

Projektplan

HoloScope: Nadelförmiges linsenloses holografisches Endoskop (21802 BG)

Forschungsziel

Dünne und flexible Endoskope für minimalinvasive medizinische Diagnostik und Therapien erlauben bisher nur eine 2D-Bildgebung, während Endoskope für eine 3D-Bildgebung einen zu großen Querschnitt für minimalinvasive Eingriffe aufweisen. Ziel des Projekts "HoloScope" ist es deshalb, ein Endoskop mit geringem Durchmesser ($< 300 \mu\text{m}$) zu entwickeln und zu validieren, welches eine 3D-Bildgebung mit subzellulärer Auflösung erlaubt und sich somit für minimalinvasive Eingriffe eignet. Hierfür sollen spezielle Faserbündel mit aperiodischer Faserkernstruktur entwickelt werden. Mittels neuer Mess- und Auswertetechnik wird es ermöglicht werden möglich, diese linsenlosen Faserbündel z. B. für Eingriffe im Gehirn zu nutzen.

Arbeitsdiagramm

Arbeitspaket	Zeitraum																													
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
AP 1: Anforderungsanalyse und Auslegung des Faserdesigns	■	■	■	■	■	■	■																							
AP 2: Aufbau eines Messstandes zur Charakterisierung der Faserbündel				■	■	■	■	■	■																					
AP 3: Faserherstellung und Entwicklung eines Fertigungskonzepts				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	◆ MS1													
AP 4: Online Kalibrierung				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	◆ MS2													
AP 5: Phasenkompensation															■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
AP 6: Weiterführende Konzepte zur Steigerung des Anwendungspotentials															■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
AP 7: Demonstrator und Applikation																									■	■	■	■	■	■
AP 8: Dokumentation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

MS 1 = Aperiodische Multikernfaser (Durchmesser $< 500 \mu\text{m}$) mittels iterativem stack&draw Verfahren mit > 100 einmodigen Kernen ($NA > 0,25$) ist hergestellt

MS 2 = Es liegt ein System zur online Kalibrierung mit einer Messrate $> 100\text{Hz}$ vor

Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Flexible Endoskope mit passiven Messköpfen basieren auf der Nutzung von Bildwellenleitern, auch kohärente Faserbündel (CFB) oder Multikernfasern (MCF) genannt. Das zugrundeliegende Prinzip solcher Endoskope liegt in der ungestörten Übertragung der 2D-Intensitätsverteilung in der Ebene der distalen Faserendfläche, wobei durch Integration starrer, makroskopischer Abbildungsoptiken entferntere Ebenen des Inspektionsgebiets auf die distale Faserendfläche abgebildet werden können. Die Anzahl der Faserkerne bestimmt dabei die örtliche Auflösung. Die notwendigen distalen Abbildungsoptiken limitieren den minimalen Endoskopdurchmesser und ermöglichen nur eine 2D Bildgebung.

Durch die Auswertung oder Manipulation der optischen Phase der übertragenen Lichtfelder kann auf die 3D Geometrie des betrachteten Objekts zurückgeschlossen werden, dabei entfällt auch die Notwendigkeit distaler Abbildungsoptiken und es lassen sich grundsätzlich dünnere Endoskope realisieren. Allerdings erfährt die Lichtfeldverteilung bei der Übertragung durch das CFB eine zunächst unbekanntes sowie im allgemeinen zeitveränderliche Laufzeitstörung. Gleichzeitig weisen kommerzielle CFB eine periodische Faserkernanordnung auf, sodass das Lichtfeld nur unter diskreten, periodischen Winkeln unterabgetastet wird. Bei der Rekonstruktion treten Aliasing bzw. höhere Beugungsordnungen auf. Für die Realisierung eines holografischen 3D Endoskops werden daher folgende Ziele verfolgt:

- Entwicklung eines für holografische Methoden geeigneten Faserbündels sowie eines Konzepts zur skalierbaren Faserbündelherstellung mit den vorteilhaften Eigenschaften.
- Entwicklung von leistungsfähigen und skalierbaren Konzepten zur dynamischen Laufzeitkalibration und -kompensation.

Konkret müssen dazu folgende wissenschaftliche und technische Fragen bearbeitet werden:

- Welchen Einfluss haben die Faserbündeleigenschaften auf die zu übertragende Information?
- Wie können Faserbündel mit vorteilhaften Eigenschaften in einem skalierbaren und kosteneffizienten Prozess gefertigt werden?
- Wie lassen sich die Eigenschaften der Faserbündel messen?
- Wie kann die Übertragungsfunktion der Faser robust und in Echtzeit kompensiert werden?
- Welche Vorteile ergeben sich in der praktischen Anwendung?

Es wird zunächst numerisch der Einfluss verschiedener Faserparameter (Modenanahl, Wellenlänge, Depolarisation, Numerischer Apertur, Transmission, Faseranzahl, Faserkernabstand und Periodizität der Faserkernanordnung) auf die Bildgebungseigenschaften bestimmt, um einen entsprechenden Anforderungskatalog zu erstellen. Die Anforderungen sollen dann in einem zweiten Schritt über entsprechende numerische Simulationen mit dem Faserdesign korreliert werden, stets unter

Berücksichtigung der Randbedingungen aus dem Herstellungsprozess. Das Ziel wird sein, eine Matrix aus Anforderungen, Fasereigenschaften und Randbedingungen der Herstellung zu generieren, welche es erlaubt ein Faserdesign zu identifizieren, welches sowohl den Anforderungen gerecht wird als auch im Rahmen eines skalierbaren und ökonomisch sinnvollen Herstellungsprozesses hergestellt werden kann.

Es sollen sowohl von der Gruppe Fiber Research and Technology der Universität Hannover (FReT) gefertigte als auch kommerzielle Faserbündel hinsichtlich ihrer Eigenschaften experimentell charakterisiert werden. Dies dient der Validierung der erarbeiteten Konzepte und zur Überwachung und Optimierung des Fertigungsprozesses der FReT. Dazu soll ein entsprechender Messstand von der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik der TU Dresden (MST) aufgebaut werden, welcher folgende Parameter erfassen wird:

- die Modenanzahl der Faserkerne
- die Polarisation
- die Fasergeometrie
- das Übersprechen
- die Phasenstabilität sowohl unter nicht-variierenden als auch unter variierenden externen Einflüssen wie Biegung und Torsion
- die Wellenlängenabhängigkeit der genannten Eigenschaften

Ziel ist die Bereitstellung von Faserbündeln, welche sowohl über den Stand der Technik hinausgehen als auch in einem skalierbaren Prozess gefertigt werden können. Dazu sollen Verfahren zur Herstellung mit besonderem Augenmerk auf Qualität, Reproduzierbarkeit und Skalierbarkeit entwickelt und untersucht werden. Der angestrebte Fertigungsprozess wird aus folgenden Schritten bestehen:

- Herstellung von Preformen in einer MCVD-Anlage
- Ausziehen von Faserkernstäben und Mantelstäben.
- Herstellung von aperiodischen Bündeln mittels iterativem Stack-and-Draw Prozess

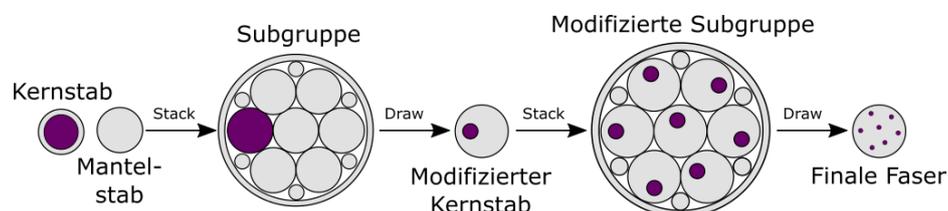


Abbildung 1: Angestrebter iterativer Prozess zur Herstellung von aperiodischen Faserbündeln.

Faserbündel weisen komplexe Phasenstörungen auf. Diese sind statischer (fertigungsbedingter) und dynamischer (auf Grund von Biegung, Temperatur, Wellenlänge) Natur. Dynamische Störungen sind während des Einsatzes in Echtzeit und mit einseitigem Zugang zu kalibrieren. Es soll die off-axis

Holographie für die single-shot Kalibrierung untersucht werden. Ein teilreflektives Element am distalen Faserende muss in die Faser integriert und hinsichtlich der Reflexionseigenschaften optimiert werden. Zur Erhöhung des Signal-zu-Rausch Verhältnisses ist die Beleuchtung bei der Kalibrierung zu optimieren. Eine Echtzeitauswertung des Hologramms mittels FPGA soll implementiert werden.

Weiterhin soll ein endoskopisches Raster-Scanning Mikroskop realisiert werden. Für die Raster-Scanning Endoskopie ist eine schnelle aktive Manipulation der Beleuchtungsphase notwendig. Hierfür sollen neben Flächenlichtmodulatoren auch Galvanometer Spiegel und adaptive Linsen untersucht werden. Das Endoskop soll hinsichtlich Robustheit und Bildgebungseigenschaften untersucht werden. Zum Ende des Vorhabens sollen weiterführende Konzepte zur Optimierung der Faserbündel zwecks Steigerung des Anwendungspotentials untersucht werden.

- Minimierung der differentiellen Laufzeiteffekte der Fasern: Einige der vielversprechendsten Anwendungen der 3D-Informationsübertragung durch Faserbündel benötigen fs-Lasersysteme als Lichtquelle, wie z. B. die (nichtlineare) 2-Photonen Bildgebung, der 3D Druck oder die Gewebearbeitung. Aus diesem Grund soll in diesem Vorhaben erstmals untersucht werden, inwiefern differentielle Laufzeiteffekte durch eine optimierte und präzise Fertigung der Faserbündel minimiert werden können. Dazu sollen in einem ersten Schritt die erlangten Erfahrungen in Bezug auf die typischen Toleranzen aus der MCVD-Preform-Fertigung und den Stab- und Faser-Zügen zusammengefasst und in einem Modell genutzt werden, um die zu erwartenden differentiellen Laufzeiteffekte abschätzen zu können. Mit dem zuvor realisierten Messstand sollen die Laufzeitdifferenzen kommerzieller und selbst gefertigter Fasern untersucht werden.
- Verdrillte Faserbündel: Es konnte bereits gezeigt werden, dass verdrillte Faserbündel eine reduzierte Sensitivität hinsichtlich der Phasenstörung bei Faserbiegung aufweisen. Potentiell weisen derartige Fasern eine statische biegeunabhängige Übertragungsfunktion auf. Dadurch ließe sich der Aufwand für die Messung und Kompensation der Störung deutlich reduzieren. Weiterhin soll die Nutzung 3D gedruckter Optiken zur Kompensation der statischen Phasenstörung untersucht werden.

Zum Abschluss des Vorhabens soll das holografische Endoskop in Bezug auf relevante Anwendungen eruiert und validiert werden. Dafür stehen verschiedene Anwendungen mit Partnern aus dem PA und laufenden Forschungsoperationen bereit. Die Auswahl der Anwendungen wird in Abstimmung mit den Partnern unter Berücksichtigung der erzielten Ergebnisse bezüglich Bildrate, Ortsauflösung, Bildfeldgröße und Kontrast geschehen.

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas

Mit dem nadelförmigen linsenlosen holografischen Endoskop wird ein innovatives, optisches System untersucht und realisiert, welches aufgrund seiner geringen Größe und der verwendeten adaptiven Optik vielseitig eingesetzt werden kann. Es ermöglicht die gezielte Manipulation von Lichtfeldern in Amplitude und Phase, sowie die Detektion komplexer Lichtfelder in schwer zugänglichen Bereichen bei sich ändernden Umgebungsbedingungen. Damit ist es als Werkzeug für optische Systeme flexibel einsetzbar für Beleuchtung und Abbildung.

Als Anwendungsmärkte seien die Biomedizintechnik (endoskopische 3D Bildgebung und lasergestützte Chirurgie, insb. Neurochirurgie), Fertigungstechnik (dimensionelle Messtechnik, Lasermaterialbearbeitung, additive Fertigung bzw. 3D-Drucktechnik) sowie die Forschung und Zukunftsmärkte im Bereich der Biophotonik (Optogenetik in der Hirnforschung, optische Elastographie von Zellen (Durchflusszytometrie) und das In-vivo-Drucken von biologischem Gewebe) genannt, welche insbesondere von KMUs bedient werden. Darüber hinaus setzt das Funktionsprinzip die Verwendung hochwertiger Optiken (Mikroskopobjektive, optische Filter, Präzisionslinsen, Spezialgläser), wellenlängen-stabilsierter Laser, rauscharmer Kameras, neuartiger optischer Komponenten (adaptive Linsen, Galvoscaner, Flächenlichtmodulatoren), Präzisionsmechaniken sowie Fachwissen im Bereich der Feinwerktechnik voraus, welche vornehmlich von KMUs bedient werden.

Projektbegleitender Ausschuss

Unternehmen
Berliner Glas GmbH
Carl Zeiss Meditec AG
CeramOptec GmbH <small>KMU</small>
FiberBridge Photonics GmbH <small>KMU</small>
FiberWare GmbH <small>KMU</small>
Forth Dimension Displays Ltd.
Holoeye Photonics AG <small>KMU</small>
JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH
Laser Components GmbH <small>KMU</small>
Leoni Fiber Optics GmbH
LLS ROWIAK LaserLabSolutions GmbH <small>KMU</small>
Multiphoton Optics GmbH <small>KMU</small>
Sikora GmbH <small>KMU</small>

Sonstige
Deutsches Hörzentrum Hannover
Universitätsklinikum Carl Gustav Carus Dresden

Das IGF-Vorhaben Nr. 21802 BG 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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.