

Forschungsergebnisse

# Photonik, Mikroelektronik, Informationstechnik: Intelligente optische Sensorik

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

---

Inline Messung und Korrektur kurzweiliger Strukturen bei der  
zerspanenden Oberflächenbearbeitung

## Inline Messung und Korrektur kurzwelliger Strukturen bei der zerspanenden Oberflächenbearbeitung

In einem Forschungsprojekt der Baden-Württemberg Stiftung wurde der kabellose, digital-holographische 3D-Sensor HoloPort entwickelt. Erstmals steht ein Sensor zur Verfügung, der direkt in der Werkzeugmaschine die Topographie von Bauteilen flächig und sub-mikrometergenau messen kann.

Die taktile 3D-Vermessung von zerspanend bearbeiteten Bauteilen in speziellen Messräumen mit Koordinatenmessmaschinen ist heute Stand der Technik, aber für eine In-Prozess-Messung nicht einsetzbar. Für hochpräzise Bauteile gibt es keine Messgeräte, die in der Produktionslinie oder gar in der Werkzeugmaschine flächige 3D-Messungen ermöglichen. Daher ist das Einrichten von Werkzeugmaschinen sehr zeitraubend; für die Optimierung des Ergebnisses müssen viele Bearbeitungsdurchläufe mit anschließender 3D-Vermessung des Bauteils durchgeführt werden. Im Rahmen des Projekts wurde ein intelligentes, optisches Messsystem zur Regelung und Inline-Qualitätsüberwachung von zerspanenden Werkzeugmaschinen entwickelt:

Größe	140×235×290 mm <sup>3</sup> (H×B×L)
Gewicht	10 kg
Auswertzeit	0,1 s / < 3 s
Abtastung (lateral)	< 7 µm (9 Mio. Messpunkte)
Messfeld	20 × 20 mm <sup>2</sup>
Reproduzierbarkeit	< 1 µm (1 σ)
Arbeitsabstand	< 150 mm

HoloPort basiert auf der digitalen Mehrwellenholographie, die gleichzeitig eine flächige und mikrometergenau Erfassung der bearbeiteten Oberflächen in wenigen Millisekunden ermöglicht. Die gesamte Mikroelektronik und Software wurde im Sensor

integriert. Dieser kann zukünftig Prozessfehler selbständig erkennen und potenziell, auf Basis neuer Auswert- und Entscheidungsalgorithmen, Steuerparameter (z. B. Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und -richtung) ermitteln. So können erkannte Fehler automatisch kompensiert werden.

Erstmals steht ein geregelter Betrieb der Werkzeugmaschine in Aussicht, der ein völlig neues Maß an Prozesssicherheit und Qualität der bearbeiteten Oberflächen gewährleistet.

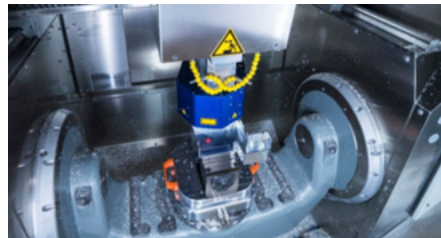


Abbildung 1: Inspektion einer typischen Fräsfläche durch HoloPort in einer Hermle C32U 5-Achsen-Fräsmaschine am Fraunhofer IPM

In Abbildung 1 ist HoloPort bei der Untersuchung einer typischen Fräsfläche zu sehen. Der Sensor löst die Höhenunterschiede (z) und Oberflächenstrukturen der einzelnen Fräsbahnen mit hoher Präzision auf, wie in Abbildung 2 dargestellt. Ein Schnitt durch zehn Einzelmessungen an der gleichen Position veranschaulicht die Wiederholgenauigkeit im sub-µm-Bereich. Bei einem Messfeld von bis zu 20 mm × 20 mm und 9 Millionen Messpunkten werden Unregelmäßigkeiten innerhalb der Mikrostruktur sowie Maschinenfehler schnell sichtbar. Im Gegensatz zu taktilen Sensoren löst das System nicht nur langwellige Komponenten, sondern auch kurzwellige Strukturen und Fehler des Fräsvorgangs auf. Aufgrund der inhärenten morphologischen Filterung des Tastkopfes sind taktilen Sensoren diese Eigenschaften grundsätzlich nicht zugänglich.

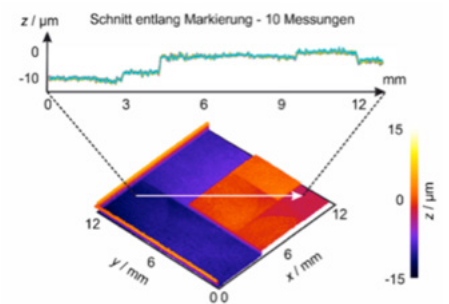
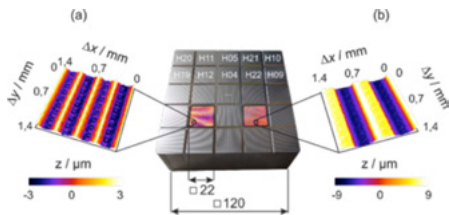


Abbildung 2: Der HoloPort-Sensor erfasst Struktur und Geometrie von Fräsbahnen

Für eine systematische Untersuchung der Einflüsse verschiedener Bearbeitungsparameter wurden vom Zentrum für Optische Technologien (ZOT) der HS Aalen Simulationen mit dem Restmaterialmodell durchgeführt. Damit lässt sich zum einen abschätzen, ob die gefräste Oberfläche den gewünschten Anforderungen entsprechen wird, zum anderen lassen sich umgekehrt gezielt definierte Oberflächenstrukturen erzeugen. Die Simulation kann den Messbereich der erzeugten Rillenstrukturen und damit die entsprechenden Kenngrößen nach EN ISO gut prognostizieren, für eine genaue Prozessanalyse ist jedoch seine Messung mit dem HoloPort Sensor notwendig.

Üblicherweise werden zur Oberflächencharakterisierung und Prüfung des Fräsergebnisses 2D-Profilansichten herangezogen. Ein solcher Profilschnitt beschreibt Oberflächen jedoch nur sehr begrenzt und reicht z. B. nicht aus, um Riefen oder zufällige Strukturelemente hinreichend zu charakterisieren. Der HoloPort-Sensor bietet die Möglichkeit, die gemessene Oberflächentopographie flächig auszuwerten, wodurch eine funktions- und strukturorientierte 3D-Auswertung der Oberfläche nach Normenreihe EN ISO 25178 ermöglicht wird. Darin werden unter anderem die in der Praxis etablierten 2D-Kenngrößen  $R_a$ ,  $R_q$  und

$R_z$  auf ihre entsprechenden 3D-Kenngrößen  $S_a$ ,  $S_q$  und  $S_z$  übertragen. Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit und Praxisrelevanz des HoloCut-Sensors hat Fraunhofer IPM in Zusammenarbeit mit dem ZOT umfangreiche Tests durchgeführt.

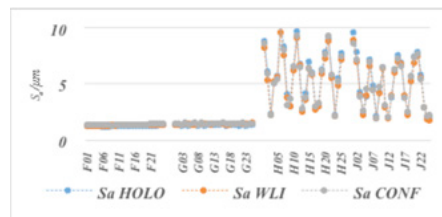


**Abbildung 3: Der HoloPort-Sensor erkennt selbst kleinste Bearbeitungsfehler am eingerichteten Bauteil. Bei der Bearbeitung von Aluminium-Testproben (F, G, H, J) wurde ein Fehler eines Temperatursensors beobachtet. Auf den Proben F und G war die Kalibrierung intakt, für die Probenkörper H und J liegt eine starke Unregelmäßigkeit vor: Der Detailausschnitt (a) der erfassten Topographie zeigt die gewünschte Rillenstruktur, der Detailausschnitt (b) der Topographie zeigt offensichtliche Bearbeitungsfehler.**

Abbildung 3 zeigt beispielhafte 3D-Daten von vier gleichartig gefrästen Testoberflächen – einmal bei optimal funktionierender Temperaturregelung (a) und einmal unter dem Einfluss eines fehlerhaft kalibrierten Temperatursensors in der Maschine (b). Alle Fräsvorgänge hat die Werkzeugmaschine ohne Fehlermeldung abgeschlossen. Die Bearbeitung erfolgte vollkommen identisch, d. h. sowohl Bearbeitungsparameter als auch Fräswerkzeuge waren exakt dieselben: Die Schnittgeschwindigkeit wurde auf 14900 U/min, der Vorschub auf 3310 mm/min und die Schnitttiefe auf 0,2 mm eingestellt. Die Ergebnisse sprechen für sich: Durch die exakte Erfassung der fehlerhaften Bearbeitung bei Testfläche (b), kann diese im Nachgang korrigiert werden – und zwar ohne erneutes Einrichten des Werkstücks. Wichtig zum Vergleich der Messdaten ist der Hinweis, dass die Farbskalen unterschiedliche Struktur Tiefen repräsentieren: Bei der Detailfläche (a) werden Messwerte

von -3 bis +3  $\mu\text{m}$  farbcodiert dargestellt, bei der fehlerhaften Detailfläche (b) erstrecken sich die Messwerte über den Bereich von -9 bis +9  $\mu\text{m}$ .

Um die Datenqualität von HoloPort zu bewerten, wurden die Ergebnisse mit Referenz-Laborsystemen (Weißlichtinterferometer WLI, konfokaler Sensor CONF) verglichen und verschiedene Parameter nach ISO 25178 ausgewertet. Abbildung 4 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung aller drei Systeme für den exemplarisch gezeigten Parameter  $S_a$ . Während HoloPort ein Messfeld von  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  in weniger als einer Sekunde auflöst, benötigen die Laborsysteme für ein äquivalentes Messfeld eine Messzeit von mehreren Minuten.



**Abbildung 4 Oberflächenrauheit  $S_a$  für HoloCut im Vergleich mit Referenzsystemen für die Versuchsproben F, G, H und J. Die Messwerte bewegen sich in einem Bereich von etwa  $10 \mu\text{m}$  und zeigen zwischen den dreien Messverfahren eine sehr hohe Übereinstimmung. Es ist eine ungewöhnlich starke Streuung der Messwerte erkennbar, die auf einen Prozess- oder Maschinenfehler hinweist. Die steuerbaren Prozessparameter sind für alle Felder gleich.**

Die unter Einfluss des Maschinenfehlers produzierten Felder können mithilfe von Machine-Learning Algorithmen deutlich von Ergebnissen korrekter Felder und der erwarteten Oberfläche aus Simulationen getrennt werden. Eine selbstlernende automatisierte Regelung der Werkzeugmaschine wird möglich.

Der portable Sensorkopf HoloPort kann in vielen Fertigungslinien zum entscheidenden Baustein werden, um

die Inline-Inspektion hochpräziser Bauteile zu ermöglichen. Durch den Wegfall zusätzlicher Handlingsysteme bietet der Sensor zudem deutliche Kostenvorteile: Der Sensor ist so konzipiert, dass er in der Werkzeugmaschine wie ein Werkzeug von der Spindel gegriffen werden kann.

**Ansprechpartner:**

Dr. Markus Fratz  
Fraunhofer IPM  
Heidenhofstraße 8  
79110 Freiburg

Tel. +49 761 8857-178  
Fax +49 761 8857-224  
markus.fratz@ipm.fraunhofer.de  
www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/produktionskontrolle-inlinemesstechnik/komp/digitale-holographie.html

Prof. Dr. Rainer Börret  
HS Aalen  
Beethovenstraße 1  
73430 Aalen

Tel. +49 7361 576-3482  
Fax +49 7361 576-3115  
rainer.boerret@hs-aalen.de  
www.hs-aalen.de/de/facilities/12