

Projektplan

tigeR: Multiskalige Risscharakterisierung in der Optikfertigung (22724 BR)

Motivation

Oberflächennahe Schädigungen, insbesondere Mikrorisse, entstehen verfahrensbedingt während der konventionellen Bearbeitung (Schleifen, Läppen) aber auch bei der Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung von hart-spröden Materialien wie Gläser und Kristalle. Die auch Subsurface Damage (SSD) genannten Schädigungen beeinflussen maßgeblich die Performanz der finalen optischen Bauelemente und Systeme hinsichtlich ihrer erreichbaren Abbildungseigenschaften, der Laserzerstörungsschwellen, Lichtstreuung etc. Für hochqualitative Optiken müssen SSD aktuell durch aufwendige und kostenintensive Polier- und Finishingverfahren entfernt werden. Vor allem bei der Fertigung von Präzisionsoptiken für Hochleistungslaseranwendungen ist die Minimierung von SSD ein essenzieller Aspekt, da die Einkopplung und Absorption der Laserstrahlung an oberflächennahen Defekten zur Zerstörung der Optiken führen kann. Für viele Anwendungen sind daher die Beseitigung bzw. Minimierung von SSD ein maßgeblicher Kosten- und Qualitätsfaktor.

Die Herstellung immer komplexerer Oberflächengeometrien, insbesondere optische Freiformflächen zur Laserstrahlformung oder zur Generierung neuer Abbildungseigenschaften in hochkompakten optischen Systemen, erfordert aufwändige Prozessketten. Diese beinhalten deterministische Verfahrensschritte wie mehrstufiges Schleifen zur Formgebung sowie einer schrittweisen Verringerung der Schleifschäden, weiter zonales Polieren mit CNC-gesteuerten Verfahren bis hin zu nichtkonventionellen teilchen- und energiestrahlbasierten Korrektur- und Finishingverfahren auf der Basis reaktiver Plasmaentladungen, reaktiver Ionenstrahlen oder laserbasierter Materialbearbeitung. Die hierbei spezifisch auftretenden Wechselwirkungen mit SSD-behafteten Oberflächen können zu Rauheiten, punktuellen, strukturellen und chemischen Defekten führen. Zur Optimierung der individuellen Fertigungsprozesse, mit Blick auf Zeit- und Kosteneffizienz, müssen passgenaue Übergabespezifikationen zu nachfolgenden Schritten definiert werden. Dies ist u. a. nur durch genaue Kenntnis über Art, Tiefe und räumliche Verteilung des Schädigungslevels in optischen Oberflächen möglich. Allerdings können SSD bisher nur sehr aufwendig und zumeist nur durch zerstörende Messverfahren nachgewiesen werden. Daher wird häufig während der Prozessentwicklung und im Produktionsprozess auf Abschätzungen der SSD zurückgegriffen. Eine Abschätzung der SSD-Tiefe und der somit abzutragenden Materialmenge wird bisher meist mittels empirischer Formeln auf Grundlage von Rauheitskennwerten bzw. abgeleitet von der Korngrößen beim Schleifen und dem Wissen über die spezifischen Schleifprozesse genutzt. Damit wird zwar sichergestellt, dass die induzierten Schädigungen bei nachfolgenden Polierprozessen weitgehend entfernt werden, allerdings wird dabei u. U. mehr Material als notwendig entfernt, wenn die Schädigungstiefe geringer als abgeschätzt ist. Verbleibende nanoskopische Defekte und Schädigungen werden oftmals nicht erfasst. Eine schnelle und möglichst umfassende zerstörungsfreie Charakterisierung der Schädigungsart und -tiefe würde die Effizienz der Fertigungsketten aus Schleif-, Läpp-, Polier- und Finishingprozessen signifikant erhöhen.

Forschungsziel

Das Forschungsziel ist die multiskalige Charakterisierung von Defekten in der Optikfertigung mittels mikroskopischer und nanoskopischer Messverfahren. In dem gemeinsamen Projekt der Ernst-Abbe-Hochschule Jena (EAH) zusammen mit dem Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., Leipzig (IOM), soll ein tiefgreifendes Verständnis der Defekte, aber auch der zerstörungsfreien Messtechnik für SSD basierend auf optischer Kohärenztomographie (OCT) entwickelt werden. Durch die zerstörungsfreie Funktionsweise der OCT wird die iterative Reduzierung der SSD-Tiefe über mehrere Prozessstufen vom Vorschleifen bis hin zum Ultrafeinstschleifen und nachfolgende Polierprozesse an einer Probe untersucht. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) sollen durch die gewonnenen Erkenntnisse zur SSD-Modellierung sowie die Validierung von optischer OCT als zerstörungsfreies Messverfahren für SSD unterstützt werden, im internationalen Umfeld der High-Tech-Optikfertigung wirtschaftlich und technologisch konkurrenzfähig zu bleiben. Die Projektarbeiten zielen darüber hinaus auf die Entwicklung und Erprobung einer neuen Fertigungskette mit Ionen- und Plasmastrahl basierten Finishingverfahren.

Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels

Der wissenschaftlich-technische sowie organisatorische Lösungsweg von tigeR wird in Abbildung 1 dargestellt. Inhaltliche Kernaspekte sind darauffolgend stichpunktartig hervorheben. Unter anderem werden innovative Ansätze zur Probenvorbereitung und Auswertung verfolgt, wie die Markierung von kleinen Messfeldern mittels Ultrakurzpulslaser (UKP-Laser) sowie das gezielte Einbringen von Defekten. Organisatorisch sieht das Projekt eine starke Einbindung des projektbegleitenden Ausschusses (PA), bestehend aus KMU und Großunternehmen entlang der Wertschöpfungskette der deutschen Optik- und Messtechnikbranche, vor.

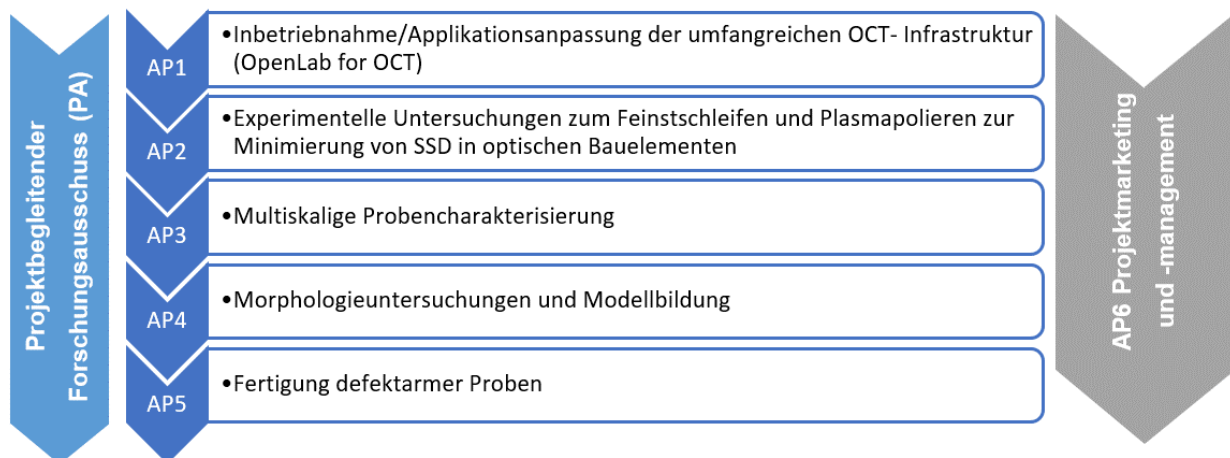


Abbildung 1: Darstellung des Lösungsweges zu tigeR anhand der 6 Arbeitspakete (AP) mit Begleitung durch den PA

- Relevante Materialien und Bearbeitungsparameter werden gemeinsam mit dem PA definiert.
- High-End OCT-Systeme stehen an der EAH im Rahmen des *OpenLab for OCT* zur Verfügung, und werden im Projekt an die Applikation der Subsurface Damage-Charakterisierung angepasst. Hierfür werden optimale Messparameter für unterschiedliche Materialien herausgearbeitet. Außerdem wird ein experimenteller OCT-Aufbau im UV-Bereich eingesetzt.
- Mittels Mikroindentation / Single-Diamond-Turning werden gezielt makroskalige Defekte präpariert und anschließend analysiert. Mit unterschiedlichen Schleifparametern hergestellte Oberflächen werden analysiert und als Prozessdemonstratoren bereit gestellt.
- Nanodefekte auf polierten Glasproben werden durch Abtrag mit Ionenstrahlen präpariert. Hierbei wird die Oberfläche schichtweise mit Schritten von ca. 10 nm bis in Tiefen von 5 µm

abgetragen bzw. durch flache Keilätzungen die Defekte auf einer Probe in verschiedenen Tiefen zugänglich gemacht.

- Für eine zuverlässige Zuordnung der Messposition über alle Fertigungsschritte hinweg kommen Mikrobohrungen mittels UKP-Lasermarkierung zum Einsatz.
- Defekte werden mit zerstörungsfreier, hochauflösender OCT erfasst und anschließend mittels destruktiver, teils nanoskopischer Verfahren betrachtet.
- Ionenstrahl- und plasmapräparierte Oberflächen werden mit bildgebender TOF-SIMS bezüglich der vorhandenen Elementverteilung analysiert. An ausgewählten repräsentativen Proben werden mittels Focused Ion Beam vertikale Querschnitte präpariert, um anschließend mit HR-STEM die Tiefenverteilung von Defekten quantitativ zu analysieren.
- Mittels Matlab-Tools wird eine prozessstabile Datenaufbereitung zur Rausch- und Artefaktreduktion der OCT-Daten sowie zur Analyse und Visualisierung entwickelt.
- Aus den extrahierten OCT-Informationen werden Modelle zur makroskaligen Rissmorphologie sowie SSD-Tiefenverteilung (Flächenanteile und Segmentanzahlen über Tiefe) abgeleitet.
- Dreidimensionale Aufnahmen von SSD ermöglichen erstmals umfangreiche Analysen der Rissmorphologie. Hierfür werden KI-Modelle zur Defekterkennung und Klassifizierung trainiert.
- Durch die Koregistrierung (örtliches Zusammenführen verschiedener Aufnahmen) der Aufnahmemodalitäten wird an der Erstellung eines skalenübergreifenden Defektmodells für die Optikfertigung gearbeitet.
- Eine innovative Prozesskette mit Vor- und Feinstschleifen, Ultrafeinstschleifen, Ionenstrahlätzen und Plasmapolieren wird im Rahmen des Projektes mit der Zielstellung einer defektfreien Endfläche entwickelt und untersucht. Dabei werden Korrelationsgrößen für SSD beim Schleifen beleuchtet.

Zeitplan zum Erreichen des Forschungsziels

Für die Bearbeitung der Projektinhalte ist eine Laufzeit von 30 Monaten vorgesehen. Aufbauend auf der Prozessentwicklung für Mess- und Bearbeitungstechnologien im ersten Projektjahr folgt die umfangreiche Charakterisierung der Proben mit dem Ziel einer defektfreien Fertigung. Für das Monitoring des Projektfortschritts und -erfolgs sind zwei übergeordnete Meilensteine definiert.

M1 Validierung von OCT erfolgt (nach 15 Monaten)

Eine optimierte Risscharakterisierung mittels hochsensitiver, hochauflösender OCT wurde umgesetzt und mit Referenzverfahren validiert. Mindestens 250 verwertbare OCT-Datensätze liegen nach AP4 vor.

M2 Gesamtmodell erarbeitet (nach 26 Monaten)

Mittels multiskaliger Risscharakterisierung und koregistrierter 3D-Daten wurde ein Gesamtmodell zu charakteristischen Defekten bei der Optikfertigung erarbeitet.

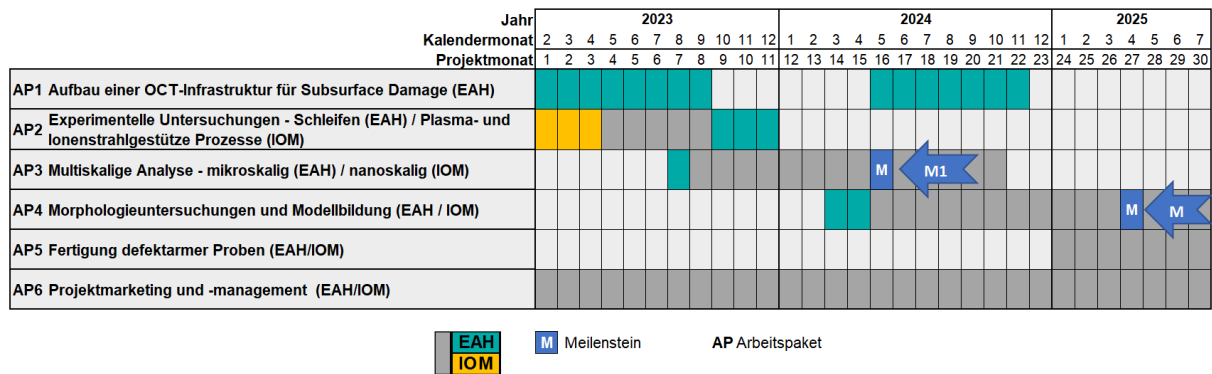


Abbildung 2: Arbeitsplan zu tigeR

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas

Das im Projekt zu generierende Prozesswissen garantiert den deutschen Unternehmen einen Know-how-Gewinn und ermöglicht auch KMU ohne große finanzielle Investitionen eine Optimierung von Prozessen, insbesondere durch verbesserte und multiskalige Modelle zu Defekten in der Optikfertigung, insbesondere zu SSD. Damit ergeben sich wirtschaftliche Vorteile durch die Reduktion von Fertigungskosten, zugleich können auch neue Anwendungsfelder durch gesteigerte Produktqualitäten erschlossen werden. Die im Projekt erarbeiteten Inhalte zur UV- und VIS-OCT ermöglichen eine schnelle Überführung moderner Fertigungsmesstechnik zur zerstörungsfreien Prüfung in die Produktion von optischen Bauelementen. Besonders die deutsche Optikbranche würde durch ein solches Qualitätsmerkmal deutlich profitieren und sich in ihrer Stellung weiter weltweit profilieren. Die im Prozess betrachtete hybride Fertigungskette mit Ionen- und Plasmastrahlgestützten Finishing-Verfahren kann einen schnellen Transfer in die fertigende Optikindustrie finden, wobei wirtschaftliche Erfolgsaussichten zur Umsetzung der Projektergebnisse als hoch eingeschätzt werden. Mittel- bis langfristig ergeben sich durch die Stellung der Optiktechnologie als „enabling technology“ neue fertigungstechnisch bedingte Technologiesprünge. Profitieren können insbesondere die Bereiche Elektronik, Kommunikation und Digitalisierung unter anderem durch die hohe Relevanz von SSD in der EUV-Lithographie und der Lasermaterialbearbeitung.

Projektbegleitender Ausschuss

Unternehmen
ASML Berlin GmbH
Carl Zeiss Jena GmbH
Hellma Materials GmbH
LAYERTEC GmbH
MABRI.VISION GmbH <small>KMU</small>
OptoTech Optikmaschinen GmbH
SCHOTT AG
ShapeFab GmbH & Co. KG <small>KMU</small>
Thorlabs GmbH
Trionplas Technologies GmbH <small>KMU</small>
VM-TIM GmbH <small>KMU</small>

Das IGF-Vorhaben Nr. 22724 BR der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.