

Trends in der Koordinatenmesstechnik

Multisensorik

Von Albert Weckenmann und Philipp Krämer

Der Markt verlangt moderne, immer leistungsfähigere und zuverlässigere Produkte. Häufig nimmt dabei die Miniaturisierung der Komponenten zu. Diese Anforderungen spiegeln sich auch in den Forderungen an die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Messergebnisse zur Sicherung der Produkt- und Prozessqualität wider.

Der Umfang und die Vielfalt der zu erfassenden Messdaten steigen drastisch an. Mithilfe von Multisensor-Koordinatenmessgeräten lassen sich die Beschränkungen beim Einsatz eines einzelnen Sensors umgehen, indem der den Anforderungen entsprechende Sensor merkmalsabhängig genutzt wird.

Vom Messschieber zum Multisensor-Koordinatenmessgerät

Die frühe Fertigungsmesstechnik konnte nur ein- und zweidimensionale Merkmale mit handbedienten Messgeräten auf der Oberfläche der Werkstücke erfassen. Jedes Merkmal musste einzeln erfasst werden, eine Automatisierung mit Dokumentation der Ergebnisse war nicht möglich.

Dipl.-Ing. Philipp Krämer und Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann, Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik (QFM), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nägelsbachstrasse 25, D-91052 Erlangen, www.qfm.uni-erlangen.de

Erst die Verfügbarkeit von leistungsfähigen und kostengünstigen Prozessrechnern ermöglichte einen Paradigmenwechsel: die Erfassung hochaufgelöster Punkte für die Messung von drei- statt zweidimensionalen Merkmalen mithilfe der Koordinatenmesstechnik [5]. In der Koordinatenmesstechnik werden Merkmale auf der Oberfläche

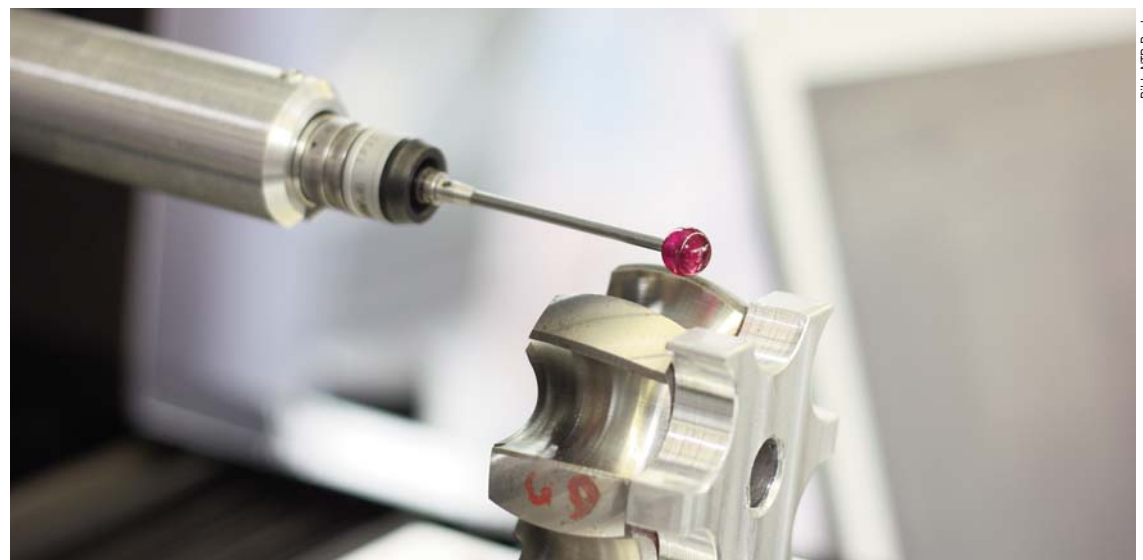
eines Werkstücks durch Einzelpunkte erfasst, die mithilfe von Ausgleichsalgorithmen zu Ersatzgeometrieelementen verrechnet werden. Durch Vergleich dieser Elemente mit den Vorgaben des Konstrukteurs lässt sich die Toleranzeinhaltung, das heisst die Konformität, des Bauteils prüfen.

Erfassung hochaufgelöster Punkte

Jedoch konnten erst durch die Entwicklung der ersten Tastsysteme Einzelpunkte auf der Bauteiloberfläche reproduzierbar angetastet und gemessen werden. Anschliessend werden diese Punkte durch Ausgleichsrech-

nung verknüpft. Durch Weiterentwicklungen der Gerätekomponenten konnte die Auflösung auf sieben tragende Dezimalstellen gesteigert und die Messgeschwindigkeit erhöht werden. Dadurch wurde es möglich, den Anforderungen der Berndtschen Regel zu genügen: Das Verhältnis von Toleranz zu Messunsicherheit zu Auflösung konnte 100:10:1 betragen. Heute sind taktile Koordinatenmessgeräte mit Auflösungen im Nanometerbereich einerseits und andererseits mit Messbereichen bis zu mehreren Metern erhältlich.

Ein erneuter Paradigmenwechsel wurde durch die ganzheitliche Messdatenerfassung möglich [4]. Durch die Verfügbarkeit von optischen und tomografischen Messverfahren kann die Gestalt des Bauteils vollständig erfasst werden. Mithilfe der Multisensorik können die verschiedenen Merkmale mit dem jeweils idealen Sensor erfasst werden. Durch die CAD-gestützte Auswertung und die dreidimensionale Darstellung von Messergebnissen werden die Interpretation und die anschliessende Umsetzung der Ergebnisse, zum Beispiel in Produkt- oder Prozessänderungen, wesentlich vereinfacht. Durch den Einsatz der Röntgen-Compu-



Zerstörungsfrei Details untersuchen

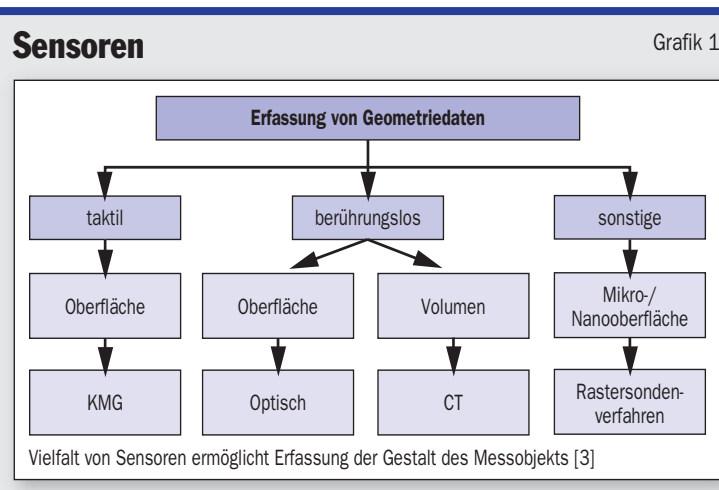
Bild: NTE Buchs

tertomografie in der Fertigungs- messtechnik ist inzwischen sogar die Erfassung des Innern und des Äusseren eines Bauteils in einem Prozessschritt möglich. Dies ermöglicht gänzlich neue Analysen, etwa die Messung an montierten Baugruppen.

Das gesamte Bauteil erfassen

Zur Erfassung einzelner Messpunkte auf der Oberfläche des Bauteils ist es notwendig, die Oberfläche reproduzierbar zu detektieren und diese Detektion mit dem Auslesen der Gerätemassstäbe zu koppeln. Heute steht dazu eine Vielzahl verschiedener Sensoren zur Verfügung (Grafik 1).

Vergleicht man die verschiedenen Sensoren, so muss



zeit existiert eine Vielzahl verschiedener Bauformen, die auf sehr unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen und dadurch unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Punktsensoren erfassen die Oberfläche nur in Antastrichtung, die weiteren Koordinaten des Messpunktes müssen aus den Längenmesssystemen in den Geräteachsen über die Position des Sensors im Gerätekoordinatensystem ermittelt werden. Beispiele hierfür sind Foucault-Laser-Abstandssensoren oder chromatische Abstandssensoren.

Flächenhaft messende Sensoren hingegen erfassen einen

grösseren Ausschnitt der Oberfläche des Messobjekts in einem Vorgang und arbeiten dadurch wesentlich schneller als taktile oder optische Einzelpunktsensoren. Typische Beispiele sind kamerabasierte Bildverarbeitungssysteme, Streifenprojektion, Fotogrammetrie, flächenhafte 2D/3D-Autofokusverfahren oder scannende Weisslichtinterferometrie. Allen gemein ist die berührungslose, rückwirkungsfreie Erfassung des Messobjektes mit einer hohen Messpunktedichte in kurzer Zeit.

Die erzielbare Genauigkeit wird durch Gestalt und Werkstoff des Messobjekts sehr stark beeinflusst. Wichtig bei allen optischen

Sensoren ist die Beleuchtung, die an die Oberfläche des Messobjekts angepasst werden muss, um eine gute Erfassung zu gewährleisten. Begrenzt wird der Einsatz optischer Sensoren durch die Zugänglichkeit der zu messenden Merkmale und durch Abschattungen, zum Beispiel an Hinterschneidungen. Die Messung im Innern von zusammengesetzten Baugruppen ist auch durch optische Sensoren mangels Zugänglichkeit nicht möglich.

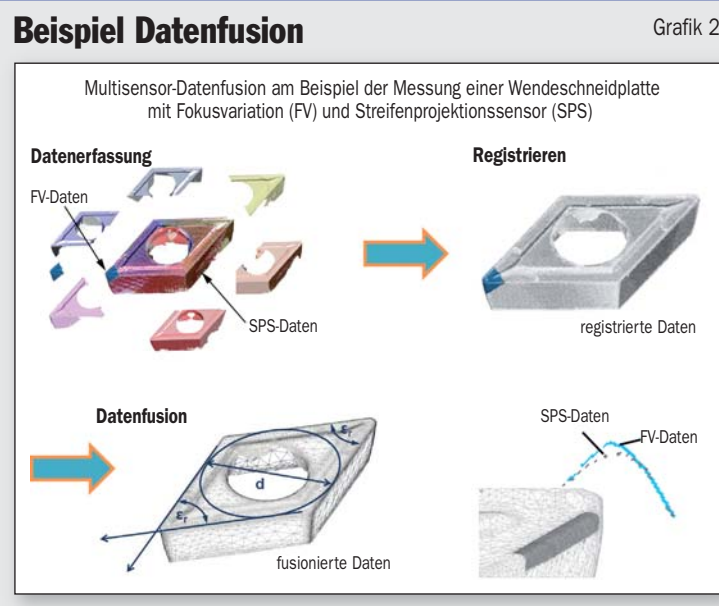
Erst seit vergleichsweise kurzer Zeit wird die Röntgen-Computertomografie in der Koordinatenmesstechnik eingesetzt [6]. Hierbei wird das Messobjekt während einer Drehung durchstrahlt und die dabei aufgenommenen Einzelbilder werden nachfolgend zu einem dreidimensionalen Volumendatensatz rekonstruiert. Dieser enthält Informationen über das Bauteil als Ganzes und beschränkt sich – im Gegensatz zu taktilem oder optischen Sensoren – nicht auf die Oberfläche. Dadurch ist es möglich, zum einen Koordinatenmessungen von Merkmalen auf der Oberfläche als auch im Innern des Bauteils durchzuführen, und zum anderen kann es auch zerstörungsfrei auf Defekte (Lunker, Risse) untersucht werden. Das Bauteil wird dabei mit einer sehr hohen Messpunktedichte hochaufgelöst erfasst. Eine mit taktilem oder optischen Verfahren vergleichbare Messunsicherheit von wenigen Mikrometern kann erreicht werden.

Die Grenzen der Tomografie liegen derzeit in der Durchstrahlbarkeit des Bauteils, sodass grosse oder stark absorbierende metallische Werkstücke nicht oder nur mit begrenzter Genauigkeit gemessen werden können. Zusätzlich wird die Untersuchung von Baugruppen aus verschiedenen Werkstoffen durch unterschiedliche Absorptionseigenschaften

Ganzheitlich Messdaten erfassen

zunächst festgestellt werden, dass die Normung im Bereich der taktilem Messtechnik aufgrund der langjährigen Verfügbarkeit sehr ausgereift und detailliert ist. Dies zeigt sich im Begriff «antasten», der auch für das Messen mit optischen Sensoren genutzt wird. Die taktilem Normen werden heute als Basis für die Erstellung von Richtlinien für optische oder tomografische Koordinatenmessgeräte genutzt. Auch die Leistungsfähigkeit neuer Messgeräte wird stets im Vergleich zu taktilem Messungen beurteilt. Taktilem Messungen sind jedoch meist mit einer langen Messzeit bei einer vergleichsweise geringen Anzahl von Messpunkten verbunden.

Soll ein Berühren der Oberfläche gänzlich vermieden werden oder muss mit sehr hoher Geschwindigkeit gemessen werden, so lassen sich optische Sensoren gewinnbringend einsetzen. Der-



begrenzt, da stets gewährleistet werden muss, dass das Messobjekt bei der Abbildung weder unter- noch überbelichtet wird. Für Kombinationen aus stark und schwach absorbierenden Materialien (Materialmix) kann dies derzeit nicht gewährleistet werden. Eine messtechnisch sinnvolle Erfassung mit geringen Messunsicherheiten ist nicht möglich.

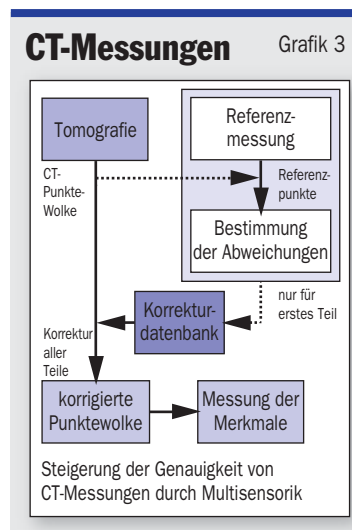
Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Werkstücke und der sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Messgenauigkeit ist es nicht möglich, einen

Informationen kombinieren

Sensor grundsätzlich bevorzugt einzusetzen. Es muss für jeden Einzelfall entschieden werden, welcher Sensor die wichtigen Eigenschaften in Summe bestmöglich erfüllt. Besonders vorteilhaft ist dabei der Einsatz sogenannter Multisensor-Koordinatenmessgeräte, die verschiedene Sensorprinzipien in einem Gerät vereinigen. Sie sind eingemessen, sodass die Messung in einem gemeinsamen Koordinatensystem möglich ist und für jedes Merkmal der geeignete Sensor ausgewählt werden kann.

Fusion von Sensordaten ermöglicht umfassende Aussagen

Die Datenfusion, also das Zusammenführen von Daten aus verschiedenen Informationsquellen (Sensoren) in ein gemeinsames Format, ermöglicht Messergebnisse, die mithilfe eines einzelnen Sensors bisher nicht oder nur mit schlechter Genauigkeit bestimmt werden konnten. Der messtechnische Nutzen kann vielfältig sein: verbesserte räumliche und zeitliche Abdeckung, bessere Robust-



heit gegenüber Sensor- und Algorithmenunsicherheit, bessere Rauschreduktion, bessere Genauigkeit oder höhere Auflösung.

Im Bereich der Multisensorik basiert die Datenfusion auf verschiedenen Schritten. Zunächst erfolgt die Datenerfassung durch den Einsatz von Sensoren mit gleichen oder unterschiedlichen Messprinzipien. Direkt im Anschluss kann eine Datenvorverarbeitung unter anderem durch Filtern oder Merkmal-Extraktion erfolgen. Im nächsten Schritt müssen die Daten registriert werden. Dazu wird eine zweistufige Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem bestehend aus Grob- und Feinregistrierung vorgenommen. Dies kann merkmals- oder oberflächenbasiert erfolgen. Abschliessend erfolgt die eigentliche Datenfusion, bei der aus den registrierten Teilmessbereichen eine einzige nahtlose Oberflächenbeschreibung gebildet.

Anwendungsbeispiel

Das Vorgehen bei der Multisensor-Datenfusion wird in Grafik 2 am Beispiel einer Wendeschneidplatte gezeigt. Die Grobgestalt kann durch mehrere Aufnahmen mit einem Streifenprojektionssensor (SPS) erfasst werden. Die

Schneidzone wird mit besserer Auflösung durch einen Fokusvariationssensor erfasst. Durch das Registrieren erhält man einen Datensatz, an dem sowohl die Merkmale Durchmesser oder Schneidwinkel bestimmt werden können als auch der Kantendradius in der Schneidzone.

Durch die Fusion, das heisst die Kombination der Informationen verschiedener Sensoren, lässt sich der Gesamtinformationsgehalt der Messung steigern. So ist es zum Beispiel möglich, die Genauigkeit eines flächenhaft oder volumetrisch messenden Sensors wie der Computertomografie durch zusätzliche genauere taktile Messpunkte zu steigern. Durch Berechnen eines vektoriel- len Abweichungsfeldes zwischen den tomografischen und den taktilen Messpunkten lässt sich die CT-Punktewolke korrigieren (Grafik 3).

Da das Abweichungsverhalten stetig verläuft, reicht eine wesentliche geringere taktile Punktanzahl für die Korrekturberechnung. Einmal berechnet, kann das Korrekturfeld auf Wiederholmessungen des gleichen Bauteils bei identischen Aufnahmeeinstellungen übertragen werden [1].

Zusammenfassung und Ausblick

Die Multisensor-Koordinatenmesstechnik ermöglicht die Erfassung verschiedenartiger Merkmale an einem Werkstück mit dem jeweils geeigneten Sensor. Durch Registrierung der Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem lassen sich Messdaten verschiedener Sensoren gemeinsam auswerten. Dabei müssen die Charakteristika (Auflösung, Punktedichte, morphologische Filterung durch das Antastelement) der verschiedenen Sensoren berücksichtigt werden. Durch die Fusion verschiedener Sensordaten lässt sich bereits heute die

Genauigkeit von Messergebnissen steigern.

Künftige Herausforderungen betreffen zunächst die Standardisierung der Methoden und Modelle zur Datenfusion und zur Datenverarbeitung. Die Entwicklung von Geräten und Verfahren zur mehr- und multiskaligen Datenfusion – hier ansatzweise anhand einer Wendeschneidplatte gezeigt – besitzt noch grosses Potenzial. Im Bereich der Bestimmung der Messunsicherheit von Multisensor-Messungen zur Sicherung der Rückführung der Messergebnisse existieren derzeit allenfalls Ansätze. Hier liegt noch ein grosser Forschungsbedarf. Zur industriellen Anwendung ist es notwendig, die Messungen mit verschiedenen Sensoren, die Registrierung der Messdaten und

Multiskalige Datenfusion

die Datenfusion besser zu automatisieren. Nur dann können die Ergebnisse von den Forschungslaboratorien in das industrielle Umfeld übertragen werden. ■

Literatur

- [1] R. Christoph und H. J. Neumann: Multisensor-Koordinatenmesstechnik. In: Die Bibliothek der Technik Band 248. München: Verlag Moderne Industrie, 2006.
- [2] L. Shaw und A. Weckenmann: Datenfusion – Mehr als nur die Summe der Sensoren. In: VDI-Berichte 2120. Düsseldorf: VDI, 2010, S. 281–288. ISBN 978-3-18-092120-4.
- [3] A. Weckenmann, X. Jiang, K.-D. Sommer, U. Neuschaefer-Rube, J. Seewig, L. Shaw und T. Estler: Multisensor data fusion in dimensional Metrology. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology 58 (2009) 2, S. 701–721. ISSN 0007-9268.
- [4] A. Weckenmann und P. Krämer: Fertigungsmesstechnik – Geschichte, Aufgaben, Möglichkeiten und Trends. In: Ingenieurspiegel 2008/3, S. 71–72. ISSN 1868-5919.
- [5] A. Weckenmann, Ph. Krämer und A. Dietmaier: Koordinatenmesstechnik – gestern, heute, morgen. 8. VDI-Fachtagung Koordinatenmesstechnik 2010. In: VDI-Berichte 2120. Düsseldorf: VDI, 2010, S. 15–22. ISBN 978-3-18-092120-4.
- [6] A. Weckenmann und Ph. Krämer: Computed Tomography for Application in Manufacturing Metrology. In: Key Engineering Materials KEM Vol. 437 (2010), S. 73–78. ISSN 1013-9826.