

---

# **Laserpolieren im geschlossenen Regelkreis mittels prozessbegleitender Oberflächenqualitätsmesstechnik**

**Oliver Faehnle<sup>1</sup>, Rolf Rascher<sup>2</sup>, Christian Vogt<sup>2</sup>, Jens Bliedtner<sup>3</sup> und Daewook Kim<sup>4</sup>**

Dieses Paper beschreibt einen Weg zu einem geschlossenen Polierprozess optischer Elemente, mit dem Ziel optimaler Polierzeiten.

Zu diesem Zweck wird ein prozessinternes Testverfahren zur Überwachung der Mikro-Oberflächenqualität bestehend aus Oberflächenrauheit und Scratch-and-Dig innerhalb des Polierkontakts vorgestellt.

Seine Anwendbarkeit auf das Closed-Loop-Polieren sowohl für das klassische kraftgesteuerte Polieren als auch für das computergesteuerte Laserpolieren wird experimentell getestet und verifiziert.

Die beschriebene Closed Loop Oberflächenmesstechnik ermöglicht die Bestimmung der optimalen lokalen Verweilzeit und trägt damit zu einer stabilen und kostenoptimierten Politur bei.

---

<sup>1</sup> FISBA AG, <sup>2</sup> Technische Hochschule Deggendorf, <sup>3</sup> Ernst Abbé Hochschule Jena, <sup>4</sup> University of Arizona

Optische Linsen werden seit mehr als 3400 Jahren hergestellt, wie z.B. die minoischen Linsen, die 1400 v.Chr. auf der griechischen Insel Kreta ausgegraben wurden [1], zeigen. Analysiert man die Entwicklung der optischen Fertigungstechnologien seit dieser Zeit und betrachtet man dies aus evolutionärer Sicht, so erkennt man, dass dieser Prozess durch das Ziel "minimaler Aufwand" bestimmt wurde, um eine "gerade genügend gute " Linsenqualität zu erzeugen; wobei unter Linsenqualität im Wesentlichen Formgenauigkeit und Oberflächengüte (bestehend aus Oberflächenrauheit (Sq), Tiefenbeschädigungen (SSD) und Scratch-and-Dig (S&D)) verstanden wird.

### 1. Einleitung

Aus Autorensicht können drei aufeinanderfolgende Phasen in der Entwicklung der optischen Herstellungstechnologie, die sich zeitlich überlappen, identifiziert werden: a) die handwerkliche Bearbeitung («*handcrafting*»), b) die maschinelle Bearbeitung («*machining*») und c) die prozessgesteuerte Bearbeitung («*processing*»). Diese drei Phasen unterscheiden sich in ihrer generellen Strategie zur Erzeugung des erforderlichen Qualitätsniveaus der Linsen und stellen die Bedeutung der vorgestellten Closed-Loop-Technologie in den Kontext.

#### A. Handcrafting (handwerkliche Linsenfertigung ohne Maschinen)

Unsere Vorfahren bearbeiteten bereits seit Jahrtausenden spröde Materialien wie z.B. Kristalloberflächen mit handgehaltenen Werkzeugen, um glänzende Objekte, wie rituelle Gegenstände, Werkzeuge, Waffen oder Schmuck zu erzeugen. Dabei wurde der Linsenherstellungsprozess (LHP) von zwei Instanzen gesteuert: 1) kognitives Denken auf der Grundlage von Logik und 2) intuitives Fühlen mit Hilfe des menschlichen Sehens, Hörens und der Wahrnehmung der Hände. Dieser handwerkliche LHP wird auch heute noch von Hobbyastronomen ohne Zugang zu Maschinen zum Polieren von Linsen eingesetzt.

## B. Machining (Linsenfertigung mittels menschengeführter Maschinenkinematik).

Schritt für Schritt wurden Teile des LHP auf Werkzeuge und Maschinen übertragen. So wurde z.B. bei der Entwicklung des abrasiven Schleifens und Polierens von Linsen die manuelle Drehbewegung der Linse durch den Einsatz von bogengetriebenen Spindeln ersetzt. Dieser Maschinentyp ähnelt einer frühen Version einer Drehbank und ist seit mindestens 1.940 Jahren im Einsatz, wie von Plinius 77 P.C. [2] beschrieben.

Die Kombination aus maschineller Drehung der Linse (oder des Werkzeugs) und maschinellem Verschieben und Andrücken des Werkzeugs (oder der Linse) von Hand gibt es auch heute noch (z.B. die fußangetriebene Poliermaschine in Bild 1). Meisteroptiker sind in der Lage, optische Oberflächen von Hand bis auf Formgenauigkeiten von unter 30 nm RMS Abweichung von der gewünschten Form und Oberflächenrauigkeiten von  $\sim 0,5-2$  nm RMS zu polieren, obwohl sie Spindeln mit lateralen Positioniergenauigkeiten von lediglich mehreren 100 Mikrometern verwenden.

Diese Handwerkskunst wird oft als die "goldenen Hände der Feinoptiker" bezeichnet. Sie ist eine Fähigkeit, die man nicht allein durch rationales Denken erlernen kann, sondern nur durch zusätzliche Schulung des Empfindens und der Intuition der Hand und mit der man den LHP in situ fühlt. Durch die sukzessive Übernahme der handwerklichen Kinematik durch Maschinen haben wir an Genauigkeit und Stabilität gewonnen. In diesem Zuge wurden große Fortschritte in der Fertigung erzielt: z.B. werden auf vortriebsgesteuerten CNC-Maschinen Positioniergenauigkeiten von weniger als  $\sim 80$  nm erreicht, die ein neues Verfahren der Ultrapräzisionsbearbeitung ermöglichen: das Duktilschleifen [3].



Bild 1. Fußgetriebene Poliermaschine in einer Optikfertigung in Delft, Niederlande.

---

### C. Processing (Prozessgesteuerte Bearbeitung durch Kontrolle kritischer Herstellungsparameter ohne menschliche Interaktionen)

Die moderne Optikfertigung hat durch die ausschließliche Optimierung der Maschinen viele Fortschritte erzielt. Dabei ist zu bedenken, dass Maschinen nur einen Teil des LHP darstellen und dass auf dem Weg zur Prozessstabilisierung und Vollautomatisierung der Optikfertigung der gesamte LHP automatisiert werden muss. Zu diesem Zweck wurden Optimierungsverfahren entwickelt, die strikt zwischen Maschinen- und Prozessthemen unterscheiden und dabei kritische Prozessparameter der Fertigung und deren Wechselbeziehungen identifizieren und optimieren [4].

Die jüngste Station auf diesem "evolutionären" Weg zu hocheffizienten und deterministischen Fertigungsprozessen war die Entwicklung der CCOS-Technologie (Computer Controlled Optical Surfacing) zur Formerzeugung. Hier wurde die menschengesteuerte Werkzeugführung an Präzisionsmaschinen vollständig durch Maschinen mit numerischer Steuerung und Algorithmen zur Prozessbeherrschung ersetzt. Ein Beispiel ist die Sub-Apertur Politur mit Verweilzeitsteuerung. Bekannte und industriell etablierte CCOS-Plattformen wie MRF (Magnetorheological Finishing) und IBF (Ion Beam Figuring) ermöglichen ausgezeichnete Oberflächenformqualitäten durch die im Prozess genutzte

deterministische Steuerung des Bearbeitungsverfahrens - ohne auf die Ausbildung der Mitarbeiter (kognitives Denken) oder die "goldenen Hände" des Optikers angewiesen zu sein.

## **2. In-Prozess-Messtechnik für das Polieren im geschlossenen Regelkreis**

Die Oberflächengüte kann nach jedem Iterationsschritt mit einem tragbaren, phasenschiebenden Interferometer *in situ* (z.B. Micro Finish Topographer [5]) oder einem kompakten, auf Streuung basierenden Rauheitssensor (z.B. *Horos* [6]), der auf einer Maschine oder einem Roboter montiert ist, gemessen werden. Diese hochsensiblen Messtechnologien liefern erfolgreich genaue Oberflächeninformationen, um weitere Iterationsschritte zu steuern.

Die Prozesssteuerung während CCOS bleibt dabei ein Open-Loop-Prozess und ist somit nur ein iterativer Ansatz der Herstellung-Messung-Fertigungs-Zyklen ohne Echtzeit-Feedback bzw. Regelung.

### **A. Geschlossener Polierkreislauf**

Dieser Artikel berichtet über einen neuen geschlossenen Regelkreis für Polierprozesse. Es wird eine *in Prozess* und *in situ* Überwachung der Oberflächenqualität (Rauheit und Scratch&Dig) mittels eines einzigen komprimierten, integrierenden Signals genutzt, deren Aufbau in Bild 2 gezeigt ist

Neben der Formerzeugung ist das Polieren, also die Erzeugung der erforderlichen Oberflächengüte, der teuerste und zeitaufwendigste Prozess für viele optische Bauteile. Leider verlassen wir uns beim Einrichten von Polierprozessen immer noch überwiegend auf die menschliche Intuition und Erfahrung. Außerdem wird die Oberflächengüte weder *in situ* noch *in Prozess*, sondern außerhalb der Maschine gemessen, indem zwei Parameter separat gemessen werden: Sq und S&D.

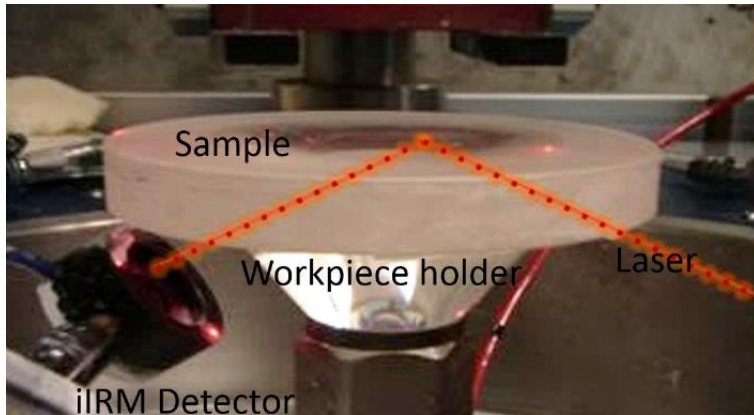


Bild 2. iIRM: Während die Probe poliert wird, wird die Intensität eines Laserstrahls detektiert, der im Inneren des Materials an der zu prüfenden Oberfläche reflektiert wird. Auf diese Weise wird die Oberflächengüte *in Prozess* und *in situ* mittels eines einzigen Signals überwacht.

---

Bei dem vorgestellten Ansatz kann die optimale Polierzeit in Echtzeit innerhalb des Polierspots ermittelt werden, wodurch eine Kosten- und Zeitoptimierung des Polierprozesses möglich ist und eine Vollautomatisierung in greifbare Nähe rückt. Zu diesem Zweck wurde die entwickelte Methode zur Messung der Oberflächenqualität, die intensitätsdetektierende Innenreflexionsmikroskopie (iIRM) [7], wie in Bild 2 gezeigt, zur Inprozesskontrolle der Oberflächengüte während des traditionellen Polierens und des Subapertur-Laserpolierens weiterentwickelt.

### B. iIRM-Messtechnik mit Sub-Nanometer-Empfindlichkeit

Es wurde gezeigt, dass durch die Überwachung der Intensität eines Laserstrahls, der an einer optischen Oberfläche innerhalb der Probe reflektiert wird, während die Außenseite der Probe abrasiv geschliffen und poliert wird, die Oberflächengüte während des Prozesses überwacht werden kann [7].

Oberflächenfehler, wie Sq, S&D oder SSD, verursachen Streulicht und folglich einen Intensitätsverlust des reflektierten Strahls, der als