Baden-Württemberg Stiftung

WIR STIFTEN ZUKUNFT

Forschungsergebnisse

Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Multifokales Messsystem für die kombinierte Erfassung von Topographie und lokaler Mikro- und Nanostruktur

Multifokales Messsystem für die kombinierte Erfassung von Topographie und lokaler Mikro- und Nanostruktur

Die für die Prozesskontrolle erforderlichen Messaufgaben werden mit den steigenden Anforderungen an die Eigenschaften von Oberflächen immer komplexer und umfangreicher. So sind zukünftig nicht nur makroskopische Größen zu erfassen, sondern auch Mikro- und Nanostrukturen der verarbeiteten Werkstoffe zu charakterisieren. Ein am ILM entwickelter multifokaler chromatisch codierter Scanner für makroskopische Größen erlaubt die Erfassung dreidimensionaler Strukturen mit einer Standardabweichung von ±30 µm. Mit der Entwicklung dieses Scanners entstand das Interesse, das Gerät zu erweitern um zusätzliche Informationen zur Mikro- und Nanostruktur der Oberfläche zu erhalten. Damit sollte durch eine integrierte Mikro- und Nanostrukturanalyse der Oberfläche, die in diesem Projekt realisiert wurde, eine erfasste dreidimensionale Struktur zugleich auf Rillen, Riefen, Kratzer sowie Mikrorisse untersucht werden. Des Weiteren wäre auch eine Materialunterscheidung der gescannten dreidimensionalen Struktur von großer Bedeutung. Um die Möglichkeit der zusätzlichen Informationsbeschaffung auf Basis des konfokalen Aufbaus zu untersuchen, konnte auf die schon vorhandenen Simulationen zur Remissionsanalyse aufgebaut werden. Die gewonnenen Informationen zur Remissionsanalyse können auch über das Projekt hinaus in anderen Bereichen genutzt werden.

Zielsetzung des im Rahmen der Ausschreibung „Forschung Optische Technologien 2010: Multiskalige optische Messverfahren“ durch die Baden-Württemberg Stiftung gGmbH des finanzierten Projekts „3D-plus“ war die Entwicklung eines multiskaligen optischen Messsystems, mit dem gleichzeitig die Topographie der Oberfläche gemessen und eine Mikro- und Nanostrukturanalyse der Oberfläche in Echtzeit durchgeführt werden kann. Das neuartige Messsystem wurde in einem Kooperationsprojekt von dem Institut für Parallele und Verteilte Systeme (IPVS) der Universität Stuttgart und dem Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik (ILM) an der Universität Ulm konzipiert und als Prototyp realisiert. Ausgehend von dem bereits existierenden multifokalen Messsystem zur Bestimmung der 3D-Kontur der Oberfläche auf der Basis der chromatisch kodierten, konfokalen Abstandsmessung, wurde unter Verwendung einer multifokalen Remissionsanalyse die Funktionalität des Systems um die Erkennung der Änderungen der Mikro- und Nanostruktur der Probe beispielsweise aufgrund von Defekten, Korrosion, Oxidation oder Größe- oder Dichte-Variation von Streukörpern erweitert. Im Laufe des Projekts eröffnete sich zudem mit der winkelaufgelösten Streulichtanalyse eine sehr viel versprechende alternative Methode der Ermittlung der Oberflächenbeschaffenheit, die ebenfalls in das Messsystem integriert wurde. Dies führte im Bereich der Optik zu einer Erweiterung und im Bereich der Signalverarbeitung zu einer teilweisen Redefinition der Aufgaben. Insgesamt führten diese Maßnahmen zur Vergrößerung des Projektumfangs und zusätzlichen Projektergebnissen.

Aus der Aufgabenstellung ergab sich eine Reihe von wissenschaftlich interessanten Fragestellungen. Zunächst wurde erforscht, welcher Informationsgehalt aus der Oberfläche trotz der chromatischen konfokalen Filterung in den erfassten Spektren des 3D-Messsystems enthalten ist. Dies wurde sowohl durch Simulationen als auch durch grundlegende Messungen an geeigneten Modellen untersucht. Auf Basis der Ergebnisse wurde dann ein Lösungsansatz konzipiert und umgesetzt, um letztendlich durch Anpassung bzw. Erweiterung der Optik und/oder durch entsprechende Auswertung quantifizierbare Größen über die Oberflächeneigenschaften zu erhalten. Hinsichtlich der Auswerte-Algorithmen wurde eine Hardware-Architektur

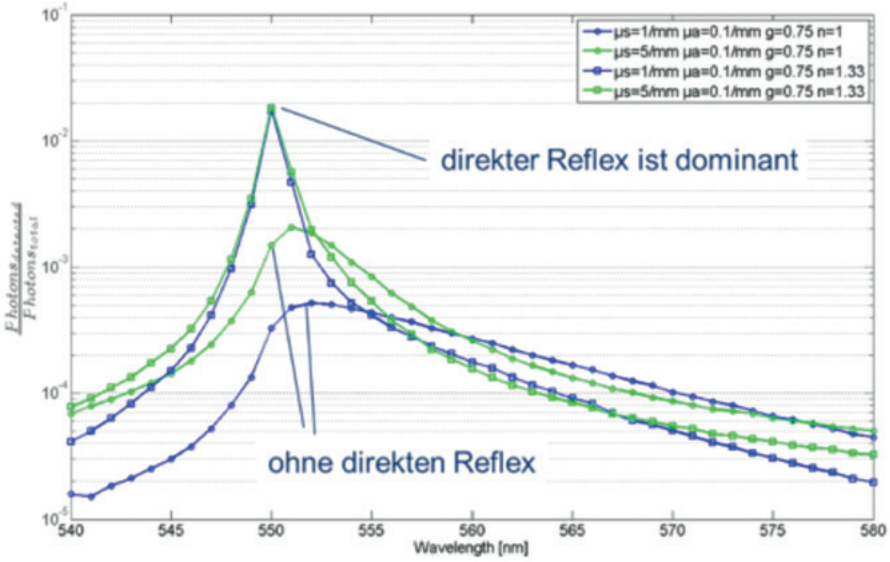

Abb. 1: Die chromatisch-konfokale Monte-Carlo-Simulation am trüben Medium zeigt nur den dominanten direkten Reflex (n=1,33). Wird dieser unterdrückt (n=1,0), sind die simulierten Intensitätsprofile klar unterscheidbar, die Signale aber deutlich schwächer.

entwickelt und optimiert, die für die Analyse der Bilddaten in Echtzeit und ohne Zwischenspeicherung konzipiert wurde. Begleitend wurden Aspekte der effizienten Übertragung großer Mengen von Bilddaten mittels Kompression und der Berücksichtigung der Bildsensor-Eigenschaften bei der Konzeptionierung von bildbasierten Messsystemen untersucht.

Ein unvorhergesehenes Ergebnis der ersten Simulationen und Messungen an Gewebemodellen war, dass durch die (erklärbare) starke konfokale chromatische Filterung des remittierten Lichts die Spektraleigenschaften (z.B. Farbe) des Messobjekts nahezu vollständig verloren gehen (s. Abb. 1). Nur bei Elimination des direkten Reflexes durch gekreuzte Polarisatoren und dem daraus resultierenden, erheblichen Rückgang des Messsignals im Bereich des Peaks, lassen sich Aussagen über die Streueigenschaften des Objekts treffen. Deshalb zeigten auch die durchgeführten intraoralen Messungen an Probanden, dass beispielsweise eine Unterscheidung zwischen Zahnhartsubstanz und Weichgewebe während der 3D-Messung so nicht möglich ist.

Folglich wurde ein zweiter Detektionskanal mit eigener spezieller Beleuchtungsoptik konzipiert und entwickelt, der es letztendlich ermöglicht, die Winkelverteilung des remittierten Lichts in jedem Messpunkt zu detektieren und dieses mit den am IPVS entwickelten Auswerte-Algorithmen und Hardware z.B. hinsichtlich Anisotropien zu analysieren. Hintergrund dieses Lösungsansatzes ist die Beobachtung, dass anisotrope Strukturen, wie beispielsweise Kratzer, Rillen oder Mikrorisse, ein anisotropes Streuverhalten aufweisen. Dies ist in Abb. 2 an den Streifen im Streubild zu erkennen, das mittels Monte-Carlo-Simulationen berechnet

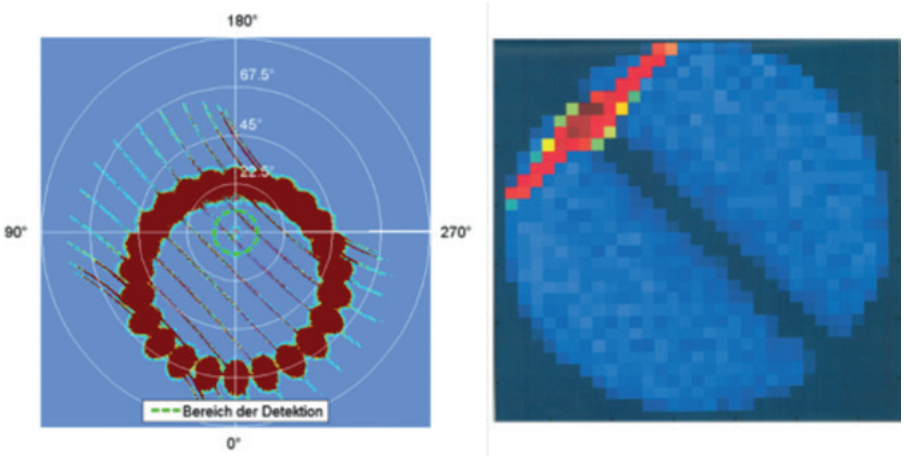

Abb. 2: Links: Simulierte Winkelverteilung des an einem Halbzylinder (Kratzer) gestreuten Lichts, die bei der Einstrahlung auf einen Kratzer mit 24 in gleichmäßigem Winkelabstand φ verteilten und unter Θ = 22,5° verkippten Lichtquellen entstehen; nach außen ist der Azimutwinkel Θ und um das Zentrum rotierend ist der Polarwinkel φ aufgetragen; nur der Bereich (innerhalb der grünen Linie) im Zentrum kann vom Messsystem detektiert werden. Im Bild ist die Oberfläche um Θ = 11,25° verkippt, was an dem Abstand des Zentrums der diffusen Reflexionen zum Nullpunkt erkennbar ist; Rechts: Simulation eines Streubildes bei einer verkippten und verdrehten Probe. Die Farben in der Darstellung sind Falschfarben und entsprechen der Intensität.

wurde. Kratzer oder Riefen wurden dabei als Zylinderstreuer modelliert. Die Beleuchtung erfolgte, wie später im aufgebauten Prototypen umgesetzt, ringförmig über 36 kollimierte Weißlichtquellen (s. Abb. 3). Die ringförmige Beleuchtung gewährleistet, dass jede Ausrichtung der anisotropen Struktur im 360° Raum erfasst werden kann.

Bezüglich der bildbasierten, echtzeitfähigen Auswertung konnten am IPVS geeignete Auswerte-Algorithmen auf Basis der Hough-Transformation in Verbindung mit einer hochperformanten und parallelen Hardware-Architektur für Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) vorgeschlagen und hinsichtlich ihrer Eigenschaften bezüglich

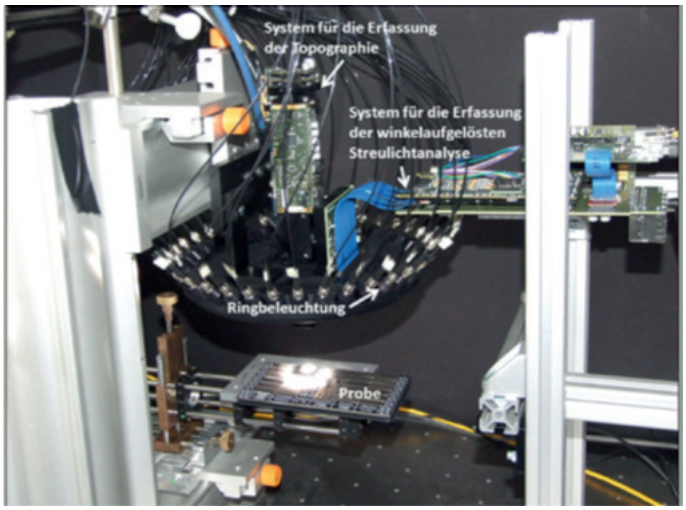

Abb. 3: Fertig entwickeltes und aufgebautes Messsystem zur Erfassung der Topographie sowie Mikro- und Nanostruktur.

der Mikro- und Nanostrukturanalyse der Oberfläche untersucht werden. Mit der erarbeiteten Hardware-Architektur konnte ein hoher Datendurchsatz für Bildraten von mehreren 100 Aufnahmen pro Sekunde erreicht werden. Die Auslastung des verwendeten FPGAs mittlerer Größe von weniger als 25% ergibt ein hinreichendes Potenzial für die Realisierung zusätzlicher Auswerte-Algorithmen. Die Effizienz der gefundenen Auswerte-Algorithmen und Architekturen erweitert im Vergleich zu Standardprozessoren die Durchsatzrate und somit die Einsatzmöglichkeiten entsprechender Systeme erheblich. Weiterhin erlaubt der Architektur-Ansatz die Entlastung PC-basierter Systeme, da nur die Messwerte, aber nicht mehr die Bilddaten auf den PCs verarbeitet werden müssen. In dem vorliegenden Fall konnte gegenüber einer PC-basierten Software-Lösung eine Steigerung des Durchsatzes um ca. 3 Größenordnungen erzielt werden. Die dabei eingesetzte Hardware zeichnet sich gegenüber einer CPU zusätzlich durch eine um den Faktor 10 – 20 geringere Leistungsaufnahme aus. Darüber hinaus konnte ein sehr robustes Verfahren zur Kalibrierung und Extraktion der Regions of Interest (ROIs) realisiert werden. Das dafür entwickelte, Datentyp-optimierte verlustlose Kompressionsverfahren erreicht eine Reduktion der Datenmenge um etwa den Faktor 11. Weiterhin ist die Verarbeitung der ROI-Bilddaten auf Basis der Hough-Transformation gut geeignet, um Kratzer auf texturierten Oberflächen zu erkennen und ist robust gegenüber dem Rauschen des Bildsensors. Zudem vereinfacht die Echtzeit-Auswertung die Handhabung der reduzierten Auswerte-Daten auf dem Host-PC deutlich. Insofern hat sich die automatisierte Detektion von Kratzern mittels multifokaler Mikroskopie und hardware-basierter Auswertung als äußerst vielversprechend herausgestellt.

Ausgehend von den im Laufe des Projekts entwickelten optischen und elektronischen Komponenten wurde ein voll funktionsfähiger Prototyp des 3D-plus Messsystems aufgebaut und erfolgreich getestet. Dabei ist mit dem Gerät sowohl eine 3D-Topographie Messung als auch die Bestimmung der Oberflächeneigenschaften mittels winkelaufgelöster Streulichtanalyse möglich. Insbesondere die Messungen an Rauheitsnormalen demonstrieren die Funktionsweise des Systems (s. Abb. 4).

Insgesamt steht damit am Ende des Projekts ein voll funktionsfähiger Demonstrator zur Verfügung, der insbesondere softwareseitig für die jeweilige konkrete Fragestellung angepasst werden kann.

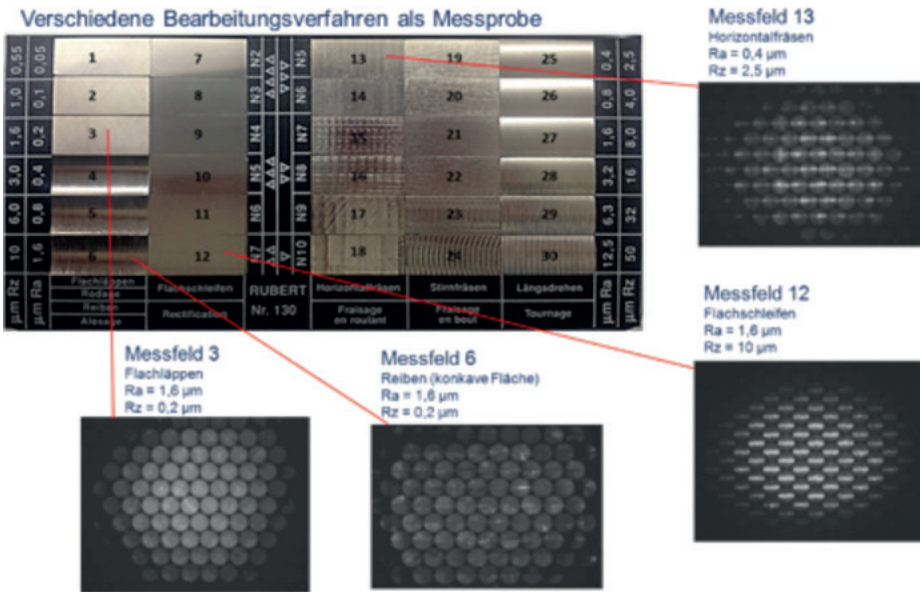

Abb. 4: Übersicht zu den Messungen an Rauheitsnormalen mit den Proben und zugehörigen Streubildern.

Kontakt

Prof. Dr. Raimund Hibst
Institut für Lasertechnologien
in der Medizin und Meßtechnik an der Universität Ulm
Helmholtzstr. 12
89081 Ulm
Tel. 0731 1429 111
raimund.hibst@ilm-ulm.de
www.ilm-ulm.de

Prof. Dr. Sven Simon
Universität Stuttgart
Institut für Parallele und
Verteilte Systeme
Universitätsstraße 38
70569 Stuttgart
Tel. 0711 6858 8450
sven.simon@ipvs.uni-stuttgart.de
www.ipvs.uni-stuttgart.de