

Optoelektronischer Rauheitssensor auf Basis kompakter Strahler-Empfänger-Baugruppen

Matthias Will, Olaf Brodersen, Arndt Steinke

CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH, 99099 Erfurt, Konrad-Zuse-Straße

Zusammenfassung

In Konstruktion und Fertigung spielt neben der Maßhaltigkeit die Rauheit der Oberflächen eine tragende Rolle. Ihre Kontrolle und qualitative Vermessungen findet daher eine weite Verbreitung. Die Entwicklung der mechanischen Tastschnittverfahren und ihr kostengünstigerer Aufbau hat komplexe optische Verfahren wie Interferenzmikroskopie sukzessive verdrängt.

In der Oberflächencharakterisierung mechanisch gefertigter Bauteile werden in der Mehrzahl der Anwendungen Oberflächenrauheiten über mechanisches Abtasten ermittelt. Die verwendeten typischen Tastspitzendurchmesser von einigen Mikrometern spiegeln vorteilhaft die Anforderungen an Messgenauigkeit bzw. Auflösung wieder. Der Vorteil der höheren Auflösung von optischen Systemen spielt häufig keine Rolle. Dennoch sind Tastsysteme in der Online-Kontrolle oder Qualitätssicherung kaum vertreten. Ursache ist hier, dass die mechanische Abtastung von den Verschleiß der Tastspitzen und besonders von den erreichbaren Messgeschwindigkeiten nicht für eine automatisierte Kontrolle mit hohem Durchsatz geeignet ist. Eine Parallelisierung ist infolge der Systemkosten kaum vertretbar.

Lösungen könnten hier kompakte Stand-Alone Sensoren schaffen, die mit einfachen verschleißfreiem Aufbau und kostengünstiger Herstellung direkt in Werkzeugmaschinen oder Transportsystemen integriert werden können. Unter diesem Anspruch wurden am CiS-Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH Sensoren auf Basis einer VCSEL-basierten fokussierten Strahlquelle und einer angepassten Silizium-Photodiodenzeile entwickelt. Ein Singelmode VCSEL mit 670nm wird im Abstand von 5mm auf die Oberfläche des Prüfstückes fokussiert und das unter dem Ausfallswinkel reflektierte Licht mit einer 8-kanaligen Photodiodenzeile registriert. Die Position des Hauptreflexes auf den auf den Photodioden erlaubt eine ausreichende Optimierung des Fokus auf der Oberfläche. Bei der Bewegung der Probe mit bekannter Geschwindigkeit lassen sich Rauheitsabhängige Signale über die Zeit an den Photodioden aufnehmen. Es konnte gezeigt werden, dass hier Ortsfrequenzen deutlich unterhalb des Spotdurchmessers erreicht werden können.

1 Einführung

Zielstellung der Arbeiten ist ein Sensor zur Bestimmung von Oberflächenqualitäten. Im Gegensatz zu existierenden mechanisch tastenden Systemen oder optischen Profilometern soll nur die Oberflächenqualität bzw. die Rauheitskennwerte bestimmt werden. Die absolute Maßhaltigkeit soll nicht erfasst werden. Dafür sollen Kosten und vor allem die Einsatzfähigkeit direkt in Fertigungsprozessen gegenüber den bestehenden Systemen entscheidend verbessert werden. Als physikalischer Ansatz dient die Winkelverteilung von gestreuter Strahlung in Reflektion. Dazu wurde eine stabile Strahlungsquelle und eine Photodiodenzeile entwickelt und in einem Sensorgehäuse integriert.

2 Sensorausführung

Für eine optische Vermessung von Oberflächen existieren verschiedenste Messverfahren. Entsprechend den Anforderungen wurde ein Ansatz gewählt, der im wesentlichen zwei Messverfahren vereinigt. Der Sensor besteht aus einer Photodiodezeile mit 8 Photodioden und eine Strahlereinheit die eine Laserdiode und Fokussierungslinse beinhaltet. Das unter einem Winkel von 30° einfallende Licht wird auf die Oberfläche der Probe fokussiert und trifft auf die Photodiodezeile. Strahlquelle und Photodiodezeile wurden so ausgelegt, dass das Primärlicht auf zwei Photodioden trifft. Durch Variation des Abstandes Sensor zur Probe (z) lässt sich innerhalb des konfokalen Bereiches eine Ausleuchtung von 2 oder 3 Photodioden so einstellen, dass $>90\%$ der Gesamtintensität auf diesen Kanälen detektiert werden. Je nach Winkelstreuung ergibt sich eine Verbreiterung der Ausgangsverteilung (in der Skizze als Messverfahren 2 dargestellt).

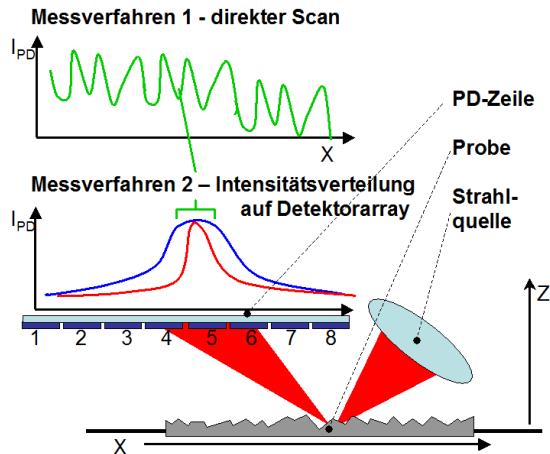


Bild 1 Prinzipskizze der Sensoranordnung und der möglichen Messanordnungen.

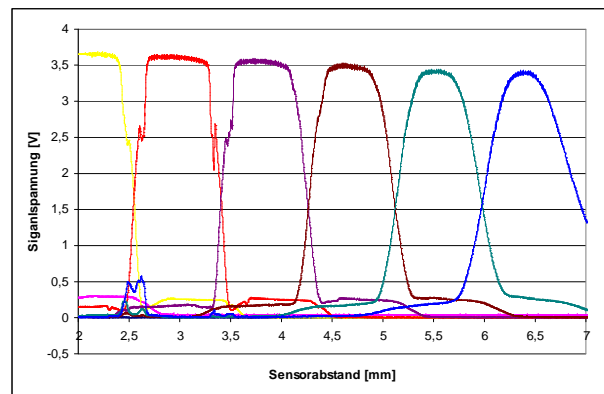


Bild 2 Spannungssignale der 8 Einzelkanäle bei Bewegung des Sensors in z-Richtung

Zur Detektion der Stahlverbreiterung stehen 8 weitere Photodioden zur Verfügung. Die Abbildung 2 zeigt die Signale der 8 Kanäle bei Variation des Arbeitsabstandes (z) von 2 bis 7mm (Designabstand des Sensors entspricht 5mm). Damit lässt sich die Arbeitsposition des Sensors ohne zusätzliche Positionssensorik einstellen. Ein weiteres Messverfahren ergibt sich beim Bewegen der Sensors oder der Probe in x-Richtung (in Bild 1 als Messverfahren 1 bezeichnet). Bei diesem direkten Scan über die Probe ergibt sich eine Modulation aller Kanäle, die ebenfalls Informationen über die Probenrauheit trägt und ausgewertet werden kann. Während der Bewegung ist eine Nachjustierung des Abstandes möglich, da die Modulation durch Nachführbewegung nicht im Frequenzbereich typischer Rauheitsmodulationen liegt.

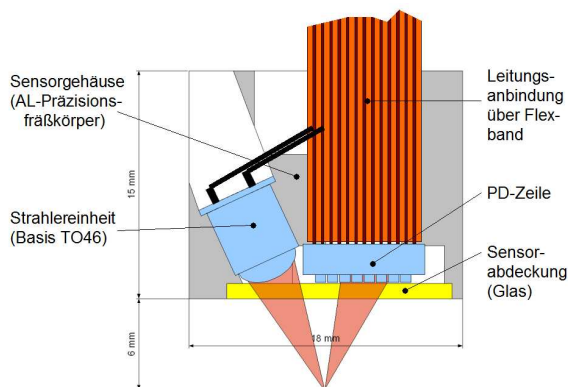


Bild 3 Detailausführung des Sensors

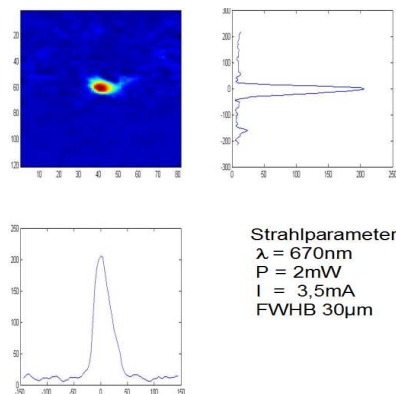


Bild 4 Strahlprofil der Strahlereinheit im Arbeitsabstand

Die Strahlereinheit wurde auf Basis eines 4,3mm Schott TO-Sockels realisiert. Auf einer angepassten LTCC-Keramik zur Höhenanpassung wurde ein Singlemode VCSEL-Chip mit 670nm Emissionswellenlänge montiert. Zur Fokussierung wurde eine Gehäusekappe mit integrierter Bikonvexlinse aufgesetzt. Die Abbildung 4 zeigt das Strahlprofil in des Probenebene.

3 Bestimmung der Auflösungsgrenze

Zur Bestimmung der Auflösungsgrenze wurde eine Teststruktur auf Basis einer geätzten Siliziumoberfläche vermessen. Diese zeigte eine 500nm hohe und 2µm breite Struktur entsprechend Bild 5.

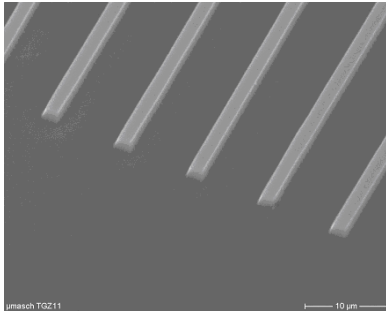


Bild 5 REM-Aufnahme des Testmusters

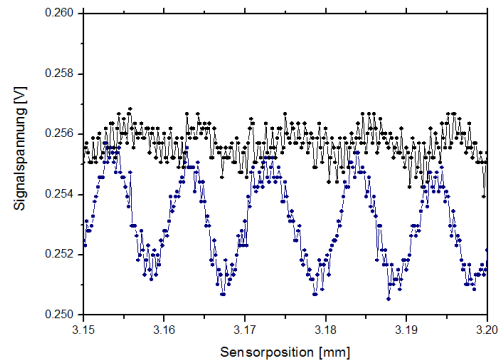


Bild 6 Signalspannungen (nach Transimpedanzverstärker) der beiden Empfangskanäle rechts bzw. links neben dem zentralen Kanal

Es zeigte sich, dass trotz des Spotdurchmessers von 30 µm, die Struktur von 2 µm breite und 10 µm Periode noch eindeutig nachgewiesen werden kann. Die in der Praxis erreichbare Auflösung kann daraufhin mit 5...10 µm abgeschätzt werden. Damit können die meisten Anwendungen im Bereich der spanenden Materialbearbeitung abgedeckt werden. Für eine Anwendung in der Präzisionsbearbeitung und bei schleifenden Verfahren ist der Fokussierdurchmesser weiter auf ca. 10µm zu reduzieren, was durch eine Änderung der Fokussierungslinse einfach möglich ist. Bild 6 zeigt deutlich die 10µm Testperiode überlagert von einem Positionierfehler des Verfahrssystems (kurze Periode). Die Unterschiede der beiden, symmetrisch um die Zentrale Photodiode angeordneten Empfangskanäle zeigen deutlich den Einfluss des z-Abstandes auf die Signalamplituden. Das Problem kann z.B. über Addition der rechten mit den entsprechenden linken Photodioden einfach eliminiert werden.

4 Messung an Realproben

Zur Evaluierung des Sensors an realen Proben wurden Präzisionsbohrungen mit typischen Rauheitsprofilen vermessen. Der im Bild 7 dargestellte Vergleich zeigt deutlich, dass im Scanbetrieb mit dem Sensor äquivalente Signale zu dem hochpräzisen Tastschnittgerät nachgewiesen werden können. Damit ist prinzipiell eine Extraktion äquivalenter Rauheitskennzahlen aus den optischen Messdaten möglich ist. Eine umfassende Kalibrierung bedarf allerdings eine geschlossene Betrachtung aller Signale. Einen Zugang zu quantitativen Werten kann z.B. über Fouriertransformation erfolgen. Wie an den Signalen der verschiedenen Photodioden zu erkennen ist, hängen Signalamplituden von der jeweiligen Frequenz und der Lage der Photodiode (also dem Streuwinkel) ab. Auch zeigt sich wie erwartet, dass z.B. die Gesamtintensität konstant ist und daher die Summe aller Signale der Gesamtintensität entspricht. Die Signale sind also auf die Gesamtintensität normierbar. Bild 8 verdeutlicht jedoch auch, dass bereits ohne komplexe mathematische Rückführung auf Rz-Werte, über die Wahl eines relevanten Einzelkanales mit einfachen statistischen Auswertungen Schwellwerte definiert werden können über z.B. ein Fertigungsprozess gesteuert werden kann.

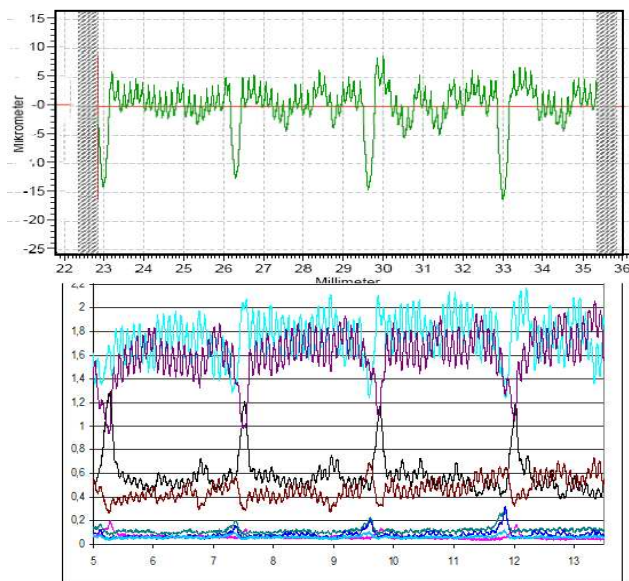


Bild 7 Vergleich von Tastschnittmessung (oben) mit Sensorsignalen (unten)

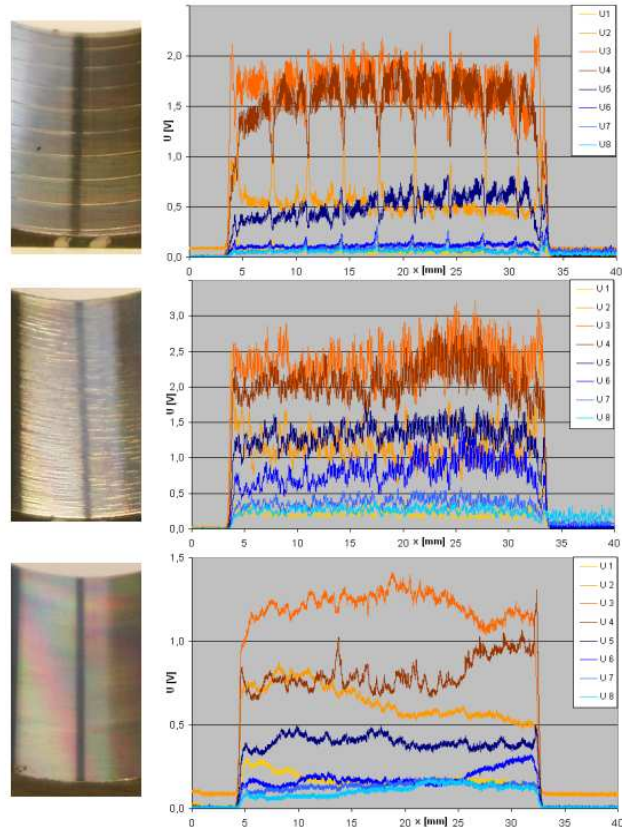


Bild 8 Messungen der Oberflächenqualität verschiedener typischer Bearbeitungsqualitäten. Links Foto des Werkstückes und rechts Signale der 8 Einzelkanäle bei Scan über die gesamte Probenlänge

5. Zusammenfassung / Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass mit der vorgestellten Sensoranordnung ein neuartiger optischer Rauheitssensor realisiert werden konnte. Die verwendeten Komponenten sowie deren Aufbau und Verbindungstechnologie sind auf kostengünstige Herstellung in größeren Stückzahlen und Stabilität im industriellen Einsatz ausgelegt. Es wurde nachgewiesen, dass im direktem Abtasten relative Signale messbar sind, die den über ein konventionelles mechanisches Tastverfahren ermittelten gute Übereinstimmungen aufweisen. Weiterhin sind in den über den Spotdurchmesser gemittelten Einzelpunktmessungen Informationen über den Rauheitsgrad enthalten. Diese kann zur Steigerung der Messgeschwindigkeit über geringere Abtastrate eingesetzt werden. Damit ist eine Qualitätsüberwachung im Fertigungsprozess bereits durchführbar. Erste mathematische Ansätze zur Absolutmessung und Rückführung auf genormte Rz-Werte sind entwickelt worden. Hier werden in Zukunft stärker Methoden aus Zeitreihenanalyse und Bildverarbeitung Einsatz finden. Weiterhin ist ein RF-Steuer- und Übertragungssystem für Energie und Daten entwickelt worden. Dies befindet sich zurzeit in der Evaluierung und wird in Zukunft den Sensor zu einem autark arbeitenden Rauheitsmesssystem komplettieren. Damit wird das Messsystem ohne Eingriff in existierende Steuerungen oder Hardwarekomponenten z.B. in Werkzeugmaschinen oder Robotersysteme eingesetzt werden können. Ein weiterer Punkt aktueller Arbeiten ist die Umsetzung in eine vollständig im Silizium integrierten Ausführung auf Basis der MORES-Technologieplattform des CiS [1]. Besonderer Anspruch besteht hier in einer waferbasierten Montagetechnologie für die Mikrooptiken und einer weiteren Verringerung des Spotdurchmessers auf $<10\mu\text{m}$ und einer Auflösungen von Rauheiten bis zu $1\mu\text{m}$.

Literatur

- [1] O. Brodersen, D. Römhild, R. Müller, M. Will, A. Steinke, MORES - Technologieplattform für opto-elektronische Sensoren, Dresdner Sensor-Symposium, G. Gerlach, P. Hauptmann (Hg.): Beiträge zur Sensorik, Band 29, ISBN 978-3-940046-45-1 7, Dresden: TUDpress 2007