

Flächige Zahnflankenprüfung mittels digitaler Holographie optisch, schnell, präzise

Dr.-Ing. Annelie Schiller, Dr.-Ing. Markus Fratz, Dr.-Ing. Tobias Seyler, Dr. Alexander Bertz, Dr. Daniel Carl,
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg

Kurzfassung

Die Suche nach neuen Verzahnungsmessverfahren führt unweigerlich zu optischen Methoden: Diese Verfahren liefern hochpräzise Daten in kürzester Zeit und das nicht nur punktwise sondern flächig. Bisher scheitern optische Messungen in der Verzahnungsmessung jedoch an steilen Flanken und Mehrfachreflexionen. Wir zeigen am Beispiel eines prototypischen Systems wie diese Aspekte überwunden werden können, um Präzision und Geschwindigkeit in der Verzahnungsmessung zu kombinieren. Dabei wird die digitale Mehrwellenlängen holographie eingesetzt. Basierend auf dieser Technologie erfasst unser Inspektionssystem eine vollständige Zahnflanke in einer einzigen Aufnahme mit Millionen von 3D-Punkten und einer Genauigkeit von unter einem Mikrometer.

1. Einleitung

Die digitale Mehrwellenlängen holographie ist eine berührungslose, hochpräzise und schnelle Messtechnik. Sie ist in der Lage, die komplette Topografie einer rauen Oberfläche mit interferometrischer Präzision zu erfassen [1]. Das Fraunhofer IPM konnte diese Technik in den letzten Jahren als vielseitiges Werkzeug für industrielle Anwendungen etablieren [2 bis 4]. Die erfolgreiche Integration des digital-holographischen HoloTop-Sensors in eine Fertigungslinie für Präzisionsdrehteile zeigt die Eignung für die 100 %-Qualitätskontrolle bei einem Produktionstakt von einem Prüfling pro Sekunde. Jüngste Arbeiten zeigen sogar die Fähigkeit, holographische Sensorsysteme in Werkzeugmaschinen zu integrieren [3, 5, 6]. Der Prototyp HoloGear überträgt diese Erfahrungen nun auf die Verzahnungsmesstechnik und zeigt damit das enorme Potential für die Qualitätssicherung durch flächige – nicht scannende – Messungen.

2. Mehrwellenlängenholographie

Die digitale Mehrwellenlängenholographie ist ein laserbasiertes, interferometrisches Verfahren zur präzisen Höhenmessung von optisch rauen Oberflächen. Im Vergleich zur Fotografie wird bei der Holographie nicht nur die Intensität des zurückgestreuten Lichts aufgenommen, sondern auch die Phase. Das heißt, es wird die volle Information der Lichtwelle erfasst.

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines am Fraunhofer IPM entwickelten HoloTop-Sensors: Kohärentes Laserlicht beleuchtet die Probe koaxial. Auf einer Kamera interferiert das gestreute Objekt- mit dem ungestörten Referenzlicht. Aus den resultierenden Interferogrammen wird die komplette Wellenform des einfallenden Lichts rekonstruiert. Dadurch ist es sogar möglich, Objekte zu vermessen, die außerhalb der Schärfentiefe der abbildenden Optik liegen. Die Nachfokussierung kann numerisch nach der eigentlichen Messung erfolgen. Damit können in einer einzigen Messung gültige Daten eines Zahnrades vom Fuß- bis zum Kopfkreis erfasst werden. Um valide Messungen durchführen zu können, ist nur wenig rückgestreutes Licht von der Prüflingsoberfläche notwendig, was die Inspektion sehr steiler Flanken ermöglicht – viele ähnlich präzise messende optische Verfahren scheitern an diesem Punkt.

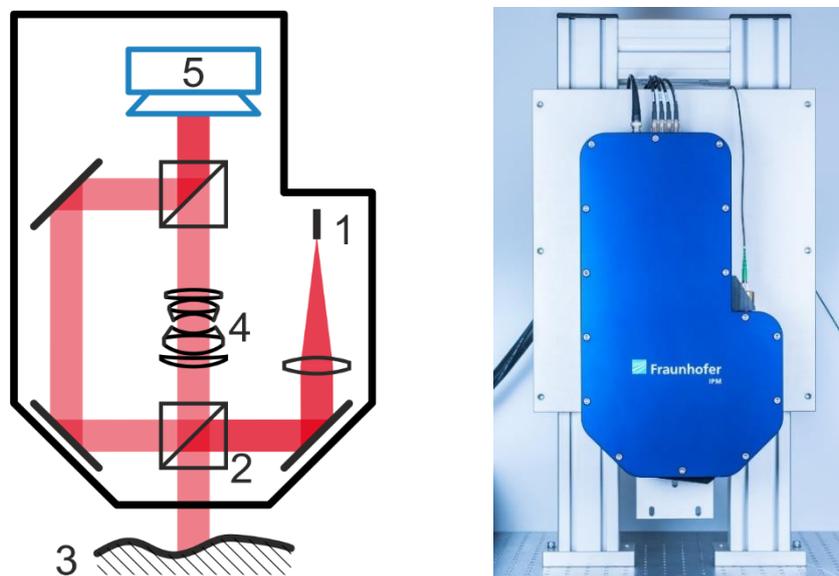


Abbildung 1: Links: Vereinfachte Skizze des digitalen Mehrwellenlängen-Holographiesensors: Das aus der Faser (1) kommende Licht wird durch den Strahlteiler (2) in Objekt- und Referenzstrahl aufgeteilt. Der Objektstrahl beleuchtet das Objekt (3) koaxial. Das gestreute Licht wird durch ein Objektiv (4) auf die Kamera (5) abgebildet und dort mit dem Referenzstrahl überlagert. Rechts: Foto eines holographischen HoloTop_9M18-Sensors mit den Abmessungen 440 mm x 250 mm x 105 mm und einem Gewicht von 11.5 kg.

Durch Wahl der verwendeten Laserwellenlängen lassen sich Genauigkeit und Eindeutigkeit passend für die gewünschte Anwendung spezifisch einstellen. Als kamerabasiertes Verfahren wird das Messfeld des Sensors an Kamera und Objektiv individuell je nach Anforderung angepasst. Realisiert wurden bisher am Fraunhofer IPM Messfeldgrößen von mikroskopischen Abbildungen von rund $3.5 \times 0.4 \text{ mm}^2$ mit $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ lateraler Abtastung bis hin zu Makroabbildungen mit $200 \times 150 \text{ mm}^2$ mit $25 \text{ }\mu\text{m}$ lateraler Abtastung [2, 7]. Messgenauigkeiten der Höhenwerte von $<0.2 \text{ }\mu\text{m}$ (3σ) wurden erreicht [3].

Um schnelle Messzyklen zu realisieren, werden u. a. CoaXPress-Kameras eingesetzt. Die eigentlichen Hologrammberechnungen und Nachbearbeitungsschritte werden auf der GPU, einer Consumer-Grafikkarte, durchgeführt. Damit lassen sich Messraten von über 100 Millionen 3D-Punkten pro Sekunde erreichen – ideal für die vollständige Vermessung aller Zahnflanken auch bei großen Zahnrädern.

3. Flankenmessung

Aufbau

Der Prototyp HoloGear ist für die Messung von Zahnrädern mit einem Außendurchmesser von 248 mm, 60 Zähnen, einem Modul von 4 und 15 mm Zahnbreite entwickelt worden. HoloGear verwendet zwei Holotop-Sensorköpfe, um die linke und rechte Flanke gleichzeitig zu messen (siehe Abbildung 2). Jeder Sensorkopf misst die Zahnflanken mit einem Sichtfeld von $15 \times 15 \text{ mm}^2$ und erfasst dabei rund 10 Millionen 3D-Punkte pro Einzelmessung. Durch Drehen des Zahnrades können alle Flanken nacheinander gemessen werden.



Abbildung 2: Digital-holographisches Messsystem HoloGear: Zwei Messköpfe, die mit derselben Laserquelle verbunden sind, messen gleichzeitig die linke und rechte Flanke eines Zahnradprüflings.

Zur Unterdrückung von Mehrfachreflexionen zwischen zwei korrespondierenden Flanken wird eine 3D-gedruckte Vorrichtung verwendet (siehe Abbildung 3). Diese Vorrichtung greift passiv in das Zahnrad ein und folgt seiner Rotation, während sie selbst keinen Einfluss auf das Zahnrad hat. Sie kann leicht an die individuelle Form des zu prüfenden Zahnrades angepasst werden.

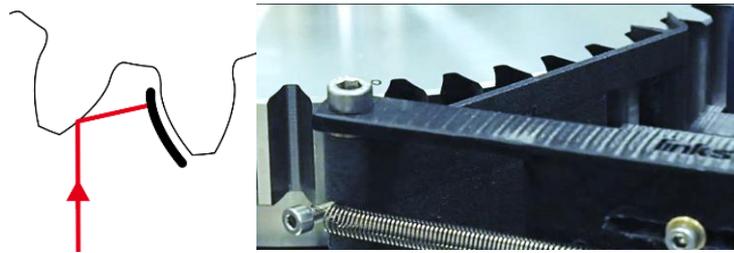


Abbildung 3: Eine 3D-gedruckte Vorrichtung unterdrückt Mehrfachreflexionen zwischen zwei Zähnen.

Die gesamte Messung einer Flanke dauert weniger als 200 ms und liefert insgesamt 3.6 Millionen 3D-Punkte (siehe Tabelle 1). Die Reproduzierbarkeit der Höhendaten in einem einzelnen Messpunkt liegt deutlich unter einem Mikrometer.

Tabelle 1: Beispielmessung des HoloGear-Prototyps, der für die Messung von Zahnradern mit einem Außendurchmesser von 248 mm, 60 Zähnen, einem Modul von 4 und 15 mm Zahnbreite entwickelt wurde.

Messzeit für eine Flanke	<200 ms
Anzahl 3D-Messpunkte	~ 3.6 Mio. pro Flanke
Reproduzierbarkeit der Höhendaten im Einzelpunkt am realen Prüfling (Zahnflanke)	< 1 μm (1σ)

Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt exemplarisch eine Flankenmessung des Testzahnrad. Auf der rechten Seite ist eine 2D-Karte der Abweichung von der Best-Fit-Evolvente für jeden Punkt der Flanke zu sehen. Schnitte durch die Daten geben das Profil und die Flankenlinien beispielhaft für die Mittelposition der Flanke an, die links bzw. unten dargestellt sind. Die 2D-Karte enthält Hunderte von Flanken- und Profillinien – für jede Position auf der Flanke. Das stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber taktilen Messungen dar, die meist nur wenige Punkte entlang einer Flanken- bzw. Profillinie antasten.

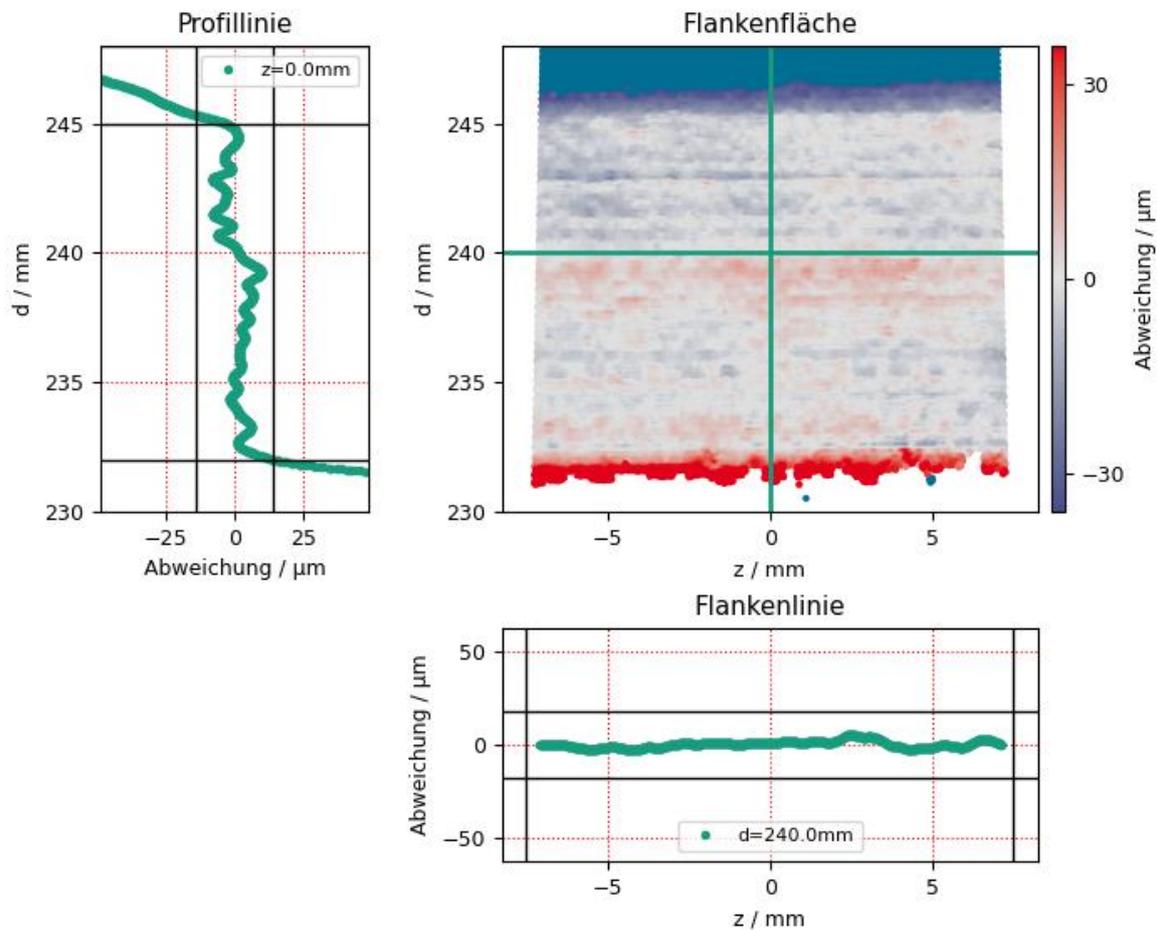


Abbildung 4: Holographische Messung an einer Flanke: Oben rechts: Farbcodierte Abweichung von der Best-Fit Evolvente. Links: Profillinie entlang der vertikalen grünen Linie in der 2D-Karte, Unten: Flankenlinie entlang der horizontalen grünen Linie in der 2D-Karte.

Abbildung 5 zeigt die Messung einer Flanke mit mehreren Fehlern, die eine Abweichung von der Soll-Form von $60\ \mu\text{m}$ überschreiten. Die flächige Messung der Flanke ermöglicht die Erkennung und die quantitative Bewertung von Defekten an jeder Stelle der Flanke, die bei der Messung von nur einer Flanken- und Profillinie nur zufällig detektiert würden. Es können sogar die genaue Form des Fehlers analysiert und mögliche Materialfehler oder Inhomogenitäten quantifiziert werden. Neben der Erkennung typischer Defekte wie Risse oder Einschlagstellen kann auch die Mikrostruktur der Oberfläche analysiert werden.

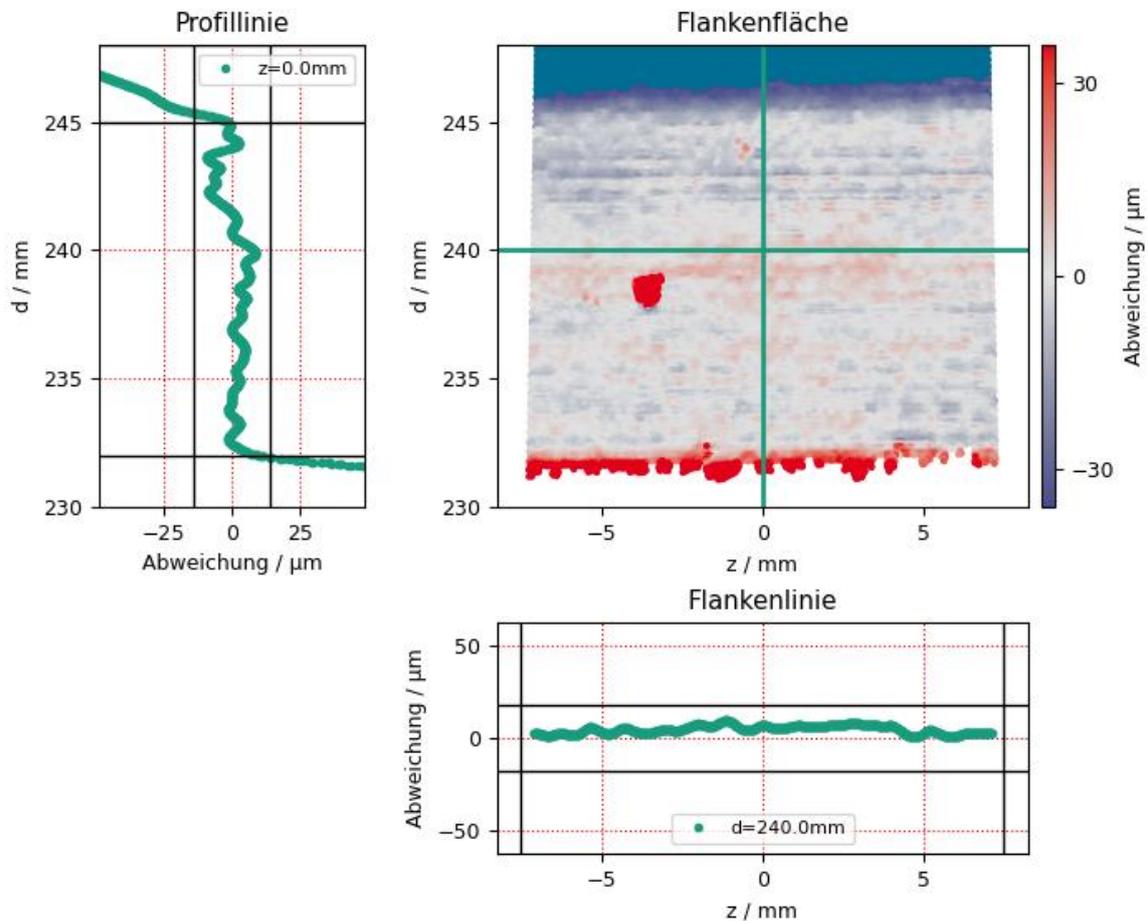


Abbildung 5: Holographische Messung an einer Flanke mit einem großen Defekt, der bei einer Standardmessung möglicherweise nicht erkannt werden würden.

4. Perspektiven

Die flächige und schnelle Auswertung aller Flanken eines Zahnrads mit 3.6 Millionen 3D-Punkten an einer Zahnflanke in nur wenigen 100 Millisekunden ermöglicht z. B. das Erkennen periodischer Fehler, die normalerweise nur schwer zu detektieren sind. Auswertungen, welche die Topographie der gesamten Zahradoberfläche berücksichtigen, ermöglichen Geräuschanalysen und können zur Verifikation von Simulationen herangezogen werden. Zukünftig werden neue Anwendungen und gegenüber dem Stand der Technik deutlich erweiterte Auswerteverfahren auf Basis der hochgenauen und vollflächigen Flankendaten zu signifikantem Erkenntnisgewinn führen und sowohl Vorteile als auch Schwächen neu entwickelter Zahnräder, ihrer Herstellungsverfahren und ihrer funktionalen Oberflächen

quantifizierbar machen. Gerne stellen wir hierfür interessierten Partnern die entsprechenden Datensätze zur Verfügung und greifen neue Auswertestrategien auf.

Aktuelle Arbeiten zur Vermessung kontinuierlich bewegter Objekte werden den Messprozess an kontinuierlich rotierenden Zahnrädern weiter beschleunigen und den Messaufbau vereinfachen. Messungen an bewegten – und rotierenden – Objekten mit Geschwindigkeiten von mehreren mm/s wurden bereits durch Fraunhofer IPM demonstriert [8, 9].

Der Einsatz holographischer Sensoren in Bearbeitungszentren bietet ebenfalls neue Möglichkeiten zur Qualitätssicherung direkt in der Fertigung, z. B. beim Allzahn-Fräsen.

5. Zusammenfassung

Die digitale Mehrwellenlängenholographie ist ein vielseitig anpassbares hochgenaues 3D-Messverfahren mit extrem hohen Messraten. Mit dem Prototyp HoloGear wurde die hochpräzise 3D-Zahnflankenmessung an realen Zahnrädern demonstriert. Dabei wurde eine Flanke in unter 200 ms aufgenommen und mit einer Reproduzierbarkeit der Höhendaten im einzelnen Messpunkt von deutlich unter 1 Mikrometer ausgewertet. Diese schnelle und flächige Messung bietet Zugang zu neuen Eigenschaften: Neben der Erkennung typischer Defekte wie Risse, Kratzer oder Schlagstellen ist auch die Auswertung der Mikrostruktur der Oberfläche möglich und dies in nur wenigen Sekunden. Dies eröffnet den messtechnischen Zugang zu neuartigen Geräusch- und Wirkungsgradanalysen.

Danksagung

Die Zahnflankenprüfung wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts "HoloMotion" (FKZ: 13N14009) zusammen mit den Firmen FrencO GmbH und ZF Friedrichshafen AG vorangetrieben. Wir danken dem VDI Technologiezentrum für die fachliche Betreuung als Projektträger und dem BMBF für die finanzielle Unterstützung des Fördervorhabens.

Literaturangaben

- [1] Wagner, C., Osten, W. u. Seebacher, S.: Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multiwavelength contouring. Optical Engineering 39 (2000) 1, S. 79–85

- [2] Beckmann, T.: Schnelle optische Vermessung von Mikrostrukturen auf tellergroßen Flächen. *Journal für Oberflächentechnik* (2020) 12, S. 49–51
- [3] Fratz, M., Seyler, T., Bertz, A. u. Carl, D.: Digital holography in production: an overview. *Light: Advanced Manufacturing* 2 (2021) 2, S. 134–146
- [4] Fratz, M., Beckmann, T., Anders, J., Bertz, A., Bayer, M., Gießler, T., Nemeth, C. u. Carl, D.: Inline application of digital holography [Invited]. *Applied Optics* 58 (2019) 34, G120
- [5] Seyler, T., Engler, J., Fuchs, M., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D., Grün, V., Börret, R., Ströer, F., Seewig, J., Börret, R. u. Seewig, J.: HoloPort – Submikrometergenau 3D-Messen in der Werkzeugmaschine. *Technisches Messen* 87 (2020) 3, S. 210–221
- [6] Stevanovic, J., Seyler, T., Aslan, J., Beckmann, T., Bertz, A. u. Carl, D.: Digital holographic measurement system for use on multi-axis systems. *Proceedings of SPIE. SPIE 2021*, S. 398–408
- [7] Schiller, A., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A. u. Carl, D.: Microscopic height measurements on moving objects with digital holography. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. SPIE 2021 - 2021*, S. 61
- [8] Schiller, A., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D. u. Buse, K.: Motion compensation for interferometric off-center measurements of rotating objects with varying radii. *APL Photonics* 4 (2019) 7, S. 71301
- [9] Schiller, A., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D. u. Buse, K.: Multiwavelength holography: height measurements despite axial motion of several wavelengths during exposure. *Applied Optics* 58 (2019) 34, G48