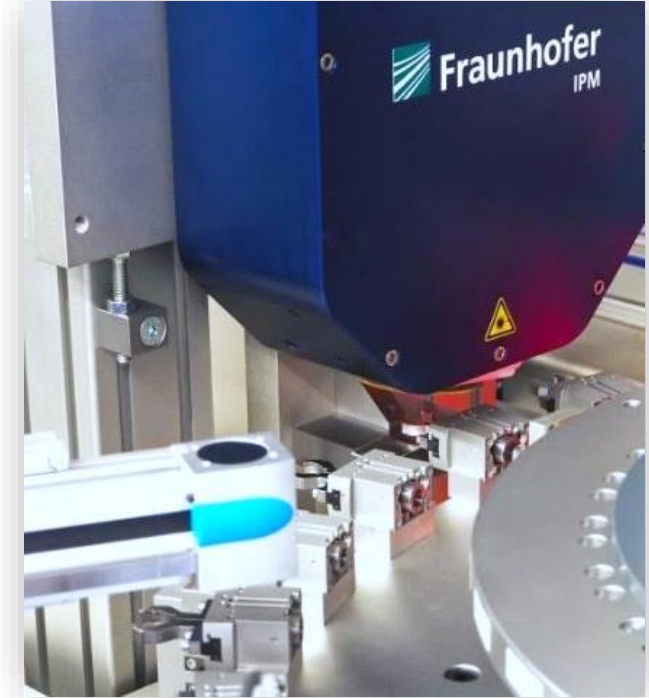


Digitale Holographie - Bildgebende Koordinatenmesstechnik der Zukunft

—
Andreas Hofmann, Fraunhofer IPM

Fraunhofer IPM

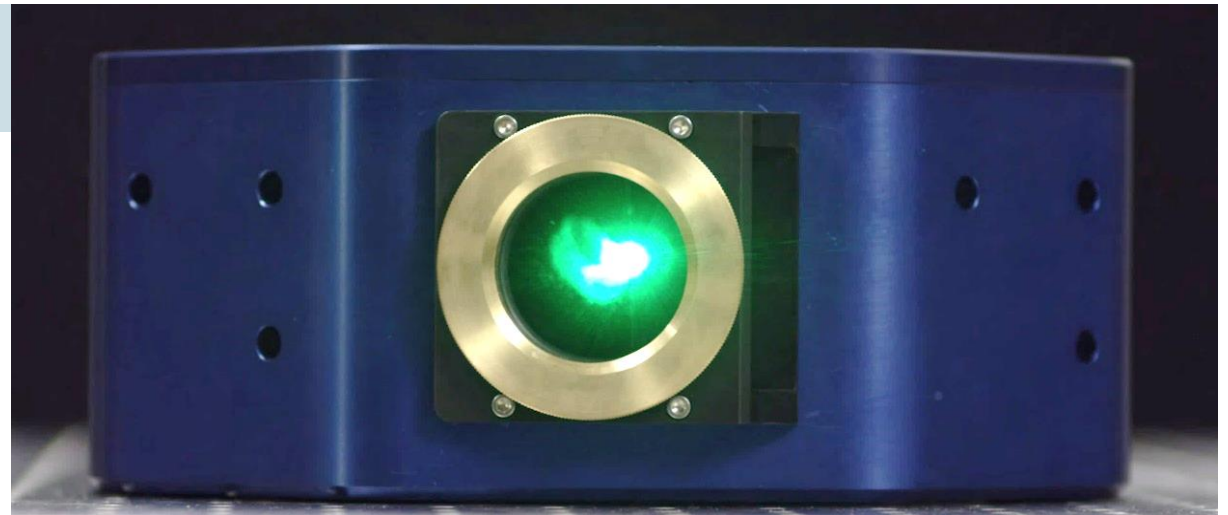
Wir entwickeln extrem schnelle, genaue und robuste Mess- und Prüfsysteme.



Digitale Holographie – Bildgebende Koordinatenmesstechnik der Zukunft

Inhaltsverzeichnis

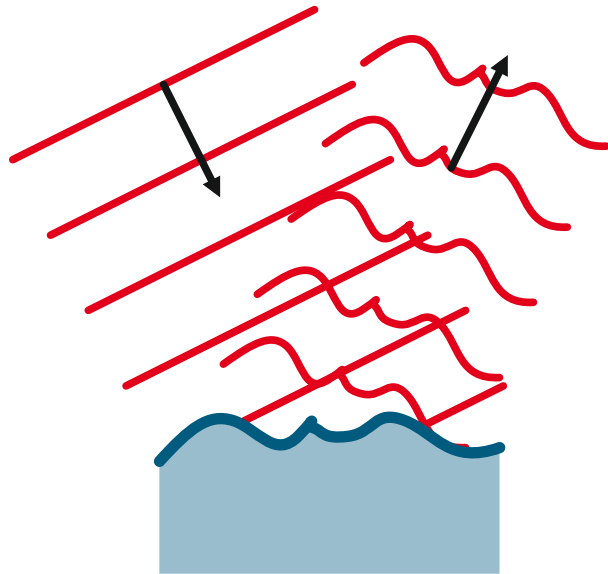
1. Was ist digitale Holographie?
2. Anwendungsbeispiele
3. Das HoloTop-System
4. Aktuelles & Ausblick



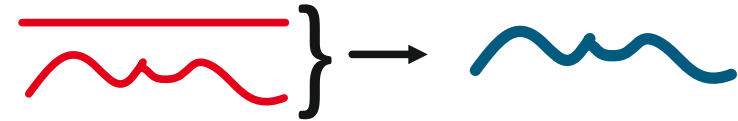
Was ist digitale Holographie?

Funktionsprinzip

- kohärentes Licht (Laser)
- reflektiertes Licht überträgt Höheninformationen als „Deformation“

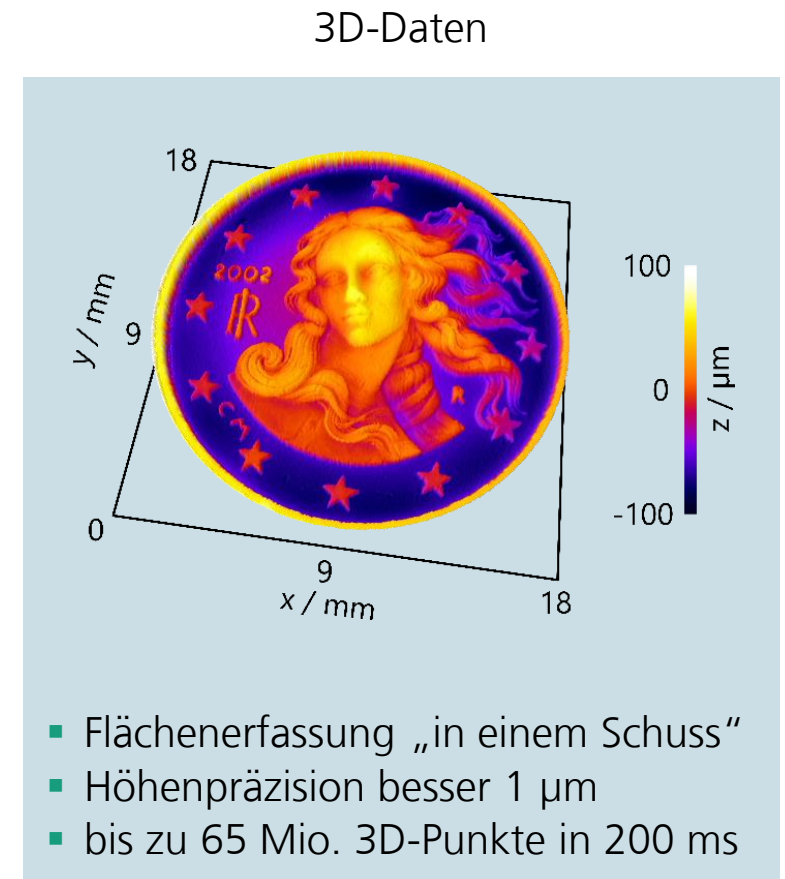
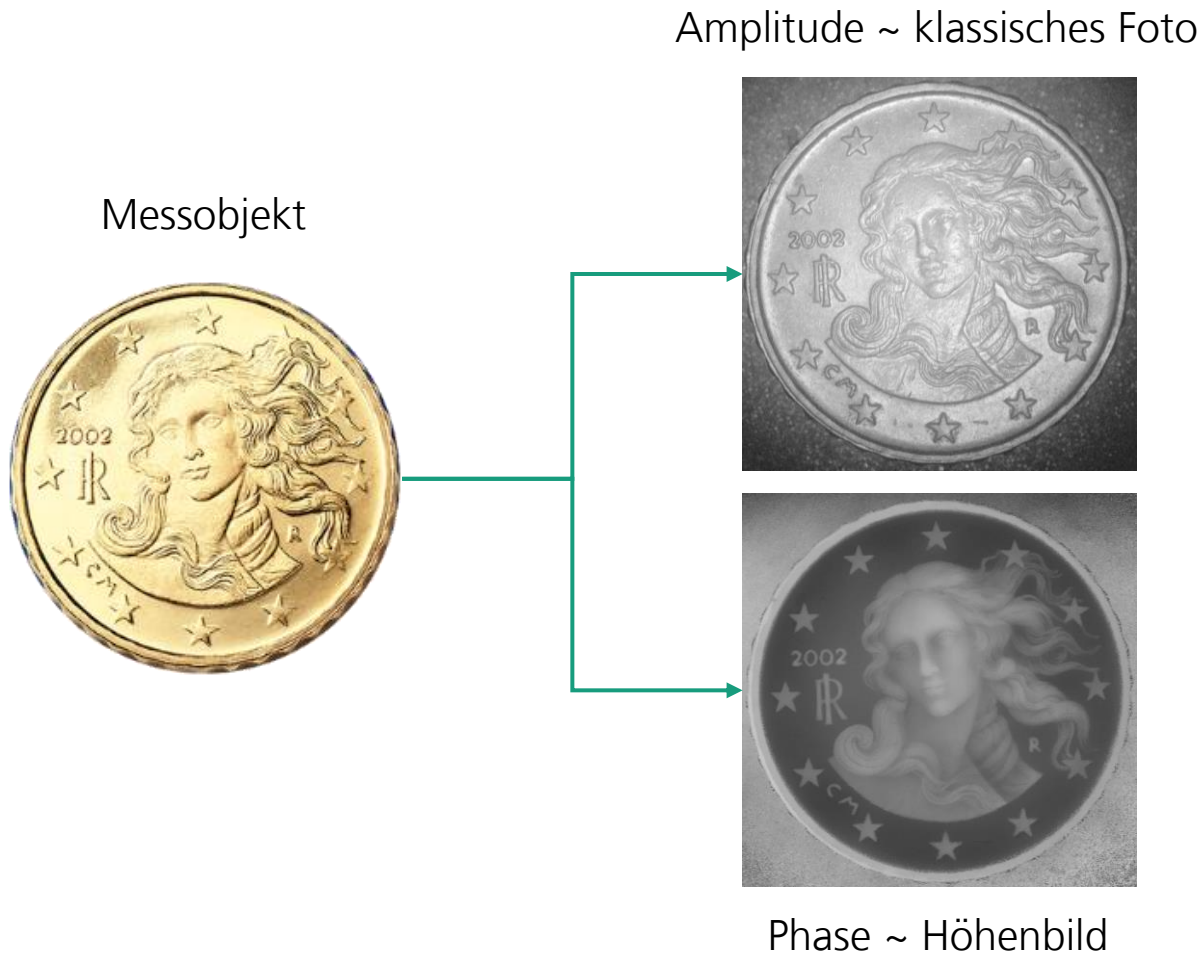


- Vergleich mit Beleuchtungslicht ergibt Form der Oberfläche
- Holographie:
Erfassung von Amplitude („Helligkeit“) und Phase („Form“) des Lichts



Was ist digitale Holographie?

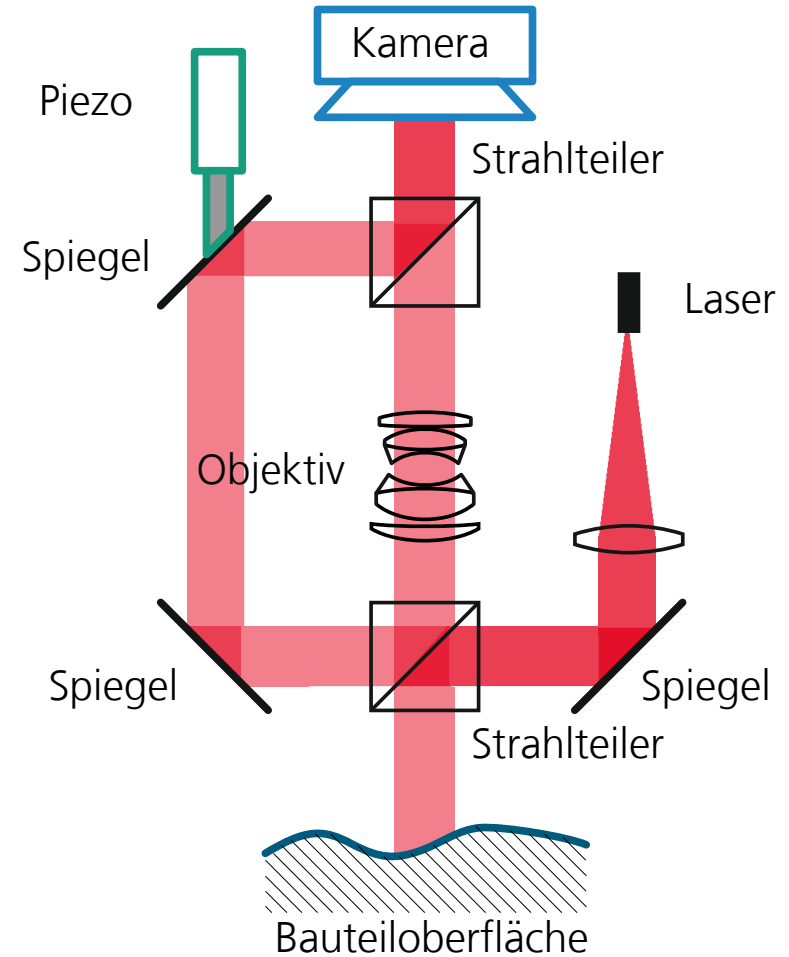
Hochgenaue, schnelle und flächenhafte 3D-Messung



Was ist digitale Holographie?

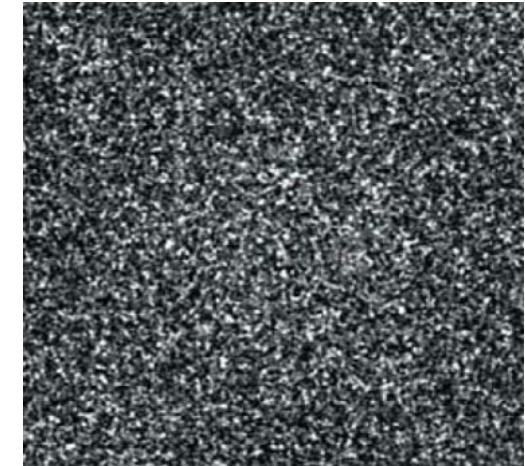
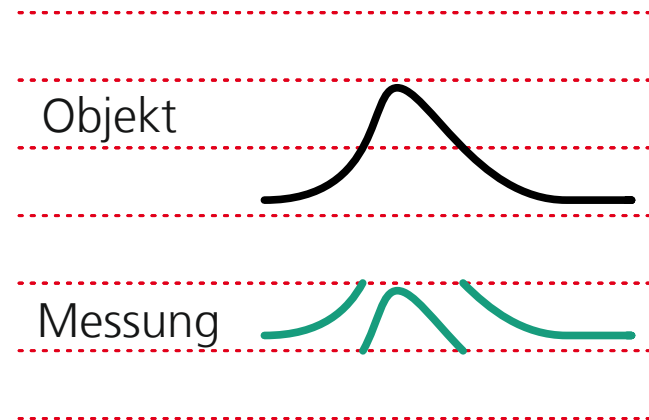
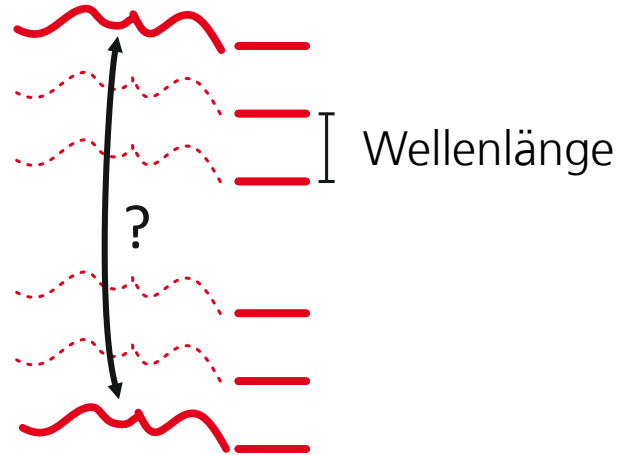
Basis-Interferometer

- Kamera + Objektiv:
Standardkomponenten erlauben flexible Abbildungsmaßstäbe
- Beleuchtung:
Laser, rot (630-643 nm) oder grün (514-532 nm)
- Referenzbeleuchtung aus gleichem System
- Überlagerung des Referenz- und Objektlichtes auf Kamera
- min. 3 gezielte Phasenschritte im Referenzstrahl durch Piezo
- aus Interferogrammen wird Form der Objektwelle berechnet



Was ist digitale Holographie?

Messung an ausgedehnten, rauen Objekten

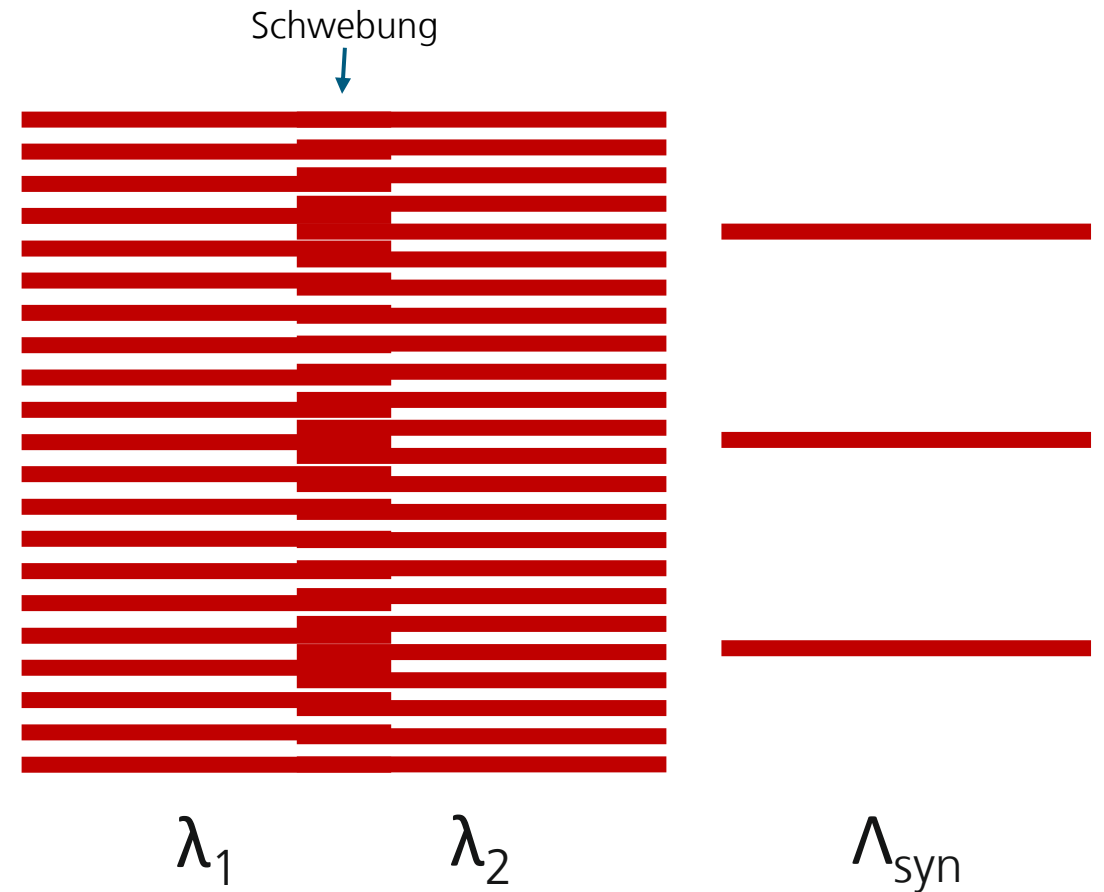


- Messsignal wiederholt sich nach einer (halben) Wellenlänge
- Höhenunterschiede einer ganzen Wellenlänge nicht unterscheidbar
- Objekte größerer Höhenausdehnung erscheinen „gewrappt“
- stetige Objekte lassen sich „unwrappen“
- raue Oberflächen erzeugen „Speckle“
- klassische Interferometrie scheitert

Was ist digitale Holographie?

Mehrwellenlängen-Holographie

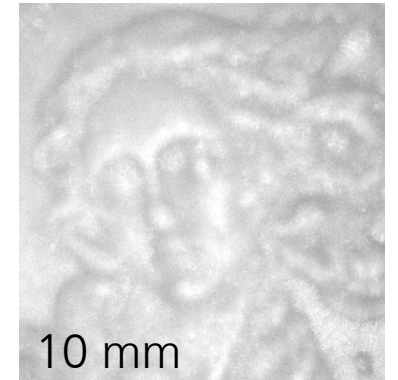
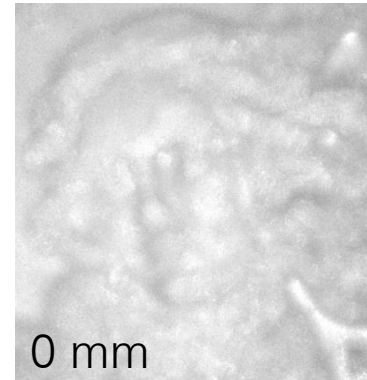
- Verwendung mehrerer, zueinander verstimmter Laserquellen
- Schwebung erzeugt „synthetische“ Wellenlänge Λ_{syn}
- Eindeutigkeitsbereich = $\Lambda_{\text{syn}} / 2$,
- Messgenauigkeit $\approx \Lambda_{\text{syn}} / 100$
- Kaskadierung mehrerer synth. Wellenlängen



Was ist digitale Holographie?

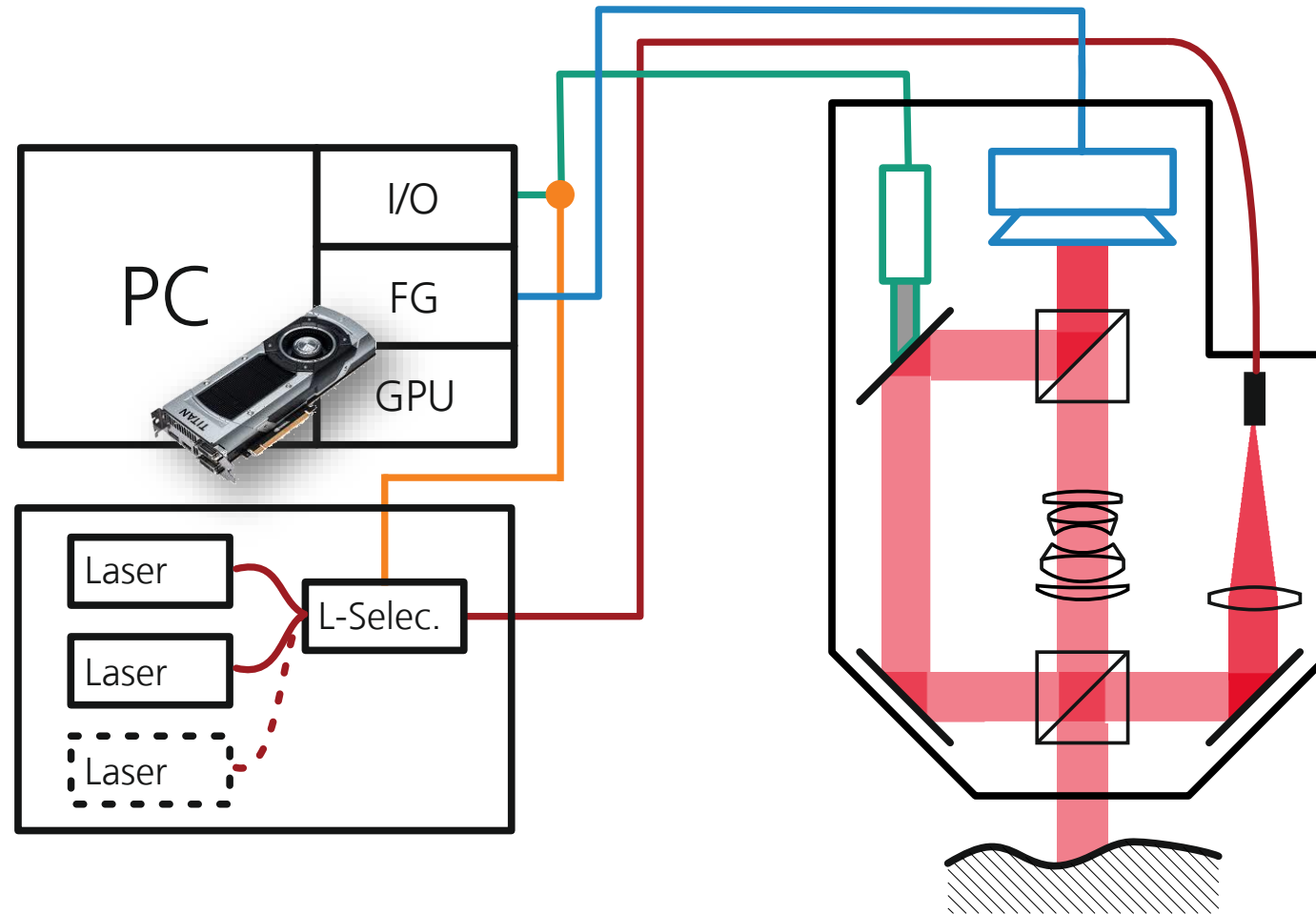
Numerisches Scharfstellen

- Die Form der Lichtwelle am Ort der Kamera ist vollständig bekannt (Amplitude & Phase).
- Damit lässt sich die Form der Lichtwelle in beliebigen Abstand zur Kamera berechnen (z. B. durch numerische Näherung des Fresnel'schen Beugungsintegrals)
- **Die Messdaten können nachträglich und ohne erneutes Messen auf beliebige Abstände scharfgestellt werden.**
- deutlich erweiterte Schärfentiefe



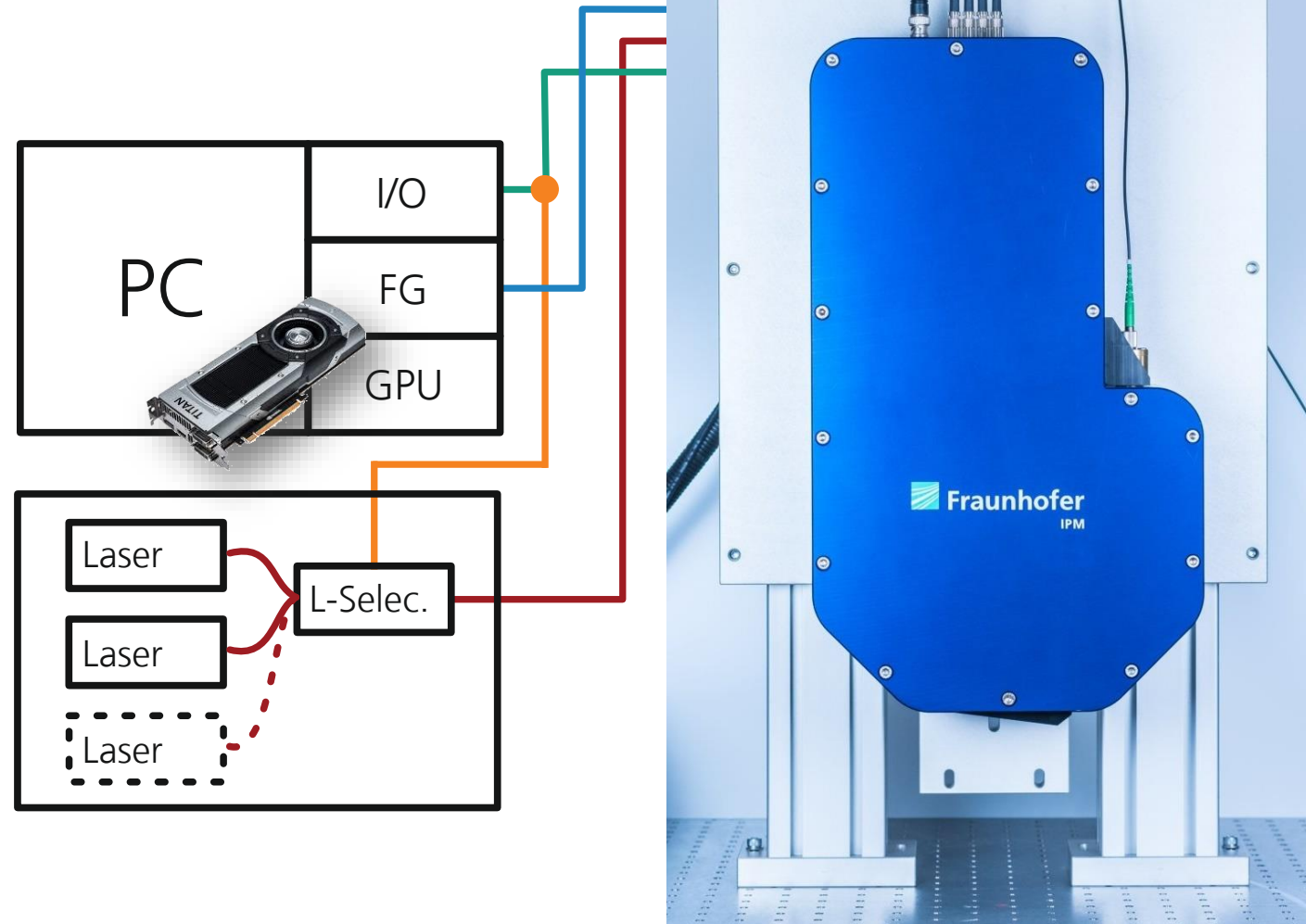
Was ist digitale Holographie?

Komplettsystem HoloTop



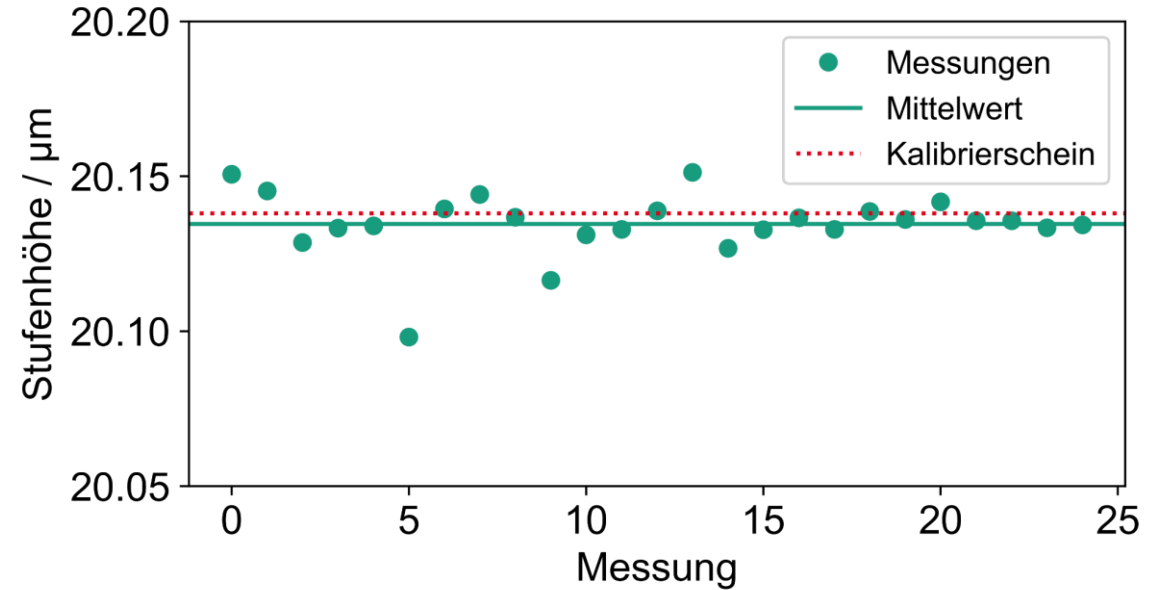
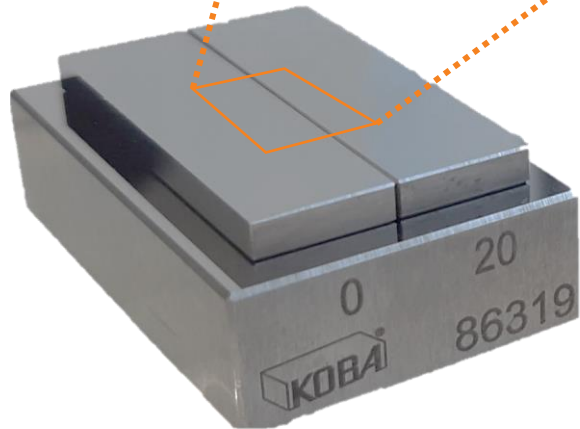
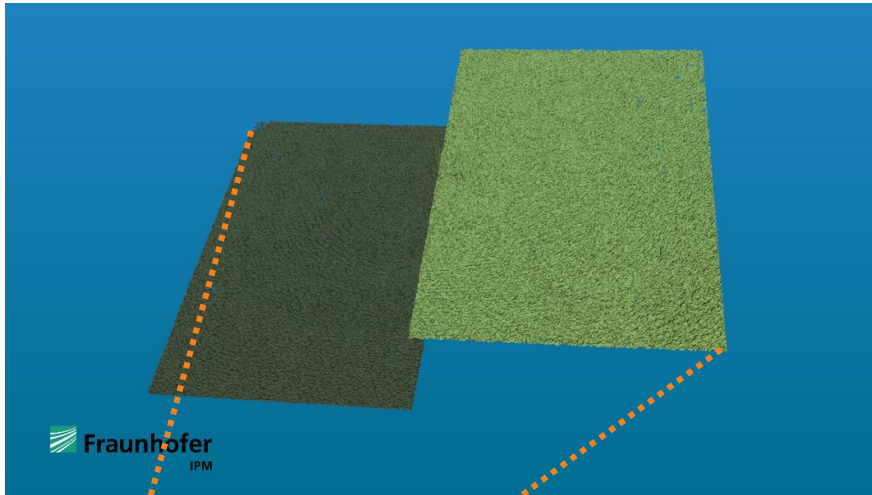
Was ist digitale Holographie?

Komplettsystem HoloTop



Digitale Holographie

Wiederholbarkeit an einem KOBA Stufenhöhennormal

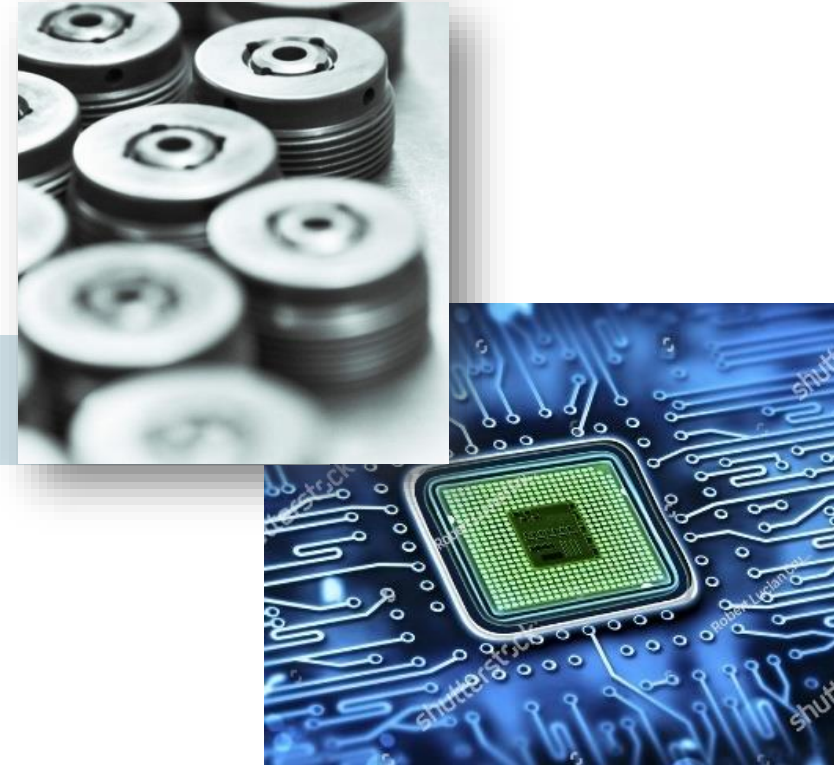


	PTB Kalibrierschein (19.85°C – 20.00°C)	Holotop (25 Messungen)
Stufenhöhe	20.138 $\mu\text{m} \pm 0.013 \mu\text{m}$	20.135 $\mu\text{m} \pm 0.010 \mu\text{m}$

Digitale Holographie - Bildgebende Koordinatenmesstechnik der Zukunft

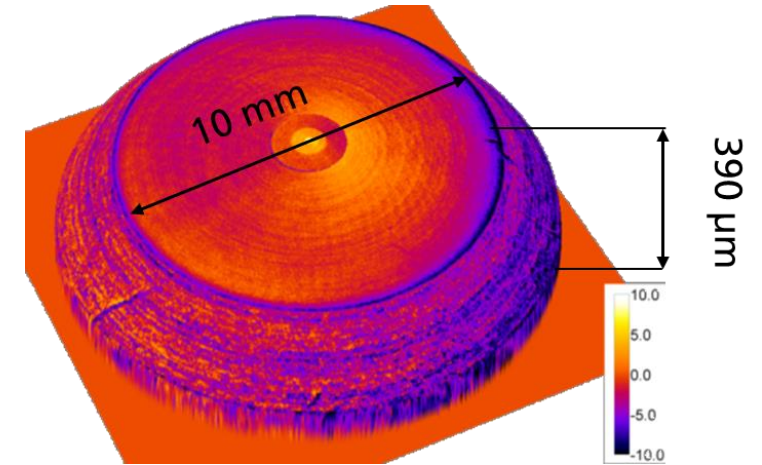
Inhaltsverzeichnis

1. Was ist digitale Holographie?
2. Anwendungsbeispiele
3. Das HoloTop-System
4. Aktuelles & Ausblick



Anwendungsbeispiele

2500 bar und alles bleibt dicht!



- Komponente für Diesel-Injektor
- axiale Wiederholgenauigkeit: <math>< 1 \mu\text{m}</math>
- Vermessung von 1 Teil pro Sekunde

- Sichtfeld ~18 mm im Durchmesser
- Messzeit ~ 60 ms
- Inspektion inkl. Handling <math>< 1.0 \text{ s}</math>

- 100%-Inline-3D-Prüfung
- 9 Mio. 3D-Punkte pro Messung
- > 10 Mio. Teile pro Jahr seit 11/2015

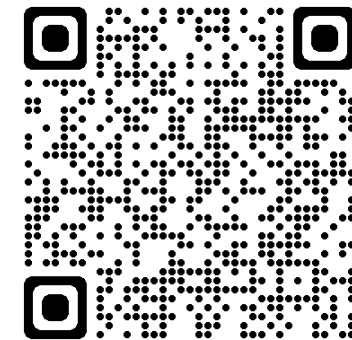
Anwendungsbeispiele

2500 bar und alles bleibt dicht!

Werner
Gießler
Präzisionsdrehteile



Video verfügbar unter:
<https://www.youtube.com/watch?v=PORyKeARKpI>

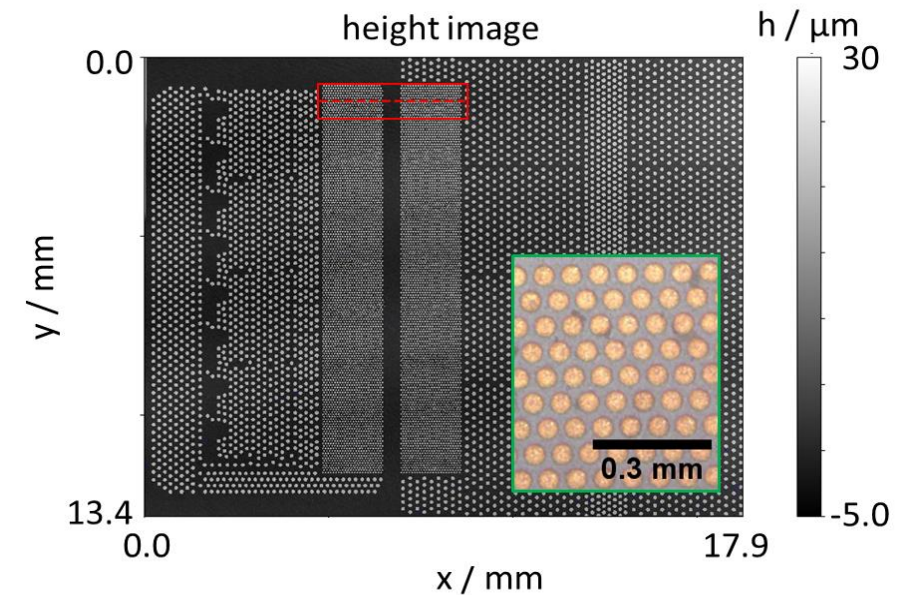
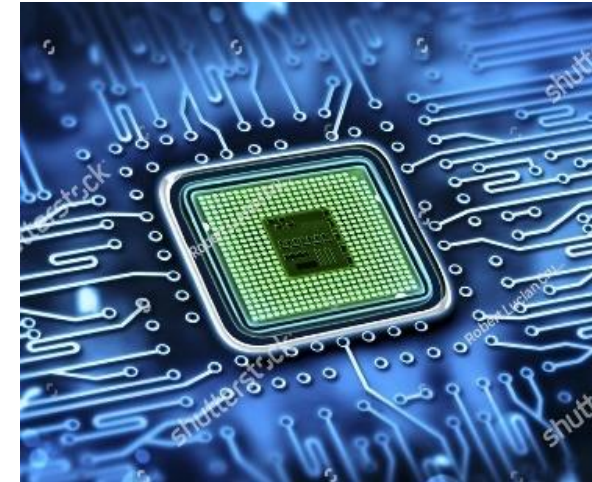


Anwendungsbeispiele

Höchste Genauigkeit in der Elektronikfertigung

- neueste Sensorgeneration in Erprobung bei Intel
- 65 Mio. 3D-Punkte in 200 ms
- 0,2 μm Precision
- 0,3 μm Accuracy
- Kooperation veröffentlicht im Rahmen eines Artikels für das Nature-Tochtermagazin LAM¹:

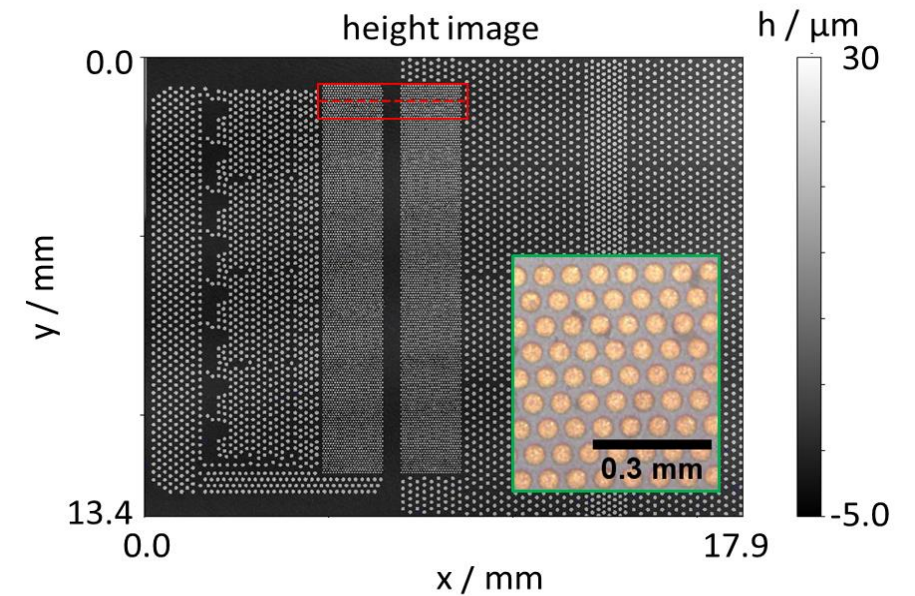
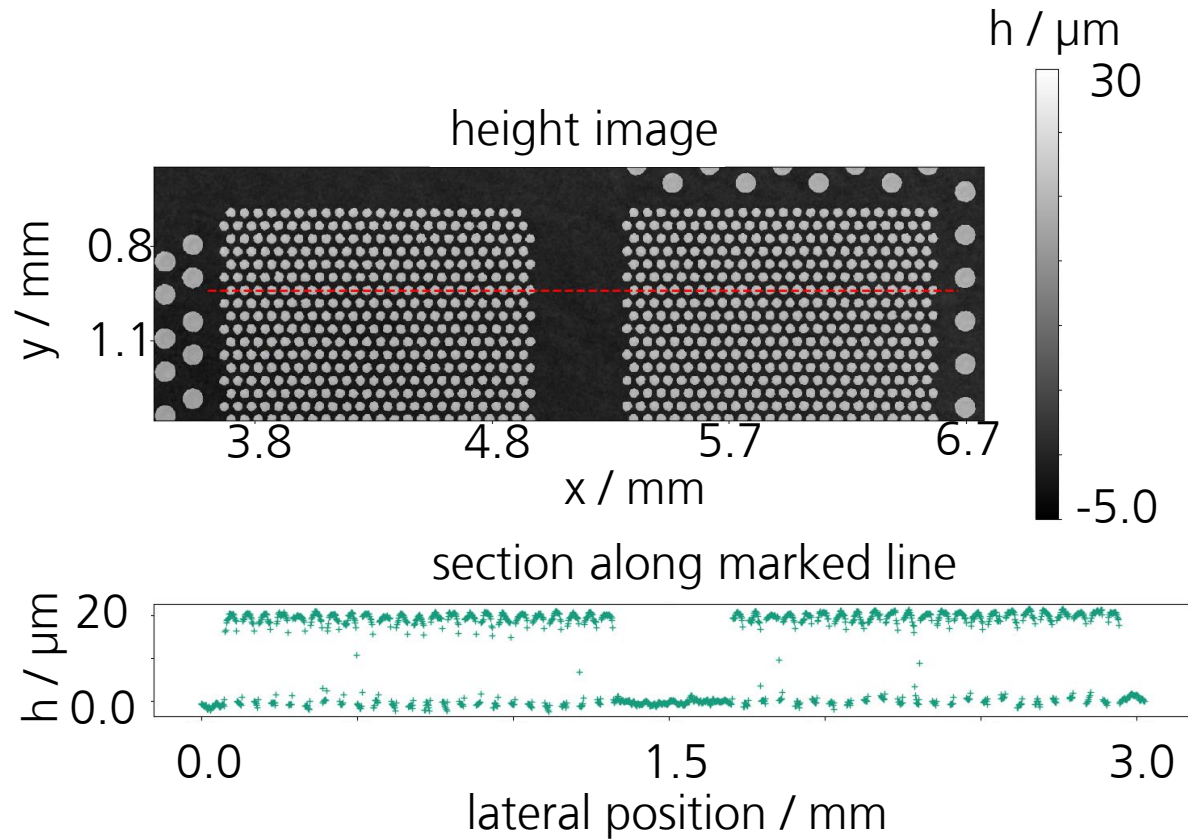
<https://www.light-am.com/article/doi/10.37188/lam.2021.015>



¹Digital Holography in Production: An Overview; M. Fratz, T. Seyler, A. Bertz, D. Carl; Light: Advanced Manufacturing, 2021.

Anwendungsbeispiele

Höchste Genauigkeit in der Elektronikfertigung

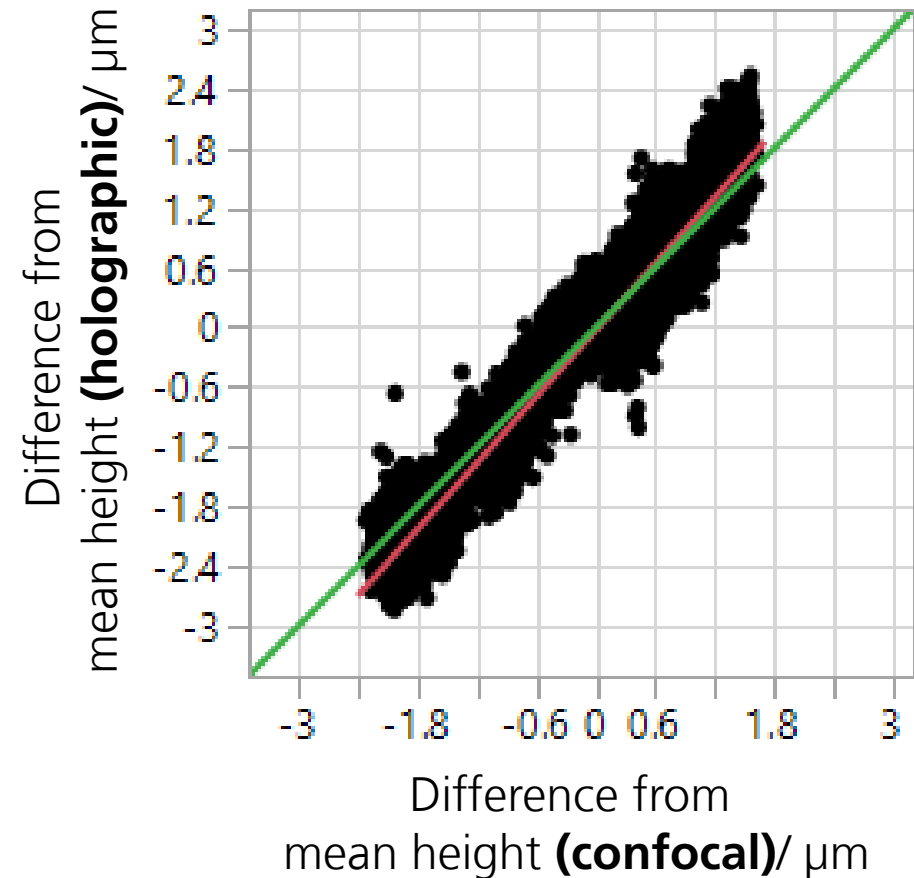


¹Digital Holography in Production: An Overview; M. Fratz, T. Seyler, A. Bertz, D. Carl; Light: Advanced Manufacturing, 2021.

Anwendungsbeispiele

Höchste Genauigkeit in der Elektronikfertigung

- Messung von > 13 000 Bumps
- Für jeden Bump wird der Höhenwert durch Bildverarbeitung extrahiert
- Der Vergleich mit Referenzdaten (Konfokalmikroskop) ergibt eine hervorragende Übereinstimmung

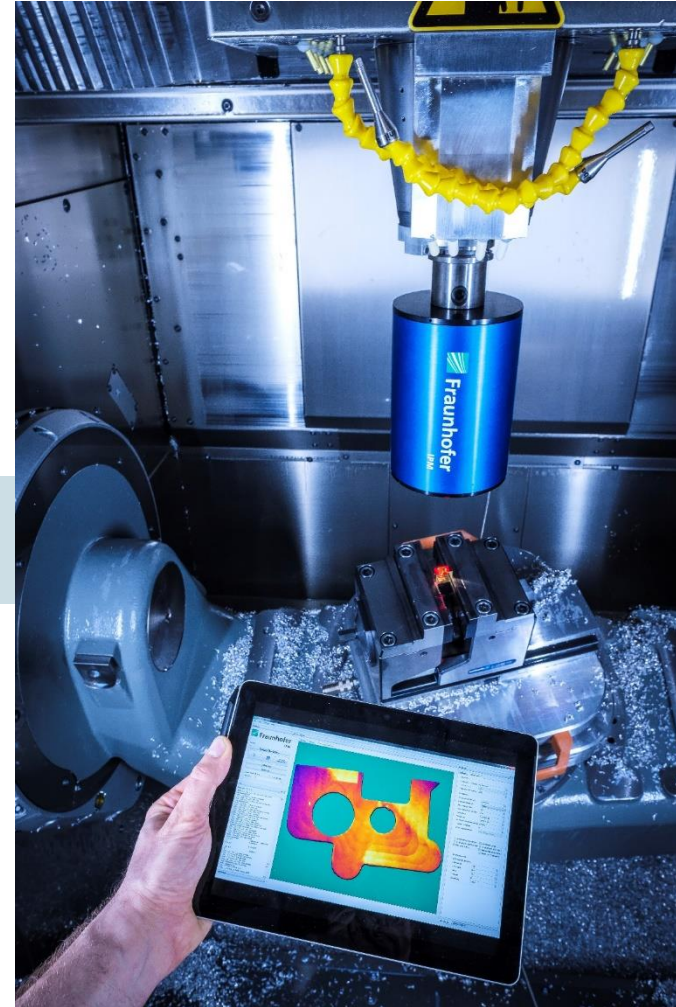


¹Digital Holography in Production: An Overview; M. Fratz, T. Seyler, A. Bertz, D. Carl; Light: Advanced Manufacturing, 2021.

Digitale Holographie - Bildgebende Koordinatenmesstechnik der Zukunft

Inhaltsverzeichnis

1. Was ist digitale Holographie?
2. Anwendungsbeispiele
3. Das HoloTop-System
4. Aktuelles & Ausblick



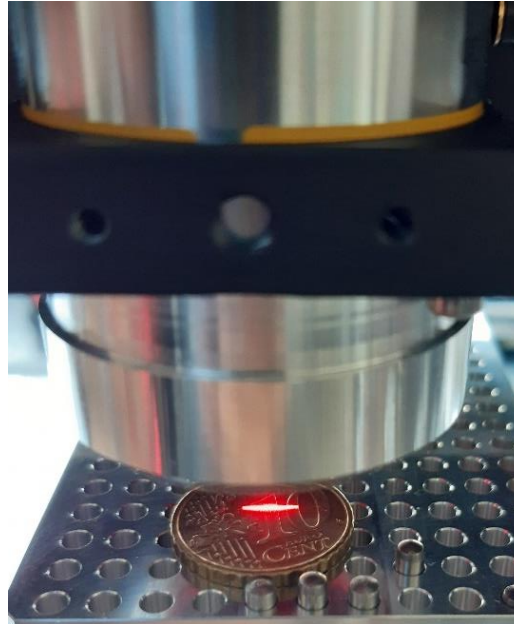
Das HoloTop-System

Aktuelle Sensoren



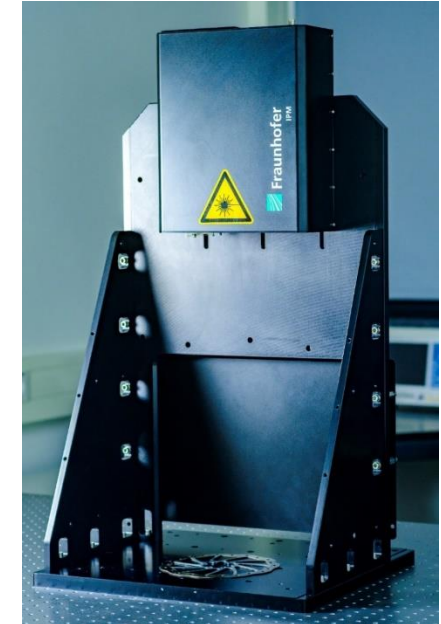
HoloTop NX

- Bearbeitungszentren
- Motorenfertigung



HoloFlash 48M3

- mikroskopische Messfelder
- Waferinspektion

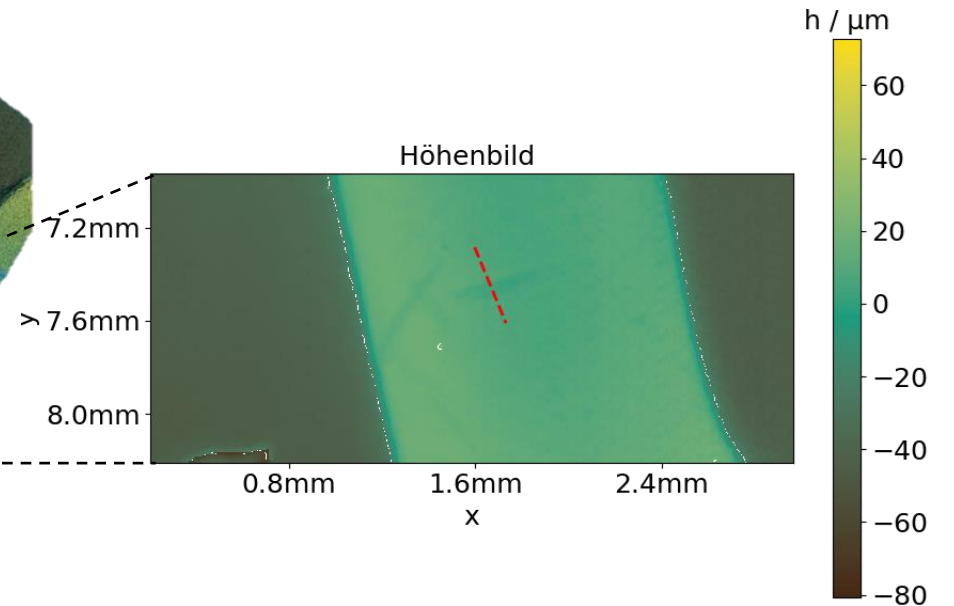
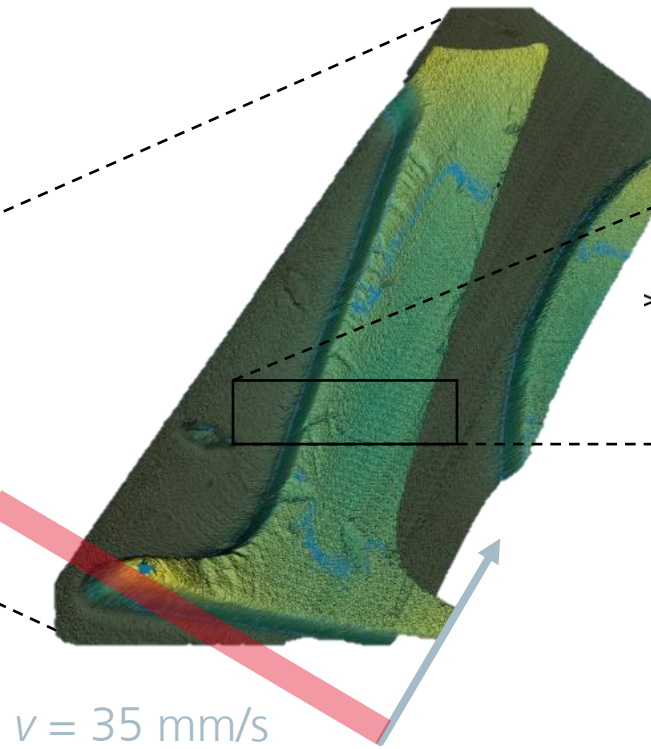
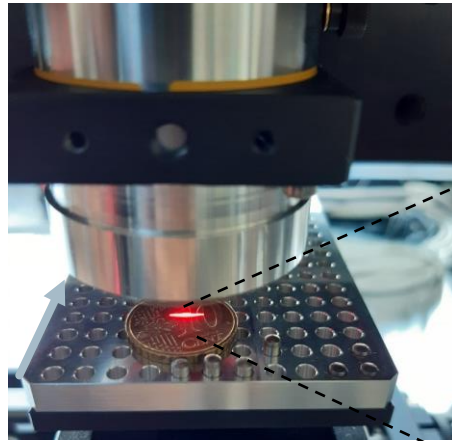


HoloTop 48M150

- große Messfelder
- Elektronikplatinen
- Bipolarplatten

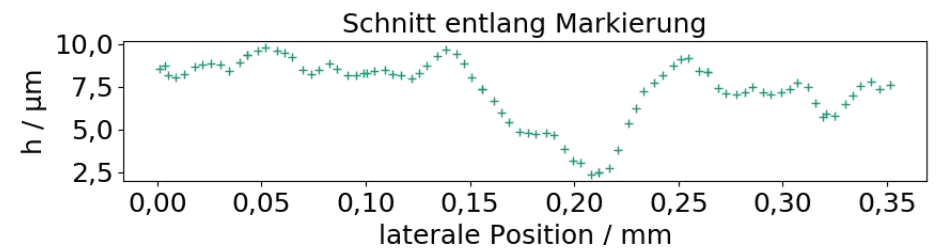
Das HoloTop-System

Liniensensor | Messen in Bewegung



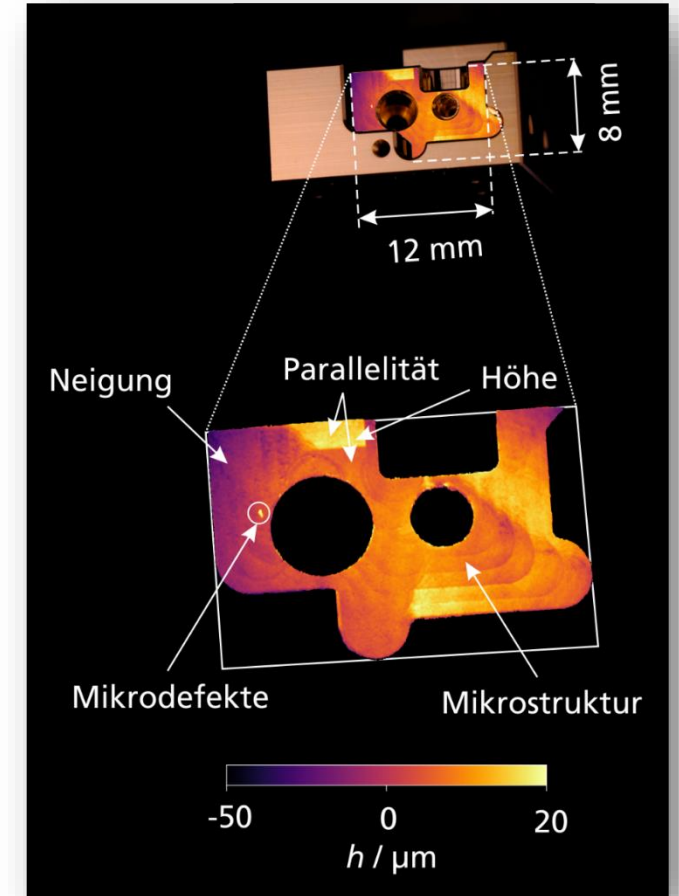
Anwendungsgebiete:

- Wafer mit Microbumps
- mikrostrukturierte metallische Funktionsflächen



Das HoloTop-System

Aktuelle Sensoren – HoloTop NX

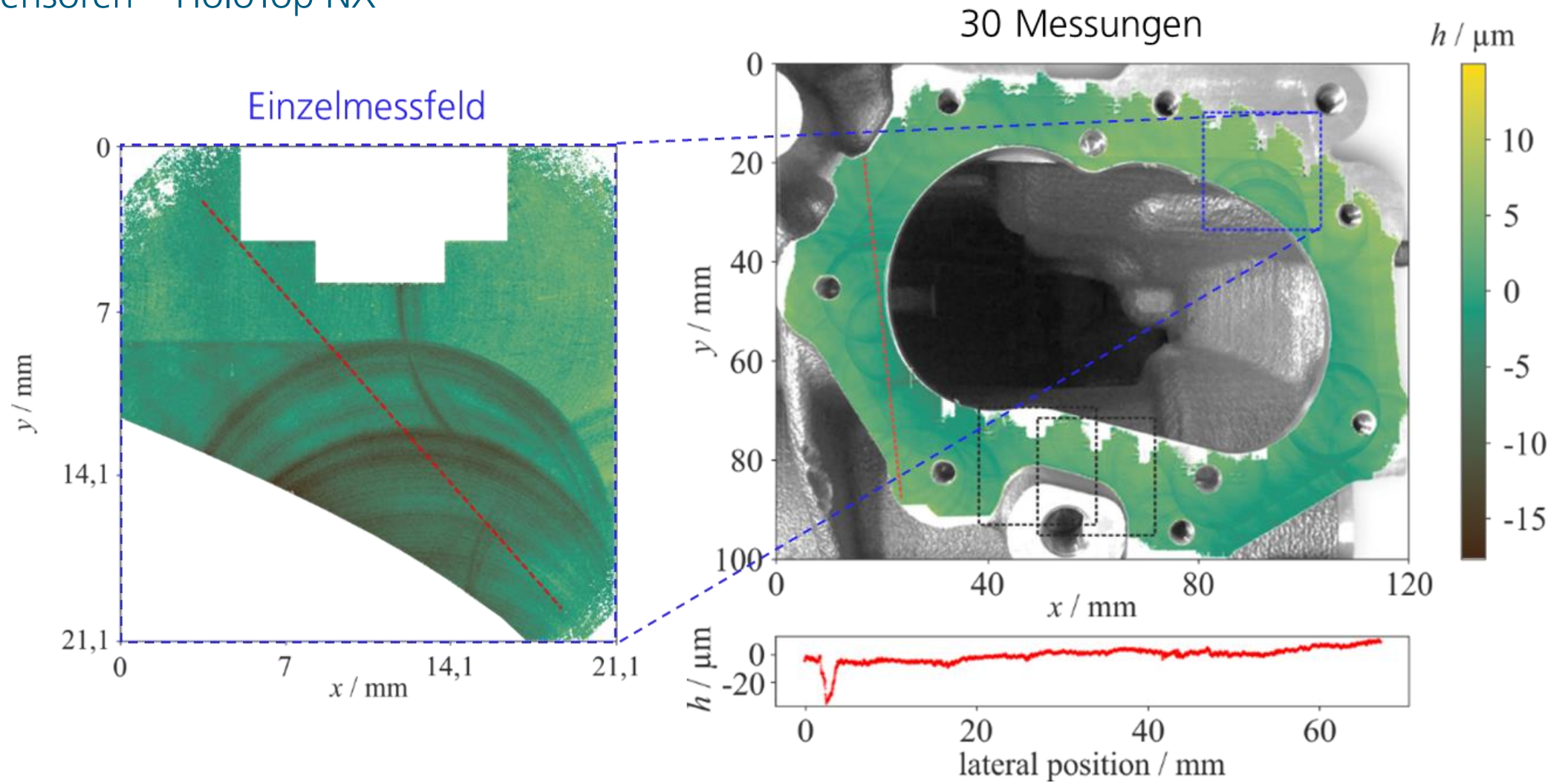


Vision: automatisierte Prüfung an Mehrachssystemen für Losgröße 1

Entwicklung des ersten digital-holographischen Messsystems für den Betrieb an Mehrachssystemen

Das HoloTop-System

Aktuelle Sensoren – HoloTop NX

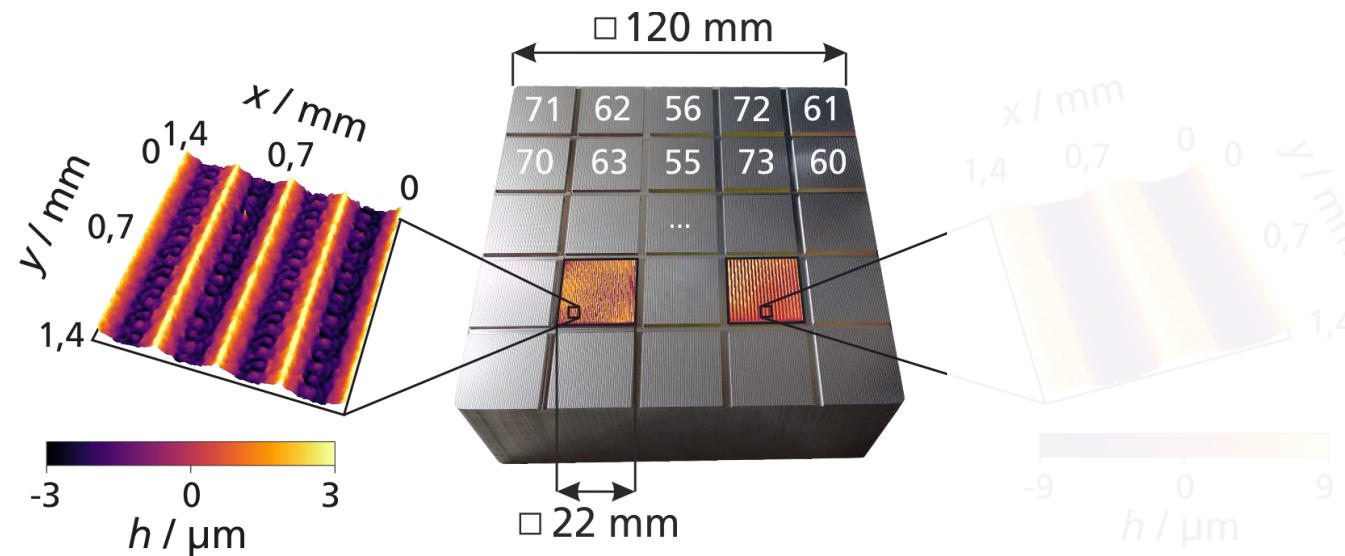


Digital Holography in Production: An Overview; M. Fratz, T. Seyler, A. Bertz, D. Carl; Light: Advanced Manufacturing, 2021.

Das HoloTop-System

HoloTop-NX | Prozessüberwachung

- Fertigung von vier gleichen Proben je 25 Felder zur Bewertung des Verschleißes eines Werkzeuges

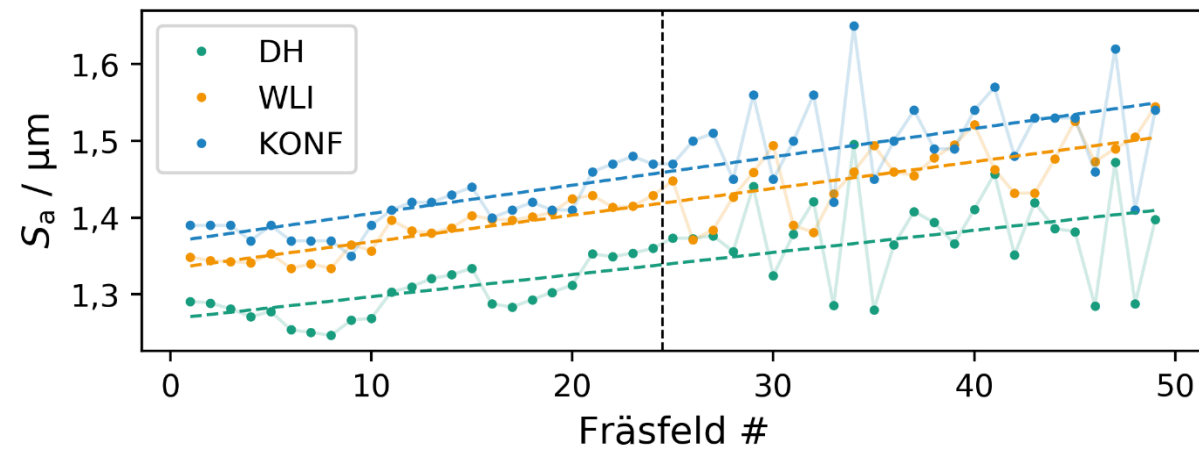


- Vergleich mit (Labor-)Referenzsystemen (konfokal, Weißlichtinterferometer)

Das HoloTop-System

HoloTop-NX | Prozessüberwachung

- gleichmäßiger Anstieg der Oberflächenrauheit durch Fräser Abnutzung nach 2 Proben

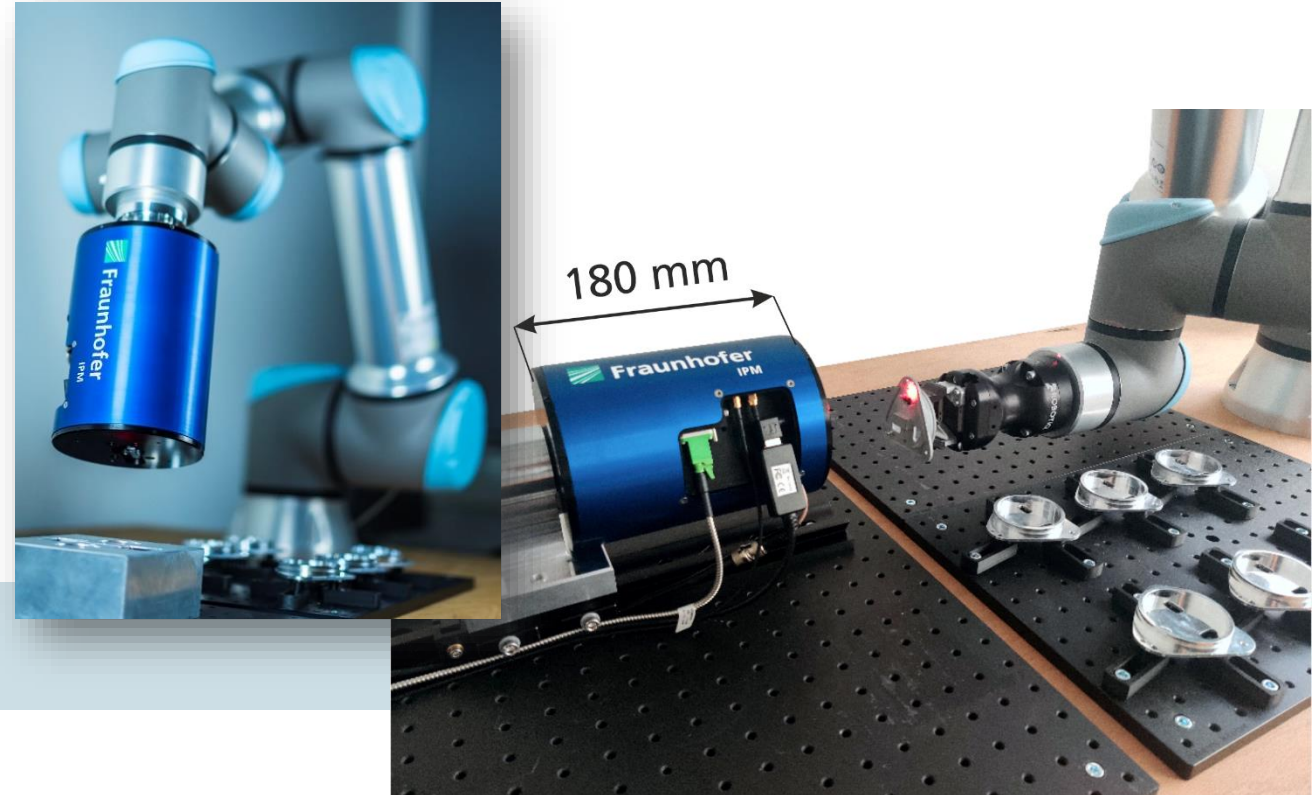


- quantitativ gute Korrelation auch bei kleinen Rauheitswerten

Digitale Holographie - Bildgebende Koordinatenmesstechnik der Zukunft

Inhaltsverzeichnis

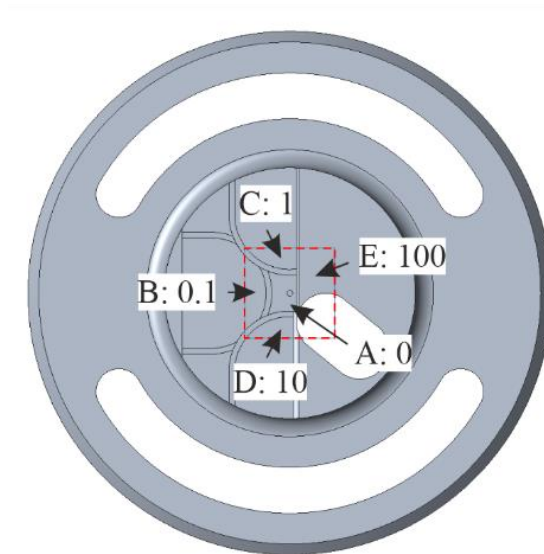
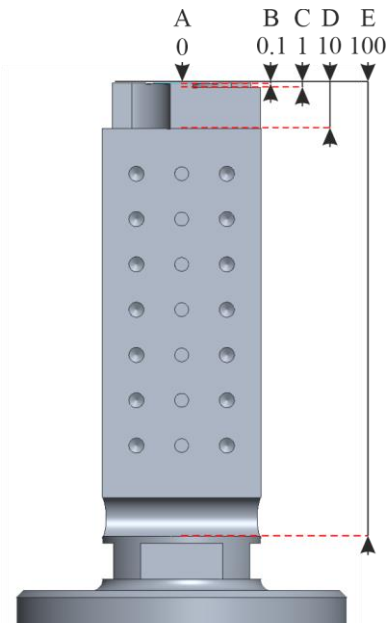
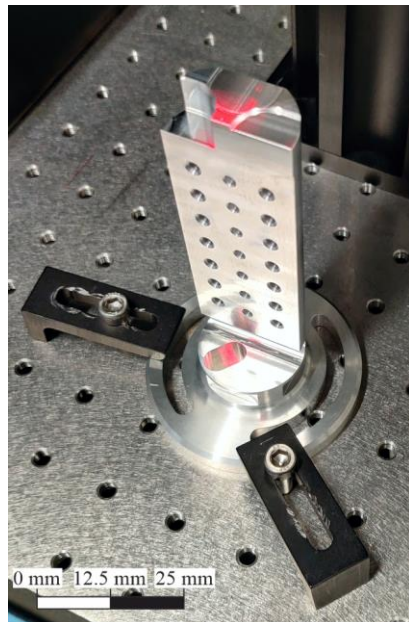
1. Was ist digitale Holographie?
2. Anwendungsbeispiele
3. Das HoloTop-System
4. Aktuelles & Ausblick



Aktuelles & Ausblick

Mikrometer auf Meter

- gefertigt in Hermle C32 U 5-Achsen Werkzeugmaschine am Fraunhofer IPM
- beinhaltet 5 Stufen von 0,1 mm bis 100 mm (A: 0 mm – Referenz, B: 0,1 mm, C: 1 mm, D: 10 mm, E: 100 mm)

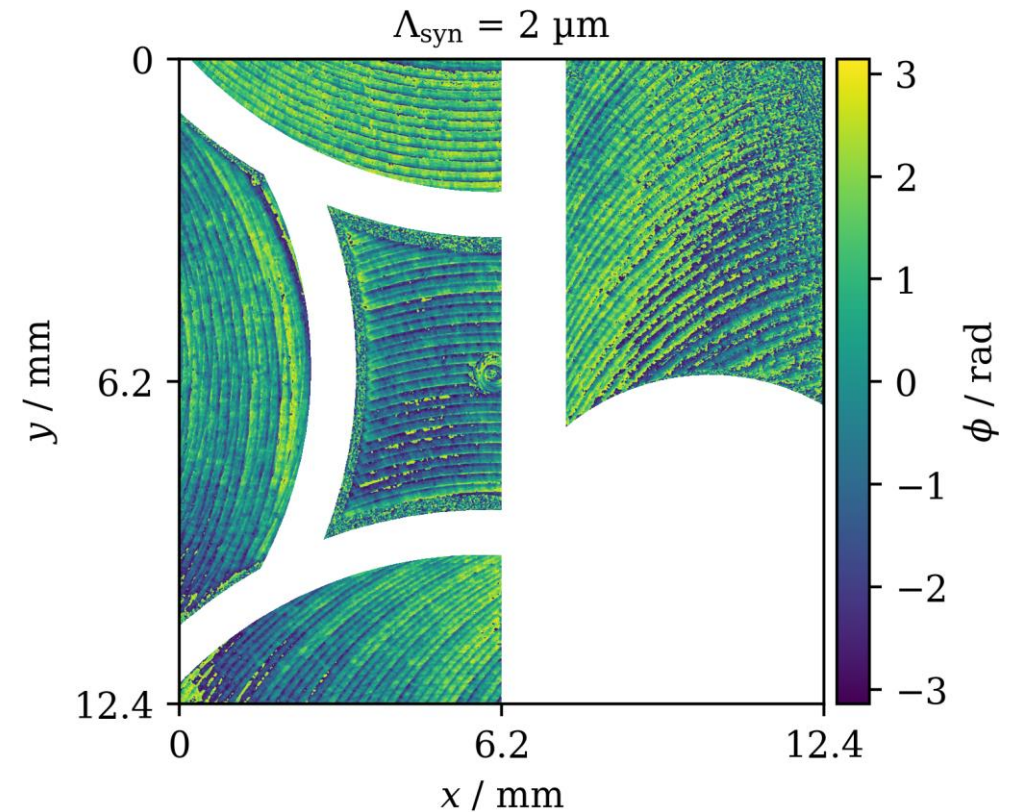
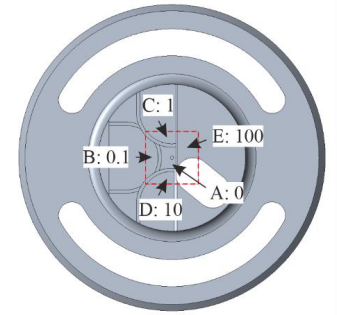


Aktuelles & Ausblick

Mikrometer auf Meter

- Numerisches Fokussierung über 10 cm weit außerhalb der geometrischen Schärfentiefe ($\sim 250 \mu\text{m}$)
- Heterodyning und All-in-focus Auswertung
- Auswertung mehrerer synthetischer Wellenlängen zeigen Bearbeitungsspuren im Mikrometerbereich
- Auswertung:

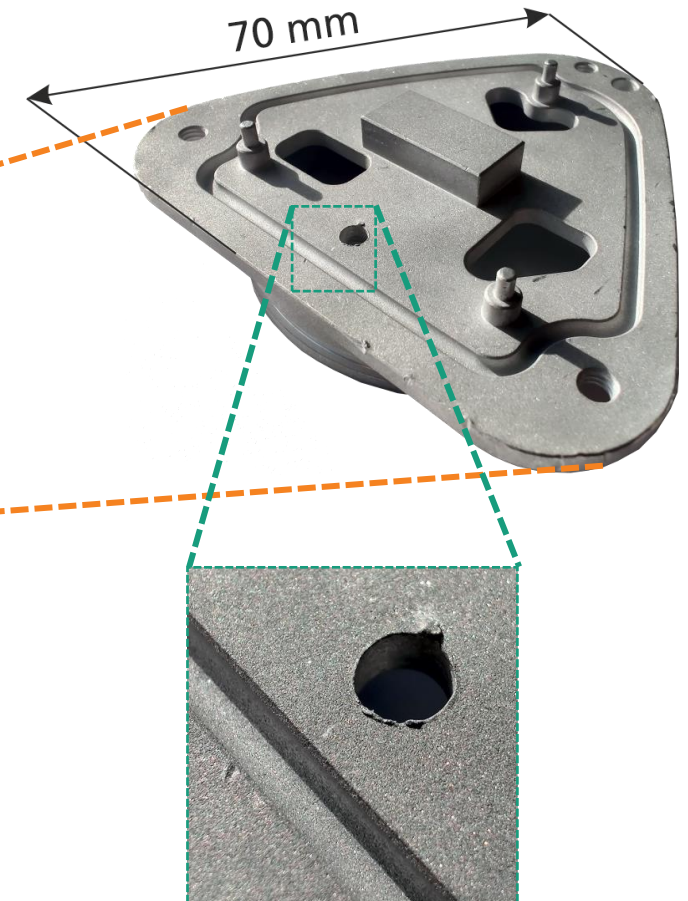
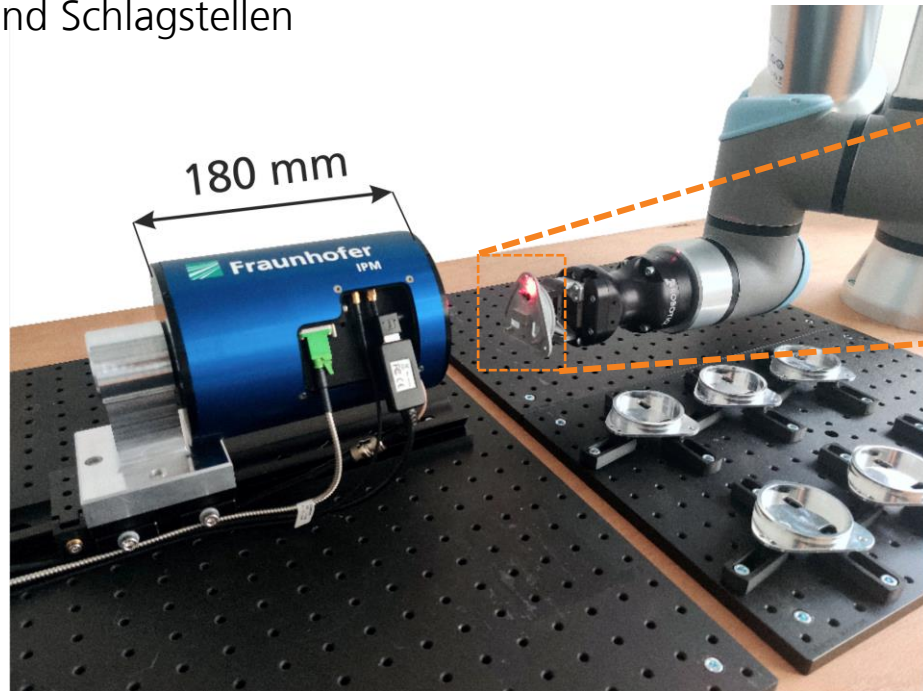
	Höhe / mm				
	A	B	C	D	E
Target	-11	-10.9	-10	-1	89
Mess- ergebnisse	-11.000	-10.900	-9.998	-0.975	89.009



Aktuelles & Ausblick

Holographie am Roboter

- Universal Robot UR16e
- gefrästes, gestrahltes Teil mit Funktionsflächen und Schlagstellen



Aktuelles & Ausblick

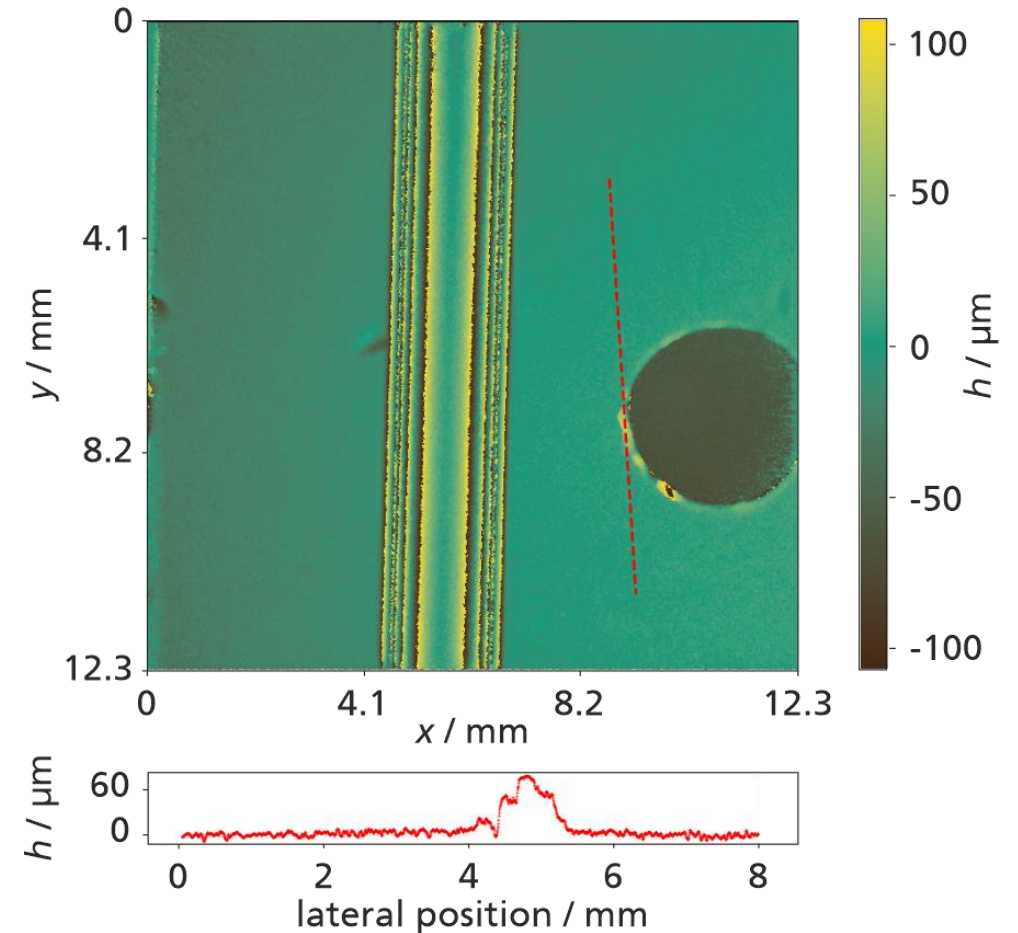
Holographie am Roboter

Randbedingungen:

- manuelle Datenbewertung und -selektion
- automatische Datenbewertung noch nicht in die Messdatenerfassung integriert
- 10% vertrauenswürdige Messungen (≈ 1 ms Belichtung)

klar sichtbare Merkmale in der Messung:

- Grat im zweistelligen Mikrometerbereich
- Ebenheit von wenigen Mikrometern



Aktuelles & Ausblick

Holographie am Roboter

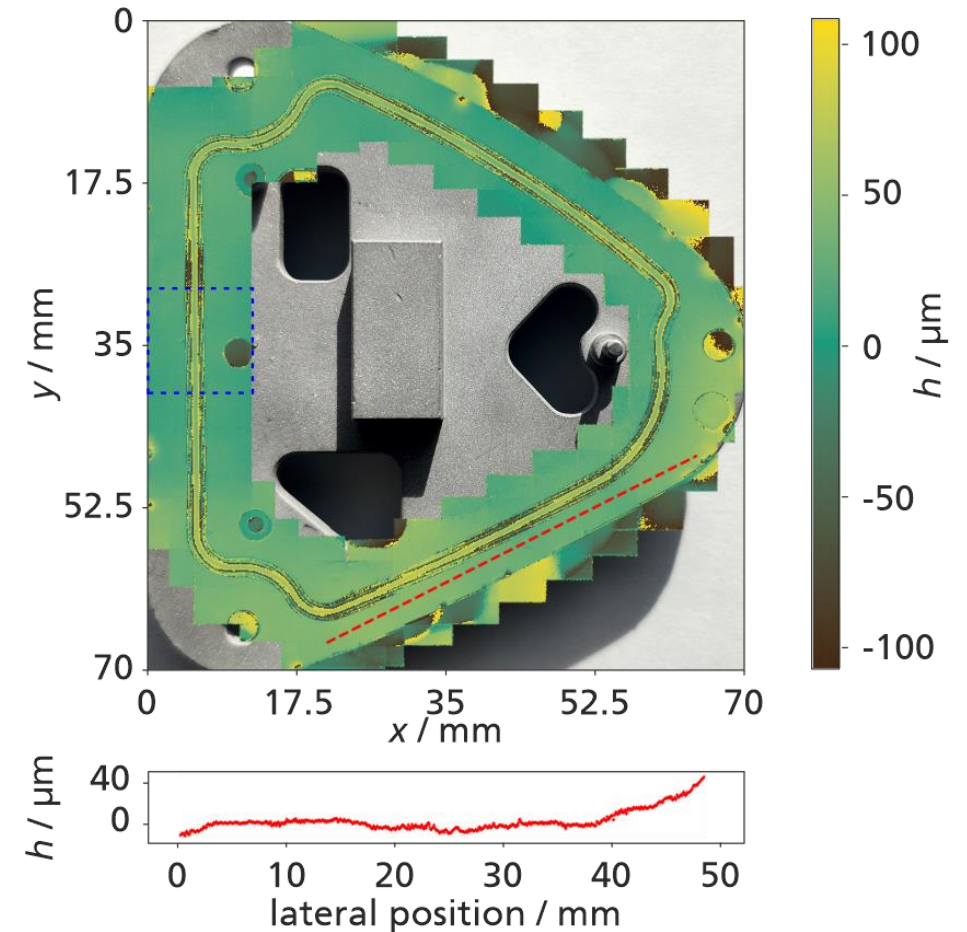
Randbedingungen:

- manuelle Datenbewertung und -selektion
- automatisierte Pfaderzeugung und Bewegung
- 34 Messpositionen (20 Minuten Datennahme)

klar sichtbare Merkmale in der zusammengesetzten Messung:

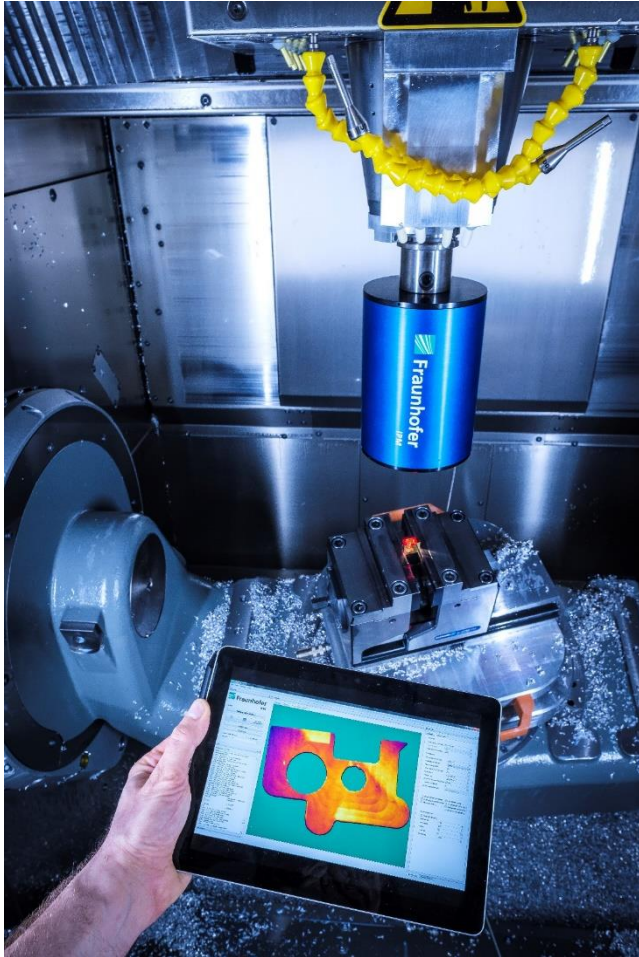
- Ebenheit über mehrere Zentimeter im zweistelligen Mikrometerbereich
- kaum Artefakte beim automatischen Stichen

Nächste Schritte: automatisierte, kaskadierte Datenaufnahme



Digitale Holographie - Bildgebende Koordinatenmesstechnik der Zukunft

Zusammenfassung



Digitale Holographie bietet flächige 3D-Messung mit Genauigkeiten $< 1 \mu\text{m}$ in unter 100 ms.

Aktuelle Systeme lassen sich in anspruchsvollen Umgebungen sicher betreiben (Inline, Werkzeugmaschine, KMG, Roboter?).

Digitale Holographie hat sehr gute Voraussetzungen eine der wichtigsten Koordinatenmesstechniken der Zukunft zu werden.

Kontakt

Andreas Hofmann

Abteilung Produktionskontrolle

Geschäftsfeldentwickler

Tel. +49 761 8857-136

andreas.hofmann@fraunhofer.de

www.ipm.fraunhofer.de | [LinkedIn](#) | [Twitter](#) | [YouTube](#)

Einstiegslektüre & weiterführende Literatur

Grundlagen:

- (1) T. Kreis. Handbook of holographic interferometry: Optical and digital methods. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. isbn: 3527405461. doi: 10.1002/3527604154.
- (2) D. Malacara, Hrsg. Optical shop testing. 3. ed. Wiley Series in Pure and Applied Optics. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007. isbn: 978-0-471-48404-2. doi: 10.1002/9780470135976
- (3) J. W. Goodman. "Some fundamental properties of speckle". In: Journal of the Optical Society of America 66:11 (1976), S. 1145–1150. issn: 0030-3941. doi: 10.1364/JOSA.66.001145.

Ausgewählte Publikationen zur digitalen Holographie:

- (4) W. Osten, A. Faridian, P. Gao, K. Körner, D. Naik, G. Pedrini, A. K. Singh, M. Takeda und M. Wilke. "Recent advances in digital holography [invited]" In: Applied Optics 53:27 (2014), G44–63. issn: 0003-6935. doi: 10.1364/AO.53.000G44.
- (5) T. Tahara, X. Quan, R. Otani, Y. Takaki und O. Matoba. "Digital holography and its multidimensional imaging applications: a review". In: Microscopy 67:2 (2018), S. 55–67. doi: 10.1093/jmicro/dfy007
- (6) T. Zhang und I. Yamaguchi. "Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography". In: Optics Letters 23:15 (1998), S. 1221–1223. issn: 0146-9592. doi: 10.1364/ol.23.001221

Ausgewählte Publikationen des Fraunhofer IPM:

- (7) Markus Fratz, Tobias Seyler, Alexander Bertz, Daniel Carl. Digital holography in production: an overview[J]. Light: Advanced Manufacturing 2, 15(2021). doi: 10.37188/lam.2021.015
- (8) Fratz, M.; Beckmann, T., Anders, J., Bertz, A., Bayer, M., Gießler, T., Nemeth, C., Carl, D., 2019, Inline application of digital holography [Invited], Applied Optics, Vol. 58, No. 34, pp. G120-G126. (OSA Spotlight, 2x in Top Ten Appl. Opt.-Downloads)
- (9) Seyler, T., Bienkowski, L., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D., 2019, Multiwavelength digital holography in the presence of vibrations: Laterally resolved multistep phase-shift extraction, Applied Optics, Vol. 58, No.34, pp. G112-G119.
- (10) Schiller, A., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D., Buse, K., 2019, Multi-wavelength holography: Height measurements despite axial motion of several wavelengths during exposure, Applied Optics, Vol. 58, No. 34, pp. G48-G51.