

Forschungsergebnisse

# Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

# Hochgenaue und absolut-kalibrierte Distanzmessung durch Kombination von Laser-Phasenlaufzeitverfahren mit digitaler Holographie

Durch die Kombination optischer Phasenlaufzeittechnik mit digitaler Holographie entwickelten das Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik und das Institut für Photonik und Quantenelektronik des Karlsruher Instituts für Technologie im Rahmen des Forschungsprogramms Optische Technologien der Baden-Württemberg Stiftung gemeinsam ein neuartiges optisches System zur Entfernungsmessung. Eine absolute Kalibration der Messergebnisse wird mittels elektrooptisch erzeugter Seitenbänder gewährleistet.

Zur Digitalisierung von 3D-Objekten werden heute je nach Anwendung sehr unterschiedliche optische Verfahren genutzt. Vor allem die Anforderungen bezüglich Objektgröße (Messbereich) und gewünschter Messunsicherheit bzw. Auflösung widersprechen sich häufig, so dass stets ein Kompromiss zu finden ist. Oft lassen sich bestimmte Ober- oder Untergrenzen z.B. durch Mittelung hin zu höherer Auflösung noch verschieben, was aber unmittelbar zu längeren Messzeiten führt. Insbesondere die Vermessung größerer Objekte im m-Bereich mit Messunsicherheiten im niedrigen  $\mu\text{m}$ -Bereich ist daher nur sehr begrenzt und mit hohem Aufwand möglich.

## Kombination Phasenlaufzeitverfahren mit digitaler Mehrwellenlängen-Holographie

Die Phasenlaufzeitmesstechnik ist ein etabliertes Verfahren zur makroskopischen Distanzmessung. Dazu wird eine Laserlichtquelle periodisch moduliert. Das abgestrahlte Laserlicht trifft auf die zu vermessende Oberfläche und wird dort gestreut. Ein Teil des Streulichts gelangt auf einen Detektor. Die Phasenlage zwischen der Modulation des abgestrahlten und detektierten Lichts ist ein Maß

für die Distanz zwischen Sensor und Objektoberfläche. Für dieses Projekt wurde eine Modulationsfrequenz von 128 MHz genutzt. Damit lassen sich eindeutige Distanzmessungen bis zu 1,17 m realisieren. Die Messgenauigkeit, die mit diesem Modul erreicht werden kann und die durch optische und elektronische Randbedingungen nicht wesentlich unterschritten werden kann, liegt in der Größenordnung von  $< 5 \text{ mm}$ .

Die digitale Mehrwellenlängenholographie ist hingegen ein Verfahren zur hochgenauen Messung in mikroskopischen Dimensionen. Die realisierbaren Messbereiche sind aber auf einige Millimeter limitiert. Für dieses interferometrische Verfahren wird kohärentes Licht in eine Objekt- und eine Referenzwelle aufgeteilt. Die Objektwelle beleuchtet das zu vermessende Objekt. Auch hier wird das rückgestreute Licht auf einen Detektor gelenkt und dort mit der Referenzwelle überlagert. Als Lichtquellen für die digitale Holographie werden vier hochstabile Whispering-Gallery-mode-Laser (OEwaves) mit unterschiedlichen Wellenlängen im Bereich von 1548 nm bis 1554 nm eingesetzt. Für den Objektstrahl wird deren Licht coaxial überlagert, während für den Referenz-

strahlengang für jede der Wellenlängen gegenüber dem Objektstrahlengang leicht unterschiedlich verkippte Referenzwellen genutzt werden (siehe Abb. 1) Dadurch können die Interferenzsignale der einzelnen Wellenlängen mit Methoden des räumlichen Phasenschiebens getrennt werden. Jedes der Interferenzsignale liefert einen Wert für die komplexe Amplitude der Welle, die vom Objekt zurückgestreut wurde.

Die Phasenlage der komplexen Amplitude kann an spiegelnden Objekten direkt als Maß für die Distanz zwischen Messobjekt und Sensor interpretiert werden – allerdings zunächst nur mit einem eindeutigen Messbereich, der so groß ist wie die halbe Wellenlänge des verwendeten Laserlichts (also ca. 775 nm). An rauen Objekten, die vor allem für technische Anwendungen eine große Rolle spielen, wird die Phasenlage von zufälligen Interferenzen, den Laser-Speckles, überlagert, die eine direkte Nutzung der Phase zur Distanzmessung unmöglich machen.

Die Lösung für beide Einschränkungen ist die Differenzbildung zwischen den gemessenen Phasenwerten bei den unterschiedlichen Wellenlängen. So verschwindet zum einen der negative Einfluss der zufälligen Laserspeckles.

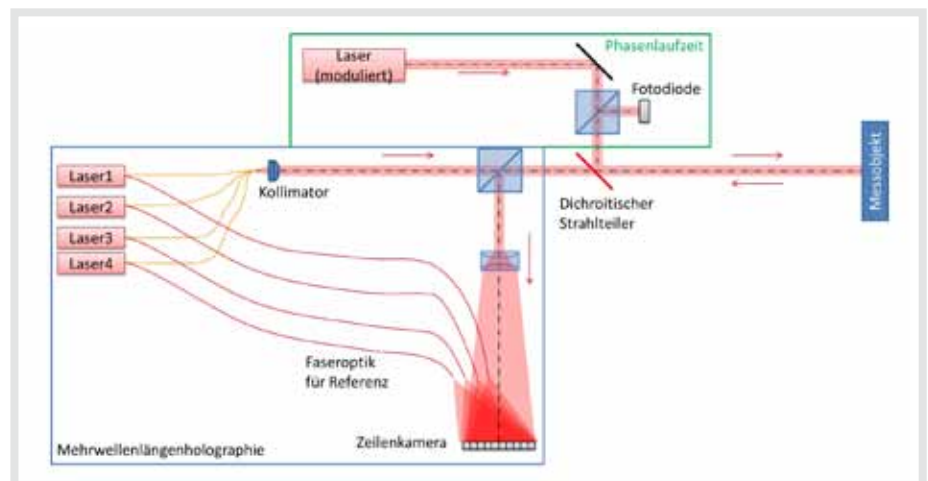


Abbildung 1: Prinzipskizze des optischen Aufbaus zur Kombination von Phasenlaufzeitmesstechnik und Holographie

Zum anderen wird der eindeutige Messbereich bei geeigneter Wahl der Wellenlängen nach dem Prinzip der synthetischen Wellenlängen bis in den mm-Bereich erweitert.

Dadurch wird ein Überlapp der Messbereiche der beiden Verfahren erreicht, so dass die Messergebnisse der beiden Verfahren zu einem neuen Messsignal kombiniert werden können, das den großen Messbereich der Phasenlaufzeitmessung mit den hohen Messgenauigkeiten der digitalen Holographie vereinigt.

### Absolute Referenzierung

Am Institut für Photonik und Quantenelektronik (IPQ) am KIT wurde ein Modul zur genauen und rückführbaren Bestimmung der zur Distanzmessung eingesetzten sog. synthetischen Wellenlängen entwickelt. Dies ist Voraussetzung für hochgenaue Distanzmessungen und erlaubt die Rückführung der Ergebnisse auf einen international gültigen Frequenzstandard.

Dabei werden die Frequenzabstände der genutzten vier Laserlinien gemessen. Diese liegen im Bereich einiger hundert Gigahertz und damit jenseits der Möglichkeiten von kommerziell erhältlicher Hochfrequenzelektronik. Zur Messung werden deshalb mittels elektro-optischer Phasenmodulation Seitenlinien im optischen Spektrum erzeugt (Abb. 2).

Diese Seitenlinien überbrücken die großen Frequenzabstände zwischen den Lasern; die Modulationsfrequenzen von 36 GHz und 40 GHz werden von einem hochpräzisen Frequenzstandard abgeleitet. Die Modulationsfrequenzen sind so gewählt, dass in Kombination mit den Frequenzabständen der Laser benachbarte Seitenlinien mit typischerweise einigen Hundert MHz Frequenzabstand entstehen. Die entstehenden Schwebungsfrequenzen können mit sub-GHz Elektronik detektiert und ausge-

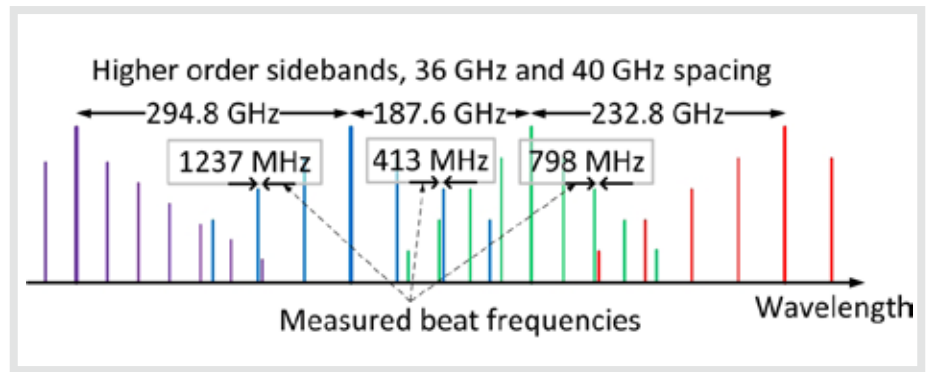


Abbildung 2: Optische Spektrallinien der Laserquellen sowie erzeugte Seitenbänder. Die zur Messung genutzten Frequenzabstände von 187,6 GHz, 232,8 GHz und 294,8 GHz führen zu Schwebungen von 413 MHz, 798 MHz und 1237 MHz. Dabei werden Seitenbänder bis zur 6. Ordnung genutzt. Andere mögliche Schwebungen als die markierten werden nicht gemessen; die auftretenden Frequenzen sind deutlich höher als die Bandbreite des Detektors (3 dB Bandbreite von 800 MHz)

wertet werden; aus den gemessenen Frequenzen, den bekannten Modulationsfrequenzen und Kenntnis über die Anzahl der zwischen den Lasern liegenden Seitenlinien (grobe Kenntnis der Laserwellenlänge) ergeben sich dann die Frequenzabstände der Laser und daraus die synthetischen Wellenlängen. Der hierfür nötige experimentelle Aufbau ist in Abb. 3 näher

### Ergebnisse

Zur Verifikation des aufgebauten Laborsystems wurde ein metallisches Objekt auf einer Linearachse befestigt, so dass es definiert vom Sensor weg und auf den Sensor zu bewegt werden kann. Dafür wurde das Testobjekt in 5-mm-Schritten auf den Sensor zu bewegt. Insgesamt wurde das Ob-

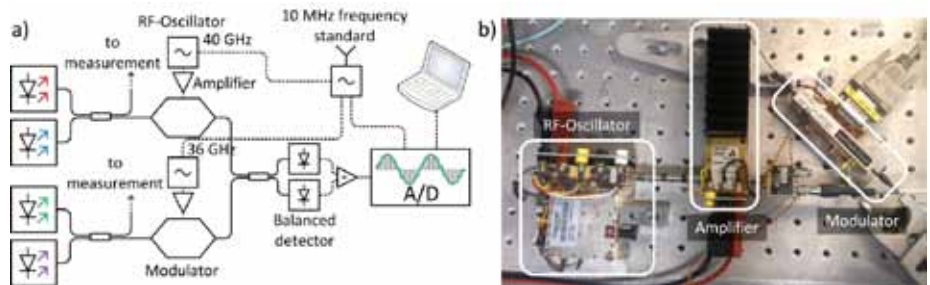


Abbildung 3: a) Schema des Referenzierungsmoduls: Vier Dauerstrich-Laser mit modulierten Ausgangssignalen. Dadurch entstehen Seitenlinien mit spektralen Abständen entsprechend der Modulationsfrequenzen (36 und 40 GHz, abgeleitet von einem Frequenzstandard). Die durch Überlagerung der optischen Signale auf einem Detektor entstehenden Schwebungssignale werden nach Analog-Digital-Wandlung (A/D) per PC ausgewertet. b) Fasergekoppelter Aufbau zur Erzeugung von Seitenlinien höherer Ordnung. Das elektrische Treibersignal wird auf bis zu 29 dBm verstärkt

beschrieben. Da die Referenzierungsmessung zeitgleich mit der Distanzmessung erfolgt, können so auch die Auswirkungen von Schwankungen der Laserwellenlängen (z.B. durch Umgebungseinflüsse wie Temperatur oder mechanische Vibrationen) ausgeglichen werden.

jekt 100 mm weit bewegt. Die Stufen der Bewegung sind deutlich erkennbar und werden in der Messung sehr exakt wiedergegeben (Abb. 4). Die Standardabweichung zwischen Soll- und Istwerten über den gesamten Messbereich liegt bei 9,9 µm. D.h. das beschriebene System ist in der Lage,

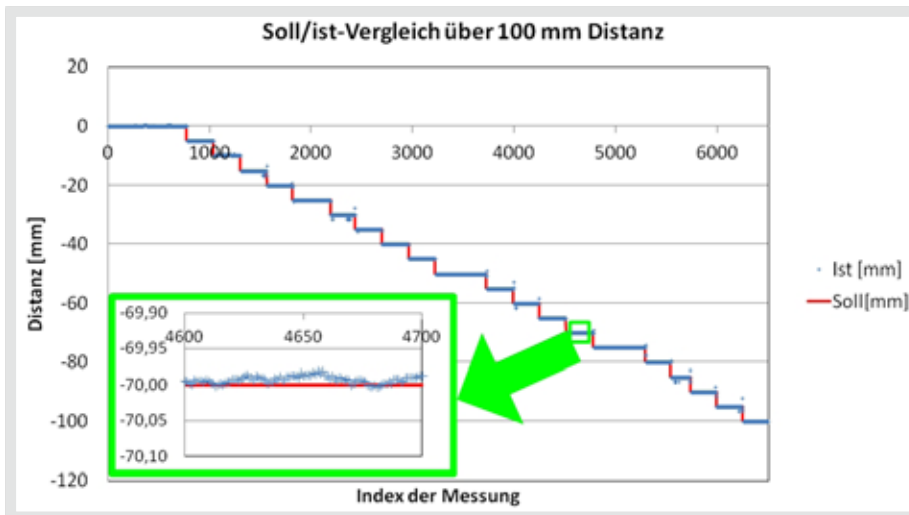


Abbildung 4: Messung zur Verifikation des Sensors: Messobjekt wurde in 5-mm-Schritten auf Sensor zubewegt; Inset Detail der Messreihe

100 mm große Distanzen absolut auf weniger als 10  $\mu\text{m}$  genau zu vermessen.

Um das Potenzial der Messmethode aufzuzeigen wurde das Messobjekt in einer weiteren Beispielmessung in Schritten von nur 100  $\mu\text{m}$  bewegt (Abb.5). Auf den klar erkennbaren Plateaus werden Standardabweichungen der Messwerte von ihrem lokalen Mittelwert zwischen 0,5  $\mu\text{m}$  und 1,8  $\mu\text{m}$  erreicht.

zeitmesstechnik, digitaler Mehrwellenlängenholographie und Absolutkalibration mit Hilfe elektronischer Hochfrequenztechnik demonstriert, dass Distanzmessungen im Bereich mehrerer cm mit Auflösungen im einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich physikalisch und technisch machbar sind. Weiterentwicklungen in Richtung noch größerer Messbereiche erscheinen realistisch. Mit den entwickelten Methoden könnten beispielsweise neue optische Koordinatenmessmaschinen realisiert

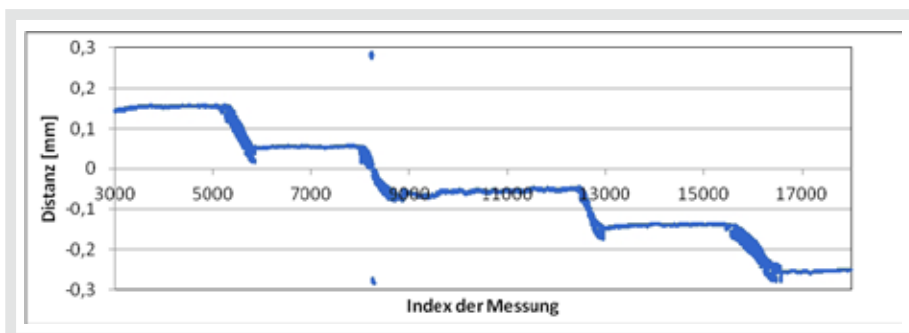


Abbildung 5: Messung mit 100 $\mu\text{m}$ -Schritten

### Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurde ein Weg zur Realisierung eines neuartigen hochgenauen Distanzmesssystems aufgezeigt. Im umgesetzten Laboraufbau wurde durch Kombination von Phasenlauf-

werden, die bisher ungelöste messtechnische Probleme in den Bereichen Automobil-, Flugzeug- oder Windkraftanlagenbau lösen wie z.B. die präzise Vermessung hochgenauer Freiformflächen.

### Kontakt

Fraunhofer-Institut für  
Physikalische Messtechnik IPM

Heidenhofstr. 8,  
79110 Freiburg

Dr.-Ing. Markus Fratz

Tel. 0761 8857-178

markus.fratz@ipm.fraunhofer.de  
www.ipm.fraunhofer.de

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Photonik und  
Quantenelektronik

Engesserstr. 5  
76131 Karlsruhe

Prof. Dr. Christian Koos

Tel. 0721 608-42491

christian.koos@kit.edu  
www.ipq.kit.edu