

Angepasste Beleuchtung zur Prüfung zylindrischer Bohrungen

Yannick CAULIER*, Klaus SPINNLER*, Marc ARNOLD*, Andreas PÖSCH**

* Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS (Dr.-Mack-Straße 81, 90762 Fürth)
yannick.caulier, klaus.spinnler, marc.arnold@iis.fraunhofer.de

** Institut für Mess- und Regelungstechnik, (Nienburger Straße 17, 30167 Hannover)
andreas.poesch@imr.uni-hannover.de

Kurzfassung. Im Rahmen der Oberflächenqualitätsprüfung ist die automatische Kontrolle von Innenoberflächen eine anspruchsvolle Aufgabe, da die benötigten Aufnahmekomponenten in kleinen Bohrungen positioniert werden müssen, um hinreichende Bilder der Innenoberflächen, die überprüft werden sollen, zu bekommen. Dieses erhöht die Schwierigkeit, den optimalen Aufbau bzgl. Bildqualität und Prüfungsgeschwindigkeit zu bestimmen und umzusetzen. Außerdem erfordern die gleichzeitige visuelle Verstärkung und die Unterscheidung verschiedener Fehler den Einsatz von mindestens zwei verschiedenen Beleuchtungsverfahren.

Diese Arbeit stellt eine neue Methodik für die visuelle Verstärkung und Unterscheidung von verschiedenen Fehlerarten vor, die sich in kleinen Bohrungen befinden. Das vorgeschlagene Verfahren basiert auf der Verbindung von einer bereits vorhandenen Methode der Innenoberflächenprüfung und von einer Qualitätsprüfungsmethode mittels strukturierter Beleuchtung.

Der vorgeschlagene Optimierungsprozess ist dem Erwerb der optimalen strukturierten Beleuchtung bzgl. 3D-Lichtform und Geometrie der Lichtstruktur von Projektion gewidmet. Die gewonnenen simulierten Ergebnisse basierend auf Strahlverfolgungsmethode korrelieren mit Testaufnahmen von fehlerhaften Innenoberflächen. Schließlich demonstrieren die Ergebnisse, dass die vorgestellte Methodik, die auf der Projektion einer geeigneten strukturierten Beleuchtung basiert, die Verstärkung und die Unterscheidung verschiedener Innenoberflächendefekte erlaubt.

1. Einführung

Es ist eine anspruchsvolle Aufgabe, kleine Innenoberflächen, z.B. von ein paar Millimetern im Durchmesser, zu untersuchen, da die notwendigen Aufnahmekomponenten (Optik, Beleuchtung) in kleinen Bohrungen positioniert werden müssen, um hinreichende Bilder für die Qualitätsprüfung der Innenoberflächen, die überprüft werden, zu bekommen. Darüber hinaus steigt die Prüfungsschwierigkeit, falls zusätzlich zur visuellen Verstärkung von fehlerhaften Oberflächenteilen verschiedene Fehlerarten ermittelt werden müssen. Somit müssen geeignete Hardwarekomponenten wie Endoskope und Boreskope für Innenoberflächenaufnahmen kombiniert mit passenden Bildverarbeitungsmethoden, wie angepasster Beleuchtung für Oberflächenverstärkung, entwickelt werden.

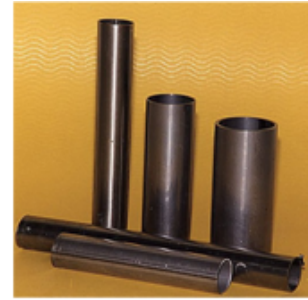


Abb. 1: Standard-Endoskop (auch Boreskop genannt) mit verschiedenen Durchmessern und typische industrielle Bohrungen.

Viele Anwendungen im Industrie- sowie Medizinbildverarbeitungsbereich machen von festen und nicht starren Endoskopen, den sogenannten "Boreskopen" oder "Fiberskopen" (siehe Abb. 1), erheblichen Gebrauch, um den visuellen Zugang zu Löchern, Hohlräumen und Bohrungen, die schwer zu erreichen und zu untersuchen sind, zu bekommen. Gemeinsam für beide Anwendungsgebiete sind normalerweise sehr kleine künstliche oder natürliche Eingangsstellen zur beobachteten Fläche - mit Durchmessern von weniger als 4 mm - sowie die Komplexität der Höhlung selbst, was einen geeigneten Beleuchtungseinsatz notwendig macht. Aufgrund der komplexen und krummen Form solcher innerer Bohrungen können für die Untersuchung dieser Hohlräume nur geeignete Lösungen angewendet werden. In der Industriemaschinenprüfung sind typische Beispiele komplexe Bohrlöcher und Kühlkanäle in Turbinenblättern [4,6 ,8].

Bei Industrieoberflächenprüfung platziert üblicherweise ein Prüfer das zu prüfende Objekt unter geeigneter Beleuchtung, um visuell die fehlerhaften Teile hervorzubringen, um diverse, z.B. strukturelle oder geometrische Oberflächendefekte zu identifizieren. Die meisten Lösungen zum maschinellen Sehen basieren auf den gleichen Prinzipien, die aus dem Gebrauch der Beugung von Lichtstrahlen bestehen, um zulässige und unzulässige Oberflächen auseinanderzuhalten. Beispiele für solche Inspektionsprinzipien, die bei industrieller Inline-Kontrolle angewendet werden, sind in [3,10] zu finden. Typische Anwendungsbereiche sind z.B. die Kontrolle von Fahrzeugmetallteilen [7], große Stahlscheiben [5] oder Zylinderoberflächen aus Stahl [2].

Allerdings ist keine der vorgenannten Anwendungen der Inline-Kontrolle wegen komplexer Kalibrierungsprozedur für die gleichzeitige Detektion von verschiedenen Fehlertypen (nicht angepasste Beleuchtung), die auf inneren, d.h. schwer erreichbaren, Oberflächen geeignet.

Hinsichtlich der Inline-Kontrolle von Innenoberflächen sowie Entwicklung und Integration von kombinierter Beleuchtung und Datenverarbeitung wurden zwei bedeutende Bezugssysteme entwickelt. Die Erste [9] erlaubt die Kontrolle von kleinen Innenoberflächen mit Durchmesser bis ca. 2 mm, während die Zweite [11,12] die Projektion von Streifenbeleuchtungsmustern auf die zu prüfende Oberfläche, und die Fusion von gestreutem und strukturiertem Licht für deren unmittelbare Charakterisierung

bzw. visuelle Verstärkung von fehlerhaften Oberflächen benutzt. Es wurde nachgewiesen, dass die erste Methode andere ähnliche Ansätze, die der Inline-Kontrolle von Innenoberflächen gewidmet sind, übertrifft und dass die zweite Methode für weitere Prüfungsaufgaben verallgemeinert werden kann. Die Schwerpunkte dieser Arbeit sind:

- zu zeigen, dass beide Qualitätsprüfungsansätze fusioniert werden können,
- eine miniaturisierte und multimodale Beleuchtung für die Qualitätsprüfung von Innenoberflächen vorzuschlagen,
- zu zeigen, dass dieser Ansatz für die Inline-Kontrolle in Echtzeit benutzt werden kann.

Diese Arbeit ist in vier Abschnitte unterteilt. Abschnitt zwei beschreibt das zu lösende Problem, Abschnitt drei befasst sich mit der Suche nach dem optimalen Lichtmuster, Abschnitt vier zeigt den Versuchsaufbau und die erzielten Innenoberflächenaufnahmen. Abschnitt fünf fasst diesen Artikel zusammen und definiert mögliche weitere Arbeiten.

2 Methodenbeschreibung

2.1 Prinzip der Endoskopieaufnahme

Die Endoskopiekontrolle erlaubt die Kontrolle oder Prüfung von kleinen Bohrungen oder Hohlräumen mithilfe eines Endoskops welches ein dünnes langes (manchmal auch flexibles) Rohr ist. Das Endoskop ist mit einer Lichtquelle und einer Kamera gekoppelt, um die schwer erreichbare und beleuchtete Innenoberfläche an den externen PC weiterzuleiten.

Im Fall der industriellen Aufnahme für die fortlaufende Oberflächenprüfung besteht der gewöhnliche Ansatz im Fixieren des zu prüfenden Objekts und Bewegen der Kamera und der Belichtung mit konstanter Geschwindigkeit und Abstand durch die Fläche. Allerdings ist es in den meisten Fällen nicht möglich, die Aufnahme der kompletten inneren Rohroberfläche in einem Zug durchzuführen, da die Rohrlänge oft viel größer ist als der Abstand zwischen dem Distalende des Boreskop und der Lichtquelle. Danach müssen alle aufgenommenen Bilder entzerrt (um die optische Verzerrungen zu entfernen) und zusammengefügt werden, um einen Überblick über die gesamte Innenoberfläche zu bekommen.

Abb. 2 zeigt das Prinzip der Endoskopieaufnahme der deflektometrieorientierten Qualitätsprüfung. Die Abbildung zeigt das Aufnahmeprinzip einer Innenoberfläche. Kamera und Lichtquelle bewegen sich simultan, d.h. mit konstanter Geschwindigkeit und mit gleichem Abstand entlang der Rohrachse.

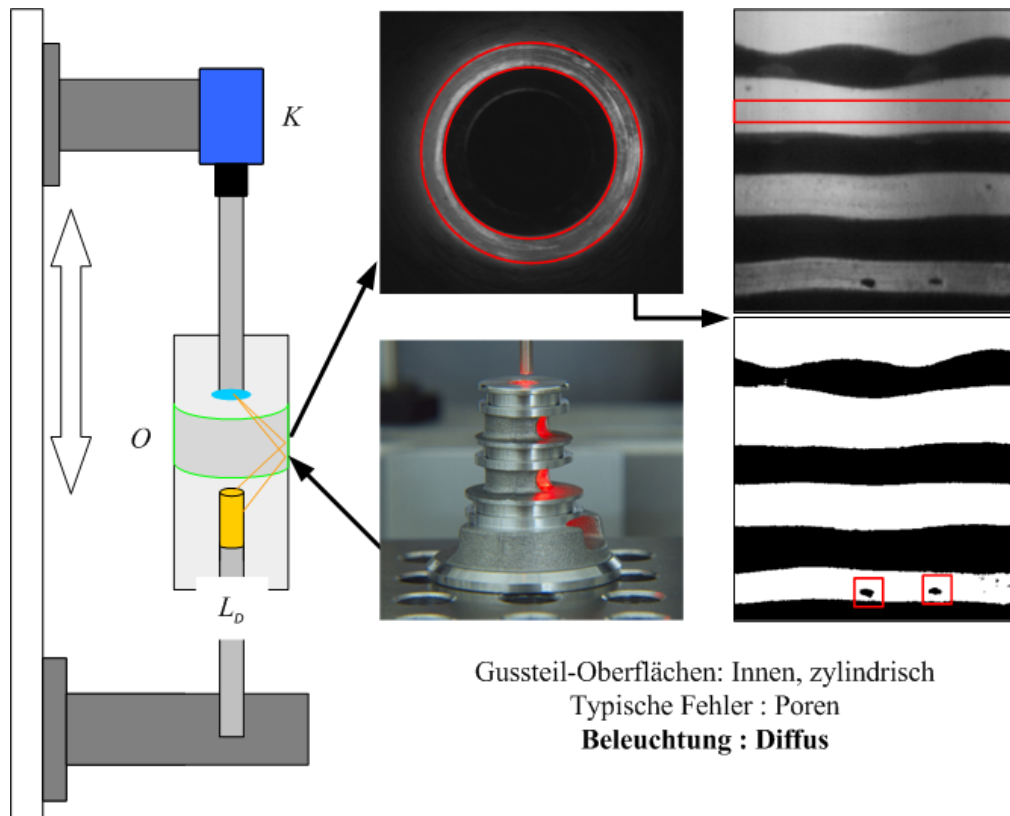


Abb. 2: Links: Prinzip der Endoskopieaufnahme der Innenoberfläche. Kamera K und Licht L_D bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit, um die Innenoberfläche des Objekts O aufzunehmen. Nur ein Teilbereich des Bildes, das die relevanten Informationen enthält, wird entzerrt und zusammengefügt. Rechts: Aufnahmeprinzip für die Kontrolle der ganzen Innenoberfläche. Typische Defekte (porenartige) können visuell vergrößert und mit dieser Beleuchtung erfasst werden.

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Aufnahme speziell für die Kontrolle von Gussteilen entwickelt wurde, wo z.B. kritische, porenartige Fehler ermittelt werden sollen. Im Fall anderer Oberflächen, z.B. bei gezogener Herstellung, wo andere Typen von Defekten auftreten können, könnte eine solche Belichtung allerdings nicht geeignet sein. Dies ist der Fall bei beulenartigen Defekten, wo eine gestreute Beleuchtung dazu neigt, die Oberfläche zu glätten, mit dem Resultat, dass der Defekt aus dem Bild "verschwindet". Für dieses Ermittlungsproblem ist die deflektometriebasierte Qualitätsprüfung besser geeignet. Das Prinzip wird im nächsten Paragraphen erklärt.

2.2 Prinzip der Deflektometrie für die Qualitätsprüfung

Die Beleuchtung, die aus der Fusion von gestreutem und strukturiertem Licht resultiert um damit die gleichzeitige visuelle Verstärkung von verschiedenen Fehlertypen zu erreichen, ist in [12] beschrieben. Diese wurde angewendet für die Kontrolle von äußeren zylindrischen Oberflächen. Die Fälle von geometrischen 3D- und strukturellen 2D-Defekten, die betrachtet wurden, sind in Abb. 3 dargestellt. Im Rest der Arbeit werden diese beiden Defekttypen betrachtet. Die Verallgemeinerung auf weitere Fehlertypen ist machbar.

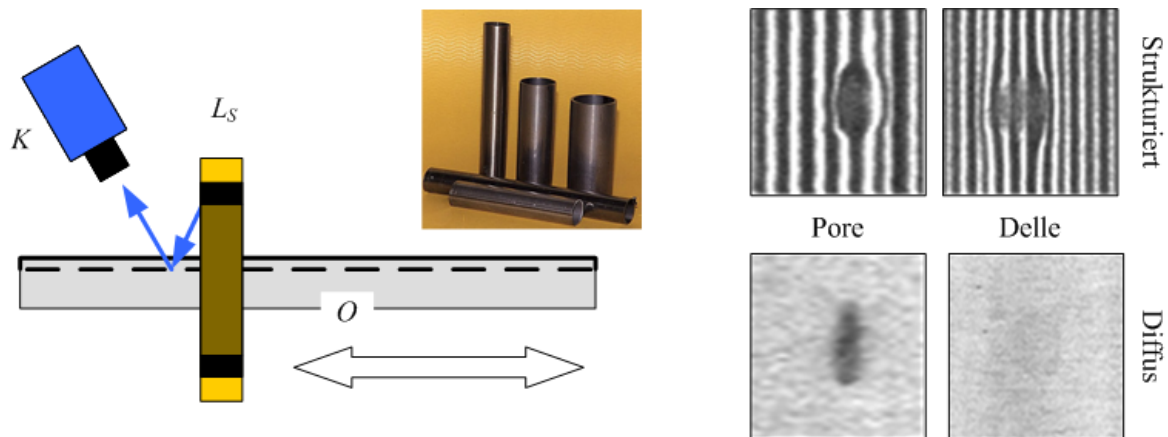


Abb. 3: Links: Vorhandene Prüfmethode für äußere zylindrische Oberflächen. Rechts: Visuelle Verstärkung von Poren- und beulenartigen Defekten mittels strukturiertem (Methode für äußere zylindrische Oberflächen) und gestreutem (Methode für innere zylindrische Oberflächen) Licht.

Das visuelle Hervorhebungsprinzip der Oberfläche basiert auf der Abweichung und der Absorption von projizierten Lichtstrahlen von der zu prüfenden Oberfläche. Folglich wird eine derartige Objektprüfung für spiegelnde oder teils reflektierende Oberflächen angewendet, bzw. für Oberflächen die einen nicht vernachlässigbaren Reflexionskoeffizient ρ aufweisen; ρ gibt den Prozentanteil von reflektiertem zu projiziertem Lichtstrom an. Dieser Koeffizient ist Null für diffuse Oberflächen, die das Licht in alle Richtungen, d.h. wie Lambertsche Quellen, reflektieren. Für eine spiegelnde Reflexion ist der Winkel vom reflektiertem Lichtstrahl gleich dem Winkel des Eingangsstrahls nach der Flächennormalen N .

Die Störungen des projizierten Lichtmusters sind deswegen direkt vom Oberflächentyp des beleuchteten Objekts abhängig. Wir nennen (s) ein einfaches Oberflächenelement der Objektoberfläche S , die untersucht wird. ρ und α sind der Reflexionskoeffizient und der Reflexionswinkel von Oberflächenelement s . Weichen ρ und α vom Referenz-Wert ab, bzw. wird eine defekte Oberfläche beleuchtet, ändert sich das Streifen-Muster. Geometrische bzw. Intensitäts-Änderungen deuten auf geometrische oder texturartige Defekte hin. Abb. 3 zeigt den Unterschied zwischen einer diffusen und einer Streifenbeleuchtung im Fall der visuellen Hervorhebung von geometrischen Fehlern. Dellenartige Fehler "verschwinden" beim diffusen Ansatz.

2.3 Deflektometrie für Innenoberflächen

Hauptziel dieser Arbeit ist es, das Prinzip der strukturierten Beleuchtung für Außenflächen zur Untersuchung von schwer erreichbaren Innenoberflächen anzupassen.

Die Hauptvoraussetzungen sind, dass (i) die kompletten Innenoberflächen mit strukturiertem Licht beleuchtet sind, und dass (ii) jeder verschiedene fehlerhafte Oberflächentyp diverse Störungen des aufgenommenen Lichtmuster verursacht.

Die nächsten Abschnitte sind der Aufnahme eines Oberflächenbereichs mit der optimalen Lichtstruktur gewidmet.

3. Bestimmung der optimalen Lichtstruktur

3.1 Problemstellung

Wie bereits im Vorherigen und in [12] erwähnt, müssen von Oberflächendefekten verursachte Lichtstrukturstörungen spezifische Eigenschaften besitzen, um diese von zulässigen Oberflächen unterscheiden zu können.

Wie in der Einführung beschrieben, ist das Hauptziel dieser Arbeit, eine neue Methode zur Unterscheidung von unterschiedlichen Defekttypen in einer Aufnahme vorzustellen. Die automatische Unterscheidung von 2D und 3D wird behandelt. Es wurde gezeigt, wie diese zwei Fehlertypen anhand der induzierten Streifenstörungen unterschieden werden können. Der erste Typ verursacht "nur" eine Abnahme der Lichtintensität, während der Zweite eine Änderung der Strukturgeometrie verursacht.

Das offene Problem besteht aus der Definition der optimalen Streifenstruktur zur Aufnahme von Innenoberflächen mittels strukturierter Beleuchtung. In Übereinstimmung mit den vorherigen Untersuchungen besteht die größte Herausforderung in der Anpassung der Lichtstruktur, so dass alle 3D-Defekte unterschieden werden können (mit guten Oberflächen, aber auch mit fehlerhaften 2D-Oberflächen).

3.2 Position und Geometrie der Lichtstruktur

Die früheren Untersuchungen [11] zeigten, in wie weit Streifenmuster auf die Oberflächengeometrie angepasst werden können, um damit eine Qualitätsprüfung zu ermöglichen. Das Vorgehen bestand dabei aus der Aufnahme eines regulären periodischen Musters für die Musterauswertung, wodurch mitunter große Streifenmuster entstanden. Zu dieser Arbeit war allerdings der Raum für die Positionierung und Anpassung der Aufbauelemente (Beleuchtung und Aufnahmesensor) begrenzt.

Wie bereits in Abschnitt zwei erwähnt, besteht eine oft angewendete Methode für die Aufnahme von Innenflächen (ohne Boden) in der Positionierung von Aufnahmesensor und diffuser Beleuchtung gegenüberliegend zueinander, so dass die seitliche Oberfläche untersucht werden kann.

Daraus folgt, dass nun die optimale Position des strukturierten Musters auf der diffusen Beleuchtung gefunden werden muss. Abb. 4 zeigt zwei mögliche Positionen der Lichtstruktur und zwei mögliche Geometrien.

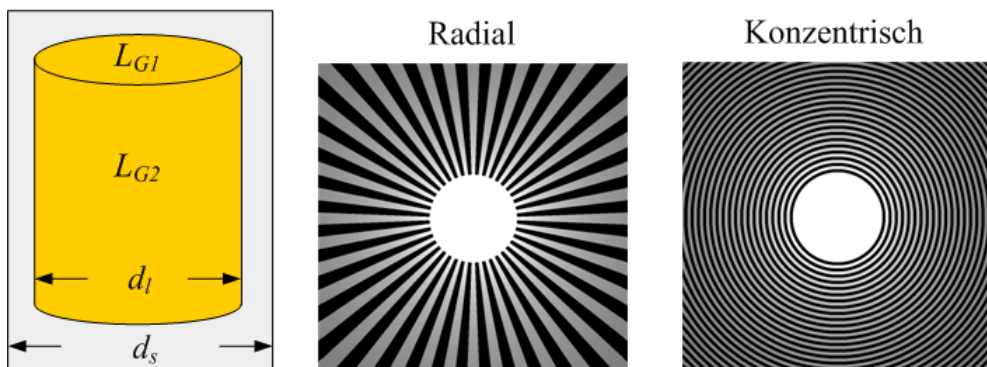


Abb. 4: Unterschiedliche Positionen (L_{G1} oder L_{G2}) und Geometrien (radial oder konzentrisch) der Licht-Strukturen.

Bezüglich der Position der Muster gibt es hier zwei mögliche Flächen: Die zylindrische L_{G2} und die kreisförmige L_{G1} . Wobei der erste Ansatz die inverse Lösung der Beleuchtung der Referenz-Anwendung ist [11]: Das strukturierte Streifenmuster besitzt eine zylindrische Geometrie. Wesentlicher Nachteil dieser Lösung ist, dass nur Bohrungen mit relativ großem Abstand zum Beleuchtungskörper inspiziert werden können, $d_s > d_l$, so dass genügend reflektiertes Licht in die Kamera eintritt. Aus diesem Grund wird, was die Kontrolle von kleinen Bohrungen angeht, der zweite Ansatz, also Licht-Strukturen auf dem oberen zylindrischen Teil der Beleuchtung L_{G1} , angewendet.

Der nächste Absatz befasst sich mit der Geometrie der Struktur selbst, indem die experimentelle Ermittlung derselben beschrieben wird.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Aufbaubeschreibung

Beim verwendeten Aufbau wurde mit einem Objekt mit einem Radius von ca. $r_0 = 15$ mm, einem Kamera-Licht-Abstand von $d = 150$ mm und einer Brennweite von $f = 15$ mm gearbeitet. Die fehlerhafte Fläche (Delle) befand sich zwischen der Optik und der Beleuchtung und hatte eine Höhe und Breite von $a = 0,15$ mm, $\sigma = 1$ mm. Die radiale Struktur besaß 40 weiße und 40 schwarze Streifen, was einer Auflösung von 1 mm entspricht. Die konzentrischen Streifen wurden mit einer radialen Frequenz von 1 mm gefertigt.

Alle Bilder wurden mit einer Dolphin F-145B Kamera von Allied Vision Technologies und einem Hopkins-Boreskop der Firma Wolf aufgenommen. Die Struktur wurde mit einem 1.200 dpi Laser-Drucker erzeugt. Die Innenfläche wurde mit einer Hochleistungs-LED (Luxeon K2 mit TFFC LXX2-PWC4-0220) bei 250 mA ausgeleuchtet. Die synchrone Verschiebung des Boreskops und der Struktur erfolgte mittels zweier Verfahrachsen. Abb. 5 zeigt den Aufbau sowie simulierte und aufgenommene Bild-Sequenzen.

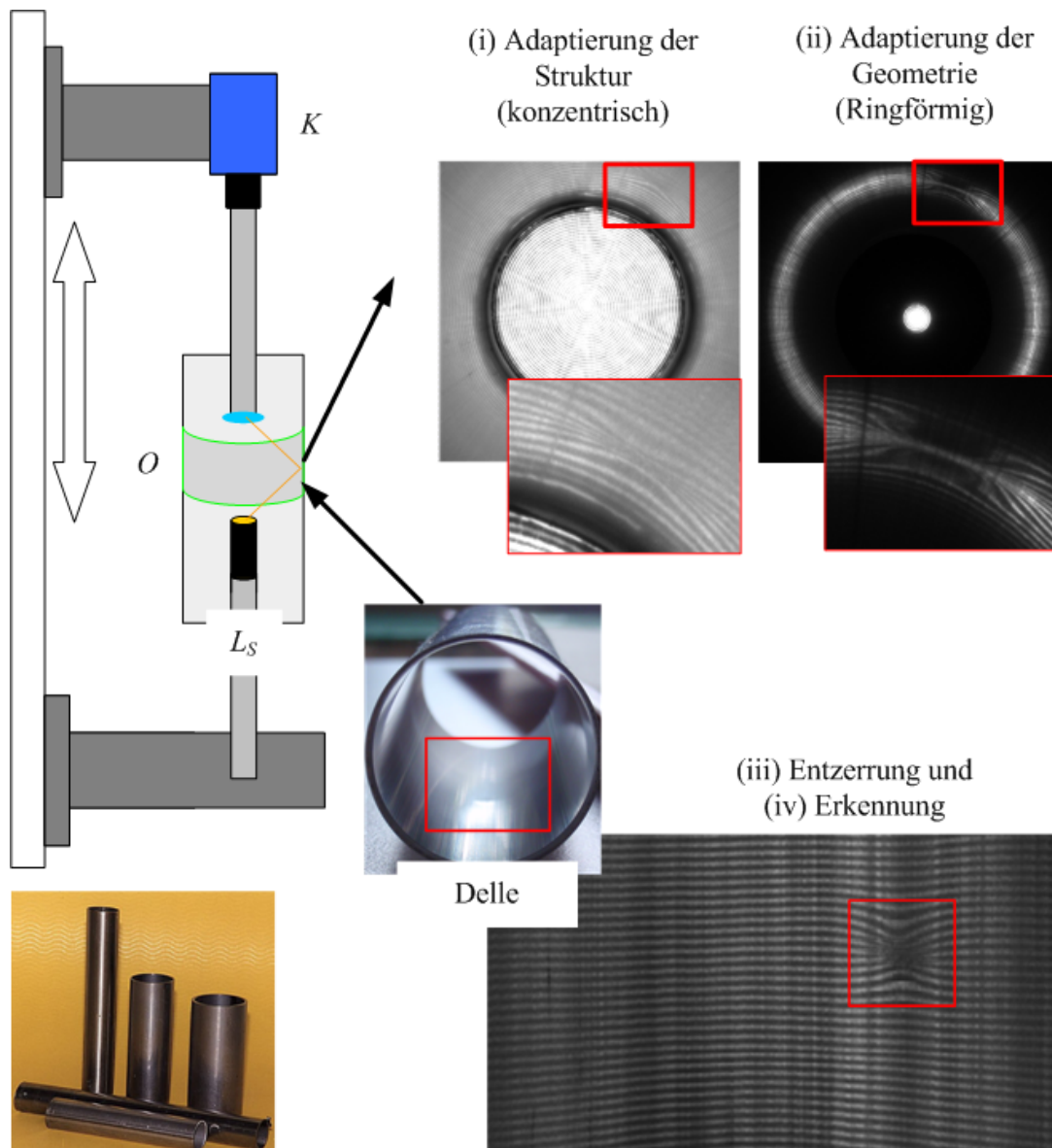


Abb. 5: Übersicht des experimentellen Aufbaus, verwendete Streifen-Muster (radiale und konzentrische) und aufgenommene Bilder unter Verwendung des konzentrischen Musters.

4.2 Visuelle Hervorhebung der Fehler: Wahl des Musters

Ziel der Voruntersuchungen war das beste Muster (radial oder konzentrisch) zu finden welches eine optimale Hervorhebung der Defekte ermöglicht.

Ein wesentlicher Nachteil der radialen Muster ist die immer größer werdende Auflösung der inneren Region. Die Auflösungsgrenze ist hier vom eingesetzten Drucker abhängig (die meisten besitzen eine max. Auflösung von 1.200 dpi). Die Konsequenz ist, dass die zentrale Region nicht optimal dargestellt werden kann und Moiré-Effekte auftreten. Weiterer Nachteil des radialen Musters ist, dass die Ortsfrequenz des Musters vom Abstand zum Zentrum abhängig ist, was zu unregelmäßigen Streifen (nach der Entzerrung der Aufnahme) führt, was wiederum die Bildverarbeitung erschwert.

Dagegen bleibt die Streifen-Frequenz bei konzentrischen Mustern konstant. Nach der Entzerrung ist hier das Streifen-Muster regelmäßig bzw. hat eine konstante Periode. Damit kann auch eine robustere und effizientere Charakterisierung der Muster erreicht werden, wie in [13,14] beschrieben.

4.3 Visuelle Hervorhebung der Fehler: Aufnahmen

Aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse wurden konzentrische Muster für die Aufnahmen der Innenflächen ausgewählt. Das verwendete Muster wurde mit einer Periode kleiner als die minimale Fehlergröße von ca. 2 mm generiert. Die Kameraauflösung wurde so gewählt, dass kleinste Muster aufgenommen werden konnten (Abtast-Theorem).

Die entzerrten und fusionierten Bilder, siehe Abb. 5, zeigen die Aufnahme der inneren Fläche mit visueller Hervorhebung einer Beule. Diese kann durch die lokale Änderung der Streifen sehr gut erkannt werden. Die Aufnahmen zeigen auch, dass diese Aufnahmetechnik gleichartige Streifen-Strukturen wie beim Referenz-System liefert [11]. Aus diesem Grund können die gleichen Verfahren zur Lokalisierung und Klassifizierung der fehlerhaften Flächen angewendet werden. Diese Verfahren wurden bereits vorher für komplexere Flächen verallgemeinert [13,14].

Die Aufnahmen zeigen, dass die vorgeschlagene Methode, wegen der zum Referenz-System gleichartigen resultierenden Streifenmuster, für Echtzeit-Prüfsysteme verwendet werden kann. Sie ist sehr empfindlich bzgl. der visuellen Hervorhebung von texturartigen und geometrischen Fehlern (die Auflösung ist nur begrenzt durch die Drucker-Auflösung) und lässt sich auch einfach implementieren (keine speziellere Hardware ist hier notwendig).

5. Zusammenfassung und Fazit

Wesentliches Ziel dieses Artikels war eine neue Methode zur Prüfung von inneren Oberflächen vorzustellen, um komplexe Inspektionsanforderungen zu bearbeiten; wobei komplex in dem Sinne, dass unterschiedliche Fehlertypen mit nur einer Aufnahme unterschieden werden sollen, gemeint ist. Durch theoretische Überlegungen konnte die optimale Streifen-Struktur definiert werden, so dass die Aufnahmen der gesamten inneren Oberflächen ein regelmäßiges Muster zeigen. Diese Strukturen sind auch sehr ähnlich zu den Streifen-Mustern des Referenz-Systems.

Die Ergebnisse zeigen, dass hier ein deflektometrischer Ansatz verwendet werden kann, so dass gleichzeitig unterschiedliche Fehlertypen auf Innenoberflächen visuell hervorgehoben werden können. Die Technik basiert auf der Fusion von diffuser und Streifen-Beleuchtung. Es wurde gezeigt, dass Bohrungen mit wenigen Millimetern Durchmesser mit dieser Technik geprüft werden können.

Die wesentlichen Komponenten (endoskopische Aufnahmen und Auswertung von Streifen-Mustern) wurden im Rahmen der Entwicklung von Echtzeitsystemen definiert. Aus diesem Grund kann die hier vorgeschlagene Technik auch zur Echtzeit-Prüfung komplexer innen liegender Flächen angewendet werden. Diese Untersuchungen sind die Basis für weitere Entwicklungen im Bereich der Inspektion von industriell gefertigten Bohrlöchern.

Referenzen

- [1] C. B.Board, Stress wave analysis of turbine engine faults. In: IEEE Aerospace Conference Proceedings, Jg. 6, doi:10.1109/AERO.2000.877885, 18-25 März 2000, s. 79–93.
- [2] Franz Pernkopf, 3D surface analysis using coupled HMMs. doi.: 10.1007/s00138-005-0001-3. In: Machine Vision and Applications, Jg. 16, H. 5, S. 298–305, (2005).

- [3] Franz Pernkopf, Peter O'Leary, Visual inspection of machined metallic high-precision surfaces. In: EURASIP Journal on Applied Signal Processing archive, Jg. 2002 (2002), s. 667–678.
- [4] Feyzi Inanc, An optical approach to the characterizations of surface flaws induced by fretting. In: AIP Conference Proceedings, 615, doi:10.1063/1.1472877, 2002, s. 780–787.
- [5] Jussi Paakkari, On-Line flatness measurement of large steel plates using Moire topography. University of Oulu, Finland, 1998.
- [6] K.Martin, C. V. Stewart, R. Hammond, Real time tracking of borescope tip pose. In: 3rd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society Press, doi:10.1109/ACV.1996.572016, 02-04 Dezember 1996, s. 123–128.
- [7] Marino, P.; Dominguez, M. A.; Alonso, M., Machine-Vision based detection for sheet metal industries. In: The 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1999 in San Jose, CA, USA. doi.: 10.1109/IECON.1999.819404, Bd. 3, 1999, s. 1330–1335.
- [8] A. Perelygin, A. A. Chigorko, Flexible photorecording fiber optical endoscope for the inner wall control of extensive cylindrical article. In: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists, Tomsk, Russia. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 8 - 12 April 2002.
- [9] Klaus Spinnler, Recheckige Querschnitte Kontrollieren QZ (Qualität und Zuverlässigkeit) 50 (2005).
- [10] Williams, A., Streifenmuster im Spiegelbild. In: Inspect Magazine, GIT Verlag GmbH & Co. KG, Darmstadt (2008), H. 02.
- [11] Yannick Caulier; Andreas Goldschmidt, Klaus Spinnler, und Marc Arnold, Automatic detection of surface defects and structural defects on reflecting workpieces, Photonik Journal 5 (März 2009).
- [12] Yannick Caulier, Klaus Spinnler, Salah Bourennane und Thomas Wittenberg, New Structured Illumination Technique for the Inspection of High Reflective Surfaces. In: EURASIP Journal on Image and Video Processing, Jg. 2008 (2007) doi:10.1155/2008/237459, 14 Seiten.
- [13] Yannick Caulier, Klaus Spinnler, Thomas Wittenberg, Salah Bourennane Segmentation and Classification of Anomalies in Periodic Structures. In: Journal of Electronic Imaging, Jg. 17 (3) (2008).
- [14] Yannick Caulier, Salah Bourennane, Fourier-Based Inspection of Free-Form Reflective Surfaces. In: Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS 2008), Juan-les-Pins, France, 20-24 Oktober (2008).