

Endoskopische Messverfahren in der Mikrotechnik

*Erfassung filigraner Mikrogeometrien mithilfe faseroptischer
Streifenprojektion*

Christoph Ohrt, Markus Kästner und Eduard Reithmeier,
Leibniz Universität Hannover



Dipl.-Ing. (FH) Christoph Ohrt arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover im Bereich der endoskopischen Streifenprojektion.



Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Markus Kästner leitet die Gruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität.



Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier leitet das Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover.

Die Qualität und Geschwindigkeit in der Fertigung und Montage von Mikrosystemen hat in den letzten Jahren immense Fortschritte gemacht. Ausgereifte Mikro- und Nano-Ra-

pidprototypingverfahren in Verbindung mit Replikationstechniken ermöglichen die Massenfertigung von hochpräzisen Mikrobauteilen. Für die Qualitätskontrolle solcher Bauteile wird eine ebenso schnelle wie genaue Messtechnik benötigt. Die diesbezüglichen guten Erfahrungen der makroskopischen Streifenprojektion sollen daher auf die Anforderungen der Mikrotechnik angepasst und optimiert werden. Ein Ansatz hierfür ist die endoskopische Streifenprojektion. Mit ihrer Hilfe wird es möglich, kleinste Messvolumina präzise und berührungsfrei dreidimensional zu erfassen und auszuwerten. Das Messprinzip und die Möglichkeiten werden anhand eines faserbasierten endoskopischen Streifenprojektionssystems aus dem, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten, Sonderforschungsbereich Transregio 73 erläutert.

Die Mikro- und Mikrosystemtechnik hat in den letzten 20 Jahren enorme Fortschritte gemacht, sowohl in Fertigungsgeschwindigkeit wie auch -qualität [1]. Nachdem sie zunächst fast ausschließlich in der Elektronik und Halbleiterindustrie Anwendungen fand, wächst mittlerweile auch das Interesse an Mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) und Mikrooptoelektromechanischen Systemen (MOEMS) wie auch dem Bereich der Mikrofluidik [2, 3]. Existierende Messsysteme wie Rasterkraftmikroskopie (AFM) und konfokale

Mikroskope oder Qualitätsüberwachungssysteme wie Rasterelektronenmikroskope (REM) haben in der Regel den Nachteil, dass der Messvorgang mit hohem manuellen und zeitlichen Aufwand verbunden ist. Dies macht Sie zur Qualitätskontrolle in der Massenfertigung von Mikrosystemen nur bedingt einsatzfähig. Es wurde daher begonnen nach neuen Messsystemen zu suchen, die vor allem die Anforderungen der hohen Geschwindigkeit und hohen Präzision wie auch der Automatisierbarkeit erfüllen.

Prinzip der endoskopischen Streifenprojektion

Das Verfahren der Streifenprojektion wird seit Jahren bei makroskopischen Messungen mit ähnlichen Anforderungen an die Geschwindigkeit und die relative Genauigkeit erfolgreich eingesetzt. Die Methode basiert auf dem Prinzip der flächigen Triangulation. Im Gegensatz zur herkömmlichen Lasertriangulation wird nicht nur ein Laserpunkt über das Messobjekt gefahren und von einer Detektorzeile wieder aufgenommen, sondern ein flächiges Bild auf das Objekt projiziert und von einem CCD-Sensor detektiert. Hierbei kann innerhalb eines Messzyklus in wenigen Sekunden, die Geometrie eines Messobjektes aufgenommen und quantitativ ausgewertet werden. Die Größe des Messvolumens bestimmt hierbei zusammen mit der Auflösungsfähigkeit der Optiken, des Streifenprojektors und

Kontakt:

Leibniz Universität Hannover
Christoph Ohrt
Institut für Mess- und
Regelungstechnik
Nienburger Straße 17
30167 Hannover
Tel.: 0511 / 762-3334

E-Mail: info@imr.uni-hannover.de
URL: <http://www.imr.uni-hannover.de>

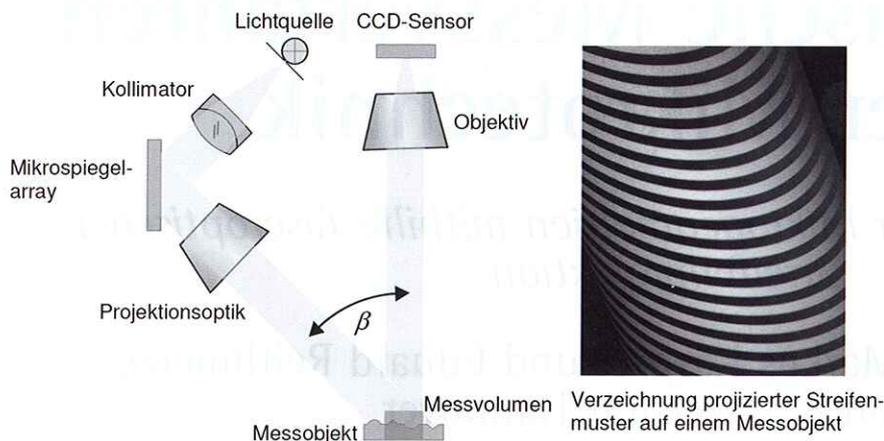


Bild 1: Aufbau und Funktionsweise eines Streifenprojektionssystems [4].

der CCD-Kamera die maximale erreichbare Genauigkeit des Systems.

Das heißt, kleinere Messvolumina wirken sich verfahrensbedingt positiv auf die Auflösung aus.

In Bild 1 wird zunächst das Prinzip der herkömmlichen Streifenprojektion dargestellt. Es wird Licht von einer monochromatischen oder Weißlichtquelle auf ein Feld von Mikrospiegeln gestrahlt. Die nur ca. 10 µm großen Mikrospiegel sind meist mit einem Füllungsgrad von über 90 % im Verhältnis 1024 x 768 rechteckig angeordnet. Jeder Spiegel ist in 2 Positionen verkipptbar [4, 5]. Das Feld wird so justiert, dass eine dieser Positionen Licht in eine Projektionsoptik einkoppelt und die andere Stellung das Licht auf einen Absorber reflektiert. Auf diese Weise lassen sich zunächst binäre schwarzweiße Muster erzeugen. Abhängig von der Aufnahme­frequenz des CCD-Elements können durch Pulsweitenmodulation am Spiegelarray auch bis zu 256 Graustufen erzeugt werden.

Auf diese Weise werden definierte Streifenmuster erzeugt, die sich aus den einzelnen Lichtpunkten der Mikrospiegel zusammensetzen. Eine Projektionsoptik mit festgelegtem Triangulationswinkel bildet dieses auf dem Messobjekt ab. Auf der Oberfläche wird das Muster durch die Geometrie des Prüflings verzerrt und anschließend über ein telezentrisches Objektiv auf das CCD-Element übertragen. Der 3D-Messeffekt

ergibt sich aus der Auslenkung der projizierten parallelen Streifenmuster auf der gekrümmten Oberfläche.

Mithilfe der dreidimensionalen Geometrieinformationen können Fehler im Fertigungsablauf schnell aufgedeckt werden, wodurch zeitnah geeignete Korrekturen durchgeführt werden können und die Anzahl von Ausschussteile minimiert werden. Für eine ganzheitliche 3D-Erfassung von MEMS oder mikrofluidischen Strukturen sind in der Regel Aufnahmen aus mehreren Perspektiven nötig. Je nach Design kann es auch notwendig werden, angepasste Sensorköpfe mit anforderungsoptimierten Triangulationswinkeln und Projektionsoptiken zu verwenden. Da herkömmliche Optiken so wie Projektionseinheiten und die CCD-Aufnahmeeinheit in der Regel zu groß und zu schwer für eine kostengünstige und zuverlässige Mikropositionierung sind, wurde auf ein System zurückgegriffen, welches durch seinen vielfältigen Einsatz in der Medizintechnik und technischen Qualitätskontrolle [6] bereits einen sehr hohen Reifegrad erreicht hat um schwer zugängliche Stellen mithilfe von Mikrooptiken sichtbar zu machen.

Die sog. starre und flexible Endoskopie wurde bisher fast ausschließlich als optisches Prüfinstrument, aber so gut wie nie als automatisiertes Messinstrument eingesetzt. Es existieren zwar verschiedene Verfahren mit einem En-

doskop manuell Strecken zu messen [8], allerdings bisher keine um 3D Messdaten aufzunehmen und auszuwerten [9]. Dies wird erst durch Kombination mit der Streifenprojektion möglich.

Bild 2 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Systems. Das projizierte Streifenbild wird über Objektive in ein Faserbündel eingekoppelt und über Gradient Index (GRIN) Mikrostablin­sen auf das Messobjekt abgebildet. Über ein zweites Faserbündel wird das verzerrte Bild wieder aufgenommen und auf eine CCD-Kamera übertragen. Der Steuer- und Messrechner identifiziert die Aufnahme und berechnet daraus Höheninformationen, welche die 3D Geometrie des Messobjektes widerspiegeln. Die Adaption der Endoskopie für die Streifenprojektion bietet weiterhin die Möglichkeit sich auf die teils komplexen Geometrien durch die Auswahl von optimierten Sensorköpfen anzupassen.

Versuchsaufbau zur Messung kleiner Messvolumina

In der Mikrotechnik lässt sich der oben beschriebene Messaufbau vielseitig einsetzen. Im Sonderforschungsbereich TR73 wird das System in der Qualitätskontrolle für Verzahnungen kleinen Moduls eingesetzt. In Bild 3 ist der aktuelle Messaufbau im Detail dargestellt.

Zur Erhöhung der Lichtintensität im Strahlengang wird eine neuartige Laserlichtquelle (1) verwendet. Herkömmliche Laser haben den Nachteil, dass sie durch Interferenzeffekte auf rauen Oberflächen zur Specklebildung neigen. Dies macht eine Auswertung der Abbildung des Messobjektes schwierig, da der Specklekontrast oft höher ist als der des projizierten Streifenmusters. Aus diesem Grund wurde eine rotierende Diffusorscheibe (2) in den Strahlengang eingebracht, welche den Specklekontrast auf ein akzeptables Maß reduziert ohne dabei den Aufweitungswinkel des Lasers stark zu erhöhen. Dies ist für eine gute Intensitätserhaltung im Strahlengang von sehr hoher Bedeutung.

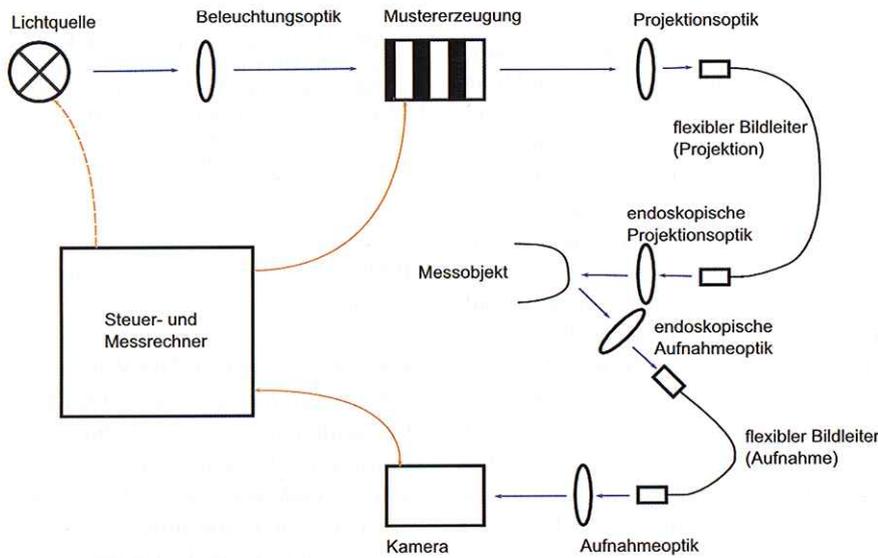


Bild 2: Konzept für ein endoskopisches Streifenprojektionssystem [10].

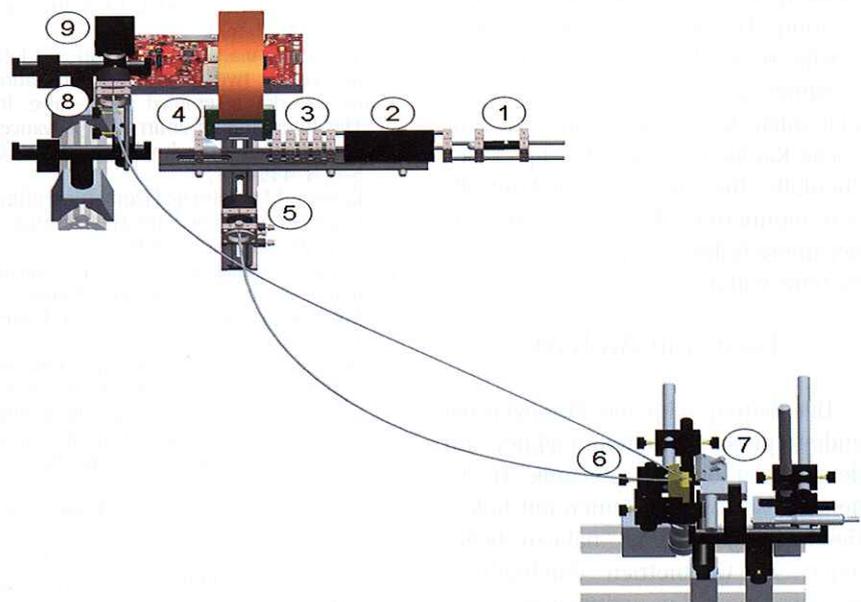
Ein weiteres Problem des Lasers als Beleuchtungsmedium ist sein meist gaußsches Strahlprofil. Es verhindert nicht nur eine flächige homogene Beleuchtung des Bilderzeugers sondern kann auch zudem ein Auslöser von hohen Glanzpunkt-contrasten auf dem Messobjekt sein. Dies erschwert die Bildauswertung ebenso wie der Speckle-contrast. Ein der Dif-fusorscheibe nachgeschaltetes Mikro-linsenarray dient als sog. Flat-Top-Generator (3), mit dessen Hilfe das Gaußprofil in eines mit gleichmäßiger Intensitätsverteilung umgewandelt wird. Über dasselbe Linsenarray wird auch der runde Strahlquerschnitt in einen rechteckigen umgewandelt. Die Kombination dieser beiden Effekte ergibt eine quasi ideale Lichtquelle für die Streifenmustererzeugung. Im Falle des im TR 73 entwickelten Systems wurde ein Mikrospiegelarray (Digital Mirror Array, DMD) (4) der Firma Texas Instruments verwendet. Es besteht aus einem Feld von 1024 x 768 einzeln ansteuerbaren Mikrospiegeln. Auf diese Weise kann ein extrem homogenes Streifenmuster mit geringer Divergenz erzeugt werden. Das Muster wird über ein Mikroskopobjektiv (5) in ein Faserbündel von 100.000 flexiblen und definiert zueinander

angeordneten Glasfasern eingekoppelt und zum Messkopf (6) übertragen. Der Messkopf ist im Design der zu messenden Mikrogeometrie angepasst. Er kann beispielsweise mit Stahlteilen oder Shutter-Systemen und mehreren Faserbündeln ein Messobjekt in 360°

Rundumansicht beleuchten. Somit werden teure Piezo Nanoaktuatoren unnötig und gleichzeitig die Mess-sicherheit gesenkt. Durch den Mess-kopf wird der Triangulationswinkel vorgegeben unter dem das Messobjekt beleuchtet wird. Das vom Prüfling reflektierte Bild wird von einem weitem Faserbündel gleicher Bauart (8) mit GRIN-Optik aufgenommen und auf eine hochauflösende Mikrokamera projiziert. Mit den entsprechenden Auswert-algorithmen lässt sich ein 3D Modell des kompletten Mikrobauteils mit nur einer Messung ohne Neu-positionierung des Messkopfes ermitteln. Das macht die Messung schneller als die meisten bisherigen Methoden und ebenso automatisierbar.

Zur Qualitätssicherung bei der Herstellung von Mikroverzahnungen in der Blechmassivumformung, soll der Messkopf, nach Abschluss der Ent-wicklung, nach einer Reihe gefe-rtigter Bauteile automatisch in das Gesenk gefahren werden um es auf Defekte oder Verschleißerscheinungen zu prüfen. Diese Prüfung kann den verschleißbedingten Ausschuss auf ein

Bild 3: Endoskopische Streifenprojektionssystem. 1: Beleuchtungslaser; 2: Entspeckler; 3: Strahlformer und Flat-Top Generator; 4: Digital Mirror Array; 5: Einkoppelobjektiv mit Faserbündel; 6: Sensorkopf; 7: Messobjekt; 8: Auskoppelobjekt; 9: CCD-Kamera.



Minimum reduzieren. Die Meldung für einen nötigen Werkzeugwechsel erfolgt in diesem Fall vollautomatisch, da Messwerte nach jedem Messvorgang mit einer digitalisierten tolerierten Sollgeometrie verglichen werden.

Hohlraummessungen

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Messendoskopie ist die Erfassung von Geometrien und Hohlräumen, die für andere Messsysteme schwer zugänglich sind. In Guss- und Feingussbauteilen werden heute immer komplexer werdende Mikrostrukturen eingebracht. Die Dimensionen solcher Strukturen, wie z.B. Kühlkanäle, Einspritzdüsen, Ventilbohrungen und mikrofluidische Formen, lassen sich zum Teil mit nur mit erhöhtem Aufwand oder gar nicht quantitativ ermitteln, obwohl sie für die Funktion der Bauteile unerlässlich sind. Prozesse können daher schlecht optimiert werden, was hohen Ausschuss bei der Fertigung zur Folge haben kann. Das flexible Messendoskop lässt sich in diese schwer zugänglichen Bereiche einführen. Durch einen 360° Messkopf kann es seine Position relativ zu den es umgebenden Seitenwänden über Algorithmen selbst ermitteln und bei der Geometrierfassung ausgleichen. Damit ist eine hochgenaue Positionierung innerhalb des Messobjektes unnötig. Durch die flexiblen Mikroglasfaserbündel mit einem Gesamtdurchmesser von nur 4 mm lassen sich auch Messstellen durch kurvenreiche Kanäle erreichen. Es eignet sich ebenfalls für die Verschleißkontrolle von montierten Motoren, wenn eine geeignete Bohrung zum Einführen des Systems vorhanden ist.

Fazit und Ausblick

Der Beitrag zeigt das Potenzial der endoskopischen Streifenprojektion auf dem Gebiet der Mikrotechnik. Hochgenaue Messungen können mit hohen Geschwindigkeiten an nahezu beliebigen 3D Geometrien durchgeführt werden. Durch den geringen Bauraum

des Messkopfes lässt sich das System einfach in Fertigungsanlagen integrieren oder für Messungen von Hohlräumen und schwer zugänglichen Stellen einsetzen. Angepasste Messköpfe ermöglichen die 360° Geometriefassung von Mikrosystemen. Der entwickelte Demonstrator wird in Zukunft mit neuen Messköpfen erweitert, deren Auflösungsvermögen ermittelt wird. Durch ein neues Design soll das System eingehaust und somit für den industriellen Einsatz vorbereitet werden. Da das Gerät bei der Messung nur so genau positioniert werden muss, dass sich das Messobjekt vollständig im Messvolumen befindet, werden keine hochgenauen Positionierachsen benötigt. Das macht das System sehr robust und lässt sich einfach mobil einsetzen. Es wird innerhalb der nächsten Jahre angestrebt ein industrietaugliches System zu entwickeln mit einer Reihe universell einsetzbarer Messköpfe für Verzahnungen, Hohlräume, bestimmte geometrische Formen und 360° Messungen.

Literatur

- [1] Mahalik, M. P.: Principle and applications of MEMS: a review. In: International Journal of Manufacturing Technology and Management 13 (2008) 2-4, S. 324-343.
- [2] Fedder, G. K.: MEMS Fabrication. In: Proceedings 2003 International Test Conference (ITC 2003), Charlotte, NC, USA, S. 691-698.
- [3] Schizas, C. u.a.: On the design and fabrication by two-photon polymerization of a readily assembled micro-valve. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 48 (2010) 5-8, S. 435-441.
- [4] Kästner, M.: Optische Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile. Hannover 2008.
- [5] Monk, D.; Gale, R.: The Digital Micro-mirror Device for Projection Display. In: Microelectronic Engineering 27 (1995) 1-4, S. 489-493.
- [6] Hornbeck, L. J.: Digital Light ProcessingTM and MEMS: Timely Convergence for Bright Future. In: Proceedings SPIE Micromachining and Microfabrication '95, Austin, Texas, USA (October 24, 1995).
- [7] Amman, F.: Technische Endoskopie. München 1984.
- [8] Gebrauchsmusterschrift: DE 201 05 211 U1 Meß-Endoskop. Anmeldetag 21.03.2001.
- [9] Driessen, S. H.: Faseroptisches Streifenprojektionssystem zur Inline-Erfassung von 3D-Oberflächengeometrien für die Mikromontage. Aachen 2008.
- [10] Krauß, M.: Entwurf und Aufbau einer Projektionseinheit für ein endoskopisches Streifenprojektionssystem. Hannover 2009.

Schlüsselwörter:

MEMS, Mikrofluidik, Streifenprojektion, Endoskopie

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB/TR 73 „Umformtechnische Herstellung von komplexen Funktionsbauteilen mit Nebenformelementen aus Feinblechen - Blechmassivumformung -“ im Teilprojekt „Endoskopische Geometrieprüfung durch modulare faseroptische Sensorköpfe“ das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter dem Kennzeichen SFB/TR 73 gefördert wird.

Endoscopic Measuring Techniques in Micro Technology

Quality and speed in manufacturing and assembly of micro systems significantly increased within the last years. Sophisticated micro- and nano-rapid prototyping methods in connection with replication techniques allow mass production of micro parts with very high precision. For quality control of those parts an as well fast as precise measuring method is necessary. The very good experiences of macroscopic fringe projection shall therefore be adapted and optimized to micro systems. Endoscopic fringe projection can achieve the measurement of small volumes optically, 3 dimensionally and precisely. The measuring principle and chances of this technique are explained exemplary on a fibrebased endoscopic fringe projection system, which currently is developed in cooperation with the SFB/TR 73 which is supported by the German research foundation (DFG).

Keywords:

MEMS, microfluidic, fringe projection, endoscopy