgenden fünf Oberflächenformen geläufig:

- (1) **Sphäre:** Die optisch wirksame Oberfläche besitzt die Oberflächengeometrie eines Kugelausschnitts (konvex), beziehungsweise der Inversen eines Kugelausschnitts (konkav). Die Beschreibung erfolgt nach [DIN10110-1] anhand des Krümmungsradius mit  $R = +/- .. \text{ mm}$ .
- (2) **Planfläche:** Eine Planfläche stellt einen Sonderfall der sphärischen Oberflächengeometrie mit einem Krümmungsradius von unendlich dar. Die Beschreibung erfolgt nach [DIN10110-1] analog sphärischer Oberflächen mit  $R = \infty$ .

---

<sup>4</sup> Kittglieder wie Achromate (Zweifachkittglieder) und Apochromate (Dreifachkittglieder) besitzen drei bzw. vier optisch wirksame Flächen.

- (3) **Rotationssymmetrische Asphäre:** Die Oberflächengeometrie weicht von der Sphärenform ab und setzt sich in ihrer mathematischen Beschreibung aus einem Kugelschnitt (vgl. Kap. 3.3: sphärischer Ersatzradius), einer Kegelschnittkonstante sowie quadratischen Polynomen zusammen. [DIN10110-12] bezeichnet diese als „Elemente mit einer symmetrischen Asphäre mit zusammenfallenden mechanischen und optischen Achsen“. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll dafür der Kürze halber die Bezeichnung **rotationssymmetrische Asphäre** genügen, sich jedoch auf die Beschreibung nach Norm beziehen.
- (4) **Off-axis Asphäre:** Die Oberflächengeometrie beschreibt einen Ausschnitt, respektive ein Segment einer rotationssymmetrischen Asphäre, bei der mechanische Bezugsachse und optische Achse nicht in Fluchtung sind. Die vollständige Bezeichnung nach [DIN10110-12] adressiert „Elemente mit einer symmetrischen Asphäre mit nicht zusammenfallenden mechanischen und optischen Achsen“, nachfolgend vereinfacht **off-axis Asphäre** genannt.
- (5) **Nichtrotationssymmetrische Asphäre:** Die optisch wirksame Oberfläche verfügt über Achssymmetrie in mindestens einem Hauptschnitt parallel zur optischen Achse. Die sich ergebenden Symmetrieachsen fallen dabei mit der mechanischen Bezugsachse zusammen. [DIN10110-12] verwendet die Bezeichnung „Teile mit nichtrotationssymmetrisch sphärischen Oberflächen“. Im Folgenden soll diese Oberflächengeometrie eine vereinfachte Bezeichnung als **nichtrotationssymmetrische Asphäre** erhalten.
- (6) **Freiformfläche:** Der im allgemeinen Sprachgebrauch geläufige Begriff der optischen Freiformfläche adressiert optisch wirksame Flächen, welche in der Regel keine Rotationssymmetrie und keine Achssymmetrie besitzen. Die mathematische Beschreibung erfolgt mittels Punktwolken, Polygonnetzen, etc. Genauer betrachtet lässt sich jede der unter (1) bis (5) beschriebenen Oberflächengeometrien als Sonderform einer optischen Freiformfläche bezeichnen und auf gleichem Wege mathematisch beschreiben. So stellen beispielsweise rotationssymmetrische Asphären eine Freiformfläche mit fluchtender optischer Achse und mechanischer Bezugsachse dar. [DIN10110-19] vermeidet den Begriff Freiformfläche und wählt stattdessen die Bezeichnung ‘generalisierte Fläche’. Off-axis Asphären (vgl. (4)) sowie nichtrotationssymmetrische Asphären (vgl. (5)) werden während der Herstellung und Prüfung in der Regel wie optische Freiformflächen behandelt, da sich ihre Beschreibung, Referenzierung und Tolerierung dadurch komfortabler gestaltet. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit bildet diese Art

optisch wirksamer Flächen keinen Schwerpunkt. Weiterhin soll aus Gründen einfacher Nachvollziehbarkeit der etablierte Begriff **optische Freiformfläche** Anwendung finden.

Ausführliche Informationen zur Einordnung, Beschreibung, Referenzierung und Tolerierung von Freiformflächen bietet [DIN10110-19].

Der Betrachtungsschwerpunkt/Fokus im Rahmen dieser Arbeit liegt auf den rotationssymmetrischen Asphären nach (3).

### 3.1.3 Genauigkeitsklassen optischer Systeme

Neben der Einteilung nach optischer Funktion (vgl. Kap. 3.1.1) sowie der Geometrie optisch wirksamer Flächen (vgl. Kap. 3.1.2) sind Klassifizierungen optischer Systeme anhand charakteristischer Systemeigenschaften möglich und üblich. So zum Beispiel nach Anwendungsbereich<sup>5</sup>, Durchmesser, Preis, Stückzahl und Systemkomplexität, um nur einige zu nennen.

Qualitätskriterium eines optischen Bauelements, eines Subsystems oder eines Gesamtsystems ist die damit zu erzielende Abbildungsleistung. Diese legt zulässige Gestaltabweichungen sowie Lagetoleranzen fest und ist ausschlaggebend für alle Prozessschritte der Entwicklung, Fertigung und Montage. Anforderungen an zur Anwendung kommende Herstell- und Montagetechnologien als auch Prüftechnik lassen sich daraus direkt ableiten. So entwickelten sich im vergangenen halben Jahrhundert drei wesentliche Genauigkeitsklassen technischer Optiken, deren Klassifizierung zum einen anhand zulässiger Gestaltabweichungen/Lagetoleranzen und zum anderen anhand erforderlicher Fertigungsmesstechnik erfolgt. Diese sollen im Folgenden vorgestellt werden.

#### ZULÄSSIGE GESTALTABWEICHUNGEN

[Fra06] schlägt Zahlenwerte für eine Abgrenzung der Genauigkeitsklassen anhand zulässiger Gestaltabweichungen sowie Toleranzen vor und hinterlegt jede Klasse mit typischen Losgrößen, Durchmessern und Anwendungsgebieten (vgl. Tab. 1). Diese Einteilung anhand definierter Zahlenwerte erlaubt eine vom Stand der Technik unabhängige Einordnung technischer Optiken. Volumenoptiken<sup>6</sup> erfahren in dieser Gegenüberstellung keine Betrachtung.

---

<sup>5</sup> Und damit auch vorherrschende Umweltbedingungen wie Atmosphäre, Druck, Temperatur, Feuchtigkeit und Sauberkeit.

<sup>6</sup> Ein typisches Beispiel aus dem Automotive Bereich sind asphärische Linsen für Xenon Scheinwerfer.

Tab. 1: Genauigkeitsklassen optischer Systeme nach [Fra06]

	Mittelklasseoptik	Hochleistungs- optik	Höchstleistungs- optik
<b>Passfehler [<math>\lambda</math>]</b>	> 1/10	1/10 .. 1/20	< 1/20
<b>Luftabstandstoleranz [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	> 5	1 .. 5	< 1
<b>Zentriertoleranzen [arcsec RFK<sup>8</sup>]</b>	> 2	0,2 .. 2	< 0,5
<b>Anwendungsgebiete</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotografie</li> <li>• Digitale Projektion</li> <li>• Zielfernrohre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikroskopie</li> <li>• Waferinspektion</li> <li>• Vermessungstechnik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Halbleiterlithografie</li> </ul>
<b>typische Linsendurchmesser [mm]</b>	5 .. 50	5 .. 300	10 .. 300
<b>typische Losgröße [Stück]</b>	> 100	5 .. 20	1 .. 10

Diese Art der Klassifizierung zielt auf gefasste optische Bauelemente, Subsysteme, bis hin zu kompletten optischen Systemen ab. Sie ist für die alleinige Klassifizierung ungefasster Optikkomponenten nicht anwendbar.

## ERFORDERLICHE FERTIGUNGSMESSTECHNIK

Eine weitere Klassifikationsmöglichkeit technischer Optiken bietet die im Fertigungsumfeld geläufige Einteilung in Geräte- und Präzisionsoptik, selten ergänzt durch die Klasse der Ultrapräzisionsoptik. Diese Klassifizierung beschränkt sich auf einzelne, ungefasste optische Bauelemente und besitzt aufgrund des Fehlens konkreter Zahlenwerte eine direkte Abhängigkeit vom aktuellen Stand der Technik.

Unterscheidungsmerkmal ist die in den Herstellprozessen erforderliche Messtechnik. In Abhängigkeit zulässiger Gestaltabweichungen (definiert durch die geforderte Abbildungsleistung) kommen taktile und optische Messmittel zum Einsatz. [Sch14a]

Die Genauigkeitsklasse der Geräteoptik erlaubt Gestaltabweichungen der optischen Bauelemente im einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich. Die Verwendung von

<sup>7</sup> Bei einer Wellenlänge von 546,07nm (grüne Quecksilberlinie: e-Linie).

<sup>8</sup> Die Relative FlächenKippung (RFK) beschreibt den eingeschlossenen Winkel zwischen optischer Achse einer Einzelfläche und gewählter Bezugsachse. Die optische Achse definiert sich dabei über den Krümmungsmittelpunkt der Fläche sowie der dazugehörigen Flächennormalen im Scheitel. [Fra06]

Koordinatenmessmaschinen als (taktile) Messmittel bietet sich an dieser Stelle aufgrund ihrer Flexibilität, ihrer kurzen Rüst-, Programmier- und Messzeiten sowie ihrer für diese Genauigkeitsklasse hinreichenden Messunsicherheit besonders an. Die Genauigkeitsklasse ist mit der von [Fra06] definierten Mittelklasseoptik vergleichbar.

Höherwertige Optikkomponenten mit zulässigen Gestaltabweichungen kleiner als die Messunsicherheit taktile Messmittel sind der Genauigkeitsklasse der Präzisionsoptik zuzuordnen. Deren Prüfung erfolgt optisch mittels Twyman-Green Interferometer. Zulässige Gestaltabweichungen liegen hierbei in der Regel unter  $1\mu\text{m}$ . Diese Genauigkeitsklasse ist mit der Klasse der Hochleistungsoptik nach [Fra06] vergleichbar.

Obgleich die zur Anwendung kommenden Messmittel identisch sind, bildet die Ultrapräzisionsoptik eine weitere Genauigkeitsklasse. Eine Abgrenzung zur Präzisionsoptik erfolgt – wenn auch nicht zufriedenstellend definiert – anhand des Anwendungsgebietes der optischen Bauelemente. So werden Ultrapräzisionsoptiken ausschließlich der Halbleiterlithografie zugeordnet.

## 3.2 Grundlagen

Zur besseren Nachvollziehbarkeit des im Rahmen dieser Arbeit behandelten Ansatzes vollaerturiger, aktiv-adaptiver Polierwerkzeuge ist die Kenntnis einer Reihe technischer Grundlagen erforderlich. Dieser Abschnitt soll der komprimierten Darstellung wichtiger Zusammenhänge und Konventionen dienen.

### 3.2.1 Vor- und Nachteile sphärischer sowie asphärischer Optiken

Sphärische Optikkomponenten, Asphären und Freiformoptiken<sup>9</sup> unterscheiden sich wesentlich in ihrer Gestalt, in den zur Anwendung kommenden Fertigungs- und Montageverfahren als auch in anwendungsspezifischen Vor- und Nachteilen.

So ist die gesamte Fertigungstechnologie sphärischer Optikkomponenten (und Systeme) aufgrund ihrer Historie hoch entwickelt und optimiert. Spätestens seit Erfindung des holländischen Fernrohrs um 1608 bestand der Wunsch nach Fertigungs- und Montagetechnologien zur Herstellung optischer Systeme mit sphärischen Optikkomponenten, welche eine kommerzielle Vermarktung ermöglichen [Rie90]. Bis zu den heute etablierten Fertigungsmaschinen und Prozessen verstrichen über 400 Jahre mehr oder minder stark vorangetriebener

---

<sup>9</sup> Freiformoptiken seien an dieser Stelle aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt. Der Vergleich sieht keine Betrachtung derer Eigenschaften vor.

Entwicklung. Heutige Fertigungstechnologien zur Herstellung sphärischer Optiken zeichnen sich im Wesentlichen durch technologisch beherrschte und stabile Verfahren, tiefgründiges Prozessverständnis sowie handhabbare und robuste Messverfahren aus. Diese erlauben eine effiziente, reproduzierbare und damit kostengünstige Fertigung. So liegen die Herstellkosten eines sphärischen optischen Bauelements nach aktuellem Stand bei etwa 1/10 einer qualitativ vergleichbaren rotationssymmetrischen Asphäre. Fassungstechnik [Son11] und Montagetechnologien [Fra06] entwickelten sich parallel zu den stetig steigenden Gestaltanforderungen an die sphärischen Optikkomponenten. Sie ermöglichen aus heutiger Sicht einen kostengünstigen Aufbau optischer Hochleistungssysteme.

Dennoch besitzen sphärische Optikkomponenten aufgrund ihrer sphärischen Aberration<sup>10</sup> einen wesentlichen Nachteil gegenüber Asphären und Freiformoptiken. Eine Korrektur dieses Fehlers erfordert den Einbau zusätzlicher optischer Bauelemente (sphärische Korrekturlinsen), welche jedoch die Komplexität des optischen Systems steigern.

Der Einsatz asphärischer Optikkomponenten erlaubt bei korrekter Auslegung des optischen Systems in monochromatischen Anwendungen die Einhaltung des Fermat'schen Prinzips – die Abbildung ist dadurch frei von Öffnungsfehlern. Damit einhergehende Einsparungen sphärischer Korrekturlinsen ermöglichen eine Vereinfachung des optischen Designs. Die reduzierte Anzahl optischer Bauelemente führt wiederum zu einer Erhöhung des Transmissionsgrades, einer Vereinfachung des mechanischen Aufbaus<sup>11</sup>, einer Verringerung des konstruktiven Aufwands sowie zu einer Verkürzung der Toleranzkette für Montage und Justage des optischen Systems. Der damit einhergehende geringere Bauraumbedarf erlaubt eine kompaktere Bauweise, eine geringere Systemmasse und verbessert damit die Handlichkeit.

Die anfallenden Herstellkosten bilden aus heutiger Sicht die einzige Einstiegschürde für den breiten Einsatz asphärischer Optikkomponenten.

---

<sup>10</sup> Eine ausführliche Definition sowie mathematische Beschreibung der sphärischen Aberration bietet [Haf02].

<sup>11</sup> Jedes optische Bauelement wird in der Regel durch eine Fassung unmittelbar gefasst. Zusätzlich zu der geringeren Anzahl zu fertigender Mechanikteile entfallen eine Reihe nachfolgender Prozessschritte zur Herstellung der Fluchtung zwischen optischer Achse und mechanischer Referenzachse der Fassung (durch Richtkleben und/oder Justierdrehen). [Fra06]; [Kra04]; [Sch12]; [The07]

### 3.2.2 Kenngrößen und Beschreibung optischer Bauelemente

Die Beschreibung<sup>12</sup> der Beschaffenheit sowie Tolerierung sphärischer Optikkomponenten sowie Asphären regelt die Normenfamilie der DIN10110<sup>13</sup>. Sie dient als Grundlage zur Anfertigung technischer Einzelteilzeichnungen optischer Bauelemente und soll Diskussionsgegenstand dieses Abschnitts bilden. Die Beschreibung zulässiger Fehler erfolgt anhand einer Beispielgeometrie (vgl. Abb. 1) unter Einschränkung auf für die Politur relevante Angaben.

Die Beschreibung optischer Freiformelemente regeln die [DIN58174] sowie die [DIN10110-19], auf welche an dieser Stelle verwiesen sei.

#### ANGABEN ZULÄSSIGER FEHLER

- 0/ **Spannungsdoppelbrechung:** Nicht relevant für Poliertechnologien, da vom Schmelzprozess sowie der verwendeten Fassungstechnik abhängig.
- 1/ **Blasen- und Einschlüsse:** Nicht relevant für Poliertechnologien, da vom Schmelzprozess abhängig.
- 2/ **Inhomogenitäten und Schlieren:** Nicht relevant für Poliertechnologien, da vom Schmelzprozess abhängig.
- 3/ **Passfehler:** Relevant für Poliertechnologien. Der Passfehler, im Fertigungsumfeld auch als ‘Passe’ bezeichnet, beschreibt nach [DIN10110-5] die Oberflächenformabweichung der Prüffläche von der theoretischen Sollfläche, gemessen senkrecht zur theoretischen Sollfläche. Die Angabe erfolgt in Interferenzstreifen oder als Peak-to-Valley (PV) Wert. Eine der wesentlichen Zielstellungen für das Durchpolieren/Vorpolieren sphärischer Optikkomponenten, Asphären als auch optischer Freiformelemente besteht in deren Formerhaltung. In Abhängigkeit des zulässigen Passfehlers sowie der zur Anwendung kommenden Poliertechnologie ist eine Korrekturpolitur ab der Genauigkeitsklasse der Präzisionsoptik üblich.

---

<sup>12</sup> Grundlagen zur Beschreibung und Definition optischer Abbildungen/geometrischer Optik bieten [DIN1335] sowie [DIN58189].

<sup>13</sup> Diese umfasst die Teile 1 – 14 sowie 19, wobei im Rahmen dieser Arbeit die Teile [DIN10110-1]; [DIN10110-5]; [DIN10110-6]; [DIN10110-7]; [DIN10110-8] sowie [DIN10110-12] herangezogen werden.



Oberflächen in Fluchtung zu bringen. Abweichungen vom Idealzustand werden bei rotationssymmetrischen Asphären als innerer Zentrierfehler bezeichnet. Dieser zieht sich durch die gesamte Herstellkette asphärischer Optikkomponenten und ist entsprechend der Zentriertoleranz einzustellen.

- 5/ **Oberflächenfehler:** Relevant für Poliertechnologien. Die Angabe legt nach [DIN10110-7] die Anzahl und Größe zulässiger lokaler Fehler in Form von Oberflächenfehlern<sup>14</sup>, Kratzern mit einer Länge von  $> 2\text{mm}$  sowie Randaussprüngen fest, unabhängig davon, ob diese Fehler während oder nach der Fertigung entstanden sind.

Für die Politur sphärischer Optikkomponenten als auch Asphären spielen Oberflächenfehler aus Prozesssicht eine wichtige Rolle. Sie sind im Rahmen dieser Arbeit für die Auslegung des hydrodynamischen Systems<sup>15</sup> zu betrachten.

- 6/ **Oberflächengüte, Rauheit und Welligkeit:** Relevant für Poliertechnologien. Die Oberflächengüte wird nach [DIN10110-8] anhand statistischer Verfahren spezifiziert und bezieht sich auf globale Oberflächenfehler – mit Fokus auf polierte Flächen. Lokale Oberflächenfehler beschreibt 5/ (siehe oben). Eine generelle Unterscheidung zwischen mittleren Ortsfrequenzen (Welligkeit) und hohen Ortsfrequenzen erfolgt nach [DIN10110-8] anhand ihrer Wirkung auf die optische Abbildungsleistung. Tiefenschädigungen<sup>16</sup> (vgl. Kap. 4.2.2 Vorschleifen, Feinschleifen und Feinstschleifen) in der Größenordnung oder größer der in der Zielanwendung verwendeten Lichtwellenlänge sind der Welligkeit zugeordnet. Diese besitzen eine starke Streuwirkung und treten typischerweise als Folge von Schleifbearbeitungen und Ätzen auf. Die Rauheit bildet nach [DIN10110-8] ein wesentliches Qualitätskriterium für die Politur von sphärischen Optikkomponenten als auch Asphären. Die anzuwendenden Prüfmethoden und Messverfahren beschreiben [DIN10110-5] sowie [DIN10110-12].

---

<sup>14</sup> Diese umfassen Kratzer mit einer Länge von  $\leq 2\text{mm}$ , Löcher, angeschnittene Blasen, Haarrisse, Wischer, Glockenabdrücke durch Ringschneiden sowie lokale Belagfehler entsprechend [DIN10110-7].

<sup>15</sup> Dies umfasst den in Abhängigkeit der Werkstückgeometrie einzustellenden Flächeninhalt der Kontaktzone, den Polierdruck, die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück sowie die Auswahl von Poliermittelträger und Poliermittel.

<sup>16</sup> Engl. SubSurface Damage (SSD), im Deutschen alternativ als Störtiefe oder Störstrukturetiefe bezeichnet. Die Tiefenschädigung ist ein Maß der Mikrorisstiefe auf der Werkstückoberfläche. Die Angabe erfolgt in  $[\mu\text{m}]$ .

Im Rahmen dieser Arbeit ist eine separate, die Norm ergänzende Betrachtung und Klassifizierung der durch den Poliervorgang hervorgerufenen mittel- und hochfrequenten Gestaltabweichungen vorzunehmen. Diese dient der besseren Beschreibbarkeit der im Polierprozess erzielten Ergebnisse (vgl. Kap. 3.2.3).

## ALLGEMEINES

Die zeichnerische Darstellung optischer Bauelemente erfolgt entsprechend [DIN10110-1]. Für die zu entwickelnde Poliertechnologie besitzt diese keinerlei Relevanz und soll daher keinen Inhalt dieser Arbeit bilden.

### 3.2.3 Gestaltabweichungen

Nach [DIN4760] sind Gestaltabweichungen als die Gesamtheit aller Abweichungen der Istgestalt<sup>17</sup> von der geometrischen Gestalt<sup>18</sup> zu verstehen. Die Istgestalt repräsentiert hierbei das messtechnisch ermittelte und fehlerbehaftete Abbild der wirklichen/realen Gestalt. Unterschiedliche Messmittel, Messverfahren sowie Mess- und Umgebungsbedingungen führen zwangsläufig zu Unterschieden in der Geometrie der Istgestalt. Die geometrische Gestalt stellt hingegen die ideale Oberfläche in ihrer Nennform dar. Das in der Norm vorgeschlagene sechsstufige Ordnungssystem (vgl. Tab. 2) erlaubt eine Beschreibung der Oberfläche des Prüflings durch Überlagerung der Gestaltabweichungen 1. .. 4. Ordnung sowie eine Beschreibung dessen stofflicher Zusammensetzung anhand Gestaltabweichungen der 5. und 6. Ordnung.

Die Klassifizierung nach Norm basiert auf prozessbedingt auftretenden Gestaltabweichungen während der spanenden Bearbeitung metallischer Werkstoffe, in der Regel zur Herstellung von Mechanikteilen/mechanischen Bauelementen. Jede Gestaltabweichung der Ordnung 1 .. 4 deckt ein spezifisches Ortsfrequenzband ab, sodass eine direkte Zuordnung des vorliegenden Formfehlers möglich ist. Für die Bearbeitung optisch wirksamer Oberflächen<sup>19</sup> finden andere Fertigungsprozesse als für Mechanikteile Anwendung. Entsprechend unterscheiden sich die prozessbedingt typischen Ortsfrequenzen, sodass das Ordnungssystem nach [DIN4760] zur Beschreibung nur bedingt geeignet ist.

---

<sup>17</sup> Nach [DIN4760] als Istoberfläche bezeichnet.

<sup>18</sup> Nach [DIN4760] als geometrische Oberfläche bezeichnet.

<sup>19</sup> Die Werkstücke bestehen in der Regel aus sprödhart brechenden Werkstoffen.

Tab. 2: Ordnungssystem der Gestaltabweichungen nach [DIN4760]

Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungs- ursache
<b>1. Ordnung: Formabweichungen</b> 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheitsabweichung, u.a.	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung Maschine/Werkstück, falsche Einspannung des Werkstücks, Härteverzug, Verschleiß
<b>2. Ordnung: Welligkeit</b> 	Wellen (siehe DIN 4761)	Außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeugs
<b>3. Ordnung: Rauheit</b> 	Rillen (siehe DIN 4761)	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeugs
<b>4. Ordnung: Rauheit</b> 	Riefen Schuppen Kuppen (siehe DIN 4761)	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschnaide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
<b>5. Ordnung: Rauheit</b> <u>Anmerkung:</u> nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
<b>6. Ordnung:</b> <u>Anmerkung:</u> nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffs	
Die dargestellten Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung überlagern sich in der Regel zu der Istoberfläche. Beispiel: 		

### Randbemerkungen:

- Eine tiefgründige Auseinandersetzung mit der Problematik der messtechnischen Erfassung von Gestaltabweichungen soll keinen Schwerpunkt dieser Arbeit bilden. Es sei an dieser Stelle jedoch auf die Herausforderungen und Zielkonflikte dieser Thematik verwiesen.

- Das in der Theorie verfolgte Ziel, dass Istoberfläche und wirkliche Fläche identisch sind, erfordert eine vollständige, ortsaufgelöste<sup>20</sup> Beschreibung der zu charakterisierenden Oberfläche im gesamten Ortswellenlängenbereich von  $0 < \lambda < \infty$ . Die Erfüllung dieses theoretischen Anspruchs ist in der Praxis nicht möglich. In der Realität erfolgt eine Einschränkung auf messbare und für die Funktion relevante Ortsfrequenzbereiche, unter der Annahme einer isotropen Verteilung vorliegender Gestaltabweichungen. Die vollständige Erfassung der Gestaltabweichungen 1. .. 4. Ordnung nach [DIN4760] kann nicht durch ein Messverfahren geleistet werden. Limitierend wirken hierbei die maximale Messpunktdichte<sup>21</sup> (MPD), das begrenzte Messfeld<sup>22</sup>, die begrenzte Auflösung<sup>23</sup> sowie verfahrenstypische Störsignale, welche die Verwendung von Filtern erfordern. Der Einsatz von Filtern führt jedoch zwangsläufig zu Informationsverlust. Daher werden in der Realität geeignete Kombinationen unterschiedlicher Messverfahren angewendet.
- Erhobene Messinformationen erfordern geeignete Auswerteverfahren zur Rückführbarkeit und Interpretation. Für Mechanikteile existieren Form- und Lageabweichungen<sup>24</sup> zur Beschreibung von Gestaltabweichungen 1. Ordnung entsprechend [DIN4760]. Gestaltabweichungen höherer Ordnung (2. .. 4.) werden durch eine Reihe nach [DIN4287] definierter Rauheitskenngrößen beschrieben. Dazu zählen der arithmetische Mittenrauwert ( $R_a$ ), der quadratische Mittenrauwert ( $R_q$ ), die Rautiefe ( $R_z$ ), der quadratische Mittenwert der Welligkeit ( $W_q$ ) sowie weitere, selten verwendete Kenngrößen [Jun12]; [DIN4287]. Für die Beschreibung optischer Oberflächen existieren diverse zusätzliche Kenngrößen.

---

<sup>20</sup> Ortsaufgelöst, da vorliegende Gestaltabweichungen aufgrund verwendeter Fertigungstechnologien eine anisotrope Verteilung auf der zu beschreibenden Oberfläche besitzen.

<sup>21</sup> Die Messpunktdichte beschreibt die Anzahl der Messpunkte (MP) je Längeneinheit, senkrecht zur Messrichtung in [MP/mm]. Für taktile Messverfahren limitieren der Tastkugeldurchmesser und/oder die Messpunktdichte die erfassbare Ortsfrequenz nach oben (Grenzfrequenz).

<sup>22</sup> Das Messfeld begrenzt den innerhalb einer Messung erfassbaren Oberflächenausschnitt des Prüflings. So erfasst ein Atomic Force Microscope (AFM) beispielsweise ein kleineres Messfeld als eine Koordinatenmessmaschine (KMM).

<sup>23</sup> Die Auflösung stellt nach [DIN1319-1] die Fähigkeit eines Geräts zur Trennung (kleinster wahrnehmbarer Unterschied) zweier physikalischer Größen gleicher Dimension dar.

<sup>24</sup> Beispiele für Form- und Lageabweichungen sind Parallelitäts-, Ebenheits- und Rundlaufabweichungen, etc. Deren Definition und Angabe erfolgt nach [DIN1101]; [DIN8015] sowie [DIN7167].

Dazu zählen die Zernike Polynome, der Passfehler (vgl. Kap. 3.2.2), der quadratische Mittenrauwert ( $R_q$ ) nach [DIN10110-8] (vgl. Kap. 3.2.2), die Power Spectral Density (PSD), der Anstiegsfehler (engl. Slope-Error) sowie die Peak-to-Valley (PV) Angabe. Diese Kenngrößen unterliegen aktuell keinem Ordnungssystem zur Beschreibung von Gestaltabweichungen und werden mehr oder minder willkürlich in der Prüfung von Optikkomponenten eingesetzt. Weiterführende Informationen und detaillierte Betrachtungen zur Thematik bieten [Dup02]; [You13]; [Bie10] sowie [Fil13].

In Ermangelung präziserer Definitionen sollen im Rahmen dieser Arbeit drei Klassen von Gestaltabweichungen zur Bewertung optischer Oberflächen eingeführt werden, welche nachfolgend definiert sind.

Im Idealfall sollten die Klassen zur Beschreibung der Gestaltabweichungen optischer Bauelemente jeweils in Abhängigkeit der zur Anwendung kommenden Lichtwellenlänge, dem freien optischen Durchmesser der zu fertigenden, optisch wirksamen Oberfläche sowie der zulässigen Streuwirkung beschrieben werden [Fil13]. Der dafür erforderliche Aufwand steht jedoch in keinem Verhältnis zum praktischen Nutzen, sodass nachfolgend festgelegte Ortsfrequenzbänder zur Klassifizierung der Gestaltabweichungen genügen sollen.

## NIEDERFREQUENTE GESTALTABWEICHUNGEN

Unter der Bezeichnung niederfrequente Gestaltabweichungen sind isotrope, periodische Formabweichungen mit einer Periodenlänge  $\geq 5\text{mm}$  zu verstehen. Diese zählen nach [DIN4760] zu den Gestaltabweichungen 1. Ordnung und anteilig 2. Ordnung. Der aus der Beschreibung optischer Bauelemente unter 3/ definierte (ortsbasierte) Passfehler (vgl. Kap. 3.2.2) nach [DIN10110-5] umfasst niederfrequente Gestaltabweichungen. Weiterhin lassen sich PSD-Angaben zur Bewertung heranziehen. Die aus der mathematischen Beschreibung von Wellenfrontfehlern stammenden Zernike Polynome<sup>25</sup> lassen sich für freie optische Durchmesser  $\geq 2,5\text{mm}$  ebenfalls zur Bewertung niederfrequenter Gestaltabweichungen zuordnen. Voraussetzung hierfür ist, dass ausschließlich die zu prüfende optisch wirksame Oberfläche zur Bewertung herangezogen wird<sup>26</sup>.

<sup>25</sup> Die Zernike Polynome sind auf den niederländischen Physiker und Nobelpreisträger Frits Zernike (\* 1888, † 1966) zurückzuführen. Sie dienen der Klassifizierung und Bewertung von Wellenfrontfehlern. Dadurch hervorgerufene Abbildungsfehler lassen sich nachfolgend gezielt durch Justage (am gängigsten sind Fokus- oder Komamanipulation) reduzieren. [Mah13]

<sup>26</sup> Ausschluss der optischen Wirkung der Gegenfläche bei Optikkomponenten zur Strahl- ablenkung durch Brechung.

### MITTELFREQUENTE GESTALTABWEICHUNGEN

Isotrope periodische Gestaltabweichungen mit Periodenlängen  $0,5\text{mm} < \lambda < 5\text{mm}$  sind den Mittelfrequenten Gestaltabweichungen zuzuordnen. Im Englischen als ‘mid-spatial-frequency error’ (MSF error) bezeichnet, besitzt diese Fehlerklasse im Bereich der Optiktechnologien großen Einfluss auf die Abbildungsleistung optischer Systeme [Fil13]. Nach [DIN4760] sind diese den Fehlern 2. Ordnung: Welligkeit sowie den Fehlern 3. Ordnung: Rauheit zugehörig. Gängige Kenngrößen zur Beschreibung optisch wirksamer Oberflächen sind die PSD,  $W_q$  sowie der Feinpassfehler nach [DIN10110-5].

### HOCHFREQUENTE GESTALTABWEICHUNGEN

Die Klasse der hochfrequenten Gestaltabweichungen umfasst isotrope periodische Gestaltabweichungen mit Periodenlängen  $\lambda \leq 0,5\text{mm}$ . Entsprechend [DIN4760] zählen diese zur 4. Ordnung: Rauheit. Sie werden in Mechanik als auch Optik typischerweise über den arithmetischen ( $R_a$ ) sowie quadratischen Mittenrauwert ( $R_q$ ) beschrieben. Im Feld der Optik ist die Bewertung mittels PSD hierfür ebenfalls üblich.

Zur Bewertung hochfrequenter Gestaltabweichungen optisch wirksamer Oberflächen existieren weiterhin eine Reihe unternehmensspezifischer Kenngrößen – beispielsweise die Mikrorauheit 2,5x, die Mikrorauheit 40x, etc. Deren messtechnische Rand- und Auswertebedingungen sind nicht explizit vorgeschrieben, sodass diese Kenngrößen keine absoluten, sondern ausschließlich vergleichende Aussagen erlauben. Zur absoluten Bewertung hochfrequenter Gestaltabweichungen sollen diese daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Anwendung finden.

### 3.2.4 Preston Hypothese und Abtragsarbeit

Die Preston Hypothese ist auf den englischen Ingenieur Frank W. Preston (\* 1896, † 1989) zurückzuführen. Sie besagt, dass die Abtragshöhe im Polierprozess linear abhängig vom Polierdruck innerhalb der Kontaktzone (vgl. Kap. 3.3: Kontaktzone), der während der Bearbeitung überstrichenen Strecke sowie einer vorab experimentell bestimmten Preston Konstante<sup>27</sup> ist.

$$\Delta h = k * p \int v(t) dt \quad (1)$$

$\Delta h$  ... Abtragshöhe  
 $k$  ... Preston Konstante  
 $p$  ... Polierdruck  
 $v(t)$  ... Geschwindigkeit  
 $t$  ... Bearbeitungszeit

Weiterhin erlaubt die Berechnung der Abtragsarbeit nach Preston (vgl. Gl. 2) einen Vergleich unterschiedlicher Poliertechnologien hinsichtlich zu erwartender Bearbeitungszeiten.

$$W_a = \mu * A_K * p * \int v(t) dt \quad (2)$$

$W_a$  ... Abtragsarbeit  
 $\mu$  ... Reibzahl  
 $A_K$  ... Flächeninhalt Kontaktzone

Im weiteren Verlauf der Arbeit dienen sowohl die Preston Hypothese als auch die Abtragsarbeit als nützliche Werkzeuge zur frühzeitigen Bewertung erarbeiteter Lösungsansätze.

---

<sup>27</sup> Die Preston Konstante ist eine Zusammenfassung mehrerer, während des Polierprozesses als konstant angenommener Prozessparameter. Dazu zählen Glassorte (Material), Poliermittelsorte, Korngröße des Poliermittels, Viskosität des Poliermittels, Temperatur des Poliermittels, Art (und Porosität) des Poliermittelträgers, Dicke des Poliermittelträgers, Shore Härte des Poliermittelträgers sowie eine Vielzahl weiterer, unbekannter Prozessparameter.

### 3.3 Begriffe

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Definition von im weiteren Verlauf häufig verwendeten Begriffen. Deren klare Abgrenzung und Konkretisierung ihrer Bedeutungen fördern die Nachvollziehbarkeit getroffener Schlüsse und erleichtern das Verständnis.

#### **AKTIV/ADAPTIV**

Der Begriff **aktiv**<sup>28</sup> wird im allgemeinen Sprachgebrauch universell als Tatform, zur Beschreibung besonderer Wirksamkeit und in einer Reihe bedeutungsschwacher oder nicht klar definierter Beschreibungen verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit ist darunter die Funktionalität der gezielten Formänderung/Deformation des zu entwickelnden Werkzeugs zu verstehen. Der mechanische Aufbau des Werkzeugs erfordert dazu Funktionselemente, welche eine Längenänderung in mindestens einer Raumrichtung erlauben.

Hingegen zielt **adaptiv**<sup>29</sup> auf die Fähigkeit der Anpassung an veränderliche Randbedingungen sowie Zustände ab. Im allgemeinen Sprachgebrauch eher selten verwendet, umfasst der Begriff im Rahmen dieser Arbeit die Anpassungsfähigkeit des Werkzeugs gegenüber der Werkstückoberfläche. Der englische Begriff 'conformal' beschreibt diese Eigenschaft am trefflichsten, hingegen bietet die deutsche Bezeichnung ohne weitere Beschreibung viel Interpretationsspielraum.

#### **KONTAKTZONE, SUBAPERTURIG/VOLLAPERTURIG**

Die Kontaktzone beschreibt den örtlich begrenzten Bereich flächiger Berührung zwischen Werkstück und Werkzeug, welche auf die Adaption (vgl. adaptiv) des Werkzeugs zurückzuführen ist. Für subaperturige Poliertechnologien fällt die Kontaktzone stets kleiner als die Oberfläche des Werkstücks aus. Für vollaperturige Poliertechnologien erstreckt sich die Kontaktzone hingegen über die gesamte Werkstückoberfläche. Der durch die Politur zu leistende Materialabtrag erfolgt in dieser Zone durch Relativbewegung von Werkzeug- und Werkstückoberfläche. Die Abtragsrate besitzt dadurch direkte Abhängigkeit vom Flächeninhalt der Kontaktzone sowie von einer Reihe weiterer Prozessparameter (vgl. Kap. 3.2.4).

---

<sup>28</sup> lat.: ‚activus‘ – tätig, aktiv

<sup>29</sup> lat.: ‚adaptare‘ – anpassen, sich anpassend

## MATERIALABTRAGSRATE

Die Materialabtragsrate ist ein Maß für abgetragenes Materialvolumen pro Zeiteinheit. Die Angabe erfolgt in der Regel in  $[\text{mm}^3/\text{min}]$ . Diese Größe dient der Abschätzung zu erwartender Polierzeiten sowie der Bewertung unterschiedlicher Poliertechnologien hinsichtlich ihrer Effizienz. Die Berechnung erfolgt im einfachsten Fall auf Basis der Preston Hypothese (vgl. Kap. 3.2.4).

## SPHÄRISCHER ERSATZRADIUS

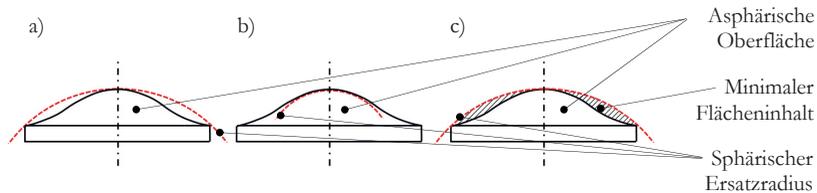


Abb. 2: Sphärische Ersatzradien a) RMR; b) Scheitelkrümmungsradius sowie c) Minimale Abweichungssumme

Der Begriff sphärischer Ersatzradius ( $R_{\text{ers}}$ ) ist für rotationsymmetrische Asphären (vgl. Kap. 3.1.2: (3)) anwendbar. In der Entwicklung, Fertigung, Montage, Justage und Systemintegration ist es häufig von Vorteil, Asphärengeometrien vereinfacht als sphärische Oberfläche zu behandeln. Abhängig von der zu leistenden Aufgabe und den technologischen Anforderungen kann der sphärische Ersatzradius nach unterschiedlichen Kriterien ausgelegt sein. Die drei häufigsten Formen seien kurz erläutern:

**Rand-Mitte-Rand (RMR):** Der sphärische Ersatzradius tangiert die asphärische Oberfläche im Scheitel und schneidet sie jeweils an ihrem Durchmesser. Der sich daraus ergebende Radius dient der Bewertung lokaler Pfeilhöhendifferenzen zwischen sphärischem und asphärischem Oberflächenverlauf.

**Scheitelkrümmungsradius:** Der sphärische Ersatzradius entspricht dem Krümmungsradius der asphärischen Oberfläche im Scheitel. Berechnung und Auswertung der relativen Flächenkippung können dadurch während der Montage<sup>30</sup> analog einer Sphäre erfolgen.

<sup>30</sup> Zum Beispiel während der Herstellung von Kittgliedern durch Richtkitten, dem Fassen durch Richtkleben sowie dem Justierdrehen.

**Minimale Abweichungssumme:** Dieser sphärische Ersatzradius ist so ausgelegt, dass der Inhalt der durch die Asphärengometrie sowie den Ersatzradius eingeschlossenen Fläche minimal ist (Zielfunktional). Der sich ergebende Krümmungsradius kann für Wendepunktasphären dem Rand-Mitte-Rand Ersatzradius entsprechen. Für den in der Schleifbearbeitung gängigen Prozess der Asphärisierung ist der sphärische Ersatzradius der minimalen Abweichungssumme hilfreich.

Auf die Diskussion und Einführung weiterer sphärischer Ersatzradien, als Best-Fit Radien mit unterschiedlichen Zielfunktionalen, sei aufgrund ihrer geringen Bedeutung für diese Arbeit verzichtet.

### RANDERSCHEINUNG

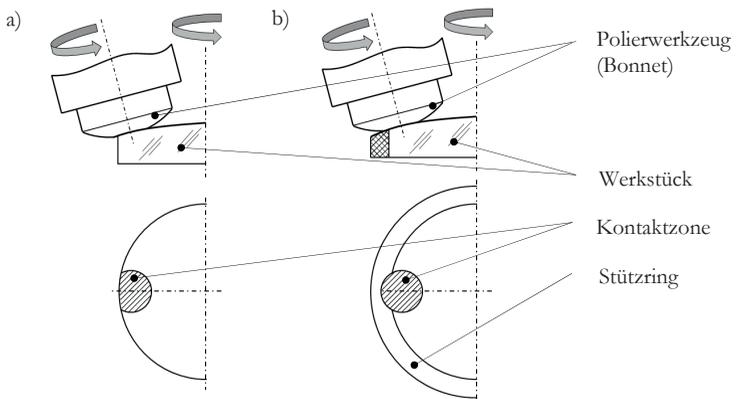


Abb. 3: Politur optisch wirksamer Oberflächen a) ohne Stützring sowie b) mit Stützring

Eine Randerscheinung steht im Alltäglichen für eine Ausnahme/Abweichung von der Regel. Der Ursprung dieser Erscheinung 'am Rand' liegt in der Astronomie und wurde im 19. Jahrhundert geprägt. Der Begriff soll im Rahmen dieser Arbeit in seiner ursprünglichen Bedeutung Anwendung finden.

Die Randerscheinung beschreibt Gestaltabweichungen polierter Spiegelflächen<sup>31</sup> in Randnähe, verursacht durch fehlenden Werkzeugrandüberlauf<sup>32</sup>. Dieser Formfehler ist systematisch und stellt eine besondere Form des Passfehlers (vgl. Kap. 3.2.2: 3/ Passfehler) dar. Heutige Poliertechnologien behelfen sich zusätzlich angebrachter Stützringkonstruktionen zur künstlichen Erweiterung des Werkstückrands, um dem Polierwerkzeug eine stetige Fläche am Werkstückrand zu bieten (vgl. Abb. 3).

### RELATIVER MATERIALABTRAGSKOEFFIZIENT

Zur Bewertung der Homogenität des durch Politur erreichten globalen<sup>33</sup> Materialabtrags soll im Rahmen dieser Arbeit der relative Materialabtragskoeffizient (RMA) dienen.

Die konventionelle Beschreibung und Bewertung von Materialabträgen nutzt die Differenz minimaler und maximaler Abtragshöhen und gibt diese als PV Wert unter Angabe einer mittleren Abtragshöhe aus. Der RMA verzichtet auf die Angabe absoluter Abtragshöhen. Er setzt minimale und maximale Abtragshöhe ins Verhältnis und gibt diese als einheitenlose Größe aus. Diese Beschreibung bietet den signifikanten Vorteil, dass sich damit der Einfluss einzelner Prozessparameter unabhängig der absoluten Abtragshöhe beschreiben lässt.

$$RMA = \frac{\Delta h_{min}}{\Delta h_{max}} \quad (3)$$

$\Delta h_{min}$  ... minimale Abtragshöhe

$\Delta h_{max}$  ... maximale Abtragshöhe

Ziel des Vor- und Durchpolierens (vgl. Kap. 4.2.2 sowie Kap. 4.2.3) ist ein global homogener Materialabtrag, welcher sich anhand des RMA anschaulich bewerten lässt. Er kann das theoretische Maximum von  $RMA = 1$  für  $\Delta h_{min} = \Delta h_{max}$  annehmen. Das theoretische Minimum von  $RMA = 0$  liegt für  $\Delta h_{min} = 0$  und  $\Delta h_{max} > 0$  vor.

<sup>31</sup> In der Regel sind dies Primärspiegel mit großem Durchmesser.

<sup>32</sup> Der Werkzeugrandüberlauf bezeichnet eine Verfahrensweise zur Politur des Werkstücks im Randbereich. Durch Verlagerung der Kontaktzone in den Werkstückrandbereich wird diese in einem Abschnitt durch den Rand des Werkstücks begrenzt. Diese Begrenzung führt zu einer Verringerung des Flächeninhalts der Kontaktzone, woraus eine Druckerhöhung resultiert. Diese ruft wiederum eine gesteigerte Abtragsrate hervor.

<sup>33</sup> Global bezieht sich hierbei auf die Bewertung der gesamten Werkstückoberfläche.

## 4 Fertigungsverfahren optischer Bauelemente

### 4.1 Einführung und Einschränkung

Inhalt dieses Kapitels bildet die schrittweise Vorstellung und Analyse der Herstellkette präzisions- und geräteoptischer Bauelemente zur Strahlablenkung durch Brechung. Der Fokus liegt hierbei auf der Herstellung sphärischer Optikkomponenten, rotationssymmetrischer Asphären sowie optischer Freiformflächen durch materialabtragende Verfahren. Ziel ist ein grundlegendes Prozessverständnis für die nach aktuellem Stand etablierten (Polier-) Technologien für die jeweiligen Werkstückgeometrien zu entwickeln.

Aufgrund des begrenzten Umfangs sowie dem bereits definierten Schwerpunkt dieser Arbeit sollen folgende Einschränkungen gelten:

- (1) **Blankpressen** als umformendes Herstellverfahren soll keinerlei Betrachtung erfahren. Das in der Massenoptik<sup>34</sup> etablierte Verfahren erfüllt die bestehenden Anforderungen hinsichtlich Spannungsdoppelbrechung (vgl. Kap. 3.2.2: 0/ ), Passfehler (vgl. Kap. 3.2.2: 3/ ) sowie Oberflächengüte, Rauheit und Welligkeit (vgl. Kap. 3.2.2: 6/ ) nach aktuellem Stand der Technik nicht<sup>35</sup>. Weiterhin sind die Werkzeugkosten für in der Präzisionsoptik übliche Stückzahlen (vgl. Kap. 3.1.3) nicht akzeptabel.
- (2) **Spritzgießen** als urformendes Herstellverfahren von Kunststoffoptiken soll aus selbigen Gründen wie das Blankpressen ausgeschlossen werden. Zusätzlich sind in der Optik verwendete Kunststoffe<sup>36</sup> aufgrund ihrer geringen mechanischen Stabilität, ihrer Unverträglichkeit gegenüber UV-Strahlung, Blasen und Einschlüssen (vgl. Kap. 3.2.2: 1/ ) sowie Inhomogenitäten und Schlieren (vgl. Kap. 3.2.2: 2/ ) zur Anwendung in der Genauigkeitsklasse der Präzisionsoptik gänzlich ungeeignet.
- (3) **Planoptische Optikkomponenten** sind aus der zu betrachtenden Herstellkette ebenfalls auszuschließen. Die hierfür zur Anwendung kommenden Fertigungsverfahren unterscheiden sich grundlegend von den in diesem Kapitel zu analysierenden.

---

<sup>34</sup> In der Massenoptik übliche Fertigungsstückzahlen je Werkstückgeometrie liegen in der Größenordnung von  $10^4$  ..  $10^7$  Stück pro Jahr.

<sup>35</sup> Nachgeschaltete Polierprozesse erlauben eine Korrektur der genannten Fehler, mit Ausnahme der Spannungsdoppelbrechung.

<sup>36</sup> Gängige Kunststoffe der (Polymer-) Optik sind Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC) sowie zyklische Olefin (Co-)Polymere (COC/COP). [Bäu06]

## 4.2 Prozesskette zur Herstellung von Präzisionsoptiken

Die Herstellung optischer Bauelemente für Präzisionsoptiken (vgl. Kap. 3.1.3) erfolgt durch eine Reihe trennender Fertigungsverfahren. Nach [DIN8580] zählen Zusammenhalt vermindernde Fertigungsverfahren zur 3. Hauptgruppe, dem Trennen (vgl. Abb. 5). Die nachfolgend beschriebene Prozesskette orientiert sich entlang Abb. 4.

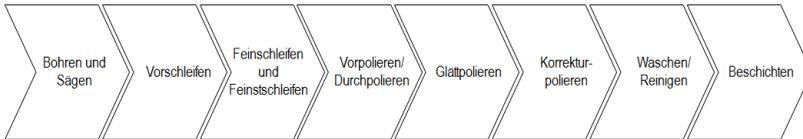


Abb. 4: Prozesskette zur Herstellung von Präzisionsoptiken nach [Son14]

### 4.2.1 Bohren und Sägen

Aus optischen Halbzeugen in Form von Blockglas werden durch Sägen und Bohren Rundscheiben erzeugt (vgl. Abb. 4). Für die Glasbearbeitung kommen diamantbesetzte Werkzeuge zum Einsatz. Diese sind nach [DIN8580] der Untergruppe 3.3, dem Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide<sup>37</sup> und gebundenem Korn, zuzuordnen (vgl. Abb. 5). Eine weitere Untergruppenklassifizierung bieten die Normen [DIN8580] sowie [DIN8589-0] nicht. Diese Unzulänglichkeit ist darauf zurückzuführen, dass unter [DIN8580], Hauptgruppe 3: Trennen klassifizierte Verfahren vorzugsweise auf die Bearbeitung metallischer Werkstoffe (Eisenmetalle/Nichteisenmetalle) abzielen. Das Bohren und Sägen anorganischer nichtmetallischer Werkstoffgruppen wie Glas und Keramik nimmt somit aufgrund des sprödharten Bruchverhaltens eine Sonderstellung ein, obgleich zur Anwendung kommende Bearbeitungskinematiken (vgl. [DIN8589-2]) identisch denen des Spanens mit geometrisch bestimmter Schneide durch Bohren und Sägen sind. Abweichend von der Norm lässt sich somit das Bohren und Sägen durch Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide ergänzen (vgl. Abb. 5 schwarz gestrichelt).

<sup>37</sup> Schneidenanzahl, Geometrie der Schneidkeile und Lage der Schneiden zum Werkstück sind hierbei unbestimmt [DIN8589-0]

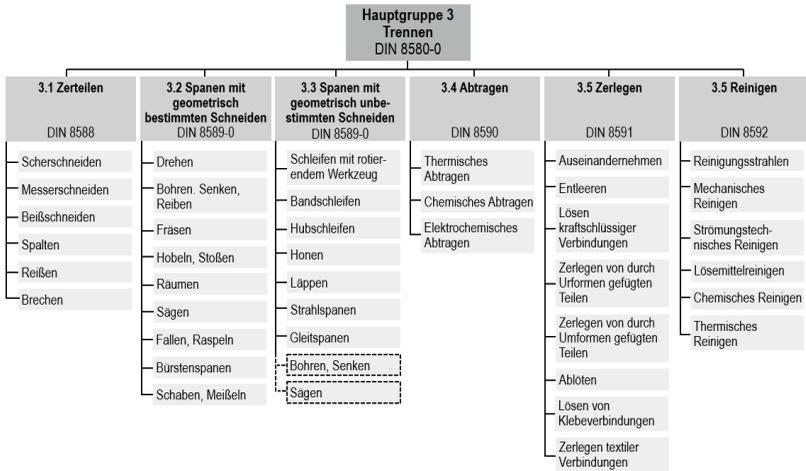


Abb. 5: Einteilung der Fertigungsverfahren nach [DIN 8580] mit Verfahrensergänzung

### 4.2.2 Vorschleifen, Feinschleifen und Feinstschleifen

In einer Reihe von Schleifprozessen wird die geometrische Grundform des optischen Bauelements erzeugt. Das Vorschleifen bildet hierbei den ersten Prozessschritt. Die zur Anwendung kommenden Schleifprozesse für Sphären, Asphären und Freiformflächen lassen sich nach [DIN8580] der Untergruppe 3.3.1, dem Schleifen mit rotierendem Werkzeug durch Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide<sup>38</sup>, zuordnen.

Die Bearbeitung sphärischer Bauelemente erfolgt mit Hilfe diamantbesetzter Ringwerkzeuge, welche einen linienförmigen Werkzeugeingriff (Kreisform) ermöglichen. Alternativ ist die Verwendung von Kalottenwerkzeugen mit flächigem Werkzeugeingriff möglich. Diese kommen selten zur Anwendung und rentieren sich ausschließlich bei großen Stückzahlen. Asphären und Freiformflächen lassen sich hingegen ausschließlich mittels Außenrundscheifen erzeugen. Die hierfür verwendeten Werkzeuge besitzen einen punktförmigen Werkzeugeingriff<sup>39</sup>.

<sup>38</sup> Die Bearbeitungskinematik wird nach [DIN8589-11] als „Ein spanendes Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Werkzeugen, deren geometrisch unbestimmte Schneiden von einer Vielzahl gebundener Schleifkörper aus natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln gebildet werden und mit hoher Geschwindigkeit, meist unter nichtständiger Berührung zwischen Werkstück und Schleifkorn den Werkstoff abtrennen“ beschrieben.

<sup>39</sup> Der punktförmige Werkzeugeingriff ist eine theoretische Annahme. In der Realität führen Abplattungseffekte als auch die Zustellung selbst zur Ausbildung eines kleinflächigen Werkzeugeingriffs.

Die Erzeugung der Grobform erfolgt in einem Vorschleifprozess unter Vorhalt eines Mittendickenaufmaßes von in der Regel 150 .. 200 $\mu\text{m}$  je bearbeitete Fläche. Für rotations-symmetrische Asphären bieten sich zur Formerzeugung zwei Vorgehensweisen an:

1. Direkte Erzeugung der Sollform mittels Außenrundscheifen mit punktförmigem Werkzeugeingriff.
2. Schleifen des sphärischen Ersatzradius mittels Ringwerkzeug mit linienförmigem Werkzeugeingriff sowie nachfolgendes Asphärisieren durch Anarbeiten der Asphärenform mittels Außenrundscheifen mit punktförmigem Werkzeugeingriff.

Das Vorschleifen führt zu einer massiven Tiefenschädigung der Werkstückoberfläche, hervorgerufen durch das sprödharte Bruchverhalten des Materials sowie die grobe Körnung des Schleifwerkzeugs. Als Folge dessen ist eine Reduzierung der Tiefenschädigung durch nachfolgendes Feinschleifen, unter Beibehaltung der Grundform, erforderlich. Das Mittendickenaufmaß beträgt nach dem Feinschleifen 100 .. 70 $\mu\text{m}$ . Abschluss der Schleifbearbeitung bilden zwei Feinstschleifdurchläufe. Diese dienen einer weiteren Reduzierung der Tiefenschädigung auf 15 .. 20 $\mu\text{m}$ <sup>40</sup> sowie der Formkorrektur des Werkstücks. Nach dem Schleifen zeigt sich die bearbeitete Oberfläche matt und lichtundurchlässig.

### 4.2.3 Vor- und Durchpolieren

Ein Abtrag der verbliebenen gestörten Grenzschicht aus den vorangegangenen Schleifprozessen erfolgt im Rahmen der Politur. Die Prozessbezeichnungen unterscheiden sich in Abhängigkeit der Genauigkeitsklasse der optischen Bauelemente:

- Für die Genauigkeitsklasse Geräteoptik ist die Bezeichnung **Durchpolieren** etabliert. Aufgrund moderater Genauigkeitsanforderungen an die Form der optisch wirksamen Flächen kann für einen stabilen Polierprozess auf ein nachfolgendes Korrekturpolieren verzichtet werden. Entscheidend ist der vollständige Abtrag der Tiefenschädigung.
- In der Genauigkeitsklasse Präzisionsoptik stellt das **Vorpolieren** einen Prozessschritt zur Beseitigung der Tiefenschädigung dar. Nach vollständigem Abtrag ist das Werkstück interferometrisch hinsichtlich seiner Form- und Rauheitsfehler prüfbar – Grundvoraussetzung für die Ableitung von Korrekturgrößen.

---

<sup>40</sup> Abhängig von Glassorte. Halogenidgläser wie Flusspat ( $\text{CaF}_2$ ) neigen aufgrund ihrer Gitteranordnung zu geringeren Tiefenschädigungen als amorphe Gläser wie NBK7.

Die zum Vor- und Durchpolieren rotationssymmetrischer Asphären eingesetzten Technologien unterscheiden sich in Abhängigkeit der Werkstückgeometrie signifikant, in Abhängigkeit der Genauigkeitsklasse jedoch nicht.

## SPHÄREN

Die Politur sphärischer Optikkomponenten erfolgt generell mit Hilfe großflächiger, formsteifer, sphärischer Polierschalen. Diese setzen sich aus einem spanend gefertigten Drehteil [DIN8580] mit sphärischer Stirnfläche sowie einem darauf durch Kleben<sup>41</sup> aufgebrachten Poliermittelträger (PMT) zusammen. Dieser besteht in der Regel aus einer aufgeschäumten Polyurethanfolie (PUF) entsprechender Dicke, Porengröße, Porosität und Shorehärte. Es wird angestrebt, dass Werkzeug- und Werkstückdurchmesser ein Verhältnis von 2:1 einnehmen. Für sehr kugelige Werkstückgeometrien (Krümmungsradius nahe des halben Werkstückdurchmessers) sind Einschränkungen unumgänglich. Entsprechend des zu polierenden Werkstückkrümmungsradius ist der Poliermittelträger auf dessen Fertigradius (alternativ als Zielradius bezeichnet) abzurichten. Die Politur sphärischer Optikkomponenten lässt sich als formkopierendes Polieren bezeichnen, da die im Polierprozess bearbeitete Werkstückoberfläche den Krümmungsradius des formstifen Werkzeugs annimmt.

Stand der Technik für das Durchpolieren von Sphären ist das Synchro-speedverfahren unter Nutzung der Synchro-speed-Kinematik [Ham01]. Der Name dieses Verfahrens leitet sich aus nahezu gleichen Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug sowie deren gleichsinnigen Drehrichtungen ab. Für einen Konstantabtrag ist nach Preston das Überstreichen gleicher Strecken über die gesamte Werkstückoberfläche erforderlich (vgl. Kap. 3.2.4). Anhand einer Drehzahlverhältnisvariation zwischen Werkzeug und Werkstück sowie des eingeschlossenen Schwenkwinkels zwischen mechanischer Achse des Werkzeugs und der Rotationsachse des Werkstücks lassen sich Abweichungen von 5 .. 10% in Relation zur gemittelten, in Summe überstrichenen Strecke realisieren [Ham01].

---

<sup>41</sup> Das Fügen von Poliermittelträger und Polierschale ist nach [DIN8593-8] der Untergruppe 4.8.1.4, dem Haftkleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen zuzuordnen.

Die Synchro-speed-Kinematik zeichnet sich durch eine vollaperturige Kontaktzone aus. Diese erlaubt eine effiziente Werkstückbearbeitung mit Abtrag der gestörten Grenzschicht binnen weniger Minuten<sup>42</sup>. Der wesentliche Vorteil der Synchro-speed-Kinematik besteht dabei darin, dass die Bearbeitungszeit weitestgehend unabhängig vom Flächeninhalt der Werkstückoberfläche, respektive dem Werkstückdurchmesser ist. Weiterhin werden mittel- und hochfrequente Gestaltabweichungen als Relikte vorangegangener Schleifprozesse gut unterdrückt. Restformabweichungen liegen vorwiegend im langperiodischen Ortswellenlängenbereich niederfrequenter Gestaltabweichungen und lassen sich in nachfolgenden Korrekturpoliervorgängen effektiv beseitigen. [Sond14]

### ASPHÄREN UND FREIFORMFLÄCHEN

Für asphärische Optikkomponenten sowie Freiformoptiken ist die subaperturige Bearbeitung mittels **Bonnet Polishing** Stand der Technik. Dafür zur Anwendung kommende Werkzeuge bestehen aus einem druckluftbeaufschlagten Ballon aus faserverstärktem Elastomer. Die eingesetzten Polyurethanfolien der Poliermittelträger entsprechen denen der Sphärenpolitur und werden mit dem Bonnet durch Kleben vollflächig stoffschlüssig verbunden oder mit Hilfe eines Rings umfangsseitig geklemmt. Eine schematische Darstellung eines Bonnet Werkzeugs zeigt Abb. 6. [Sch14a]; [Hue15]

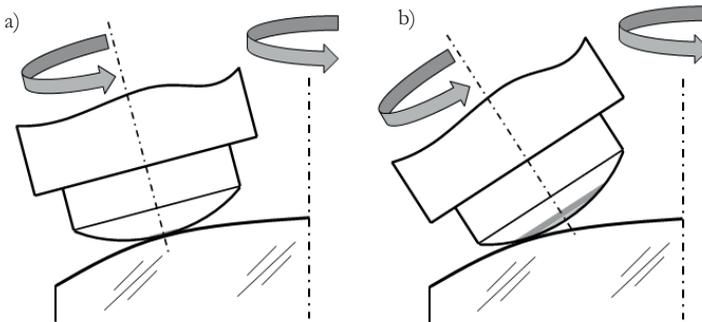


Abb. 6: Prinzipielle Anordnung für das Bonnet Polishing nach [Sch14a]:  
a) klassisch; b) Off-axis

<sup>42</sup> In Abhängigkeit der abzutragenden Tiefenschädigung, der Werkstückgeometrie (Durchmesser, Krümmungsradius, Mittendicke), der Glassorte sowie des Poliermittels beträgt die übliche Bearbeitungszeit zwischen 9 .. 11min.

Zur Anwendung kommende Mehrachs-CNC Maschinen- und Roboteranordnungen als auch erforderliche Steuerungshardware und -software sind kommerziell frei verfügbar. Um die im Schleifprozess auf rund  $1\mu\text{m}$  angearbeitete Asphären- oder Freiform nicht zu verfälschen, sind Maßnahmen zum formerhaltenden Vor- oder Durchpolieren zu treffen. Dazu zählt, dass der Krümmungsradius des Werkzeugs maximal dem kleinsten lokalen (hohlen) Krümmungsradius im Oberflächenverlauf der zu polierenden Geometrie entsprechen darf.

Diese Limitierung führt parallel zu einer Begrenzung des Werkzeugdurchmessers und folglich zur Ausbildung einer kleinflächigen Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück. [Sch14a]

Die in [Sch14a] diskutierten drei wesentlichen Nachteile kleinflächiger Kontaktzonen sollen an dieser Stelle aufgegriffen werden:

1. Die Materialabtragsrate im Poliervorgang ist unter Annahme konstanter Druckverhältnisse direkt abhängig von der Größe der Kontaktzone. Kleinflächige Kontaktzonen führen zu **geringen Materialabtragsraten** und erfordern somit zwangsläufig längere Bearbeitungszeiten als der Ansatz der vollaperturigen Politur mit Hilfe der Synchro-speed-Kinematik. Die Bearbeitungszeit ist hierbei direkt abhängig vom Flächeninhalt der Werkstückoberfläche, respektive vom Werkstückdurchmesser. Diese Abhängigkeit ist der wesentliche Kostentreiber in der Herstellung von Optikkomponenten, die von der Sphärenform<sup>43</sup> abweichen und typische Durchmesser ( $D_{\text{Wst}} > 30\text{mm}$ ) der Geräte- und Präzisionsoptik besitzen.
2. Kleinflächige Kontaktzonen neigen zur Generierung **mittelfrequenter Gestaltabweichungen (MGA)** (vgl. Kap. 3.3). Der eingeprägte Fingerabdruck<sup>44</sup> des Werkzeugs lässt sich durch nachfolgende Glättpoliervorgänge nicht effektiv beseitigen.
3. Für kleinflächige Kontaktzonen unterliegt der Poliermittelträger erhöhtem **Verschleiß** und besitzt dadurch eine wesentlich geringere Standzeit als in der Politur mit Hilfe der Synchro-speed-Kinematik. Der notwendige häufige Wechsel des Bonnets führt zu erhöhten Rüstzeiten und somit höheren Herstellkosten.

---

<sup>43</sup> Dies schließt Planflächen ein, da diese als sphärische Flächen mit Krümmungsradius  $= \infty$  betrachtet werden können.

<sup>44</sup> In der englischen Literatur üblicherweise als 'foot print' bezeichnet.

Ein Ansatz zur Standzeiterhöhung des Poliermittelträgers (vgl. Nachteil 3) ist das Off-axis Bonnet Polishing [Kio06]. Es zeichnet sich dadurch aus, dass die Kontaktzone einen definierten Radius zur Drehachse des Werkzeugs aufweist. Dies hat den Vorteil, dass die Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$  im Bereich der Kontaktzone an keiner Stelle  $v_{rel} = 0\text{m/s}$  beträgt und die Differenz maximaler und minimaler Relativgeschwindigkeit im Vergleich zum klassischen Bonnet Polishing geringer ausfällt. Die Standzeiterhöhung des Poliermittelträgers ist hingegen auf eine im Bezug zum Werkzeug umlaufende Kontaktzone zurückzuführen. Diese führt zu einer ringförmigen Werkzeugeingriffsfläche<sup>45</sup>, deren mittlerer Durchmesser direkt abhängig vom Schwenkwinkel ist. Der Flächeninhalt der im Off-axis Bonnet Polishing vorliegenden Werkzeugeingriffsfläche ist somit um ein Vielfaches größer als im klassischen Bonnet Polishing. Die Standzeit des Poliermittelträgers besitzt eine lineare Abhängigkeit vom Flächeninhalt der Werkzeugeingriffsfläche.

Optimierungsansätze hinsichtlich erreichbarer Oberflächengüten sowie der Orientierungsrichtung der eingebrachten Störstruktur auf Grundlage des Off-axis Bonnet Polishing finden sich in [Ji06], [Wal03], [Bea14] sowie [Xie06]. Die verbleibenden Nachteile der geringen Materialabtragsrate (vgl. Nachteil 1) als auch der Neigung zu mittelfrequenten Gestaltabweichungen (vgl. Nachteil 2) vermag das Off-axis Bonnet Polishing nicht zu beseitigen. [Sch14a]

Die drei aufgezeigten wesentlichen Nachteile, welche beim Vor- und Durchpolieren von Asphären sowie Freiformflächen mittels Bonnet Polishing vorliegen, stellen einen wesentlichen Kostentreiber in der Fertigung von Asphären und Freiformoptiken dar. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll die Erarbeitung von Lösungsansätzen, deren Bewertung und Auswahl anhand festzulegender Kriterien<sup>46</sup> sowie die Weiterentwicklung und Ausgestaltung der Lösungen den wesentlichen Untersuchungsgegenstand bilden (vgl. Kap. 5).

---

<sup>45</sup> Unter der Werkzeugeingriffsfläche ist die am Poliermittelträger durch Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug abrasivem Verschleiß unterliegende Zone zu verstehen.

<sup>46</sup> Die zur Bewertung heranzuziehenden Kriterien schließen die Fähigkeiten des Lösungsansatzes zur Beseitigung der drei wesentlichen Nachteile kleinflächiger Polierwerkzeuge, den erforderlichen Realisierungsaufwand, die Flexibilität des Lösungsansatzes, sowie die erforderlichen regelungstechnischen Aufwände ein.

#### 4.2.4 Glättpolieren

Dem Vorpulieren schließt sich ein mehrfacher Wechsel zwischen Glätt- und Korrekturpoliervorgängen zur iterativen, formerhaltenden Beseitigung verbliebener Welligkeiten sowie zur Korrektur der Oberflächenrauheit an. Das Glättpolieren zielt auf die Beseitigung mittel- und hochfrequenter Gestaltabweichungen (vgl. Kap. 3.2.3) ab.

Zur Glättpolitur genutzte Technologien unterscheiden sich analog des Vor- und Durchpolierprozesses für Sphären und Asphären/Freiformflächen grundlegend, sodass diese nachfolgend separat zu analysieren sind. Eine Unterscheidung der zu beseitigenden Oberflächenunvollkommenheiten nach Ordnung und Ortsfrequenz ist für detailliertere Betrachtungen sinnvoll und soll für das Glätten unterschiedlicher Oberflächengeometrien dargestellt werden.

### SPHÄREN

Die Glättpolitur sphärischer Optikkomponenten ist ab der Genauigkeitsklasse Präzisionsoptik üblich. Nach aktuellem Stand zur Anwendung kommende Werkzeuganordnungen basieren auf vollaperturigen sphärischen Schalen. Diese sind in der Regel mit einem Polierpech<sup>47</sup> ausgekleidet. Polierpech ist ein superzähes, Newton'sches Fluid<sup>48</sup> und gleicht sich der Werkstückkontur im Makroskopischen sehr gut an. Mittel- und hochfrequente Gestaltabweichungen vermag das Pech unter Relativbewegung von Werkzeug und Werkstück jedoch nicht ab- und nachzubilden. Diese Eigenschaft ermöglicht in Verbindung mit einer vollaperturigen Kontaktzone ein effizientes und formerhaltendes Glättpolieren.

Pechschalen erfordern eine isotrope Oberflächenstrukturierung innerhalb des Bereichs, in dem sich die Kontaktzone ausbildet. Diese erfolgt standardmäßig per Hand durch feines Ritzen mit scharfkantigen Werkzeugen<sup>49</sup> und erlaubt ein Zuführen und Puffern von Poliermittel innerhalb der Kontaktzone. Dieses manuelle Glätt- und Korrekturpolierverfahren setzt großes handwerkliches Geschick und insbesondere einschlägige Erfahrung/empirisches Wissen in der Pechpolitur voraus.

---

<sup>47</sup> Polierpech oder Pech im Allgemeinen ist den langkettigen Kohlenwasserstoffen zuzuordnen. Eine Summenformel als solche existiert nicht, da es sich um ein Gemisch einer Reihe verschiedener Substanzen handelt. Pech kann mit Hilfe der Erdöldestillation oder durch Pyrolyse von Holz gewonnen werden.

<sup>48</sup> Newton'sche Fluide (engl. Newtonian fluid) besitzen ein linear viskoses Fließverhalten, d.h. die Scherspannung ist direkt proportional zur Schergeschwindigkeit. Ihre Viskosität ist belastungsunabhängig. [Kim09]; [The08]

<sup>49</sup> Üblich ist die Verwendung von Skalpellklingen.

## ASPHÄREN UND FREIFORMEN

Für das Glättpolieren von Asphären sowie Freiformelementen sind formnachgiebige (adaptive) Subaperturwerkzeuge Stand der Technik. Ein meist mehrschichtiger Aufbau, bestehend aus einer Grund-/Trägerplatte, einer elastischen Zwischenschicht sowie einem Poliermittelträger, erlaubt eine begrenzte Anpassung an die zu glättenden Ortsfrequenzen sowie zu bearbeitenden Oberflächenverläufe. Gängige Variationsparameter sind Art und Dicke der elastischen Zwischenschicht sowie des Poliermittelträgers. Der Durchmesser des Glättwerkzeugs wird hingegen stark vom Krümmungsverlauf der zu glättenden Oberfläche limitiert, ist jedoch aus Gründen hoher Materialabtragsraten und somit kurzer Prozesszeiten größtmöglich ausgelegt. Sowohl Polierdruck, Poliermittel, Kinematik als auch einzustellende Relativgeschwindigkeiten besitzen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die glättbaren Ortsfrequenzen.

Das Glättpolieren von Asphären und Freiformflächen erlaubt eine Unterscheidung anhand ihrer Zielforderungen, in diesem Falle zu glättender Ortsfrequenzbereiche:

1. Verringerung der Störstrukturamplitude für **mittelfrequente Gestaltabweichungen**. Dieser Glättprozess erfolgt einmalig nach dem Vorpolieren. Eine effiziente Glättung der durch vorangegangene Schleif- und Poliervorgänge eingebrachten, periodischen Strukturen ist nach aktuellem Stand der Technik nicht möglich. Jedoch ist eine signifikante Verringerung der Störstrukturamplitude durch einmalige Glättpolitur erzielbar. Die Beseitigung verbliebener periodischer Gestaltabweichungen erfolgt durch eine anschließende Korrekturpolitur. Dieser Vorgang erfordert eine verweilzeitgesteuerte Bearbeitung der gesamten Werkstückoberfläche. Aufgrund punktförmigen Werkzeugeingriffs ist diese entsprechend zeitaufwändig und somit kostenintensiv. Eine signifikante Herstellkostensenkung der mittels Bonnet Polishing vorpolierten Asphären und Freiformelemente erfordert die Entwicklung eines Glättwerkzeugs zur effizienten Beseitigung genannter Störstrukturen.
2. Verringerung der Störstrukturamplitude für **hochfrequente Gestaltabweichungen**. Diesem Glättpoliervorgang geht nach aktuellem Stand der Technik ein erster, im vorherigen Abschnitt beschriebener Korrekturpoliervorgang voraus. Die zu glättenden Ortsfrequenzen sind Relikte der Korrekturpolitur. Mit Periodenlängen  $<250\mu\text{m}$  zählen diese nach [DIN4760] zur 4. Ordnung: Rauheit. Das Bearbeitungsziel dieses Glättvorgangs besteht in der Erzeugung der geforderten Mikrorauheit (im Fertigungsumfeld auch als Feinpasse bezeichnet) unter Beibehaltung der Form (vgl. Tab. 2: 1. Ordnung: Formabweichungen). Der Fokus dieses Glättpoliervorgangs liegt in der deterministischen Erzeugung

einer homogenen Oberflächenrauheit. Erzielbare Materialabtragsraten spielen hingegen aufgrund geringster Abtragshöhen eine untergeordnete Rolle. Nach aktuellem Stand der Technik liefern die zur Anwendung kommenden Glättpolierwerkzeuge zur Beseitigung hochfrequenter Gestaltabweichungen zufriedenstellende Ergebnisse und sollen daher im weiteren Verlauf der Arbeit keinen Gegenstand weiterer Betrachtungen bilden.

#### 4.2.5 Korrekturpolieren

Das Korrekturpolieren dient der lokalen Formkorrektur sphärischer, asphärischer als auch freigeformter Optikkomponenten durch Materialabtrag. Es ordnet sich in der Fertigungskette optischer Bauelemente formal nach dem Glättpolieren ein (vgl. Abb. 4). Die zur Anwendung kommenden Bearbeitungstechnologien sind für alle Oberflächenformen universell anwendbar.

Dem Korrekturpolieren geht in der Regel ein erster Glättpoliervorgang voraus (vgl. Kap. 4.2.4). Abzutragende Zonen werden mit Hilfe orts aufgelöster interferometrischer Messungen ermittelt und dienen als Grundlage der Verweilzeit- sowie Werkzeugbahnberechnung. Die dafür zur Anwendung kommenden Interferometeraufbauten entsprechen in ihrer Grundstruktur einem Twyman-Green Interferometer. Weicht die zu vermessende Oberflächengeometrie von der Sphärenform ab (bei Asphären und Freiformelementen), ist die Nutzung eines Computer Generierten Hologramms (CGH) zur gezielten Deformation der Wellenfront erforderlich [Sch96]; [Son14].

Das Korrekturpolieren dient primär der Korrektur von Gestaltabweichungen 1. Ordnung: Formabweichungen [DIN4760]. Weiterhin ist eine, wenngleich auch zeitaufwändige, Beseitigung mittelfrequenter, nicht glättbarer Gestaltabweichungen möglich und nach aktuellem Stand der Technik auch erforderlich. Mittels Magnetorheological Finishing (MRF) korrekturpolierte Oberflächen erreichen speziell in der Genauigkeitsklasse der Präzisionsoptik nicht die geforderte Oberflächenqualität. Eine Korrektur der Mikrorauheit durch einen weiteren Glättpoliervorgang ist somit erforderlich. Dabei entstehende Formabweichungen erfordern in Abhängigkeit zulässiger Toleranzen einen weiteren Korrekturpoliervorgang. Diese iterative Vorgehensweise erlaubt eine sukzessive Annäherung der Istoberfläche<sup>50</sup> an ihre geforderte Sollgestalt nach Datenblatt/Zeichnung.

Die zur Korrekturpolitur erforderlichen Prozessschritte sind unabhängig vom Korrekturverfahren. Aus einem bekannten Fehler- sowie Werkzeugabtrags-

---

<sup>50</sup> Diese stellt nach [DIN4760] die Überlagerung der Gestaltabweichungen 1. ... 4. Ordnung dar.

profil erfolgt die Berechnung der notwendigen Verweilzeiten, um als Ausgangsgröße das vorhergesagte, korrigierte Oberflächenprofil zu erhalten. Abb. 7 zeigt den prinzipiellen Prozessablauf der Korrekturpolitur.

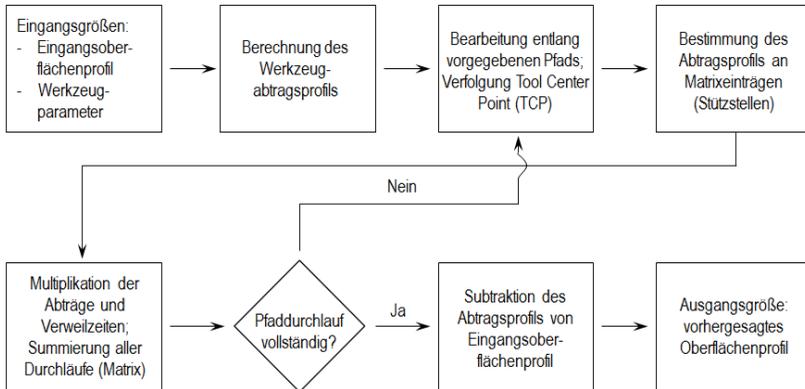


Abb. 7: Prozessablauf des Computer Controlled Polishing nach [Jon80]

Für die Genauigkeitsklasse der Geräteoptik kann für sphärische Optiken, unter Voraussetzung eines stabilen Durchpolierprozesses, auf eine Korrekturpolitur verzichtet werden. Ebenso ist dies für rotationssymmetrische Asphären mit moderaten Oberflächentoleranzen im Bereich  $2 \dots 3 \mu\text{m PV}$  möglich.

Für das Korrekturpolieren existieren eine Reihe etablierter sowie neuer Technologien (vgl. Tab. 3), deren Wirkungsweise, Kinematik und Anwendungsfelder in Auszügen nachfolgend dargestellt sind.

Tab. 3: Übersicht etablierter sowie neuer Korrekturpoliertechnologien

Klassifizierung aktuell bestehender Korrekturpoliertechnologien	
Etablierte, kommerziell frei verfügbare Korrekturpoliertechnologien	Neue, kommerziell nicht frei verfügbare Korrekturpoliertechnologien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computer Controlled Polishing (CCP)</li> <li>• Ion Beam Figuring (IBF)</li> <li>• Magnetorheological Finishing (MRF)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrodynamic Radial Polishing (HyDRa)</li> <li>• Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ)</li> <li>• Ultrasonic Vibration Assisted Polishing (UVAP)</li> <li>• Ultrasonic-Magnetorheological Compound Finishing (UMCF)</li> <li>• Ball End Magnetorheological Finishing (BEMRF)</li> <li>• Fluid Jet Polishing (FJP)</li> <li>• Magnetorheological Jet Finishing (MR JET)</li> <li>• Etc.</li> </ul>

## COMPUTER CONTROLLED POLISHING

Das Computer Controlled Polishing umfasst dem Begriff nach alle rechnergestützten Polierverfahren, unabhängig vom Wirkprinzip und Werkzeugaufbau. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die Abkürzung jedoch der rechnergestützten Korrekturpolitur mittels kleinflächiger Werkzeuge zugeordnet. Dieser Missstand ist auf eine unzureichende Begriffsfindung und Beschreibung des ersten Korrekturpolierverfahrens nach [Jon80] zurückzuführen. Die korrekte Bezeichnung sollte demnach 'rechnergestützte Korrekturpolitur mittels kleinflächiger Werkzeuge' oder im Englischen 'Computer Controlled Fine Correction with Small Sized Tools' lauten. Da der Begriff des Computer Controlled Polishing in der einschlägigen Literatur, vor allem in der amerikanischen, etabliert ist, sei an dieser Stelle nur darauf hingewiesen. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll der Begriff Computer Controlled Polishing das Verfahren der rechnergestützten Korrekturpolitur mittels kleinflächiger Werkzeuge adressieren.

Die Ursprünge des Computer Controlled Polishing liegen im Jahre 1972 bei R. Aspden. Sein Ansatz beschreibt ein verweilzeitgesteuertes Korrekturpolieren mit Hilfe einer NC Poliermaschine. Die Eingangsgröße zur Berechnung der Steuerdaten bilden aus interferometrischen Messungen gewonnene Informationen lokaler Formabweichungen (Betrag und Ort). Über einen Algorithmus werden diese unter Voraussetzung einer bekannten und konstanten Materialabtragsrate in lokale Verweilzeiten umgesetzt.

Die ursprünglich für Großoptiken wie Teleskope, Erdbeobachtungs- und Aufklärungsoptiken entwickelte Technologie wird heutzutage zur Herstellung von Präzisions- und Ultrapräzisionsoptiken genutzt. Dieser Wandel ist auf eine Reihe von Weiterentwicklungen in Puncto Werkzeuggeometrie, Maschinenaufbau- und Steuerung, Algorithmik sowie verbesserter Modelle zur Beschreibung der Werkzeugsabtragsfunktion, engl. Tool Influence Function (TIF) zurückzuführen. [Bec02]; [Gig88]; [Jon77]; [Jon78]; [Jon80]; [Jon83]

## ION BEAM FIGURING

Das Ion Beam Figuring (IBF), im Deutschen Ionenstrahlbearbeitung, ist ein Korrekturverfahren mit punktförmigem Materialabtrag. Mittels Ionensputtern unter Vakuumatmosphäre erfolgt eine gezielte Beseitigung von Gestaltabweichungen 1. .. 4. Ordnung (vgl. Tab. 2).

Entwicklungen, welche über Grundlagenexperimente hinausgehen, sind auf Wilson und McNeil zurückzuführen. Die notwendigen Entwicklungsaktivitäten wurden 1987 von der Strategic Defense Initiative der Vereinigten Staaten von Amerika unter Präsident Ronald Reagan veranlasst und erzielten um 1989 den Entwicklungsstand eines Laborwerkzeugs.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht in der berührungslosen und somit werkzeugverschleißfreien Bearbeitung, welche über den gesamten Bearbeitungsprozess eine gleichbleibende, stabile Materialabtragsrate ermöglicht. Ebenso besitzt das Verfahren keinerlei Neigung zu Randerscheinungen (vgl. Kap. 3.3: Randerscheinung) sowie zur Generierung von Tiefenschädigungen. Erzielbare Formabweichungen betragen in Abhängigkeit der Werkstückgeometrie und des verwendeten Werkstoffs typischerweise  $< 10\text{nm PV}$  sowie  $< 1\text{nm RMS}$ . Wesentlicher Nachteil des IBF ist auch nach aktuellem Stand der Technik die prinzipbedingt sehr geringe Materialabtragsrate in der Größenordnung von  $10^{-4}\text{mm}^3/\text{min}^{51}$ , welche das Verfahren aufgrund der erforderlichen Bearbeitungszeit zur Beseitigung mittelfrequenter Gestaltabweichungen unwirtschaftlich macht. Das Einsatzgebiet dieser Technologie beschränkt sich

---

<sup>51</sup> Basierend auf der Annahme eines Spotdurchmessers von 1mm und einer Materialabtragshöhe von 1 .. 2nm/s.

daher aktuell auf Hochleistungs- und Höchstleistungsoptik, welche einerseits geringerem Kostendruck unterliegen und deren Spezifikation andererseits die Verwendung von IBF rechtfertigt, respektive ausschließlich mittels IBF erreichbar ist. [Bec02]; [Opt14]; [Ghi07]

Aktuelle Entwicklungsaktivitäten zielen auf eine signifikante Steigerung der Materialabtragsrate durch leistungsfähigere Ionenstrahlquellen ab. Die Zielstellung zu erreichender maximaler Materialabtragsraten liegt in der Größenordnung  $10\text{mm}^3/\text{min}$  [Zeu12].

## MAGNETORHEOLOGICAL FINISHING

Die Bezeichnung des aus dem Englischen stammenden Magnetorheological Finishing (MRF), im Deutschen sinngemäß MagnetoRheologische Formkorrektur, beschreibt das jüngste der etablierten und kommerziell frei verfügbaren lokalen Korrekturverfahren.

Die Grundidee aus dem Jahr 1988 geht auf eine Gruppe sowjetischer Wissenschaftler zurück, deren Ansatz die Nutzung magnetorheologischer Flüssigkeiten, welche üblicherweise in Stoßdämpfern sowie Drehmomentwandlern von Lastkraftwagen Anwendung finden, zur Korrekturpolitur optischer Gläser beschreibt [Har11]. Ein mit ferromagnetischen Eisenpartikeln sowie abrasiven Partikeln angereichertes Fluid auf Mineralölbasis wird hierbei zwischen dem zu bearbeitenden Spot der Werkstückoberfläche und dem Außenumfang eines rotierenden Rades zugeführt.

Der Abstand zwischen Rad- und Werkstückoberfläche beträgt wenige mm. In diesem Wirkspalt wird das Fluid einem permanenten Magnetfeld ausgesetzt und erfährt durch Ausrichtung der ferromagnetischen Partikel eine signifikante Viskositätserhöhung. Aufgrund des Fluidcharakters erfolgt eine perfekte Formanpassung im zu bearbeitenden Spot. Die während des Anpassungsprozesses auf die Werkstückoberfläche wirkenden Kräfte erzeugen einen von Spotdurchmesser und Relativgeschwindigkeit abhängigen Polierdruck. In Abhängigkeit der Drehzahl des Rades lässt sich die für den gewünschten Polierabtrag notwendige Relativgeschwindigkeit einstellen. Das Korrekturverfahren mittels Magnetorheological Finishing ist frei von Werkzeugverschleiß, sodass der Abtragsprozess unter Voraussetzung kontinuierlicher Fluidaufbereitung (Temperierung, Homogenisierung, Dichtekorrektur) entsprechend stabil ausfällt. [Bec02]; [Sin12]; [Kor99]; [Kor95]; [Sho00]

### 4.2.6 Waschen, Reinigen und Beschichten

Nach abgeschlossenem Durchpolieren für die Genauigkeitsklasse der Geräteoptik sowie abgeschlossener Glätt- und Korrekturpolitur für die Genauigkeitsklasse der Präzisionsoptik ist das Werkstück von Poliermittelresten (mit Ausnahme IBF) sowie sonstigen Verunreinigungen zu befreien. Hierzu kommen eine Reihe von Wasch- und Reinigungsvorgängen zum Einsatz. Die Reinigung sowie mögliche nachfolgende Antireflexbeschichtungen optisch wirksamer Flächen sind der Vollständigkeit halber aufgeführt, bilden jedoch keinen Schwerpunkt im weiteren Verlauf dieser Arbeit.

## 4.3 Bewertung und Ableitung eines Handlungsbedarfs

Die unter Abschnitt 4.2 vorgestellte Prozesskette zeigt, dass die Herstellung von Präzisionsoptiken eine Abfolge hochtechnologisierter, komplexer Prozessschritte erfordert. Mit Ausnahme der Halbzeugfertigung durch Sägen und Bohren differieren die zur Anwendung kommenden Fertigungstechnologien in Abhängigkeit der herzustellenden Werkstückgeometrie (Sphäre, Asphäre, Freiformoptik) teils stark.

## SCHLEIFBEARBEITUNG

Die Optimierungspotentiale der Schleifbearbeitung sind direkt ableitbar und mit begrenztem technologischen Aufwand realisierbar. Eine signifikante Prozesszeitverkürzung ist prinzipbedingt nicht möglich, jedoch hat eine Verringerung der Tiefenschädigung eine bedeutsame Aufwandssenkung des nachfolgenden Durchpolierens zur Folge. So führt eine angenommene Halbierung der Tiefenschädigung zu einer theoretischen Halbierung der Durchpolierzeit. Einen Entwicklungsschwerpunkt im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts<sup>52</sup> ‘FREE‘ bildete die Konzeption, Herstellung sowie Prozessprobung einer Ultrapräzisionsschleifmaschine (UP-Schleifmaschine), mit der Zielstellung einer verringerten Tiefenschädigung von  $< 15\mu\text{m}$  sowie Formabweichungen  $< 1\mu\text{m}$  PV. Erreicht wurde dies im Wesentlichen durch einen sehr steifen Maschinengrundaufbau sowie hydrostatische Maschinenachsen mit Direktantrieben [Rot12]; [Sch14b]; [Sch14c].

---

<sup>52</sup> Der Projektverbund, bestehend aus der Carl Zeiss Jena GmbH, der Carl Zeiss AG, der Jenoptik Polymer Systems, der OptoTech GmbH sowie dem Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik (IOF).

Optimierungsansätze zum Schleifen wurden im Rahmen des Verbundprojekts tiefgründig analysiert und sollen daher keinen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen.

## **VOR- UND DURCHPOLIEREN**

Für das Vor- und Durchpolieren sphärischer Optiken ist das Synchrospeedverfahren Stand der Technik. Es erzielt aufgrund seiner vollaperturig ausgebildeten Kontaktzone die maximale Materialabtragsrate, ermöglicht damit Prozesszeiten im einstelligen Minutenbereich bei gleichzeitig geringer Neigung zu mittelfrequenten Gestaltabweichungen (vgl. Kap. 4.2.3). Das Optimierungspotential für die Politur sphärischer Optiken mittels Synchrospeed-Kinematik ist an dieser Stelle als gering zu bewerten.

Das Vor- und Durchpolieren von Asphären sowie Freiformoptiken erfolgt nach aktuellem Stand der Technik mit Hilfe subaperturiger Bonnet Werkzeuganordnungen. Kleinflächige Kontaktzonen führen aufgrund geringer Materialabtragsraten zu zeitintensiven Bearbeitungsprozessen, zur Generierung mittelfrequenter Gestaltabweichungen sowie zu hohem Werkzeugverschleiß (vgl. Kap. 4.2.3).

Aus der Forderung nach einer zeit- und kosteneffizienten Fertigung rotations-symmetrischer Asphären und Freiformoptiken lässt sich ein genereller Handlungsbedarf für die Technologie- und Prozessentwicklung leistungsfähigerer Polierwerkzeuganordnungen ableiten. Der Fokus der Entwicklung sollte dabei auf einer signifikanten Steigerung der Abtragsrate sowie einem formerhaltenden Polierprozess liegen. Weiterhin lässt sich die Forderung nach einer Polier-technologie mit geringer Neigung zu mittel- und hochfrequenten Gestaltabweichungen, vergleichbar mit dem Synchrospeedverfahren für die Sphärenpolitur, formulieren. Dies hätte für nachfolgende Glättprozesse eine Aufwandssenkung sowie geringere, durch das Glättpolieren verursachte, Formabweichungen zur Folge.

## GLÄTTPOLIEREN

Für das Glättpolieren sphärischer Optikkomponenten lässt sich aus aktueller Sicht kein akuter Handlungsbedarf zur Technologieentwicklung ableiten. Das im vorausgegangenen Durchpolierprozess genutzte Synchrospeedverfahren erlaubt vor allem für die Genauigkeitsklasse der Geräteoptik den Verzicht auf eine Glättpolitur. Der Schwerpunkt in der Präzisions- und Ultrapräzisionsoptik üblicher Glättprozesse liegt auf der effizienten Beseitigung mittelfrequenter Gestaltabweichungen. Die dafür zur Anwendung kommende manuelle Pechpolitur erfüllt die technologischen Anforderungen sicher – obgleich sie für die Herstellung von Hightech Produkten aufgrund ihres ‘Handwerkcharakters’ nicht mehr zeitgemäß erscheinen mag.

Das nach aktuellem Stand zum Vor- und Durchpolieren von Asphären und Freiformoptiken genutzte Bonnet Polishing erfordert aufgrund seiner prinzipbedingten Neigung zu mittelfrequenten Gestaltabweichungen eine anschließende, formerhaltende und effiziente Glättpolitur. Aktuell verfügbare Glätttechnologien erfüllen diese Forderungen nur bedingt, da durch das Glätten hervorgerufene Formabweichungen über zeitintensive Korrekturpoliervorgänge iterativ zu beseitigen sind.

Unter Beibehaltung des Bonnet Polishing zum Vor- und Durchpolieren besteht ein genereller Bedarf an der Entwicklung effizienter, großflächiger Glättwerkzeuge, welche aufgrund einer vergrößerten Kontaktzone eine gesteigerte Materialabtragsrate und somit eine Prozesszeitverkürzung ermöglichen. Weiterhin lässt sich formulieren, dass diese Glättwerkzeuge in ihrer Form adaptiv zu gestalten sind, um ein formerhaltendes Glätten zu gewährleisten und somit die Anzahl der Iterationsschleifen aus Glätt- und Korrekturpolieren zu verringern (vgl. Kap. 4.2.4).

## 5 Lösungsansätze für die Politur rotationssymmetrischer Asphären

Zur Reduzierung der Bearbeitungszeit für das Vor- und Durchpolieren rotationssymmetrischer Asphären werden in [Sch14a] sowie [Sch15a] drei Lösungsansätze diskutiert, welche sich hinsichtlich technischer als auch prozesstechnischer Vor- und Nachteile sowie ihrer Realisierungsaufwände unterscheiden. Im Folgenden sollen diese Ansätze in verkürzter Form vorgestellt, gegenübergestellt und bewertet werden. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Auswahl eines auszugestaltenden Lösungsansatzes.

### 5.1 Prozessparameteroptimierung für eine gesteigerte Materialabtragsrate

Der durch Politur zu erwartende Materialabtrag ist von der in den Prozess eingebrachten Abtragsarbeit, sprich von den drei Prozessparametern Polierdruck, Relativgeschwindigkeit sowie Verweilzeit direkt abhängig. Die zu erwartende Abtragshöhe lässt sich anhand der Preston Hypothese (vgl. Kap. 3.2.4: Gl. 1) in guter Näherung voraussagen.

Ein gezielter Materialabtrag im Poliervorgang erfordert einen Zustand der Mischreibung<sup>53</sup>, in welchem anteilig Gleitreibung als auch Flüssigkeitsreibung vorherrschen. Die Abtragshöhenvorhersage erfordert stabile und konstante Reibverhältnisse. Untersuchungen zur Prozessparametervariation für das Polieren sphärischer Bauelemente mittels Synchrospeed-Kinematik durch [Ham01] zeigen folgende wesentliche Zusammenhänge:

1. Eine Erhöhung des Polierdrucks führt zu einer Erhöhung der Reibzahl.
2. Eine Erhöhung der Relativgeschwindigkeit führt zu einer Verringerung der Reibzahl.

Es lässt sich daraus ableiten, dass nach Preston eine gesteigerte Materialabtragsrate durch eine abgestimmte Erhöhung von Druck und Relativgeschwindigkeit, unter der Annahme eines unveränderten Werkzeugaufbaus sowie gleicher Bearbeitungs kinematik, zu erwarten ist. Dies lässt sich durch eine Erhöhung der in den Prozess eingebrachten Abtragsarbeit (vgl. Kap. 3.2.4: Gl. 2) begründen. Untersuchungen von [Ham01] bestätigen diese Annahme, zeigen jedoch, dass der abgestimmten Erhöhung von Druck und Relativgeschwindigkeit enge tribologische Grenzen gesetzt sind.

---

<sup>53</sup> Nach [STR02] als Grenzreibung bezeichnet.

So sind Steigerungen der Materialabtragsrate, in Abhängigkeit des zu polierenden Werkstoffs, um 20 .. 25% realistisch. Nachteilig wirkt sich hierbei die gesteigerte Empfindlichkeit des tribologischen Systems hinsichtlich während des Bearbeitungsprozesses veränderlicher Größen (Verschleiß Poliermittelträger, Temperaturänderung Poliermittel, etc.) aus. Für das Vor- und Durchpolieren rotationssymmetrischer Asphären mittels Bonnet Werkzeugen ist die Änderung der Prozessparameter Druck und Relativgeschwindigkeit bedingt geeignet. Entgegen der Politur mittels Synchrospeed-Kinematik treten trotz Off-axis Anordnung lokale Geschwindigkeitsdifferenzen innerhalb der Kontaktzone auf, welche zu kritischen hydrodynamischen Verhältnissen führen können. Gleiches gilt für lokale Druckunterschiede durch die Formanpassung des Werkzeugs an den Krümmungsverlauf der Asphärenform. Konstante Materialabtragsraten für den gesamten Polierprozess sind dadurch nicht möglich. Weiterhin verbleiben die zwei wesentlichen Nachteile der Neigung zu mittelfrequenten Gestaltabweichungen sowie des hohen Werkzeugverschleißes (vgl. Kap. 4.2.3).

## 5.2 Multiwerkzeuganordnung mit simultanem Eingriff mehrerer Polierköpfe

Eine signifikante Prozesszeitverkürzung verspricht der Ansatz einer Multiwerkzeuganordnung mit simultanem Eingriff mehrerer subaperturiger Polierköpfe. Eine mögliche Anordnung auf Prinzipbasis zeigt Abb. 8. Aus der Darstellung lassen sich eine Reihe von Randbedingungen für den Polierprozess sowie Forderungen an die konstruktive Realisierung ableiten, welche in [Sch14a] detailliert aufgeführt sind. Die folgende Aufzählung zeigt verkürzt die drei wesentlichen Forderungen:

1. Ein simultaner Einsatz beider Polierköpfe im Mittenbereich des Werkstücks ist aufgrund limitierten Bauraums nicht möglich. Die relative Prozesszeitverkürzung ist somit für Werkstücke großer Durchmesser bei simultanem Einsatz beider Polierköpfe am größten.
2. Um die Polierköpfe dem Krümmungsverlauf des Werkstücks nachzuführen, ist je Polierkopf eine motorisch angetriebene Rotationsachse (vgl. Abb. 8:  $Y_{\text{rotWz1}} / Y_{\text{rotWz2}}$ ) erforderlich.
3. Ein Off-axis Polieren außerhalb der x-z-Ebene kann über einen konstanten Winkeloffset der Polierköpfe um die x-Achse (vgl. Abb. 8:  $X_{\text{rotWz1}} / X_{\text{rotWz2}}$ ) oder außerhalb der Flächennormalen des Werkstücks über einen konstanten Winkeloffset durch Drehung um die y-Achse (vgl. Abb. 8:  $Y_{\text{rotWz1}} / Y_{\text{rotWz2}}$ ) realisiert werden.

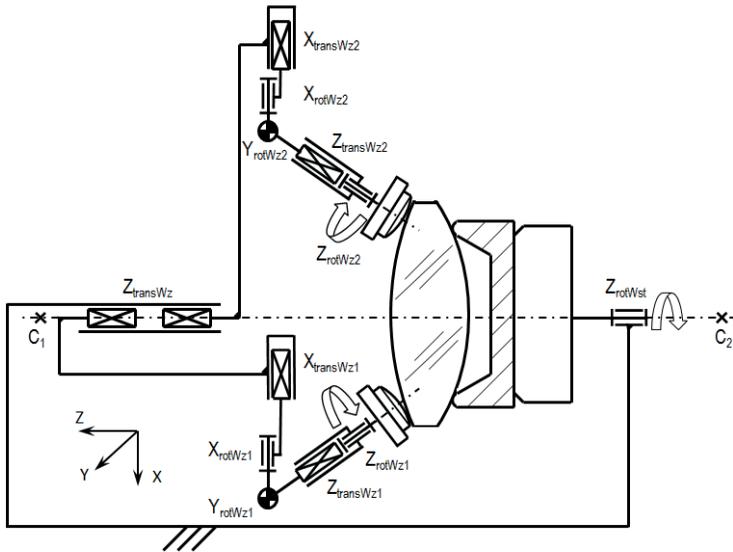


Abb. 8: Technisches Prinzip Multiwerkzeuganordnung nach [Sch14a]

Ausführungen mit drei oder mehr Polierköpfen sind prinzipiell realisierbar. Der typische Durchmesserbereich von Präzisionsasphären erlaubt aufgrund beschränkter Platzverhältnisse jedoch selten den simultanen Eingriff aller Polierköpfe, zu Lasten der angestrebten Prozesszeitverringerung. Weiterhin führt jeder zusätzliche Polierkopf zu einer Steigerung der Komplexität von Mechanik, Steuerung und Programmierung.

Eine Zielgruppe dieses Ansatzes stellen Asphären aus der Genauigkeitsklasse Hochleistungsoptik für Halbleiteranwendungen dar, da diese große Durchmesser und in der Regel moderate Krümmungsverläufe besitzen.

Es lässt sich festhalten, dass der Ansatz einer Multiwerkzeuganordnung mit simultanem Eingriff mehrerer Polierköpfe eine signifikante Prozesszeitverringerung verspricht. Unter Beibehaltung der Prozessparameter des klassischen Bonnet Polishing ist nahezu eine Halbierung der Bearbeitungszeit zu erwarten. Die unter Kapitel 4.2.3 aufgeführten Nachteile der Neigung zu mittelfrequenzen Gestaltabweichungen sowie des hohen Werkzeugverschleißes verbleiben hingegen.

### 5.3 Vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeuge

Die folgende Darstellung der vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeuge ist im Wesentlichen eine verkürzte Darstellung der Betrachtungen aus [Sch14a] sowie deren weiterer, detaillierterer Ausarbeitung in [Sch13] und [Sch14d].

#### VOLLAPERTURIGE POLIERWERKZEUGE

Vollaperturige Polierwerkzeuge, eingesetzt in der Politur sphärischer und planer optischer Bauelemente mittels Synchrospeed-Kinematik, besitzen eine Reihe von Vorteilen.

Die Materialabtragsrate ist linear abhängig vom Flächeninhalt der Kontaktzone, unter Voraussetzung gleichen Drucks und Relativgeschwindigkeit innerhalb der Kontaktzone. Die maximale Materialabtragsrate wird folglich durch ein vollaperturiges Polierwerkzeug erreicht. Weiterhin besitzen vollaperturige Kontaktzonen den Vorteil, dass durch den Polierprozess entstehende Störstrukturen vorwiegend langwellige Anteile aufweisen. Diese lassen sich in anschließenden Korrekturpoliervorgängen unter geringem Aufwand beseitigen.

#### AKTIVE UND ADAPTIVE POLIERWERKZEUGE

Erste theoretische Betrachtungen zu aktiv/adaptiv (vgl. Kap. 3.3) deformierbaren Polierwerkzeugen für den Durchmesserbereich der Geräteoptik sowie kleiner Astrospiegel erschienen um das Jahr 2006 [Lamb06]. Ergebnisse praktischer Untersuchungen folgten wenig später durch [Hu07], [Hu10]. Die vorgestellten Lösungsansätze lassen sich in aktive sowie adaptive Werkzeuge unterscheiden. Die von [Hu07] sowie [Hu10] entwickelte vollaperturige Polierschale mit flächig verteilten Piezoaktoren ermöglicht eine **aktive Formänderung** des Werkzeugs. Der maximale Stellweg von  $30\mu\text{m}$  schränkt die Anwendbarkeit jedoch auf schwache Asphärengometrien ein. Je Werkstückgeometrie ist eine auf den Scheitelradius des Werkstücks angepasste Polierschale erforderlich. [Suz12] sowie [Kat13] verfolgten den Ansatz eines großflächigen Polierwerkzeugs, welches eine **adaptive Formanpassung** zum Durchpolieren rotationssymmetrischer Asphären erlaubt. Der Grundaufbau dieser Werkzeuganordnung besteht aus einer Membran, welche in Abhängigkeit der Werkstückgeometrie (konvex/konkav) mittels Druckluft oder magnetisch mit dem Werkstück in Kontakt gebracht wird. Die in Versuchen erreichten, niedrigen Materialabtragsraten sind geringen Polierdrücken von  $\approx 10\text{kPa}$  zuzuschreiben. Eine Verbesserung des Abtragsprofils verspricht eine Anpassung des Drehzahlverhältnisses von Werkstück zu Werkzeug.

### VOLLAPERTURIGE, AKTIV-ADAPTIVE POLIERWERKZEUGE

Bislang veröffentlichte Ansätze großflächiger Polierwerkzeuge zur Bearbeitung rotationssymmetrischer Asphären besitzen die Funktion einer aktiven Formänderung der Polierschale oder der adaptiven Formanpassung entsprechend des Werkstückoberflächenprofils, jedoch keine Kombination beider Funktionalitäten. Die Vereinigung beider Ansätze zu einem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug verspricht deutliche Vorteile:

1. Entspannung der Anforderungen an die Aktorik hinsichtlich Stellauflösung, Stellgeschwindigkeit sowie Bauraum.
2. Verbleibende Formfehler der aktorisch deformierten Polierschale werden durch den adaptiven Teil des Polierwerkzeugs ausgeglichen. Es stellt sich eine annähernd homogene Druckverteilung innerhalb der Kontaktzone ein, was die Grundvoraussetzung für einen Konstantabtrag ist.
3. Die unter Kap. 4.2.3 vorgestellte Synchrospeed-Kinematik zur Politur sphärischer Optikkomponenten erlaubt einen Konstantabtrag<sup>54</sup> über die volle Apertur des Werkstücks. Eine Adaption dieser Kinematik für die Bearbeitung rotationssymmetrischer Asphären verspricht wesentliche Vorteile hinsichtlich der Beeinflussbarkeit der Abtragsverhältnisse, um einen Konstantabtrag zu erzielen.
4. Die Bearbeitungszeit ist weitestgehend unabhängig vom Flächeninhalt der Werkstückoberfläche, analog der Politur mittels Synchrospeed-Kinematik.

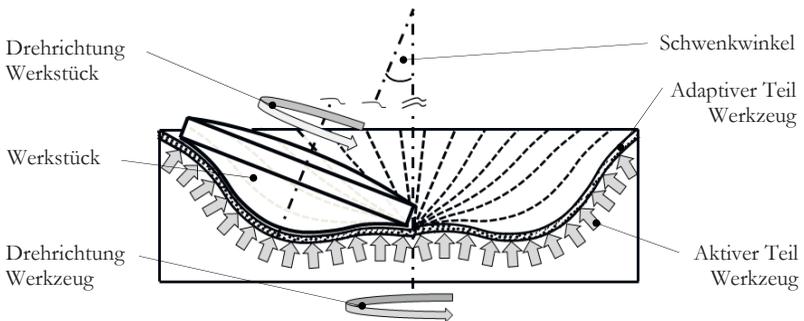


Abb. 9: Prinzipieller Aufbau eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs nach [Sch14a]

<sup>54</sup> Durch Variation des Drehzahlverhältnisses zwischen Werkzeug und Werkstück sowie des eingeschlossenen Schwenkwinkels.

Abb. 9 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs im Vollschnitt. Der gewählte Ansatz zeichnet sich durch eine sinnvolle Kombination aus aktivem und adaptivem Teil des Werkzeugs in serieller Anordnung aus. Dieser Lösungsansatz sieht eine klare Funktionstrennung vor. So erfolgt die Herstellung einer vollaperturigen Kontaktzone zwischen Werkzeug und dem um den Schwenkwinkel gekippten Werkstück durch aktive Deformation der Werkzeuggrundform. Verbleibende Formfehler gleicht der adaptive Teil des Werkzeugs aus.

Der Ansatz eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeugs vermag alle der unter Kap. 4.2.3 aufgeführten Nachteile zu beseitigen.

## 5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Lösungsansätze

Die nachfolgende Bewertung der vorgestellten Lösungsansätze entspricht einer erweiterten Darstellung der unter [Sch14a] diskutierten Inhalte. Sie dient der objektiven Entscheidungsfindung des im weiteren Verlauf der Arbeit zu konkretisierenden Ansatzes. Die Zielstellung einer signifikanten Prozesszeitreduzierung macht es erforderlich, das Potential für den jeweiligen Lösungsansatz abzuschätzen. Weiterhin sind Aussagen hinsichtlich nutzbarer, bestehender Technologien hilfreich, um den zeitlichen sowie finanziellen Entwicklungs- und Realisierungsaufwand bestmöglich abzuschätzen. Eine deutliche Senkung der Herstellkosten erfordert die flexible Anwendbarkeit des Lösungsansatzes für im Idealfall das gesamte Produktportfolio, beziehungsweise einen Großteil des Produktportfolios. Eine Aufschlüsselung der Kriterien sowie Bewertung der Ansätze bietet Tab. 4.

Es zeigt sich, dass keiner der vorgestellten Lösungsansätze in allen Bewertungskriterien überzeugt. Das prozessparameteroptimierte Bonnet Polishing zeigt sich den beiden verbleibenden Lösungsansätzen hinsichtlich des Realisierungsaufwands sowie seiner Flexibilität klar überlegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich entgegen der anderen Ansätze um eine reine Weiterentwicklung des Prozesses handelt. Die alternativen Lösungsansätze sind hingegen Neuentwicklungen.

Tab. 4: Bewertung vorgestellter Lösungsansätze

Kriterium \ Ansatz	Prozessparameter- optimierung	Multiwerkzeug- anordnungen	Vollaperturige, aktiv-adaptive Werkzeuge
<b>Erfolgsaussichten:</b>	o	o	++
- Steigerung Materialabtragsrate	+	+	++
- Vermeidung mittelfrequenter Gestaltabweichungen	--	--	++
- Verschleißminderung Werkzeug	--	--	++
<b>Realisierungsaufwand:</b>	++	-	-
- Nutzung bestehender Technologie	++	+	-
- Finanzieller Aufwand (gering = + +)	++	-	-
- Zeitlicher Aufwand (gering = + +)	++	-	-
<b>Flexibilität:</b>	++	+	o
- Rüstaufwand	+	+	o
- Umrüstkosten	++	+	-
- Anwendbarkeit Produktportfolio	++	o	+

++ sehr gut    + gut    o befriedigend    - ausreichend    -- ungenügend

Zielstellung der Entwicklung stellt eine signifikante Prozesszeitreduzierung und somit Senkung der Herstellkosten dar. Diese kann bei Bewertung der Erfolgsaussichten durch die Prozessparameteroptimierung sowie die Multiwerkzeuganordnungen nicht geleistet werden. Die Weiterverfolgung dieser Ansätze ist somit nicht zielführend. Der verbleibende Lösungsansatz des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs besitzt entgegen der anderen beiden Ansätze Defizite hinsichtlich des hohen Realisierungsaufwands sowie der eingeschränkten Flexibilität.

Schwerpunkt des weiteren Verlaufes dieser Arbeit soll die systematische Konzeption und Realisierung eines Lösungsansatzes für ein vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug bilden.



## 6 Realisierung eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs

### 6.1 Einführung

Die in diesem Kapitel zur Anwendung kommende Herangehensweise zur Lösungsfindung und Ausgestaltung basiert im Wesentlichen auf dem Konstruktiven Entwicklungsprozess (KEP) – einer schrittweisen Abarbeitung definierter Teilaufgaben zur systematischen Lösungsfindung technischer Problemstellungen, die aus der Ilmenauer Konstruktionslehre stammt. Der KEP beginnt bei der Formulierung der Aufgabe, beinhaltet die Definition der zur Bearbeitung erforderlichen Aktivitäten und endet (gestalterisch) mit der technischen Realisierung [Han66]; [Leh03]; [Mb60]. Zur Interpretation und Weiterentwicklung der theoretischen Inhalte sowie deren Überführung in die Konstruktionspraxis trugen Veröffentlichungen innerhalb der vergangenen  $\approx 35$  Jahre, beispielsweise durch [Spe82]; [Hoe83] sowie [Pah06] wesentlich bei. [Son11] bietet eine Zusammenfassung dieser sowie eine systematische Abarbeitung des KEP am Praxisbeispiel, wie in [Leh03] beschrieben. Die Theorie des KEP soll daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit keinen Schwerpunkt bilden. Der unter Kap 4.3 formulierte Handlungsbedarf, zur Entwicklung einer zeit- und kosteneffizienten Fertigungstechnologie rotationssymmetrischer Asphären, erfordert aufgrund der Komplexität der Problemstellung eine systematische und zielführende Bearbeitung anhand des KEP. Schwerpunkte liegen im Folgenden in der Erarbeitung eines Lösungsraums, dessen sinnvoller Einschränkung, der Ausarbeitung Technischer Prinzipie sowie deren Konkretisierung und Ausgestaltung hin zum Konstruktionsentwurf.

### 6.2 Aufgaben und Ziele

Die nachfolgende Darstellung der Aufgaben und Ziele orientiert sich am prinzipiellen Ablauf des KEP (vgl. Abb. 10).



Abb. 10: Phasen und dazugehörige Inhalte des Konstruktiven Entwicklungsprozesses nach [Leh03]

Für das zu entwickelnde vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug sind im Rahmen der Aufbereitungsphase (entsprechend KEP) eine Reihe von Vorüberlegungen/Vorarbeiten zu leisten. Dazu zählen die Konkretisierung der Aufgabenstellung sowie die Ausarbeitung eines Lastenhefts/Pflichtenhefts<sup>55</sup> [Las12]; [Pfl12]. Auf beide notwendigen Vorarbeiten sei an dieser Stelle lediglich verwiesen, da sie aufgrund geringen wissenschaftlichen Anspruchs keinen inhaltlichen Gegenstand im weiteren Verlauf dieser Arbeit bilden sollen.

Die Erarbeitung des Lösungsraums sowie die Ableitung der Funktionsstruktur bauen auf diese Ausführungen auf und sind Schwerpunkt der Prinzipphase.

Durch eine anschließende kombinatorische Variation des Grundprinzips lassen sich bereits in der frühen Konzeptionsphase Lösungsansätze bewerten und nachfolgend ausschließen, respektive präferieren. Nach erfolgter Einschränkung des Lösungsraums schließt sich in der nächsten Abstraktionsstufe die Erarbeitung Technischer Prinzipie an. Deren Ausführung und Anwendbarkeit gilt es hinsichtlich spezifischer Eigenschaften zu bewerten und erfolgt in Abhängigkeit des im Rahmen der Konkretisierung der Aufgabenstellung definierten Entwicklungsziels.

Auf Basis des präferierten Technischen Prinzips entsteht der Gestaltförderungsplan, als Grundlage der nachfolgenden konstruktiven Ausgestaltung, welche den Abschluss der Gestaltungsphase bildet.

Die anschließende Dokumentationsphase beinhaltet die Erstellung des Zeichnungssatzes, der Stücklisten, der Montageanleitung, der Justiervorschrift, der Prüfvorschrift sowie gegebenenfalls weiterer erforderlicher Dokumente. Die letzte Phase des KEP soll im Rahmen dieser Arbeit analog der Aufbereitungsphase keinen Schwerpunkt bilden.

## 6.3 Prinzipphase

### 6.3.1 Funktionsstruktur

Die Ausarbeitung der Funktionsstruktur versteht sich als erste Teilaufgabe der Prinzipphase nach KEP. Sie dient nach [Leh03] der Darstellung aller zur Funktionserfüllung erforderlichen Informations-, Energie- und Materialflüsse sowie deren Bezeichnung und Richtung. Erforderliche Stellgrößen/Prozessparameter, Medienversorgungen- und Zuführungen sowie mechanische

---

<sup>55</sup> Das Lastenheft stellt eine Auflistung der für das Technische System/Gebilde erforderlichen Funktionen dar. Die Erstellung des Lastenhefts erfolgt in der Regel durch den Kunden. Das Pflichtenheft baut auf das Lastenheft auf und stellt eine Interpretation der zu leistenden Entwicklung durch den Auftragnehmer dar.

An- und Einbindungen lassen sich grafisch auf Basis des Lasten- und Pflichtenhefts ableiten und darstellen.

Für die Entwicklung eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs auf Basis der Synchrospeed-Kinematik bestehen prozessbedingte Randbedingungen. Daher erweist es sich als vorteilhaft, auf eine Entwicklung der Werkzeugperipherie zu verzichten und stattdessen auf eine bestehende Maschinenbasis zurückzugreifen. Synchrospeed Maschinenaufbauten, deren CNC Steuerung und Software sowie zur Poliermittelaufbereitung/-zuführung erforderliche Zusatzaggregate sind kommerziell frei verfügbar. Deren Verwendung erfordert die Integration des zu entwickelnden Polierwerkzeugs in ein bestehendes, abgeschlossenes technisches System. Verfügbare Bauräume, Standards bestehender Anschlussmaße sowie Arbeitsabläufe sind vorgegeben und nur bedingt veränderbar. Den typischen Aufbau sowie die Achsdeklarationen einer Poliermaschine mit Synchrospeed-Kinematik veranschaulicht die Maschinenstruktur nach Abb. 11.

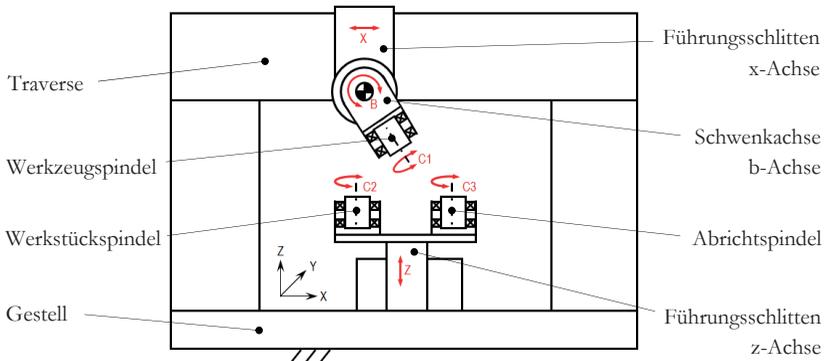


Abb. 11: Typische Maschinenstruktur einer Poliermaschine mit Synchrospeed-Kinematik

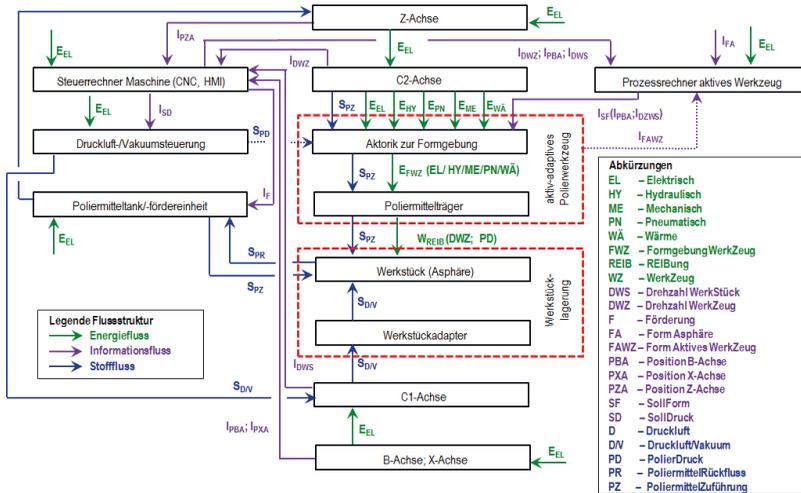


Abb. 12: Funktionsstruktur zur Integration eines vollperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs in eine SynchroSpeed Maschinenbasis

Abb. 12 zeigt die Funktionsstruktur eines in eine SynchroSpeed Maschinenbasis integrierten vollperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. Die Deklaration der Achsen korreliert mit der in Abb. 11 dargestellten Maschinenstruktur. Eine Aufschlüsselung der Informations-, Energie- und Medienflüsse der Funktionsstruktur bietet die nachfolgende Diskussion.

## INFORMATIONSFLOSS

Die aus der Sphärenpolitur stammende Maschinenbasis erfüllt Positioniergenauigkeiten im unteren einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich für Linearachsen sowie Winkelabweichungen im einstelligen Winkelminutenbereich für Schwenkachsen. Ein Regelkreis je Maschinenachse ist erforderlich. Entsprechend verfügt jede positionierbare Maschinenachse über ein Längen-/Winkelmesssystem zur Rückführung der Regelabweichung als Eingangsgröße. Die Werkzeug- als auch Werkstückspindel zählen zu den nicht positionierbaren Rotationsachsen. Eine Erfassung und Korrektur ihrer Drehzahlen ist hinreichend. Ein Großteil der in der Funktionsstruktur dargestellten Informationsflüsse ist der SynchroSpeed Maschinenbasis zuzuordnen.

Das vollperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug verfügt über einen separaten Prozessrechner, welcher seine Eingangsgrößen über den Steuerrechner der SynchroSpeed Maschinenbasis bezieht. In Abhängigkeit des im Anschluss zu

entwickelnden Lösungsansatzes ist ein Regelkreis sowie die dafür erforderliche Messtechnik zur Formkorrektur des aktiven Teils des Polierwerkzeugs vorzusehen.

## ENERGIEFLUSS

Jede in Abb. 12 dargestellte Maschinenachse erfordert mechanische Antriebe. Die zu verwendende Synchrospeed Maschinenbasis nutzt einen Gleichstrommotor in Verbindung mit einem Harmonic Drive<sup>56</sup> Getriebe zur Betätigung der Schwenkachse sowie Gleichstrommotoren mit Kugelumlaufspindeln für Linearrachsen. Für die geforderten Genauigkeiten ist dieses Prinzip ausreichend, da mechanisch sehr robust und stabil, kostengünstig und steuerungstechnisch simpel implementierbar. Die Diskussion der auf die Maschinenbasis zurückzuführenden Energieflüsse soll keinen weiteren Inhalt dieser Arbeit bilden.

In Abhängigkeit des zu verfolgenden Lösungsansatzes sind für die Anordnung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs Möglichkeiten zur Übertragung verschiedener Energieflüsse vorzusehen. Eine frühzeitige Festlegung der Art des Energieflusses hätte vorzeitige Einschränkungen der Antriebsart/des Wirkprinzips zur Folge und würde den Lösungsraum vor dessen Erarbeitung determinieren. Folglich sind in der Maschinenbasis Durchführungen und Übertragungselemente für die jeweiligen Energieflüsse vorzuhalten. Nach [Leh03] lassen sich diese in elektrische, hydraulische, pneumatische und mechanische Energie sowie Wärmeenergie unterteilen (vgl. Abb. 12).

## STOFFFLUSS

Die Maschinenbasis erfordert zur Funktionserfüllung keine separaten Stoffflüsse, jedoch ist das zur Politur erforderliche Poliermittel bereitzustellen. Für die Synchrospeed Maschinenbasis bedeutet dies die Zuführung des temperierten Poliermittels in die Kontaktzone sowie das anschließende Auffangen und Rückführen an die Zusatzaggregate zur Aufbereitung und Temperierung. Je nach Ausführung der Maschine ist die Verwendung mehrerer Poliermittel und Reinigungsmittel in separaten Versorgungskreisläufen möglich, im vorliegenden Anwendungsfall jedoch nicht erforderlich.

---

<sup>56</sup> Harmonic Drive Getriebe zählen zu den Wellgetrieben und zeichnen sich unter anderem durch ihre Spielfreiheit, ihre kompakte Bauweise sowie ihren einfachen mechanischen Aufbau aus. Diese Getriebe werden ausschließlich durch die Harmonic Drive AG hergestellt und vertrieben. [Har15]

### 6.3.2 Lösungsraum

Für die Erarbeitung des Lösungsraums bietet sich eine Untersetzung der Gesamtaufgabe in zwei Teilaufgaben an. Zum einen sind Lösungsansätze zur Realisierung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs zu erarbeiten. Die zweite Teilaufgabe besteht in der Erarbeitung eines Ansatzes zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts. Die Lösungsansätze der jeweiligen Teilaufgaben gilt es im Anschluss zu vergleichen und zu bewerten.

#### VOLLAPERTURIGES, AKTIV-ADAPTIVES POLIERWERKZEUG

Der unter Kap. 5.3 vorgestellte Ansatz zeigt eine mögliche Anordnung der aktiven und passiven Funktionselemente des Werkzeugs und stellt eine mögliche Teillösung dar. Im Folgenden gilt es den Lösungsraum ganzheitlich und systematisch zu erfassen. Eine schrittweise Konkretisierung der Lösungsansätze (vgl. Abb. 13) erlaubt eine sinnvolle Einschränkung des Lösungsraums durch Diskussion und Bewertung der Teillösungen.

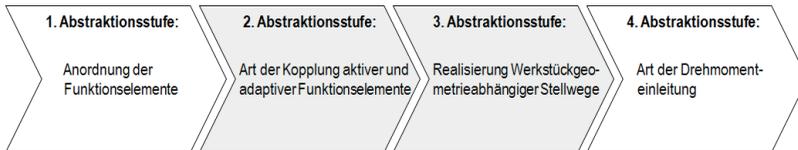


Abb. 13: Abstraktionsstufen zur Einschränkung des Lösungsraums

- (1) Der Begriff des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs führt aus, dass der Werkzeugaufbau eine vollaperturige Kontaktzone ausbildet und mindestens über ein aktives als auch ein adaptives Funktionselement verfügt. Diese in Kombination lassen eine parallele als auch serielle Anordnung zu, wie Abb. 14 veranschaulicht.

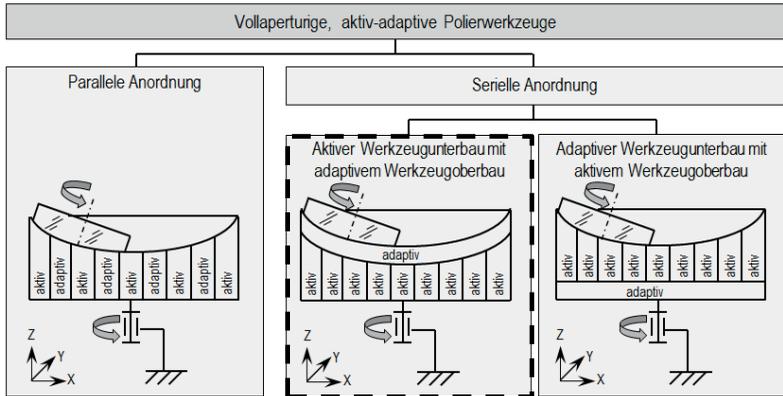


Abb. 14: Kombinationsmöglichkeiten aktiver und adaptiver Werkzeugkomponenten

Eine erste Einschränkung des Lösungsraums ist bereits in dieser Abstraktionsstufe möglich. Die unter Kap. 5.3 genannten wesentlichen Vorteile eines aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs sind durch parallele Anordnung aktiver und adaptiver Funktionselemente nicht erfüllbar. Diese Variante lässt sich somit ausschließen.

Die serielle Anordnung erlaubt hingegen eine weitere Variation des strukturellen Aufbaus. Vorteile hinsichtlich des Ausgleichs verbleibender Positionierabweichungen des aktiven Teils durch den adaptiven Werkzeugteil versprechen beide Ansätze. Ebenso ermöglichen beide seriellen Anordnungen eine homogene Druckverteilung und erfüllen somit die Grundvoraussetzung für einen Konstantabtrag. Für den Ansatz mit adaptivem Werkzeugunterbau ist damit zu rechnen, dass die begrenzte Miniaturisierbarkeit der aktiven Funktionselemente zur Ausbildung über die Kontaktzone flächig verteilter Stützstellen führt. Diese besitzen zwar alle einen identischen Arbeitsdruck, jedoch stellt jede Stützstelle ein örtlich begrenztes und steifes Subaperturwerkzeug dar. Diese neigen wie in Kap. 4.2.3 veranschaulicht zur Generierung mittelfrequenter Gestaltabweichungen. Diese Anordnung ist folglich nicht zu präferieren und erfährt im weiteren Verlauf der Arbeit keine weitere Betrachtung. Die Anordnung mit aktivem Werkzeugunterbau und adaptivem Werkzeugoberbau verspricht die Erfüllung aller Anforderungen und ist folglich zu bevorzugen.

- (2) Der Lösungsansatz eines aktiven Werkzeugunterbaus mit adaptivem Werkzeugoberbau erlaubt eine weitere Detaillierung hinsichtlich Kinematik und Dynamik der aktiven Funktionselemente. Aktiv ist hierbei nicht zwingend mit aktorisch gleichzusetzen. Vielmehr zielt es auf die aktive Deformation des Werkzeugoberbaus nach Vorbild des Werkzeugunterbaus zur Nachbildung der um den Schwenkwinkel gekippten Asphärengometrie ab. Werden die aktiven Teile des Werkzeugunterbaus aktorisch realisiert, so bietet sich die Verwendung einer Vielzahl von Linearaktoren an. Alle Aktoren gilt es dabei flächig verteilt in den Werkzeugunterbau zu integrieren. Der aus Prinzipsicht einfachste Ansatz besteht in der indirekten Kopplung zwischen aktiven und adaptiven Funktionselementen (vgl. Abb. 15).

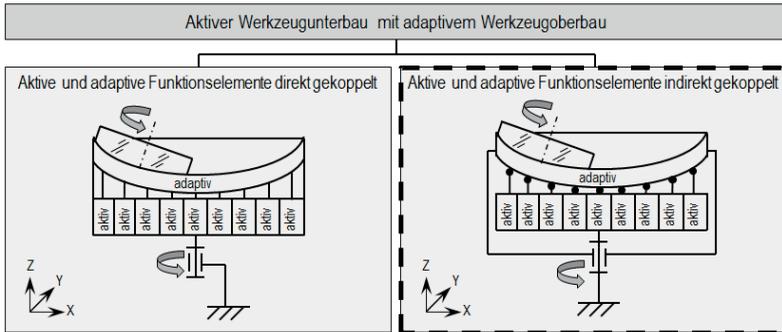


Abb. 15: Art der Kopplung aktiver und adaptiver Funktionselemente

Die Nachbildung der um den Schwenkwinkel gekippten Asphärengometrie erfordert eine möglichst hohe Stützstellendichte. In Abhängigkeit der Querschnittsfläche (senkrecht zur Bewegungsrichtung) eines jeden aktiven Funktionselements/Aktors sowie des Werkstückdurchmessers, ist die Annahme mehrerer einhundert bis eintausend aktiver Funktionselemente/Aktoren realistisch. Aufgrund der Synchrospeed-Kinematik führen sowohl Werkstück als auch Werkzeug eine Rotationsbewegung durch. Direkt gekoppelte aktive Funktionselemente in aktorischer Ausführung (vgl. Abb. 15: Aktive und adaptive Funktionselemente direkt gekoppelt) sind somit im Verbund rotatorisch zu bewegen. Unabhängig der Antriebsart sind Drehdurchführungen für Kabel zur Versorgung und/oder Steuerung der Aktoren erforderlich, welche bis zu einem bestimmten Grad miniaturisierbar sind. Limitierend für diesen Lösungsansatz ist vielmehr der erforderliche konstruktive Aufwand zur Versorgung aller Aktoren. Dieser steht in einem linearen Verhältnis zur Anzahl der Aktoren. Jede Durchführung bildet hierbei eine Fehlerquelle hinsichtlich technischer Ausfallwahrscheinlichkeit sowie ihres Übertra-

gungsverhaltens. So sind für elektrische Drehdurchführungen hochfrequente Störungen sowie Leckverluste für Hydraulik und Pneumatik zu erwarten. Aus Sicht dynamischer Anforderungen ist die Aktorik zur Nachbildung des lokalen Höhenprofils mit einem Vielfachen der Drehzahl des Werkzeugs anzusteuern.

Der Ansatz einer indirekten Kopplung aktiver und adaptiver Funktionselemente verspricht im Vergleich zur direkten Kopplung eine Reihe signifikanter Vorteile. So ist die mechanische Komplexität durch Wegfall der Drehdurchführung bedeutend geringer. Des Weiteren bestehen Anforderungen an die Dynamik des Systems ausschließlich bei Schwenkwinkeländerungen. Wird der Schwenkwinkel konstant gehalten, ist das System nach einmaligem Einstellen der Sollkontur als statisch zu betrachten. Im einfachsten Fall erlaubt dies den Verzicht auf eine aktorische Ausführung des Werkzeugunterbaus. Wird die Sollkontur in den Werkzeugunterbau statisch so eingepreßt, dass diese die um den Schwenkwinkel gekippte Asphärengometrie nachbildet, so erfährt der adaptive Werkzeugoberbau bei Rotation eine aktive Formänderung. Bei Verwendung eines aktorischen Werkzeugunterbaus mit selbstsperrender Aktorik kann diese bei konstantem Schwenkwinkel zur Reduzierung der thermischen Last deaktiviert werden. Wesentlicher Nachteil dieses Ansatzes besteht in der Integration je eines Kopplungselements pro Aktor. Diese dienen der Übertragung der z-Position (vgl. Abb. 14: Aktive und adaptive Funktionselemente indirekt gekoppelt) jedes Aktors und erfordern entsprechend den Freiheitsgrad 5 ( $FG = 5$ ).

Die Gegenüberstellung beider Lösungsansätze nach Abb. 15 zeigt, dass die Variante der indirekten Kopplung aktiver und adaptiver Funktionselemente der direkten Kopplung vorzuziehen ist. Eine detaillierte Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der direkten/indirekten Kopplung aktiver und adaptiver Funktionselemente bietet Tab. 5.

Tab. 5: Bewertung direkt und indirekt gekoppelter Funktionselemente

Kriterium \ Ansatz	Funktionselemente direkt gekoppelt	Funktionselemente indirekt gekoppelt
Dynamische Anforderungen (gering = + +)	--	++
Miniaturisierbarkeit	-	+
Konstruktiver Aufwand (gering = + +)	--	o
Thermale Last (gering = + +)	--	+
Ausfallwahrscheinlichkeit (gering = + +)	-	o

++ sehr gut    + gut    o befriedigend    - ausreichend    -- ungenügend

- (3) In Abhängigkeit der Werkstückgeometrie bestehen unterschiedliche Anforderungen an die maximal zu leistenden Stellwege der aktiven Funktionselemente/Aktorik. Wesentliche Kenngrößen sind hierbei der sphärische Ersatzradius, die Asphärität (vgl. Kap. 3.3) sowie der Werkstückdurchmesser. Inhalt der 3. Abstraktionsstufe soll die nachfolgende Diskussion zweier Lösungsansätze sowie deren Bewertung zur weiteren Einschränkung des Lösungsraums bilden.

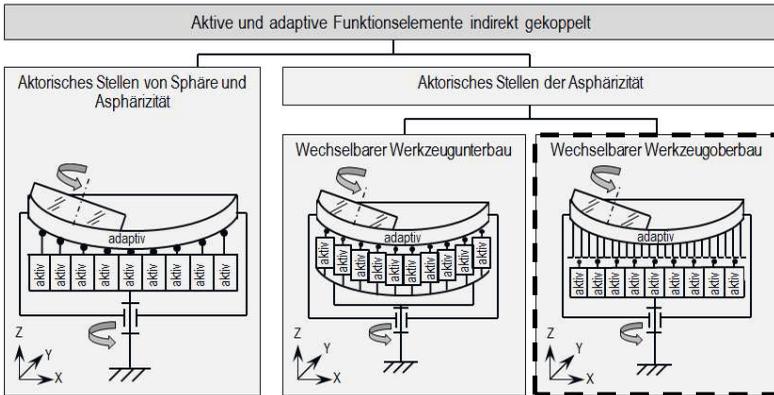


Abb. 16: Realisierung werkstückgeometrieabhängiger Stellwege

Abb. 16 zeigt Möglichkeiten zur Realisierung erforderlicher Stellwege. Wird die Form einer um den Schwenkwinkel gekippt liegenden rotationssymmetrischen Asphäre ausschließlich durch den aktiven Teil des Werkzeugs nachgebildet, ist das Polierwerkzeug flexibel im Rahmen vorab festgelegter Asphärengeometrien anwendbar. Dieser wesentliche Vorteil erfordert jedoch in gleichem Zuge, dass Stellwege im zweistelligen mm-Bereich bei zulässigen Positionsabweichungen im einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich zu leisten (vgl. Abb. 16: Aktorisches Stellen von Sphäre und Asphärität) sind.

Einen weiteren Lösungsansatz beschreibt die sphärische Vorformung des Werkzeugs in Abhängigkeit des erforderlichen sphärischen Ersatzradius. Aufgrund des seriellen Aufbaus sind zwei Variationen möglich. So lassen sich die flächig verteilten Aktoren beispielsweise auf einem sphärischen Unterbau platzieren (vgl. Abb. 16: Wechselbarer Werkzeugunterbau). Dessen Krümmungsradius kann entsprechend der Werkstückgeometrie angepasst sein, um den Stellbereich/ Stellweg der aktiven Funktionselemente zu reduzieren. Weiterhin bieten sich Schnittstellen zum Austausch des sphärischen Unterbaus zum flexiblen Einsatz des Werkzeugs an. Die Versorgung der Aktorik durch den sphärischen Unterbau erfordert hingegen aufwändige

und komplexe Konstruktionslösungen. Die zweite Variante zeichnet sich durch eine Umkehr des Funktionsprinzips nach [Leh04] aus. Sie verfügt über einen dem sphärischen Ersatzradius entsprechend vorgeformten, wechselbaren Werkzeugoberbau in Form geführter Zylinderstifte, nachfolgend als ‘Nadelkissen’ bezeichnet. Die Bearbeitung unterschiedlicher Asphärengometrien erfordert eine Möglichkeit zum Wechsel des Nadelkissens durch eine geeignete Wechselschnittstelle. Weiterhin ermöglicht der Aufbau die Konditionierung des Poliermittelträgers (aufgrund Verschleiß) außerhalb der Maschine durch Verwendung mehrerer, identischer Nadelkissen. Dies erlaubt eine Reduzierung der Rüstzeit, da das Abrichten des Poliermittelträgers parallel zur Polierbearbeitung erfolgen kann. Für den weiteren Entwicklungsverlauf bietet sich die Ausgestaltung der Variante des wechselbaren Werkzeugoberbaus gegenüber den erstgenannten Lösungsansätzen an.

- (4) Für die Art der Drehmomenteinleitung lassen sich für das zu entwickelnde Polierwerkzeug zwei Lösungsansätze ableiten. Unabhängig dessen ist es erforderlich, die Führungselemente des Nadelkissens anzutreiben. Zum einen, um Querkräfte auf die Nadeln zu reduzieren und zum anderen, um Relativbewegungen der Nadeln zum adaptiven Teil des Werkzeugs auszuschließen. Eine vereinfachte Darstellung des wechselbaren Werkzeugoberbaus zeigt Abb. 17.

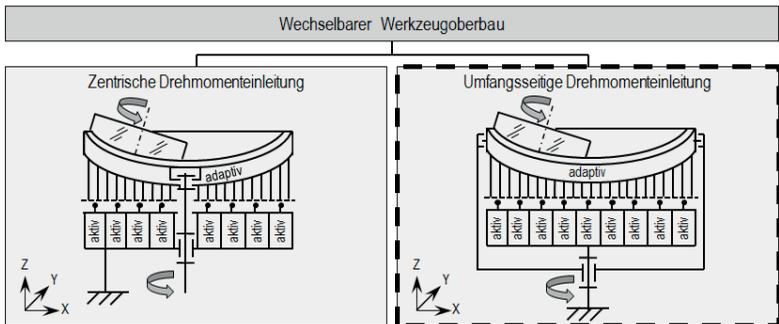


Abb. 17: Varianten zur Drehmomenteinleitung in den Werkzeugoberbau

Im ersten Lösungsansatz erfolgt die Drehmomenteinleitung in den adaptiven Teil des Werkzeugs zentrisch zur Rotationsachse des Oberbaus (vgl. Abb. 17: Zentrische Drehmomenteinleitung). Aufgrund des zu übertragenden Drehmoments sind der Miniaturisierbarkeit an dieser Stelle Grenzen gesetzt. Es ist davon auszugehen, dass der Scheitel des Werkzeugs keine Integration aktiver als auch adaptiver Funktionselemente erlaubt.

Dennoch bietet dieser Ansatz den signifikanten Vorteil, dass die zur Drehmomentübertragung erforderliche Welle hohl ausgeführt werden kann, um so eine Mittenversorgung<sup>57</sup> zu gewährleisten.

Der zweite Lösungsansatz zeichnet sich durch eine umfangsseitige Drehmomenteinleitung aus. Der adaptive Teil des Werkzeugs ist hierbei um den gesamten Umfang flächig in axialer Richtung zu klemmen. Diese ringförmige Einspannung erlaubt eine homogene Einleitung der Umfangskraft und eignet sich besonders für das anzutreibende Funktionselement mit gewollt niedriger Scher- und Druckfestigkeit. Der zweite Lösungsansatz erlaubt entgegen des ersten keine Integration einer Mittenschmierung, verfügt dafür im Gegenzug über eine vollaperturig homogene Verteilung aktiver und adaptiver Funktionselemente.

Der weitere Entwicklungsverlauf des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs baut aufgrund der aufgeführten Vorteile auf den Lösungsansatz einer umfangsseitigen Drehmomenteinleitung (vgl. Abb. 17: Umfangsseitige Drehmomenteinleitung) auf.

## HERSTELLUNG DES WERKZEUG-WERKSTÜCK KONTAKTS

Zur Realisierung des für einen Polierabtrag erforderlichen Flächenkontakts zwischen Werkstück und Poliermittelträger (vgl. Kontaktzone) existieren in Abhängigkeit der Werkstückgeometrie verschiedene Ansätze. Generell lässt sich formulieren, dass mindestens ein nachgiebiges Funktionselement erforderlich ist, über dessen Steifigkeit der Polierdruck eingestellt wird.

In der Politur sphärischer Optikkomponenten mittels der Synchro-speed-Kinematik ist das Werkzeug in Richtung seiner Rotationsachse steif gelagert (vgl. Abb. 18). Die Zustellung des Werkstücks an das Werkzeug sowie die Erzeugung des Polierdrucks erfolgen mittels einer vollaperturigen, druckluftbeaufschlagten Elastomermembran. Das Werkstück liegt dabei auf der Membran und wird seitlich durch einen Kunststoffring geführt. Der Innendurchmesser des Kunststoffrings ist in Abhängigkeit des Werkstückdurchmessers um etwa 0,3mm größer ausgelegt. Diese pragmatische Lösung ist zulässig, da für sphärische Optiken geringe Anforderungen an deren Lageorientierung bestehen.

---

<sup>57</sup> Der Begriff 'Mittenversorgung' oder 'Mittenschmierung' stammt aus der Sphärenpolitur mittels Synchro-speed-Kinematik. Für Werkstückdurchmesser ab 50mm bietet es sich je nach Glassorte, Art des Poliermittelträgers und verwendeten Poliermittels an, zusätzliches Poliermittel bereitzustellen. Dessen Zuführung erfolgt in der Regel über eine zentrische Bohrung durch die Polierschale. Eine Verteilung des Poliermittels wird durch die Rotation des Werkzeugs und die somit auftretende Zentrifugalkraft sichergestellt.

Diese sind auf den Effekt der Paarung zweier sphärischer Flächen zurückzuführen, in welcher die Verbindung derer Krümmungsmittelpunkte die optische Achse repräsentiert. Mögliche Randdickenunterschiede lassen sich nach Abschluss der Politur durch einen Zentriervorgang<sup>58</sup> beseitigen.

In der Politur rotationsymmetrischer Asphären sowie Freiformoptiken mittels Bonnet Werkzeuganordnungen bestehen strenge Lageanforderungen an das optische Bauelement. Entgegen der Sphärenpolitur haben im Polierprozess auftretende Lagefehler direkten Einfluss auf die Form des Werkstücks. Die Lagerung des Werkstücks erfolgt generell formsteif, in der Regel durch Aufkitzen des Werkstücks auf eine Ringschneide mit geeigneten Schnittstellen<sup>59</sup> zur verwendeten Bearbeitungsmaschine (vgl. Abb. 18). Das Bonnetwerkzeug ist von innen druckluftbeaufschlagt. Aufgrund der Kompressibilität des Gases kann das Werkzeug entsprechend der Werkstückgeometrie sowie des Innendrucks nachgeben und somit im Bereich des Flächenkontakts die Kontaktzone ausbilden. Das Werkzeug fungiert dabei als das nachgiebige Funktionselement.

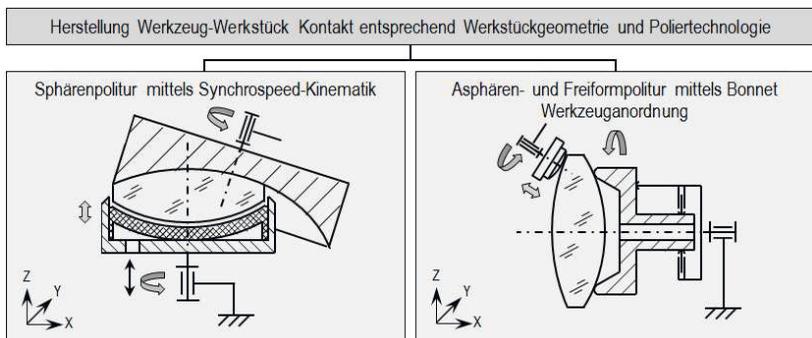


Abb. 18: Arten zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts entsprechend verwendeter Technologien

Ein vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug erfordert zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts eine Kombination der genannten Lösungsansätze aus der Politur mittels Synchrospeed-Kinematik sowie der Politur mittels Bonnet Werkzeuganordnungen. Hierfür sind die zwei nachfolgend dargestellten Lösungsansätze nach Abb. 19 zu diskutieren.

<sup>58</sup> Nach aktuellem Stand der Technik verfügbare Zentriertechnologien sind das Spannzentrieren sowie das Steckzentrieren. Deren Wirkprinzip als auch Kinematik sind in [Fra06] detailliert beschrieben.

<sup>59</sup> Gängige Schnittstellen sind zylindrische Dorne für Hydrodehnspannfutter zur Aufnahme rotationsymmetrischer Werkstücke sowie Nullpunktspannsysteme oder zylindrische Dorne mit Azimutzuordnung für Freiformoptiken.

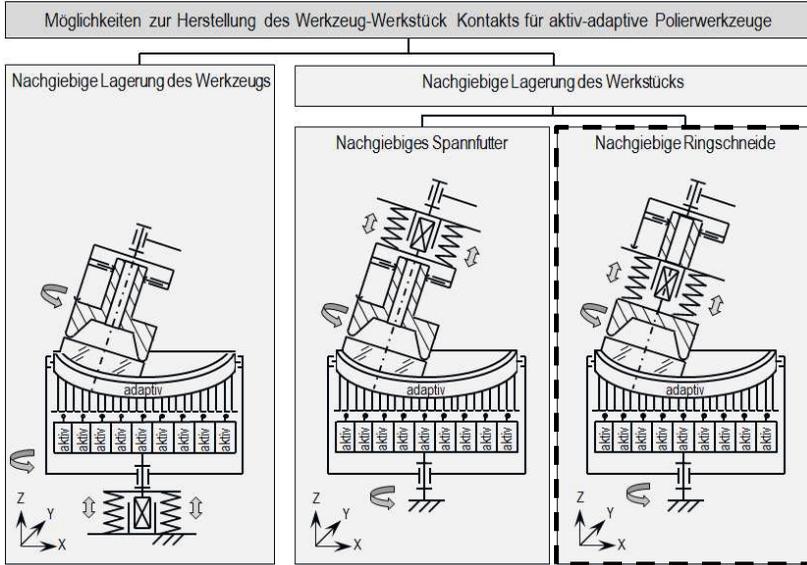


Abb. 19: Ansätze zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts für vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeuge

Der erste Lösungsansatz mit in z-Richtung nachgiebiger Lagerung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs ermöglicht die Weiterverwendung klassischer Ringschneiden unter Beibehaltung der in Richtung der optischen Achse steifen Werkstücklagerung. Als nachteilig ist die aufwändige Lagerfassung der Werkstückoberfläche zur Herstellung des Flächenkontakts zwischen Werkzeug und Werkstück zu bewerten. In Abhängigkeit des einzustellenden Polierdrucks ist eine simultane Bewegung des Werkzeugs in x- als auch z-Richtung erforderlich. Das Verhältnis aus Zustellbewegung in z- und x-Richtung ist hierbei vom eingeschlossenen Schwenkwinkel zwischen der Rotationsachse des Werkzeugs und des Werkstücks abhängig.

Ein zweiter Lösungsansatz beschreibt die steife Lagerung des Werkzeugs in z-Richtung. Das Werkstück hingegen ist in Richtung seiner Rotationsachse nachgiebig gelagert. Die konstruktive Ausgestaltung erlaubt zwei Varianten. Zur weiteren Verwendung klassischer Ringschneiden mit zentrischer Klemmung, beispielsweise in Form eines Hydrodehndorns<sup>60</sup>, ist die Funktionalität der

<sup>60</sup> Ein Hydrodehndorn besitzt eine zylindrische Referenzfläche zur zentrischen Spannung in einem Hydrodehnspannfutter. Dieses Spannsystem erlaubt das reproduzierbare Einwech-

Nachgiebigkeit (in Richtung der Rotationsachse) zwischen Spannfutter und Werkstückspindel zu integrieren (vgl. Abb. 19: Nachgiebiges Spannfutter). Als wesentliche Nachteile dieses Ansatzes sind der zu erwartende komplexe Aufbau sowie die freie Distanz zwischen Führung und Werkstückoberfläche zu nennen.

Durch die Führung eingebrachte Verkippungen wirken aufgrund ihres Hebelarms an der Werkstückoberfläche als Querversatz und sind als kritisch zu bewerten.

Die zweite Variante der nachgiebigen Werkstücklagerung sieht eine Integration der Führung in den Hydroehndorn vor (vgl. Abb. 19: Nachgiebige Ringschneide). Dies erlaubt eine möglichst geringe freie Distanz zwischen Werkstückoberfläche und Führung sowie größtmögliche Führungslänge. Für die nachfolgende Konkretisierung der Lösungsansätze in Form Technischer Prinzipie ist die Variante der nachgiebigen Ringschneide zu verfolgen.

### 6.3.3 Technische Prinzipie

Die nachfolgende Erarbeitung Technischer Prinzipie sieht eine Aufteilung (analog Kap. 6.3.2) der Gesamtaufgabe in zwei abgegrenzte Teilaufgaben vor. Die erste umfasst Prinziplösungen eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs, die zweite dient dem Entwurf Technischer Prinzipie zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts. Ein anschließender Vergleich mit Bewertung erlaubt die Auswahl des jeweilig präferierten Prinzipis und bildet die Grundlage des nachfolgenden Gestaltförderungsplans.

#### **VOLLAPERTURIGES, AKTIV-ADAPTIVES POLIERWERKZEUG**

Der unter Kapitel 6.3.2 erarbeitete Lösungsraum ermöglicht einen effektiven Ausschluss praktisch nicht relevanter oder praktisch nicht umsetzbarer Lösungsansätze für das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug. Die folgende Ausarbeitung Technischer Prinzipie ist als Konkretisierung des präferierten Lösungsansatzes zu verstehen.

Das Flächenmuster des Nadelkissens, des aktiven Teils sowie die Realisierung der Koppelstelle zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau sollen in diesem Abschnitt nicht betrachtet werden. Deren Realisierungsvarianten sind Inhalt des nachfolgenden Gestaltförderungsplans.

---

seln von Werkstücken, Prüflingen und Werkzeugen. Typische Anwendungsfelder sind Fräs-, Schleif- und Poliermaschinen. [Sch16]

Tab. 6: Kombinationsmöglichkeiten der Einzelfunktionen Nadelführung und -rückstellung

		Nadelführung	
		Segmentiert	Einfach
Nadelrückstellung	Magnetkraft	Führungsarray segmentiert mit Permanentmagnetarray	Führungsarray einfach mit Permanentmagnetarray
	Federkraft	Führungsarray segmentiert mit Schraubendruckfederarray	Führungsarray einfach mit Schraubendruckfederarray

Die nachfolgend dargestellten Ansätze zeigen jeweils zwei Lösungen zur Realisierung zweier Einzelfunktionen, der Nadelführung sowie der Nadelrückstellung. In den Technischen Prinzipien sind diese frei kombinierbar (vgl. Tab. 6). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll aus der Vielzahl erarbeiteter Technischer Prinzipie (vgl. [Sch13]) die Diskussion auf die beiden präferierten Prinzipie beschränkt werden. Die verbleibenden 12 Varianten erfahren keine Betrachtung.

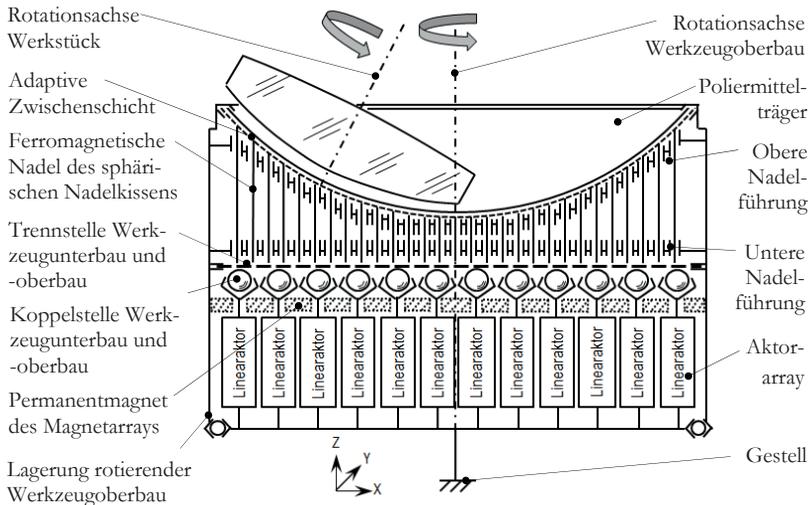


Abb. 20: Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug mit segmentiertem Führungsarray und Permanentmagnetarray

Abb. 20 zeigt eine mögliche Ausführungsform des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. Das dargestellte Prinzip zeichnet sich durch die segmentierte Führung aller Nadeln im rotierenden Werkzeugoberbau aus. Durch die sphärische Grundform der oberen Nadelführung nutzt jede Nadel die maximale Führungslänge, um Verkippungen und elastische Biegung durch Querkräfte zu minimieren<sup>61</sup>. Der gewählte Ansatz erfordert aufgrund seiner Überbestimmtheit zusätzliche Maßnahmen, um die Funktion sicherzustellen. Diese können die gemeinsame Bearbeitung der Bohrungen in oberer und unterer Nadelführung und/oder die Toleranzauslegung der Bohrungen zum Nadelaußendurchmesser sein, um ein Klemmen der Nadeln bei Bewegung in z-Richtung auszuschließen.

Die korrekte Nachbildung der um den Schwenkwinkel gekippten Asphärengometrie ist Grundvoraussetzung für die Wirksamkeit und Funktion des erarbeiteten Verfahrensansatzes. Erreicht wird dies durch Überlagerung des in den Werkzeugunterbau statisch eingepprägten asphärischen Anteil mit dem sphärischen Ersatzradius. Jede Nadel erfordert bei oszillierender (translatorischer) Bewegung eine Rückstellkraft<sup>62</sup>, welche der Trägheitskraft der jeweiligen Nadel entgegenwirkt. Das Technische Prinzip nach Abb. 20 sieht dafür ein Array aus Permanentmagneten vor. Dieses ermöglicht einen ständigen Kontakt der Nadeln mit dem Werkzeugunterbau, respektive der dazwischen liegenden Trennstelle. Grundvoraussetzung zur Funktionserfüllung nach diesem Ansatz ist der Einsatz ferromagnetischer Nadeln.

Der Aufbau nach Abb. 21 nutzt ein Array aus Schraubendruckfedern, um den Kontakt der Nadeln mit dem Werkzeugunterbau sicherzustellen. Für die maximale Nadeldichte kann dies limitierend sein, jedoch stellt es kein frühzeitiges Ausschlusskriterium des Ansatzes dar. Entgegen des in Abb. 20 dargestellten Technischen Prinzips verfügt der Ansatz nach Abb. 21 über ein einfaches Führungsarray. Dieses bietet jeder Nadel, unabhängig von deren Länge und Position im Werkzeugoberbau, die gleiche Führungslänge. Zusätzlich vermeidet dieser Ansatz durch seine einfache Zylinder-Zylinder Paarung Überbestimmtheiten und vereinfacht somit die konstruktive Umsetzung.

---

<sup>61</sup> Die auf die jeweilige Nadel wirkende Querkräfte ist abhängig vom Abstand der Nadel zur Rotationsachse des Werkzeugoberbaus sowie dem sphärischen Ersatzradius des Nadelkissens. Das sich ergebende Kräfte Dreieck lässt sich trigonometrisch über den Kosinus des eingeschlossenen Winkels beschreiben (vgl. Anhang A).

<sup>62</sup> Die Rückstellkraft ist hierbei größer oder gleich der maximal auftretenden Trägheitskraft auszuliegen. Diese berechnet sich aus dem Produkt der Masse einer Nadel sowie der in z-Richtung maximal wirkenden Beschleunigung.

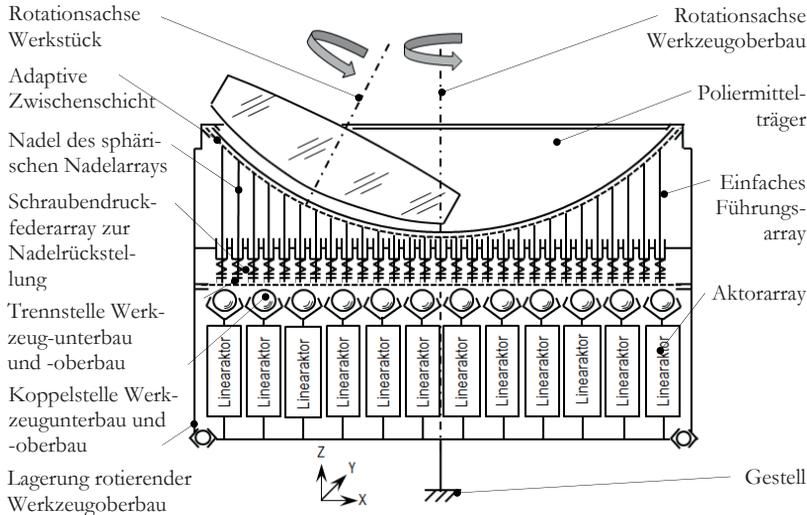


Abb. 21: Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug mit einfachem Führungsarray und Schraubendruckfederarray

Aus Sicht technischer Zuverlässigkeit ist die Nadelrückstellung mittels Magnetkraft dem Ansatz der Federkrafrückstellung vorzuziehen, da im Falle des Versagens einer Druckfeder die Funktion des gesamten Werkzeugoberbaus gefährdet ist.

Eine analytische Betrachtung (vgl. Anhang A) zu erwartender Biegemomente als auch maximaler Deformation der äußeren Nadeln zeigt weiterhin, dass der Ansatz einer segmentierten Nadelführung trotz Überbestimmtheit und damit verbundener zusätzlicher Fertigungsaufwände zu bevorzugen ist. Für die nachfolgende Gestaltungsphase ist der Ansatz nach Abb. 20 weiterzuverfolgen.

## HERSTELLUNG DES WERKZEUG-WERKSTÜCK KONTAKTS

Die auf Prinzipbasis verfügbaren Variationsmöglichkeiten zur Realisierung einer nachgiebigen Ringschneide sind überschaubar. Es sollen daher zwei Ansätze auf Basis Technischer Prinzipie erarbeitet werden sowie eine Kombination derer als dritte Variante. Eine nachfolgende Gegenüberstellung sowie Bewertung dient der Auswahl des im Rahmen der Gestaltungsphase weiter zu verfolgenden Ansatzes.

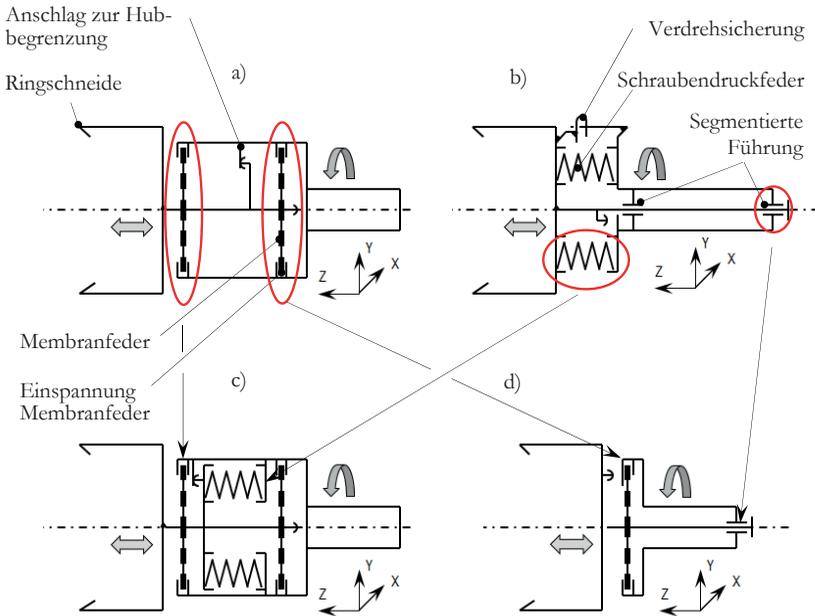


Abb. 22: Technische Prinzipie nachgiebiger Ringschneiden mittels a) Doppelmembranfeder, b) segmentierter Führung, c) Doppelmembranfeder und Schraubendruckfedern, d) segmentierter Führung mit Membranfeder

Die Variante nach Abb. 22: a) zeigt eine nachgiebige Ringschneide mit Doppelmembranfeder. Dieser Ansatz zeichnet sich durch seine Funktionsintegration aus, da durch die parallele Anordnung zweier Membranfedern sowohl die Funktion der Führung in z-Richtung als auch die Rückstellkraft<sup>63</sup> realisiert ist. Der Ansatz ermöglicht eine Sperrung der verbleibenden fünf Freiheiten. Zur Begrenzung des Hubs sind feste Anschläge vorzusehen. Der im Rahmen der Auslegung einmalig erforderliche Simulationsaufwand, die zu erwartende stark nichtlineare (progressive) Federkennlinie sowie der erforderliche Bauraumbedarf (Ausdehnung in z-Richtung) sind für diesen Ansatz als nachteilig zu bewerten.

<sup>63</sup> Die Rückstellkraft dient der Einstellung des Arbeitspunkts. Voraussetzung dafür ist der bereits sichergestellte Flächenkontakt (vollaperturig ausgebildete Kontaktzone) zwischen Werkstück und Werkzeug. In Abhängigkeit des gewünschten Polierdrucks erfolgt unter Berücksichtigung der Federkennlinie eine definierte Zustellung in Richtung der Rotationsachse des Werkstück (hier z-Richtung). Die Komprimierung der Federelemente darf dabei keine Änderung des Zentrierzustands des Werkstücks hervorrufen.

Dagegen zeigt der Ansatz einer segmentierten Führung nach Abb. 22: b) eine klare Funktionstrennung. Der Einsatz von Schraubendruckfedern zur Realisierung der Rückstellkraft ermöglicht eine nahezu lineare Federkennlinie, welche die Einstellung des Arbeitspunkts vereinfacht. Speziell für unterschiedliche Werkstückdurchmesser erweisen sich Schraubendruckfedern mit der Möglichkeit zum einfachen Austausch<sup>64</sup> als sehr vorteilhaft. Die segmentierte Führung lässt sich im einfachsten Falle mittels einer Zylinder-Zylinder Paarung realisieren. In Abhängigkeit der gewählten Passung sowie des Abstands der tragenden Segmente zueinander lassen sich parasitäre Verkippungen und Lateralversätze effektiv einschränken. Eine Sperrung des Rotationsfreiheitsgrads um die z-Achse ist zwingend erforderlich. Diese kann beispielsweise durch die Paarung eines balligen Zylinderstifts mit einem Langloch erfolgen.

Hinsichtlich des erforderlichen Bauraums, des Konstruktionsaufwands sowie der Anzahl und Komplexität mechanischer Bauelemente besitzt dieser Ansatz klare Vorteile gegenüber Variante a).

Eine Kombination der Vorzüge beider Varianten beschreibt das Prinzip nach Abb. 22 Variante d). Es nutzt zur Erzeugung der Rückstellkraft eine Membranfeder, welche gleichzeitig Teil der segmentierten Führung ist. Der zweite Teil der Führung besteht analog Variante b) im einfachsten Falle aus einer Zylinder-Zylinder Paarung. Eine zusätzliche Sperrung des Rotationsfreiheitsgrads um die z-Achse ist bei entsprechender konstruktiver Auslegung der Membranfeder nicht erforderlich. Ebenso lässt sich eine Hubbegrenzung einfach und ohne zusätzliche Bauelemente integrieren. Die bereits in Variante a) identifizierten Nachteile des erforderlichen Simulationsaufwands sowie der zu erwartenden nichtlinearen Federkennlinie verbleiben hingegen.

Aus der Kombination der Varianten a) und b) lässt sich eine weitere Prinziplösung ableiten (vgl. Abb. 22 Variante c). Diese nutzt eine Doppelmembranfeder zur Realisierung der Linearführung sowie Schraubendruckfedern zur Erzeugung der Rückstellkraft. Die Verdrehsicherung als auch die Hubbegrenzung lassen sich analog Abb. 22: Variante a) ausführen. Auch hier dominieren die Nachteile des Simulationsaufwands, der zu erwartenden nichtlinearen Kennlinie als auch des zu erwartenden Bauraumbedarfs (Ausdehnung in z-Richtung), weshalb diese Variante geringe praktische Relevanz besitzt.

Aufgrund des Vorteils einfacher Abstimmung der Federkennlinie und -vorspannung sowie der simplen Integrierbarkeit in eine bestehende Synchronspeed Maschinenbasis ist der Ansatz einer segmentierten Führung im weiteren Entwicklungsverlauf zu bevorzugen. Die folgende Gestaltungsphase greift somit das Prinzip nach Abb. 22 Variante b) auf.

---

<sup>64</sup> Zur Anpassung der Federkennlinie sowie Federvorspannung, um unabhängig des Werkstückdurchmessers gleiche Polierdrücke zu erzielen.

### 6.3.4 Zusammenfassung

Die im Rahmen der Prinzipphase des KEP vorgenommene Erarbeitung der Funktionsstruktur bildet die Grundlage zur systematischen Einschränkung des Lösungsraums. Mit Hilfe eines mehrstufigen Auswahlprozesses ließen sich Lösungsansätze in einem frühen Entwicklungsstadium gezielt analysieren, vergleichen und ausschließen, beziehungsweise in der darauffolgenden Abstraktionsstufe weiter untersetzen, detaillieren und konkretisieren.

So konnte die Anzahl zu erarbeitender Technischer Prinzipie für die Teilaufgabe des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs auf zwei erfolgversprechende Ansätze reduziert werden. Deren Varianten zur Realisierung zweier einander unabhängiger Einzelfunktionen ermöglichten eine einfache Gegenüberstellung und Bewertung.

Für die Teilaufgabe der Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts zeigte der Ansatz einer nachgiebigen Ringschneide wesentliche technische als auch prozessrelevante Vorteile. In der folgenden Erarbeitung zweier Technischer Prinzipie ließen sich aus der Kombination dieser zwei weitere Varianten ableiten. Vor- und Nachteile aller Technischen Prinzipie wurden im Rahmen einer nachfolgenden Gegenüberstellung und Bewertung analysiert.

Als Ergebnis der Konzeptphase liegt zu jeder Teilaufgabe ein präferiertes Technisches Prinzip vor, welches eine zielführende konstruktive Ausgestaltung in der folgenden Gestaltungsphase erlaubt.

Die heranzuziehenden Ansätze sind das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug mit segmentiertem Führungsarray und Permanentmagnetarray sowie der Ansatz einer nachgiebigen Ringschneide mit segmentierter Führung.

## 6.4 Gestaltungsphase

Diese Phase des KEP versteht sich als Überführung zweidimensionaler Technischer Prinzipie in ein auskonstruiertes, dreidimensionales und vollständig definiertes<sup>65</sup> technisches Gebilde. Die dafür notwendigen Zwischenschritte dienen der schrittweisen Konkretisierung von Teillösungen unter Festlegung der Kopplung mechanischer Bauelemente, Varianten zur Aufnahme und Übertragung von Kräften und Momenten, der Festlegung funktionsrelevanter Werkstoffe/Werkstoffpaarungen, etc.

---

<sup>65</sup> Unter ‘vollständig definiert‘ ist die Festlegung aller zur Herstellung erforderlichen geometrisch-stofflichen Angaben wie Werkstoffe, Oberflächen, Passungen, etc. zu verstehen.

Inhaltliche Schwerpunkte sind der Gestaltforderungsplan sowie der grafische Forderungsplan. Diese bilden die letzten Entwicklungsschritte auf Basis vereinfachter zweidimensionaler Prinzipdarstellung vor der Konstruktion. Sie dienen der Zusammenfassung wesentlicher konstruktionsrelevanter Randbedingungen. Die zu bearbeitenden Inhalte basieren auf den in [Sch14d] beschriebenen Ansätzen.

### 6.4.1 Gestaltforderungsplan/grafischer Forderungsplan

#### VOLLAPERTURIGES, AKTIV-ADAPTIVES POLIERWERKZEUG

Als Vorarbeiten des Gestaltforderungsplans gilt es mögliche Ausführungsvarianten ausgewählter Funktionselemente und Funktionsgruppen zu erarbeiten und zu vergleichen. Die zu diskutierenden Detaillösungen sind:

1. Die Koppelstelle zur Formübertragung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau;
2. Die Trennstelle zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau;
3. Die Hubbegrenzung und Verdrehsicherung der Nadeln.

(1) Die Ausgestaltung der **Koppelstelle zur Formübertragung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau** erlaubt eine Vielzahl konstruktiver Ausführungsvarianten. Die in Abb. 23 gezeigten Lösungen sind präferierte Ansätze einer vorangegangenen Erarbeitung durch [Sch14d] sowie [Hue15]. Diese sollen nachfolgend verglichen und bewertet werden.

Zu detaillierende Koppelstelle basierend auf Technischem Prinzip nach Abb. 20

Membran als Trennstelle Zwischen Ober- und Unterbau, analog für alle drei Varianten

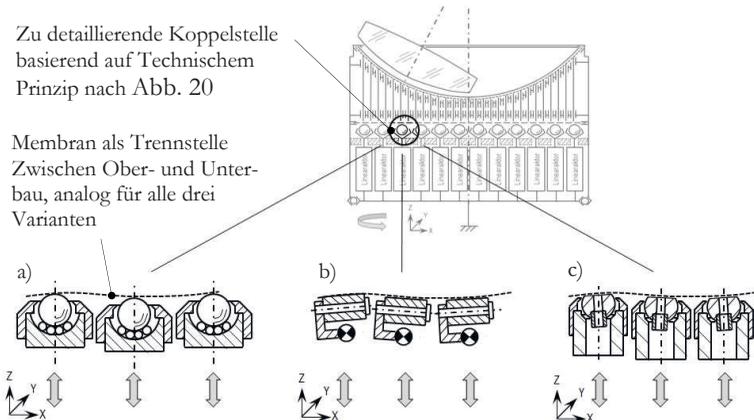


Abb. 23: Ausführungsvarianten der Koppelstelle zur Formübertragung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau, a) Kugelrollen, b) Zylinderrollen sowie c) sphärische Luftlager Elemente nach [Sch14d]

Die einfachste Variante, da kommerziell frei verfügbar, ist der Einsatz von Kugelrollen. Die Koppelstelle geht mit der darüber angeordneten Trennstelle (Membran) zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau eine punktförmige Kugel-Ebene Berührung ein. Diese Paarung sperrt eine Freiheit (Translation in z-Richtung) und erfüllt somit die funktionellen Forderungen. Als nachteilig sind die Wälzreibung zwischen Kugel-Kugel und Kugel-Trennstelle sowie die Hertz'sche Pressung<sup>66</sup> zwischen den beiden Funktionselementen Kugelrolle und Membran zu bewerten.

Variante b) zeigt eine Anordnung mit flächig verteilten Zylinderrollen. Jede Rolle ist hierbei um die x-Achse drehbar gelagert sowie um die y-Achse in einem begrenzten Winkelbereich schwenkbar. Die Koppelstelle besitzt die Unfreiheit 1 ( $U = 1$ ) durch Sperrung der Translation in z-Richtung. Die Zylinder-Ebene Paarung zwischen Zylinderrolle und Membran führt zur Ausbildung eines Linienkontakts (ebenfalls Hertz'sche Pressung). Verglichen mit der Punktberührung der Kugelrolle lässt sich mit diesem Ansatz prinzipbedingt eine vielfach höhere Kraft (je Zylinderrolle) zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau übertragen. Der durch die Zylinderrollen nachzubildende asphärische Anteil der um den Schwenkwinkel gekippten Asphäre wird in diesem Ansatz über eine Vielzahl linearer Segmente approximiert. Die Güte der Abbildung ist dabei direkt abhängig von der Länge der Rollen sowie dem dazwischenliegenden freien Abstand. Analog des Ansatzes der Kugelrolle ist die zu überwindende Rollreibung ebenfalls als nachteilig zu bewerten.

Der nach Variante c) entwickelte Ansatz lässt sich als Kombination und Weiterentwicklung der beiden vorab vorgestellten Ansätze betrachten. So erlaubt die sphärische Gestalt des Luftlagerelements Rotationen in allen 3 Freiheiten (Kippung um x- und y-Achse sind durch eine Kippssperre limitiert). Die angebrachte plane Luftlagerfläche ermöglicht translatorische Bewegungen der Trennstelle in x- und y-Richtung, sperrt jedoch die Bewegung in z-Richtung. Ein weiterer Vorteil ist die flächige Abstützung der Membran auf dem Fluidkissen. Diese vermeidet Hertz'sche Pressung und erlaubt zusätzlich eine signifikante Tragfähigkeitssteigerung.

---

<sup>66</sup> Die Hertz'sche Pressung geht auf den deutschen Physiker Heinrich Hertz (\* 1857, † 1894) zurück. Sie dient der Druckverteilungsbeschreibung sich gegenseitig berührender gekrümmter Flächen. Entgegen der Theorie starrer Körper besitzen reale Körper eine begrenzte Steifigkeit, definiert durch das Elastizitätsmodul. Dadurch hervorgerufene charakteristische Abplattungseffekte sowie lokale Spannungsverteilungen lassen sich anhand der Theorie unter Berücksichtigung der Krümmungsradien und Kontaktkraft beschreiben. [Kle07]; [Bög11]

Die Ausführung als Luftlager ermöglicht eine Senkung der Reibzahl um mindestens zwei Größenordnungen<sup>67</sup>, verglichen mit typischen Rollenführungen [Don06]; [Sch11]; [The03]. Weiterhin werden Stick-Slip, mechanischer Kontakt als auch Verschleiß vermieden. Als Nachteile dieses Ansatzes können der erhebliche, einmalige Konstruktionsaufwand zur Auslegung der sphärischen Luftlagerelemente als auch die zu erwartenden Herstellkosten identifiziert werden. Analog des Ansatzes der Zylinderrolle erfolgt die Nachbildung der Asphärenform durch lineare Segmente. Als Zielstellung der Konstruktion lässt sich daher ein möglichst geringer Kugeldurchmesser ( $D_K$ ) sowie Zwischenabstand ( $a_K$ ) für eine möglichst hohe Anzahl von Luftlagerelementen je Flächeneinheit (Flächendichte) formulieren. Die ideale Nachbildung der Asphärenform erfordert eine unendlich hohe Stützstellendichte<sup>68</sup>. In der Realität sind Kugeldurchmesser im unteren einstelligen Millimeterbereich sowie Zwischenabstände im Zehntelmillimeterbereich anzustreben.

Für die konstruktive Ausgestaltung ist der Ansatz der sphärischen Luftlagerelemente weiter zu verfolgen.

**(2) Die Trennstelle zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau** dient der simplen Austauschbarkeit des Nadelkissens, in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Werkstückgeometrie. Sie ist so auszulegen, dass der Wechsel des Nadelkissens:

- mit definiertem Zentrierfehler;
- mit überschaubarem Zeitaufwand (Rüstzeit < 5min);
- reproduzierbar;
- geschützt vor Poliermittel und Wasser

sichergestellt ist. Abb. 24 führt dazu zwei detaillierte Varianten aus. Der Ansatz nach a) realisiert die Anforderungen reproduzierbarer Einwechselbarkeit mit definiertem Zentrierfehler durch eine spielbehaftete Formpaarung. Eine Zylinder-Kugel Paarung, realisiert durch einen zylindrischen und einen balligen Zentrierbund, in Kombination mit einer Ebene-Ebene Paarung über zwei Plananlagen sperren fünf Freiheiten<sup>69</sup> über Formschluss. Diese Kombination besitzt die Vorteile kurzen Kraftflusses, steifer und aus Fertigungssicht simpler Ausführung.

<sup>67</sup> für die Relativbewegung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau

<sup>68</sup> Und somit  $D_K \rightarrow 0$  sowie  $a_K \rightarrow 0$

<sup>69</sup> Die Sperrung der verbleibenden Freiheit (Rotation um die z-Achse) ist aufgrund der vorliegenden Rotationssymmetrie nicht erforderlich. Die Verschraubung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau stellt die Drehmomentübertragung durch Kraftschluss/Reibschluss sicher.

Zum Medienschutz im Werkzeuginneren befindlicher Funktionselemente (Koppelstellen sowie Linearaktoren) dient mindestens ein umlaufender O-Ring, in dieser Variante axial in die Plananlage des Werkzeugunterbaus eingelassen. Eine radiale Abdichtung analog Variante b) ist ebenfalls möglich. Der Ansatz nach a) sieht die Fassung der Membran im Werkzeugoberbau vor. Zur flächigen Verteilung der Andruckkraft sowie scherspannungsarmer Einspannung der Membran dient ein am Außenumfang geführter Niederhalter.

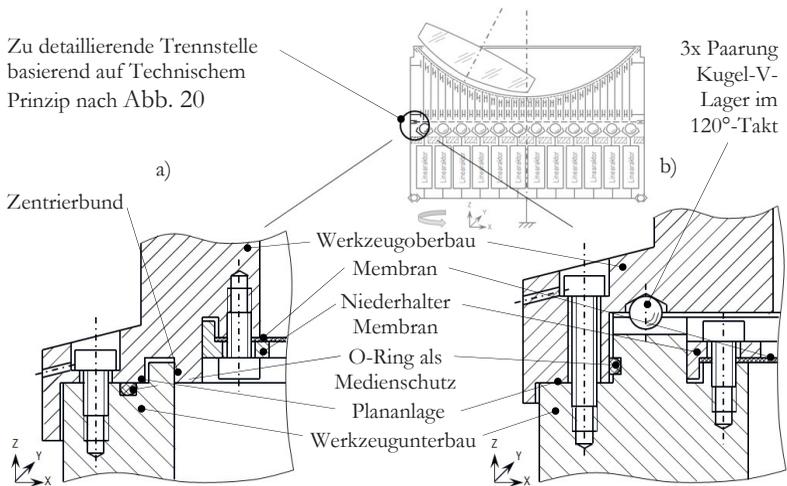


Abb. 24: Ausführungsvarianten der Trennstelle zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau, a) Zentrierbund, b) Dreipunktauflage

Die alternative Ausführungsvariante (vgl. Abb. 24 b) Dreipunktauflage) verzichtet auf einen Zentrierbund und nutzt stattdessen drei Kugel-V-Lager Paarungen<sup>70</sup>, welche zueinander im 120° Takt angeordnet sind. Dies erlaubt eine formgepaarte und spielfreie Sperrung aller 6 Freiheiten mit dem Nachteil geringer Steifigkeit. Diesem Mangel lässt sich durch eine Funktionstrennung entgegen wirken, indem der Kraftkreis über eine zusätzliche Ebene-Ebene Paarung kurzgeschlossen wird. So dienen die Kugel-V-Lager Paarungen der Positionierung des Werkzeugoberbaus durch Entzug aller drei translatorischer Freiheiten sowie der Sperrung des Rotationsfreiheitsgrads um die z-Achse. Nach definierter Vorspannung der Kugeln durch elastische Deformation erfolgt ein Kurzschluss des Kraftkreises über eine steife Plananlage (Ebene-Ebene Paarung) unter Sperrung der Rotationsfreiheitsgrade

<sup>70</sup> Je Auflage liegen zwei Kugel-Ebene Berührungen mit Hertz'scher Pressung vor.

um die x- und y-Achse. Zur Realisierung der Spannkraft bieten sich axial angeordnete Zylinderschrauben zur unmittelbaren Verschraubung mit dem Werkzeugunterbau an. Grundvoraussetzung für die Wirksamkeit dieses Ansatzes ist ein gleichmäßiges Anzugsmoment der Zylinderschrauben, größer oder gleich dem Mindestanzugsmoment, um den Kurzschluss des Kraftkreises sicherzustellen. Die Grundprinzipie des Medienschutzes sowie der Membraneinspannung lassen sich analog Ausführungsvariante a) beibehalten. Die in Variante b) dargestellte radiale Abdichtung mittels O-Ring sowie die Einspannung der Membran am Werkzeugunterbau sind gleichwertige, alternative Ausführungsvarianten. Aus Sicht zu erwartender Fertigungsaufwände sowie Robustheit im späteren Produktionseinsatz besitzt die Variante der Dreipunktauflage Nachteile gegenüber Variante a).

Für den weiteren Entwicklungsverlauf soll der Ansatz a) Zentrierbund aufgrund seiner robusten und kostengünstigen Ausführung Anwendung finden.

- (3) Für die Hubbegrenzung und Verdrehsicherung der Nadeln** wird der Lösungsraum in erster Linie durch den limitierten Bauraum determiniert, sodass sich alle ausgestalteten Varianten in ihrem Grundprinzip ähnlich sind. Die Notwendigkeit einer Hubbegrenzung der Nadeln ergibt sich dabei aus der Austauschbarkeit des Werkzeugoberbaus für den Wechsel auf eine andere Werkstückgeometrie. Eine Hubbegrenzung soll dabei ein Herausfallen der Nadeln aus dem Nadelkissen ausschließen. Weiterhin erfordert jede Nadel eine Verdrehsicherung. Diese garantiert, dass die sphärische Grundform des Nadelkissens in jedem Betriebszustand erhalten bleibt. Allein das Verdrehen einer Nadel hätte im Betrieb eine Beschädigung des Werkzeugaufbau als auch des Werkstücks zur Folge.

Analog der Koppelstelle zur Formübertragung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau ist die Nadelanzahl je Flächenelement (Flächendichte) entscheidend. Auch hier sind der Flächendichte zur Nachbildung der Asphärenform in der Realität Grenzen gesetzt. Unabhängig des Flächenmusters der Nadeln sollen nachfolgend Ausführungsvarianten zur Hubbegrenzung vorgestellt, verglichen und bewertet werden. Abb. 25 zeigt drei vorzuziehende Ansätze eines größeren Lösungsumfanges. Da sich diese ausschließlich im Detail unterscheiden, wird von einer Diskussion aller neun Varianten abgesehen.

Zu detaillierende Hubbegrenzung basierend auf dem Technischen Prinzip nach Abb. 20

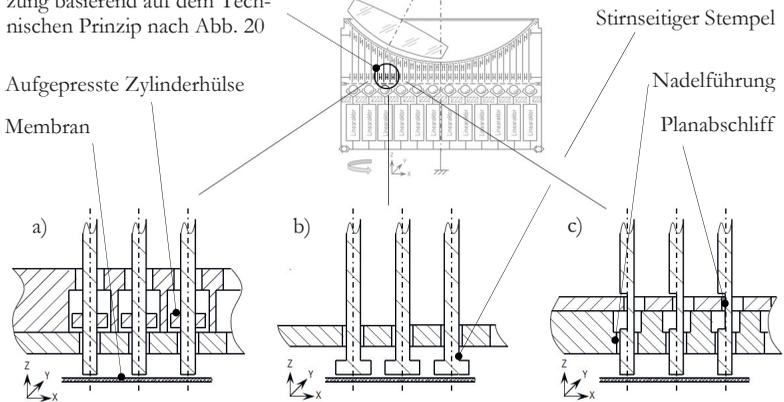


Abb. 25: Ausführungsvarianten zur Hubbegrenzung der Nadeln mittels  
 a) Zylinderhülsen, b) stirnseitige Stempel, c) radiale Planabschliffe

So nutzt Ansatz a) Zylinderhülsen zur Hubbegrenzung, welche einen größeren Außendurchmesser als die Nadeln besitzen. Zur Hubbegrenzung in  $-z$ -Richtung wird die untere Nadelführung verwendet. In  $+z$ -Richtung nutzt der Ansatz eine Lochplatte mit identischem Raster, jedoch mit größerem Bohrungsdurchmesser. Variante b) sieht stirnseitige Stempel zur Hubbegrenzung vor. Abweichend von Ansatz a) dient die untere Nadelführung zur Begrenzung des Nadelhubs in  $+z$ -Richtung. Ein Herausfallen der Nadeln (in  $-z$ -Richtung) verhindert die unter den Stempeln montierte Membran. Dieser Ansatz setzt jedoch voraus, dass die Membran wie in Abb. 24 Variante a) dem Werkzeugoberbau zugehörig ist. Die Anzahl zur Funktionserfüllung erforderlicher Bau-/Funktionselemente ist geringer als für die Variante der Zylinderhülsen.

Für die Ansätze a) (Zylinderhülsen) als auch b) (stirnseitige Stempel) eröffnen sich jeweils verschiedene Möglichkeiten zur Verbindung des Funktionselements mit der Nadel. So können die Zylinderhülsen als auch die stirnseitigen Stempel auf den Nadelaußendurchmesser kraftschlüssig aufgeschraubt/gepresst, stoffschlüssig geklebt oder formschlüssig aufgeschraubt<sup>71</sup> sein. Alternativ ist die Fertigung aus einem Stück möglich, obgleich aus Fertigungs- und Kostengründen nicht zu präferieren. Die in Variante a) und b) dargestellten Verbindungen stellen dafür zwei Ausführungsbeispiele dar.

<sup>71</sup> In diesem Falle auch kraftschlüssig.

Der Ansatz nach c) realisiert die Hubbegrenzung über radiale Planabschliffe an den Nadeln. Diese sehr kompakt bauende Lösungsvariante erfordert keine zusätzlich anzubringenden Funktionselemente, sondern ausschließlich eine Schleifbearbeitung der Nadeln. Die Geometrie der Nadeln fällt entsprechend simpel aus, im einfachsten Falle entspricht diese einem Zylinderstift. Die angebrachten Abschliffe schlagen bei ausgeschöpftem Hub (in  $+z$ - als auch  $-z$ -Richtung) auf eine mit parallelen Langlöchern versehene Platte. Diese besitzt ein der Nadelführung identisches Raster, wobei die größte Ausdehnung der Langlöcher in  $y$ -Richtung orientiert ist. Weiterhin realisiert diese Anordnung die Funktion einer Nadelverdrehssicherung ohne Einsatz zusätzlicher Funktionselemente.

Variante a) als auch b) erfordern zur Verdrehssicherung von der Rotations-symmetrie abweichende Außengeometrien. Geeignete Ausführungsformen sind dabei unter Beachtung des Flächenmusters der Nadeln zu erarbeiten. So können hexagonale oder quadratische Außengeometrien zweckmäßig sein. Aufgrund der überwiegenden Vorteile des Ansatzes radialer Planabschliffe ist dieser im Folgenden für die Ausgestaltung des grafischen Forderungsplans zu präferieren. Folglich soll die Detaillierung möglicher Verdrehssicherungen für die verbleibenden Lösungsansätze keinen Schwerpunkt dieser Arbeit bilden.

Die Erkenntnisse aus der Diskussion und Bewertung ausgewählter Funktionselemente und Funktionsgruppen erlauben eine zielgerichtete Erarbeitung des Gestaltforderungsplans für das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug.

Der in Abb. 26 dargestellte Forderungsplan baut auf dem Technischen Prinzip mit segmentiertem Führungsarray und Permanentmagnetarray (vgl. Abb. 20) auf und entspricht einer Kombination der in [Sch14d] sowie [Sch15b] beschriebenen Ausführungen. Er stellt eine detaillierte Ausführung dessen dar und zeigt neben dem Grundaufbau des Werkzeugs zusätzlich im Konstruktionsentwurf vorzusehende Schnittstellen, Trennstellen und Dichtelemente sowie zu berücksichtigende/zu integrierende Peripherie wie Werkzeugantrieb, Verkleidung, etc.

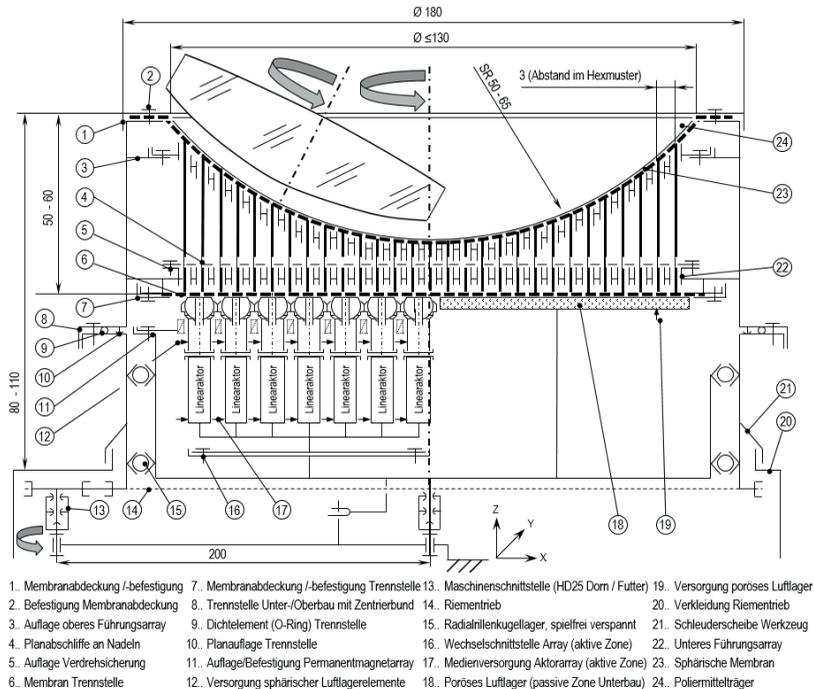


Abb. 26: Gestaltungsforderungsplan des vollpertrigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs

Entsprechend der Forderungen aus Lasten- und Pflichtenheft [Las12]; [Pfl12] sind Außendurchmesser, Achsabstand sowie weitere funktionsrelevante geometrische Randbedingungen bereits definiert.

Weiterhin sieht der Gestaltungsforderungsplan eine Möglichkeit zum Austausch des aktiven Teils im Werkzeugunterbau vor. Dies erlaubt die praktische Erprobung unterschiedlicher Prinzipie und Ausführungsformen hinsichtlich ihrer Eignung für den gewählten Lösungsansatz.

Der aktiv deformierbare Bereich des Werkzeugs (vgl. Abb. 26, Pos. 12) nimmt einen Bruchteil der Oberfläche des Werkzeugunterbaus, respektive des darüber befindlichen Werkzeugoberbaus, ein. So genügt es, ausschließlich die Zone als aktiv verformbar zu gestalten, in der sich die Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück ausbildet. In der konstruktiven Ausgestaltung ist die aktive Zone größer als die Kontaktzone auszulegen, um einen tangentialen Überlauf zwischen aktivem und passivem Teil des Werkzeugunterbaus außerhalb der Kontaktzone (und somit in einer Zone geringerer Flächenpressung) sicherzustellen.

Zusätzlich ist die Verlagerung der Kontaktzone bei Schwenkwinkeländerungen zu berücksichtigen, welche eine größere Ausdehnung der aktiven Zone in x-Richtung erfordert.

Die verbleibende passive Zone (vgl. Abb. 26, Pos. 18) des Werkzeugunterbaus lässt sich kostengünstig als Planfläche ausführen.

Die Koppelstelle zwischen Membran und Planfläche sollte aufgrund kontinuierlicher Relativbewegung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau reibungs- und verschleißarm ausgeführt sein. Eine Vorzugslösung dafür stellt die Verwendung eines kommerziell frei verfügbaren, porösen Luftlagers<sup>72</sup> dar, welches der Anwendung entsprechend zu modifizieren/nachzuarbeiten ist. Aufgrund seiner vorteilhaften tribologischen (Notlauf-) Eigenschaften sind Graphitlager nichteisenmetallischen Sinterlagern aus Messing, Keramik oder porösem Glas vorzuziehen. Bei Überlast durch Fehlpositionierung, temporärem Druckabfall oder gar Ausfall der Luftversorgung lässt sich somit eine Beschädigung der Membran ausschließen. Dabei abgetragene Partikel (Graphitstaub) haben keinerlei negativen Einfluss auf die Schmierung der Radialrillenkugellager (vgl. Abb. 26, Pos. 15), wohingegen von der Membran abgetragene Partikel das Reibverhalten der Lager sowie die Lebensdauer der Membran nachteilig beeinflussen können. Auf eine weitere Auslegung und Detaillierung des passiven Teils des Werkzeugunterbaus wird im Folgenden verzichtet.

Einen aus Steuerungssicht wesentlichen Vorteil verspricht die Verwendung einer Maschinenstruktur aus der Politur mittels Synchrospeed-Kinematik, welche die Nutzung im Maschinenaufbau vorhandener Linearachsen und Spindeln erlaubt. Eine Synchrospeed Maschinenbasis verfügt in der Regel über eine unten laufende Werkstückspindel sowie eine parallel dazu angeordnete Abrichtspindel zur Konditionierung des oben laufenden Werkzeugs (vgl. Abb. 11). Werkstück- als auch Abrichtspindel sind am Schlitten der z-Achse befestigt, sodass diese stets gemeinsam verfahren. Da der beschriebene Ansatz eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs eine äußere Einleitung der Drehbewegung erfordert, lässt sich das Maschinenlayout einer typischen Synchrospeed Maschinenbasis unverändert nutzen. Eine der beiden unten laufenden Spindeln dient zur Aufnahme des Werkzeugunterbaus unter Sperrung von 5 Freiheiten. Dazu dient die Abrichtspindel, unter Voraussetzung einer Maschinenstruktur nach Abb. 11. Eine Verdrehsicherung entzieht die verbleibende Rotationsfreiheit um die z-Achse, sodass der feststehende Teil des Werkzeugunterbaus damit statisch bestimmt ist. Der Antrieb des rotierenden Teils des Werkzeugunterbaus erfolgt über eine zweite, unten laufende

---

<sup>72</sup> Auch Düsenlager sind prinzipiell verwendbar, obgleich diese aufgrund erforderlicher Zusatzaufwände für Auslegung und Fertigung für diese Anwendung nicht zu präferieren sind.

Werkstückspindel (vgl. Abb. 11). Zur Kraftübertragung empfiehlt sich aufgrund nicht klar definierter Achsabstände die Verwendung eines Riementriebs mit Spannrolle.

Die gezeigte Lösung verspricht, ohne den Anspruch auf vollständige systematische Ausarbeitung möglicher Ausführungsvarianten, eine zuverlässige Funktionserfüllung sowie kostengünstige Realisierung.

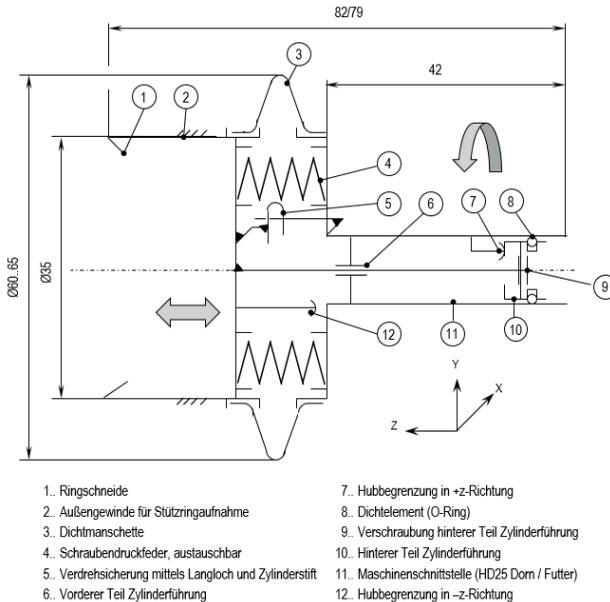
Der diskutierte Gestaltforderungsplan schließt alle theoretischen Vorbetrachtungen und Konzeptionen zur Entwicklung eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs ab. Er stellt das Ergebnis der vorangegangenen, systematischen Erarbeitung des präferierten Lösungsansatzes dar und bildet den Leitfaden für die anschließende konstruktive Umsetzung.

## **HERSTELLUNG DES WERKZEUG-WERKSTÜCK KONTAKTS**

Die Erarbeitung des Gestaltforderungsplans der nachgiebigen Ringschneide zeichnet sich entgegen des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs durch vergleichsweise geringe Komplexität aus. Das unter Abb. 22, Variante b) beschriebene Technische Prinzip erlaubt eine direkte Überführung in den Gestaltforderungsplan und bedarf keiner zusätzlichen Variation und Diskussion von Funktionselementen und Funktionsgruppen. Gegenstand der Überführung ist im Wesentlichen die Integration der geforderten Zusatzfunktionalität<sup>73</sup> in den bestehenden Ansatz einer Ringschneide unter Nutzung eines Hydrodehndorns als Maschinenschnittstelle. Weiterhin ist im Rahmen der Erarbeitung des Gestaltforderungsplans je eine Lösung zur Abdichtung gegen Poliermittel sowie zur Verwendung eines Stützrings während der nachfolgenden Glätt- und Korrekturpolitur (vgl. Kap. 4.2) zu entwickeln.

---

<sup>73</sup> Definierte Nachgiebigkeit in z-Richtung durch Verwendung einer segmentierten Linearführung in Verbindung mit Schraubendruckfedern nach Abb. 22, Prinzip b).



**Abb. 27: Gestaltungsforderungsplan der nachgiebigen Ringschneide**

Abb. 27 zeigt einen Gestaltungsforderungsplan, welcher die Forderungen nach [Las12] sowie [Pfl12] erfüllt. Die gewählte Außengeometrie ist bezüglich der Lage und Orientierung ihrer Funktions- und Fügeflächen analog bestehender starrer Ringschneiden dieser Dimension gestaltet, was einen einfachen Austausch erlaubt. Um das Eindringen abrasiven Poliermittels in die Mechanik der nachgiebigen Ringschneide zu verhindern, nutzt der Ansatz eine umlaufende Stülpmanschette (vgl. Abb. 27, Pos. 3), welche sich umfangsseitig spannen lässt. Im Bedarfsfall lässt sich zum Schutz innenliegender Funktionselemente (Führung, Schraubendruckfedern sowie Verdrehsicherung) ein Sperrluftanschluss<sup>74</sup> integrieren. Dessen Auswirkung auf die in z-Richtung wirkende Kraft ist entsprechend zu berücksichtigen.

Die Aufnahme eines Stützrings erfolgt über ein konzentrisch zur Ringschneide angeordnetes Außengewinde (vgl. Abb. 27, Pos. 2). Zur Sperrung des Rotationsfreiheitsgrads um die z-Achse (Verdrehsicherung) zwischen vorderem und hinterem Teil der nachgiebigen Ringschneide dient ein Zylinderstift, welcher sich an einem radial orientierten Langloch (vgl. Abb. 27, Pos. 5) abstützt.

<sup>74</sup> Die Abdichtung mittels Sperrluft verhindert berührungs- und verschleißfrei das Eindringen unerwünschter äußerer Medien und Partikel. Der abzudichtende Raum ist dazu mit einem gegenüber seiner Umwelt höheren Luftdruck zu beaufschlagen.

Zur Begrenzung des Hubs und somit der Gesamtlänge der nachgiebigen Ringschneide dienen zwei Anschläge. In +z-Richtung (vgl. Abb. 27, Pos. 7) lässt sich dadurch eine Federvorspannung erzeugen, wohingegen sich in -z-Richtung (vgl. Abb. 27, Pos. 12) eine Überlastung/Blocklage der Federn ausschließen lässt.

Fluchtungs- und Richtungsfehler der Führungsachse der nachgiebigen Ringschneide in Bezug zur optischen Achse des Werkstücks gehen während des Durch-/Vorpolyerprozesses direkt (als Fehler 1. Ordnung) in den Zentrierfehler des Werkstücks ein. Zusätzlich sind bei Komprimierung des nachgiebigen Teils der Ringschneide entstehende Kippfehler<sup>75</sup> ebenfalls als kritisch zu bewerten. Ziel sollte es folglich sein, diese Fehler so gering wie möglich zu halten. Der Gestaltforderungsplan nach Abb. 27 bedient sich dabei eines in der Feinwerktechnik üblichen Ansatzes der segmentierten Führung [The03]. Dieser erlaubt eine Vergrößerung der Basislänge des Führungsschlittens, welche direkten Einfluss auf die Kippempfindlichkeit<sup>76</sup> der Führung besitzt. So befindet sich der vordere Teil der Zylinderführung so nah wie möglich am Werkstück, wohingegen der hintere Teil der Zylinderführung in die Maschinenschnittstelle in Form eines Hydrodehndorns integriert ist. Eine günstige Auslegung der Passung zwischen Innen- und Außenzylinder der Führung ermöglicht Kippfehler  $< 1,5\text{arcmin}$  (vgl. Anhang B).

Eine nützliche Zusatzfunktion des gezeigten Gestaltforderungsplans stellt die Möglichkeit des pneumatischen Anhebens dar. Obgleich keine primär geforderte Funktion, so erleichtert sie die Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts während des Rüstvorgangs oder im Rahmen eines Trockenlaufs.

---

<sup>75</sup> Positionsabhängige Verkippung der Ringschneide und somit des darauf befindlichen Werkstücks zur Maschinenschnittstelle.

<sup>76</sup> Kippung um beliebige Achsen, welche nicht mit der Bewegungsachse zusammenfallen. In diesem Falle sind Kippungen, welche eine Winkeländerung um die x- und y-Achse hervorrufen, kritisch.

### 6.4.2 Konstruktionsentwurf

Der Konstruktionsentwurf versteht sich im Rahmen dieser Arbeit als Strukturbeschreibung eines technischen Gebildes. Analog zum Technischen Entwurf (vgl. Kap. 6.2: KEP) beinhaltet er die quantitative Definition der geometrischen Eigenschaften des technischen Gebildes. Abweichend vom Technischen Entwurf nach KEP wird in dieser Arbeit aufgrund geringen wissenschaftlichen Anspruchs auf die Darstellung in Form einer Technischen Zeichnung unter Angabe geometrisch stofflicher Eigenschaften verzichtet. [Leh03]

#### VOLLAPERTURIGES, AKTIV-ADAPTIVES POLIERWERKZEUG

Die konstruktive Umsetzung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs basiert auf dem in Abb. 26 dargestellten Gestaltforderungsplan. Die Integration dieses Aufbaus in eine handelsübliche Synchrospeed Maschinenbasis erfordert die Beachtung bauart- und bauraumbedingter Randbedingungen, welche nicht näher erläutert werden sollen, da diese keine allgemeingültigen Aussagen zulassen und vom Maschinentyp und -modell abhängen. Der Konstruktionsentwurf versteht sich entsprechend als beispielhafte Ausführung.

Abb. 28 zeigt die konstruktive Ausgestaltung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs in Draufsicht, im Vollschnitt sowie in zwei isometrischen Ansichten. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit verzichtet die Abbildung auf Darstellung der Nadeln sowie Details des Werkzeugunterbaus.

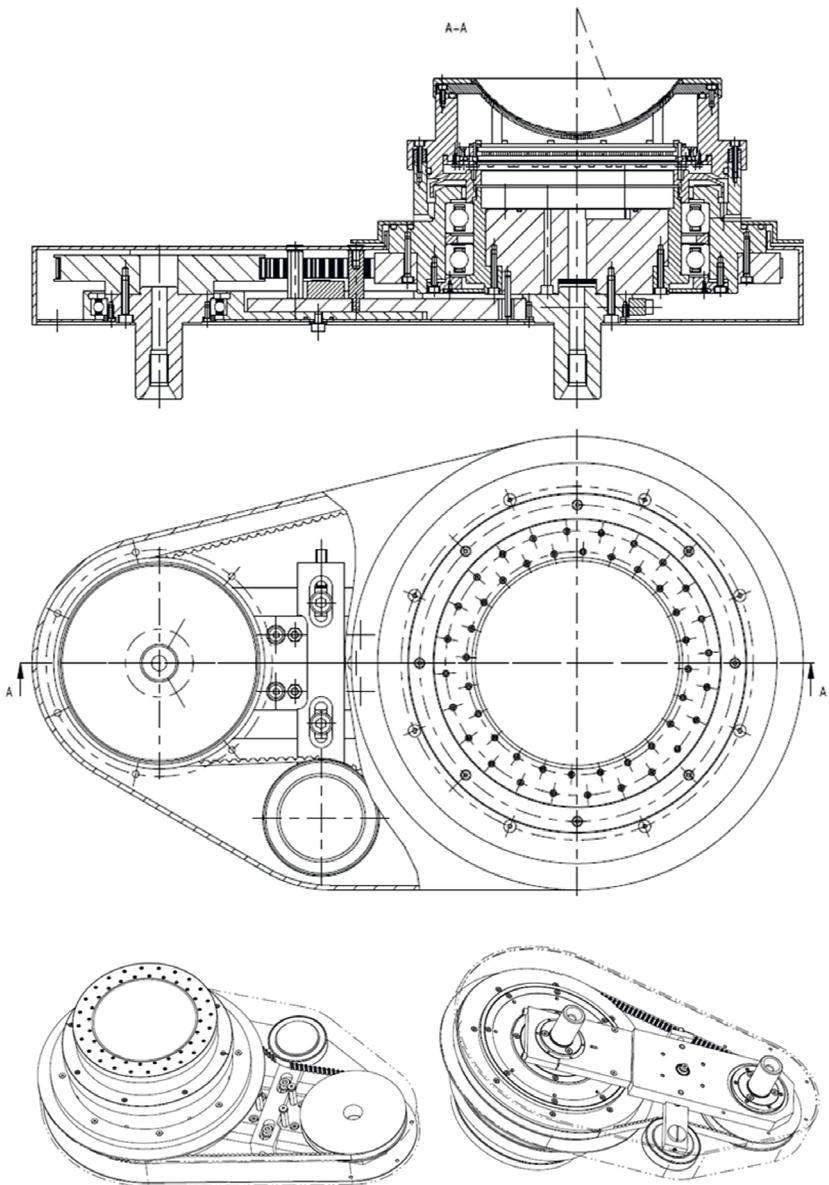


Abb. 28: Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug in Vollschnittdarstellung

Die Aufnahme des Werkzeugunterbaus erfolgt gemäß Gestaltforderungsplan (vgl. Abb. 26) über zwei zylindrische Hydrodehndorne, welche über eine arretierbare Linearführung miteinander verbunden sind. Der gewählte Ansatz erfüllt dabei eine Hauptfunktion sowie zwei Nebenfunktionen unter Einsparung zusätzlicher Bauelemente. Dieses Prinzip ist in der Konstruktionstechnik als Funktionsintegration bekannt. Die nachfolgende Aufschlüsselung bestehender Anforderungen sowie geleisteter Funktionen dient der systematischen Einordnung:

- **Anpassung des Achsabstands (Hauptfunktion):** In Abhängigkeit des Justierzustands der Poliermaschine variiert der Achsabstand von Werkstück- und Abrichtspindel (vgl. Abb. 11). Die in den Werkzeugunterbau integrierte arretierbare Linearführung erlaubt eine Anpassung des Achsabstands.
- **Kurzschluss des Kraftkreises (Nebenfunktion):** Der in Abb. 28 dargestellte Riemen dient dem (rotatorischen) Antrieb des Werkzeugunterbaus. Zur Funktionserfüllung (Drehmomentübertragung) ist eine definierte Vorspannung dessen erforderlich. Die arretierbare Linearführung erlaubt einen Kurzschluss des Kraftkreises, sodass die Spannkraft nicht über die Lager von Abricht- und Werkstückspindel sowie den Führungsschlitten der z-Achse (vgl. Abb. 11) als deren Verbindungselement abgeleitet werden. Der kurze Kraftkreis führt weiterhin zu einer Steifigkeitserhöhung des Gesamtaufbaus sowie zu geringerem Verschleiß der Spindellager.
- **Verdrehsicherung des Werkzeugunterbaus (Nebenfunktion):** Zur Gewährleistung der Funktion des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs ist sicherzustellen, dass der aktive Teil des Werkzeugunterbaus seine Lage unabhängig vom Justierzustand der Maschine beibehält. Die arretierbare Linearführung lässt sich außer zur Anpassung des Achsabstands weiterhin als Verdrehsicherung des Werkzeugunterbaus nutzen. In Verbindung mit dem zylindrischen Hydrodehndorn erlaubt dies die Sperrung aller 6 Freiheiten. Die Lage des Werkzeugunterbaus ist damit vollständig definiert und erfährt keine Lageänderung.

Das Spannen des Riemens erfolgt durch eine Spannrolle, welche an der arretierbaren Linearführung befestigt ist. Eine in Bewegungsrichtung der Führung angebrachte Stellschraube erlaubt eine definierte und feinfühligere Einstellung der Spannkraft. Nach Abschluss lässt sich der Justierzustand durch Sperrung der Linearführung sichern.

Der gesamte Werkzeugaufbau ist gegen das Eindringen von Poliermittel und Wasser geschützt. Dabei erfolgt eine grobe Abschirmung wenig empfindlicher Funktionsgruppen durch ein zweiteiliges Gehäuse, welches mit Sperrluft (vgl. Kap. 6.4.1) zu beaufschlagen ist. Die verwendeten Radialrillenkugellager sind ebenfalls über Labyrinthdichtsysteme geschützt. Empfindliche Funktionselemente des Werkzeugunterbaus und -oberbaus verfügen über mehrstufige Abdichtungen mittels O-Ringen.

Der Werkzeugaufbau sieht eine Wechselschnittstelle zum Austausch des Werkzeugoberbaus vor. Diese erlaubt Rüstzeiten von  $\leq 5\text{min}$  bei Wechsel auf eine andere Werkstückgeometrie. Zusätzlich kann bei Verfügbarkeit mindestens zweier Werkzeugoberbauten das Abrichten eines Poliermittelträgers außerhalb der Maschine erfolgen, währenddessen ein weiterer Werkzeugoberbau in Betrieb ist. Eine zusätzliche Reduzierung der Rüstzeit ist dadurch möglich.

## NACHGIEBIGE RINGSCHNEIDE

Die konstruktive Umsetzung der nachgiebigen Ringschneide zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts lehnt sich direkt an den Gestaltforderungsplan gemäß Abb. 27 an. Die Trennstelle zwischen vorderem, nachgiebigem Teil und hinterem, starrem Teil erlaubt eine Variation der Federkennlinie. Dafür bestehen folgende Möglichkeiten:

1. **Tausch:** Ersetzen aller Schraubendruckfedern durch Modelle mit anderer Federrate<sup>77</sup>. Alternativ ist der Tausch mindestens zwei sich gegenüberliegender Schraubendruckfedern zulässig. Die Summenfederrate lässt sich damit entsprechend der Anzahl identischer Federn und ihrer jeweiligen Federrate variieren.
2. **Entnahme:** Die Summenfederrate lässt sich durch Federbestückung der nachgiebigen Ringschneide beeinflussen. Von den vorgesehenen acht Federn kann die Bestückung um die Schrittweite zwei durch Entnahme sich jeweils gegenüberliegender Federn variiert werden. Die Mindestfederanzahl beträgt zwei, um die Einprägung eines Kippmoments in die Linearführung auszuschließen.

---

<sup>77</sup> Die Federrate oder Federkonstante (c) gibt an, welche Rückstellkraft eine Feder bei Auslenkung generiert. Die Angabe erfolgt bei Schraubendruck- oder Zugfedern üblicherweise in [N/mm] sowie für Schenkelfedern in [Nm/°].

3. **Federvorspannung:** Die Verwendung von Federn mit unterschiedlicher Nulllänge<sup>78</sup> erlaubt die Variation der Vorspannkraft und somit der Federkennlinie des nachgiebigen Teils der Ringschneide. Weiterhin ermöglichen Unterlagen geeigneter Höhe eine Änderung der Federvorspannung. Bei der Auslegung ist auszuschließen, dass die Federn vor Erreichen des Maximalhubs (bei vollem Einfedern des nachgiebigen Teils) ihre Blocklage erreichen.
4. **Feder in Feder:** Zur Erhöhung der Federrate ist die Montage zweier geeigneter Schraubendruckfedern unterschiedlichen Durchmessers je Federteller möglich. Sicherzustellen ist hierbei, dass zwischen den Federn im Betrieb kein Scheuerkontakt und/oder Verklemmen auftritt<sup>79</sup>. Die innere Feder ist zusätzlich in geeigneter Weise durch einen Zylinderstift oder an den Endwindungen montierte Federteller zu führen.
5. **Kombination:** Geeignete Kombinationen der Varianten 1 bis 4 erlauben eine nahezu beliebige Auslegung der Federkennlinie. Einzig der zur Verfügung stehende Bauraum sowie kommerziell frei verfügbare Schraubendruckfedermodelle wirken sich hierbei limitierend aus.

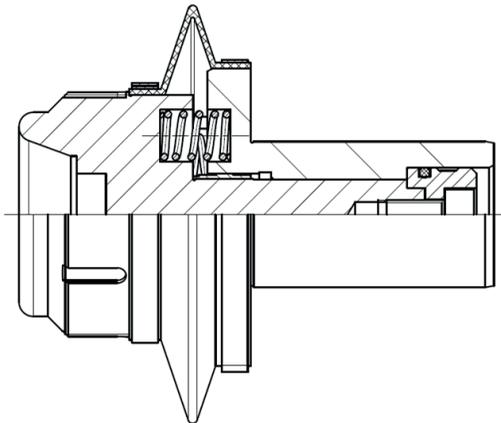


Abb. 29: Halbschnittdarstellung der nachgiebigen Ringschneide

<sup>78</sup> Die Nulllänge ( $l_0$ ) einer Schraubendruck- oder Zugfeder gibt an, welche Länge die Feder ohne Angriff äußerer Kräfte besitzt.

<sup>79</sup> Es ist zwingend ein Mindestspiel zwischen Innendurchmesser der äußeren Feder und Außendurchmesser der inneren Feder vorzuhalten.

Die nachgiebige Ringschneide erfordert einen Schutz gegen das Eindringen von Wasser und Poliermittel. Die konstruktive Ausgestaltung sieht dazu einen Faltenbalg, beziehungsweise eine Stülpmanschette vor. Die segmentierte Zylinderführung (in diesem Fall eine Gleitführung) nutzt das in der Konstruktionstechnik oft angewendete Prinzip ‘Funktionswerkstoff an Funktionsstelle’ [Leh04] durch Verwendung einer Messinglegierung am nachgiebigen Teil der Ringschneide. Der starre Teil ist aufgrund seines direkten Kontakts mit Poliermittel aus hochlegiertem, korrosionsbeständigem Edelstahl gefertigt.

### 6.4.3 Zusammenfassung

Die Gestaltungsphase diente der konstruktiven Ausgestaltung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs sowie der Werkstücklagerung. Vorab erarbeitete Gestaltforderungspläne reduzierten den konstruktiven Aufwand und vereinfachten die Umsetzung maßgeblich.

Das Prinzip der Funktionsintegration erlaubt eine merkliche Reduzierung der Bauteilanzahl/Komplexität der Werkzeugbaugruppe des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. Für die Federkraftanpassung der nachgiebigen Ringschneide bestehen mehrere Varianten, welche in Kombination eine große Freiheit in der Auslegung der Federkennlinie bieten.



## 7 Aufbau & Justage vollaperturiger, aktiv-adaptiver Polierwerkzeuge

Dieses Kapitel behandelt den Aufbau, die Justage, die Inbetriebnahme sowie die Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs als Vorbereitung des nachfolgenden Verfahrensnachweises der vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphären.

### 7.1 Montage

#### VOLLAPERTURIGES, AKTIV-ADAPTIVES POLIERWERKZEUG

Die Montage des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeugs sieht den getrennten Aufbau zweier Unterbaugruppen vor, welche nachfolgend kurz vorgestellt werden sollen:

- **Werkzeugunterbau:** Der Aufbau und die Montage des Werkzeugunterbaus erfolgen direkt in der Nasszelle der Poliermaschine. Der Abstand der beiden Hydroehndorne passt sich entsprechend dem durch den Justierzustand der Maschine vorgegebenen Achsabstand zwischen Abricht- und Werkstückspindel an (vgl. Abb. 11: Maschinenstruktur) und ist abschließend durch Arretieren der Linearführung zu sperren. Unabhängig des Werkzeugoberbaus ist bereits in diesem Stadium eine Funktionsprüfung aller Funktionselemente möglich. Nach Abschluss ist der Werkzeugunterbau durch die Einhausung gemäß Abb. 31 zu verkleiden.
- **Werkzeugoberbau:** Der Aufbau des Werkzeugoberbaus erfordert die Montage und Verdrehsicherung aller Nadeln (vgl. Abb. 30). Durch eine Dreh-, Fräs- oder Erodierbearbeitung ist der sphärische Ersatzradius in das Nadelkissen einzuarbeiten. Weiterhin sind Nadelkissen und Membran<sup>80</sup> sowie Membran und Poliermittelträger<sup>81</sup> stoffschlüssig miteinander zu verbinden. Da der Werkzeugoberbau im Betrieb kontinuierlich dynamischen Formänderungen unterliegt, ist die Verbindung flexibel auszuliegen. Kontaktkleber eignen sich hierfür prinzipiell.

---

<sup>80</sup> Ausschließlich die sphärische Stirnseite einer jeden Nadel ist mit der Membran stoffschlüssig verbunden.

<sup>81</sup> Membran und Poliermittelträger sind vollflächig stoffschlüssig miteinander zu verbinden.

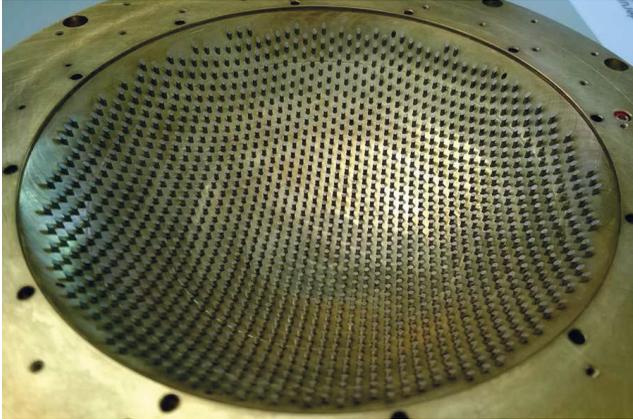


Abb. 30: Vollständig bestücktes Nadelkissen

Der Werkzeugoberbau ist nach Abschluss der Montage dem sphärischen Ersatzradius des Werkstücks anzupassen. In einem Abrichtvorgang<sup>82</sup> trägt ein mit dem Sollkrümmungsradius versehenes Werkzeug überstehende Bereiche des Poliermittelträgers ab. Für das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug ist die Abrichttechnologie der klassischen Sphärenpolitur ohne Anpassungen nutzbar. Aus diesem Grund verzichtet diese Arbeit auf eine detaillierte Diskussion des Abrichtvorgangs. Weiterführende Informationen zum Abrichten mit Ring- und Pelletabrichtern nach aktuellem Stand bieten [Bli10] sowie [Ham01].

Sind beide Teilbaugruppen montiert, justiert und konditioniert, schließt sich die Montage der Gesamtbaugruppe an. Der Werkzeugoberbau ist dazu über die vorgesehene Schnittstelle mit dem Werkzeugunterbau zu verbinden. Dieser Montageschritt entspricht der Vorgehensweise bei Umrüstung auf eine andere Werkstückgeometrie oder Tausch des Werkzeugoberbaus (vgl. Kap. 6.4.2: Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug). Abb. 31 zeigt die schrittweise Montage des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs (links und mittig) sowie das Werkzeug nach einem Poliervorgang.

<sup>82</sup> Auch als Konditionierung des Poliermittelträgers bezeichnet. Das Abrichten erfolgt mit Ring- oder Pelletabrichtern, welche mit galvanisch gebundenem Diamant besetzt sind.

Alternativ erlaubt die Werkzeugbaugruppe das Abrichten des Poliermittelträgers im Gesamtaufbau. Dadurch lässt sich der Radialschlag<sup>83</sup> des Poliermittelträgers in Bezug zur Rotationsachse des Werkzeugoberbaus bis auf wenige  $\mu\text{m}$  reduzieren.



Abb. 31: Schrittweiser Aufbau und Inbetriebnahme des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs

## NACHGIEBIGE RINGSCHNEIDE

Für den Aufbau der nachgiebigen Ringschneide bestehen keine besonderen Anforderungen, welche eine detaillierte Diskussion erfordern. Aus diesem Grunde sei im Rahmen dieser Arbeit auf eine Beschreibung notwendiger Montageschritte verzichtet.

---

<sup>83</sup> Der Radialschlag rührt hierbei aus einem fügespielbedingten Lagefehler (Lateralversatz im einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich sowie Verkippungen im Winkelminutenbereich) zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau.

## 7.2 Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts

Die Anforderungen an die Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts<sup>84</sup> unterscheiden sich grundlegend von denen der Sphärenpolitur. Die spielbehaltene und nachgiebige Lagerung des Werkstücks bei der Synchrospedpolitur erlaubt eine Lageanpassung an das Werkzeug im Bereich mehrerer Zehntelmillimeter (vgl. Kap. 6.3.2: Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts). Entsprechend großzügig sind die Lagefehler zwischen Werkzeug und Werkstück im zweistelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich toleriert.

Der gewählte Ansatz der vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphären fordert prinzipbedingt eine engere Tolerierung der Lageabweichungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Abweichungen vom idealen geometrischen Arbeitspunkt führen zu lokal/zonal abweichenden Bearbeitungsdrücken, welche keinen homogenen Materialabtrag erlauben. Eine typische Synchrosped Maschinenbasis nach Stand der Technik erfüllt die Positionieranforderungen der Sphärenpolitur sicher. Maschinen nach aktuellem Stand verfügen über mittels Lookup-Tabellen<sup>85</sup> korrigierte Linearachsen. Die Korrektur erfolgt zum einen in Bewegungsrichtung und zum anderen orthogonal zur Kompensation von Ausrichtfehlern der Linearachsen zueinander [DIN8601]; [IPT13]; [ISO230-2]; [Sch12]. Für das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug sind die Grundanforderungen an die Bearbeitungsmaschine nach Tab. 7 zu erfüllen:

Tab. 7: Zulässige Fehlergrößen für die vollaperturige Politur rotationssymmetrischer Asphären

Fehlergröße	Richtung	Translatorisch	Rotatorisch
Positionierfehler	Unidirektional	$< 2\mu\text{m}$	$< 6 \text{ arcsec}$
	Bidirektional	$< 2\mu\text{m}$	$< 6 \text{ arcsec}$
Reproduzierbarkeitsfehler	Unidirektional	$< 1\mu\text{m}$	$< 6 \text{ arcsec}$
	Bidirektional	$< 1\mu\text{m}$	$< 6 \text{ arcsec}$

Für eine Synchrosped Maschinenbasis ist eine Korrektur der Schwenkachse (vgl. Abb. 11) unüblich. Dadurch hervorgerufene Formabweichungen am Werkstück lassen sich über eine Anpassung der Verweilzeiten korrigieren und

<sup>84</sup> Der geometrische Arbeitspunkt repräsentiert für den Polierprozess erforderliche Position- und Lageanforderungen.

<sup>85</sup> Lookup-Tabellen oder auch Umsetzungstabellen erlauben die Korrektur linearer Teilungsfehler, Führungsabweichungen sowie Ausrichtfehlern von Maschinenachsen. Die Lookup-Tabelle enthält Korrekturwerte mit definiertem Stützstellenabstand für die jeweilige Achse. Bei der Positionierung einer Achse erfolgt die Verrechnung des dazugehörigen Korrekturwerts. Mit Hilfe linearer Interpolation ist die Berechnung von Korrekturwerten zwischen zwei Stützstellen möglich und üblich.

vermeiden. Für den Ansatz der vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphären ist diese Verfahrensweise nicht zweckmäßig. Abweichungen vom Sollschenkwinkel führen zu Formabweichungen der zu polierenden Oberfläche und erlauben keine vollaperturige Politur der Werkstückoberfläche. Im Rahmen der Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts ist die korrekte Einstellung des Schwenkwinkels daher unumgänglich. Eine geeignete dreistufige Vorgehensweise zur Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts sei nachfolgend beschrieben:

- 1. Einstellung Schwenkwinkel:** Die Ermittlung der Schwenkachsennulllage erfolgt über eine taktile oder optische Längenmessung nach der Umschlagmethode<sup>86</sup> (vgl. Abb. 32). Mit Hilfe einer Nullpunktverschiebung kann die korrekte Schwenkachsennulllage an die Maschinensteuerung übergeben werden. Der Schwenkwinkel beträgt im Bezug zur x-z-Ebene  $0^\circ$  (vgl. Abb. 32: Pos. 7). Die Rotationsachse des Werkstücks (vgl. Abb. 32: Pos. 6) und des Werkzeugs (vgl. Abb. 32: Pos. 8) sind damit parallel ausgerichtet.

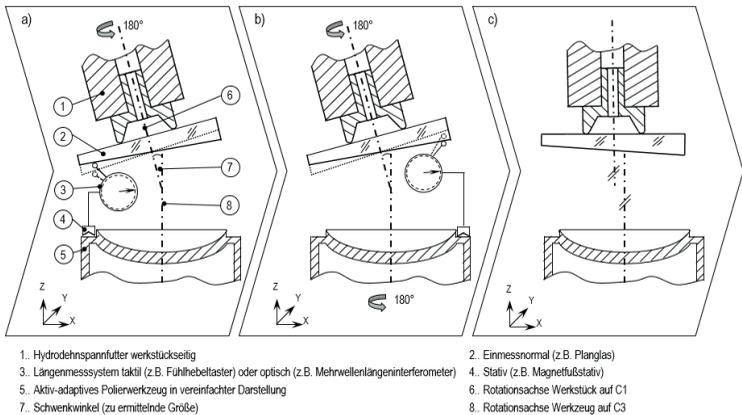
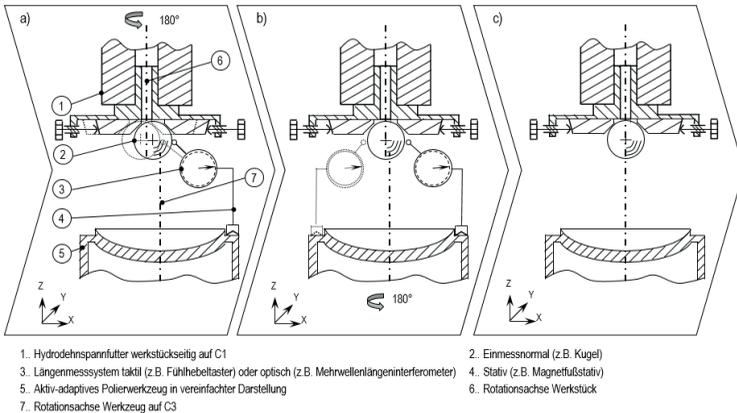


Abb. 32: Erfassung der Schwenkachsennulllage durch Umschlagmessung

<sup>86</sup> Die Umschlagmethode erlaubt eine signifikante Reduzierung der Messunsicherheit. Dabei werden systematische Fehler des Prüfnormals gezielt korrigiert. Sie erfordert zur Bestimmung dieser (beispielsweise Gestaltabweichungen in Form von Oberflächengestaltabweichungen sowie Form- und Lageabweichungen) mindestens zwei Messungen. Dabei ist das Prüfnormal zwischen zwei Messungen um  $180^\circ$  zu drehen (oder auch umzuschlagen), sodass Beginn und Ende der Messstrecke auf dem Normal vertauscht sind. Der Umschlagwinkel ist dabei zur Vermeidung von Fehlern höherer Ordnung hinreichend genau einzuhalten.

**2. Einstellung der x-Position:** Die Notwendigkeit zur Einstellung der x-Position ergibt sich prinzipbedingt aus der Trennstelle zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. So ist nach dem gewählten Ansatz nicht garantiert, dass Abichtspindel und Rotationsachse des Werkzeugoberbaus in Fluchtung<sup>87</sup> sind. Der Ansatz des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs verhält sich innozent<sup>88</sup> gegenüber Fehllagen in y-Richtung [Sch12]. Abweichungen im zweistelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich rufen Gestaltabweichungen am Werkstück im zweistelligen nm-Bereich hervor und können folglich vernachlässigt werden. Fehllagen in x-Richtung führen hingegen zu direkten Gestaltabweichungen der Werkstückoberfläche.



**Abb. 33: Einstellung der x-Position durch Umschlagmessung**

Zur Ermittlung der korrekten Position in x-Richtung sind mindestens zwei Anordnungen zur Umschlagmessung erforderlich (vgl. Abb. 33: Darstellung a) und Darstellung b)). Im ersten Schritt ist das Prüfnormal durch Justage so auszurichten, dass es minimalen Radialschlag (in x-Richtung) aufweist (vgl. Abb. 33: Darstellung a)). In Abhängigkeit verwendeter optischer oder taktiler Messmittel sowie der Qualität des Prüfnormals (Ausführung der Prüffläche<sup>89</sup>, deren Gestaltabweichungen

<sup>87</sup> Es lässt sich zwischen Fluchtungsfehlern in x- und y-Richtung unterscheiden.

<sup>88</sup> Ist die Funktionsgröße nur in höherer Ordnung von der Störgröße abhängig, so verhält sich das technische System innozent gegenüber der Störgröße (in diesem Fall eine Fehllage). [Hac10]

<sup>89</sup> Geeignete Prüfflächenformen sind Zylinder als auch Kugeln. Hierbei besitzt die Kugel gegenüber dem Zylinder den Vorteil, dass Kippfehler des Prüfnormals keinen systematischen Messfehler hervorrufen. Weiterhin sind Kugeln mit anspruchsvollen Toleranzen

sowie kleinste Schrittweite der Justierstelle) sind Radialschläge von  $< 0,5\mu\text{m}$  sicher erreichbar. Dazu ist die Werkstückachse zur Umschlagmessung in  $180^\circ$  Schritten zu rotieren und der Radialschlag des Prüfnormals durch eine eindimensionale Justage in x-Richtung auf kleiner/gleich den vorab definierten Grenzwert einzustellen. Obgleich aufwändiger aufgrund verketteter Justierkreise, ist eine zweidimensionale Justage des Prüfnormals zu bevorzugen.

Diese erlaubt die kontinuierliche Rotation des Prüflings um die Werkstückachse und zeichnet sich durch seine Invarianzeigenschaft<sup>90</sup> gegenüber Drehlagenabweichungen der Werkstückspindel als auch höherer erreichbarer Genauigkeiten aus. Das dabei aufgenommene Signal des Wegmesssystems entspricht einer Sinusfunktion, wobei die Amplitude dem Radialschlag des Prüflings entspricht und im Justierprozess zu minimieren ist.

Im folgenden Schritt ist die Werkzeugachse gegen die stehende Werkstückachse zu rotieren (vgl. Abb. 33: Darstellung b)). Analog der Justage des Prüfnormals kann eine Messung auf Umschlag durch Drehung in  $180^\circ$  Schritten oder durch kontinuierliche Rotation erfolgen. Zielgröße ist hierbei die Einstellung des Radialschlags auf kleiner/gleich dem vorab definierten Grenzwert durch gezieltes Verfahren der x-Achse. Nach Abschluss der Nullpunktbestimmung sind Werkstück- und Werkzeugachse in der x-z-Ebene zueinander fluchtend ausgerichtet. Mit Hilfe einer Nullpunktverschiebung ist die korrekte Lage in x-Richtung an die Maschinensteuerung zu übergeben.

- 3. Einstellung der z-Position:** Die fehlerarme Einstellung des Abstands zwischen Werkstückaufnahme und Scheitelhöhe des Werkzeugoberbaus setzt einen möglichst geringen Radialschlag des Poliermittelträgers im Bezug zur Rotationsachse des Werkzeugs voraus. Liegt der Messpunkt nicht im Scheitel des Messobjekts, so führt dies zu einem Messfehler höherer Ordnung. Eine Möglichkeit zur Beseitigung des Radialschlags wurde unter Abschnitt 7.1 vorgestellt. Zur Vereinfachung gilt im Folgenden die Annahme, dass der Scheitelpunkt des Werkzeugoberbaus (Poliermittelträger) auf der Rotationsachse des Werkzeugs liegt.

---

hinsichtlich Formabweichungen  $\ll 1\mu\text{m}$  und Oberflächenqualitäten von  $R_a < 0,2\mu\text{m}$  wesentlich kostengünstiger herstellbar.

<sup>90</sup> Ist die Funktionsgröße unabhängig von der Störgröße, so verhält sich das technische System invariant gegenüber der Störgröße (in diesem Fall eine Fehllage). [Hac10]

Die Einstellung der z-Position setzt die vorherige Einstellung des Schwenkwinkels sowie der x-Position zwingend voraus (vgl. Kap. 7.2: 1. Einstellung Schwenkwinkel sowie 2. Einstellung der x-Position). Für die Ermittlung der korrekten z-Position ergeben sich mehrere geeignete Möglichkeiten, von denen zwei im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

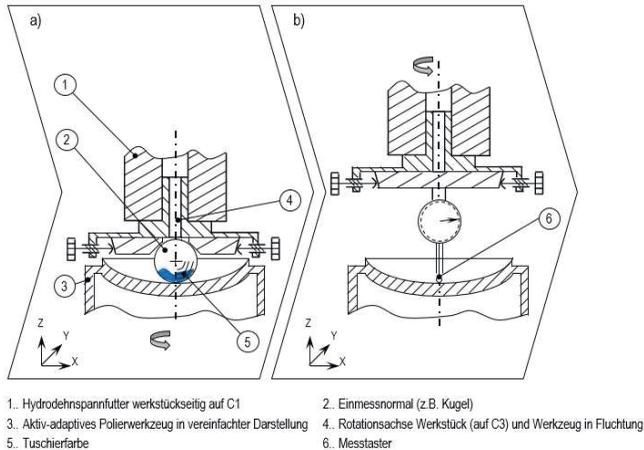


Abb. 34: Einstellung der z-Position durch a) Einmessnormal sowie b) Messtaster

Die Nutzung der zur Einstellung der x-Position beschriebenen Anordnung erlaubt den Verzicht auf ein Wegmesssystem. Der Aufbau nach Abb. 34: Darstellung a) setzt voraus, dass die Scheitelhöhe des Prüfnormals bekannt ist, dieses minimalen Radialschlag aufweist und die Rotationsachsen von Werkzeug und Werkstück in Fluchtung sind (vgl. Kap. 7.2: Einstellung der x-Position). Das Prüfnormal ist nachfolgend an seinem Scheitel mit Tuschiepaste zu bestreichen/zu besprühen. Die kleinste erreichbare Schichtdicke wirkt limitierend auf die Auflösung der Anordnung und ist entsprechend gering zu halten (3 .. 5µm sind realisierbar). Das Prüfnormal ist nachfolgend schrittweise dem Scheitelpunkt des Werkzeugoberbaus zu nähern, wobei der Werkzeugoberbau kontinuierlich rotiert. Ist ein Abtrag der Tuschiepaste am Scheitel des Prüfnormals erkennbar, so ist die Sollposition in z-Richtung erreicht. Als nachteilig erweist sich in dieser Anordnung das langwierige iterative Vorgehen sowie die begrenzte Genauigkeit des Verfahrens.

Eine weitere Möglichkeit stellt die taktile Messung der Scheitelhöhe des Werkzeugoberbaus dar. Berührungslose Messsysteme (interferometrisch, kapazitiv, induktiv, etc.) sind aufgrund der Oberflächenstruktur und Materialzusammensetzung des Poliermittelträgers ungeeignet. Das erforderliche taktile Wegmesssystem ist in dieser Anordnung am werkstückseitigen Hydrodehnspannfutter montiert. Da es sich um eine Absolutwertmessung handelt, ist eine vorherige Nullpunktbestimmung des Messsystems notwendig. Weiterhin ist es erforderlich, den Radialschlag des Messaufbaus durch Justage zu eliminieren. Dazu ist der Antastpunkt in Messrichtung lateral so zu verschieben, dass dieser auf der Rotationsachse des Werkstücks liegt<sup>91</sup>. Nach erfolgter Justage kann die Scheitelhöhe des Werkzeugoberbaus taktil gemessen und der Maschinensteuerung unter Berücksichtigung des Messsystemnullpunkts übergeben werden.

Die in diesem Kapitel beschriebene Vorgehensweise zur Einstellung des geometrischen Arbeitspunkts erlaubt die Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen zur vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphären. Das gezeigte Verfahren setzt jedoch die sichere Erfüllung der unter Tab. 7 aufgezeigten Anforderungen an die Bearbeitungsmaschine voraus.

---

<sup>91</sup> Die Vorgehensweise ist analog dem vorherigen Justierschritt, vgl. Kap. 7.2: Einstellung der x-Position.

### 7.3 Festlegung Prozessparameter

Der Ansatz des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs lehnt sich hinsichtlich Gestalt und Kinematik stark an die Politur mittels Synchrospeed-Kinematik an. Die Prozessparameter sind entsprechend folgender Vorgaben einzustellen:

- **Prozessparameter vergleichbar oder identisch dem Synchrospeedverfahren:** Das Drehzahlverhältnis zwischen Werkzeug und Werkstück sowie der Schwenkwinkel (Winkel, der zwischen den Rotationsachsen von Werkzeug und Werkstück aufgespannt wird) sind analog der Synchrospeed-Kinematik auszulegen. Ebenfalls sollten übliche Poliermittelträger mit bekannten Eigenschaften (Abtragsrate, Standzeit, Porosität, Shorehärte, etc.) aus der Sphärenpolitur Anwendung finden.
- **Prozessparameter abweichend vom Synchrospeedverfahren:** Bearbeitungsdruck als auch Drehzahl sind so auszulegen, dass eine Beschädigung des Werkzeugprototyps ausgeschlossen werden kann. Begrenzend für den Bearbeitungsdruck ist in erster Linie die Tragfähigkeit der Luftlager Elemente im Werkzeugunterbau. Weiterhin unterliegen die Nadeln einer kontinuierlichen, dynamischen Auf- und Abbewegung mit Amplituden im Bereich mehrerer Zehntelmillimeter. In Abhängigkeit orts- und drehzahlabhängiger Beschleunigungen sowie der jeweiligen Masse der betrachteten Nadel, erhöht sich die lokale Flächenpressung der Luftlager Elemente zusätzlich.

## 8 Politur mittels vollaperturiger, aktiv-adaptiver Werkzeuge

### 8.1 Verfahrensnachweis

Ein Verfahrensnachweis versteht sich als die praktische Erprobung zum Nachweis der Wirksamkeit eines Fertigungs- und/oder Bearbeitungsverfahrens. Im Rahmen dieser Arbeit ist darunter die vollaperturige Politur einer festgelegten Werkstückgeometrie unter Verwendung des vorab entwickelten Prototyps eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs zu verstehen. Ziel des Verfahrensnachweises ist es nicht, eine Werkstückgeometrie nach Zeichnungsvorgabe in Spezifikation zu fertigen. Vielmehr sind Funktion, Zusammenspiel, Wirksamkeit sowie Zuverlässigkeit aller für die Bearbeitung relevanten Funktionselemente des zu erprobenden Werkzeugkonzepts nachzuweisen.

#### 8.1.1 Werkzeug und Werkstück

Im Rahmen des Verfahrensnachweises sei auf eine aktorische Ausführung des Werkzeugunterbaus verzichtet. Der Prototyp des vollaperturigen, aktiv adaptiven Polierwerkzeugs (vgl. Abb. 26) entspricht damit einer in [Sch15b] beschriebenen Anordnung. Die sphärischen Luftlagerelemente werden dabei durch ein ursprünglich planar ausgeführtes Luftlager aus porösem Graphit substituiert, welches den asphärischen Anteil des um den Schwenkwinkel gekippten Werkstücks nachbildet. Diese Vorgehensweise bietet sich an, um die Vorzüge einer signifikanten Reduzierung von Komplexität und Herstellkosten des Werkzeugaufbaus, einer Senkung der Ausfallwahrscheinlichkeit sowie einer Steigerung der Stabilität und Steifigkeit des Aufbaus zu nutzen. Weiterhin erlaubt diese Ausführung die Erprobung des Nadelkissenprinzips sowie den Funktionsnachweis der vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphären.

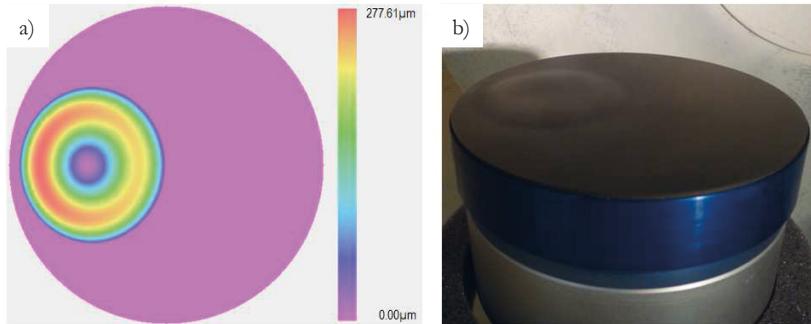


Abb. 35: a) simulierte Geometrie des Werkzeugunterbaus; b) bearbeitetes Luftlager mit Sollgeometrie nach [Sch15b]

Die von der Planfläche abweichende Kontur des asphärischen Anteils ist hierfür in das Luftlagerelement über trennende Verfahren nach [DIN8580-0] einzuarbeiten. Die Kontur des Luftlagerelements ist dabei auf die zu bearbeitende Werkstückgeometrie auszuliegen.

Als geeignete Bearbeitungsverfahren haben sich das Ultrapräzisionsdrehen mit Slow Tool Servo (STS) und Diamantwerkzeug (vgl. Abb. 5: 3.2 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden nach [DIN8589-0]) sowie das Schleifen mit rotierendem Werkzeug (vgl. Abb. 5: 3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden nach [DIN8589-0]) erwiesen.

Die Darstellung unter Abb. 35 a) zeigt die simulierte Sollgeometrie des statischen Werkzeugunterbaus. Die maximale Abweichung von der Planfläche (als Nullniveau) beträgt  $277,6\mu\text{m}$  und ist erhaben ausgeführt. Abb. 35 b) veranschaulicht das ursprünglich planare Luftlagerelement nach spanender Bearbeitung.

Der Verzicht auf eine aktorische Ausführung des Werkzeugunterbaus erfordert einen über den gesamten Poliervorgang korrekt eingestellten und konstanten Schwenkwinkel. Alle weiteren prozessrelevanten Randbedingungen sowie der mechanische Aufbau des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs entsprechen denen der aktorischen Ausführung und bleiben unverändert.

### 8.1.2 Vorgehensweise und Durchführung

Die im Rahmen des Verfahrensnachweises erforderliche Vorgehensweise sowie die zu durchlaufenden Prozessschritte zeigt Abb. 36. Das Werkstück ist eingangs auf die nachgiebige Ringschneide aufzukitten und durch Schleifbearbeitung (vgl. Kap. 4.2.2) entsprechend der Sollgeometrie zu bearbeiten. Durch eine nachfolgende taktile Eingangsmessung kann die Istform sowie Mittendicke des Werkstücks ermittelt werden. Dazu ist die Scheitelhöhe des geschliffenen Werkstücks zu erfassen. Weiterhin ist mindestens eine Messreihe in radialer Richtung (radialer Schnitt) mit geeigneter Messpunktdichte (vgl. Kap. 3.2.3) aufzunehmen.

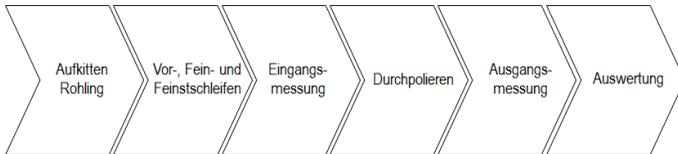


Abb. 36: Prozessschritte für den Verfahrensnachweis

Nach abgeschlossener Politur des Werkstücks mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug ist die Werkstückoberfläche zu reinigen und eine Ausgangsmessung analog der Eingangsmessung durchzuführen (vgl. Abb. 36). Die daraus gewonnenen Informationen dienen im Anschluss der Bestimmung maximaler Abtragshöhe sowie durch die Politur verursachter Gestaltabweichungen 1. Ordnung (vgl. Kap. 3.2.3) nach [DIN4760].

### 8.1.3 Auswertung und Interpretation

Im Rahmen der Auswertung sind Eingangs- und Ausgangsmessung nach Abb. 36 gegenüberzustellen und zu bewerten. Anhand der Abtragsverläufe<sup>92</sup> können nachfolgend Aussagen zur Erfüllung des Verfahrensnachweises getroffen werden.

<sup>92</sup> Alternativ als Abtragsprofil bezeichnet. Dieses errechnet sich aus der Differenz aus Eingangsmessung und Ausgangsmessung.

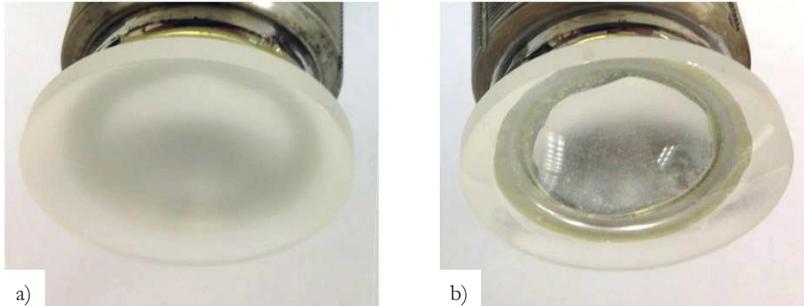


Abb. 37: Werkstückgeometrie a) vor Bearbeitung; b) nach Durchpoliervorgang mit vollaperturigem, aktiv-adaptivem Polierwerkzeug

Abb. 37 a) zeigt die visuell matt und undurchsichtig erscheinende Oberfläche des aufge kitteten Prüflings nach Schleifbearbeitung und Eingangsmessung. Dem gegenüber ist die Werkstückoberfläche (vgl. Abb. 37 b)) nach zehnminütiger Polierbearbeitung mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeug vollständig glänzend und durchsichtig. Eine Betrachtung der Abtragsverläufe nach Abb. 38 zeigt, dass – obgleich lokal unterschiedlicher Abtragshöhen – ein vollaperturiger Materialabtrag erzielt und der Verfahrensnachweis damit prinzipiell erbracht wurde.

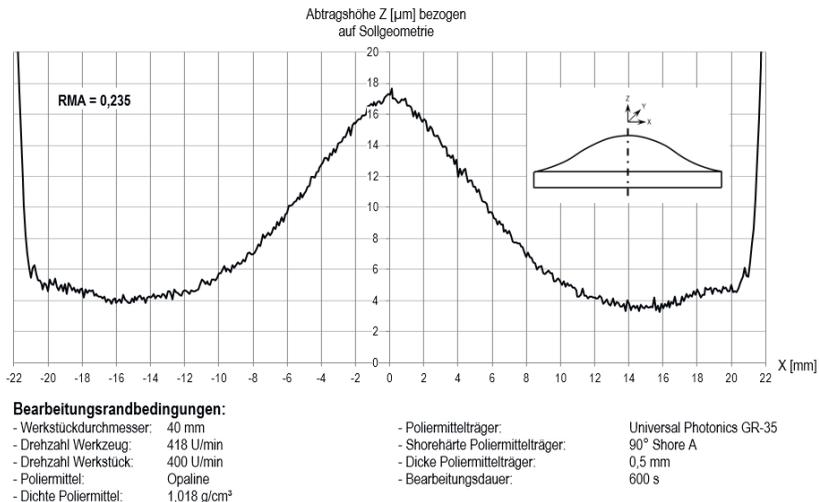


Abb. 38: Abtragsverlauf für die Politur mit vollaperturigem, aktiv-adaptivem Polierwerkzeug

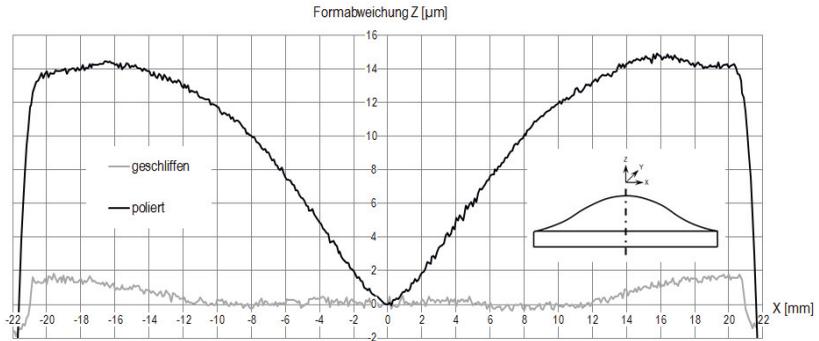


Abb. 39: Formfehlerprofil des Werkstücks nach Schleifen und vollperturiger Politur

### Bemerkungen und Interpretation des Abtragsverlaufs sowie Formfehlerprofils:

- Das in Abb. 38 dargestellte Abtragsprofil errechnet sich aus der Differenz von Eingangsprofil (nach dem Schleifen) und Ausgangsprofil (nach dem Polieren). Durch die Schleifbearbeitung in die Werkstückoberfläche eingeprägte Formfehler in der Größenordnung von 1 .. 2µm bleiben somit ohne Auswirkung.
- Abb. 39 zeigt das Formfehlerprofil der Werkstückoberfläche nach den Prozessschritten Schleifen und Polieren. Dieses errechnet sich aus der Differenz von Sollform und Istform. Da der Formfehler eine relative Größe ist, ist eine Nullpunktverschiebung im Linsenscheitel ( $x = 0\text{mm}$ ) zur vereinfachten Interpretation der Graphen zulässig.
- Der asymptotische Verlauf der Abtragshöhe (vgl. Abb. 38) bei  $x = -21\text{mm}$ , respektive  $x = 21\text{mm}$  ist auf den Werkstückdurchmesser von  $D_{\text{Wst}} = 40\text{mm}$  sowie die Verwendung einer Tastkugel mit dem Durchmesser  $D_T = 2\text{mm}$  zurückzuführen. Der maximal auswertbare Bereich ist entsprechend auf den Werkstückdurchmesser begrenzt.
- Die maximale Abtragshöhe von  $\approx 17\mu\text{m}$  verspricht einen vollständigen Abtrag der nach dem Schleifen vorliegenden gestörten Grenzschicht.
- Die minimale Abtragshöhe von  $\approx 4\mu\text{m}$  verspricht keinen vollständigen Abtrag der gestörten Grenzschicht. Diese sollte minimal  $15\mu\text{m}$  betragen.

- Das Abtragsprofil zeigt eine ausgeprägte Radialsymmetrie, welche auf die Politur mittels Synchronspeed-Kinematik zurückzuführen ist. Sie erleichtert für das Schleifen zum einen den gezielten Vorhalt von Formabweichungen (Gestaltabweichungen 1. Ordnung nach [DIN4760]) und zum anderen nachfolgende, verweilzeitgesteuerte Korrekturpoliervorgänge.
- Der langwellige Kurvenverlauf des nach der Politur vorliegenden Fehlerprofils eignet sich prinzipiell für die Korrekturpolitur mittels Magnetorheological Finishing und Computer Controlled Polishing (vgl. Kap. 4.2.5).
- Der gutmütige Verlauf des Abtragsprofils im Bereich des Werkstückrands schließt eine stützringlose Politur prinzipiell nicht aus. Der im Vergleich zum Bonnet Polishing ausbleibende Randabfall der Werkstückoberfläche ist auf die vollaperturig ausgebildete Kontaktzone sowie die aktive Formänderung des Werkzeugs zurückzuführen.
- Die Differenz aus maximaler und minimaler Abtragshöhe ist mit  $\approx 13\mu\text{m}$  bei einem RMA = 0,235 für die Genauigkeitsklasse der Präzisionsoptik nicht vertretbar.

Ein Wiederholversuch unter identischen Randbedingungen zeigt einen vergleichbaren Abtragsverlauf. Die maximale Abweichung beträgt  $\approx 1,5\mu\text{m}$  PV und tritt im Bereich der kleinsten Abtragshöhe auf. Der Formfehlerverlauf (mit Abweichungen von  $\approx 13\mu\text{m}$ ) ist folglich auf systematische Fehler zurückzuführen. Dazu zählen ungeeignete Prozessparameter, deren Einflussverhalten es im folgenden Abschnitt zu untersuchen und zu optimieren gilt.

Nicht beeinflussbar ist hingegen der stets erhöhte Materialabtrag im Bereich des Linsenscheitels. Die zwischen Luftlager und Nadelkissen befindliche Membran stützt sich im unbelasteten Zustand auf den höchsten Punkten des Luftlagers ab. Die Zone des Luftlagers, welche den Linsenscheitel nachbildet, liegt nahe dem Nullniveau der Planfläche (vgl. Abb. 35 a)). Die Luftspalthöhe zwischen Luftlager und Membran entspricht in dieser Zone der Größenordnung der maximalen Pfeilhöhendifferenz des Luftlagers. Da das Nadelkissen die Kontur der Membran nachbildet, weist das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug im unbelasteten Zustand einen systematischen Formfehler im Scheitelbereich auf. Sind Werkzeug und Werkstück im Eingriff, werden die Nadeln im Scheitelbereich (in z-Richtung) verdrängt. Das Werkzeug besitzt damit seine gewünschte Sollform. Die Verdrängung der Nadeln erfordert eine elastische Deformation der Membran, welche einen lokal erhöhten Polierdruck im Bereich des Linsenscheitels hervorruft. Nach der Preston Hypothese (vgl. Kap. 3.2.4) führt eine Erhöhung des Drucks zu einer

erhöhten Materialabtragsrate, welche den systematischen Fehler erhöhten Materialabtrags im Scheitelbereich erklärt. Eine Vermeidung dieses systematischen Fehlers ist ohne konstruktive Änderungen nicht möglich, jedoch verspricht eine geeignete Prozessparameterauslegung eine Kompensation des Effekts.

## 8.2 Einflussgrößen und deren Wirkverhalten

Die Korrektur des im Rahmen des Verfahrensnachweises ermittelten Abtragsprofils erfordert die Kenntnis abtragbestimmender und wirksamer Einflussgrößen sowie eine Analyse ihres Einflussverhaltens. Diskussionsgegenstand dieses Abschnitts soll daher die Aufarbeitung in der flächigen Politur wirkender Einflussgrößen sein. Darauf aufbauend erfolgt eine gezielte Variation dreier Einflussgrößen, um deren Auswirkungen auf das Abtragsprofil zu ermitteln.

Ziel dieses Abschnitts ist es nicht, eine vollständige Analyse wirkender Einflussgrößen durchzuführen, respektive eine Beispielgeometrie in Spezifikation zu fertigen. Vielmehr dient er der Findung zur Beeinflussung des Abtragsprofils geeigneter Einflussgrößen, indem vielversprechende Größen analysiert, diskutiert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet werden. Den Abschluss bilden eine Empfehlung weiterer zur Variation geeigneter Einflussgrößen sowie eine kurze Zusammenfassung.

### 8.2.1 Einflussgrößen flächiger Polierprozesse

In flächigen Polierprozessen wirkende Einflussgrößen erlauben eine Kategorisierung anhand unterschiedlichster Kriterien wie Prozess, körperlicher Zugehörigkeit, etc. Da diese frei wählbar sind stellt die Zusammenfassung nach Tab. 8 lediglich eine Möglichkeit der Kategorisierung, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, dar.

Mit Ausnahme der kursiv hervorgehobenen Einflussgrößen sind alle aufgelisteten Größen analog für die flächige Politur mittels Synchrospeed-Kinematik, Hebelwerkzeug als auch Bonnet gültig. Die Ausnahmen nehmen Bezug auf die konstruktive Ausführung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs und bieten zusätzliche Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung des Abtragsprofils.

Tab. 8: Übersicht der Einflussgrößen flächiger Polierprozesse [IPT15]; [Bli10]; [Nau14]

Kategorie	Kriterium	Einflussgröße	
Maschinenbasis	Grundaufbau (konstruktiv)	- Führungsart und -länge - Art der Spindellagerung - Antriebskonzept - Aufbau Grundgestell - Messsystem	- Eigenkreisfrequenzen - Achssteifigkeit - Thermalmanagement - Ausführung Werkzeugaufnahme
	Statische/ dynamische Fehler	- Reproduzierbarkeitsfehler - Ablauffehler/Lauffehler	- Bahnfehler
	Steuerung	- Art/Grad der Achskorrektur - Bahnbeschreibung	- Automatisierungsgrad
Werkstück	Material	- Mech. Eigenschaften (Härte, Kratzempfindlichkeit) - Thermische Eigenschaften - Struktur: amorph/kristallin	- Textur und Gefüge - Inhomogenitäten und Schlieren - Chem. Eigenschaften
	Geometrie	- Gestaltabweichungen/Vorhalt	- Mikrorauheit
Vorprozesse	Schleifen	- Gestaltabweichungen/Vorhalt	- Tiefenschädigung
	Werkstücklagerung	- Stabilität Zentrierzustand	- Spannungszustand
Prozessparameter		- Exzenterbewegung (Hebelpol.) - Off-axis Winkel (Bonnet Pol.) - Relativgeschwindigkeit (Drehzahl $W_{st}/W_z$ )	- Bearbeitungsdauer - Bahn/Oszillation - Druck - Randverlängerung
Polierwerkzeug	Grundaufbau	- Maschinenschnittstelle - <i>Fehlervorhalt in Werkzeuggeometrie</i> - <i>Härte und Dicke der Membranen</i>	- Material - Durchmesser - Steifigkeit
	Poliermittelträger	- Werkstoff - Härte - Makrogeometrie (Porigkeit)	- Mikrogeometrie - Dicke - <i>Geometrie (Belegung)</i>
Poliersuspension (Hilfsstoff)	Polierflüssigkeit	- Konzentration Polierkörner - Chemische Eigenschaften - Physikalische Eigenschaften - Konditionierung/ Aufbereitung/Filterung	- pH-Wert - Temperatur - Betriebsdauer - Viskosität - Art und Typ
	Polierkorn	- Art und Typ - Chemische Eigenschaften - Physikalische Eigenschaften - Größenverteilung	- Härte - Korngröße - Kornform - Betriebsdauer
Fehlerquelle		- Schwingungen (Gebäude, Peripherie) - Inhomogenitäten Reibzustand	- Umwelteinflüsse - Bediener

Nicht alle bekannten Einflussgrößen eignen sich a priori zur gezielten Beeinflussung des Abtragsprofils. Um vorab eine Bewertung zur Variation geeigneter Einflussgrößen zu treffen, sollten nachfolgende Grundvoraussetzungen erfüllt sein. Die Einflussgröße:

- ist bekannt, beschreibbar und veränderbar;
- besitzt hinreichenden Einfluss auf das Abtragsprofil;
- führt zu einem stabilen und reproduzierbaren Abtragsprofil;
- erlaubt die Einhaltung der Oberflächenrauheits- und Sauberkeitsanforderungen.

Nicht beeinflussbare Größen (z.B. zufällige Fehler) sowie durch das zu bearbeitende Werkstück vorgegebene Parameter wie Werkstoff, zulässige Gestaltabweichungen, zulässige Mikrorauheit, etc. beeinflussen den Abtragsprozess, die Auslegung der Einflussgrößen und insbesondere der Prozessparameter wesentlich.

Im Folgenden soll der Einfluss einer Variation von Poliermittelträgerbelegung, Drehzahlverhältnis von Werkstück zu Werkzeug sowie Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks auf das Abtragsprofil analysiert werden.

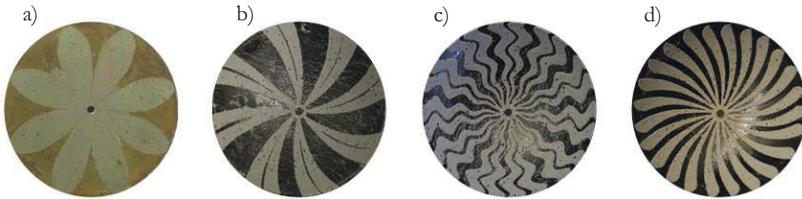
### 8.2.2 Variation der Poliermittelträgerbelegung

Die aus der Politur mittels Synchrospeed-Kinematik übliche Poliermittelträgerbelegung in 'Blütenform'<sup>93</sup> ist auf das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug nicht übertragbar. Stellt das Synchrospeedverfahren aufgrund seines steifen Werkzeugaufbaus in einfachster Betrachtung ein Formkopieren der Werkzeugkontur auf die Werkstückoberfläche dar, ist die vollaperturige Politur rotationsymmetrischer Asphären mit dem aktiv-adaptiven Werkzeug hingegen den druckgesteuerten Polierverfahren zuzuordnen. Druckgesteuert bedeutet in diesem Fall, dass die Abtragshöhe nach der Preston Hypothese (vgl. Kap. 3.2.4) von der lokalen Druckverteilung, unter Annahme gleicher überstrichener Strecken (Integral der Relativgeschwindigkeit nach der Zeit) sowie einer konstanten Preston Konstante, abhängig ist. Da die Druckverteilung für den Ansatz des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs nicht gezielt einstellbar ist, lässt sich die im Poliervorgang überstrichene Strecke als

---

<sup>93</sup> Die in der Politur mittels Synchrospeedverfahren übliche Blütenform ergibt sich allein aus der Forderung nach gleichmäßigem Verschleiß des Poliermittelträgers über die gesamte Werkzeugoberfläche. Ein ungleichmäßiger Verschleiß hätte systematische Formabweichungen des Werkstücks zur Folge. Die Gestalt der Blütenform errechnet sich aus der lokalen Verteilung zwischen Werkzeug und Werkstück zurückgelegter Strecken und ist jeweils nur für einen Prozessparametersatz (Drehzahl Werkstück; Drehzahl Werkzeug; mittlerer Schwenkwinkel; etc.) gültig.

Ersatzsteuergröße einführen. Dazu ist die Flächenbelegung des Poliermittelträgers (Poliermittelträger-Belegung) entsprechend den lokalen Abtragshöhen auf der Werkstückoberfläche auszulegen. Zonen mit geringer Abtragshöhe sind folglich so zu belegen, dass die im Poliervorgang überstrichene Strecke größer als in Bereichen größerer Abtragshöhe ausfällt.



**Abb. 40: Poliermittelträgerbelegungen a) Blütenform Synchronspeed-Kinematik; b) Ausgangsbelegung für vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug; c) - d) optimierte Belegung für gleichmäßige Abtragshöhe**

Abb. 40 a) zeigt die in der Politur mittels Synchronspeedverfahren typische Blütenform, welche für den Prototyp des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs aufgrund mangelnder Flexibilität ungeeignet ist. Im Rahmen des Verfahrensnachweises (vgl. Abb. 38 mit  $RMA = 0,235$ ) wurde eine Poliermittelträger-Belegung nach Abb. 40 b) verwendet.

Die Poliermittelträger-Geometrien nach Abb. 40 c) und d) sind in ihrer Belegung dahingehend optimiert, dass sie eine geringere Abtragshöhendifferenz und somit eine Steigerung des relativen Materialabtragskoeffizienten (RMA) versprechen. Die Poliermittelträger-Belegung ist für Variante c) als auch d) identisch, jedoch unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer Form. Geometrisch sind der Optimierung der Poliermittelträger-Belegung enge Grenzen gesetzt, um die Flexibilität des flächig geklebten Membran-Poliermittelträger-Verbunds beizubehalten und den Poliermittelzufluss und -abfluss zu gewährleisten. Eine zonal geschlossene/vollständige Poliermittelträger-Belegung ist daher nicht möglich.

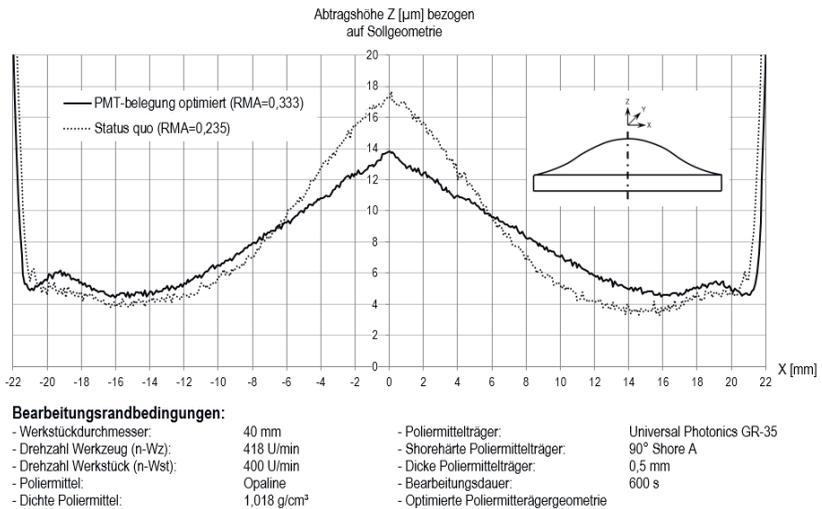


Abb. 41: Abtragsverlauf des vollperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs mit optimierter Poliermittelträger-Belegung

Abb. 41 zeigt den Abtragsverlauf mit optimierter Poliermittelträger-Belegung sowie  $RMA = 0,333$ . Das im Rahmen des Verfahrensnachweises erreichte Abtragsprofil ist zu Vergleichszwecken ebenfalls geplottet. Daraus lässt sich rückschließen, dass eine optimierte Poliermittelträger-Belegung eine Verbesserung des Abtragsverlaufs um  $\approx 40\%$  im Vergleich zum Status quo ( $RMA = 0,235$ ) ermöglicht, jedoch nicht als alleiniges Stellglied zur Erzeugung eines Konstantabtrags genügt.

### 8.2.3 Variation Drehzahlverhältnis von Werkstück zu Werkzeug

Das vollperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug entspricht in seiner Bearbeitungs kinematik der Synchro speed-Kinematik (vgl. Kap. 4.2.3) – mit Ausnahme des für das Prototypwerkzeug unveränderlichen Schwenkwinkels. Somit besitzt das Drehzahlverhältnis zwischen Werkzeug und Werkstück wesentlichen Einfluss auf das Abtragsverhalten. Nach der Preston Hypothese hängt die Abtragshöhe direkt von der überstrichenen Strecke auf der Werkstückoberfläche ab (vgl. Kap. 3.2.4), welche sich aus der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück ergibt.

Das im Rahmen des Verfahrensnachweises gewählte Drehzahlverhältnis entspricht einem typischen Prozessparameter der Synchronspeed-Kinematik. Da das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug zu einem stets erhöhten Materialabtrag im Bereich des Linsenscheitels führt (vgl. Kap. 8.1.3), verspricht eine erhöhte Werkstückdrehzahl im Verhältnis zur Werkzeugdrehzahl eine Steigerung des RMA.

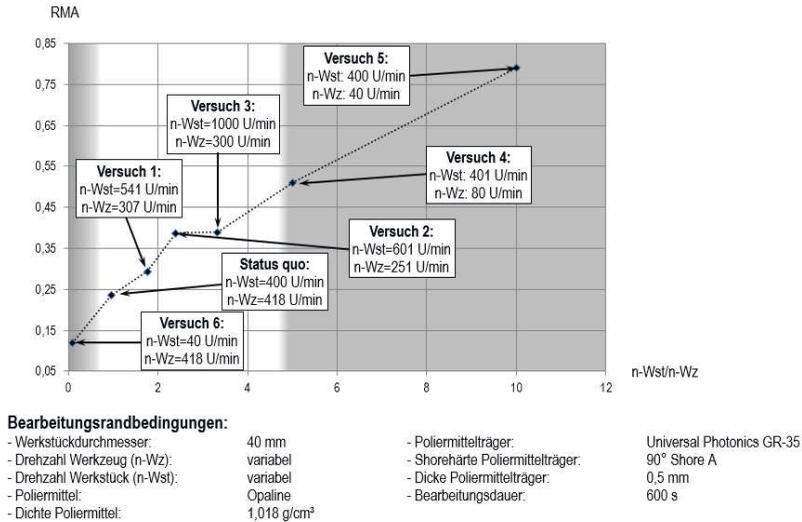


Abb. 42: Relativer Materialabtragskoeffizient in Abhängigkeit des Drehzahlverhältnisses

Die unter Abb. 42 aufgeführte Versuchsreihe zeigt die Abhängigkeit des RMA vom Drehzahlverhältnis zwischen Werkstück und Werkzeug. Eine wirksame Erhöhung des RMA verspricht die Anhebung des Drehzahlverhältnisses zwischen Werkstück und Werkzeug, wie die Versuche 1 bis 5 belegen. Das Maximum mit  $RMA = 0,79$  erzielt Versuch 5 mit einem Drehzahlverhältnis von 10:1. Die negativen Auswirkungen einer Reduzierung des Drehzahlverhältnisses zwischen Werkstück und Werkzeug veranschaulicht Versuch 6. Mit  $RMA = 0,12$  beträgt die maximale Abtragshöhe in etwa das Achtfache der minimalen Abtragshöhe. Der RMA besitzt in erster Näherung eine lineare Abhängigkeit zum Drehzahlverhältnis.

Liegt das Drehzahlverhältnis im grau markierten Bereich (vgl. Abb. 42), so neigt das tribologische System zur Generierung mittelfrequenter Gestaltabweichungen (vgl. Kap. 4.2.3), wie sie aus der Politur mittels subaperturiger Bonnetwerkzeuge bekannt sind. Folglich stellen diese Zustände keine Option für die Praxis dar, da diese eine nachfolgende Glättpolitur erfordern.

Als praktikabel erweisen sich hingegen Drehzahlverhältnisse, welche im weiß markierten Bereich des Diagramms liegen, obgleich sie nur eine begrenzte Steigerung des RMA ermöglichen.

Analog der optimierten Belegung des Poliermittelträgers sind der Variation des Drehzahlverhältnisses in der Praxis Grenzen gesetzt. Dennoch stellt sie eine wertvolle Einflussgröße zur Beeinflussung des Abtragsprofils dar.

### 8.2.4 Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks

Der während der Politur mit vollperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeugen systematisch auftretende Fehler erhöhten Materialabtrags im Bereich des Linsenscheitels eignet sich aufgrund seiner Reproduzierbarkeit ( $\Delta PV < 2\mu\text{m}$ ) prinzipiell zur Korrektur durch Fehlervorhalt. Das aus der Politur sphärischer, asphärischer als auch freiformoptischer Bauelemente angewandte Prinzip des Fehlervorhalts lässt sich unverändert für die Politur mit vollperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugen nutzen.

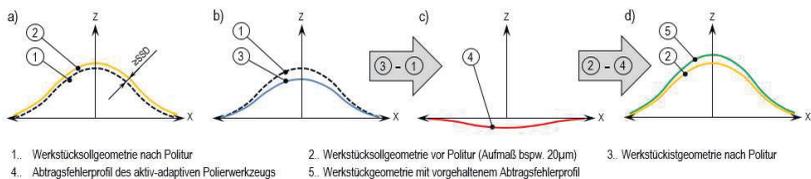


Abb. 43: Prinzipielle Vorgehensweise zum Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung

Die prinzipielle Vorgehensweise erfordert die Abarbeitung vier sequentieller Prozessschritte, dargestellt in Abb. 43: a) bis d). Eingangs ist die Werkstücksollgeometrie vor der Politur (vgl. Abb. 43: Position 2) gemäß Abb. 43: a) zu berechnen. Dazu ist es hinreichend, die Werkstücksollgeometrie nach der Politur (vgl. Abb. 43: Position 1) mit einem konstanten Aufschlag in Normalenrichtung, größer/gleich der zu erwartenden Tiefenschädigung, zu beaufschlagen.

Nach erfolgter Testpolitur nach Abb. 43: b) ist die Differenz aus Werkstückgeometrie nach Politur (vgl. Abb. 43: Position 3) und der Werkstücksollgeometrie nach Politur (vgl. Abb. 43: Position 1) zu bilden.

Den errechneten Verlauf des Abtragsfehlers zeigt Abb. 43 c). Dieser (vgl. Abb. 43: Position 4) ist im Bedarfsfall mit geeigneten Filtern zu glätten, um einen schleifbaren, krümmungsstetigen ( $C^2$ -stetigen) Pfeilhöhenverlauf zu generieren. Weiterhin ist im Bedarfsfall eine Skalierung des Abtragsfehlerprofils möglich und sinnvoll.

In einem letzten Prozessschritt nach Abb. 43 d) ist das Abtragsfehlerprofil des aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs (vgl. Abb. 43: Position 4) von der Werkstücksollgeometrie vor Politur (vgl. Abb. 43: Position 2) zu subtrahieren. Der damit vorliegende Verlauf der Werkstückgeometrie mit vorgehaltenem Abtragsfehlerprofil (vgl. Abb. 43: Position 5) kann nachfolgend in ein zu bearbeitendes Werkstück durch Schleifbearbeitung eingepägt werden.

Die beschriebene Vorgehensweise zum Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung eignet sich prinzipiell für ein iteratives Vorgehen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass der Reproduzierbarkeitsfehler kleiner als der verbliebene Restformfehler ausfällt.

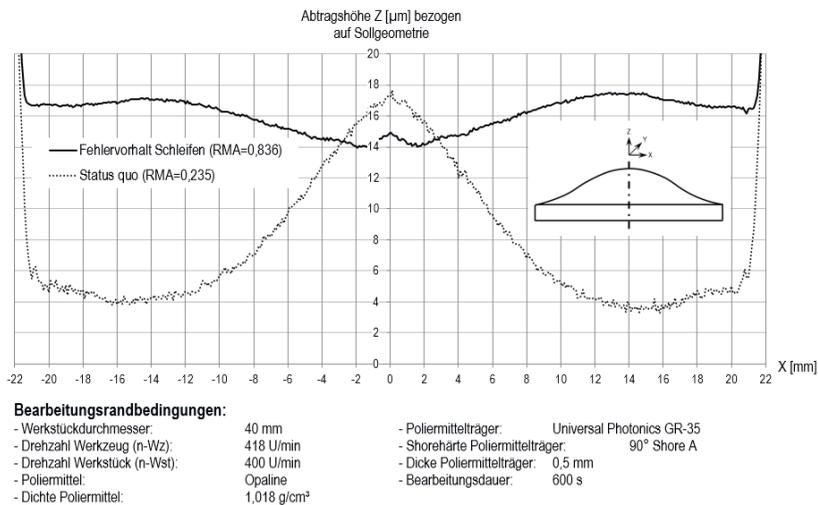


Abb. 44: Abtragsverlauf des aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs bei Fehlervorhalt

Die in Abb. 44 dargestellten Abtragsverläufe zeigen zwei mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug bearbeitete Werkstückgeometrien. Die Bearbeitungsrandbedingungen sind für beide Verläufe identisch.

Der unkorrigierte Abtragsverlauf des schwarz gepunkteten Graphen (Status quo mit  $RMA = 0,235$ ) dient der Wirksamkeitsbewertung des Fehlervorhalts. Dem systematisch erhöhten Materialabtrag im Scheitelbereich des Werkstücks wurde für den schwarzen, durchgehenden Graphen durch Fehlervorhalt während der Schleifbearbeitung entgegengewirkt. Der erzielte  $RMA = 0,836$  zeigt, dass diese Vorgehensweise zur Einstellung der Sollgeometrie hervorragend geeignet ist.

Für die Genauigkeitsklasse der Präzisionsoptik liegen die zulässige Formabweichungen des Vorpolierprozesses zwischen 3 .. 4  $\mu\text{m}$  PV. Weiterhin besteht die

Forderung nach niederfrequenten Gestaltabweichungen mit Ortswellenlängen  $\geq 5\text{mm}$  (vgl. Kap. 3.2.3). Diese erlauben den Verzicht auf aufwändige Glättpoliervorgänge und sind Voraussetzung einer effizienten Formkorrektur mittels Magnetorheological Finishing (Radpolitur). Das mit Fehlervorhalt geschliffene und mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeug polierte Werkstück erfüllt dabei beide Forderungen.

### 8.2.5 Zusammenfassung

Dieser Abschnitt diene der Vorstellung abtragsbestimmender Einflussgrößen flächiger Polierprozesse sowie einer Analyse ihres Wirkverhaltens. Aus einer eingangs diskutierten Übersicht wirkender Einflussgrößen wurden nachfolgend drei ausgewählt und zur Korrektur des im Rahmen des Verfahrensnachweises ermittelten Fehlerprofils gezielt variiert.

Den größten Einfluss auf das Abtragsprofil zeigte der Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks. Dieser erlaubte eine signifikante Steigerung von  $RMA = 0,235$  auf  $RMA = 0,836$  und erwies sich aufgrund seiner simplen Umsetzung als auch hinreichenden Reproduzierbarkeit als praktikable Stellgröße zur Korrektur des Fehlerprofils.

Eine Optimierung der Poliermittelträgerbelegung erwies sich aufgrund ihres geringen Einflussvermögens auf das Abtragsprofil als mäßig geeignet. So empfiehlt sich die Variation dieser Größe vielmehr zur finalen Reduzierung langwelliger Formfehleranteile als zur Korrektur des systematisch erhöhten Abtrags im Scheitelbereich des Werkstücks.

Die Variation des Drehzahlverhältnisses von Werkstück zu Werkzeug ( $n_{Wst}/n_{Wz}$ ) stellt eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung des Abtragsprofils dar. Eine schrittweise Erhöhung der Drehzahl des Werkstücks im Verhältnis zum Werkzeug zeigt eine lineare Steigerung des relativen Materialabtragskoeffizienten. Der Variation des Drehzahlverhältnisses sind in der Praxis jedoch enge Grenzen gesetzt, da das tribologische System ab einem Drehzahlverhältnis ( $n_{Wst}/n_{Wz}$ ) von  $> 5$  zur Generierung mittelfrequenter Gestaltabweichungen neigt, welche eine nachfolgende Glättpolitur erfordern.

Für weitere Untersuchungen bietet sich ein wiederholter Wechsel des Drehzahlverhältnisses mit vorab zu definierender Bearbeitungsdauer an. So kann ein Bearbeitungsvorgang mit erhöhtem Drehzahlverhältnis ( $> 5$ ) zur Beseitigung der Tiefenschädigung mit reduziertem Fehlerprofil genutzt werden, wohingegen ein der Synchrospeed-Kinematik typisches Drehzahlverhältnis ( $\approx 1$ ) der Beseitigung mittelfrequenter Gestaltabweichungen dient.

Weiterhin bietet sich bei Verwendung des statischen Prototyps eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs der Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung der Luftlagerfläche an. Für die aktorische Ausführung des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs kann der Fehlervorhalt im Werkzeugunterbau aktorisch eingepägt werden, sodass ein Verzicht auf den Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung möglich ist.

Weitere Einflussgrößen wie Härte und Dicke der sphärisch und plan ausgeführten Membranen versprechen hingegen eine geringe Einflussmöglichkeit auf das Fehlerprofil.

### **8.3 Eigenschaften vollaperturiger, aktiv-adaptiver Polierwerkzeuge**

Gegenstand dieses Abschnitts soll die Diskussion charakteristischer Eigenschaften des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs bilden. In Abhängigkeit des jeweiligen Kriteriums erfolgt ein direkter Vergleich mit der Referenz- und Standardtechnologie des Bonnet Polishing.

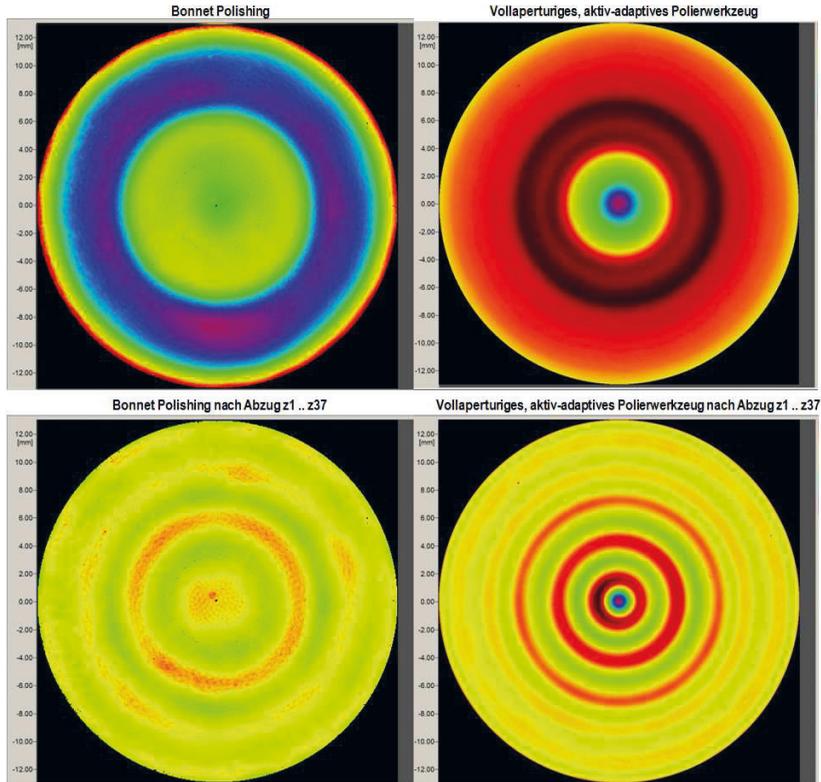
#### **8.3.1 Charakteristische Gestaltabweichungen**

##### **NIEDERFREQUENTE GESTALTABWEICHUNGEN**

Im Rahmen des unter Kap. 8.1 durchgeführten Verfahrensnachweises sowie der anschließenden Untersuchung der Einflussgrößen flächiger Polierprozesse (vgl. Kap. 8.2) wurden ausschließlich niederfrequente Gestaltabweichungen als Bewertungskriterium herangezogen. Im Speziellen zeigte der Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks (vgl. Kap. 8.2.4), dass die Politur mit vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugen die typischen Forderungen zulässiger Formabweichungen (als Gestaltabweichungen 1. Ordnung nach [DIN4760], beziehungsweise 3/ Passfehler nach [DIN10110-5]) sicher erfüllt. Auf eine weitere Analyse charakteristischer niederfrequenter Gestaltabweichungen sowie einen Vergleich typischer Formabweichungen des Bonnet Polishing sei daher im Folgenden verzichtet.

## MITTELFREQUENTE GESTALTABWEICHUNGEN

Zur Bewertung charakteristischer mittelfrequenter Gestaltabweichungen ist das Bonnet Polishing als Referenztechnologie heranzuziehen. Dazu wurden zwei identische Prüflinge (Werkstückgeometrie, Material, Schleifprozess, Vorbehandlung, etc.) sowohl mit einer subaperturigen Bonnet Werkzeuganordnung als auch mit dem Prototyp eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs mit einer konstanten Abtragshöhe von  $20\mu\text{m}$  bearbeitet. Zur Bewertung dient jeweils ein Interferogramm eines Aspherical Stitching Interferometers, welches einen subaperturigen Ausschnitt der Werkstückoberflächen mit Durchmesser  $26\text{mm}$  zeigt. Da niederfrequente Gestaltabweichungen (vgl. Kap. 3.2.3) als Formabweichungen mit Periodenlängen  $\geq 5\text{mm}$  keine Beachtung erfahren sollen, wurden in beiden Interferogrammen die Zernike Polynome 1 .. 37 abgezogen. Als Ergebnis verbleiben größtenteils mittel- und hochfrequente Gestaltabweichungen. Abb. 45 zeigt unterhalb der Interferogramme die jeweiligen Bearbeitungsrandbedingungen sowie ermittelten Messdaten. In der linken Bildhälfte ist die mittels Bonnet Polishing bearbeitete Werkstückoberfläche dargestellt. Die polierte Oberfläche zeigt vor Abzug der Zernike Polynome Formabweichungen um  $1,5\mu\text{m}$  PV (unter Vernachlässigung des Randabfalls) sowie keinen erkennbaren Zentrierfehler. Entsprechend ergibt sich nach Abzug der Polynome  $z_1 \dots z_{37}$  ein Oberflächenprofil mit einem PV von  $545\text{nm}$ .



Bearbeitungsrandbedingungen		
Poliervverfahren	Bonnet Polishing	Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug
Bearbeitungsmodus	Spiralmodus	Linearer Vorschub
Werkstückdurchmesser	40mm	
Poliermittelträger	Universal Photonics GR-35	
Shorehärte Poliermittelträger	90° Shore A	
Dicke Poliermittelträger	0,5mm	
Poliermittel	Opaline	
Dichte Poliermittel	1,018g/cm <sup>3</sup>	
Bearbeitungsdauer	1720s	600s

Messdaten		
Messsystem	QED Technologies ASI(Q) (Aspherical Stitching Interferometer)	
PV	545,2nm	771,4nm
RMS	121,7nm	55,6nm
Minimum	-207,0nm	-553,1nm

Abb. 45: Vergleich mittelfrequenter Gestaltabweichungen für das Bonnet Polishing und für das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug

Deutlich erkennbar ist der vollflächig isotrope Fingerabdruck des Bonnet Werkzeugs, welcher das inhomogene Oberflächenprofil sowie den RMS Wert von 121,7nm erklärt. Weiterhin werden nach Abzug der Zernike Polynome radialsymmetrische Strukturen mit einer Ortswellenlänge von  $\lambda \approx 3\text{mm}$  deutlich sichtbar.

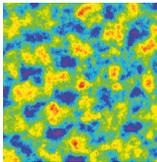
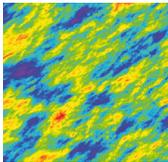
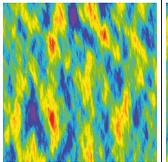
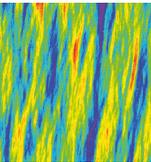
Die in der rechten Bildhälfte dargestellte Werkstückoberfläche erfuhr eine Bearbeitung mit dem Prototyp eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. Sie zeigt vor Abzug der Zernike Polynome Formabweichungen von  $PV \approx 3\mu\text{m}$ . Nach Abzug der Polynome  $z1 \dots z37$  ist der Zentrierfehler des Prüflings erkennbar. Der mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeug bearbeitete Prüfling weist einen erhöhten PV (= 771nm) im Vergleich zum Referenzteil auf. Dieser ist anteilig auf den Zentrierfehler als auch auf den um Faktor zwei erhöhten Formfehler zurückzuführen. Weiterhin zeigt der Prüfling unerwünschte radialsymmetrische Strukturen mit einer Ortswellenlänge von  $\lambda \approx 2\text{mm}$ , welche dem Rasterabstand des Nadelkissens entspricht. Für den Serieneinsatz ist daher eine konstruktive Überarbeitung des Nadelkissens unter Änderung des Flächenmusters des Nadelkissens zur Vermeidung dieses systematischen Fehlers zwingend notwendig. Die Amplitude der radialsymmetrischen Strukturen nimmt vom Scheitel zum Werkstückrand stark ab. Dieser Effekt lässt sich auf den Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks zurückführen. So beträgt die absolute Abtragshöhe im Scheitelbereich des Werkstücks in etwa das Dreifache, verglichen mit dem Randbereich. Folglich fällt die Amplitude der radialen Strukturen im Scheitelbereich um diesen Faktor größer aus.

Erkennbar ist, dass die Oberfläche des mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug bearbeiteten Prüflings deutlich homogener als die mit Bonnet bearbeitete Referenzfläche erscheint. Dieser Effekt ist auf die vollaperturige Kontaktzone zurückzuführen und wirkt sich äußerst positiv auf dem RMS Wert, welcher bei 55,6nm liegt, aus (vgl. Referenzteil  $\text{RMS} = 121,7\text{nm}$ ).

## HOCHFREQUENTE GESTALTABWEICHUNGEN - MIKRORAUHEIT

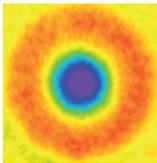
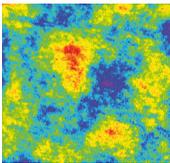
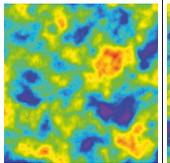
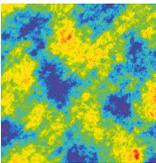
Die Analyse hochfrequenter Gestaltabweichungen erfolgt anhand einer in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Messung der Mikrorauheit 2,5x sowie Mikrorauheit 40x. Diese Kenngrößen erlauben keine absoluten Aussagen, eignen sich hingegen für den direkten Vergleich zweier Technologien. Folglich sollen die Mikrorauheiten zweier Werkstückoberflächen gegenübergestellt werden – zum einen das mittels Bonnet Polishing bearbeitete Referenzteil und zum anderen ein mit dem Prototyp eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs durchpoliertes Prüfling.

Tab. 9: Mikrorauheiten Bonnet Polishing (Referenzteil)

Messposition	Mitte		Halbe Mitte	
				
Kenngröße/ Messfeldgröße	Mikrorauheit 2,5x (1664 x 1664 $\mu\text{m}^2$ )	Mikrorauheit 40x (156 x 156 $\mu\text{m}^2$ )	Mikrorauheit 2,5x (1664 x 1664 $\mu\text{m}^2$ )	Mikrorauheit 40x (156 x 156 $\mu\text{m}^2$ )
				
Messgröße	PV [nm]: 27,7 RMS [nm]: 4,6	PV [nm]: 4,3 RMS [nm]: 1,4	PV [nm]: 20,6 RMS [nm]: 3,4	PV [nm]: 6,2 RMS [nm]: 1,0

Tab. 9 zeigt eine Zusammenfassung der Mikrorauheiten des Referenzteils. Mit Ausnahme der Messung Mikrorauheit 2,5x – Mitte sind auf allen dargestellten Oberflächenprofilen gerichtete Strukturen erkennbar. Diese sind auf den Fingerabdruck des Bonnet Werkzeugs sowie die bei off-axis Bearbeitungskinematik zur Werkstückoberfläche tangential gerichtete Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück zurückzuführen. Da das Werkstück einer kontinuierlichen Drehbewegung um seine optische Achse (z-Achse) unterliegt, treten im Scheitelbereich über die Bearbeitungsdauer keine Relativbewegungen in ausschließlich einer Richtung auf. Für die Mikrorauheit 2,5x – Mitte sind somit keine gerichteten Strukturen erkennbar. Für die Mikrorauheit 40x zeigen sich ausschließlich sehr schwache Strukturen als Relikt der letzten Orientierung der Relativbewegung.

Tab. 10: Mikrorauheiten vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug

Messposition	Mitte		Halbe Mitte	
				
Kenngröße/ Messfeldgröße	Mikrorauheit 2,5x (1664 x 1664 μm <sup>2</sup> )	Mikrorauheit 40x (156 x 156 μm <sup>2</sup> )	Mikrorauheit 2,5x (1664 x 1664 μm <sup>2</sup> )	Mikrorauheit 40x (156 x 156 μm <sup>2</sup> )
				
Messgröße	PV [nm]: 25,3 RMS [nm]: 4,2	PV [nm]: 3,6 RMS [nm]: 0,6	PV [nm]: 19,1 RMS [nm]: 3,3	PV [nm]: 4,8 RMS [nm]: 0,8

Eine Zusammenfassung der durch Politur mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug erreichten Mikrorauheiten zeigt Tab. 10. Der Einfluss verbleibender Gestaltabweichungen im Scheitelbereich ist in der Aufnahme Mikrorauheit 2,5x – Mitte deutlich erkennbar. Deren Ursache und Möglichkeiten der Beseitigung wurden im vorherigen Abschnitt diskutiert und sollen daher keinen weiteren Gegenstand der Betrachtungen bilden. Die verbleibenden drei Oberflächenprofile zeigen eine sogenannte ‘Wolkenstruktur’. Diese ergibt sich in der flächigen Politur optischer Gläser nur dann, wenn die Relativbewegung, welche die Werkstückoberfläche während der Bearbeitung erfährt, ungerichtet (ohne Vorzugsrichtung) ist. Indirekt beweist die Wolkenstruktur, dass die im Rahmen der Mikrorauheitsmessung untersuchten Ausschnitte der Werkstückoberfläche während der Bearbeitung dauerhaft in Kontakt mit dem Poliermittelträger des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs stehen.

Den signifikanten Vorteil vollaperturiger Kontaktzonen in Kombination mit der Synchrospeed-Kinematik beweist ein direkter Messgrößenvergleich mit dem Referenzteil. Dabei zeigt die mit dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug bearbeitete Werkstückoberfläche weder für den PV Wert, noch für den RMS Wert größere Abweichungen als das Referenzteil. Besonders unter Bewertung der Mikrorauheit 40x liefert das vollaperturig polierte Werkstück eine deutlich höhere Oberflächengüte.

### 8.3.2 Potentiale und Grenzen

Das zentrale Entwicklungsziel des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs ist die Bereitstellung einer Technologie zur kosteneffizienten Herstellung rotationssymmetrischer Asphären. Wesentlich für die Abschätzung des Einsatzgebiets und der Einsatzbreite ist daher die Ermittlung des bearbeitbaren Produktspektrums rotationssymmetrischer Asphären.

Weiterhin sind Aussagen zur Bearbeitungszeitverkürzung im Vergleich zur Standardtechnologie des Bonnet Polishing erforderlich, um belastbare Aussagen zum Einsparpotential treffen zu können. Zielstellung dieses Abschnitts ist daher die Ermittlung von Grenzen und Potentialen des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs sowie deren Diskussion.

#### BEARBEITBARES PRODUKTSPEKTRUM

Eine Abschätzung des bearbeitbaren Produktspektrums lässt sich anhand des in Anhang A hinterlegten Berechnungsmodells vollziehen. Begrenzender Faktor ist dabei der doppelte Schwenkwinkel  $2\alpha^{94}$ . Dieser ist auf  $45^\circ$  limitiert, um eine Selbstsperrung der Nadeln bei maximalem Krafterleitungsinkel zu verhindern. Daraus ergibt sich im Umkehrschluss, dass der Best-Fit Radius der minimalen Abweichungssumme (vgl. Kap. 3.3) mindestens dem Werkstückdurchmesser entsprechen muss. Der bearbeitbare Werkstückdurchmesser ist nach unten aufgrund der Vielzahl in das aktiv-adaptive Werkzeug zu integrierender Funktionselemente auf  $D_{Wstmin} = 35\text{mm}$  limitiert. Bei Integration des entwickelten Werkzeugaufbaus in eine handelsübliche Synchrospeed Maschinenbasis (vgl. Abb. 11) begrenzen der verfügbare Arbeitsraum der Maschine sowie der Achsabstand zwischen Werkstückspindel (C2-Achse) und Abrihtspindel (C3-Achse) den maximalen Werkstückdurchmesser auf  $D_{Wstmax} = 110\text{mm}$ . Der bearbeitbare Durchmesserbereich deckt damit etwa 80% typischer Werkstückdurchmesser der Geräte- und Präzisionsoptik ab. Ein Verzicht auf eine kommerziell frei verfügbare Maschinenbasis hebt diese Limitierung auf. Eine grafische Veranschaulichung des bearbeitbaren Durchmesserbereichs zeigt der schraffierte Bereich in Abb. 46.

Weiterhin erlaubt das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug nach aktuellem Entwicklungsstand ausschließlich die Bearbeitung konvexer Werkstückgeometrien. Eine Erweiterung dieser Technologie auf konkave Werkstückgeometrien ist unter technisch identischen Randbedingungen (bearbeitbarer Durchmesserbereich, Grenze des doppelten Schwenkwinkels, etc.) mit

---

<sup>94</sup> Der doppelte Schwenkwinkel lässt sich alternativ auch als Umschließungswinkel bezeichnen.

überschaubarem Aufwand realisierbar und hätte eine signifikante Erweiterung des abdeckbaren Produktspektrums zur Folge.

### ERREICHBARE BEARBEITUNGSZEITVERKÜRZUNG

Die zum Vor-/Durchpolieren erforderliche Bearbeitungszeit ist bei Nutzung des aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs nahezu unabhängig vom Werkstückdurchmesser. Dieser Vorteil ergibt sich allein aus der vollaperturigen Kontaktzone des aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs, wodurch stets die gesamte Werkstückoberfläche eine für den Materialabtrag erforderliche Relativbewegung erfährt. Damit ist ein Konstantabtrag von  $\approx 20\mu\text{m}$  Abtragshöhe zur Entfernung der gestörten Grenzschicht (Tiefenschädigung  $\approx 15\mu\text{m}$ ) innerhalb von 600 .. 720s möglich.

Bei der Politur mittels Bonnet Werkzeuganordnungen ist die Abtragsrate hingegen durch die kleinflächige, subaperturige Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück limitiert. Der Flächeninhalt einer Werkstückoberfläche ist für  $R_{\text{ers}} \gg D_{\text{Wst}}^{95}$  in erster Näherung quadratisch vom Werkstückdurchmesser abhängig. Für eine Verdopplung des Werkstückdurchmessers vervierfacht sich entsprechend die erforderliche Bearbeitungszeit. Für das Durchpolieren einer rotationssymmetrischen Asphärenoberfläche mit  $D_{\text{Wst}} = 40\text{mm}$  sind je nach Glassorte und Tiefenschädigung zwischen 1600 .. 1800s erforderlich. Die Bearbeitung eines Werkstücks mit  $D_{\text{Wst}} = 80\text{mm}$  erfordert analog zwischen 6400 .. 7200s.

Aus diesen Annahmen lässt sich nachfolgend der vom Werkstückdurchmesser abhängige Faktor der Bearbeitungszeitverkürzung ermitteln. Eine grafische Veranschaulichung dazu liefert der grüne Graph in Abb. 46.

---

<sup>95</sup> Für diesen Fall kann die Werkstückoberfläche als Planfläche betrachtet werden, sodass die Flächenformel eines Kreises Anwendung findet. Liegen  $R_{\text{ers}}$  und  $D_{\text{Wst}}$  in der gleichen Größenordnung, so empfiehlt sich die Verwendung der Flächenformel eines Kugelsegments.

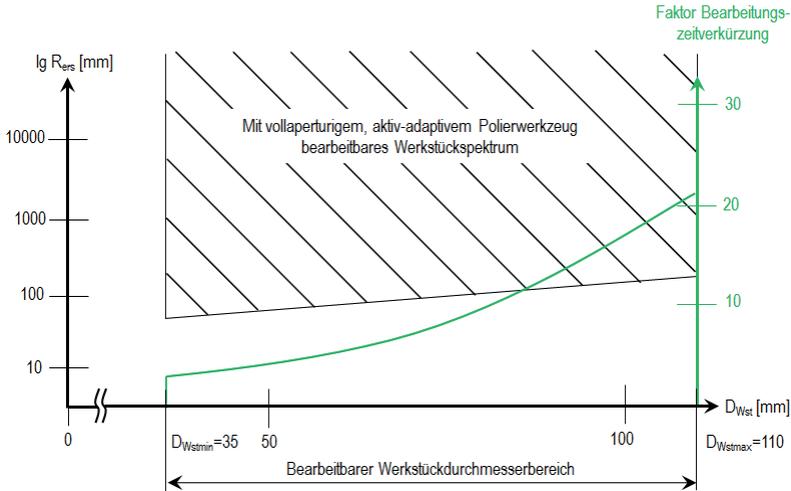


Abb. 46: Bearbeitbarer Durchmesserbereich für konvexe Werkstücke sowie mögliche Bearbeitungszeitverkürzung

Entsprechend des Potentials massiver Bearbeitungszeitverkürzung für große Werkstückdurchmesser sollte das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug bevorzugt für rotationssymmetrische Asphären mit  $D_{Wst} \geq 55\text{mm}$  Anwendung finden. Damit ist eine Reduktion der Bearbeitungszeit auf weniger als 20% der Referenzdauer erzielbar. Für stärker gekrümmte rotationssymmetrische Asphären, bei denen  $R_{ers}$  und  $D_{Wst}$  in der gleichen Größenordnung liegen, erhöht sich die erreichbare Bearbeitungszeitverkürzung zusätzlich.

Die durchgeführte Analyse zur erreichbaren Bearbeitungszeitverkürzung zieht stets den Vergleich zur Politur vergleichbarer sphärischer Werkstückgeometrien. Da der Einsatz asphärischer Optikkomponenten jedoch eine Reduzierung der Anzahl optischer Bauelemente<sup>96</sup> im System erlaubt (vgl. Kap. 3.2.1), besitzt die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Poliertechnologie einen ebengrößeren Hebel zur Kostensenkung.

<sup>96</sup> Die Verwendung eines asphärischen Bauelementes ermöglicht in der Regel den Verzicht auf einen Achromaten, bestehend aus zwei verkitteten oder separat gefassten sphärischen Einzellinsen.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit lieferte einen wissenschaftlichen Beitrag zur Weiterentwicklung von Poliertechnologien für die Herstellung rotations-symmetrischer Asphären der Genauigkeitsklassen Geräte- und Präzisionsoptik. Ausgangspunkt der Betrachtung bildete die Vermittlung wesentlicher funktionaler Vorteile asphärischer Optikkomponenten gegenüber sphärischen Optikkomponenten (vgl. Kap. 3). Der Einsatz von Präzisionsasphären in kostensensitiven Serienprodukten ist aktuell sehr überschaubar – zurückzuführen auf die bislang wirtschaftlich nicht vertretbaren Herstellkosten. Im Rahmen einer Analyse der Herstellkette konnte der Durchpolierprozess als wesentlicher Kostentreiber in der Fertigung rotations-symmetrischer Asphären identifiziert werden. Dieser erfordert nach aktuellem Stand der Technik den Einsatz subaperturiger Bonnet Werkzeuganordnungen mit all ihren im Rahmen dieser Arbeit aufgeführten Nachteilen (vgl. Kap. 4).

Der Analyse schloss sich die systematische Ausarbeitung dreier grundverschiedener Lösungsansätze an. Deren Gegenüberstellung und Bewertung zeigte, dass eine Prozessparameteroptimierung hin zu gesteigerten Abtragsraten sowie der Einsatz mehrerer simultan im Eingriff befindlicher Bonnetwerkzeuge (Multiwerkzeuganordnung) die Auswirkungen der Nachteile zwar zu verringern, deren Ursachen jedoch nicht zu beseitigen vermögen. Der präferierte und nachfolgend entwickelte Lösungsansatz zum kosteneffizienten und formerhaltenden Durchpolieren rotations-symmetrischer Asphären zeichnet sich durch eine vollaperturige Kontaktzone aus (vgl. Kap. 5).

Die Konkretisierung und Ausgestaltung dieses Ansatzes erfolgte in Anlehnung an den Konstruktiven Entwicklungsprozess unter systematischer Variation und Bewertung technischer Lösungen auf Prinzipiebene. Parallel dazu konnte in analoger Vorgehensweise eine geeignete Lösung zur Aufnahme des Werkstücks, respektive zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts entwickelt werden. Die erarbeiteten Technischen Prinzipie galt es nachfolgend in einen Gestaltforderungsplan als Grundlage für den Konstruktionsentwurf zu überführen. Der im Rahmen der konstruktiven Ausgestaltung entwickelte vollaperturige, aktiv-adaptive Werkzeugaufbau ist dabei in eine handelsübliche und kommerziell frei verfügbare Synchronspeed Maschinenbasis, nach Stand der Technik in der Sphärenpolitur, integrierbar (vgl. Kap. 6).

Im Rahmen des anschließenden Aufbaus, der Justage und der Inbetriebnahme (vgl. Kap. 7) des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs wurden prozessrelevante Lage- und Positionieranforderungen ermittelt und diskutiert. Basierend darauf erfolgte die Ableitung einer geeigneten Vorgehensweise zur Einrichtung der Maschine und Bestimmung des geometrischen Arbeitspunkts.

Gestalt und Bearbeitungskinematik des entwickelten Werkzeugaufbaus lehnen sich an das Synchrospeedverfahren zur Politur sphärischer Optiken an. Folglich erlaubt dies die Übertragung verschiedener Prozessparameter auf den Ansatz der vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphären. Von der Politur mit Synchrospeed-Kinematik abweichend gewählte Prozessparameter wurden separat aufgeführt.

Der anschließende Verfahrensnachweis belegt die Wirksamkeit des Verfahrens durch Nachweis vollaperturigen Materialabtrags unter Verwendung des Prototyps eines statischen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs. Eine Analyse abtragbestimmender Einflussgrößen flächiger Polierprozesse bildete die Grundlage der nachfolgenden Variation einzelner Parameter. So konnte nachgewiesen werden, dass eine auf Konstantabtrag optimierte Poliermittelträgerbelegung einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Abtragsprofil besitzt, da die Belegung engen geometrischen Grenzen unterliegt.

Hingegen zeigten eine Variation des Drehzahlverhältnisses von Werkstück zu Werkzeug als auch der Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung des Werkstücks einen wirksamen Hebel zur gezielten Beeinflussung des Abtragsprofils, respektive zur Reduzierung des Fehlerprofils.

Ein direkter Technologievergleich zwischen dem vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeug und dem Bonnet Polishing als Referenztechnologie erfolgte anhand charakteristischer Gestaltabweichungen für die Politur einer vorab definierten rotationssymmetrischen Asphärengometrie. Die darin ermittelten Vorzüge versprechen unter geringer konstruktiver Änderung der Nadelkissenbaugruppe einen Verzicht auf nachfolgende, zeitintensive Glättopiervorgänge. Durch eine Analyse des bearbeitbaren Produktspektrums sowie erreichbarer Bearbeitungszeitverkürzungen liefert das 1. Kapitel eine Abschätzung zu Potentialen und Grenzen der Politur mit vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugen. Anhand dieser Bewertung empfiehlt sich der breite Einsatz der entwickelten Poliertechnologie, da sie einen deutlichen Sprung zur Kostenreduzierung in der Herstellung rotationssymmetrischer Asphären erlaubt. Dieser wiederum bietet Kostenvorteile für laufende Produkte und führt zu einer signifikanten Senkung der Einstiegshürde für den Einsatz asphärischer Optikkomponenten in neuen Produkten.

Grundsätzlich lässt sich nach Abschluss dieser Arbeit ein weiterer, dringender Handlungsbedarf für die Weiterentwicklung vollaperturiger, aktiv-adaptiver Polierwerkzeuganordnungen formulieren. Eine erste, mit geringem Änderungsaufwand und Risiko verbundene, Entwicklungsaufgabe stellt die Erweiterung des bearbeitbaren Produktportfolios auf konkave Asphärengometrien dar. Zur Realisierung sind ausschließlich geringe konstruktive Anpassungen erforderlich.

Weiterhin ist eine Erweiterung des Produktportfolios für die Politur rotations-symmetrischer, asphärischer Spiegelflächen prinzipiell möglich. Die für die Prüflingsgeometrie geltenden geometrischen Einschränkungen sind dabei analog denen der Politur brechender optischer Bauelemente. Eine Abschätzung der Anwendbarkeit und Eignung aus der Spiegelpolitur bekannter Poliermittel-träger als auch Poliermittel ist nach aktuellem Wissensstand nicht möglich.

Bedeutend aufwändiger gestaltet sich die praktische Umsetzung der im Rahmen des KEP entwickelten aktorischen Ausführung des Werkzeugunterbaus der vollaperturigen, aktiv-adaptiven Werkzeuganordnung. Diese verspricht die flexible Nutzung eines Werkzeugunterbaus für alle bearbeitbaren Werkstückgeometrien und erlaubt eine gezielte Beeinflussung des Abtragsprofils durch individuelle Ansteuerung einzelner Linearaktoren. Die Wirksamkeit der in [Sch14d] beschriebenen sphärischen Luftlagerelemente als Koppelstelle zur Formübertragung zwischen Werkzeugober- und Werkzeugunterbau wurde bereits in [Hue15] nachgewiesen. So ist die praktische Umsetzung einer Polieranordnung gemäß [Sch14d] unter Verzicht auf das sphärische Nadelkissen für Werkstückgeometrien mit  $R_{\text{ers}} \gg D_{\text{Wst}}$  durchaus realistisch. Unerprobt bleibt bislang jedoch das in [Sch14d] aufgeführte hydraulische Aktorarray.

Oggleich nicht flexibel für mehrere Werkstückgeometrien anwendbar, verspricht die Weiterentwicklung statischer vollaperturiger, aktiv-adaptiver Werkzeuganordnungen eine Reihe von Vorteilen. So erlaubt die Integration einer geeigneten Wechselschnittstelle, beispielsweise eines Nullpunktspannsystems, den reproduzierbaren Wechsel des Luftlagerelements im Rahmen des Umrüstvorgangs auf eine andere Werkstückgeometrie [Sch15b]. Der Verzicht auf eine aktorische Ausführung des Werkzeugunterbaus besitzt weiterhin bedeutende Kostenvorteile sowie den Vorzug erhöhter technischer Zuverlässigkeit. So kann der Ausfall eines Linearaktuators oder eines sphärischen Luftlagerelements zum Ausfall der gesamten Werkzeuganordnung führen. Das statische Luftlagerelement hingegen besitzt aufgrund seiner Ausführung aus porösem Graphit hervorragende Notlaufeigenschaften und fungiert durch seine geringe mechanische Festigkeit als nachgiebiges Element im Falle eines Crashes.

Ein enormes Potential zur Senkung der Werkzeugkosten je Werkstückgeometrie sowie zur Steigerung der technischen Zuverlässigkeit besteht im Verzicht auf das Nadelkissen, wie in [Sch15b] beschrieben. Dieser Ansatz sieht vor, die gesamte Asphärengometrie unter Vorhalt der Dicke des Poliermittelträgers sowie einer sphärischen Membran in ein statisches Luftlagerelement einzuarbeiten. In Kombination mit einer geeigneten Wechselschnittstelle erlaubt dies den flexiblen und kostengünstigen Einsatz vollaperturiger, aktiv-adaptiver Werkzeuganordnungen für die Herstellung rotationssymmetrischer Asphären.

Das Anwendungsfeld der entwickelten Poliertechnologie ist prinzipiell nicht auf die Bearbeitung optisch wirksamer Oberflächen begrenzt. So ist diese

Technologie ebenso auf die Politur rotationssymmetrischer Formwerkzeuge<sup>97</sup> zur Herstellung von Spritzgussoptik als auch optisch nicht wirksamer Spritzgussteile übertragbar. Ebenso empfiehlt sie sich für die Politur von Formwerkzeugen für das Blankpressen.

Die Verwendung einer bestehenden, kommerziell frei verfügbaren Maschinenbasis bietet enorme Vorzüge hinsichtlich reduziertem Steuerungsaufwand, gesteigerter Flexibilität, bestehender Medienversorgung und -aufbereitung, etc. Dennoch limitiert die Nutzung einer klassischen Synchro-speed Maschinenbasis das Potential vollaperturiger, aktiv-adaptiver Werkzeuganordnungen. Nicht nur die Begrenzung des maximal bearbeitbaren Werkstückdurchmessers durch den konstruktiv begrenzten Arbeitsraum, sondern vielmehr die durch das Führungs- und Antriebskonzept beschränkte Genauigkeit der Maschinenachsen sind als kritisch zu bewerten. So bietet die Entwicklung einer eigens auf die Anforderungen der vollaperturigen Politur rotationssymmetrischer Asphären ausgelegte Maschinenbasis signifikante Vorteile. Zum einen lässt sich der maximal bearbeitbare Werkstückdurchmesser beliebig erweitern. Zum anderen verspricht die Verwendung aus der UP-Zerspanung üblicher Führungs- und Antriebsprinzipie mit hydrostatischen Führungen und Direktantrieben eine deutliche Steigerung der erreichbaren Positioniergenauigkeit, Reproduzierbarkeit und Achssteifigkeit.

Der im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Lösungsansatz, die nachfolgende Erprobung sowie die Empfehlungen für weitere Entwicklungsaktivitäten liefern einen wissenschaftlichen Beitrag zur Erweiterung bestehender Poliertechnologien – im Speziellen für die kosteneffiziente Herstellung rotationssymmetrischer Asphären. An den damit erweiterten Stand der Technik können zukünftige Entwicklungen anknüpfen, um Leistung als auch Funktionsumfang der vorgestellten Technologie zu erweitern und somit den Forderungen nach erhöhter Integrationsdichte, bei gleichzeitiger Steigerung der Abbildungsleistung, zu reduzierten Herstellkosten gerecht zu werden.

---

<sup>97</sup> Ein Formwerkzeug (engl. Mold), alternativ auch als Gesenk bezeichnet, stellt die Negativform des zu gießenden oder zu pressenden Werkstücks dar.

---

## Literaturverzeichnis

- [Amb09] Amberg, M.: Optische Mikrosysteme und Bauelemente für die Optofluidik. Dissertationsschrift. TU Ilmenau, 2009.
- [Bac02] Back, H.- J.; Basting, D.; Eichelbrönnner, G.; Litfin, G.; Martinen, H.; Merkle, F.; Sandner, W.; Sepold, G.; Siegel, A.; Späth, W.; Steiner, R.; Tschudi, T.; Weber, J.: Lenkungsreis – Optische Technologien für das 21. Jahrhundert. Düsseldorf, 2002.
- [Bäu06] Bäumer, S.; Schipper, R.: Kunststoffoptik – Neue Perspektiven für Optik großer Stückzahlen. Optik & Photonik Nr. 2/2006. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, 2006.
- [Bea14] Beaucamp, A.; Namba, Y.; Charlton, P.; Freeman, R.: Super Smooth Finishing of Optical Surfaces By Fluid Jet and Bonnet Polishing. ODF'14. Tokyo, 2014.
- [Bec02] Beckstette, K. F.: Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung am Beispiel von Lithografieoptiken. tm- Technisches Messen Vol. 12/2002. Berlin, 2002.
- [Bie10] Biermann, D.; Feldhoff, M.: Welligkeit und Musterbildung beim Flachsleifen gezielt beeinflussen. dihw – Diamant Hochleistungswerkzeuge, Vol. 1/2010. Dr. Harnisch Verlags GmbH. Nürnberg, 2010.
- [Bli10] Bliedtner, J.; Gräfe, G.: Optiktechnologie. Carl Hanser Verlag. München, 2010.
- [Bög11] Böge, A.; Ahrberg, R.; Arndt, K.-D.; Bahmann, W.; Barfels, L.; Bauer, J.; Borutzki, U.; Böge, G.; Böge, W.: Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinebau-Technik. Springer Verlag. Wiesbaden, 2011.
- [Bun10] Optische Technologien: Jahrhundert des Photons. Bundesregierung Deutschland. Berlin, 2010.  
<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/WissenschafterWohlstand/2007-08-01-hightech-strategie-photonik-innovationsstrategie-des-monats.html>

- [DIN10110-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-1 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Allgemeines. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO10110-2 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Materialfehler – Spannungsdoppelbrechung. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-3] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-3 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Materialfehler – Blasen und Einschlüsse. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-4] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-4 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Materialfehler – Inhomogenitäten und Schlieren. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-5] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-5 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Passfehler. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-6] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-3 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Zentriertoleranzen. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-7] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-7 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Oberflächenfehler. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-8] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-8 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Oberflächengüte, Rauheit und Welligkeit. Beuth Verlag. Berlin, 2000.
- [DIN10110-12] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-12 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Asphärische Oberflächen. Beuth Verlag. Berlin, 2000.

- [DIN10110-19] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 10110-19 Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Allgemeine Beschreibung von Oberflächen und Komponenten. Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [DIN1101] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 1101 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung Ort und Lauf. Beuth Verlag, Berlin, 2014.
- [DIN1319-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1319-1 Grundlagen der Messtechnik – Teil 1: Grundbegriffe. Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [DIN1335] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1335 Bezeichnungen und Definitionen der geometrischen Optik. Beuth Verlag, Berlin, 1983.
- [DIN4287] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 4287 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- [DIN58174] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN58174 Optik und Photonik- Spezifikation von Freiformflächen. Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [DIN58189] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN58189 Grundnormen der Optik- Bestimmung der Brennweite. Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- [DIN7167] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 7167 Zusammenhang zwischen Maß-, Form- und Parallelitätstoleranzen – Hüllbedingung ohne Zeichnungseintragung. Beuth Verlag, Berlin, 1987.
- [DIN8015] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 8015 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln. Beuth Verlag, Berlin, 2011.

- [DIN8580] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN8550 Fertigungsverfahren- Begriffe, Einteilungen. Beuth Verlag. Berlin, 2003.
- [DIN8589-0] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN8559-0 Fertigungsverfahren Spanen- Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag. Berlin, 2003.
- [DIN8593-8] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN8593-8 Fertigungsverfahren Fügen- Teil 8: Kleben – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag. Berlin, 2003.
- [DIN8601] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 8601 Werkzeugmaschinen-Abnahmebedingungen für Werkzeugmaschinen für die spanende Bearbeitung von Metallen. Beuth Verlag. Berlin, 1986.
- [Don06] Donat, H.: Aerostatische Führungen und Luftlagerungen – Berechnung, Konstruktion und Einsatz aerostatischer Führungen im Maschinen- und Präzisionsgerätebau. Cuvillier Verlag. Göttingen, 2006.
- [Dup02] Duparré, A.; Ferre-Borull, J.; Gliech, S.; Notni, G.; Steinert, J.; Bennett, J. M.: Surface Characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components. Applied Optics, Vol. 41, No.1. Washington D.C., 2002.
- [Eco10] Eco, U.: Wie man eine wissenschaftliche Abschlussarbeit schreibt. Facultas wuv Universitätsverlag. Wien, 2010.
- [Fil13] Filhaber, J.: Mid-spatial-frequency errors: the hidden culprit of poor optical performance. Laser Focus World. Tulsa, 2013.
- [For15] Forbes, G.: Never-ending struggles with mid-spatial frequencies. Proceedings of SPIE Vol. 9525 9525B-1. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. München, 2015.

- [Fra06] Frank, S.: Justierdrehen – Eine Technologie für Hochleistungsoptik. Dissertationsschrift. TU Ilmenau, 2006.
- [Ghi07] Ghigo, M.; Canestrari, R.; Spiga, D.; Novi, A.: Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of Ion Beam Figuring. Proceedings of SPIE. Optical Manufacturing and Testing VII. Bellingham, 2007.
- [Gig88] Giggel, V.: Verfahren zur rechnergesteuerten Polierkorrektur hochgenauer optischer Funktionsflächen. Dissertationsschrift. FSU Jena, 1988.
- [Gin13] Ginani, L. S.: Optical Scanning Sensor System with Submicron Resolution. Dissertationsschrift. TU Ilmenau, 2013.
- [Hac10] Hackel, T.: Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für Nanopräzisionsmaschinen. Dissertationsschrift. TU Ilmenau, 2010.
- [Haf02] Haferkorn, H.: Optik: physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen. 2., bearbeitete Auflage. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, 2002.
- [Ham01] Hambücker, S.: Technologie der Politur sphärischer Optiken mit Hilfe der Synchrospeed-Kinematik. Dissertationsschrift. RWTH Aachen, 2001.
- [Han66] Hansen, F.: Konstruktionssystematik – Grundlagen für eine allgemeine Konstruktionslehre. VEB Verlag Technik. Berlin, 1966.
- [Har11] Harris, D. C.: History of Magnetorheological Finishing. Proceedings of SPIE. Window and Dome Technologies and Material XII, Vol. 8016. Bellingham, 2011.
- [Har15] Harmonic Drive AG: Technologie Harmonic Drive Wellgetriebe. Limburg an der Lahn, 2015.  
<http://harmonicdrive.de/technologie/harmonic-drive-wellgetriebe/>

- [Hoe83] Höhne, G.: Struktursynthese und Variationstechnik beim Konstruieren. Dissertationsschrift. TU Ilmenau, 1983.
- [Hu07] Hu, Z.: Novel Method of designing deformable polishing lap. Proceedings of SPIE. 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies. Bellingham, 2007.
- [Hue15] Hüfner, K.: Aufbau, Inbetriebnahme und Charakterisierung eines formadaptiven, segmentierten Luftlagers für ein aktives Polierwerkzeug. Bachelorarbeit. TU Ilmenau, 2015.
- [Hu10] Hu, Z.: Finite Element Analysis for PZT Actuated Deformable Polishing Lap. Proceedings of SPIE. 5th International Symposium on Advanced Manufacturing and Testing Technologies. Bellingham, 2010.
- [IPT13] Fraunhofer Institut für Produktionstechnik: Entwicklung und Charakterisierung von Präzisions- und Ultrapräzisionsmaschinen. Lehrunterlagen Workshop. Aachen, 2013.
- [IPT15] Fraunhofer Institut für Produktionstechnik: Schleifen und Polieren optischer Gläser. Lehrunterlagen Workshop. Aachen, 2015.
- [ISO230-2] ISO International Organization for Standardization: ISO 230-2 Prüffregeln für Werkzeugmaschinen- Bestimmung der Positioniergenauigkeit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen. Beuth Verlag. Berlin, 2006.
- [ji06] Ji, S. M.; Zhang, X.; Yuan, Q.L.; Wan, Y.H.; Yuan, J.L.: Form and Texture Control of Free-form Surface Polishing. Trans Tech Publications. Switzerland, 2006.
- [Jon77] Jones, R. A.: Optimization of computer controlled polishing. Applied Optics, Vol.16, No. 1. Washington D.C., 1977.
- [Jon78] Jones, R.A.: Fabrication using the computer controlled polisher. Applied Optics, Vol. 17, No. 12. Washington D.C., 1978.

- [Jon80] Jones, R.A.: Computer controlled polisher demonstration. Applied Optics, Vol. 19, No. 12. Washington D.C., 1980.
- [Jon83] Jones, R.A.: Modeling the computer-controlled polishing process. Applied Optics, Vol. 22, No. 15. Washington D.C., 1983.
- [Jun12] Jung, S.: Oberflächenbeurteilung – Rauheitsmessung. Praktikumsanleitung. TU Stuttgart, 2012.
- [Kat13] Kato, D., Suzuki, H., Okada, M.: Uniform Polishing of Large Aspheric Glass Lenses by Magnetic Field-Assisted Polishing. Proceedings of the 13th EUSPEN International Conference. Berlin, 2013.
- [Kim09] Kim, D. W.: Next Generation Computer Controlled Optical Surfacing. Dissertationsschrift. University of Arizona, 2009.
- [Kio06] Kiontke, S.; Kurschel, T.: Verfahren zum Polieren. Patentschrift DE102004047563 (A1). Deutsches Patentamt, 2006.
- [Kle07] Kletzin, U.: Maschinenelemente 2. Vorlesungsunterlagen Fachbereich Maschinenelemente. TU Ilmenau, 2007.
- [Kor95] Kordonski, W. I.; Prokhorov, I. V.; Gorodkin, S. R.; Gorodkin, G. R.; Gleb, L. K.; Kashevsky, B. E.: Magnetorheological polishing devices and methods. Patentschrift US5449313(A). United States Patent and Trademark office, 1995.
- [Kor99] Kordonski; W. I.; Golini, D.; Dumas, P. R.: System for magnetorheological finishing of substrates. Patentschrift US5951369(A). United States Patent and Trademark office, 1999.
- [Kra00] Krause, W.: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektrotechnik. 3., überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag. München, 2000.

- [Kra04] Krause, W.: Konstruktionselemente der Feinmechanik. 3., überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag. München, 2004.
- [Lam06] Lambropoulos, J. C.: Mechanics of Full Aperture Polishing Tools for Aspheres. Hg.: Optical Society of America. Washington D.C., 2006.
- [Las12] Carl Zeiss Jena GmbH: Lastenheft großflächige aktive Polierwerkzeuge. Unveröffentlichtes Dokument. Jena, 2012.
- [Leh03] Technische Universität Ilmenau: Lehrbrief B01 – Grundlagen der Produktentwicklung. Lehrblätter Fachbereich Konstruktionstechnik. Ilmenau, 2003.
- [Leh04] Technische Universität Ilmenau: Lehrbrief B03 – Methoden der Produktentwicklung. Lehrblätter Fachbereich Konstruktionstechnik. Ilmenau, 2004.
- [Mah13] Mahajan, V. N.: Optical imaging and aberrations, part III: Wavefront analysis. SPIE press. Bellingham, 2013.
- [Mar90] Martin, H. M.: Aspheric polishing with a stressed lap. Optics & Photonic News. Washington DC, 1990.
- [Mb60] Sonderband 60 Jahre Maschinen- und Gerätebau an der Technischen Universität Ilmenau. Jenaer Jahrbuch zur Technik- und Industriegeschichte, Band 18. Verlag VOPELIUS Jena. Jena, 2015.
- [Nau14] Naumann, H.; Schröder, G.; Löffler-Mang, M.: Handbuch Bauelemente der Optik – Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag. München, 2014.
- [Opt14] Optotech Optikmaschinen GmbH: IBF150 – Ionenstrahlbearbeitungssystem. Verkaufsprospekt. Wettenberg, 2014.

- [Pah06] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 2006.
- [Pfl12] Carl Zeiss Jena GmbH: Pflichtenheft großflächige aktive Polierwerkzeuge. Unveröffentlichtes Dokument. Jena, 2012.
- [Rie90] Riekher, R.; Beck, H., G.: Fernrohre und ihre Meister. Verlag Technik. Berlin, 1990.
- [Rot12] Roth, E.; Autschbach, L.; Ewert, D.: Prozesskettenentwicklung für optische Freiformen – der Projekt-Verbund FREE. Jahrbuch Optik und Feinmechanik 2012. OPTIK-Verlag Dr. Prenzel. Görlitz, 2012.
- [Sch96] Schmidt, G.: Formprüfung von Asphären mit flächigen interferometrischen Verfahren. Dissertationsschrift. Universität Stuttgart, 1996.
- [Sch11] Schmitt, R.: Tribologie – Ein interdisziplinäres Wissenschaftsgebiet. Vorlesungsunterlagen Winterkolloquium des Lehrstuhls für Prozessleittechnik. Aachen, 2011.
- [Sch12] Scheibe, H.: Charakterisierung, Justage und Abnahme von Ultrapräzisionsmaschinen am Beispiel einer Justierdrehmaschine. Masterarbeit. TU Ilmenau, 2012.
- [Sch13] Scheibe, H.: Technische Prinziplösungen für großflächige, aktive Polierwerkzeuge. Carl Zeiss Jena GmbH. Unveröffentlichtes Dokument. Jena, 2013.
- [Sch14a] Scheibe, H.; Theska, R.: Approaches to Cost-effective Manufacturing of Precision Aspheres. Proceedings of 58th IWK. Ilmenau, 2014.
- [Sch14b] Scheibe, H.; Roth, E.: Customized optical Systems – What makes the difference?. Fachvortrag OPTATEC 2014. Vortragsfolien. Frankfurt am Main, 2014.

- [Sch14c] Scheibe, H.; Roth, E.: Recent Activities for Cost-effective Manufacturing of Precision Freeform Optics. Proceedings of the EUSPEN Special Interest Group: Structured & Freeform Surfaces. Padova, 2014.
- [Sch14d] Scheibe, H.; Theska, R.: Vorrichtungen zum Bearbeiten von optischen Werkstücken. Patentschrift DE102014109654. Deutsches Patentamt, 2014.
- [Sch15a] Scheibe, H.; Roth, E., Giggel, V.; Theska, R.: Latest Investigations on Technologies for Fast Prepolishing of Precision Aspheres. Proceedings of the 15th EUSPEN International Conference. Leuven, 2015.
- [Sch15b] Scheibe, H.: Vorrichtung zum Bearbeiten von Werkstücken. Patentschrift DE102015121700. Deutsches Patentamt, 2015.
- [Sch15c] Scheibe, H.; Theska, R.: Lösungsansätze zur wirtschaftlichen Fertigung von Präzisionsasphären. Jahrbuch Optik und Feinmechanik 2015. OPTIK-Verlag Dr. Prenzel. Görtitz, 2015.
- [Sch16] Schunk GmbH & Co. KG: TENDO Hydro-Dehnspannfutter. Verkaufsprospekt. Lauffen/Neckar, 2016.
- [Sho00] Shore, A. B.: Mechanics of Material Removal in Magnetorheological Finishing (MRF) of Glass. Dissertationsschrift. University of Rochester, 2000.
- [Sie00] Sietmann, R.: Jahrhundert des Photons beginnt. VDI Nachrichten 01/2000. VDI Verlag GmbH. Düsseldorf, 2000.
- [Sin12] Singh, A. K.; Jha, S.; Pandey, P. M.: Performance Evaluation of Improved Ball End Magnetorheological Finishing Process. World Academy of Science, Engineering and Technology Vol. 61. Neu Dehli, 2012.

- [Son11] Sondermann, M.: Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hochleistungssysteme. Dissertationsschrift. TU Ilmenau, 2011.
- [Son14] Sondermann, M.; Scheibe, H.; Beier, T.; Theska, R.: Technologie zur Herstellung optischer Hochleistungssysteme kleiner Durchmesser. Jahrbuch Optik und Feinmechanik 2014. OPTIK-Verlag Dr. Prenzel. Görlitz, 2014.
- [Sta13] Statistisches Bundesamt: Ausstattung privater Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik. Wiesbaden, 2013.
- [Spe82] Sperlich, H.: Das Gestalten im Konstruktionsprozess. Dissertationsschrift. TU Ilmenau, 1982.
- [Str02] Striebeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. VDI Zeitschrift Vol. 46, 1902.
- [Str08] Strafford, D. N.; Charles, B. M.; Lewis, T. S.; Lebbon, W. C.; Warner, J. M.: Lap Grinding and polishing machine. Patentschrift US 7,364,493 B1. United States Patent and Trademark Office, 2008.
- [Suz12] Suzuki, H.; Furuki, T.; Okada, M.; Kagohashi, Y.; Katoh, D.; Yamagata, Y.: Precision grinding and polishing of large aspheric glass lenses for digital single lens reflex cameras. Proceedings of the 12th EUSPEN International Conference. Stockholm, 2012.
- [The03] Theska, R.: Führungen. Lehrblätter zur Lehrveranstaltung „Maschinen- und Gerätekonstruktion“, Technische Universität Ilmenau, 2003.
- [The07] Theska, R.: Fassen optischer Bauelemente. Lehrblätter zur Lehrveranstaltung „Maschinen- und Gerätekonstruktion“, Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [The08] Thess, A.; Resagk, C.: Strömungsmechanik 1. Vorlesungsunterlagen Fachbereich Thermo- und Magnetofluiddynamik. TU Ilmenau, 2008.

- [Tue02] Tuell, M. T.; Burge, J. H.; Anderson, B.: Aspheric optics: smoothing the ripples with semi-flexible tools. Proceedings of SPIE. Optical Engineering, Vol. 41. Bellingham, 2002.
- [Wes94] West, S. C.; Martin, H. M.; Nagel, R. H.; Young, R. S.; Davison, W. B.; Trebisky, T. J.; DeRigne, S. T.; Hille, B. B.: Practical Design and performance of the stressed lap polishing tool. Applied Optics Vol.33, No. 34. Optical Society of America, Washington D.C., 1994.
- [Wal03] Walker, D.; Brooks, D.; King, A.; Freeman, R.; Morton, R.; McCavana, G.; Kim, S.: The 'precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces. Optics Express Vol. 11 No. 8. Optical Society of America, Washington D.C., 2003.
- [Wil88] Wilson, S. R.; Reicher, D. W.; McNeil, J. R.: Surface Figuring using neutral ion beams. Proceedings of SPIE. Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics, Vol. 966, p. 74-81. Bellingham, 1988.
- [Xie06] Xie, D. G.; Gao, B.; Yao, Y. X.; Yuan, Z.J.: Study of Local Material Removal Model of Bonnet Tool Polishing. Trans Tech Publications. Switzerland, 2006.
- [You13] Youngworth, R. N.; Gallagher, B. B.; Stamper, B. L.: An overview of power spectral density (PSD) calculations. Proceedings of SPIE. Optical Manufacturing and Testing VI. Bellingham, 2013.
- [Zeu12] Zeuner, M.; Kiontke, S.: Ion Beam Figuring Technology in Optics Manufacturing. Optik& Photonik 2012, No. 2. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, 2012.
- [Zim03] Zimmermann, K.: Technische Mechanik – multimedial. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. München, 2003.
- [Zim06] Zimmermann, K.: Technische Mechanik 3.1. Vorlesungsunterlagen Fachbereich Technische Mechanik. Ilmenau, 2006.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einzelteilzeichnung einer Beispielasphäre.....	15
Abb. 2: Sphärische Ersatzradien a) RMR; b) Scheitelkrümmungsradius sowie c) Minimale Abweichungssumme.....	24
Abb. 3: Politur optisch wirksamer Oberflächen a) ohne Stützring sowie b) mit Stützring.....	25
Abb. 4: Prozesskette zur Herstellung von Präzisionsoptiken nach [Son14] ...	28
Abb. 5: Einteilung der Fertigungsverfahren nach [DIN 8580] mit Verfahrensergänzung.....	29
Abb. 6: Prinzipielle Anordnung für das Bonnet Polishing nach [Sch14a]: a) klassisch; b) Off-axis.....	32
Abb. 7: Prozessablauf des Computer Controlled Polishing nach [Jon80] .....	38
Abb. 8: Technisches Prinzip Multiwerkzeuganordnung nach [Sch14a] .....	47
Abb. 9: Prinzipieller Aufbau eines vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs nach [Sch14a] .....	49
Abb. 10: Phasen und dazugehörige Inhalte des Konstruktiven Entwicklungsprozesses nach [Leh03] .....	53
Abb. 11: Typische Maschinenstruktur einer Poliermaschine mit Synchro-speed-Kinematik .....	55
Abb. 12: Funktionsstruktur zur Integration eines vollaperturigen, aktiv- adaptiven Polierwerkzeugs in eine Synchro-speed Maschinenbasis ....	56
Abb. 13: Abstraktionsstufen zur Einschränkung des Lösungsraums .....	58
Abb. 14: Kombinationsmöglichkeiten aktiver und adaptiver Werkzeugkomponenten .....	59
Abb. 15: Art der Kopplung aktiver und adaptiver Funktionselemente .....	60
Abb. 16: Realisierung werkstückgeometrieabhängiger Stellwege.....	62
Abb. 17: Varianten zur Drehmomenteinleitung in den Werkzeugoberbau .....	63
Abb. 18: Arten zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts entsprechend verwendeter Technologien.....	65
Abb. 19: Ansätze zur Herstellung des Werkzeug-Werkstück Kontakts für vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeuge .....	66
Abb. 20: Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug mit segmentiertem Führungsarray und Permanentmagnetarray .....	68
Abb. 21: Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug mit einfachem Führungsarray und Schraubendruckfederarray.....	70
Abb. 22: Technische Prinzipie nachgiebiger Ringschneiden mittels a) Doppelmembranfeder, b) segmentierter Führung, c) Doppelmembranfeder und Schraubendruckfedern, d) segmentierter Führung mit Membranfeder .....	71

Abb. 23: Ausführungsvarianten der Koppelstelle zur Formübertragung zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau, a) Kugelrollen, b) Zylinderrollen sowie c) sphärische Luftlager Elemente nach [Sch14d].....	74
Abb. 24: Ausführungsvarianten der Trennstelle zwischen Werkzeugunterbau und -oberbau, a) Zentrierbund, b) Dreipunktauflage.....	77
Abb. 25: Ausführungsvarianten zur Hubbegrenzung der Nadeln mittels a) Zylinderhülsen, b) stirnseitige Stempel, c) radiale Planabschliffe...	79
Abb. 26: Gestaltforderungsplan des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs.....	81
Abb. 27: Gestaltforderungsplan der nachgiebigen Ringschneide.....	84
Abb. 28: Vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug in Vollschnittdarstellung.....	87
Abb. 29: Halbschnittdarstellung der nachgiebigen Ringschneide.....	90
Abb. 30: Vollständig bestücktes Nadelkissen.....	94
Abb. 31: Schrittweiser Aufbau und Inbetriebnahme des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs.....	95
Abb. 32: Erfassung der Schwenkachsennulllage durch Umschlagmessung.....	97
Abb. 33: Einstellung der x-Position durch Umschlagmessung.....	98
Abb. 34: Einstellung der z-Position durch a) Einmessnormal sowie b) Messtaster.....	100
Abb. 35: a) simulierte Geometrie des Werkzeugunterbaus; b) bearbeitetes Luftlager mit Sollgeometrie nach [Sch15b].....	104
Abb. 36: Prozessschritte für den Verfahrensnachweis.....	105
Abb. 37: Werkstückgeometrie a) vor Bearbeitung; b) nach Durchpoliervorgang mit vollaperturigem, aktiv-adaptivem Polierwerkzeug.....	106
Abb. 38: Abtragsverlauf für die Politur mit vollaperturigem, aktiv-adaptivem Polierwerkzeug.....	106
Abb. 39: Formfehlerprofil des Werkstücks nach Schleifen und vollaperturiger Politur.....	107
Abb. 40: Poliermittelträgerbelegungen a) Blütenform Synchrospeed-Kinematik; b) Ausgangsbelegung für vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug; c) - d) optimierte Belegung für gleichmäßige Abtragshöhe.....	112
Abb. 41: Abtragsverlauf des vollaperturigen, aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs mit optimierter Poliermittelträger-Belegung.....	113
Abb. 42: Relativer Materialabtragskoeffizient in Abhängigkeit des Drehzahlverhältnisses.....	114
Abb. 43: Prinzipielle Vorgehensweise zum Fehlervorhalt bei der Schleifbearbeitung.....	115

---

Abb. 44: Abtragsverlauf des aktiv-adaptiven Polierwerkzeugs bei Fehlervorhalt .....	116
Abb. 45: Vergleich mittelfrequenter Gestaltabweichungen für das Bonnet Polishing und für das vollaperturige, aktiv-adaptive Polierwerkzeug.....	120
Abb. 46: Bearbeitbarer Durchmesserbereich für konvexe Werkstücke sowie mögliche Bearbeitungszeitverkürzung .....	126



---

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Genauigkeitsklassen optischer Systeme nach [Fra06] .....	11
Tab. 2: Ordnungssystem der Gestaltabweichungen nach [DIN4760] .....	18
Tab. 3: Übersicht etablierter sowie neuer Korrekturpoliertechnologien .....	39
Tab. 4: Bewertung vorgestellter Lösungsansätze .....	51
Tab. 5: Bewertung direkt und indirekt gekoppelter Funktionselemente .....	61
Tab. 6: Kombinationsmöglichkeiten der Einzelfunktionen Nadelführung und -rückstellung .....	68
Tab. 7: Zulässige Fehlergrößen für die vollaperturige Politur rotationssymmetrischer Asphären.....	96
Tab. 8: Übersicht der Einflussgrößen flächiger Polierprozesse [IPT15]; [Bli10]; [Nau14] .....	110
Tab. 9: Mikrorauheiten Bonnet Polishing (Referenzteil) .....	122
Tab. 10: Mikrorauheiten vollaperturiges, aktiv-adaptives Polierwerkzeug .....	123



## Anhang

### ANHANG A: ANALYTISCHES MODELL ZUR BERECHNUNG ZU ERWARTENDER NADELDEFORMATIONEN

Aufgabe: Herleitung eines analytischen Modells zur Abschätzung zu erwartender Biegeverläufe der äußeren Nadeln.

#### Randbedingungen und Annahmen:

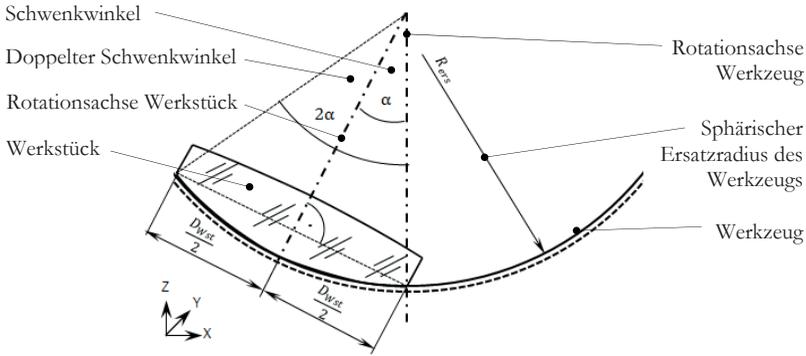
- $R_{\text{ers}} = 105\text{mm}$  ... Sphärischer Ersatzradius des Werkzeugs
- $D_{\text{Wst}} = 40\text{mm}$  ... Werkstückdurchmesser
- $l_{F1} = 12\text{mm}$  ... Führungslänge der Führung 1
- $l_{F2} = 3\text{mm}$  ... Führungslänge der Führung 2
- $l_{\text{Feder}} = 5\text{mm}$  ... Federlänge in Ausgangslage
- $h_{\text{ÜPlan}} = 1\text{mm}$  ... Überstand Unterseite Führung und Planfläche
- $h_{\text{ÜSph}} = 1\text{mm}$  ... Überstand Oberseite Führung und sphärischer Fläche
- $D_{\text{Nadel}} = 1\text{mm}$  ... Nadeldurchmesser
- $E = 210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$   
... E-Modul Stahlwerkstoffe (bspw. X5CrNi18-10)
- $F = 0,2\text{N}$  ... Auf Stirnfläche der Nadel wirkende Kraft

#### Gesucht:

- $v_n(x)$  ... Durchbiegung an der Stelle x im Bereich n

#### Ansatz

Der Ansatz erfordert vorab die Berechnung des Schwenkwinkels zur Bestimmung der maximalen Nadellänge sowie des Krafteinleitungswinkels.



Der Schwenkwinkel  $\alpha$  ergibt sich nach (5) zu:

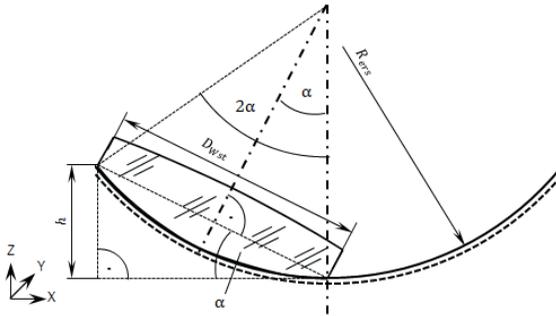
$$\sin(\alpha) = \frac{\frac{D_{Wst}}{2}}{R_{ers}} \quad (4)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{\frac{D_{Wst}}{2}}{R_{ers}} \right) \quad (5)$$

Ist der Schwenkwinkel bekannt, so lässt sich daraus direkt der maximale Kräfteinleitungswinkel als doppelter Schwenkwinkel ableiten. Diese Größe geht dabei von zwei Randbedingungen/Konventionen aus:

1. Zur Berechnung des maximalen Kräfteinleitungswinkels wird der sphärische Ersatzradius des Werkstücks, respektive der Werkzeuggrundkrümmungsradius herangezogen;
2. Die zur Berechnung dienende (lokale) Flächennormale der Werkstückoberfläche spannt den größtmöglichen Winkel zur Rotationsachse des Werkzeugs auf. Folglich trägt sich diese direkt am Werkstückrand an.

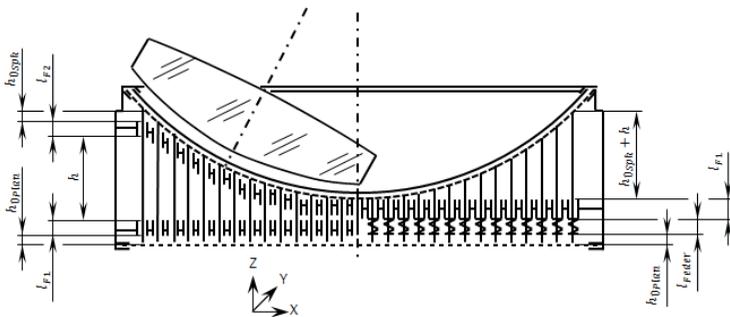
Der maximale Kräfteinleitungswinkel dient der Berechnung der auf die Nadeln wirkenden Querkräfte in  $x$ -Richtung sowie wirkender Biegemomente. Aus den soeben berechneten Größen lässt sich nachfolgend die maximale Nadellänge ermitteln:



$$\sin(\alpha) = \frac{h}{D_{Wst}} \quad (6)$$

$$h = \sin(\alpha) \cdot D_{Wst} \quad (7)$$

Die Länge  $h$  nach Gl. (7) beschreibt den von der Werkstückgeometrie (Werkzeuggrundkrümmungsradius  $R_{ers}$  sowie Werkstückdurchmesser  $D_{Wst}$ ) abhängigen Längenteil der Nadel. Die Gesamtlänge der Nadel ergibt sich in Abhängigkeit der gewählten Führungsverante wie folgt:



Die maximale Nadellänge setzt sich für die Ausführungsvariante des segmentierten Führungsarrays nach Gl. (8) zusammen aus:

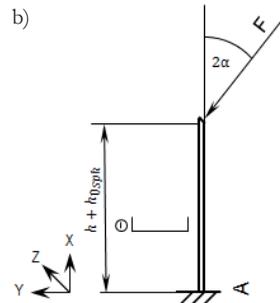
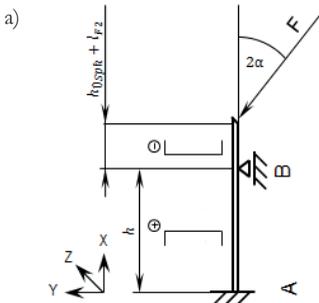
$$l_{Seg} = l_{F1} + l_{F2} + h_{0sph} + h_{0plan} + h \quad (8)$$

Für die Variante des einfachen Führungsarrays ergibt sich die maximale Nadellänge nach Gl. (9) zu:

$$l_{Ein} = h_{Üsph} + h + l_{F1} + l_{Feder} + h_{ÜPlan} \quad (9)$$

Zur Berechnung der gesuchten Biegeverläufe liegen damit alle erforderlichen Eingangsgrößen vor. Zur Vereinfachung der Berechnung anhand eines analytischen Modells nach [Zim03] sowie [Zim06] sollen folgende Annahmen zur Vereinfachungen gelten:

1. Die untere Führung wird sowohl für die Variante des segmentierten Führungsarrays als auch des einfachen Führungsarrays aufgrund ihrer Führungslänge  $\gg$  Nadeldurchmesser/Fügespiel als Einspannung betrachtet;
2.  $h_{ÜPlan}$ ;  $l_{Feder}$  sowie die Führungslänge der unteren Führung ( $l_{F1}$ ) werden vernachlässigt;
3. Für das segmentierte Führungsarray wird der obere Teil der Führung als Loslager betrachtet und deren Führungslänge ( $l_{F2}$ ) auf die freie Biegelänge aufgeschlagen.



Segmentiertes Führungsarray

Für den Ansatz des segmentierten Führungsarrays nach a) ergeben sich die im weiteren Verlauf benötigten Lagerreaktionen zu (10) und (11):

$$\sum \vec{e}_x = 0 : 0 = A_x - F \cdot \cos(2\alpha) \quad \rightarrow A_x = F \cdot \cos(2\alpha) \quad (10)$$

$$\sum \vec{e}_y = 0 : 0 = A_y + B_y + F \cdot \sin(2\alpha) \quad \rightarrow A_y = -B_y - F \cdot \sin(2\alpha) \quad (11)$$

$$\sum \vec{e}_z = 0 : 0 = 0$$

Für den Ansatz des segmentierten Führungsarrays nach a) ergibt sich folgendes Momentengleichgewicht zu (12):

$$\begin{aligned} \sum M_z(A) = 0 : 0 &= M_{ZA} + B_y \cdot h + F \cdot \sin(2\alpha) \cdot (h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2}) \\ &\rightarrow M_{ZA} = -B_y \cdot h - F \cdot \sin(2\alpha) \cdot (h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2}) \end{aligned} \quad (12)$$

Für den Fall a) ist das System einfach statisch überbestimmt, sodass eine Gleichung zur Bestimmung der Lagerreaktion  $B_y$  fehlt. Diese ergibt sich im Folgenden aus den noch aufzustellenden Übergangsbedingungen.

Für die Berechnung von Biegebalken besteht nach [Zim03] der Zusammenhang nach (13). Die Gleichung beinhaltet die gesuchte Größe der Durchbiegung  $v(x)$  in der zweiten Ableitung als  $v''(x)$ .

$$v''(x) = \frac{-M_{bz}(x)}{E \cdot I_z} \quad (13)$$

Die nachfolgenden Berechnungen der Schnittreaktionen (SR) erfolgen jeweils unter Betrachtung des positiven Schnittufers im Bereich  $0 < x < h$  sowie des negativen Schnittufers im Bereich  $h < x < (h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2})$  zur Errechnung des gesuchten Biegemoments nach (13).

SR des segmentierten Führungsarrays nach a) im Bereich  $0 < x < h$ :

$$0 = M_{bz1}(x) + M_{ZA} - A_y \cdot x \quad \rightarrow M_{bz1}(x) = -M_{ZA} + A_y \cdot x \quad (14)$$

Mit (12) und (14) eingesetzt in (13) ergibt sich die gesuchte Durchbiegung im Bereich von  $0 < x < h$  zu (15):

$$v_1''(x) = \frac{B_y \cdot (-h + x) + F \cdot \sin(2\alpha) \cdot (-h - h_{\ddot{u}sph} - l_{F2} + x)}{E \cdot I_z} \quad (15)$$

SR des segmentierten Führungsarrays nach a) im Bereich  $h < x < (h + h_{\ddot{u}sph} + l_{F2})$ :

$$0 = -M_{bz2}(x) + F \cdot \sin(2\alpha)(h + h_{\ddot{u}sph} + l_{F2} - x)$$

$$\rightarrow M_{bz2}(x) = F \cdot \sin(2\alpha)(h + h_{\ddot{u}sph} + l_{F2} - x) \quad (16)$$

Mit (16) eingesetzt in (13) ergibt sich die gesuchte Durchbiegung im Bereich von  $h < x < (h + h_{\ddot{u}sph} + l_{F2})$  zu (17):

$$v_2''(x) = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot (h + h_{\ddot{u}sph} + l_{F2} - x) \quad (17)$$

Nachfolgend ist die Ermittlung der Randbedingungen (RB) und Übergangsbedingungen (ÜB) zur vollständigen Lösung der Verformungsgleichungen erforderlich. Analog der Schnittreaktionen ist ebenfalls zwischen den beiden Bereichen im Stabverlauf zu unterscheiden. Dabei sind vier Bedingungen zur Bestimmung der Integrationskonstanten und eine Bedingung zur Bestimmung der Lagerreaktion  $B_y$  erforderlich.

$$\text{RB für } 0 < x < h: \quad v_1(0) = 0 \quad (18)$$

$$v_1'(0) = 0 \quad (19)$$

$$\text{ÜB zwischen den Bereichen:} \quad v_1(h) = 0 \quad (20)$$

$$v_2(h) = 0 \quad (21)$$

$$v_1'(h) = v_2'(h) \quad (22)$$

Bestimmung von  $v_1'(x)$ ,  $v_1(x)$  sowie  $c_1$  und  $c_2$  durch Nutzung der RB und ÜB nach (18) bis (22):

$$v_1''(x) = \frac{B_y \cdot (-h + x) + F \cdot \sin(2\alpha) \cdot (-h - h_{\text{Üsph}} - l_{F2} + x)}{E \cdot I_z} \quad \Big| \cdot \int dx \quad (15)$$

$$v_1'(x) = \frac{B_y \cdot \left(-hx + \frac{x^2}{2}\right) + F \cdot \sin(2\alpha) \cdot \left((-h - h_{\text{Üsph}} - l_{F2})x + \frac{x^2}{2}\right)}{E \cdot I_z} + c_1 \quad \Big| \cdot \int dx \quad (23)$$

$$v_1(x) = \frac{B_y \cdot \left(-\frac{hx^2}{2} + \frac{x^3}{6}\right) + F \cdot \sin(2\alpha) \cdot \left(\frac{(-h - h_{\text{Üsph}} - l_{F2})x^2}{2} + \frac{x^3}{6}\right)}{E \cdot I_z} + c_1 x + c_2 \quad (24)$$

RB entsprechend (19) eingesetzt in (23) ergibt:

$$c_1 = 0 \quad (25)$$

RB entsprechend (18) eingesetzt in (24) ergibt:

$$c_2 = 0 \quad (26)$$

(20) eingesetzt in (24) erlaubt die Ermittlung der Lagerreaktion  $B_y$ :

$$v_1(x=h) = 0 = \frac{B_y \cdot \left(-\frac{h^3}{3}\right) + F \cdot \sin(2\alpha) \cdot \left(\frac{(-h_{\text{Üsph}} - l_{F2})h^2}{2} - \frac{h^3}{3}\right)}{E \cdot I_z} \quad (27)$$

(27) umgestellt nach  $B_y$ :

$$B_y = F \cdot \sin(2\alpha) \cdot \left(-\frac{3(h_{\text{Üsph}} + l_{F2})}{h} - 1\right) \quad (28)$$

Bestimmung von  $v_2'(x)$ ,  $v_2(x)$  sowie  $c_3$  und  $c_4$  durch Nutzung der RB und ÜB nach (18) bis (22):

$$v_2''(x) = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot (h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2} - x) \quad | \cdot \int dx \quad (17)$$

$$v_2'(x) = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left( (h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2})x - \frac{x^2}{2} \right) + c_3 \quad | \cdot \int dx \quad (29)$$

$$v_2(x) = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left( \frac{(h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2})x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + c_3x + c_4 \quad (30)$$

(23), (30) und (28) eingesetzt in ÜB gemäß (22) und vereinfacht ergibt:

$$\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \frac{3}{4} (h_{\text{Üsph}} + l_{F2})h = \frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left( -\frac{h^2}{2} \right) + c_3 \quad (31)$$

(31) umgestellt nach  $c_3$  liefert:

$$c_3 = \frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left( \frac{h^2}{2} + \frac{3}{4} (h_{\text{Üsph}} + l_{F2})h \right) \quad (32)$$

(21) und (32) eingesetzt in (30) liefert  $c_4$ :

$$v_2(h) = 0 = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left( \frac{(h_{\text{Üsph}} + l_{F2})h^2}{2} + \frac{h^3}{3} - \frac{h^3}{2} - \frac{3}{4} (h_{\text{Üsph}} + l_{F2})h^2 \right) + c_4 \quad (33)$$

(33) umgestellt nach  $c_4$  und vereinfacht:

$$c_4 = \frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left( -\frac{1}{4} (h_{\text{Üsph}} + l_{F2})h^2 - \frac{1}{6} h^3 \right) \quad (34)$$

Zusammenfassen und Vereinfachen der Gleichung (24) durch Einsetzen von (28):

$$v_1(x) = \frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \left( \left( -\frac{3(h_{\text{Üsph}} + l_{F2})}{2h} - 1 \right) \cdot \left( -\frac{hx^2}{2} + \frac{x^3}{6} \right) - \frac{(h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2})x^2}{2} + \frac{x^3}{6} \right) \quad (35)$$

Ausmultiplizieren und Vereinfachen von (33) liefert  $v_1(x)$ :

$$\underline{\underline{v_1(x) = \frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{4 \cdot E \cdot I_z} \left( \left( 1 - \frac{x}{h} \right) (h_{\text{Üsph}} + l_{F2}) x^2 \right)}} \quad (36)$$

Zusammenfassen und Vereinfachen der Gleichung (30) durch Einsetzen von (32) sowie (34):

$$\underline{\underline{v_2(x) = \frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left( \frac{x^3 - h^3}{6} - \frac{(h + h_{\text{Üsph}} + l_{F2})x^2}{2} + \frac{h^2x}{2} + \frac{3hx - h^2}{4} \cdot (h_{\text{Üsph}} + l_{F2}) \right)}} \quad (37)$$

### Einfaches Führungsarray

Für den Ansatz des einfachen Führungsarrays nach b) ergeben sich die Lagerreaktionen zu (38) und (39):

$$\vec{e}_x: 0 = A_x - F \cdot \cos(2\alpha) \quad \rightarrow A_x = F \cdot \cos(2\alpha) \quad (38)$$

$$\vec{e}_y: 0 = A_y + F \cdot \sin(2\alpha) \quad \rightarrow A_y = -F \cdot \sin(2\alpha) \quad (39)$$

$$\vec{e}_z: 0 = 0$$

Die nachfolgende Berechnung der Schnittreaktionen (SR) erfolgt unter Betrachtung des negativen Schnittufers und liefert das gesuchte Biegemomente nach (13).

SR des einfachen Führungsarrays nach b) im Bereich  $0 < x < (h + h_{\ddot{u}sph})$ :

$$0 = -M_{bz}(x) + \left( (h + h_{\ddot{u}sph}) - x \right) \cdot F \cdot \sin(2\alpha)$$

$$\rightarrow M_{bz}(x) = \left( (h + h_{\ddot{u}sph}) - x \right) \cdot F \cdot \sin(2\alpha) \quad (40)$$

(40) eingesetzt in (13) liefert die gesuchte Durchbiegung im Bereich von  $0 < x < (h + h_{\ddot{u}sph})$  zu (41):

$$v_3''(x) = - \frac{\left( (h + h_{\ddot{u}sph}) - x \right) \cdot F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \quad (41)$$

Nachfolgend ist die Ermittlung der RB zur vollständigen Lösung der Biegegleichung erforderlich.

$$\text{RB für } 0 < x < (h + h_{\ddot{u}sph}) : \quad v_3''(0) = 0 \quad (42)$$

$$v_3'(0) = 0 \quad (43)$$

$$v_3(0) = 0 \quad (44)$$

Bestimmung von  $v_3'(x)$  sowie  $v_3(x)$  durch Nutzung der RB nach (43) und (44):

$$v_3''(x) = -\frac{\left((h + h_{\ddot{u}_{sph}}) - x\right) \cdot F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \quad \Big| \cdot \int dx \quad (41)$$

$$\underline{v_3'(x) = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left((h + h_{\ddot{u}_{sph}})x - \frac{x^2}{2}\right) + c_5} \quad \Big| \cdot \int dx \quad (45)$$

$$\underline{v_3(x) = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left(\frac{(h + h_{\ddot{u}_{sph}})x^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) + c_5x + c_6} \quad (46)$$

RB entsprechend (43) eingesetzt in (45) ergibt:

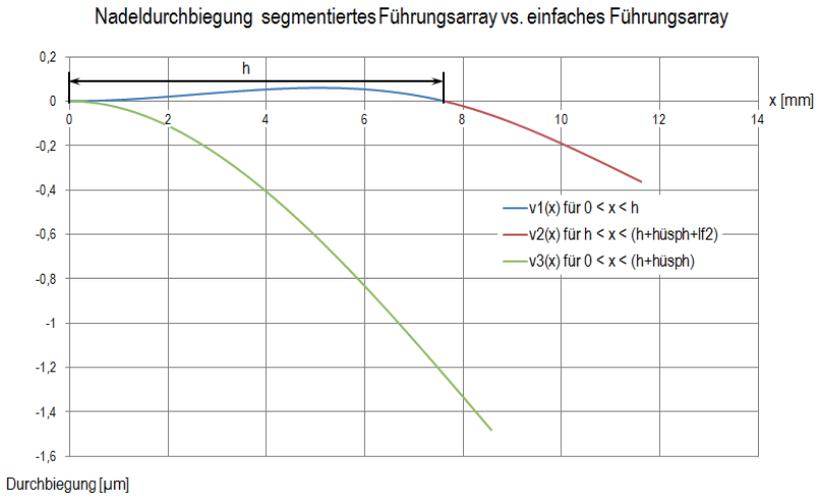
$$c_5 = 0 \quad (47)$$

RB entsprechend (44) eingesetzt in (46) ergibt:

$$c_6 = 0 \quad (48)$$

Damit ergibt sich  $v_3(x)$  nach Gleichung (49) zu:

$$\underline{\underline{v_3(x) = -\frac{F \cdot \sin(2\alpha)}{E \cdot I_z} \cdot \left(\frac{(h + h_{\ddot{u}_{sph}})x^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right)}} \quad (49)$$



Ein Plot der Biegeverläufe veranschaulicht die Überlegenheit des segmentierten Führungsarrays gegenüber dem einfachen Führungsarray aufgrund der  $\approx 4x$  geringer ausfallenden Durchbiegung obgleich größerer Nadellänge.

## ANHANG B: ANALYTISCHES MODELL ZUR KIPPWINKELBERECHNUNG DES BEWEGLICHEN TEILS DER NACHGIEBIGEN RINGSCHNEIDE

Aufgabe: Berechnung des zu erwartenden Kippwinkels der nachgiebigen Ringschneide für unterschiedliche Fügespiele.

### Randbedingungen und Annahmen:

- $b_{\max} = 35\text{mm}$  ... Maximale, virtuelle Führungslänge
- $D_{\text{führ}} = 15\text{mm}$  ... Durchmesser Zylinderführung
- Elastische Verformungen des feststehenden als auch beweglichen Teils der Ringschneide erfahren keine Berücksichtigung.

### Gesucht:

- $\beta(g_n)$  ... maximaler Kippwinkel des beweglichen Teils der Ringschneide in Abhängigkeit der Passung

### Ansatz

Berechnung des maximalen Fügspiels für unterschiedliche Spielpassungen. Nachfolgend erlaubt das jeweils ermittelte Größtspiel die Berechnung des maximalen Kippwinkels des nachgiebigen Teils der Ringschneide, unter Berücksichtigung der sich aus beiden Führungssegmenten ergebenden maximalen, virtuellen Führungslänge.

#### **Passung 1: Ø15H7/f7**

H7:	ES = +18µm	f7:	es = -66µm
	EI = 0µm		ei = -34µm
	Daraus ergibt sich das Größtspiel $g_1$ zu:		$g_1 = 52\mu\text{m}$

#### **Passung 2: Ø15H7/g6**

H7:	ES = +18µm	g6:	es = -6µm
	EI = 0µm		ei = -17µm
	Daraus ergibt sich das Größtspiel $g_2$ zu:		$g_2 = 35\mu\text{m}$

**Passung 3: Ø15H6/g5**

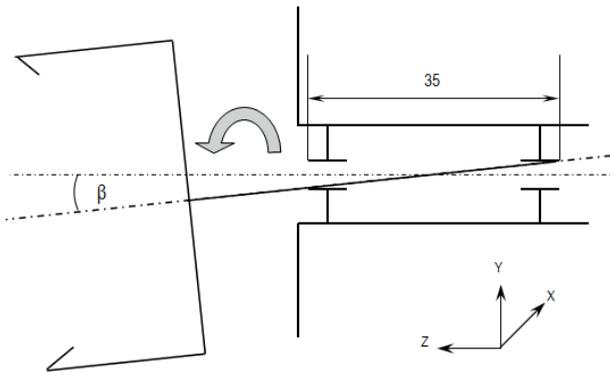
H6:	ES = +11µm	g5:	es = -6µm
	EI = 0µm		ei = -14µm
Daraus ergibt sich das Größtspiel $g_3$ zu:			$g_3 = 25µm$

**Passung 4: Ø15H5/g4**

H5:	ES = +8µm	g4:	es = -6µm
	EI = 0µm		ei = -11µm
Daraus ergibt sich das Größtspiel $g_4$ zu:			$g_4 = 19µm$

**Passung 5: Ø15H4/g3**

H4:	ES = +5µm	g3:	es = -6µm
	EI = 0µm		ei = -9µm
Daraus ergibt sich das Größtspiel $g_5$ zu:			$g_5 = 14µm$



Der Kippwinkel des beweglichen Teils der Ringschneide berechnet sich zu:

$$\tan(\beta_n) = \frac{g_n}{b_{max}} \quad (50)$$

$$\beta_n = \tan^{-1}\left(\frac{g_n}{b_{max}}\right) \quad (51)$$

Nach Einsetzen des zugehörigen Größtspiels  $g_n$  ergibt sich der maximale Kippwinkel  $\beta(g_n)$  zu:

$$\beta(g_1) = 5,1 \text{ arcmin} \quad (52)$$

$$\beta(g_2) = 3,4 \text{ arcmin} \quad (53)$$

$$\beta(g_3) = 2,5 \text{ arcmin} \quad (54)$$

$$\beta(g_4) = 1,9 \text{ arcmin} \quad (55)$$

$$\beta(g_5) = 1,4 \text{ arcmin} \quad (56)$$

Für die konstruktive Ausgestaltung der nachgiebigen Ringschneide empfiehlt sich zur Minimierung des Kippfehlers die Verwendung einer H4/g3 Passung.

## Liste der bisher erschienenen Bände, Stand 01.08.2016

### Bericht aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (IMK), 1990 – 2010

- Band 1**    **Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.):**  
Forschung und Lehre im Institut für Maschinenelemente und  
Konstruktion  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 1999. - ISBN 3-932633-37-7
- Band 2**    **Spiller, Frank:**  
Möglichkeiten der rechentechnischen Umsetzung von Erkenntnissen aus  
der Konstruktions-systematik unter Nutzung der Featuretechnologie  
(Dissertation TU Ilmenau 1998)  
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-932633-20-2
- Band 3**    **Leibl, Peter:**  
Entwicklung eines featureorientierten Hilfsmittels für die Konstruktion  
kostengünstiger Produkte  
(Dissertation TU Ilmenau 1998)  
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-00-003695-4
- Band 4**    **Lutz, Steffen:**  
Kennlinie und Eigenfrequenzen von Schraubenfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2000)  
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-47-4
- Band 5**    **Kletzin, Ulf:**  
Finite-Elemente-basiertes Entwurfssystem für Federn und  
Federanforderungen  
(Dissertation TU Ilmenau 2000)  
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-48-2
- Band 6**    **Volz, Andreas K.:**  
Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der  
Crashsimulation  
(Dissertation TU Ilmenau 1998)  
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-52-0

- Band 7 Brix, Torsten:**  
Feature- und constraint-basierter Entwurf technischer Prinzipie  
(Dissertation TU Ilmenau 2001)  
Ilmenau : ISLE, 2001. - ISBN 3-932633-67-9
- Band 8 Rektor der TU Ilmenau und Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss Jena GmbH**  
Vom Arbeitsblatt zum virtuellen Prototyp – 50 Jahre  
Konstruktionssystematik  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 2002. - ISBN 3-932633-68-7
- Band 9 Liebermann, Kersten:**  
Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für  
Schraubendruckfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2003)  
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-74-1
- Band 10 Meissner, Manfred; Denecke, Klaus:**  
Die Geschichte der Maschinenelemente als Fachgebiet und Institut an  
der Technischen Universität Ilmenau von 1953 bis 2003  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-82-2
- Band 11 Geinitz, Veronika:**  
Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2006)  
Ilmenau : ISLE, 2006. - ISBN 3-938843-11-X
- Band 12 Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (Hrsg.):**  
Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierungen von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-  
Ing. habil. Hans-Jürgen Schorcht  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 2005. - ISBN 3-932633-97-0
- Band 13 Wittkopp, Tobias:**  
Mehrkörpersimulation von Schraubendruckfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2005)  
Ilmenau : ISLE, 2005. - ISBN 3-938843-07-1
- Band 14 Frank, Stefan:**  
Justierdrehen – eine Technologie für Hochleistungsoptik  
(Dissertation TU Ilmenau 2007)  
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-35-4

**Band 15 Schilling, Thomas:**

Augmented Reality in der Produktentstehung  
(Dissertation TU Ilmenau 2008)  
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-42-0

**Band 16 Lotz, Markus:**

Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und  
Positioniermaschinen  
(Dissertation TU Ilmenau 2009)  
Ilmenau : ISLE, 2009. - ISBN 978-3-938843-46-8

**[Band 17] Hackel, Tobias:**

Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für  
Nanopräzisionsmaschinen  
(Dissertation TU Ilmenau 2010)  
Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-  
86991-111-3

**[Band 18] Frank, Thomas:**

Konzeption und konstruktive Gestaltung der Messkreise von  
Nanomessmaschinen  
(Dissertation TU Ilmenau 2010)  
Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-  
86991-194-6

**Berichte aus dem Institut für Maschinen- und  
Gerätekonstruktion (IMGK), 2010 - ...**

**Band 19 Sondermann, Mario:**

Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer  
Hochleistungssysteme  
(Dissertation TU Ilmenau 2010)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2011. - ISBN 978-3-939473-94-7

**Band 20 Husung, Stephan:**

Simulation akustischer Produkteigenschaften unter Nutzung von Virtual  
Reality während der Produktentwicklung  
(Dissertation TU Ilmenau 2011)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2012. - ISBN 978-3-86360-026-6

- Band 21 Dobermann, Dirk:**  
Stabilisierung der Bildlage abbildender optischer Systeme  
(Dissertation TU Ilmenau 2012)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-056-3
- Band 22 Taubmann, Peter:**  
Analyse der Ventildfederbewegung als Beitrag zur Beeinflussung der Verschleißursachen an den Auflageflächen  
(Dissertation TU Ilmenau 2013)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-059-4
- Band 23 Erbe, Torsten:**  
Beitrag zur systematischen Aktor- und Aktorprinzipauswahl im Entwicklungsprozess  
(Dissertation TU Ilmenau 2013)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-060-0
- Band 24 Ginani, Luciano Selva:**  
Optical Scanning Sensor System with Submicron Resolution  
(Dissertation TU Ilmenau 2013)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-068-6
- Band 25 Heidler, Nils:**  
Untersuchungen zylindrischer Gasführungselemente für Hochvakuumanwendungen  
(Dissertation TU Ilmenau 2015)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2016. - ISBN 978-3-86360-130-0
- Band 26 Reich, René:**  
Möglichkeiten und Grenzen bei der Auslegung von Schraubendruckfedern auf Basis von Umlaufbiegeprüfungen  
(Dissertation TU Ilmenau 2016)  
Ilmenau : Universitätsverlag Ilmenau, 2016. - ISBN 978-3-86360-139-3
- Band 27 Resch, Jens:**  
Kontextorientierte Entwicklung und Absicherung von festen Verbindungen im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie  
(Dissertation TU Ilmenau 2016)  
Ilmenau : Universitätsverlag Ilmenau, 2016. - ISBN 978-3-86360-143-0
- Band 28 Scheibe, Hannes:**  
Aktiv-adaptive Polierwerkzeuge zur Herstellung rotationssymmetrischer Asphären  
(Dissertation TU Ilmenau 2016)  
Ilmenau : Universitätsverlag Ilmenau, 2016. - ISBN 978-3-86360-147-8