

Prozessvisualisierung in der Mikrofertigung

Lage- und Qualitätskontrolle durch eine arbeitsraumintegrierte Messoptik

Jörg Lehmann, Jens P. Wulfsberg

Dipl.-Ing. Jörg Lehmann, Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik
Laboratorium Fertigungstechnik
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg
Tel.: 040 / 6541 2610 –oder – 2720
Fax: 040 / 6541 – 2839
e-Mail: Joerg.Lehmann@hsu-hh.de oder Jens.Wulfsberg@hsu-hh.de
Internet: <http://laft.hsu-hh.de>

Inhalt

Die Einbindung von Messtechnik in Maschinen der Mikroproduktion ermöglicht den Aufbau von Qualitätsregelkreisen. Genaue und hochauflösende Messsysteme können jedoch nur bedingt in die Arbeitsraum integriert werden. Einen Lösungsansatz bietet der Einsatz von Stabliniensystemen mit kleinem Durchmesser, ergänzt durch ein Mikroobjektiv. Durch die Auswertung der Abbilder lassen sich die Vermessung und Bewertung der Mikrobauteile realisieren, ohne diese aus dem Referenzsystem der Maschine zu entnehmen

In Process Visualization of Micro Operations

Position and quality controlling with integrated optical measurement technology

Abstract

The integration of measurement technology in a micro machining tool makes it possible to create a closed loop quality control system. But it's difficult to integrate a system with high accuracy and resolution into the workspace of a machine tool. A possible solution is to use an optical system, based on a rod lens system, which can be, caused by its small diameter, easily mounted in the working space. By applying this optical system a workpiece can be analysed very fast and without leaving the reference system of the machine tool.

1 Einleitung

Der Trend in der Mikroproduktionstechnik geht immer mehr in Richtung hybrider Bearbeitungsprozesse, bei denen mehrere Teilprozesse im Koordinatensystem einer Produktionsmaschine zusammengeführt werden. Dies erfordert Einbindung von Messtechnik direkt in die Fertigungsmaschine, um geschlossene Qualitätsregelkreise zu realisieren. Genaue und hochauflösende Messsysteme lassen sich jedoch nicht ohne weiteres in eine Fertigungsumgebung einbinden.[1],[2] Die Hauptproblematik ist dabei die Beherrschung von ungünstigen Umgebungseinflüssen (zum Beispiel Vibration, Klimaschwankungen oder Verschmutzung). Weitere Herausforderungen sind die Ausnutzung des knappen Bauraums in den Fertigungseinrichtungen sowie die Referenzierung und Synchronisation von Messsystem, Messvorgang und Produktionsmaschine.

2 Anforderungen an das Messsystem

Unabhängig vom verwendeten physikalischen Messprinzip ist die Forderung nach einem Messsystem,

welches den Bedingungen im Arbeitsraum einer Maschine standhält. Dies bezieht sich in erster Linie auf eine Systemausführung, die gegen Verschmutzungen, die während des Bearbeitungsvorganges entstehen, geschützt ist und somit auch unter realen Einsatzbedingungen eine einwandfreie Funktion des Systems garantieren. Weiterhin ist sicherzustellen, dass das Messprinzip die geforderte Genauigkeit und Auflösung für einen Einsatz im Mikrobereich erreichen kann.

Zur Realisierung eines solchen Messsystems gibt es generell zwei mögliche Ansätze. Zum einen eine Lösung auf Basis eines taktilen Messverfahrens (z.B. mit Messtaster) oder alternativ ein berührungsloses Messverfahren (z.B. optisch). Gegen eine Verwendung von Messtastern spricht unter anderem der relativ große Zeitbedarf für eine Vermessung kompletter Geometrien und die Tatsache, dass eine Erweiterung einer Bearbeitungsmaschine zu einer integrierten Koordinatenmessmaschine generell nicht sinnvoll erscheint. Dies steht jedoch nicht im Widerspruch zu einer Verwendung von Messtastern für die Antastung von Werkstücken im Arbeitsraum, wie sie beispielsweise in [4] beschrieben werden. Ebenso wie bei den taktilen Systemen gilt auch bei der Verwendung eines optischen Systems, dass die zu erreichende Qualität nicht mit denen einer optischen Messmaschine vergleichbar sein kann. Dennoch bieten die optischen Verfahren den Vorteil, dass eine Auswertung von erfassten Geometriemerkmale im Vergleich zu einer taktilen Messung erheblich weniger Zeit benötigt. Dies gilt auch, wenn berücksichtigt wird, dass die benötigte Zeit mit der Komplexität der eingesetzten Bildverarbeitungsalgorithmen steigt.

Die nötige Optik zum Aufbau des Systems sollte möglichst wenig Platz im Arbeitsraum der Maschine einnehmen, sich aber trotzdem gut auf das Werkstück fokussieren lassen und ein formatfüllendes Bild für die Geometrieauswertung erzeugen. Einen Lösungsansatz bietet der Einsatz von Stabliniensystemen mit kleinem Zylinderdurchmesser, ergänzt durch ein Mikroobjektiv.[5],[6] Mit dem am Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT) der Helmut-Schmidt-Universität entwickelten optischen Aufbau [3] wird ein Abbild des Werkstücks aus einem Mikrobearbeitungsraum in den Makroraum transferiert, so dass zur Bilderfassung Methoden des Makrobereiches genutzt werden können. Durch die Auswertung der Aufnahmen lassen sich Vermessung und Bewertung der erfassten Mikrobauerteile realisieren, ohne dass dazu das Mikrobauerteil aus dem Bearbeitungsraum z.B. zur Vermessung in einem Koordinatenmessgerät oder zur optischen Vermessung mittels Mikroskop entnommen und der Produktionsprozess hierfür längerfristig unterbrochen werden muss.

Ein entscheidender Parameter für ein in den Arbeitsraum einer Maschine integrierbares optisches System, ist neben der möglichst kleinen bzw. schmalen Bauform auch die Wahl eines geeigneten Arbeitsabstandes. Die Forderung bezüglich der Bauform erfüllen die bereits erwähnten Stabliniensysteme. Aufgrund ihres geringen Durchmessers, ergibt sich in der Regel die Möglichkeit, die Optik z. B. parallel zur Bearbeitungsspindel zu platzieren. Durch eine Bewegung der Maschinenachsen kann die Optik auf einfache Weise über dem Messobjekt positioniert werden. Für die Auswahl des Arbeitsabstandes, d.h. im Falle der Stablinienoptik die Lage des Fokusbereiches, kann folgende Bedingung formuliert werden:

Die Optik muss hoch genug über dem Werkstück montiert sein, um während des Bearbeitungsprozesses nicht beschädigt zu werden, aber tief genug montiert sein, damit bei einer Fokussierung auf das Werkstück ausreichend Abstand zwischen Werkzeug und Werkstück vorhanden ist.

Bei der vorgeschlagenen Verwendung einer Stablinienoptik kommt erschwerend hinzu, dass ihr Fokuspunkt aus physikalischen Gründen fest gewählt werden muss und sich nur mit hohem und teurem Aufwand, durch Um- bzw. Neubau der Optik, verändern oder korrigieren lässt. Weiterhin ist für den Aufbau der Optik die maximale Größe der zu betrachtenden Objekte festzulegen, da diese für die Wahl des

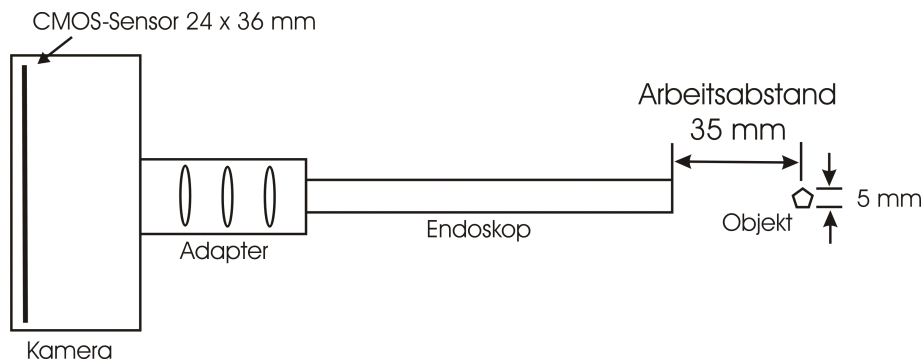


Bild. 1: Prinzipieller Aufbau des optischen Systems

Öffnungswinkel, welcher ebenfalls nur durch einen Um- oder Neubau zu korrigieren ist, entscheidend ist. **Bild. 1** können der prinzipielle Aufbau sowie die festgelegten Werte für den Arbeitsabstand bzw. Fokuspunkt und die maximale Objektgröße entnommen werden, die für den Aufbau der Versuchseinrichtung am LaFT gewählt wurden.

3 Visualisierung von Geometrien zwischen einzelnen Bearbeitungsfolgen

Durch den Einbau des Systems direkt in die Fertigungseinrichtung kann das Abbild des Werkstücks ohne Werkstückumpositionierung bzw. einen Maschinenwechsel aufgenommen werden, so dass auch zwischen einzelnen Bearbeitungsschritten eine Kontrolle möglich wird. **Bild 2** zeigt auf der rechten Seite den strukturellen Ablauf der Prüfung. Zunächst ist eine Aufnahme des Messobjektes (Werkstück) auszuwerten, d.h. es müssen Geometriemerkmale des Werkstücks gefunden werden. Zur Ermittlung eines Maßstabes ist die Optik dann um einen definierten, mit der hohen Auflösung heutiger Wegmesssysteme in Mikrobearbeitungsmaschinen genau erfassbaren, Weg zu verfahren. Durch die Aufnahme und Auswertung eines weiteren Bildes, kann dann die Anzahl der Pixel bestimmt werden, um die die Bauteilgeometrie verschoben wurde. Durch dieses Vorgehen kann ein Maßstab für die weitere Vermessung des Bauteils erzeugt werden. Als nächster Schritt erfolgt dann eine Vermessung der Bauteilgeometrie und ein Abgleich zwischen den Soll- und Ist-Daten, bevor abschließend die Entscheidung getroffen werden kann, ob ein

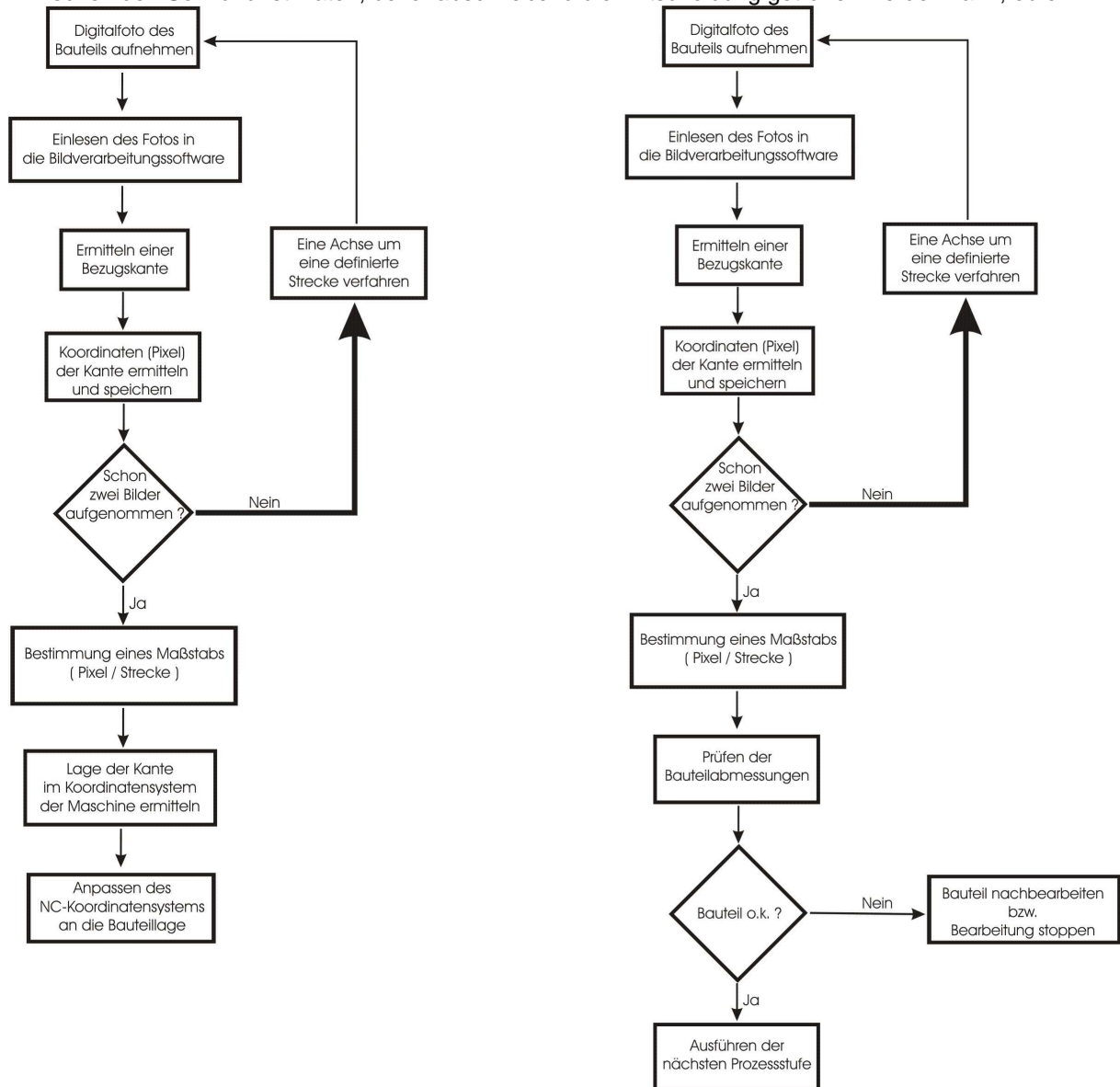


Bild 2: Schematische Darstellung der Abläufe bei der Werkstücklagermittlung (links) und bei der Qualitätskontrolle (rechts)

Werkstück in der nächsten Prozessstufe weiter bearbeitet werden kann, oder eine Nachbearbeitung erforderlich ist bzw. das Werkstück als Ausschuss aus der Produktion genommen werden muss.

Sollte es nötig werden, z.B. aufgrund eines Maschinenwechsels, das Werkstück aus der Einspannung zu lösen, so kann nach dem erneuten Einlegen des Werkstücks in die Folgemaschine ein aufgenommenes Bild zur Spann-Lageermittlung herangezogen werden. Wenn die Lage der Achsen des optischen Systems in Bezug auf die Maschinenachsen bekannt ist, kann z.B. der Winkel einer Verdrehung des Werkstücks bezüglich der Bearbeitungsachsen mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware ermittelt werden. Der nötige Algorithmus ist in **Bild 2** links dargestellt. Wie schon bei der Werkstückvermessung werden zunächst zwei Bilder des Werkstücks aufgenommen, um einen Abbildungsmaßstab zu bestimmen. Über eine Bildverarbeitungssoftware wird dann eine Bezugskante (Bauteilkante) ermittelt und deren Orientierung im Bildkoordinatensystem bestimmt. Durch Kenntnis des ermittelten Winkels kann dann das Bearbeitungsprogramm korrigiert werden bzw. die Maschinensteuerung den Winkel beim Ablauf des Fertigungsprogramms berücksichtigen. Dies reduziert die Anzahl der aufgrund von Lagefehler fehlerbehafteten Werkstücke.

4 Bildauswertung mit Standardsoftwarekomponenten

Bild. 3 zeigt beispielhaft die Aufnahme eines teilgefertigten Werkstückes. Mit Hilfe des *Matlab*-Bildverarbeitungstools *Image Processing Toolbox* ist zunächst eine der Bauteilaussenkanten zu detektieren. Dazu ist es erforderlich das Originalbild in ein Graustufenbild bzw. ein Schwarz-Weiß-Bild zu transformieren, da die am Markt verfügbaren Bildverarbeitungstools in der Regel keine Farbbilder verarbeiten können. Bei Bedarf kann das Bild vor den weiteren Analyseschritten noch einer Kontrastverstärkung unterzogen werden. Nach diesen Vorarbeiten kann jetzt die Analyse mit den Algorithmen zur Kantenerkennung durchgeführt werden. In einem ersten Schritt wird ein sogenanntes logisches Kantenbild erzeugt, in dem die erkannten Konturpunkte dargestellt werden. In einem zweiten Schritt werden dann aus dem Bild die Geraden ermittelt, auf denen die meisten der erkannten Konturpunkte liegen. Die so ermittelte Kante wird in das logische Kantenbild oder alternativ in das Originalbild eingeblendet, um dem Anwender die Möglichkeit zu geben, die Lage der erkannten Kante mit der Lage der realen Kante zu vergleichen. Wurde eine Kante falsch erkannt, kann der Anwender diese verwerfen und der Algorithmus sucht nach einer weiteren Kante. Diese Abfrage wurde vorgesehen, da z.B. beschädigte Werkstückoberflächen oder Schattenwurf bei der Aufnahme des Bildes zur Erkennung sogenannter Pseudokanten führen. Diese Pseudokanten werden zwar vom Algorithmus als Kante identifiziert, haben jedoch nichts mit der Lage der realen Bauteilkontur zu tun. In einem letzten Schritt wird für die erkannte Bauteilkante die Lageverschiebung bezogen auf den Bildmittelpunkt bzw. die Richtung (Winkel in Bezug zur Bildaussenkante) bestimmt. Die ermittelten Verschiebungen entlang der x- bzw. y-Achse sowie der Winkel werden dann als Ergebnis der Bildanalyse in einem File gespeichert.

Die Wahl des Bildmittelpunktes erfolgte aufgrund der Überlegung, dass sich für ein fest installiertes Messsystem auch immer ein fester Abstand zwischen einem Bildpunkt und dem Bearbeitungswerkzeug ergibt. Da dieser Zusammenhang generell für alle Bildpunkte / Pixel gilt, ist die Festlegung auf den Bildmittelpunkt willkürlich. Im Prinzip könnte auch jeder andere Bildpunkt verwendet werden, solange er nicht als absoluter Punkt definiert ist, da dies bei einem Kamerawechsel, womit in der Regel auch einer Änderung der Pixelanzahl verbunden ist, zu einem Programmfehler führen würde.

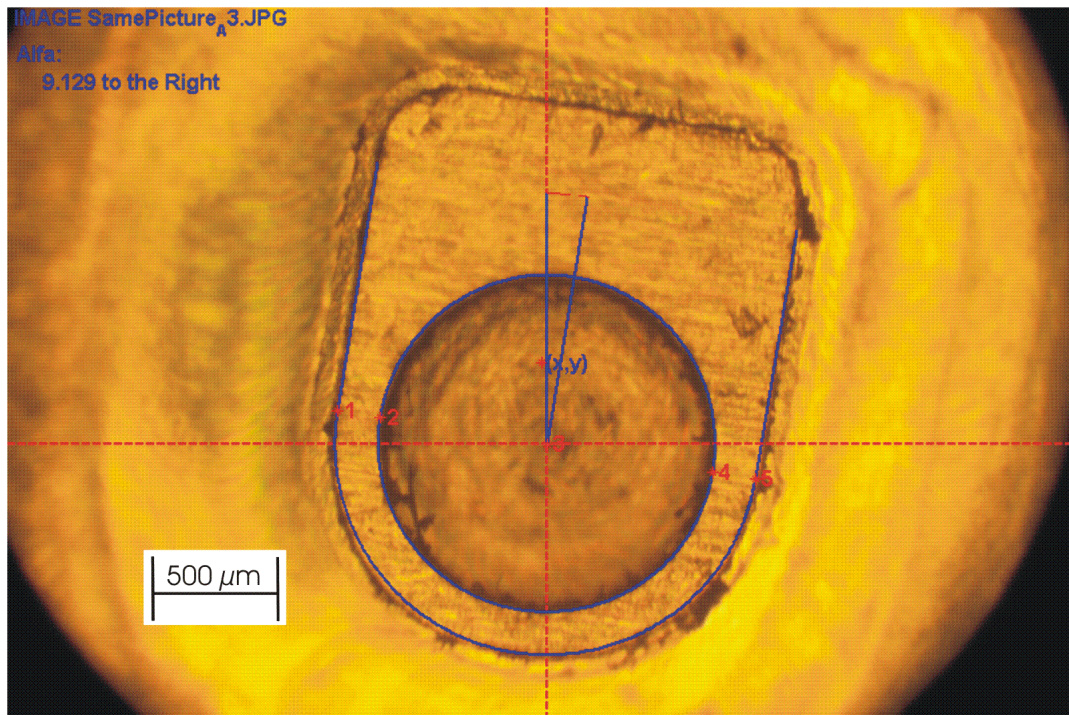


Bild 3: Ausgewertetes Bild mit einer Verdrehung von ca. 9° bezogen auf die Maschinenachsen (rote Linien)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der ersten hier vorgestellten Versuchsergebnisse kann deutlich gemacht werden, dass das beschriebene optische Konzept zur Lagefehlererkennung in Mikrofertigungseinrichtungen prinzipiell geeignet ist. In weiteren Entwicklungsschritten ist nun das System in die Fertigungseinrichtung in der Art zu integrieren, dass die ermittelten Korrekturdaten automatisch an die Maschinensteuerung übergeben werden und bei der weiteren Bearbeitung Berücksichtigung finden.

Weiterhin ist zu prüfen, inwieweit das Auflösungsvermögen der optischen Einrichtung ausreichend für die geplante Anwendung ist und ob es ggf. verbessert werden muss und ab wann das Auflösungsvermögen durch die Physik begrenzt wird.

Ebenso gilt es zu diskutieren, wie das zur Zeit zweidimensionale System zu einem dreidimensionalen System erweitert werden kann. Bisher können nur Lagefehler in der x/y-Ebene des Werkstückes bzw. der Fertigungseinrichtung erfasst werden, jedoch keine Verkippungsfehler.

Zusätzlich zur reinen Lageerkennung bietet das System die Möglichkeit, bei entsprechender Referenzierung, das Werkstück online, d.h. in der Fertigungseinrichtung, zu vermessen. Dies kann nach jedem Fertigungsschritt erfolgen und ermöglicht somit schon sehr früh die Erkennung von fehlerhaften Werkstücken und somit ggf. eine Nachbearbeitung durch Anpassung der CNC-Bearbeitungsprogramme. Sind die ermittelten Fehler nicht mehr zu korrigieren, kann die Bearbeitung frühzeitig abgebrochen und ein neuer Bearbeitungsvorgang gestartet werden. Das trägt zur Kostensenkung in der Fertigung bei, da zum einen fehlerhafte Bauteile korrigiert werden können und somit weniger Ausschuss produziert wird und zum anderen die Bearbeitungszeit von Bauteilen, bei denen eine Fehlerkorrektur nicht mehr möglich ist, verringert wird.

Literatur

- [1] J. Hesselbach, et al, Appl .mikroPRO, **wt-online** Heft 3 (2003) S119 – 128
- [2] T. Pfeifer, et al, Integration von optischen Messsystemen in Produktionsmaschinen. **VDI-Z** Nr. 5 (2004)20-23
- [3] J. P. Wulfsberg. 3D-Mikrobearbeitungsraum-Projektor. **Gebrauchsmuster** Nr. 20 2004 013 326.1, eingetragen am 23.12.2004
- [4] N.N., Vielseitiges Talent in der Mikrobearbeitung. **WB Werkstatt und Betrieb** Nr. 10/2004 S24-25
- [5] J.Reiling, Industrielle Endoskopie. **Verlag Moderne Industrie**, Landsberg, 1997
- [6] J.Reiling, et. Al. Technische Endoskopie. **Expert Verlag**, Renningen, 2001