

Forschungsergebnisse

Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Hybrides endoskopisches Abbildungszoom
mit integriertem tomographischem Sensor



Hybrides endoskopisches Abbildungszoom mit integriertem tomographischem Sensor

Im Bereich der Lebenswissenschaften, aber auch im Bereich der industriellen Messtechnik, besteht ein zunehmender Bedarf, Mess- und Diagnosesysteme zu miniaturisieren. Neben der Miniaturisierung wird zunehmend angestrebt, mehrere Messmodalitäten in endoskopischen Systemen zu vereinen. In diesem Projekt wurde ein endoskopisches Zoomsystem realisiert, das gleichzeitig tomographische Tiefenschnitte ermöglicht.

Eine der Hauptanforderungen an endoskopische Abbildungssysteme stellt die Miniaturisierung dar. Daher werden für endoskopische Systeme fast ausschließlich festbrennweitige Abbildungssysteme eingesetzt. Optische Zoomsysteme, die auf mechanischer Verschiebung von Linsen basieren, haben sich jedoch aufgrund der Limitationen bezüglich des Durchmessers bislang nicht durchgesetzt. Gleichzeitig ist die Fusion verschiedener Informationskanäle, wie etwa Oberflächenbild, Tiefenschnitt und Fluoreszenzbild, wünschenswert, um die Leistungsfähigkeit einer endoskopischen Sonde zu erhöhen.

Ziel des durch die Baden-Württemberg Stiftung finanzierten Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines hybriden, miniaturisierten Abbildungssystems mit integriertem uniaxialen OCT-Messkanal (Optische Kohärenztomografie) für endoskopische Anwendungen. Das System sollte einerseits über ein mikrooptisches Zoom- und Scansystem ein variables, farbiges Bild der untersuchten Oberfläche darstellen können, andererseits parallel innerhalb desselben Bildfelds einen OCT-Tiefenschnitt erzeugen. Dadurch stehen für die Messung/Diagnose sowohl ein Oberflächenbild, als auch ein optischer Tiefenschnitt simultan zu Verfügung. Der Informationsgehalt einer Messung ist somit deutlich gesteigert

und die Synthese der Bilder bietet weitere Möglichkeiten, um die Sensitivität und Visualisierungsmöglichkeiten der Anordnung zu erhöhen.

Konzept

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Komponenten, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden. Auf der linken Seite der Abbildung finden sich die sogenannten proximalen Komponenten, also alle Systembestandteile, die sich außerhalb und getrennt von der Endoskopsonde befinden. Diese unterteilen sich in die Abschnitte Fluoreszenzmikroskopie, Weißlichtmikroskopie und optische Kohärenztomographie: Der aufgebaute Laserscanner, der hauptsächlich zur Fluoreszenzmikroskopie verwendet wurde, kann gleichzeitig auch zur flächigen OCT-Messung genutzt werden. Er besteht aus einem 2D-Kippspiegel

und entsprechenden Optiken, um über die Bildleitfaser scannen zu können. Im Fluoreszenzaufbau ist ein Anregungslaser untergebracht, der über einen wellenlängenselektiven Spiegel auf die Bildleitfaser fokussiert wird. Der Spiegel ist für das frequenzverschobene Fluoreszenzsignal durchlässig und lässt dieses im rückläufigen Strahlengang auf eine Avalanche-Diode durch.

Der Aufbau zur Weißlichtmikroskopie besteht aus einer Abbildungsoptik, die das Ende der Abbildungsfaser auf einen Bildsensor abbildet.

Für die OCT-Messung wurde ein Spectral-Domain-OCT-System aufgebaut. Der Pfadabgleich erfolgt über einen verschiebbaren Piezo-Spiegel, das Interferenzsignal wird dann mittels eines Spektrometers ausgelesen.

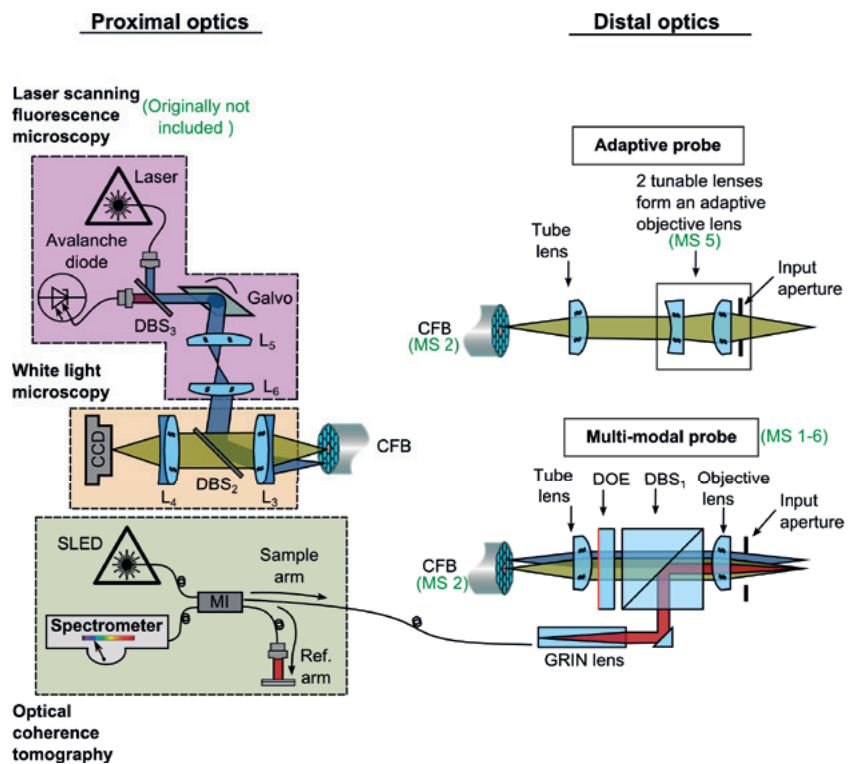


Abb. 1: Links: Proximale Optikkomponenten, die außerhalb des Messraums liegen. Implementiert wurden laserscannende Fluoreszenzmikroskopie, Weißlichtabbildung und OCT-Signalgebung. Die OCT-Funktionalität wurde über die Darstellung hinausgehend auch über die Abbildungsfaser scannend getestet. Rechts: Varianten der distalen Sonde

Auf der rechten Seite von Abbildung 1 befinden sich die Komponenten der sogenannten distalen Optik, also die Elemente, die Teil der eigentlichen Endoskopsonde sind. Die Entwicklung der distalen Sonde wurde in zwei Schritte zerlegt und umfasste zunächst eine festbrennweitige Variante, anhand derer entscheidende Arbeitsschritte für die komplexe adaptive Sonde getestet und optimiert werden konnten. Im Fall der festbrennweitigen Sonde wurde auch die zusätzliche Multimodalität implementiert und getestet.

Im Folgenden wird die Beschreibung der adaptiven Sonde in den Vordergrund gestellt. Details zur multimodalen Variante finden sich u.a. in [1].

Optikdesign der adaptiven Sonde

Als Hilfestellung bei der Findung der optimalen Linsenordnung wurde zunächst ein paraxiales Modell der Bank entwickelt. Die durchstimmbaren Linsen der adaptiven Sonde basieren auf der Druckauslenkung von Membranen und wurden rigoros mittels Finite-Elemente-Methode simuliert. Anschließend konnten die modellierten

Membranprofile als variable Oberflächen in der Raytracing-Software ZEMAX implementiert werden. Dazu wurden DLL-Dateien geschrieben, die später in ZEMAX direkt aus der Eingangsvariablen Druck das zugehörige asphärische Linsenprofil errechnen. Dadurch lässt sich das Zoom-System dynamisch optimieren.

Aufgrund von Limitationen in der Brennweite der einzelnen durchstimmbaren Linsen ergibt sich ein gewisser Zustandsraum, in dem das optische System funktioniert. Abbildung 2 zeigt diesen Bereich sowie die für den jeweiligen Zustand theoretisch erreichbare Auflösung. Außerdem sind exemplarisch die drei verschiedenen Linsenstellungen dargestellt.

Realisierung

Die experimentelle Realisierung erfolgte mit Methoden der Mikrosystemtechnik am Gisela-und-Erwin-Sick-Lehrstuhl für Mikrooptik, IM-TEK, Universität Freiburg, wo später auch die experimentelle Charakterisierung erfolgte.

Abbildung 3 zeigt die Umsetzung des adaptiven Designs mit Hilfe der am Lehrstuhl entwickelten Silicon-Optical-Bench-Technologie. Auf der Mikrobank werden gemäß der optischen Auslegung neben einer festbrennweitigen Linse zwei adaptive Linsen angebracht, welche sowohl positive als auch negative Brechkräfte bereitstellen können. Die gezeigte Bank erlaubt den Aufbau von Tele- und Retrofokus-Systemen durch die Aktuierung der Membranlinsen über vergrabene Fluidkanäle innerhalb der mikrooptischen Bank. Über Schläuche sind die Kanäle mit externen Fluidreservoirs verbunden, welche mittels Druckreglern mit positiven und negativen Drücken beaufschlagt werden können.

Die einzelnen Komponenten auf der Bank werden durch KOH-geätzte Gräben in ihrer Position definiert und mittels eines Klebprozesses auf der Bank fixiert. Über einen dichroitischen Strahlteilerwürfel kann ein zweiter Strahlengang in den flächig abbildenden Strahlengang eingekoppelt werden.

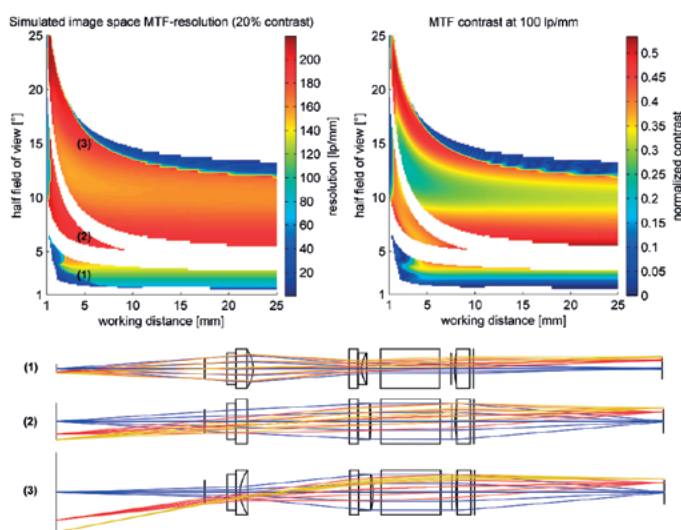


Abb. 2: Zustandsdiagramme für den Bildraum und Beispiel-Zoomstellungen bei einem Arbeitsabstand von 5 mm. Telephoto (1), Neutral (2), Retrofokus (3)

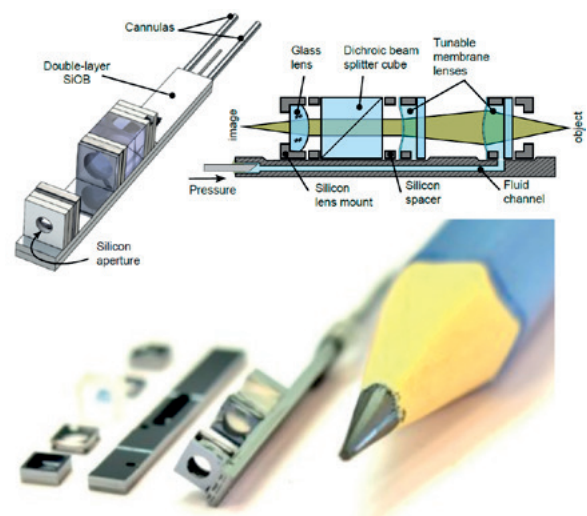


Abb. 3: Schemaskizze und Fotografie der adaptiven MEMS-Sonde. Mit Hilfe von zwei durchstimmbaren Membranlinsen, welche über extern angelegte Drücke in ihrer Brechkraft variiert werden können, werden Arbeitsabstand und Vergrößerung der abbildenden Optik unabhängig voneinander angepasst

Ergebnisse

Die erfolgreich aufgebaute Sonde konnte durch die Abbildungsfaser hindurch charakterisiert werden. Dabei wurde zunächst der unterste Ast des Zustandsdiagramms untersucht (Telephoto-Stellung, Linse 1 konvex, Linse 2 konkav).

Da das unterste Band relativ schmal ist, wurde noch kein besonders großer Zoombereich gemessen. Der bestimmte Zoomfaktor für einen festen Objekt-Abstand liegt im Bereich von 1,2x. Prinzipiell ist das unterste Band für die Endomikroskopie geeignet, da das Objekt auf die Abbildungsfaser vergrößert wird. Das bedeutet zum Beispiel, dass die Auflösungs-limitierung der Abbildungsfaser von etwa 6 µm, aufgrund der Vergrößerung von 2x im Objektraum theoretisch Features von 3 µm auflösbar macht.

In Abbildung 4 wird ein Vergleich zwischen Simulation und Experiment gezeigt. Um eine direkte Vergleichbarkeit herzustellen, wurde das simulierte Diagramm so angepasst, dass über die Farbskala die MTF-Auflösung im Objektraum ablesbar wird. Dazu wurde die simulierte MTF-Auflösung im Bildraum (Abb. 2) mit der Bildvergrößerung verrechnet, wobei die Limitierung durch die Abbildungsfaser mit beachtet wurde. Die gemessenen Stützstellen sind als weiße Punkte eingezeichnet. Den vier äußersten Stützstellen wurden simulierte und gemessene Bilder zugeordnet.

Die Bilder im Nahbereich zeigen einen vergrößerten Bildausschnitt, obwohl sie ein größeres Gesichtsfeld aufweisen als die Bilder in 10 mm Abstand. Dies liegt daran, dass die perspektivische Vergrößerung durch die Annäherung das größere FoV überkompensiert.

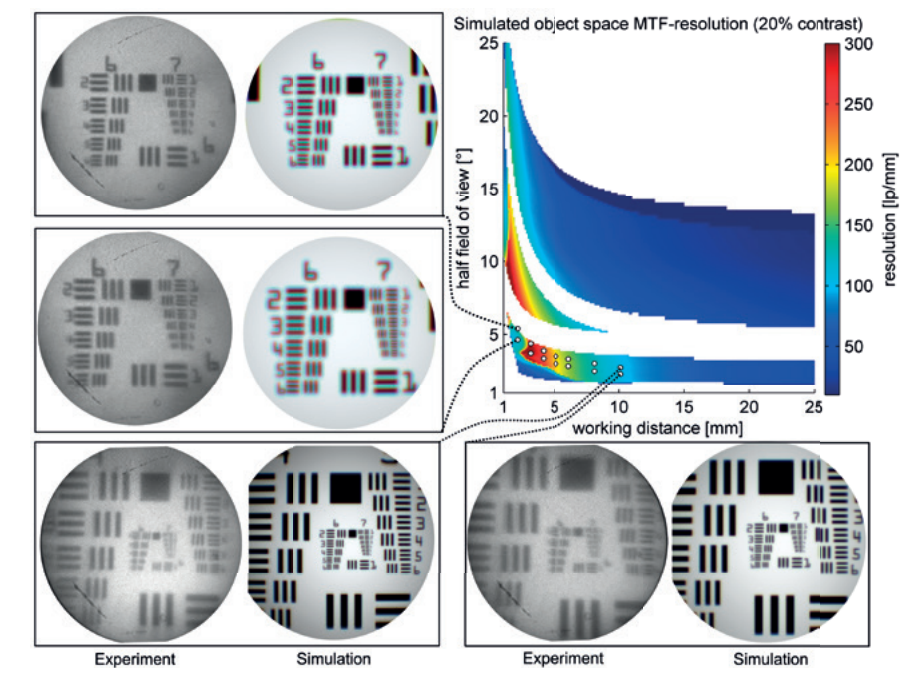


Abb. 4: Vergleich zwischen Simulation und Messung. Das simulierte Diagramm zeigt die Auflösung, die bei einem MTF-Kontrast von 20 % im Objektraum zu erwarten ist. Die weißen Punkte entsprechen gemessenen Systemzuständen. Die kleinen Bilder des USAF-Targets ermöglichen einen direkten Vergleich von simulierter und gemessener Abbildungsleistung

Die experimentell aufgenommenen Bilder weisen, vermutlich aufgrund von Streulicht, einen verringerten Gesamtkontrast auf und wirken blasser. Trotzdem lassen sich die Teststrukturen, bei denen gerade noch 20 % des Gesamtkontrasts messbar sind, mittels Bildverarbeitung ermitteln. Bei den Bildern im Nahbereich weist die Gruppe 7.1 des USAF1951-Targets einen Kontrast von 20 %. Dies würde einer Auflösung von 128 lp/mm und damit rund 7,8 µm entsprechen. Im Fernbereich besitzt Gruppe 5.5 einen Kontrast von 20 %, was 50,8 lp/mm oder 19,7 µm entspricht. Mittels nachträglicher Kontrastoptimierung lässt sich die Auflösung noch verbessern.

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse aus diesem Projekt als sehr vielversprechend bewerten. Weitergehende Untersuchungen finden im Rahmen von Folgeprojekten statt.

[1] Bimodal endoscopic probe combining white-light microscopy and optical coherence tomography – M. Blattmann, S. Kretschmer, S. Thiele, C. Ataman, H. Zappe, A. Herkommer, A. Seifert, Appl. Opt. 55 (15), 4261-9 (2016)

Kontakt:

Prof. Dr. Hans Zappe
Gisela-und-Erwin-Sick-
Professur für Mikrooptik
Institut für Mikrosystemtechnik
(IMTEK)
Universität Freiburg
Georges-Köhler-Allee 103
79110 Freiburg im Breisgau

Prof. Dr. Alois Herkommer
Institut für Technische Optik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart