

Taktile und optische Sensoren für die Inline-Prozessüberwachung bei der spanenden Fertigung

Th. Frank¹, M. Fiedler¹, St. Völlmeke¹, A. T. Winzer¹, St. Görlandt, H.-G. Ortlepp¹, A. Steinke¹, L. Doering², H.-W. Lahmann³, S. Reich³,

¹CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt, tfrank@cismst.de

²Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

³GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V., Näherstiller Str. 10, 98574 Schmalkalden

Kurzfassung

Durch die Inline-Prozessüberwachung werden Abweichungen in der Fertigung frühzeitig erkannt. Eine Nacharbeit des Werkstücks oder ein Werkzeugwechsel können sofort veranlasst werden. Die Qualitätsregelschleife wird damit verkürzt, Fehlerkosten und Lieferverzug können so effektiv verringert und die Gesamtanlageneffektivität (OEE) erhöht werden. Dieser Artikel befasst sich mit Sensoren für die Inline-Prozessüberwachung bei der spanenden Fertigung, insbesondere mit der Messung kritischer Merkmale am Werkstück. Die Messung direkt in der Werkzeugmaschine ist der entscheidende Vorteil. Kein Werkstück verlässt den Prozess ungeprüft, Fehler und Kosten durch Umspannen und Ausrichten entfallen. Vorgestellt werden ein optisches und ein taktiles Verfahren zur Messung der Rauheit und der Formabweichung.

Abstract

By inline process monitoring deviations are detected at an early stage in the production. A reworking of the workpiece or a tool change can be initiated immediately. The quality loop is shortened. Thereby, failure costs and delivery delay can be effectively reduced and overall equipment efficiency (OEE) can be increased. This article deals with sensors for in-line process monitoring in metal cutting, especially with the measurement of critical features on the workpiece. The measurement directly in the machine tool is the decisive advantage. No workpiece exits the process un-inspected. Errors and costs due to re-clamping and alignment are minimized. We present a visual and a tactile method for measuring the roughness and the form deviation.

Schlüsselwörter: Inline-Messung, taktile, optisch, Messung, piezoresistive, Formabweichungen, Rauheit, Mikrotaster, Oberfläche, Bohrung, 3D-Profil, Tastspitze, Laserdiode, VCSEL, Tastschnittgerät, Gestaltabweichungen

Einleitung

Das Ziel jeder Fertigung oder Produktion ist eine Ausbeute von 100%. Kann bei der Prozesseinrichtung in der Massenfertigung das erste Werkstück noch verworfen werden, ist diese Vorgehensweise bei der Einzelfertigung aufwändiger Güter katastrophal. Sensoren für die Inline-Prozessüberwachung werden benötigt. Besonders bei der spanenden Fertigung kann in den Phasen des Werkzeugwechsels die Inline-Messung zeitgerecht eingetaktet werden. Diese Maßnahmen befähigen die Maschinensteuerung insbesondere zu einem verschleißabhängigen Werkzeugwechsel. Ein Indiz für einen beginnenden Werkzeugverschleiß ist die Änderung der Rauheit der gerade bearbeiteten Werkstückoberfläche. Diese kann sowohl optisch als auch taktile gemessen werden. Je früher Abweichungen durch die Inline-Messung der kritischen Merkmale am Werkstück zwischen dem Werkzeugwechsel oder

in den Taktpausen werden erkannt werden, desto höher sind die möglichen Einsparungen.

Die wichtigsten Prüfmerkmale sind Rauheit und die Formabweichungen. Vielfach enthält die Makrostruktur eine untergeordnete Mikrostruktur für eine verbesserte Funktionalität. Verbreitet sind tribologischen Strukturen auf Führungsflächen zur Verminderung der Reibung bei gleichzeitiger Einsparung von Schmiermitteln.



Bild 1. Optischer Messkopf im modifizierten Werkzeugsystem und die Einzelkomponenten.

Der Nutzer erwartet vom Messsystem außer der Lösung der Messaufgabe noch geringe Abmessungen, hohe Messgeschwindigkeit und Robustheit. Die Zeit für den Messvorgang kann die Taktzeit verlängern. Dem entsprechend muss der durch die verringerten Fehlerkosten erzielte Kostenvorteil größer sein als die durch die Messung verursachten Prüfkosten. Die Inline-Prozessüberwachung bietet weitere Vorteile, wie die Vernetzung von Werkzeugmaschinen und eine verbesserte Produktionssteuerung insbesondere bei einer hohen Variantenvielfalt.

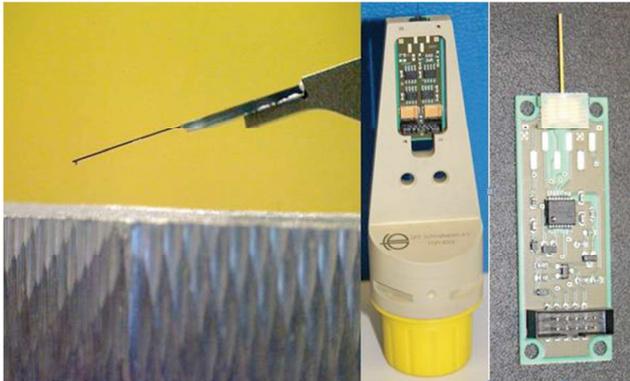


Bild 2. Links: Mikrotaster im Einsatz. Rechts: Mikrotaster im Werkzeugsystem.

Für die beschriebene Prozessüberwachung wurden optische und taktile Sensoren entwickelt. Beide sind kompatibel mit dem Schnellwechsel-Werkzeugsystem CoromantCapto® (Bild 1 und Bild 2).

Taktile Messung

Das Tastschnittverfahren zur messtechnischen Beschreibung von Oberflächen ist ein eingeführtes Verfahren. Bei der Rauheitsmessung wird eine Tastspitze mit konstanter Geschwindigkeit über die Oberfläche einer Probe (Werkstück) verfahren. Das Messprofil ergibt sich aus der vertikalen Lageverschiebung der Tastspitze, welche messtechnisch erfasst wird. In DIN EN ISO 3274 wird dieses Verfahren beschrieben. Abgeleitet werden können Gestaltabweichungen bis zur 4. Ordnung.

Die Rückführbarkeit auf Normen ist einer der Vorteile dieses Verfahrens. Bedingt durch die hohe bewegte Masse sind die in konventionellen Tastschnittgeräten verwendeten Tastspitzen zur schnellen Inline-Messung jedoch nicht geeignet. Dieser Nachteil kann durch die Kombination des konventionellen Messverfahrens mit dem neuen Silizium-MEMS-Mikrotaster [2] ausgeglichen werden.

Der Mikrotaster besteht aus dem Kragarm (Bild 3), der Tastspitze und der Messbrücke. Die piezoresistive Wheatstone'sche Messbrücke ist im Bereich maximaler mechanischer Spannung positioniert. In vorangegangenen Artikeln [2-6] ist die Funktion des Mikrotasters genauer beschrieben.

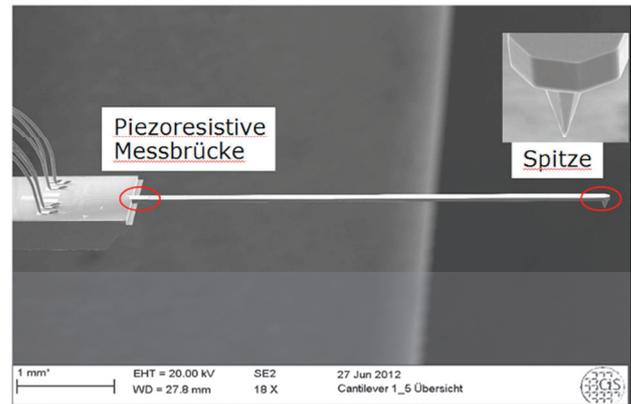


Bild 3. Silizium-MEMS-Mikrotaster.

Der Mikrotaster, insbesondere die Spitzengeometrie, kann nach der Norm hergestellt und der Messvorgang kann dann entsprechend der Norm durchgeführt werden. Die Tastspitze befindet sich zur Messung im Kontakt mit der Oberfläche. Formabweichungen bewirken eine Änderung der Verbiegung des Mikrotasters und somit eine Änderung der mechanischen Spannung im Bereich der Messbrücke. Das Brückensignal ist im Bereich kleiner Auslenkungen proportional zur mechanischen Spannung und somit zur Auslenkung der Tastspitze. Nach der Kalibrierung des Mikrotasters mit einem kalibrierten Tiefeneinstellnormal [6] steht ein Tastschnitt zur Verfügung. Mehrere Profilschnitte ergeben ein 3D-Profil der Werkzeugoberfläche.

Tabelle 1: Parameterübersicht des Mikrotasters.

Länge:	bis 5000 μm
Breite:	30 - 200 μm
Dicke:	15 - 50 μm
Empfindlichkeit	250 $\mu\text{V}/1\mu\text{m}$ @ $V_b=1\text{V}$
Auflösung ca.	2 nm
Geschwindigkeit	15 mm/s
Bandbreite	10 kHz

Dieses Messsystem schließt die Auflösungslücke zwischen einem herkömmlichen Atomkraftmikroskop (AFM) und einem Profilometer und erschließt für optische Sensoren bisher ungeeignete Anwendungsbereiche.

Taktile Messung von Frähteilen

Für die Inline-Messung in der CNC-Werkzeugmaschine wurden die Drehachse und die Vorschubachse des Fräskopfes zur Bewegung des Mikrotasters verwendet. Im Bild 4 sind beide Möglichkeiten dargestellt.

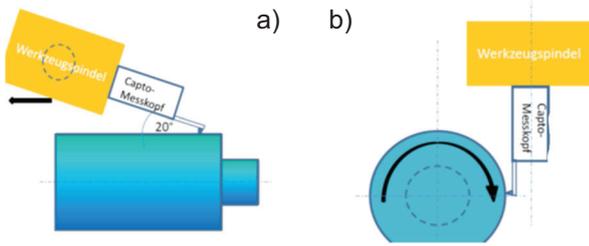


Bild 4. Anwendung des Mikrotasters in der CNC-Maschine.

Im Bild 5 ist das Ergebnis einer gescannten drehgefrästen Oberfläche gezeigt, das Werkstück ist in a) und die Messungen mit einem Weißlichtinterferometer und dem MEMS-Mikrotaster sind in den Spalten b) bzw. c) dargestellt. Der Mikrotaster ermöglicht, auf Grund seiner hohen Resonanzfrequenz von 3..5 kHz, eine Messgeschwindigkeiten von bis zu 15 mm/s.

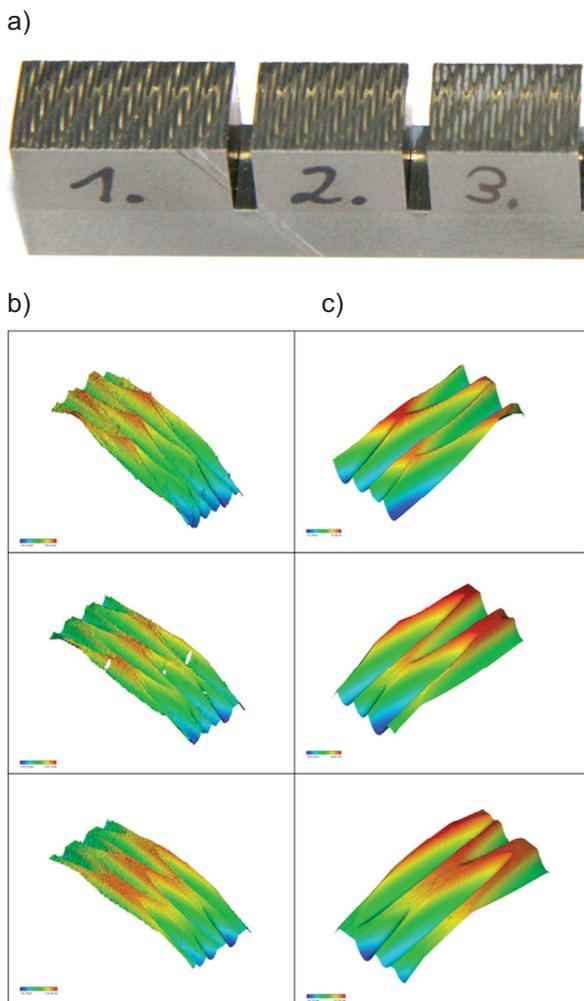


Bild 5. a) Drehgefräste tribologische Struktur in gehärteten Werkzeugstahl, b) optische Messung mit einem Weißlichtinterferometer, c) taktile Messung mit Mikrotaster aus Bild 3.

Zu sehen ist außerdem, dass die Mikrotaster-Messung weniger Artefakte als die Messung mit dem Weißlichtinterferometer aufweist.

Taktile Messung von Bohrungen

Die geometrische Vermessung von Bohrungen stellt eine besondere Herausforderung dar, insbesondere, wenn der Durchmesser unterhalb eines Millimeters liegt. Für etliche Anwendungen ist die Gestalt der inneren Oberfläche relevant für die Funktion. Für die Einhaltung der Qualität ist eine Vermessung unerlässlich.

Für die Vermessung kann der in Bild 3 gezeigte Mikrotaster eingesetzt werden. Das Bild 6 zeigt einen 3D-Scan einer Bohrung in Silizium, gefertigt durch Ultraschallschwingläppen. Der 3D-Scan ist aus 2D-Scans in Z-Richtung zusammengesetzt. Die Anzahl der Messpunkte in Z-Richtung pro μm kann bis zu 5 betragen. Die radiale Auflösung beträgt 1° . Das Bild 7 zeigt einen Ausschnitt, einen Scan in Z-Richtung.

Aus diesem Scan können alle Rauheitsparameter berechnet werden.

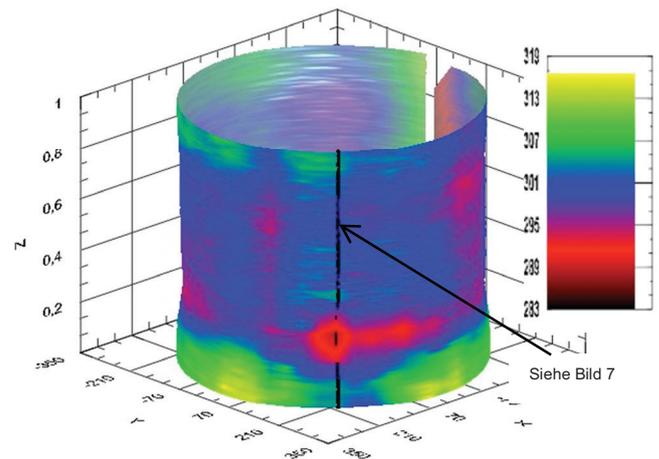


Bild 6. 3D-Scan einer Bohrung in Silizium, gefertigt durch Ultraschallschwingläppen.

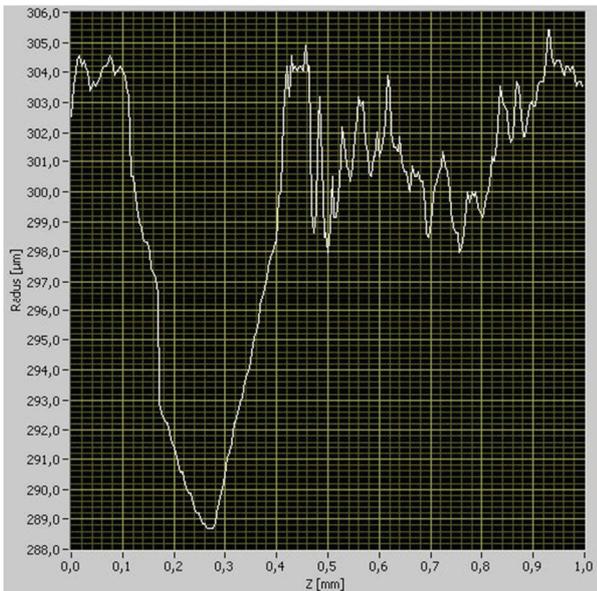


Bild 7. 2D-Linienscan, Ausschnitt der Bohrung.

Weitere Erkenntnisse können durch eine Abwicklung erlangt werden. In Bild 8 ist eine Abwicklung der Bohrung aus Bild 6 gezeigt. In allen drei Bildern können die gleichen geometrischen Merkmale betrachtet werden.

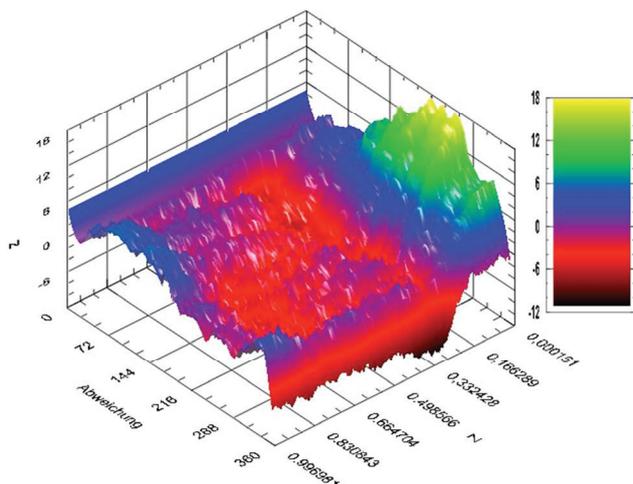


Bild 8: Abwicklung der Bohrung.

Optische Messung

Der optische Sensor misst über die Streustrahlung die Rauheit der bearbeiteten Oberfläche. Seine Sender-Empfängereinheit fokussiert einen Laserstrahl auf die zu messende Probe, nimmt die reflektierte Strahlung auf und wandelt sie in elektrische Signale um [1]. Der Sender besteht aus einer vertikal emittierenden Laserdiode (VCSEL), deren Licht mit einer Optikeinheit auf die Probenoberfläche fokussiert wird. Der Strahldurchmesser auf der zu prüfenden Werkstückoberfläche beträgt gegenwärtig 15 µm. Perspektivisch kann er auf

bis zu 5 µm verringert werden. Das Licht wird entsprechend der Werkstückoberflächentopographie zum Empfänger gestreut und von diesem aufgenommen und in elektrische Signale gewandelt. Damit können Gestaltabweichungen in der 3. und 4. Ordnung abgeleitet werden. In Tabelle 2 sind wichtige Sensorparameter angegeben.

Eine Rechnung der Strahlungsverteilung am Empfänger und der Aufbau der Strahlerquelle sind in Bild 9 dargestellt. Für die Simulation wurden taktil gemessene Oberflächendaten der Probe zu Grunde gelegt. Das zum Detektor gestreute Licht enthält einen intensitätsmäßig großen spekularen, d.h. spiegelnd reflektierten, Anteil, aber auch Beugungsstrukturen. Durch die spanende Bearbeitung entstehen auf der Werkstückoberfläche Rillen und Riefen. Diese und die Gefügestrukturen besitzen Ausdehnungen in der Größenordnung von knapp unter einer Wellenlänge bis zu einigen Wellenlängen des Laserlichts. Das von diesen Strukturen zum Detektor zurück gestreute Licht besitzt ein kompliziertes Intensitätsprofil.

Tabelle 2: Parameterübersicht eines optischen Sensors.

Auflösung	10 nm
Erfassbare Oberflächen	metallisch glänzend
Abmessungen des Sensors (LBH)	15 mm x 10 mm x 10 mm
Messwertspeicher	31200 Werte
Messgeschwindigkeit	bis 20 mm/s
Abtastrate	10 kHz

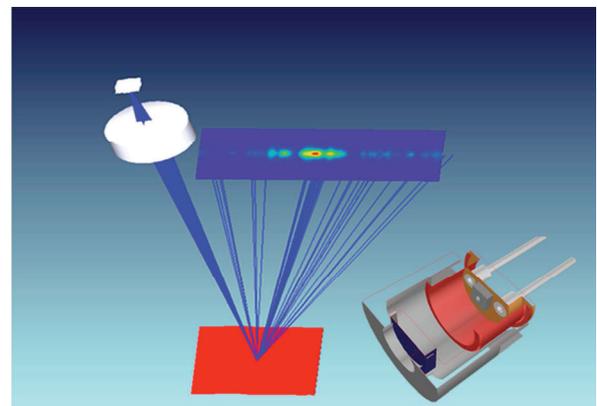


Bild 9. Simulation der Lichtverteilung auf dem Detektor und Schnittbild der CAD-Zeichnung der Strahlerquelle.

Bild 7 zeigt die sensornahe Elektronik, in der die elektrische Vorverarbeitung dieses Signals, die Steuerung der Komponenten und die Speicherung der Messwerte erfolgt. Sie ist in das Werkzeugsystem integriert. Der Mikrocontroller steuert die Stromquelle der Laserdiode, die Verstärkung (Gain) des Transimpedanzverstärkers (TIV), verarbeitet die digitalisierten Daten des ADC und kommuniziert mit dem Schnittstellenmodul. Als Schnittstellenmodul kommen USB- oder Blue-

tooth-Module zum Einsatz. Diese und die Ladeschaltung mit den Akkumulatoren sind ebenfalls in das Werkzeugsystem integriert.

Der Messablauf beginnt damit, dass der Messkopf aus seiner Halterung genommen und der über der optischen Komponente befindliche Schutz geöffnet wird. Ist der Messkopf über der Werkstückoberfläche positioniert, wird die Messung gestartet. Danach wird der Schutz geschlossen und der Kopf in seine Halterung zurück gebracht, die Messdaten werden an den Host-Computer gesendet und die Akkumulatoren aufgeladen.

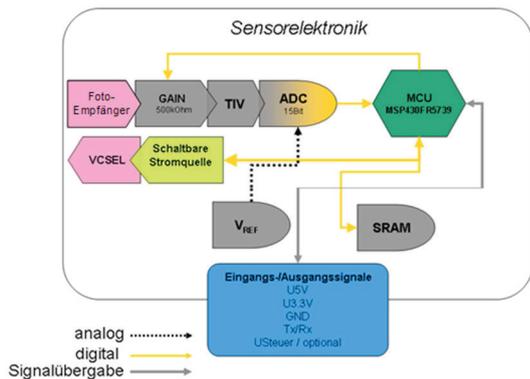


Bild 10. Schema der sensornahen Elektronik

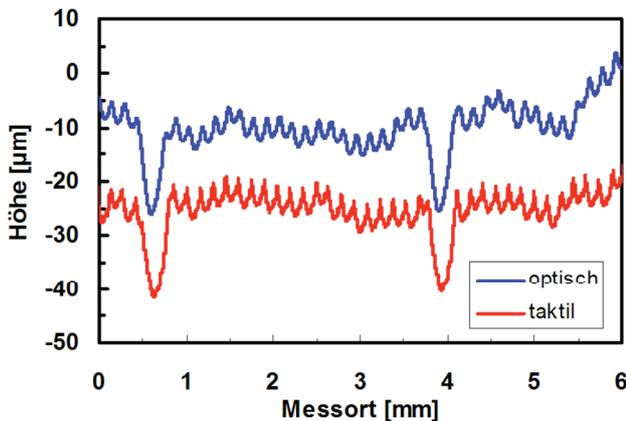


Bild 11. Vergleich der Messergebnisse des Tastschnittgerätes mit dem optischen Messkopf. Zur besseren Erkennbarkeit wurden die taktile Daten um 15 µm vertikal verschoben.

Bild 11 zeigt die Ergebnisse der Messung mit dem Tastschnittgerät im Vergleich zur optischen Messung. Die Übereinstimmung der Messprofile ist gut. Diese Messungen wurden für weitere Proben durchgeführt. Rauheitskenngrößen wurden nach DIN EN ISO 3274 für die taktile Methode und sinngemäß auch für die optische Methode bestimmt. Die Übereinstimmung der Rauheitskenngrößen ist gut. Für R_a lagen die Abweichungen

zwischen taktile und optischer Messung bei ca. 12%.

Der Vorteil der optischen Methode ist die berührungslose Messung, so dass ein empfindliches Werkstück nicht verändert wird als auch der Sensor nicht verschleißt. Diese Methode ist für glänzende Oberflächen und durch den Messkopf zugängliche Geometrien geeignet. Bei Licht absorbierenden Oberflächen oder Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (HARMS high aspect ratio micro structures) besitzen taktile Sensoren Vorteile.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Thüringer Aufbaubank für die finanzielle Unterstützung der Forschergruppe 2012 FGR 0011 „Energie- und ressourcensparende Tribosysteme durch intelligente Zerspanprozesse“ und beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung im Projekt „Entwicklung eines miniaturisierten optischen Rauheitssensors zur Klassifizierung bearbeiteter Oberflächen“ MF120007.

Literatur

- [1] R. Müller, E. Förster, O. Brodersen, und P. Schreiber, „Reflective Optical Sensor for Scattered Light with Integrated Micro-Optic“, gehalten auf der OPTO Kongress 2008 und IRS² Kongress, Nürnberg, 2008, S. 189–194.
- [2] T. Frank, L. Doering, G. Heinrich, N. Thronicke, C. Löbner, A. Steinke, S. Reich, und others, „Silicon cantilevers with piezoresistive measuring bridge for tactile line measurement“, *Microsyst. Technol.*, Bd. 20, Nr. 4–5, S. 927–931, 2014.
- [3] E. Peiner, M. Balke, und L. Doering, „Slender tactile sensor for contour and roughness measurements within deep and narrow holes“, *Sens. J. IEEE*, Bd. 8, Nr. 12, S. 1960–1967, 2008.
- [4] E. Peiner und L. Doering, „MEMS cantilever sensor for non-destructive metrology within high-aspect-ratio micro holes“, *Microsyst. Technol.*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1259–1268, 2010.
- [5] E. Peiner und L. Doering, „Nondestructive Evaluation of Diesel Spray Holes Using Piezoresistive Sensors“, *IEEE Sens. J.*, Bd. 13, Nr. 2, S. 701–708, 2013.
- [6] SiMetricS GmbH, Chemnitz, „Silizium Tiefennormal auf Glasträger.“