

Herausforderungen und Lösungsansätze für die fertigungsnahe Qualitätskontrolle mittels optischer 3D-Messtechnik

W. Lyda¹, D. Fleischle^{1,2}, M. Gronle¹, F. Mauch¹, K. Körner¹, W. Osten¹

¹Institut für Technische Optik, Stuttgart Research Center of Photonic Engineering, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart

²Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, Universität Stuttgart, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

lyda@ito.uni-stuttgart.de / +49 (0) 711 685 66594

Einleitung

Die Fortschritte im Bereich der optischen Oberflächenmesstechnik haben vielfach dazu geführt, dass optische Sensoren den Sprung aus dem Labor in fertigungsnahe Anwendungen geschafft haben und taktile Sensoren immer häufiger ablösen. Durch die berührungslose Oberflächenabtastung können auch empfindliche Oberflächen ohne Beeinträchtigung hochgenau erfasst werden und die flächenhafte Datenaufnahme ermöglicht neue Kriterien zur Objektcharakterisierung bei kurzen Taktzeiten. Neben der eigentlichen Messzeit ist die Gesamtzeit von der Bearbeitung eines Werkstücks über dessen messtechnische Erfassung bis zur Nutzung der Informationen in der Fertigungslinie entscheidend. Nur durch kurze Informationswege kann eine frühzeitige Korrektur im Prozess vorgenommen werden. Um dies zu gewährleisten, muss die Messung so nah wie möglich am Fertigungsprozess erfolgen. Dadurch sind Einwirkungen aus den Umgebungsbedingungen nahe am Fertigungsprozess größer als unter kontrollierten Laborbedingungen. Diese Rahmenbedingungen wirken sich zusammen mit zunehmendem Integrationsgrad der Sensorik auch auf die Anforderungen an die Sensorparameter (z.B. Sensorpositionierung, Arbeitsabstand und Bauraum) aus. Im folgenden Beitrag werden am Beispiel zweier unterschiedlicher Implementierungen für die prozessintegrierte Sensorik die Anforderungen und Lösungsansätze vorgestellt und diskutiert.

Prozessintegrierte Sensorik

Je nach Art der Implementierung unterscheidet man bei der Prozessintegration zwischen Offline-, In-Situ- und In-Prozess-Strategien [1].

Bei der Offline-Implementierung steht das Messgerät auf konventioneller Art neben der Fertigungslinie. Auf Grund der benötigten Zeit für den Transport des Werkstücks besitzt diese Implementierung den weitesten Informationsweg. Daher eignet sich diese Strategie vor allem für Stichproben. Durch das notwendige Aus- und Einspannen des Messobjektes ist eine lokal begrenzte Nachbearbeitung des Werkstücks nicht ohne weiteres möglich.

Bei der In-Situ-Implementierung wird der Sensor in die Fertigungsmaschine integriert. Bearbeitung und Messung laufen getrennt voneinander ab. Im Gegensatz zur Offline-Überwachung wird das Werkstück nicht aus der Maschine entnommen. Dadurch ist eine Nachbearbeitung, basierend auf den Messergebnissen in einem weiteren Bearbeitungsschritt, ohne aufwendiges erneutes Einmessen des Werkstücks in das Maschinenkoordinatensystem möglich. Zudem erfolgt eine deutliche Verringerung der Zeit bis zur Rückmeldung.

Die kürzesten Informationswege werden bei der In-Prozess-Technik erreicht. Fertigung und Messung finden dabei nahezu gleichzeitig statt. Die Messdaten können direkt in die Optimierung der Fertigungsparameter eingebracht werden. Damit die Messung und die Fertigung nahezu zeitgleich ablaufen, muss der Sensor nah am Werkzeugeingriff positioniert werden. Dadurch entstehen Vorgaben an den Bauraum und den Arbeitsabstand des Sensors. Außerdem muss der Sensor dem Fertigungsfahren entsprechend gegen Kühlschmiermittel oder andere Medien sowie mechanische Zerstörung geschützt werden. Auf Grund der umgebungs- und prozessbedingten Bewegungen zwischen Sensor und Messobjekt (Vibrationen, Werkstückbewegung beim Drehen) ist in der Mehrzahl der Fälle eine „Single-Shot“-Messung notwendig.

Bei der In-Situ-Messung lässt die zeitliche Trennung zwischen Messung und Fertigung die Möglichkeit zu, scannende Sensoren zu verwenden. Im Rahmen des gegebenen Maschinenbauraums ist auch eine gewisse räumliche Trennung zwischen Sensor und Werkzeug möglich, wodurch der Sensor besser gegen Verunreinigung und Beschädigung geschützt werden kann.

Sowohl die In-Situ- als auch die In-Prozess-Implementierungen bieten eine kurze Signallaufzeit im Vergleich zur Offline-Strategie, andererseits spielen die Umgebungseinflüsse aus der Fertigung wie Vibrationen und Temperaturschwankungen hier eine deutlich größere Rolle.

Sowohl die In-Situ- als auch die In-Prozess-Implementierungen bieten eine kurze Signallaufzeit im Vergleich zur Offline-Strategie, andererseits spielen die Umgebungseinflüsse aus der Fertigung wie Vibrationen und Temperaturschwankungen hier eine deutlich größere Rolle. Zur Auswahl der optimalen Integrationstrategie - zusammen mit dem passenden Messprinzip und der Auslegung der Sensorparameter - ist somit eine umfassende Betrachtung des Fertigungsprozesses und seiner Randbedingungen notwendig. Gleichzeitig müssen auch die Auswirkungen der Oberflächencharakteristik des Messobjekts auf das Messsignal berücksichtigt werden. In [2-7] sind Beispiele für Messartefakte aufgrund unterschiedlicher Oberflächencharakteristika für verschiedene Sensorprinzipien dargestellt.

In Abbildung 1 ist ein Ansatz für die systematische Analyse der Topographiedaten-Entstehung und der wichtigsten Einflüsse auf die Qualität des Messergebnisses dargestellt. Methoden, um auf Basis dieses Schemas einen passenden Sensor auszuwählen und zu charakterisieren, wurden u.a. von Fleischle et al. [9] vorgestellt.

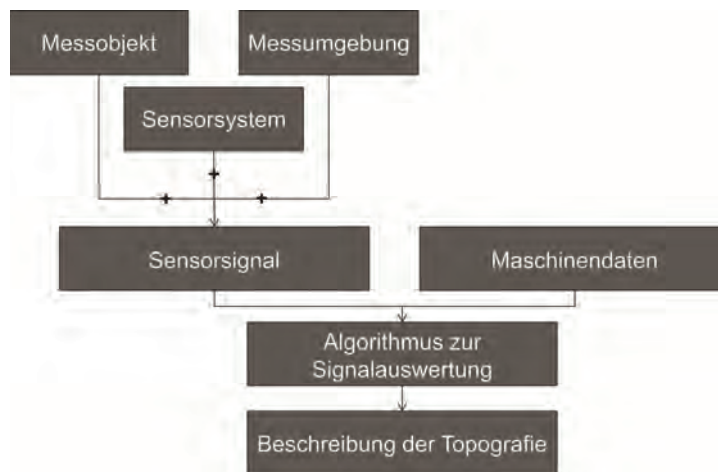


Abbildung 1: Signalentstehung und Einflüsse auf die Qualität des Messergebnisses

Beispiel für eine In-Situ-Implementierung

Im folgenden Beispiel wird gezeigt, wie mithilfe der prozessintegrierten Messtechnik die Herstellung von Diamantwerkzeugen, die unter anderem beim Hochpräzisionsdrehen von Optiken eingesetzt werden, verbessert werden kann [10]. Die relevanten Größen dieser Werkzeuge sind dabei der Freiwinkel, die Werkzeuggeometrie sowie Schneidkantenwelligkeit. Um eine präzise Nachbearbeitung der Werkzeuge zu ermöglichen, ist eine Messung des Werkzeugs ohne Ausspannen erforderlich. Eine besondere Herausforderung bei der Implementierung einer derartigen In-Situ-Messtechnik stellt dabei die große Vielfalt an vordefinierten Schneidkanten geometrien dar, welche mit Auflösungen im zweistelligen Nanometerbereich erfasst werden sollen. Auf Basis dieser Anforderungen (siehe auch Tabelle 1) wurde eine In-Situ-Strategie entwickelt, welche die vollständige Erfassung der Schneidkanten geometrie ermöglicht.

Tabelle 1: Anforderungen an das Messsystem

Größe (Länge x Breite x Höhe)	max. 400x200x200 mm ³
Gewicht	< 6 kg
Laterale Auflösung des 2D-Systems	500 nm
Laterale Auflösung des 3D-Systems	1 µm
Z-Messbereich	100 µm
Winkelauflösung Schneidgeometrie	0,02 °
Abgeleitete Höhenauflösung (gesamt System)	~ 35 nm
Messzeit	< 30 s

Dazu wurde ein kommerzielles Weißlichtinterferometer zu einem hybriden Messsystem weiterentwickelt und in die im Projekt iTool entwickelte 6-Achsen-Diamantschleifmaschine integriert (Abbildung 2). Um die Messaufgabe lösen zu können, wurde ein zusätzlicher Messmodus, basierend auf digitaler Bildverarbeitung, in das Messsystem implementiert. Dadurch ist es möglich, unabhängig vom Krümmungsradius der Schneidengeometrie ein zuverlässiges Messergebnis zu erzielen. Zusätzlich wurde ein „Stitching“-Verfahren entwickelt, welches mithilfe der Präzisionsachsen der Maschine das Objekt aus unterschiedlichen Ansichten erfasst und die Daten anschließend zusammenfügt.

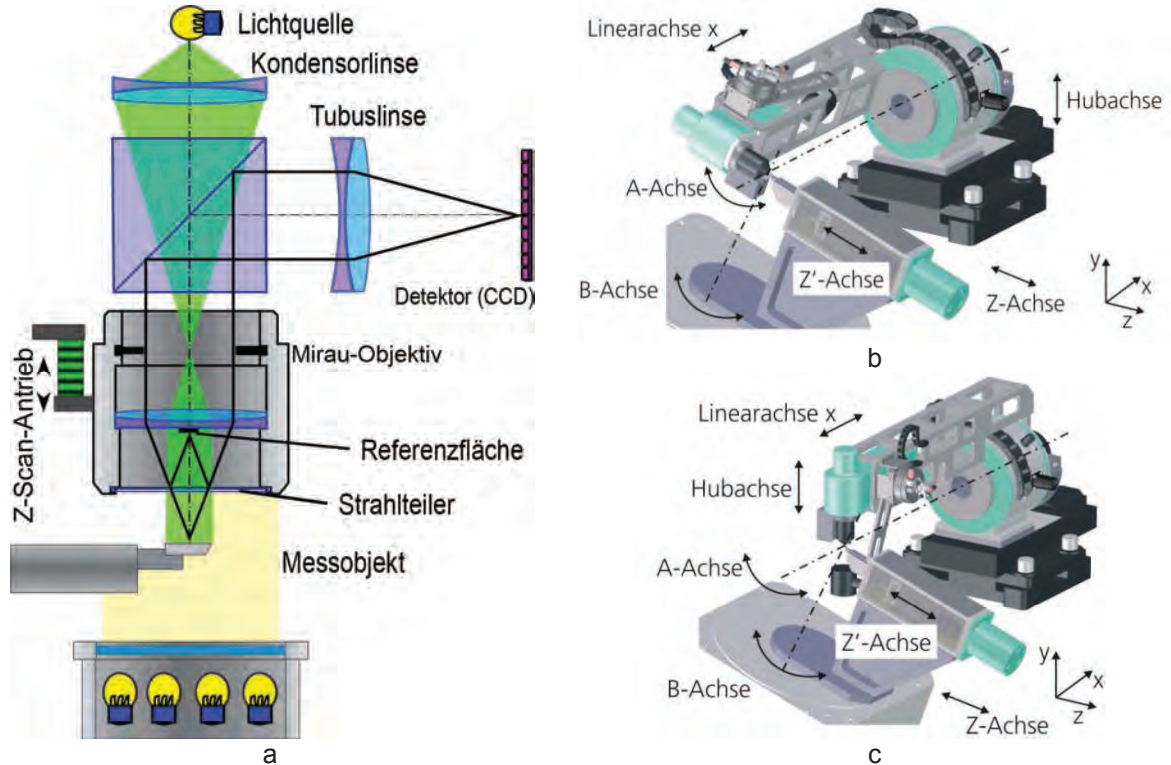


Abbildung 2: Integration des hybriden Messsystems, (a) Skizze des Systems, (b) Messposition zur Schneidkantengeometrie mittels Weißlichtinterferometrie (Quelle IPT-Aachen), (c) Messposition zur Bildverarbeitung (Quelle IPT-Aachen)

Um beim Stitching über die Positionsgeber der Achsen Genauigkeiten im Nanometerbereich zu erreichen, müssen die Achsen entsprechend gute Wiederholgenauigkeiten der Positionierung aufweisen. Zur Optimierung der Achsenspezifikationen und Abschätzung des Fehlerbudgets wurde eine Modellierung des Stitchingprozesses entwickelt [10]. Das Modell schließt sowohl Sensorrauschen als auch Positionierfehler während der Sensorreferenzierung im Maschinenkoordinatensystem und während des Messprozesses mit ein. In Abbildung 3 sind beispielhaft die Einflüsse von Positioniergenauigkeiten der B-Achse (Abbildung 2c) als auch des Messrauschens auf das Stitching dargestellt.

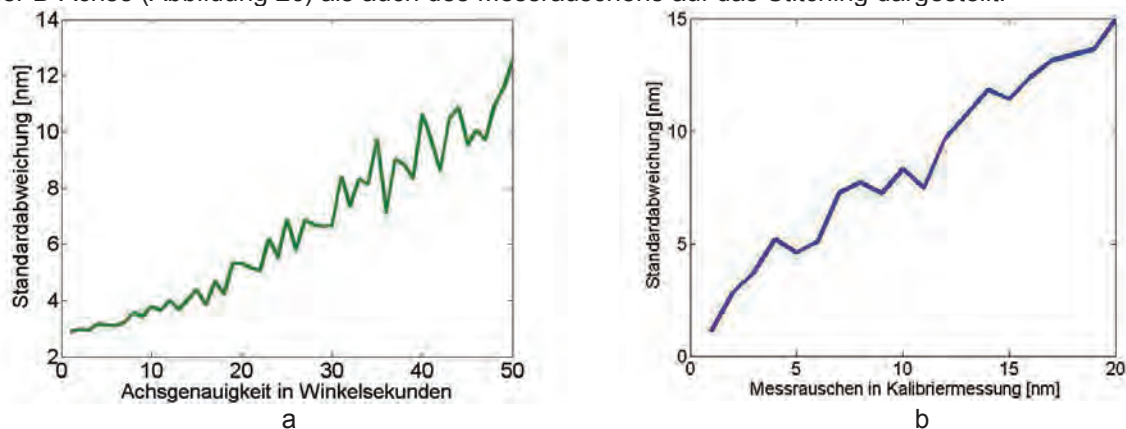


Abbildung 3: Auswirkungen von (a) Positionierfehlern und (b) Messrauschen in der Kalibrierung auf die Messunsicherheit (Standardabweichung) beim Stitching-Prozess

Beispiel für eine In-Prozess-Implementierung

Wie bereits beschrieben, ermöglicht die In-Prozess-Implementierung eine noch schnellere Rückführung von Messdaten in den Prozess. Ein mögliches Anwendungsfeld für diese Strategie ist die Überwachung der Oberflächenqualität und der geometrischen Abmaße bei spanenden Bearbeitungsprozessen. Von Dreier et al. [8] wurde eine Integration eines Laser-Doppler-Punktsensors in eine Drehmaschine zur Erfassung des Werkstückdurchmessers während der Bearbeitung vorgestellt. In Fleischle et al. [11] wird eine Integration eines chromatisch-konfokalen Punktsensors in eine Drehmaschine vorgeschlagen (s. Abbildung 4). Der chromatisch-konfokale Punktsensor (CCM-Sensor) hat einen Durchmesser von weniger als 2mm und eine Länge von unter 14mm und kann dadurch direkt in die Werkzeugaufnahme integriert werden. Dadurch kann mit dem CCM-Sensor gegenüber dem Laser-Doppler-Sensor eine weitere Verkürzung der Signallaufzeit erreicht werden. Bei beiden Ansätzen wird der Messpunkt über die Bewegung der Bearbeitungsachsen über das Werkstück geführt. Aus der Fusion von Sensormessdaten und Maschinendaten wird dann die Overflächengeometrie rekonstruiert.

Um den Einfluss der Bearbeitungskräfte und des Spindelrundlaufs auf die Messergebnisse zu reduzieren, ist es notwendig, den Spindelschlag zu bestimmen und gegebenenfalls zu minimieren. Dies ist besonders dann wichtig, wenn neben der Geometrie lokale Rauheiten oder Welligkeiten bestimmt werden sollen.

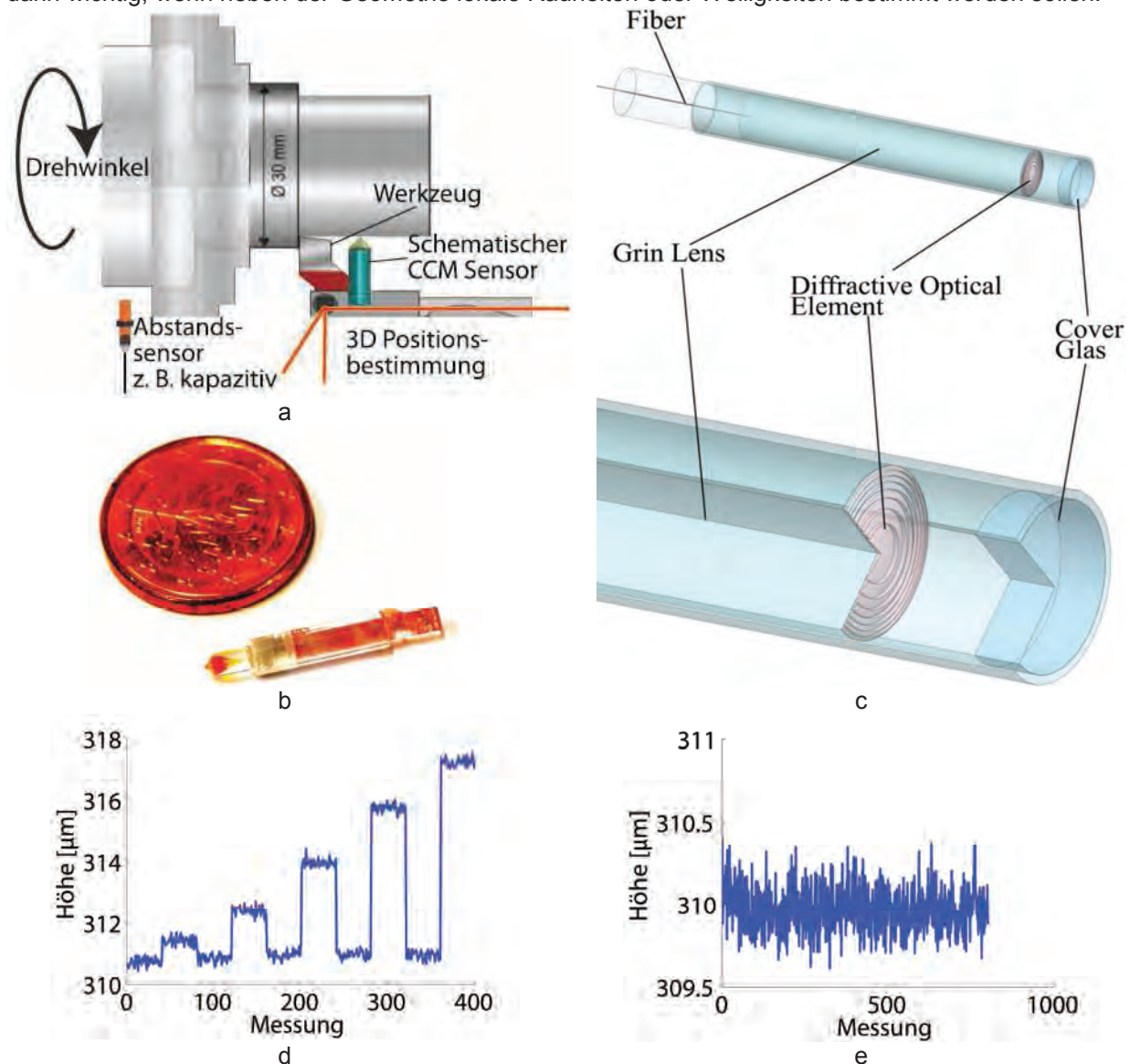


Abbildung 4: (A) Integrationskonzept des CCM-Sensors, (b) Foto des CCM-Sensors mit Vergleichsobjekt, (c) Aufbau des miniaturisierter CCM-Sensors, (d) Referenzmessungen mit dem CCM-Sensor und (e) Sensorrauschen

Da der Sensor nur den Abstand zwischen Werkzeugaufnahme und Werkstückoberfläche ermittelt, ist außerdem eine zusätzliche Erfassung der Werkzeugaufnahmen-Position im

Maschinenkoordinatensystem notwendig. Für den Fall, dass nur Änderungen im Werkstückdurchmesser durch Verschleiß am Werkzeug oder nach dem Werkzeugwechsel gemessen werden sollen, reicht die Genauigkeit der maschineninternen Maßstäbe aus. Wenn eine Absolutmessung der Werkstückdurchmesser zur Korrektur der Maschinenfehler erreicht werden soll, ist eine zusätzliche Messung der Werkzeughalterposition im Maschinenraum mit einem separaten Messsystem notwendig, um Fertigungsfehler und Spiel der Werkzeugschlittenführungen durch Kräfteinwirkungen zu eliminieren. In Abbildung 4a sind die entsprechende Messsystemanordnung für eine vollständige Rückführbarkeit der Messdaten dargestellt.

Zusätzliche Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Prozessintegrierten Sensorik sind in [11, 12] zusammengefasst. Besonders kritisch wird hierbei der Temperaturdrift (z.B. durch Erwärmen der Werkzeugaufnahme), welcher im Bereich von $0,5\mu\text{m} - 1\mu\text{m}$ je Kelvin liegt, die Vereinerlichung der Werkstückoberfläche durch Schmiermittel und die optischen Wechselwirkungen zwischen Messobjektoberfläche und Sensor bewertet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die direkte Integration optischer Sensoren in den Fertigungsprozess bietet den Vorteil, dass die gemessenden Daten unmittelbar in den Prozess zurückgeführt werden können. Dadurch können Fertigungsfehler und Störungen im Fertigungsprozess frühzeitig erkannt werden. In diesem Beitrag wurde anhand zweier Beispiele gezeigt, dass die Umwelteinflüsse und die Referenzierung des Sensors im Maschinengesamtsystem eine kritische Komponente für die Zuverlässigkeit des Inspektionssystems sind. Zukünftige Arbeiten zielen auf die Steigerung der Robustheit der Sensorreferenzierung bei In-Situ-Implementierungen und die vollständige Integration des miniaturisierten chromatisch-konfokalen Sensors ab.

Danksagungen

Die Autoren danken der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart und dem BMWi (Innonet-Projekt „iTool“) für die finanzielle Unterstützung. Außerdem danken sie den Kollegen vom Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT, Aachen) und Herrn Reinhard Berger für die Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Osten, W., Garbusi, E., Fleischle, D., Lyda, W., Pruss, C., Reichle, R., Falldorf, C., "Optical metrology - from the laboratory to the real world", Proc. of SPIE 7387 (2010).
- [2] Ruprecht, A. K., Wiesendanger, T., Tiziani, H.-J., "Signal Evaluation for High-Speed Confocal Measurements", Appl. Opt 41 (35), S. 7410 (2002).
- [3] Lyda, W., Fleischle, D., Haist, T., Osten, W., "Chromatic confocal spectral interferometry for technical surface characterization", Proc. of SPIE 7432 (2009).
- [4] Harasaki, A., Wyant, J. C., "Fringe Modulation Skewing Effect in White-Light Vertical Scanning Interferometry", Appl. Opt 39 (13), S. 2101 (2000)
- [5] Pavlicek, P., Hýbl, O., "White-light interferometry on rough surfaces— measurement uncertainty caused by surface roughness", App. Opt. 47 (16), S. 2941–2949 (2008).
- [6] De Groot, P., "Chromatic dispersion effects in coherent absolute ranging", Opt. Lett 17 (12), S. 898. (1992).
- [7] Lehmann, P., "Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures", Opt. Lett. 35 (11), S. 1768 (2010).
- [8] Dreier, F., Günther, P., Pfister, T., Czarske, J. (2011), "Robust and Miniaturized Interferometric Distance Sensor for In-Situ Turning Process Monitoring", 10th IMEKO Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry (LMPMI 2011), Braunschweig, (2011)
- [9] Fleischle, D., Lyda, W., Mauch, F., Osten, W., "Optical metrology for process control: modeling and simulation of sensors for a comparison of different measurement principles", Proc. of SPIE 7718, 77181D-12 (2010).
- [10] Berger, R., Fleischle, D., Körner, K., Lyda, W., Osten, W., Sobotka, A. et al., „Interferometrische Messung von Freiform-Schneidkanten auf einer Diamanwerkzeugmaschine“, Technisches Messen 78 (10) (2011).
- [11] Fleischle, D., Lyda, W., Mauch, F., Osten, W., "Conceptual consideration for the integration of optical sensors for In-Process monitoring", Proc. of SPIE 8082 (2011).
- [12] Fleischle, D., Lyda, W., Mauch, F., Schaal, F., Osten, W., "Optical sensors for In-Process monitoring. Conceptual considerations for the implementation of optical sensors into the production environment", 10th IMEKO Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry (LMPMI 2011), Braunschweig (2011).