

5. VDI-Fachtagung

Optische Messung von Funktionsflächen

VDI-Fachtagung

Form- und Kontur- messtechnik



VDI-Berichte 2285

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

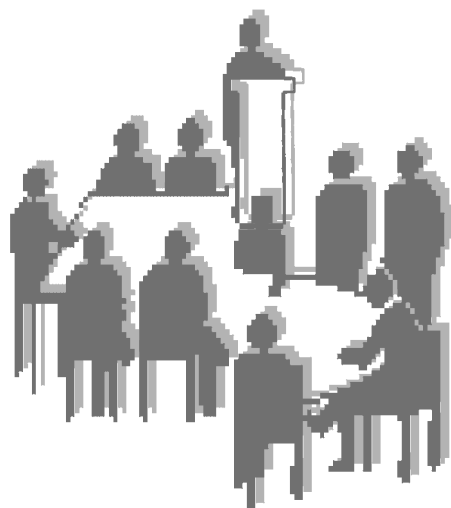
5. VDI-Fachtagung

Optische Messung von Funktionsflächen 2016

VDI-Fachtagung

Form- und Kontur- messtechnik 2016

Nürtingen bei Stuttgart, 28. und 29. Juni 2016



VDI-Berichte 2285

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

(German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092285-0

5. VDI-Fachtagung

Optische Messung von Funktionsflächen 2016

| | |
|---------|---|
| Vorwort | 1 |
|---------|---|

Prüfung optischer Komponenten – Im Fokus asphärische Oberflächen

| | | |
|------------------------------------|--|----|
| <i>G. Blobel, M. Schulz</i> | Vergleichsmessungen an Asphären | 3 |
| <i>F. Reischer, A. Beutler</i> | Messung optischer Oberflächen – von Asphären bis Freiformen | 17 |
| <i>M. Wendel, J. Petter</i> | Prüfung asphärischer Oberflächen durch scannende Interferometrie | 21 |

Photogrammetrische Verfahren

| | | |
|--|---|----|
| <i>T. Luhmann, M. Göring, C. Jepping</i> | Optische Messung der Verformung von Rotorblättern unter Windlast | 33 |
| <i>H. Friebe, M. Klein</i> | Optische Bewegungs- und Verformungsanalyse auf Basis applizierter Muster und Marken | 47 |

Optische Messsysteme in der Werkstoff- und Bauteilprüfung

| | | |
|---------------------|---|----|
| <i>A. Ettemeyer</i> | Optische Messtechniken in der Werkstoff- und Bauteilprüfung | 63 |
|---------------------|---|----|

Messung von Bauteilspannungen

| | | |
|--|--|----|
| <i>D. Buchta,</i> <i>W. Osten,</i> <i>C. Krekel</i> | Detektion von verborgenen Schäden an Kunstwerken mit Hilfe von Shearographie | 65 |
| <i>G. Pedrini,</i> <i>W. Osten,</i> <i>V. Martínez-García,</i> <i>M. Wenzelburger,</i> <i>A. Killinger,</i> <i>R. Gadow,</i> <i>P. Weidmann ,</i> <i>S. Schmauder</i> | Analyse von Eigenspannungen in beschichteten Oberflächen durch Laser-Ablation und digitale Holographie | 77 |

Sicherer Einsatz optischer Messsysteme

| | | |
|---|---|-----|
| <i>D. Imkamp,</i> <i>E. Schuster,</i> <i>M. Basel,</i> <i>H. Daxauer,</i> <i>A. Fuchs,</i> <i>T. Mayer</i> | Systeme zur Messung komplexer Oberflächen und ihre Leistungsbewertung | 87 |
| <i>L. Koenders,</i> <i>A. Felgner,</i> <i>R. Krüger-Sehm</i> | Normung: Taktile und optische Oberflächenmesstechnik – Spezifikationen und Kalibrierung | 99 |
| <i>R. Tutsch,</i> <i>M. Fischer</i> | Beiträge zur Messunsicherheit bei deflektometrischen Messverfahren | 111 |

Messungen auf Werkzeugmaschinen

| | | |
|--|---|-----|
| <i>W. Schott, I. Rahneberg, D. Dontsov</i> | Neuartige Kalibrierinterferometer mit 5 Freiheitsgraden | 121 |
| <i>P. Lehmann, S. Tereschenko</i> | Maschinenintegration von interferometrischen Präzisionssensoren | 135 |
| <i>R. Kuschmierz, A. Fischer, J. Czarske</i> | Absolute Formmessung in CNC-Drehmaschinen mit einem optischen Sensor | 147 |

VDI-Fachtagung

Form- und Konturmesstechnik

Normung / GPS

| | | |
|--------------------------|---|-----|
| <i>S. Gröger</i> | Das System der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung | 161 |
| <i>J. Hägele-Görlitz</i> | Fachausschuss VDI/VDE-GMA 3.21 Formmesstechnik | 171 |

Formmessung auf Koordinatenmessgeräten

| | | |
|---|---|-----|
| <i>U. Lunze, R. Roithmeier</i> | Messen von Form- und Lageabweichungen mit Form- und Koordinatenmessgeräten | 183 |
| <i>O. Jusko, H. Reimann, R. Bernhardt</i> | Möglichkeiten und Grenzen des Formscanning auf Koordinatenmessgeräten im Drei- und Vierachsbetrieb | 189 |
| <i>M. Weißgerber, S. Gröger</i> | Bezugsbildung – Assoziation und Funktion | 205 |
| <i>J. Illemann</i> | Strukturauflösung in der Koordinatenmesstechnik | 217 |

Welligkeit und Form

| | | |
|-------------------------------|---|-----|
| <i>R. Volk, L. Meigel</i> | Spektralanalyse auf unterbrochenen Profilen | 233 |
| <i>M. Hutzler</i> | Anwendung der harmonischen Analyse in der Wälzlager- fertigung | 245 |

Filter nach ISO 16610

| | | |
|-----------------|---|-----|
| <i>D. Hüser</i> | Software-Normale und Referenzsoftware für Filterung nach ISO 16610 | 255 |
|-----------------|---|-----|

Anwenderlösungen aus der Form- und Konturmesstechnik

| | | |
|---|---|-----|
| <i>B. Schönberg</i> | Strategien zur messtechnischen Validierung von Form- und Lagetoleranzen nach ISO GPS in der Praxis | 267 |
| <i>B. Brodmann, R. Brodmann, K. Konovalenko</i> | Optische Form- und Welligkeitsmessung im Nanometer- bereich | 281 |
| <i>D. Beiler</i> | Konturmessung an Nockenwellen | 291 |

Vorwort

Die Tagung „Optische Messung von Funktionsflächen“ gibt einen umfassenden Überblick über optische Messtechniken, wie sie heute vielfach zur flexiblen, schnellen und berührungslosen Prüfung von Funktionsflächen eingesetzt werden.

Es werden Lösungen für Messaufgaben in der Optikfertigung und der zerstörungsfreien Prüfung von Werkstücken aufgezeigt. Anhand von Beispielanwendungen wird gezeigt, dass optische Messverfahren heute auch prozessnah auf Werkzeugmaschinen eingesetzt werden können. Darüber hinaus werden Vorgehensweisen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Abschätzung der Messunsicherheit optischer Messgeräte vorgestellt und ein Überblick über anzuwendende Normen und Standards gegeben.

Ziel der Tagung ist es, Anwender über die Möglichkeiten der optischen Messtechnik an Funktionsflächen zu informieren und einen Beitrag zur sicheren Anwendung dieser Messtechniken in der industriellen Produktion zu liefern.

Wir freuen uns, Sie als Teilnehmer der Tagung vom 28. bis 29. Juni 2016 in Nürtingen begrüßen zu dürfen.

Im Namen der Tagungsleitung

Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig

Lehrstuhlleiter, TU Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Institutsleiter, TU Braunschweig

Der Programmausschuss

Dipl.-Ing. Jürgen Berthold, Technik und Wissenschaft, GMA,

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf

Dr.-Ing. Karl Dietrich Imkamp, Director Visual Systems, Industrial Metrology,

Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

Dr. rer. nat. Ludger Koenders, Fachbereichsleiter, Oberflächenmesstechnik,

PTB Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann, Fachgebietsleiter, Elektrotechnik/Informatik,

Universität Kassel

Prof. Dr. Wolfgang Osten, Institutsleiter, Institut für Technische Optik, Universität

Stuttgart

Vergleichsmessungen an Asphären

M.Sc. **Gernot Blobel**, Dr. **Michael Schulz**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine Methode zur Messdatenauswertung von optischen Asphären und Freiformoberflächen vorgestellt. Messdaten von optischen und taktilen Formmessgeräten werden verwendet, wobei die gemessenen Topografien genau zueinander ausgerichtet und die Abweichungen zur Designtopografie festgestellt werden. Die Oberfläche einer asphärischen Linse wurde von zwei taktilen und zwei optischen Messgeräten gemessen. Die Messdaten wurden nach der beschriebenen Methode ausgewertet und die Ergebnisse der Abweichungen zur Designtopografie werden gezeigt.

Abstract

This paper presents a method for the measurement data analysis of optical aspheres and freeform surfaces. Measurement data from optical and tactile form measuring systems are used, whereby the measured topographies are precisely aligned with each other and the deviations from the design topography are observed. The surface of an aspheric lens was measured by two tactile and two optical measuring devices. The measurement data were analyzed according to the described method and the results of the deviations from the design topography are shown.

1. Einleitung

Die Formmessung von asphärischen und Freiformoberflächen mit einer sehr hohen Genauigkeit ist für die Fertigung von Präzisionsoptiken von großer Bedeutung. Die Formmesswerte dienen während der Herstellung als Rückkopplung, denn die letztendlich hergestellte Oberfläche kann nur so genau sein, wie sie gemessen werden kann.

Für die Messung einer asphärischen Oberfläche gibt es verschiedene Messmethoden mit charakteristischen Eigenschaften, die unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Dabei wird zwischen berührenden (taktile) und berührungslosen (optischen) Systemen unterschieden. Die Art der Oberflächenmessung untergliedert sich weiter in punktweise, linienförmige oder

flächig messende Verfahren. Punktweise messende Systeme sind insbesondere 3D-Mikro-Koordinatenmessgeräte (μ KMGs) welche mit punktuellen Tastern oder optischen Punktsensoren die Topografie der Oberfläche absolut messen. Flächig messende Systeme sind Interferometer, bei denen man zwischen vollflächig messenden und Sub-Apertur-Interferometern unterscheiden kann. Die vollflächig messenden Interferometer verwenden typischerweise Computer-generierte Hologramme (CGH) zur Prüfung einer asphärischen Oberfläche im so genannten Nulltest, wobei die Herstellung der Hologramme sowohl zeit-aufwändig als auch kostspielig ist und sie zudem nur für die jeweilige Asphäre zu nutzen sind. Dagegen setzen die Sub-Apertur-Interferometer die gesamte Topografie durch Stitching der gemessenen Teilbereiche zusammen.

Obwohl eine Reihe von verschiedenen optischen und taktilen Verfahren zur Messung asphärischer Oberflächen genutzt werden, gibt es derzeit kein anerkanntes absolutes Referenzmessverfahren. Daher sind Vergleichsmessungen auf nationaler und internationaler Ebene zwischen Messgeräteherstellern, Forschungsinstituten und nationalen Metrologieinstituten (NMIs) notwendig, um die Entwicklung der Metrologie voran zu treiben. Durch einen Messvergleich mit asphärischen TransfERNormalen sollen die existierenden Abweichungen zwischen verschiedenen Messgeräten festgestellt werden. Um bei einem Asphären-Messvergleich die Gleichbehandlung der teilnehmenden Partner zu gewährleisten, sind verschiedene Herausforderungen bezüglich der unterschiedlichen Messgeräte, Messverfahren und Datensätze zu bewältigen. Diese Herausforderungen werden in dem zweiten Kapitel erläutert. Im dritten Kapitel wird eine Methode der Datenauswertung und deren Ablauf vorgestellt. In Kapitel vier werden die Ergebnisse einer ausgewerteten Asphäre gezeigt, welche mit zwei taktilen und zwei optischen Messgeräten gemessen wurde. Abschließend wird der Beitrag zusammengefasst.

2. Herausforderungen

Die Aufgabe von Vergleichsmessungen ist es, existierende Abweichungen zwischen den Messdaten von verschiedenen Messgeräten festzustellen. Bei einem Vergleich von Asphären-Messgeräten werden asphärische TransfERNormale verwendet und die Abweichungen der gemessenen Topografien werden ausgewertet. Die Organisation eines Messvergleichs übernimmt meistens ein Pilotlabor. Ein wichtiger Punkt vorab ist die Auswahl geeigneter TransfERNormale, in diesem Fall Asphären, und die Messbarkeit der Oberfläche für alle beteiligten Messgeräte. Daher müssen die Eigenschaften (Material, Form, Durchmesser, Höhe, Wölbung, Gradienten, Wendepunkte, etc.) sorgsam bedacht und das TransfERNormal danach ausgesucht werden.

Von den unterschiedlichen Messgeräten bzw. deren Verfahren ist auch die Form der Messdaten abhängig. Man unterscheidet Messgeräte, die die absolute Topografie messen von solchen, die die Abweichung von der Designtopografie erfassen. Die Projektion der Oberfläche kann in Richtung der kartesischen z-Achse oder in Richtung der lokalen Oberflächennormale ausgegeben werden. Die Abrasterung der Oberfläche kann gleich-, kreis-, spiral- oder linienförmig erfolgen. Die Punktdichte ist von der Anzahl und der Verteilung der Messpunkte abhängig und kann äquidistant oder nicht-äquidistant sein. Da bei den Messungen die Orientierung der Oberfläche nicht immer gleich ist, muss diese in der Auswertung korrigiert werden. Während der Messungen kann es zu zufälligen Störeinflüssen kommen, z.B. Kratzer oder Partikel auf der Oberfläche oder Rauschen, die im Nachhinein beachtet werden sollten.

Insgesamt gibt es folgende Punkte, welche bei der Messdatenauswertung berücksichtigt werden sollten. Dazu zählen:

- der Messdatentyp (absolute Topografie oder Abweichung zur Designtopografie)
- die Art der Projektion (in Richtung der z-Achse oder senkrecht zur Oberfläche)
- das Rasterverfahren (gleich-, kreis-, spiral- oder linienförmig)
- die Messpunktdichte (Anzahl und Verteilung)
- die Orientierung der Oberfläche
- und zufällige Störeinflüsse (Kratzer, Partikel oder Rauschen).

3. Auswertemethode

Eine Methode zur Auswertung von Topografiemessdaten wird nachfolgend vorgestellt. Das Ablaufdiagramm der Auswertung ist in Bild 1 dargestellt. Vorteilhaft ist es, wenn die Teilnehmer ihre Messdaten als Rohdaten, d.h. ohne Abzug einer bestpassenden Sphäre oder die Anwendung von Filterfunktionen zur Glättung der Topografie, zur Verfügung stellen.

In den ersten Schritten der Auswertung werden die Daten importiert und es wird zunächst eine grobe Anpassung der Koordinatensysteme vorgenommen, bei der eventuelle Ablagen zum Koordinatenursprung abgezogen werden. Zunächst wird von den Messdaten der größte gemeinsame Durchmesser bestimmt und für die Ausrichtung der Koordinatensysteme verwendet. Nach einer ersten Visualisierung der Messdaten kann beurteilt werden ob es sich bei der jeweiligen Messung um eine absolute Topografie oder die Abweichung zur Designtopografie handelt. Falls eine absolut gemessene Topografie vorliegt, werden die Messdaten anhand der Designtopografie in bis zu sechs Freiheitsgraden ausgerichtet. Wenn die Messdaten die Abweichungen zur Designfläche wiedergeben, kann man die Designtopografie zu den Messwerten hinzu addieren, um absolute Topographiedaten zu erhalten. Zur Überfüh-

rung der Messdaten in ein gemeinsames Koordinatensystem werden die Datenpunktwolken dann ebenfalls an der Designtopografie ausgerichtet. Hierfür wird ein in der PTB entwickeltes Matlab®-Programm benutzt, wobei ein nicht-lineares Minimierungsproblem mit der Methode der kleinsten Quadrate gelöst wird. Der vertikale Abstand der Datenpunktwolke wird zur Designtopografie in maximal 6 Freiheitsgraden, in Rotation (α , β , γ) und Translation (x , y , z), minimiert.

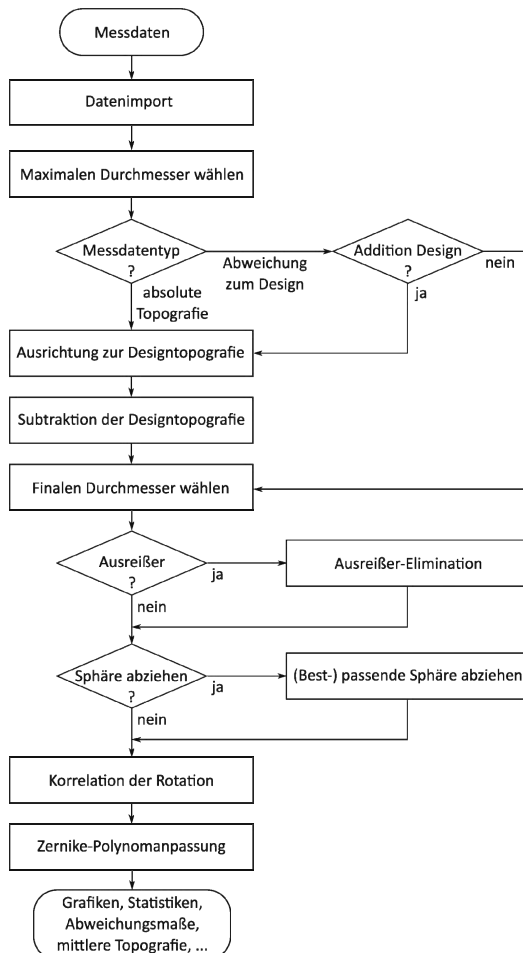


Bild 1: Ablaufdiagramm für die Auswertung von Asphären-Messdaten

Bei einer rotationssymmetrischen Asphäre werden aufgrund ihrer Rotationssymmetrie nur fünf Freiheitsgrade verwendet und die Rotation γ um die z-Achse bleibt inaktiv. Bei einer Freiformoberfläche können alle sechs Freiheitsgrade für die Ausrichtung verwendet werden. Nach der Ausrichtung zur Designtopografie wird sie von den Messdaten abgezogen. Die Abweichungen zur Designtopografie werden Residuen genannt. Die Ausgabe der Residuen erfolgt auf demselben Raster der ursprünglichen Messwerte. Alternativ kann man die Ausrichtung zur Designtopografie und deren Subtraktion überspringen wenn die Messdaten bereits die Abweichung zur Designtopografie sind.

Zur Überprüfung besteht im Programm die Möglichkeit, die Schritte des Minimierungsverfahrens als Video anzusehen und das letzte Bild abzuspeichern. Eine Beispiel-Ausgabe ist in Bild 2 dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung sind die Designtopografie der gemessenen Asphäre und die Punktwolke der Messwerte in einem 3-dimensionalen Koordinatensystem zu sehen. Im unteren Teil sind die Residuen grafisch dargestellt. Rechts unten sind die Differenzen der Rotations-, im Bogen- und Gradmaß, und Translationsparameter dargestellt. Außerdem wird der quadratische Mittelwert der Residuen e_{rms} berechnet und als Qualitätsmaß mit angegeben.

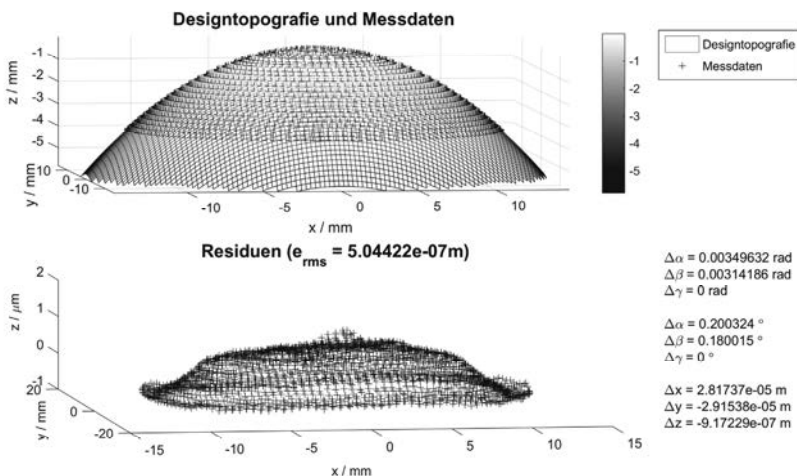


Bild 2: Ausgabebild der durchgeführten Ausrichtung zur Designtopografie an beispielhaften Messdaten einer Asphäre.

Anschließend wird optional geprüft, ob sich Ausreißer in den Residuen befinden. Als Ausreißer werden Werte bezeichnet, die in einer geringen Häufigkeit außerhalb des erwarteten Wertebereichs vorkommen. Dazu wird eine Analyse der Häufigkeitsverteilung durchgeführt. Da größere Abweichungen zur Designtopografie möglich sind, wird zunächst eine aus Zernike-Koeffizienten rekonstruierte Topografie von den Residuen abgezogen. Für diesen Schritt wird eine Zernike-Polynomanpassung an die Residuen durchgeführt. Für die Differenz wird die mittlere absolute Abweichung vom Median (MAD) berechnet. Die Grenze des erwarteten Wertebereichs wird durch ein Vielfaches der MAD gebildet. Werte, die sich außerhalb dessen befinden, werden in der Punktwolke identifiziert und eliminiert. Zu bedenken ist, dass die Elimination von Ausreißern immer einen Informationsverlust bedeutet. Daher muss bei den eliminierten Werten sichergestellt werden, dass diese nicht zur Topografie gehören, sondern klar als Ausreißer definiert sind. Auf der anderen Seite können diese Ausreißer wichtige Anhaltspunkte für zukünftige Messstrategie sein, z.B. kann die Verteilung der Partikel auf der Oberfläche einen Aufschluss über deren Herkunft geben.

Falls in den Messdaten eine starke sphärische Abweichung von den entsprechenden Designdaten zu erkennen ist, besteht die Option, die bestpassende Sphäre zur jeweiligen Punktwolke zu berechnen. Die sphärische Formabweichung kann von der gemessenen Oberfläche oder einer Messabweichung resultieren. Die Anpassung einer bestpassenden Sphäre beruht ebenfalls auf der Methode der kleinsten Quadrate. Die rekonstruierte Sphäre kann von der Punktwolke abgezogen werden. Der ermittelte Radiuswert ist ein Abweichungsmaß zur Designtopographie. Falls bei allen Messungen ein ähnlicher Radiuswert festgestellt wird, kann man davon ausgehen, dass sich die Formabweichung tatsächlich auf der Oberfläche befindet. In diesem Fall ist es sinnvoll eine Sphäre mit dem mittleren Radius (Mittelwert aus allen Messungen) abzuziehen, wodurch die Differenz zwischen den jeweiligen Messdaten beibehalten wird.

Bei der zuvor erläuterten Anpassung zur Designfunktion wurde keine Ausrichtung um die z-Achse (mit einer Rotation γ) gemacht, da die Asphären-Designfunktion rotationssymmetrisch ist. Beim Vergleich realer Messungen, bei denen Abweichungen zur Rotationssymmetrie auftreten können, ist eine Ausrichtung der Residuen hinsichtlich der Rotation sehr wichtig. Dafür wird unter den zu vergleichenden Messdaten eine sogenannte Referenztopografie ausgewählt, zu der die anderen in der Rotation um die z-Achse korreliert werden. Da die Korrelation nur für Matrizen gleicher Größe funktioniert, werden hierfür die rekonstruierten Topografien aus einer Polynomanpassung verwendet. Je nach Form der Abweichungen ist hierbei darauf zu achten, dass eine möglichst eindeutige Rekonstruktion verwendet wird, was durch die Wahl der zur Rekonstruktion verwendeten Polynome beeinflusst werden kann.

Eine mehrfache Rotationssymmetrie könnte zu falschen Ergebnissen führen. Die Topografie der anderen Teilnehmer werden gegenüber der Referenztopografie mit einer definierten Schrittweite gedreht und der normierte Korrelationskoeffizient wird berechnet. Bei Datensätzen mit gespiegelter Achse muss dies bei der Korrelation entsprechend berücksichtigt werden, um keine falschen Ergebnisse zu bekommen. Eine beispielhafte Korrelationskurve, bei der eine 3-fache Symmetrie zu erkennen ist, ist in Bild 3 gezeigt.

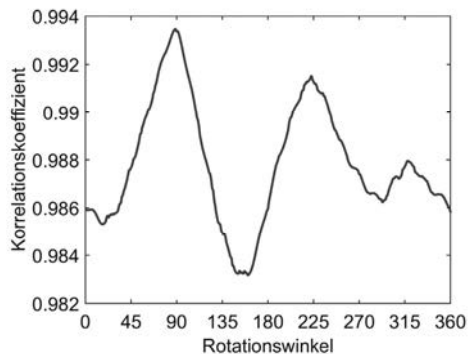


Bild 3: Korrelationskoeffizienten für den Rotationswinkel

Nach diesen Auswerteschritten befinden sich alle Punktwolken der Residuen in demselben Koordinatensystem, was mehrere Möglichkeiten des Vergleichs eröffnet. Es können verschiedene Visualisierungen mit Grafiken, Abweichungsmaßen oder statistischen Betrachtungen genutzt werden. Als Abweichungsmaße werden meistens Peak-to-Valley (PV) und Root-Mean-Square (RMS) Werte betrachtet, welche allein allerdings nur eine globale und damit beschränkte Aussagekraft bezüglich der Formabweichungen haben. Deshalb sollten andere Maße in Betracht gezogen werden. Eine Variante ist die Beschreibung von Oberflächen anhand von Polynomen. Hier werden die sogenannten Zernike-Polynome verwendet und deren Koeffizienten für die nicht äquidistanten Residuen berechnet. Die jeweiligen Koeffizienten beschreiben bestimmte Formanteile der Topografie und damit lassen sich die gemessenen Abweichungen zur Designtopografie vergleichen. Zusätzlich können aus einer Auswahl von Koeffizienten Topografien auf einem äquidistanten Raster rekonstruiert werden. Je nachdem, welche Formanteile interessant sind, können die nieder-, mittel- oder hochfrequenten Ordnungen betrachtet und analysiert werden. Bestimmte Terme, wie Defokus, Koma oder Astigmatismus, können eventuelle Justagefehler während der Messung aufzeigen.

Wenn die Oberfläche einer Asphäre mit mehreren Geräten gemessen wurde, kann aus den rekonstruierten Topografien der Zernike-Polynome eine mittlere Topografie gebildet werden. Wenn diese von den jeweiligen Residuen abgezogen wird, kann die Differenz untersucht werden. Mit den Unsicherheiten der Zernike-Koeffizienten kann eine genauere Abschätzung der mittleren Topografie gemacht werden.

Als Ergebnisse der Auswertung können letztendlich die verschiedenen Abweichungsmaße, z.B. PV-, RMS- und Radienwerte, Zernike-Koeffizienten und grafische Darstellungen der gemessenen, rekonstruierten oder mittleren Topografien betrachtet werden.

4. Auswertung von Asphären Messdaten

Bei dem hier vorgestellten Vergleich werden Messdaten einer Asphäre verwendet, welche unter anderem im Rahmen des europäischen Projektes EMRP IND10 [1] generiert wurden. An dem durch die PTB organisierten Messvergleich hatten drei NMIs und ein wissenschaftliches Forschungsinstitut teilgenommen. Das schweizerische NMI (METAS) und das niederländische NMI (VSL) hatten mit taktilen ultra-präzisen Mikro-Koordinatenmessmaschinen (μ KMGs) gemessen [2,3]. Die Niederländische Organisation für angewandte wissenschaftliche Forschung (TNO) verwendet das Messgerät NANOMEFOS [4] mit einem hochgenauen optischen Einzelpunktsensor. Das Tilted-Wave Interferometer (Mahr) des deutschen NMI (PTB) ist ein optisches Sub-Aperture-Interferometer, welches die einzelnen Teilinterferogramme zu einer Topografie zusammen fügt [5,6].

Nachfolgend werden die Ergebnisse einer Messdatenauswertung mit den unterschiedlichen Gerätetypen vorgestellt. Die Designtopografie der Präzisionsasphäre kann mit dem gegebenen Durchmesser $d = 30$ mm und den Parametern aus Tabelle 1 durch die Asphärenformel nach DIN ISO 10110-12 [7] beschrieben werden. Hierbei ist $h^2 = x^2 + y^2$, r der Krümmungsradius, k die konische Konstante und A_{2i} mit $i = 2 \dots 8$ sind die Koeffizienten des Korrekturpolynoms.

Die vorliegenden Messdaten wurden, wie in dem Kapitel zuvor beschrieben, alle nach demselben Verfahren evaluiert und gleich behandelt. Nachdem die Messdaten in den ersten Schritten angepasst und zur der Designtopografie ausgerichtet wurden, wurde für die Auswertung ein Durchmesser $d = 23$ mm gewählt. Für die jeweiligen Residuen wurde ein Ausreißer-Test durchgeführt. Mit dem 10-fachen des jeweiligen MAD-Wertes wurden einige Messwerte eliminiert.

$$z(h) = \frac{h^2}{r(1 + \sqrt{(1 - (1 + k)h^2/r^2)})} + \sum_{i=2}^n (A_{2i} h^{2i})$$

Tabelle 1: Designparameter der verwendeten Asphäre

| Parameter | Wert |
|----------------------------|--------------------------|
| r / mm | 20,2 |
| k | -1 |
| A_4 / mm^{-3} | $5,4145 \cdot 10^{-6}$ |
| A_6 / mm^{-5} | $-8,0413 \cdot 10^{-10}$ |
| A_8 / mm^{-7} | $-2,9871 \cdot 10^{-12}$ |
| A_{10} / mm^{-9} | $-1,4918 \cdot 10^{-15}$ |
| A_{12} / mm^{-11} | $1,3777 \cdot 10^{-18}$ |
| A_{14} / mm^{-13} | $4,4258 \cdot 10^{-21}$ |
| A_{16} / mm^{-15} | $-3,4928 \cdot 10^{-24}$ |

Daraufhin wurden die Topografien mit einer Zernike-Polynomanpassung und einer maximalen Ordnung von $n = 20$ analysiert. Die Korrelation der Rotation γ wurde anhand der mittelfrequenten Zernike-Polynome $n = 8 \dots 20$ durchgeführt. Hierbei sind vor allem die nicht-rotationssymmetrischen Zernike-Polynome entscheidend. Bei der weiteren Analyse der Zernike-Polynome wurde festgestellt, dass der Defokus-Term $Z(2,0)$ den größten Anteil hat. Die Zernike-Polynome der Ordnung $2 \dots 4$ sind in Bild 4 dargestellt. Im oberen Teil des Bildes 4(a) sind die Dominanz und ähnlich große Werte des Defokus-Terms zu erkennen. Die sphärische Abweichung ist daher vermutlich in der Oberfläche der Asphäre enthalten und der Herstellung geschuldet. Aus diesem Grund wurden an den jeweiligen Residuen bestpassende Sphären und deren Radien bestimmt, welche in Tabelle 2 dargestellt sind. Der berechnete Mittelwert aller Radien von etwa 42 m wurde genutzt um den gleichen sphärischen Anteil von allen Residuen abzuziehen. Die Zernike-Polynome nach Abzug der Sphäre sind in Bild 4(b) dargestellt. In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass einzelne Zernike-Polynome sehr gut übereinstimmen und nur vereinzelt größere Differenzen zwischen den beteiligten Topografien auftreten.

Tabelle 2: Ermittelte Radien der Residuen

| | TNO | PTB | METAS | VSL | Mittelwert |
|------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| Radius / m | 44,51 | 44,43 | 39,89 | 39,23 | 42,02 |

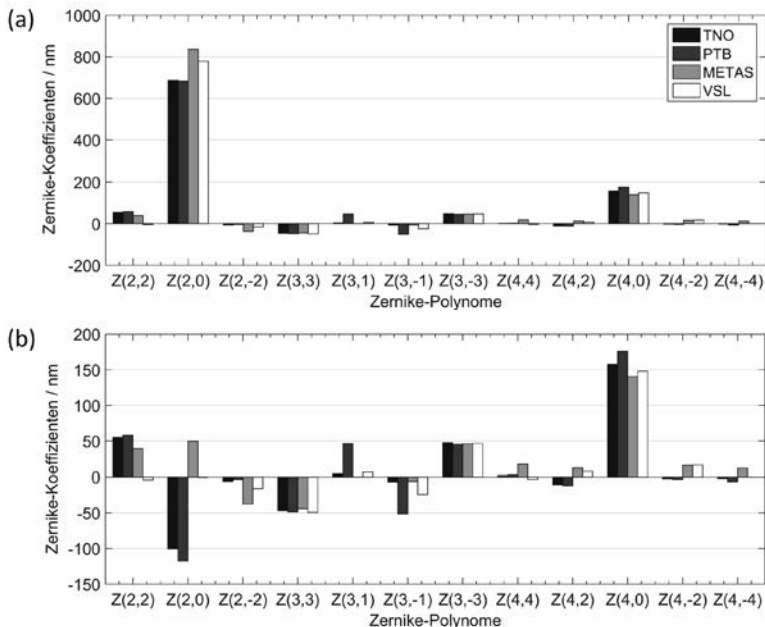


Bild 4: Zernike-Polynome der Ordnung $n = 2 \dots 4$ (a) der gefilterten Residuen und (b) nach Abzug einer mittleren Sphäre

Zur visuellen Analyse wurden die Topografien in verschiedene Frequenzbereiche aufgeteilt und diese können in Bild 5 betrachtet werden. Darin sind die ausgerichteten und teilweise korrigierten Topografien von der Abweichung vom Design, deren rekonstruierte Topografien der niederfrequenten (LSF) und der mittelfrequenten (MSF) Polynomordnungen und die Residuen der Zernike-Polynomannäherung dargestellt. Hierbei entspricht LSF der Ordnung $n = 1 \dots 7$, MSF der Ordnung $n = 8 \dots 20$ und die Residuen den hochfrequenten Abweichungen. Für die grafische Darstellung der Topografien wurden die Daten auf einem gleichförmigen Raster mit 1000×1000 Punkten interpoliert. Hierbei ist anzumerken, dass die Anzahl der Messwerte aufgrund der unterschiedlichen Messgeräte stark variiert. Der Datensatz mit den wenigsten Messwerten hat für den gewählten Radius etwas mehr als 1800 Messwerte und die größte Anzahl beträgt etwa 710.000 Messwerte. Die laterale Auflösung ist von der Punktdichte der Messwerte und der effektiven Aperturfunktion abhängig, d.h. dass ein Messwert einer punktuell antastenden Kugel einen kleineren Bereich abbildet als ein über eine Fläche integrierender optischer Sensor.

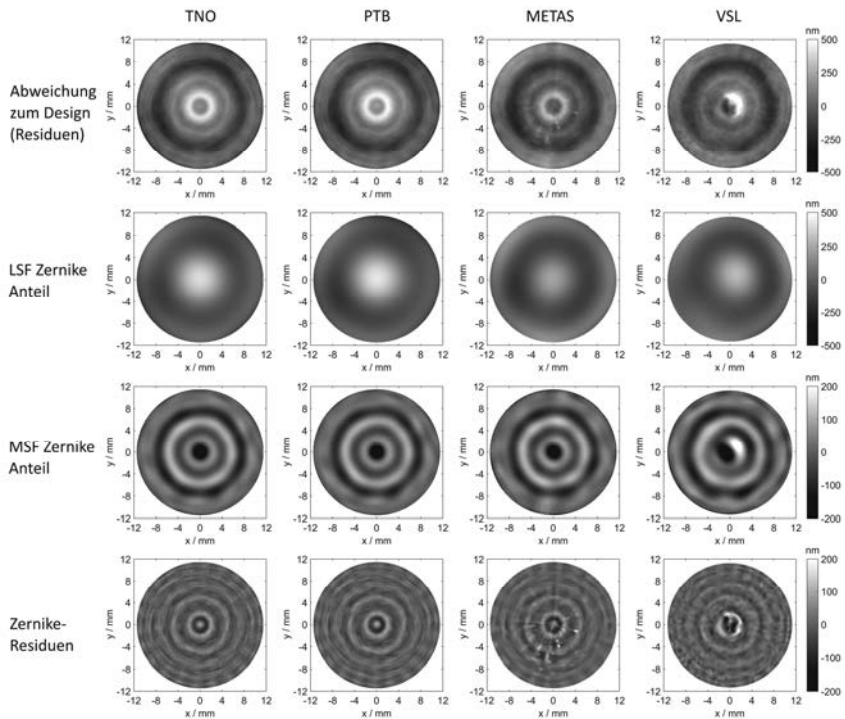


Bild 5: Topografien für die Abweichung zum Design, die LSF-, MSF- Anteile und die Residuen der Zernike-Polynomannpassung

Eine PV- und RMS-Analyse wurde nach drei verschiedenen Auswerteschritten durchgeführt, erstens nach der Ausrichtung der Messdaten und dem Abzug der Designtopografie mit den Residuen (PV_{res} und RMS_{res}), zweitens nach der Ausreißer-Elimination (PV_{out} und RMS_{out}) und drittens nach dem Abzug der mittleren Sphäre von den Residuen (PV_{final} und RMS_{final}). Eine grafische Darstellung der jeweiligen Werte ist in Bild 6 dargestellt. Darin ist zu sehen, dass sich die Werte der Residuen und die nach der Eliminierung der Ausreißer nur wenig unterscheiden. Die Eliminierung der Ausreißer wird vor allem durch kleinere PV-Werte deutlich. Allerdings beträgt es bei den PV-Werten eine Differenz von etwa 300 nm zwischen den beiden optischen Messgeräten und den beiden taktilen. Bei den RMS-Werten ist die Differenz kleiner als 100 nm. Nach dem Abzug der mittleren Sphäre haben sich die PV-Werte jeweils angenähert und die Differenz der RMS-Wert ist kleiner als 20 nm.

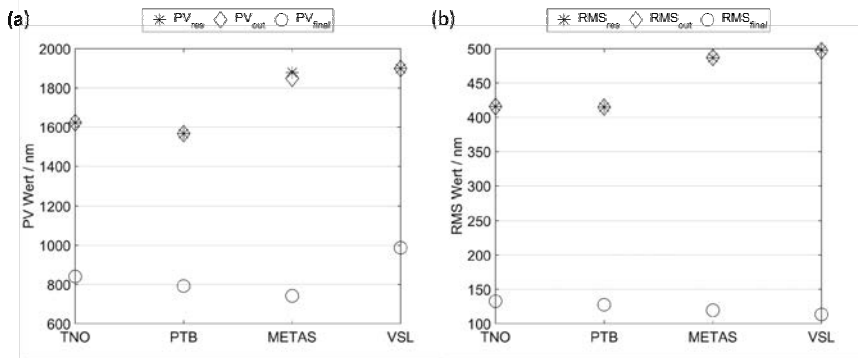


Bild 6: Grafische Darstellungen der (a) PV- und (b) RMS-Werte

5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Auswertung von Asphären-Topografie-Messdaten für den Vergleich von optischen und taktilen Messgeräten vorgestellt. Die Herausforderungen der Organisation, Durchführung und Auswertung eines Messvergleichs wurden beschrieben. Der Ablauf der hier durchgeführten Auswertung wurde erläutert und in einem Ablaufdiagramm dargestellt. Um das Verfahren anhand von realen Daten zu zeigen, wurden Messdaten einer Asphäre verwendet, welche von vier Institutionen (TNO, PTB, METAS und VSL) mit verschiedenen Messsystemen gemessen wurde. Darunter befanden sich zwei taktile μ KMGs und zwei optische Messgeräte. Die Messdatenauswertung erfolgte anhand der hier beschriebenen Methode für einen festgelegten Durchmesser von 23 mm. Die Abweichungen zur Designtopografie wurden bestimmt. Nach der Elimination von Ausreißern und eines gemeinsamen sphärischen Formanteils wurden die Messdaten mittels Korrelation bzgl. der Rotation um die z-Achse zueinander ausgerichtet. Die resultierenden Topografien wurden durch Zernike-Polynome mit der höchsten Ordnung $n = 20$ beschrieben. Der Defokus-Term $Z(2,0)$ hat den größten Anteil und auch die Differenz zwischen den Messdaten ist dort am größten. Zusätzlich zur grafischen Darstellung der Residuen wurden die nieder- und mittelfrequenten Anteile der Topografie rekonstruiert und die Zernike-Residuen gezeigt. Anhand der Residuen wurden die Abweichungsmaße die PV-, RMS- und Radienwerte bestimmt.

Danksagung

Wir danken dem EMRP für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten im Projekt „Optical and tactile metrology for asphere form characterization“. Das EMRP wird von den im EMRP teilnehmenden Staaten innerhalb von EURAMET und der Europäischen Union gemeinschaftlich gefördert. Einen herzlichen Dank möchten wir an die Kollegen von VSL, METAS und TNO für die Messdaten und Diskussionen richten.

Literatur

- [1] EMRP IND10 „Form“, URL: <http://www.ptb.de/emrp/ind10-contact.html>
- [2] A. Küng et al, „Application of a virtual coordinate measuring machine for measurement uncertainty estimation of aspherical lens parameters“, Meas. Sci. Technol. **25**(9):094011 (2014)
- [3] R. Bergmans et al, „Comparison of asphere measurements by tactile and optical metrological instruments“, Meas. Sci. Technol. **26**(10):105004 (2015)
- [4] R. Henselmans et al, „Nanometer level freeform surface measurements with the NA-NOMEFOS non-contact measurement machine“, Proc. SPIE 7426, Optical Manufacturing and Testing VIII, 742606 (2009), doi: 10.1117/12.826067
- [5] J. Liesener et al., „Verfahren und Messvorrichtung zur Vermessung einer optisch glatten Oberflaeche“, Patent DE 10 2006 057 606 A1 (2006)
- [6] E. Garbusi et al, „Interferometer for precise and flexible asphere testing“, Opt. Lett. **33**, 2973–2975 (2008)
- [7] Deutsches Institut für Normung, DIN ISO 10110-12, „Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme – Teil 12: Asphärische Oberflächen“, ISO 10110-12:2007 (2009)

Messung optischer Oberflächen – von Asphären bis Freiformen

Dr.-Ing. **Franz Reischer**, Dr. **Andreas Beutler**,
Mahr GmbH, Göttingen

Kurzfassung

Während in der Vergangenheit die meisten optischen Designs auf Basis von Sphären berechnet und gefertigt wurden, ermöglichen heute Asphären, DOEs (diffraktive optische Elemente) u. A. sowohl die oftmals notwendige Miniaturisierung wie auch Verbesserungen der optischen Leistungsfähigkeit. Moderne Oberflächengeometrien, wie z. B. Asphären, DOEs und Freiformen, erfordern über die unterschiedlichen Stufen der hochgenauen Fertigung passende Messtechnik. Diese wird nicht nur zur Prüfung der Oberflächen und Form benötigt, sondern liefert notwendige Parameter an die Bearbeitungsmaschinen.

1. Stufen des Herstellungsprozesses von Präzisionsoptiken

Die insbesondere bei der Herstellung von Präzisionsoptiken genutzten Prozessschritte sind: Schleifen, Vorpulieren und Polieren bzw. Endpolieren. Bei der Produktion von Planoptiken, Sphären und Prismen erfolgt hierbei eine zumindest stichprobenartige Prüfung. Dazu werden typischerweise Kontur und Form sowie Rauheit bestimmt. Während des Schleifprozesses kommen Oberflächenmessgeräte mit taktilen Tastern zum Einsatz. Zur Prüfung der Politur werden meist Interferometer verwendet: Fizeau-Interferometer zur Bewertung der Pässe und gelegentlich Weißlichtinterferometer zur Bestimmung der Rauheit. Hierbei können leicht Genauigkeiten von $\lambda/20$ (ca. 30 nm, Fizeau-Interferometer) bzw. unter 1 nm (Weißlichtinterferometer) erreicht werden.

2. Besonderheiten für Asphären, Freiformen und Sonderoptiken

Zur Herstellung von Asphären und weiteren komplexeren Geometrien sind fertigungsbegleitende Messungen notwendig. Die Soll-Ist-Abweichung wird erfasst und zur Korrektur des Produktionsprozesses genutzt („Closed-Loop-Verfahren“).

Im Schleifprozess erfolgt dies typischerweise mit taktilen Profilometern in einem oder mehreren 2D-Schnitten. Dabei können neben Kontur- auch Rauheitswerte gemessen werden. Bei Materialien mit geringer Festigkeit ist es wichtig, den richtigen Sensor auszuwählen. Mit dem Messplatz MarSurf LD Aspheric (s. Bilder 1 und 2) ist eine solche taktile Messung auch mit

geringen Antastkräften möglich. Hierbei werden häufig Tastarme mit Rubinkugel (1 mm Durchmesser) verwendet. Die Messergebnisse werden zur Optimierung der nachfolgenden Produktionsschritte an die Bearbeitungsmaschine übertragen. [1]

Zur Prüfung und Optimierung des Polierprozesses werden bevorzugt Messsysteme verwendet, die berührungslos arbeiten, um Oberflächenbeschädigungen vollständig auszuschließen. Hierbei kann zwischen flächig und punktförmig messenden Verfahren unterschieden werden. Zu den flächig messenden Verfahren zählen Fizeau-Interferometer. Punktwise messende Systeme sind meist Koordinatenmessgeräte, wobei es Varianten mit kartesischen und Zylinderkoordinaten gibt. Zu letzteren zählt auch der Formprüfer MarForm MFU 200 Aspheric. Dieser wurde speziell für Messungen an Asphären entwickelt. Neben taktilen Tastarmen steht auch ein optischer (interferometrischer) Sensor zur Verfügung. Zum einen kann mit dem optischen Punktsensor die polierte asphärische Oberfläche berührungslos gemessen werden und zum anderen mit dem taktilen Sensor der geschliffene Rand und die Unterseite geprüft werden. Die Kombination dieser Messungen ermöglicht zusätzlich Aussagen zur Dezentrierung und Kippung von Ober- zu Unterseite. Das Ergebnis der Asphärenmessung wird in einem maschinenlesbaren Format als Differenzprofil an die Bearbeitungsmaschine übertragen, um den Polierprozess erfolgreich zu Ende zu führen. Das freie Tracking (Nachführen) macht die MarForm MFU 200 darüber hinaus zu einer idealen und flexiblen Lösung für Freiformen und unbekannte Asphären. [2]

Eine sehr schnelle interferometrische Prüfung ist mit MarSurf TWI 60 möglich. Hierbei wird die bereits mehrfach ausgezeichnete Technologie der gekippten Wellenfront genutzt, die die Messung auch steiler Asphären ohne Stitching oder CGH (Computer Generated Hologram) erlaubt. Außerdem zeichnet sich das MarSurf TWI 60 durch das hochgenaue Erfassen von mittel- und hochfrequenten Fehlern auf den Prüflingsoberflächen aus. [3]



Bild 1: MarSurf LD Aspheric: Es gibt Varianten für 2D und 3D.

Prüfung asphärischer Oberflächen durch scannende Interferometrie

Dr.-Ing. **Marc Wendel**, Dr. **Jürgen Petter**,
Ametek GmbH, GB Lufos, Weiterstadt

Kurzfassung

In der Optikindustrie herrscht ein stetiger Trend hin zu engeren Toleranzen bezüglich Formabweichungen, sowie zunehmender Komplexität der Objekte. Dadurch steigen ebenfalls die Anforderungen an die Messtechnik zur Qualitätskontrolle. An dieser Stelle wird daher ein auf der Mehrwellenlängen-Interferometrie basierendes Metrologiesystem vorgestellt, dass Formabweichungen im Nanometerbereich erfassen kann. Durch die Verwendung eines scannenden Messprinzips in Kombination mit einem hochgenauen Referenzierungskonzept wird weiterhin eine hohe Flexibilität erreicht. Die Metrologieplattform kann durch geeignete Erweiterungen auch zur Erfassung von Maß- und Lageparametern genutzt werden. Zwei aktuelle Entwicklungen in diesem Bereich werden erläutert und erste Messergebnisse präsentiert.

1. Einleitung

Im industriellen Umfeld werden die Anforderungen an optische Systeme immer größer. Hieraus ergibt sich ein Trend zu steigender Komplexität von Linsenformen, bei gleichzeitig engeren Fertigungstoleranzen. Während moderne Fertigungsmaschinen bereits Linsen mit Formabweichungen von nur wenigen Nanometern fertigen können, ist die passende Messtechnik zur Qualitätskontrolle schwer zu finden. Die Anforderungen an die Messinstrumente sind enorm: Neben der absoluten Formgenauigkeit, die deutlich besser als ± 100 nm sein sollte, wird auch eine hohe Flexibilität bezüglich der Asphärizität (d.h. Form und Flankenwinkel) gefordert. Weiterhin müssen diverse Grundformen, z.B. segmentierte, annulare oder auch asphäro-diffraktive Linsen, messbar sein. Abhängig vom Einsatzzweck des Produkts (Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts, UV, IR, etc.) beeinflussen auch verschiedene Materialien sowie Coatings die Messung. Neben den technischen Herausforderungen kommt noch die Wirtschaftlichkeit der Qualitätsprüfung hinzu. Diese äußert sich hauptsächlich durch die Forderung nach kurzen Messzeiten. Aber auch ein frühzeitiges Erkennen (und Korrigieren) von Fehlern innerhalb der Produktion spart Kosten

ein. Daher fordern viele Hersteller nicht nur eine hochgenaue Endkontrolle auf polierten Linsen, sondern zusätzliche Qualitätskontrollen in den verschiedenen Bearbeitungsprozessen der Fertigung, z.B. nach dem Schleifen oder Feinschleifen.

Viele Messsysteme erfüllen nur wenige der Anforderungen gleichzeitig. Als Beispiele seien hier taktile Messsysteme und parallel messende Interferometer angeführt. Während erstere aufgrund der Dynamik des Tastarms langsam sind und zusätzlich eine Beschädigung der Oberfläche hervorrufen können (insbesondere bei empfindlichen Oberflächen aus Aluminium, Germanium oder Kunststoff) [1], sind letztere auf einfache geometrische Strukturen begrenzt [2]. Im Folgenden wird daher das Messprinzip eines scannenden Interferometers vorgestellt, welches die Vorteile der scannenden (taktile) Messtechnik mit der hohen Auflösung eines Interferometers vereint; es wird eine hohe geometrische Flexibilität bei gleichzeitig sehr guter Auflösung erreicht. Der zum Einsatz kommende Sensor ist ein auf der Mehrwellenlängen-Interferometrie (MWLI®) basierender Punktsensor. Durch Kombination von mehreren MWLI-Sensoren mit einem Referenzsystem ist die hochgenaue Messung von komplexen Oberflächen („pancake“-Linsen, „gull wings“ mit Wendestellen, Zylinder, Axikons, asphäro-diffraktive Objekte, segmentierte oder annulare Linsen, etc.) bis hin zu Hemisphären und milden Freiformflächen möglich. Dieses Messsystem wird im Folgenden genutzt, um zusätzliche Maß- und Lagekennwerte von optischen Elementen zu erfassen. Hierzu zählen die absolute Mittendicke, sowie Dezentrierung und Verkipfung von Ober- zu Unterseite einer Linse.

2. Funktionsprinzip der Mehrwellenlängen-Interferometrie

Interferometer können ohne großen Aufwand Genauigkeiten im Bereich weniger Nanometer erzielen und dabei Wegänderungen im Picometerbereich registrieren. Bei geeigneter Kollimierung sind weiterhin sehr große Messbereiche realisierbar. Allerdings ist man bei der Verwendung eines homodyn Interferometers zur Vermessung von Abständen größer als die halbe Wellenlänge dazu gezwungen, Interferenzringe zu zählen. Im sichtbaren Wellenlängenbereich beschränkt sich daher der Eindeutigkeitsbereich (halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts) auf etwa 190 nm bis 390 nm. Verwendet man statt eines homodyn Interferometers ein kohärenz-scannendes Interferometer (kurz CSI, umgangssprachlich als Weißlichtinterferometer bezeichnet), so gewinnt man durch Auswertung der Korrelogramme mittels Hüllkurven- und/oder Phasenverfahren eine genaue, und vor allem absolute Abstandsinformation. Bedingt durch das breite Spektrum der verwendeten Lichtquelle ist die Interferenzfähigkeit des Lichts jedoch nur gegeben, wenn die optischen Weglängen in Objekt- und Referenzarm nahezu gleich sind. Daraus folgt, dass der Messbereich von CSIs auf wenige

Mikrometer begrenzt ist. Als Kompromiss zwischen den beiden zuvor genannten Extrema bietet sich die Verwendung von mehreren diskreten Wellenlängen an. So lässt sich sowohl die sehr gute Auflösung, als auch der sehr große Messbereich von Homodyn-Interferometern, mit einem um mehrere Größenordnungen erweiterten Eindeutigkeitsbereich verbinden. Die hier vorgestellte Mehrwellenlängen-Interferometrie nutzt mehrere unabhängige, diskrete Wellenlängen, die sich einen optischen Leiter teilen. Verwendet man beispielsweise zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 zur Messung des gleichen Abstandes, so liefert jede Wellenlänge ein eigenes Interferenzsignal. Dies entspricht zwei unabhängigen Homodyn-Interferometern mit hoher Genauigkeit (circa $\lambda/2000$) aber kleinem Eindeutigkeitsbereich $\lambda_1/2$ bzw. $\lambda_2/2$. Mit Hilfe der MWLI-Technologie kann der Eindeutigkeitsbereich jedoch erweitert werden, indem die synthetische Schwebungswellenlänge der beiden diskreten Wellenlängen berechnet wird. Die Größe des erzielten Eindeutigkeitsbereichs entspricht der Hälfte der synthetischen Schwebungswellenlänge Λ gemäß

$$\frac{\Lambda}{2} = \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Innerhalb dieses Bereichs kann eine Wegstreckenänderung eindeutig erfasst werden, auch wenn ein kontinuierliches Nachverfolgen der Änderung nicht möglich ist.

Die synthetische Schwebungswellenlänge wird größer, wenn die Einzelwellenlängen dichter beieinander liegen. Technisch sind so Eindeutigkeitsbereiche größer als 1 mm ohne Weiteres realisierbar. Der offensichtliche Vorteil der rein mathematischen Berechnung der synthetischen Schwebungswellenlänge ist der um mehr als drei Größenordnungen erweiterte Eindeutigkeitsbereich, ohne Verlust der hohen Auflösung und Genauigkeit der einzelnen Homodyn-Interferometer. Eine Skizze des Funktionsprinzips ist in Bild 1 dargestellt.

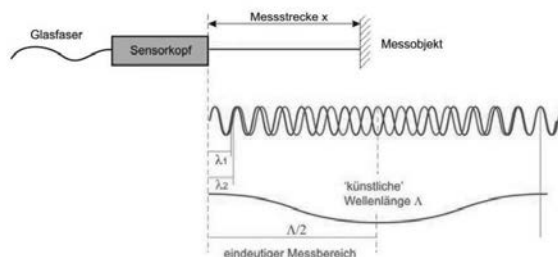


Bild 1: Messprinzip eines MWLI-Sensors. Durch Berechnung der künstlichen Schwebungswellenlänge Λ wird der Eindeutigkeitsbereich um mehrere Größenordnungen erweitert.

2.1 Einsatz der Mehrwellenlängen-Interferometrie in einem Metrologiesystem

Das Messprinzip der Mehrwellenlängen-Interferometrie kann durch eine Punktsensorik realisiert werden. In einem auf Punktsensorik basierendem Metrologiesystem zur Erfassung der 3D Objektform muss entweder die Sensorik, das Objekt oder beides bewegt werden. Bei der Bewegung der MWLI-Sensorik ist es sinnvoll, die träge Masse zu Gunsten der Dynamik zu reduzieren. Eine Reduktion des Sensorkopfes auf ein Minimum, durch Auslagerung der Elektronik (Laser und Datenerfassung), ist daher eine Grundvoraussetzung. Die optische Verbindung zwischen Elektronik und Sensorkopf geschieht durch eine optische Faser. Diese überträgt das Licht von vier unabhängigen, hoch stabilisierten Lasern (Wellenlängen zwischen 1530 nm und 1610 nm). Die Objektoberfläche reflektiert einen Teil der eingestrahlen Lichtleistung. Dieses Licht wird mit einer intern erzeugten Referenzwelle zur Interferenz gebracht und ausgewertet. Hierbei werden die vier Wellenlängen unabhängig und parallel ausgewertet. Erst im Anschluss werden die Ergebnisse in Relation gesetzt, um die Position des Objekts innerhalb des synthetischen Eindeutigkeitsbereichs zu berechnen.

Weiterhin muss für eine hochgenaue Messung nicht nur der Abstand von Objekt zu Sensor bekannt sein, sondern zusätzlich die exakte Position im Raum an der gemessen wird. Hierzu werden drei zusätzliche MWLI-Sensoren in Kombination mit einem hochgenauen Referenzierungskonzept benutzt: Zunächst wird das Licht der stabilisierten Laser in eine Faser gekoppelt. Anschließend wird das Licht auf vier Fasern, eine für jeden Sensorkopf, aufgeteilt. Die Interferenzsignale von jedem Sensorkopf werden unabhängig und parallel verarbeitet, sowie die Auswertung im synthetischen Eindeutigkeitsbereich durchgeführt.

Linear- und Rotationsachsen übernehmen die Positionierung des Objektsensors über der Oberfläche (vgl. Bild 2). Zwei lineare Achsen, in radialer Richtung (R) und in vertikaler Richtung (Z), positionieren den Sensor hierbei im Raum, während eine Rotationsachse (T) die senkrechte Messung bezüglich der Oberfläche ermöglicht. Der Objektsensor erfasst ununterbrochen den Abstand zum Messobjekt. Hierbei wird die (z.B. asphärische) geometrische Soll-Form der Oberfläche abgefahren. Während der Messung wird das Objekt mittels einer weiteren Rotationsachse mit bis zu 720°/s rotiert und so eine Spiralbahn auf der Oberfläche optisch abgetastet.

Die erhaltene Punktwolke zeigt die Formabweichungen von Ist-Form zu Soll-Form, sowie Oberflächendefekte. Während der Achsbewegung auftretende Positionierungsfehler der R-, Z- und T-Achse vermischen sich selbstverständlich mit den zu erfassenden Formabweichungen. Zur Trennung der zu erfassenden Geometriemerkmale von den Achsfehlern ist ein Referenzierungskonzept unabdingbar.

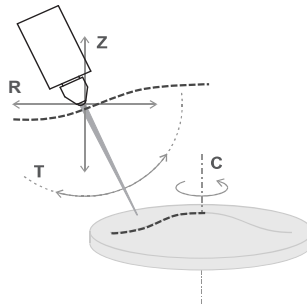


Bild 2: Positionierung des Objektsensors senkrecht über der Oberfläche. Zwei linear und zwei Rotationsachsen kommen zum Einsatz.

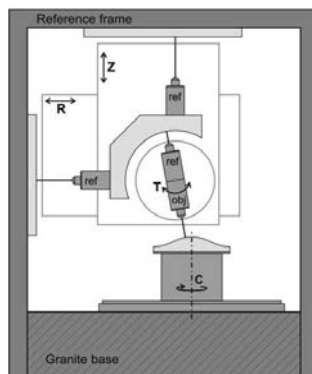


Bild 3: Referenzierungskonzept. Drei Referenzsensoren erfassen im Zusammenspiel mit präzisen Spiegeln und einem Referenzrahmen die Position des Objektsensors im Raum.

2.2 Referenzierungskonzept

Die Forderung nach einer hohen Messgenauigkeit im gesamten Messvolumen macht es nötig, die Positionierungsfehler der Achsen (R, Z und T) zu erfassen und zu berücksichtigen. Um dies zu erreichen, sind (wie in Bild 3 gezeigt) drei Referenzsensoren und ein stabiler Referenzrahmen mit hochgenauen Referenzspiegeln nötig. Form, Biegung und Verkipfung der Spiegel im Raum muss weiterhin durch eine präzise Kalibrierung erfasst, und bei der

Auswertung der Messdaten berücksichtigt werden. Durch die gezeigte Anordnung von zwei linearen und einem zylindrischen Referenzspiegeln kann die absolute Position des Objektsensors im Messvolumen ununterbrochen erfasst werden. Die Referenzsensorik ist so positioniert, dass Abbe-Fehler der ersten Ordnung, welche durch die mechanische Bewegung der Achsen entstehen und den Messabstand beeinflussen, kompensiert werden. Die sehr gut reproduzierbaren Fehler der luftgelagerten Objekt-Rotationsachse (C) werden während der Messung nicht erfasst, jedoch durch eine Kalibrierung berücksichtigt.

Zusammen mit Schutzvorrichtungen vor Luftturbulenzen im Strahlengang wird durch das vorgestellte Referenzierungskonzept eine Messunsicherheit der Form von nur ± 50 nm (3σ) im gesamten Messvolumen, bis hin zu 90° Oberflächensteigung, erreicht.

3. Erfassung von Maß- und Lagekennwerten optischer Elemente

Die Möglichkeit zur Erfassung der 3D Formabweichung von rotationssymmetrischen Objekten (Sphären, Asphären, Axikons, Zylinder, etc.) oder milden Freiformen wurde bereits in den vorangehenden Abschnitten erläutert. Aufgrund des absolut messenden MWLI-Prinzips ist es jedoch ebenfalls möglich, Maß- und Lagekennwerte optischer Elemente zu erfassen. An dieser Stelle werden zwei Realisierungsmöglichkeiten vorgestellt.

3.1 Softwarebasierte Erweiterung der Metrologierplattform

Durch eine reine softwareseitige Anpassung des Messablaufs kann die zuvor beschriebene Metrologieplattform genutzt werden, um Lageparameter bezüglich ausgezeichneter Referenzflächen des Messobjekts zu erfassen. Bild 4 zeigt beispielhaft die Skizze eines Werkzeugs zur Verpressung von kleinen Linsen (z.B. für Smartphone-Kameras). Zunächst wird die asphärische Topographie des Werkzeugs gemessen. Im Anschluss erfolgt die Erfassung mehrerer objektbezogener Referenzflächen: Durch Messung entlang einer Kreisbahn auf der Oberseite des Werkzeugs (in Bild 4 durch „A“ gekennzeichnet) kann die Verkippung der Asphäre zur Referenzfläche, sowie die Scheitelhöhe bezogen auf die Referenzfläche, ermittelt werden. Wird zusätzlich eine Bahn auf der Außenseite („DEC A“) gemessen, ist auch die Dezentrierung der Asphäre bezogen auf die Werkzeugachse zu ermitteln. Weitere Schnitte („DEC M1“ und „DEC M2“) ermöglichen die Verkippung und Dezentrierung des Werkzeugs (oberer Teil in Bild 4) bezogen zur Maschinenaufnahme (unterer Teil).

Dieses flexible Konzept kann auf die Gegebenheiten des Messobjekts, d.h. die Lage der Referenzflächen, angepasst werden. So ist es auch möglich die Dezentrierung und/oder Verkippung bezüglich der Fase oder der Fassung einer Linse zu erfassen.

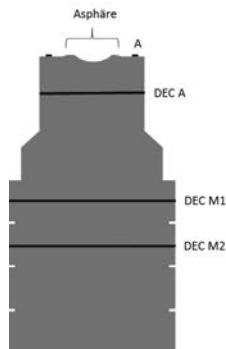


Bild 4: Ermittlung von Lageparameter von Presswerkzeugen für kleine Linsen. Skizziert sind mögliche Referenzflächen auf dem Werkzeug und dessen Aufnahme.

3.2 Hardwarebasierte Erweiterung der Metrologieplattform

Spannt man das Messobjekt, z.B. eine Linse, in einen Halter ein und versieht diesen mit geeigneten Referenzflächen, so werden weitere Messaufgaben lösbar: Eine Messung des Objekts und der Referenzflächen des Halters ermöglicht es, die in 3.1 erläuterten Lageparameter (Verkipfung und Dezentrierung) der Oberfläche bezogen auf die Referenzflächen des Halters zu ermitteln. Die Referenzflächen dienen hierbei in erster Linie zur Bestimmung des axialen und radialen Achsschlags des Linsenhalters (vgl. Bild 5). Dreht man den Halter wie in Bild 6 gezeigt herum (ohne Lösen des Objekts im Halter), so können die gleichen Lageparameter für die Unterseite des Objekts ebenfalls ermittelt werden. Indem radialer und axialer Achsschlag der Referenzflächen von Oberseite und Unterseite miteinander verrechnet werden, können Ober- und Unterseite des Objekts korreliert werden. Dies ermöglicht die Auswertung von Verkipfung und Dezentrierung der beiden Objektoberflächen zueinander. Weiterhin kann durch die Korrelation in Kombination mit dem absolut messenden Messprinzip auch die Mittendicke des Objekts berechnet werden. Bild 7 gibt einen Überblick über die Parameter. Die Dezentrierung Δx wird hier bezogen auf die Linsenmitte angegeben, um unabhängig von der Definition einer „Vorderseite“ und einer „Rückseite“ zu sein.

Welche der Parameter Verkipfung, Dezentrierung und Mittendicke berechnet werden können, hängt vom Messobjekt selbst ab. Während für ein Objekt vom Typ Asphäre-Asphäre alle drei berechnet werden können, sind für die Kombination Asphäre-Sphäre nur Mittendicke und Verkipfung, oder alternativ Mittendicke und Dezentrierung möglich. Bei diesem Beispiel können Verkipfung und Dezentrierung aus geometrischen Überlegungen heraus ineinander

umgerechnet werden; die Angabe der Lageabweichung als Mix aus beiden Parametern ist daher nicht sinnvoll. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die berechenbaren Kennwerte und Alternativen.

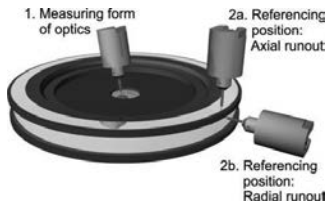


Bild 5: Ermittlung der Lageparameter bezüglich des Linsenhalters. Nach Erfassung der Topographie des Messobjekts werden axialer und radialer Achsschlag des Halters erfasst.



Bild 6: Messablauf. Nach der Messung (gemäß Bild 5) der Oberseite inklusive Referenzflächen wird der Halter manuell herumgedreht und anschließend die gleiche Messprozedur auf der zweiten Seite durchgeführt.

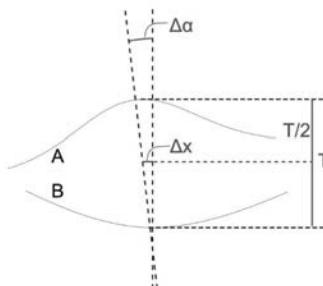


Bild 7: Kenngrößen des vorgestellten Messkonzepts: Absoluten Mittendicke T , Dezentrierung Δx und Verkipfung $\Delta \alpha$ von Oberseite A zu Unterseite B.

Tabelle 1: Berechenbare Kennwerte, abhängig vom Linsentyp. Alternativen sind durch (✓) gekennzeichnet.

| Linsentyp | Mittendicke T | Verkipfung $\Delta\alpha$ | Dezentrierung Δx |
|-------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|
| Asphäre – Asphäre | ✓ | ✓ | ✓ |
| Asphäre – Sphäre | ✓ | ✓ | (✓) |
| Asphäre – Ebene | ✓ | ✓ | x |
| Sphäre – Sphäre | ✓ | x | x |
| Sphäre – Ebene | ✓ | x | x |
| Ebene – Ebene | ✓ | ✓ | x |

3.3 Erste Messergebnisse

Mit einem Prototyp des vorgestellten Referenzrings wurden Wiederholbarkeits- und Reproduzierbarkeitsmessungen durchgeführt. „Wiederholbarkeit“ beschreibt in diesem Zusammenhang, wie gut sich die Ergebnisse wiederholen lassen, ohne dass eine mechanische Änderung am System vorgenommen wurde (abgesehen vom manuellen Herumdrehen des Referenzrings zur Messung der Unterseite). „Reproduzierbarkeit“ hingegen beschreibt, wie gut sich die Ergebnisse wiederholen lassen, wenn mechanische Änderung vorgenommen wurden. Dies können z.B. das Aus- und wieder Einspannen der gemessenen Linse, oder das Aus- und Einbauen des Referenzring-Halters sein.

Das gemessene Objekt ist eine Glas-Linse vom Typ Asphäre-Sphäre (Oberseite sphärisch mit $Roc \approx 25$ mm konvex, Unterseite leicht asphärisch mit $Roc \approx -46$ mm konkav, freie Apertur 17,8 mm, gemessene Apertur jeweils 16 mm, Mittendicke $\approx 2,5$ mm). Bild 8 zeigt ein Foto der Linse, eingespannt in den Referenzring, welcher wiederum auf den Halter aufgelegt ist.

Aus 20 Wiederholbarkeitsmessungen errechnen sich die Unsicherheiten der Verkipfung zwischen Ober- und Unterseite zu $0,76''$ (2σ) bzw. alternativ der Dezentrierung zu $0,13 \mu\text{m}$ (2σ). Die Unsicherheit der Mittendickenmessung ergibt einen Wert von $1,54 \mu\text{m}$ (2σ), wobei nur die Achsgenauigkeit zur Messung genutzt wurde. Eine (aktuell noch nicht softwareseitig implementierte) Nutzung der MWLI-Sensorik zur Dickenmessung, wie zuvor beschrieben, wird diesen Wert in Zukunft voraussichtlich um circa eine Größenordnung verbessern.

Die Auswertung von weiteren 20 Datensätzen, diesmal jedoch mit mechanischen Änderungen (10 Messungen mit Aus- und Einspannen der Linse, 10 Messungen mit Aus- und Einbau des Referenzringhalters) ergeben eine Unsicherheit der Verkipfung zwischen Ober- und Unterseite von $2,23''$ (2σ) bzw. alternativ der Dezentrierung von $0,31 \mu\text{m}$ (2σ). Die Unsicherheit

der Mittendickenmessung liegt unverändert bei $1,54 \mu\text{m}$ (2σ), wobei auch hier wieder nur die Achsgenauigkeit zur Messung genutzt wurde.

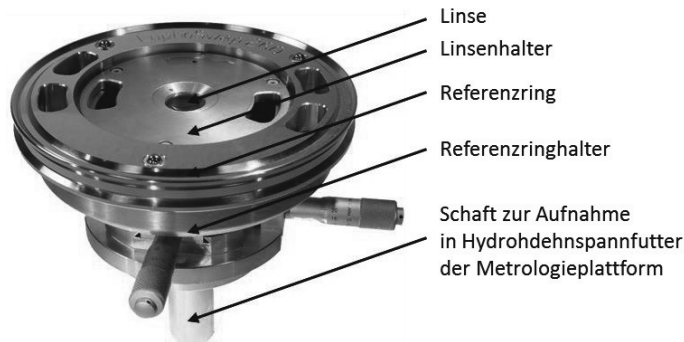


Bild 8: Foto des Prototyps zur Messung von Maß- und Lageparametern optischer Elemente. Die Linse wird in einem speziell angepassten Halter aufgenommen. Dieser wird im Referenzring befestigt. Der Halter des Referenzrings wiederum kann mittels Hydrodehnspannfutter in die Metrologieplattform eingesetzt und fixiert werden.

4. Zusammenfassung und Fazit

Die vorgestellte Metrologieplattform ermöglicht es, durch die Kombination eines hochgenauen Messprinzips auf Basis der Mehrwellenlängen-Interferometrie mit einem scannenden Messverfahren, diverse Messaufgaben im Bereich der Optikindustrie präzise und flexibel zu erledigen. Durch Soft- und Hardwareerweiterungen der Plattform konnte zusätzlich zur Topographiemessung von Linsen und anderen Bauteilen die Erfassung von Maß- und Lageparametern ermöglicht werden. Die präsentierten Messergebnisse zeigen eine Unsicherheit von nur wenigen Bogensekunden für die Messung der Verkipfung zwischen Ober- und Unterseite einer Linse. Die Unsicherheiten der Dezentrierungsmessung liegen im Sub-Mikrometer-Bereich, die der absoluten Mittendicke im niedrigen einstelligen Mikrometerbereich. Letztere können in Zukunft aber noch reduziert werden.

Die ermittelten Unsicherheiten beziehen sich auf ein Objekt mit nur leichter Asphärizität. Bei einer stärker ausgeprägten Asphärizität wird die Berechnung der Kennwerte robuster, und somit die Streuung nochmals kleiner.

Quellenverzeichnis

- [1] Meli, F., Küng, A.: AFM investigation on surface damage caused by mechanical probing with small ruby spheres. In: Meas. Sci. Technol., Vol. 18, No. 2, pp. 496, 2007.

- [2] Kuechel, M. F.: Interferometric Measurement of Rotationally Symmetric Aspheric Surfaces. In: Proc. SPIE 7389, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, 2009.

Optische Messung der Verformung von Rotorblättern unter Windlast

Prof. Dr. **T. Luhmann**, **M. Göring** M.Sc., **Ch. Jepping** M.Sc.,
Jade Hochschule, Oldenburg

Kurzfassung

Windenergieanlagen (WEA) im laufenden Betrieb sind starken Belastungen ausgesetzt, insbesondere treten bei den Rotorblättern starke Verformungen auf. In diesem Beitrag werden dazu einige Lösungsansätze und aktuelle Entwicklungen vorgestellt, die auf der Basis berührungslos erfasster Messdaten (Photogrammetrie, Laserscanning) die Bestimmung von Durchbiegung, Torsion und anderer Parameter erlauben. Insbesondere werden Ansätze diskutiert, die ohne künstliche Markierung der Oberfläche auskommen und damit eine operationelle Erfassung von WEA unter Realbedingungen erlauben. Zur numerischen Stabilisierung der Deformationsbestimmung wird darüber hinaus ein Ansatz vorgestellt, in dem aus Bild- und Laserscandaten unter Einbeziehung von Finite-Elemente-Methoden elastische Verformungen abgeleitet werden. Das Verfahren ist weitgehend skalierbar und daher grundsätzlich auch für andere vergleichbare Messprobleme anwendbar.

Abstract

Wind energy systems (WES) in operation are subject to heavy mechanical stress. In particular, strong deformations occur at the rotor blades. In this paper a number of existing solutions for contactless measurement (photogrammetry, laserscanning) are presented that allow for the determination of bending, torsion and other parameters. The paper focuses on approaches that do not require any artificial targeting of the surface, hence permit the measurement of operating WES on-site. For stabilization of the numerical process of deformation analysis, a new approach is presented that combines image and laserscan data with finite-element methods in order to derive elastic deformations. The method can be scaled almost arbitrarily and is therefore also applicable for similar measurement tasks.

1. Einleitung

Windenergieanlagen (WEA) im laufenden Betrieb sind starken Belastungen ausgesetzt, wobei besonders die Rotorblätter erheblichen Verformungen unterliegen. Die Rotorblätter werden ständig optimiert, um Herstellungs- und Betriebskosten zu senken und die Effizienz wei-

ter zu steigern [1]. Die Rotorblätter verursachen ca. 25% der Investitionskosten einer WEA [2]. Auch die Überwachung (Monitoring) und Wartung der WEA sind ein wesentlicher Kostenfaktor, sie betragen ca. 25% der gesamten Betriebskosten [2].

Bisher werden die Rotorblätter in großen Laboren für die Zertifizierung einer statischen und zyklischen Prüfung unterzogen. Das Rotorblatt wird eingespannt und in Eigenschwingung versetzt, die Verformungen werden u.a. photogrammetrisch erfasst [3-4].

Zur besseren Überwachung im laufenden Betrieb werden bereits verschiedene Monitoring-Techniken verbaut, um die Anlage zu überwachen [5]. An den Rotorblättern können dazu Dehnungsmessstreifen angebracht werden. Diese sind jedoch anfällig für Fehler, besonders die Temperatur beeinflusst die Ergebnisse [6]. Die tatsächliche Verformung der Blätter lässt sich damit nicht ausreichend beschreiben.

Verschiedene Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der optischen Erfassung von Rotorblattverformungen im laufenden Betrieb. Zunächst sind hier photogrammetrische Ansätze zu nennen, bei denen insbesondere Mehrkamerasysteme erfolgversprechend sind. Für den Einsatz von laserbasierten Verfahren (z.B. Laserscanner) müssen die sequentiell erfassten Messpunkte dem bewegten Objekt eindeutig zugeordnet werden.

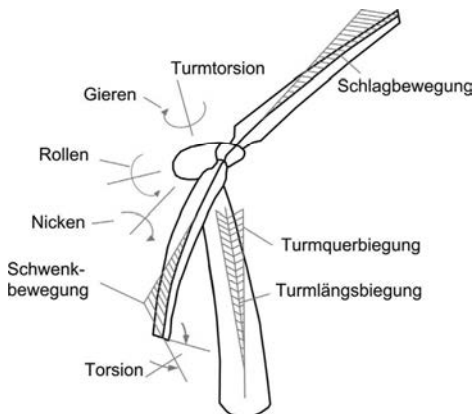


Bild 1: Freiheitsgrade der WEA [nach 8]

2. Grundlagen und bisherige Versuche

WEA bilden aufgrund der Dimensionen und der Freiheitsgrade (Bild 1) ein komplexes Messobjekt. Die Spitzengeschwindigkeit an der Außenspitze von Rotorblättern kann je nach Anlagentyp bei bis zu 100 m/s liegen. Die Rotorblätter haben an der Nabe einen Querschnitt von mehreren Metern, der sich zur Außenspitze hin reduziert. Somit ist das Rotorblatt dort weniger steif und es kommt zu starken Verformungen. In Windrichtung verbiegt sich das Rotorblatt bis zu 10% der Blattlänge [7].

Für die optische Erfassung der Verformungen von Rotorblättern sind insbesondere photogrammetrische Ansätze und das terrestrische Laserscanning einsetzbar. Im Folgenden werden die Grundlagen und aktuelle Forschungsprojekte vorgestellt.

2.1 Photogrammetrie

Der größte Vorteil bei der Photogrammetrie besteht darin, eine Vielzahl an Messungen (Anzahl der Pixel) in einer kurzen Zeit (ein Foto / Belichtungszeit) aufzunehmen. Um aus Messungen in den Bildern geometrisch genaue Informationen über das aufgenommene Objekt abzuleiten, muss die Kamera vorab kalibriert werden (innere Orientierung). Dreidimensionale Objektrekonstruktionen werden üblicherweise durch Stereo- oder Multi-Kamera-Systeme realisiert. Dazu muss die relative räumliche Orientierung zwischen den Kamera- oder Bildstandorten sowie der Bezug zum Objektkoordinatensystem (äußere Orientierung) hergestellt werden. Über die Identifizierung eindeutiger Bildmerkmale und verschiedener 3D-Berechnungsverfahren können Objekte (wie Punkte, Linien oder Oberflächen) dreidimensional rekonstruiert werden. Das Messobjekt wird dazu häufig mit Messmarken oder einem zufälligen Punktemuster beklebt. Grundlagen der Photogrammetrie werden in [9] beschrieben.

Ersten Messungen an einer realen Anlage mit einem Stereo-Kamerasystem wurden in [10] veröffentlicht. Die WEA wurde dazu mit einem retroreflektierten Punktemuster beklebt, um Schwingungen vom Turm und der Rotorblätter zu erfassen.

In [11] wurden der Turm und die Rotorblätter mit retroreflektierenden Marken beklebt und diese mit zwei synchronisierten Stereokamerasystemen beobachtet (Bild 2 links). In [12] konnte nachgewiesen werden, dass der zufällige Fehler der Messungen in einer Größenordnung von ± 5 mm liegt. Dieser Wert deckt sich mit den Erwartungen. Weiterhin konnte ein systematischer Anteil von bis zu ca. 30 mm bei Marken an der Blattspitze nachgewiesen

werden. Es wird vermutet, dass es einen Zusammenhang zwischen Position der Marke im Bild und dem systematischen Fehler gibt.

Bei einem weiteren aktuellen Projekt wird das Rotorblatt mit einem Punktemuster an vier Positionen beklebt (Bild 2 Mitte) und von zwei Kameras beobachtet [13]. Es können relative Verformungen zu einem Referenzzeitpunkt berechnet werden. Durch eine ausgleichende Ebene eines Rotorblattdurchlaufs wird die Rotationsachse als Koordinatenursprung angenommen. Zwei Kameras mit 25 MP werden eingesetzt, die vorab im Nahbereich kalibriert werden. In [14] werden Simulationsergebnisse vorgestellt, dabei werden pro Position auf dem Rotorblatt 10.000 Punkte gemessen. Die relative Schlagbewegung lässt sich mit einer Genauigkeit von ± 9 mm bestimmen.

Das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung hat einen Laservibrometer mit kombinierter Kamera entwickelt und im Labor getestet (Bild 2 rechts). Der Vibrometer erfasst die Schwingungen an einer festen Position des Blattes. Durch die kombinierte Kamera wird mittels Trackingverfahren die Außenspitze des Rotorblatts in Echtzeit verfolgt und der Laser automatisch nachgestellt [15].



Bild 2: Vermessung von Windenergieanlagen; links: WEA beklebt mit photogrammetrisch beobachteten Retromarken [11]; Mitte: am Rotorblatt angebrachtes Punktemuster, rechts: Laservibrometer mit kombinierter Kamera zur Erfassung von Schwingungen [15]

Nachteilig bei diesen Verfahren ist, dass die WEA angehalten werden muss, um diese zu bekleben und um die Folie wieder zu entfernen. Dies ist mit einem hohen Aufwand und mit zusätzlichen Kosten verbunden. Da diese Untersuchungen an windreichen Tagen erfolgen, kommen finanzielle Mindereinnahmen hinzu.

2.2 Laserscanning

Laserscanning ist eine kontaktlose aktive 3D-Messmethode. Es ermöglicht das Messen von Distanzen mit den dazugehörigen Winkeln mit einer Frequenz von bis zu 1 MHz. Eine Genauigkeit von wenigen Millimetern kann bei der Distanzmessung von über 100 m erreicht werden. Als Beispiel liegt das Rauschen des Laserscanners Imager 5010 von Zoller & Fröhlich bei 2mm auf einer weißen Oberfläche [16]. Typische Anwendungen beschäftigen sich mit der Aufnahme statischer Objekte. Einige Instrumente erlauben die Nutzung verschiedener Messmodi, deren Prinzip in Bild 3 dargestellt ist. Die sequentielle Aufnahme einzelner Punkte ergibt sich aus der Drehung des Lasers um die horizontale und vertikale Achse (3D). Alternativ wird beim Mobile Mapping typischerweise der 2D-Modus genutzt. Der Laser rotiert dabei um eine Achse, während die Bewegung einer mobilen Plattform des Laserscanners die dritte Dimension liefert. Ein bewegtes Objekt kann von einer festen Position mit fest eingestellten Winkeln auch im 1D-Modus gemessen werden. Um die Messpunkt an einem bewegten Objekt eindeutig der Oberfläche zuzuordnen, muss die Bewegung über weitere Sensoren beobachtet werden.

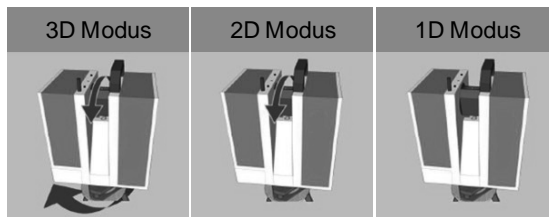


Bild 3: Messmodi Laserscanner [17]

In Forschungsprojekten werden Laserscanner an WEA im laufenden Betrieb bisher nur eingesetzt, um Schwingungen des Turms zu erfassen [18-19].

Die Firma Windcomp setzt zwei Distanzmesser ein um relative Verformungen der Rotorblätter zu ermitteln. Die Distanzmesser zielen dazu in zwei verschiedenen Abständen zur Nabe auf den Turm [20].

3. Aktuelle Versuche und Lösungsansätze

Aktuelle Projekte am Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der Jade Hochschule beschäftigen sich mit der Bestimmung der Verformungen ohne Signalisierung der WEA.

3.1. WindScan

Das Projekt WindScan [21] hat das Ziel, die Torsion in Verbindung mit der Durchbiegung in Windrichtung in einem standardisierten Koordinatensystem der WEA zu bestimmen. Dazu wird eine Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie eingesetzt. Jedes Messsystem ist mit einem GPS-Modul ausgestattet, so dass eine hochgenaue zeitliche Synchronisierung stattfinden kann.

Mindestens 2 Laserscanner vom Typ Zoller & Fröhlich 5010 werden sowohl im 3D- als auch im 1D-Modus eingesetzt. Der 3D-Modus dient der Bestimmung der Orientierung der Laserscanner im Koordinatensystem der WEA. Dazu wird die Punktwolke der Gondel an das CAD-Modell der Gondel angepasst. Um die Verformungen der Rotorblätter zu erfassen, wird der 1D-Modus eingesetzt. Horizontal- und Vertikalwinkel des Laserscanners werden festgesetzt, so dass lediglich Entfernungen in Abhängigkeit der Zeit gemessen werden. So wird ein Profil in der Nähe der Nabe aufgezeichnet, aus dem der Anstellwinkel des Rotorblattes bestimmt werden kann. Weitere Profile werden, je nach Anzahl verfügbarer Scanner, entlang des Rotorblattes und an der Außenspitze aufgenommen.

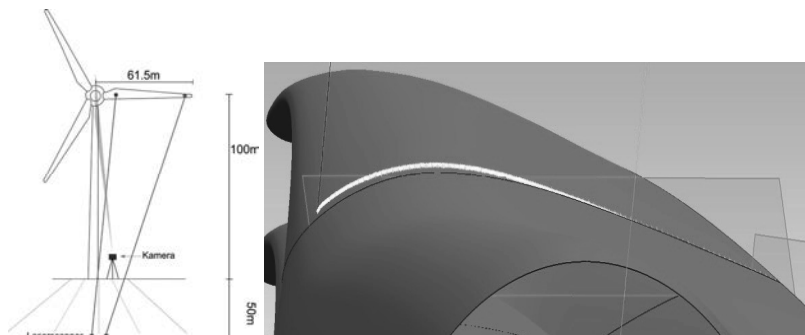


Bild 4: links: Messanordnung an WEA; rechts: das gemessene Profil (in Weiß) wird an das CAD-Modell vom Rotorblatt (in Grün) angepasst

Zeitgleich zum 3D-Scan des Laserscanners wird mit einer Kamera, welche direkt unter der Gondel positioniert wird, die Gondelbewegung erfasst. Über markante Punkte an der Gondel und dem bekanntem CAD-Modell können die Bewegungen berechnet werden und die Profildaten des Laserscanners im Koordinatensystem der Gondel/Nabe korrigiert werden. Der Messaufbau ist in Bild 4 links dargestellt.

Dieses Verfahren ermöglicht die Messung von absoluten Verformungen im Koordinatensystem der Nabe. Für die Festlegung des Objektkoordinatensystems muss dazu das CAD-Modell der Gondel und für die Verformungsbestimmung das CAD-Modell des Rotorblattes vorliegen (Bild 4 rechts). Die erreichbare Genauigkeit ist stark von der Genauigkeit des CAD-Modells bzw. der Fertigungsgenauigkeit der Gondel abhängig.

Für die Verformungsberechnung müssen die Profile zum selben Zeitpunkt gemessen werden. Das erfordert neben der genauen zeitlichen Synchronisation eine perfekte räumliche Ausrichtung der Laserscanner, welche im Felde kaum realisiert werden kann. Daher werden aktuell Verfahren zur vereinfachten Ausrichtung untersucht. So wird derzeit ein neues Messsystem entwickelt, welches aus mehreren fächerartig ausgerichteten Distanzmessern besteht, die synchron mehrere 1D-Profile aufnehmen können.

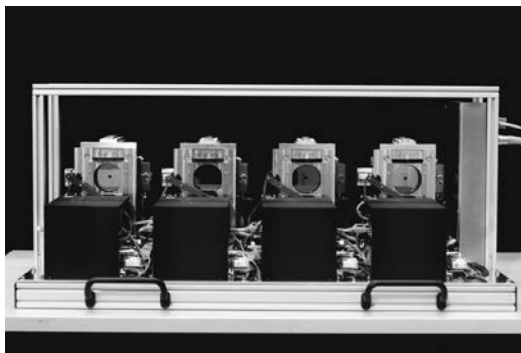


Bild 5: Neu entwickeltes fächerartiges Distanzmesssystem mit 4 Lasereinheiten

3.2 Optische Deformationsmessungen mit Modellannahmen

In einem zweiten Projekt werden Verfahren zur Erfassung von Rotorblattverformungen aus Kamera- und Laserscanner-Daten entwickelt. Im Vergleich zum Projekt WindScan ist hier das Ziel, den Verlauf der Verformungen aus den Messungen unter Berücksichtigung der Ver-

formungseigenschaften abzuleiten. Hierzu werden Laserscanner und Kameras zur Erfassung der Bewegung und Verformung eines Rotorblattsystems einer WEA verwendet.

Es wird hierbei angenommen, dass sich das Rotorblatt unter Berücksichtigung der Euler-Bernoulli Annahmen [22] für Balken verhält. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass rechtwinklig zu einer neutralen Faser gemessenes Profil nach der Verformung rechtwinklig zu dieser bleibt und das dieses Profil weiterhin eben ist. Weiterhin wird angenommen, dass die Länge der neutralen Faser nach der Verformung gleich der Länge der unverformten neutralen Faser ist (Bild 6). Dies entspricht der Annahme, dass keine oder für die Messgenauigkeit vernachlässigbare Zugkräfte auf die Rotorblätter wirken.

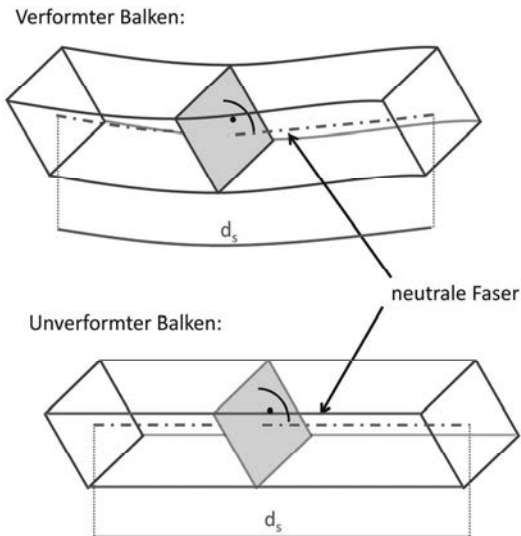


Bild 6: Annahmen, die an die Verformung gestellt werden (Streckentreue auf der neutralen Faser und Rechtwinkligkeit der Profile zur neutralen Faser.)

Basis der Auswertung ist, wie im Projekt WindScan, ein CAD-Modell der Rotorblätter. Dieses bietet die Möglichkeit der Verknüpfung beider Messverfahren. Hierzu wird das CAD-Modell um zeitabhängige Verformungsparameter sowie Transformationen zur Beschreibung der räumlichen Lage erweitert, die in einer kombinierten Ausgleichung (Photogrammetrie und Laserscanning) bestimmt werden. Die Verformungsparameter werden entlang der neutralen

Faser des Rotorblattes an Transformationsknoten definiert. Die Transformation eines unverformten CAD-Punktes in einen verformten Zustand erfolgt durch folgende Transformation:

$$\mathbf{P}'_{\text{CAD}} = \mathbf{X}_0 + \mathbf{R}_0 \cdot (\mathbf{P}_{\text{CAD}} - \mathbf{P}_F) + \mathbf{P}_F$$

Hierbei beschreibt \mathbf{X}_0 die Translation und \mathbf{R}_0 die Rotation eines Punktes \mathbf{P}_{CAD} im Bezug zu dessen Fußpunkt \mathbf{P}_F auf der neutralen Faser (siehe Bild 7). \mathbf{X}_0 und \mathbf{R}_0 werden hierbei zwischen den benachbarten Transformationsknoten interpoliert. Die Interpolation erfolgt sowohl über die Distanz zu den benachbarten Transformationsknoten auf der neutralen Faser als auch über zeitlich benachbarte Transformationsknoten. Unter Nutzung der Verformungsannahmen kann die Anzahl der erforderlichen Parameter auf drei je Transformationsknoten reduziert werden. Hierzu kann die Translation in Abhängigkeit zur Rotation beschrieben werden [23]. Alternativ kann die Einhaltung der Annahmen durch Pseudo-Beobachtungen oder Bedingungen bewirkt werden [24].

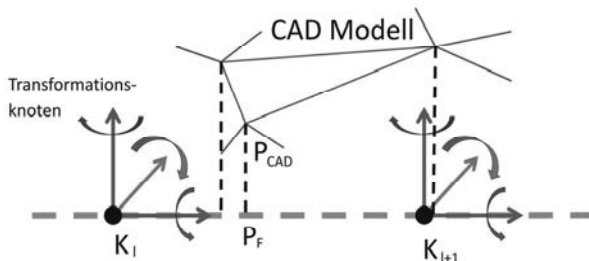


Bild 7: Zusammenhang von Transformationsknoten und CAD

Zur Bestimmung der Parameter innerhalb einer Ausgleichung werden die Abstände zwischen den Laserscanning-Punktwolken zum erweiterten Modell der Rotorblätter minimiert. Weiterhin erfolgt eine Projektion des Modells in die Bilder der Kameras. In den Kamerabildern wird der Abstand der gemessenen Silhouette zum Modell minimiert.

Das Ergebnis sind zeitabhängige Verformungen und Transformationen des Objektes, aus denen Torsionsverläufe oder Durchbiegungsverläufe abgeleitet werden können. In [24] wird aufgeführt, dass diese Parameter zum Vergleich mit Statikberechnungen genutzt werden können. Hierzu wird in einem Laborversuch die Verformung eines Balkens bestimmt und mit der theoretischen Durchbiegung anhand der Biegetheorie verglichen. Ein Vergleich mit Referenz-

renzmessungen hat bei diesem Laborversuch eine Sub-Pixelgenauigkeit bei der Verformungserfassung aus Silhouetten nachgewiesen.

Weiterhin kann das Verfahren flexibel an die messtechnischen Anforderungen angepasst werden. Je nach Anforderungen an die Messung kann der Geräteaufwand variiert werden. Die Mindestanforderung ist eine Kamera. Der ausschließliche Einsatz von Laserscannern ist nicht sinnvoll, da die Rotation des Rotorblattsystems in diesem Fall stark mit den Verformungen korreliert ist. Simulationen haben gezeigt, dass Laserscanner insbesondere für die Bestimmung der Torsion sinnvoll sind. In BBild 8 ist eine Auswertung mit simulierten Daten dargestellt. Bei der Simulation werden drei Kameras sowie drei Laserscanner simuliert. Die maximale (simulierte) Verformung an der Rotorblattspitze beträgt ca. 3 m bei einem maximalen Torsionswinkel von ca. 5°.

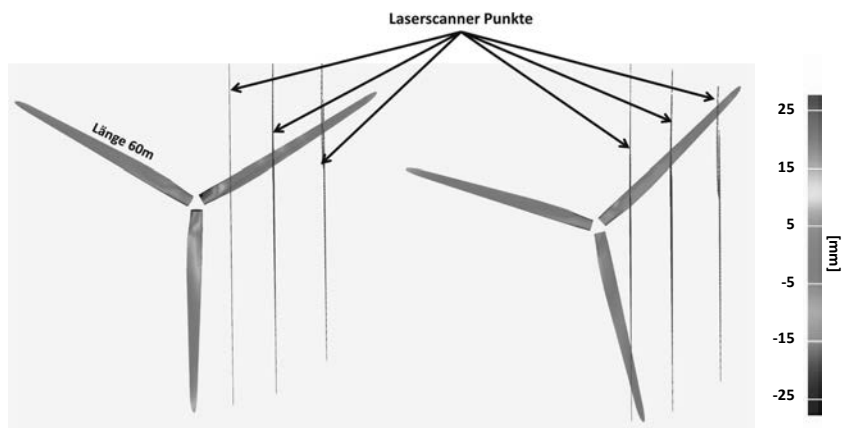


Bild 8: Vergleich zwischen Soll-Geometrie (Simulation) und berechneter Verformung aus simulierten Messdaten zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Erfassung von Rotorblattverformungen an Windkraftanlagen hat zu einigen speziellen Lösungsansätzen geführt. Als vielversprechend ist hierbei die Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie zu sehen. Diese Kombination führt zu neuen Möglichkeiten der kinematischen Objekterfassung, die sich nicht nur für Rotorblätter einsetzen lassen.

Das Verfahren erlaubt, bei hoch kinematischen Prozessen berührungslose Messungen ohne Signalisierung durchzuführen und Deformationen nachzuweisen. Sinnvolle Einsatzgebiete sind überall dort zu finden, wo kinematische Verformungen auftreten, d.h. eine Erfassung in einzelnen diskreten Epochen nicht möglich ist. Darüber hinaus muss die Kinematik in einem Bereich auftreten, welche durch die Abtastrate des Laserscanner gut zu repräsentieren ist. Die räumliche Beschreibbarkeit der Verformung muss dabei durch die Messstellen gegeben sein.

Die Nutzung von CAD-Informationen zur kinematischen Deformationsbeschreibung kann auf andere Anwendungen übertragen werden. Die Einschränkung, dass lediglich die Silhouette genutzt wird, kann als Sonderfall betrachtet werden. Allgemein können beliebige Objektkanten (z.B. an Bohrungen oder Aussparungen) genutzt werden, um daraus 3D-Informationen abzuleiten, sofern diese im Bild korrekt erkannt werden können. In [25] wird beispielsweise ein CAD-Modell zur Beschreibung der 6Dof-Parameter eines Objektes aus nur einem Kamerabild genutzt, wobei markante Kanten und Bohrungen aus dem CAD-Modell im Bild extrahiert werden. Erweitert man das CAD-Modell nun mit Verformungsparametern, so sind verschiedene Anwendungen bei Bauteilprüfungen denkbar, z.B. die Erfassung von Verformungen bei thermischer oder mechanischer Belastung.

5. Literatur

- [1] Zerbst St., Knops M., Haase K. & Rolfes R. 2010: Schadensfrüherkennung an Rotorblättern von Windenergieanlagen. *Lightweight Design* 3(4), 16-24, Vieweg+Teubner Verlag.
- [2] Jarass, L., Obermair, G. & Voigt, W. 2009: *Windenergie – Zuverlässige Integration in die Energieversorgung* (2. Ausg.). Springer Verlag, Heidelberg.
- [3] IWES 2016: Test Centers, Rotor Blade Testing, Bremerhaven, Germany
http://www.windenergie.iwes.fraunhofer.de/de/testzentren_und_labore/rotorblatt-und-cfk-materialien/rotorblatt_pruefzentrum.html (14.3.2016)
- [4] AICON 2016: Rotor blade testing at the IWES, Braunschweig, Germany,
<http://www.aicon3d.com/applikationen/portable-koordinaten-messtechnik/dynamisches-messen/iwes.html> (14.3.2016)
- [5] García Márquez, F. P., Tobias, A. M., Pinar Pérez, J. M., & Papaelias, M. 2012: Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy*, 46, 169-178.
- [6] Papadopoulos, K., Morfiadakis, E., Philippidis, T. P., Lekou, D. J. 2000: Assessment of the strain gauge technique for measurement of wind turbine blade loads. *Wind Energy*, 3/1 35-65
- [7] Edzard, H. 2009: Rotorblatt für Windkraftanlagen, insbesondere für schwimmende Windkraftanlagen, sowie Windkraftanlage mit einem Rotorblatt <http://www.patent-de.com/20090212/DE102007036917A1.html> (21.4.2016)
- [8] Hau, E. 2008: *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*, Springer, Berlin, pp. 233 & 437, ISBN: 978-3-540-72150-5.
- [9] Luhmann, T. 2010: *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, 668 S.
- [10] Corten, G. B. 1996: Optical Motion Analysis of Wind Turbines European Union Wind Energy Conference, Goeteborg, Sweden.
- [11] Schmidt Paulsen, U., Erne, O., Schmid, T. 2009: Wind Turbine Operational and Emergency Stop Measurements Using Point Tracking Videogrammetry In Conference proceedings. Bethel (US): SEM.
- [12] Özbek, M. 2013: Optical monitoring and operational modal analysis of large wind turbines. PhD thesis, Delft University of Technology.
- [13] Winthroth, J., Schoen, L., Ernst, B. and Seume, J. R. 2014: Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation: a comparison to aeroelastic simulations of a multi-megawatt wind turbine. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 524, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.
- [14] Winthroth, J., Seume, J.R. 2015: Error Assessment of Blade Deformation Measurements on a Multi-Megawatt Wind Turbine based on Digital Image Correlation. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. GT2015. June 15-19, 2015, Montréal, Canada

- [15] Fraunhofer 2016: Distanze Vibrationsmessung von Windenergieanlagen im Betrieb, <http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/26555/> (14.3.2016)
- [16] Z+F 2016: 3D Laser scanner Technical Data. http://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5010.3d_laserscanner0.0.html (21.4.2016)
- [17] Kutterer, H., Paffenholz, J.-A., Vennegeerts, H. 2009: Kinematisches terrestrisches Laserscanning. Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 2, Augsburg: Wißner-Verlag, 79-87
- [18] Paffenholz, J.-A., Vennegeerts, H., Kutterer H. 2008: High Frequency Terrestrial Laser Scans for Monitoring Kinematic Processes. INGE0 2008 – 4th International Conference on Engineering Surveying. Bratislava, Slovakia, October 23-24
- [19] Gikas V., Daskalakis S. 2009: Contribution of Combined RTS and TLS to Dynamic Monitoring of Wind Energy Turbines. 9th Int. Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, July 1-3.
- [20] Windcomp 2016: Firma Windcomp GmbH. <http://windcomp.jimdo.com/>.
- [21] Grosse-Schwiep, M., Piechel, J. and Luhmann, T. 2013: Measurement of Rotor Blade Deformations of Wind Energy Converters with Laser Scanners. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W2, 97-102.
- [22] Merkel, M., Öchsner, A. 2014: Eindimensionale finite Elemente: ein Einstieg in die Methode. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- [23] Jepping, C., Luhmann, T. 2016: Deformations from image silhouettes using a kinematic finite element beam model. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, Prague, Czech Republic.
- [24] Jepping, C., Schulz, J. U., Luhmann, T. 2016: Konzept zur Modellierung kinematischer Rotorblattverformungen an Windkraftanlagen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 1, pp. 3-10.
- [25] Cefalu, A., Boehm, J. 2009: Three-dimensional object recognition using a monoscopic camera system and CAD geometry information. SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, pp. 74470K-74470K

Optische Bewegungs- und Verformungsanalyse auf Basis applizierter Muster und Marken

Dr.-Ing. **Harald Friebe**, **M. Klein**, GOM mbH, Braunschweig

Kurzfassung

Dieser Artikel gibt einen kleinen Überblick über die prinzipielle Funktionsweise und die Anwendungsmöglichkeiten optischer Messsysteme, die Ihre Objektinformationen auf Basis applizierter Marken oder Muster erzeugen. Es werden die technischen Grundlagen beschrieben und einzelne Anwendungen näher betrachtet.

1. Marken und Muster in digitalen Bildern

Die Bestimmung eines Bezugspunktes auf einem Objekt (z.B. eines Messpunktes) und seiner Bewegungen basiert auf der präzisen Positionsbestimmung optischer Merkmale in Kamerabildern. Sind diese optischen Merkmale mit dem Objekt verbunden, so kann nicht nur die Koordinate des Bezugspunktes bestimmt werden, sondern auch seine veränderte Lage infolge einer Bewegung im Raum von Kamera oder Objekt, bzw. seine Verformung.

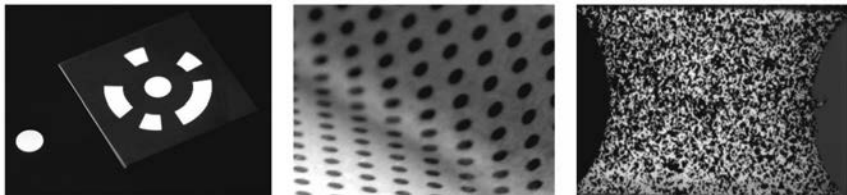


Bild 1: Links: Messpunkt als weiße Kreismarke und ein Messpunkt mit zusätzlicher optischer Kodierung, Mitte: Messoberfläche mit regelmäßig aufgetragener Punktstruktur, Rechts: stochastisch feinverteilte Oberflächenstrukturierung

2. Bestimmung des Bezugsortes von Punktmarken

Kreisförmige Punktmarken werden in Bildern in der Regel nicht als Kreise, sondern durch perspektive oder geometrische Verzerrungen als Ellipsen abgebildet. Für die genaue Bestimmung eines Punktmarken-Mittelpunktes in einem Bild sind unterschiedlichste Ansätze möglich. In der Regel erfolgt dies in einem mehrstufigen Prozess. Werden die hellen Bereiche im Bild zunächst numerisch identifiziert, so kann für jeden hellen Bereich ein Schätzwert für seinen Mitte bestimmt werden (z.B. Schwerpunkt oder Helligkeitsmaximum). Ausgehend von diesem Startpunkt können nach [1] z.B. sternförmig Schnitte durch die im Bild vorhandene Helligkeitsverteilung gelegt werden.

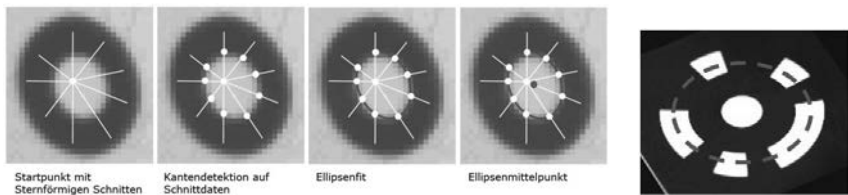


Bild 2: Beispiel für die Bestimmung des Bezugsortes einer Punktmarke; rechts: kreisförmiger Strichcode für eindeutige Punktidentifizierung

Wird der Intensitätsverlauf längs der Schnitte jeweils mit einer Funktion durch die Helligkeiten der Pixelmitten angenähert, so kann für jeden Schnitt der Ort der mittleren Helligkeit am Übergang vom hellen Bereich zum dunklen Hintergrund als Kantenpunkt sub-pixelgenau bestimmt werden. Durch alle Kantenpunkte wird anschließend mathematisch eine Ellipse berechnet. Der Mittelpunkt der Ellipse liefert eine hochgenaue Beschreibung der Position des Messpunktes.

Werden Marken mit optischem Code verwendet, so muss zusätzlich zum Mittelpunkt des Punktes auch sein logischer Code bestimmt werden. In Bild 2 wird ergänzend zu der Ellipse auf dem Punktrand eine vergrößerte Ellipse durch den Strichcode gelegt. Der Helligkeitsverlauf entlang der äußeren Ellipse wird als Barcode ausgewertet.

3. Bestimmung des Bezugspunktes von Facetten (DIC)

Liegt anstelle einer wohldefinierten Markierung (Punkt, Ellipse, ...) eine zufällige, feinverteilte Helligkeitsinformation im Bild vor, so bietet sich die digitale Bildkorrelation (auch Rasterverfahren genannt [2]) als Auswerteverfahren an. Hierbei wird das Bild eines Referenzzustandes in eine große Anzahl kleiner Felder, im Weiteren Facetten genannt, unterteilt. Als geometrischer Bezugsort wird die Mitte einer Facette definiert. Tritt nun eine Verschiebung des Bezugsortes, wie in Bild 3 dargestellt, auf (Bewegung/Verformung des Messobjektes oder Veränderung der Beobachtungsrichtung), so ist die entsprechend veränderte Lage des Bezugspunktes aus den veränderten Helligkeitsinformationen zu bestimmen.

Bild 4 zeigt links als Ausgangssituation eine Facette aus 7x7 Pixeln, d.h. 7x7 Helligkeitswerte stehen für eine Lagebestimmung der Facette zur Verfügung. Der Ort des Helligkeitswertes ist geometrisch der jeweiligen Pixelmitte zuzuordnen (weiße Kreuze) und bildet 7x7 geometrische Stützstellen. Im rechten Bild ist das Objekt im Bild leicht verschoben und verdreht. In diesem Fall liegt keine der Stützstellen mehr in der Mitte eines Pixels und es sind passende Ersatzwerte für die neuen Stützstellen zu ermitteln.

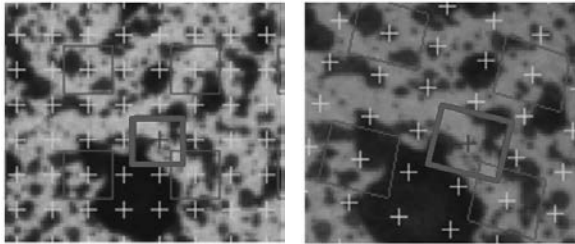


Bild 3: Links: Ausgangsbild, jedes Kreuz steht für die Mitte einer Facette, ein Teil der Facetten sind eingezeichnet (Quadrate). Rechts: Bild mit verzerrem Muster und Facettenfeld

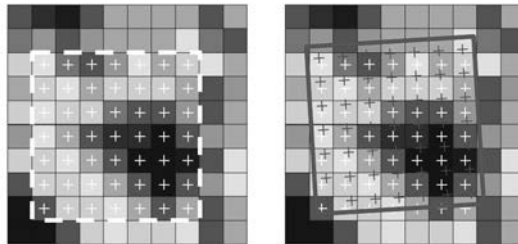


Bild 4: Links: Einteilung der Bildinformation in eine Facette aus 7x7 Pixeln, rechts: verdrehte und verschobene Facette mit entsprechend verschobenen Stützstellen.

Die Bestimmung der Lage einer Facette in einem neuen Bild erfolgt prinzipiell zuerst durch die Berechnung eines Schätzwertes für die Position aller Facetten. Für die Bestimmung der benötigten Stützstellen werden daraufhin Helligkeitsersatzwerte durch eine Subpixel-Interpolation berechnet. Mit Hilfe dieser erzeugten Helligkeitsersatzwerte wird die Position der Facette iterativ zur maximalen geometrischen Übereinstimmung gebracht.

Der Vorteil der digitalen Bildkorrelation liegt darin, dass für eine sehr große Anzahl an Facetten die Muster sehr einfach und schnell z.B. durch Aufsprühen erzeugt werden können. Die DIC liefert auf einfache Weise eine große Anzahl flächenhaft verteilter und subpixelgenauer, korrespondierender Messpunkte aus Bildern.

4. Photogrammetrischer Messansatz

In der Photogrammetrie wird die Lage eines Punktes im Raum durch Triangulation von Richtungsbündeln bestimmt. Von einer festen Punktanordnung werden mehrere Bilder aus verschiedenen Richtungen aufgezeichnet. Mit Kenntnis der jeweiligen räumlichen Orientierung

gen im Objektkoordinatensystem lassen sich aus den Bildkoordinaten über die Strahlenschnitte die gesuchten Objektkoordinaten berechnen. [3]

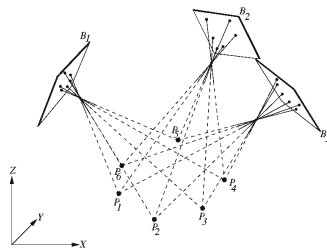


Bild 5: Koordinatenbestimmung von Objektpunkten durch Triangulation von Strahlenbündeln aus verschiedenen Bildebenen

Kameramodell

Das Kameramodell beschreibt die Abbildung eines Objekts in die Bildebene einer Kamera. Beim vereinfachten Modell der Zentralprojektion entspricht dabei das Kameraobjektiv einer Lochblende, dem Projektionszentrum. Bei realen Abbildungssystemen ist der Zusammenhang und damit der Verlauf der Strahlen komplizierter.

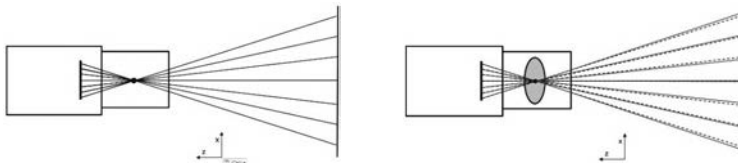


Bild 6: Links: idealisierte Zentralprojektion mit linearer Rückprojektion vom Bild in der Raum
Rechts: durchgezogene Linien markieren die Projektionslinien bei realen Objektiven mit Verzeichnungen in der Bildinformation

Die kameraabhängigen Parameter, wie die Kammerkonstante, die Koordinaten des Bildhauptpunktes und die Größen zur Beschreibung von systematischen Bildfehlern werden als innere Orientierungen bezeichnet. Die Werte des Projektionszentrums und die Rotationsmatrix, die von der Lage der Kamera innerhalb des globalen Koordinatensystems abhängen, bilden die äußere Orientierung.

Als bekannte Größen liegen nach dem Identifizieren der Messpunkte im Bild nur die Bildkoordinaten der Messpunkte, gegebenenfalls schon eine Identifizierung einzelner Messpunkte (kodierte Marken) in den verschiedenen Bildern und die Längenangaben zu den verwendeten Maßstäben vor. Alle anderen Parameter (Kameramodell, Kamerapositionen und Ausrich-

tungen und die Koordinaten der Objektpunkte) sind unbekannt und werden beim photogrammetrischen Messansatz in einer komplexen Ausgleichsberechnung gelöst.

4. Stereobildsensoren

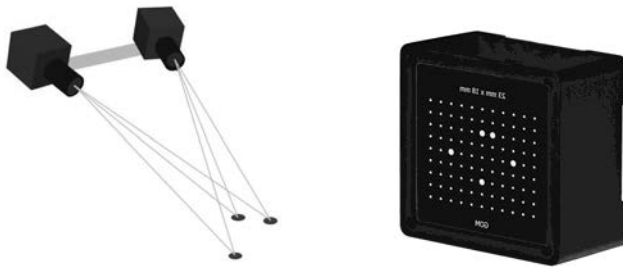


Bild 7: Links: Prinzip eines Stereo-Kameraaufbaus mit zwei fest verbundenen Kameras;
Rechts: Kalibriernormal zur Kalibrierung von Mehr-Kamera-Aufbauten

Werden Sensoren mit zwei oder mehr fest miteinander verbundenen Kameras eingesetzt, so genügt ein zeitgleich aufgezeichnetes Bildpaar zur Bestimmung von 3D Koordinaten und dynamische Vorgänge können einfach mit mehreren Bildpaaren erfasst werden. Die optischen Parameter beider Kameras müssen dafür in einer vorausgehenden Kalibrierprozedur bestimmt werden. Hierfür werden Kalibrierkörper eingesetzt, die eine eindeutige Kodierung in Ihrem Muster und mindestens einen bekannten Maßstab beinhalten (Bild 7). Im Zuge der Kalibrierung werden nacheinander mehrere Bildpaare aufgenommen, bei denen die Kalibriervorlage immer im Bild der Kameras sichtbar bleibt, Sensor und Kalibriervorlage aber verschiedene Positionen zueinander einnehmen (verdreht, gekippt, verschoben). Mittels Ausgleichsrechnung wird aus den Bildpositionen der Messpunkte dieser Bilder ein präzises mathematisches Kalibriermodell des Sensors einschließlich der Kamerapositionen und Objektiverzeichnungsparameter berechnet. Damit sind die zu jedem Bildpunkt gehörenden Abbildungsstahen bekannt.

Wird anschließend ein Objektpunkt (Messpunkt oder Facettenmittelpunkt) im Bild der beiden Kameras identifiziert, so kann seine 3D Raumkoordinate durch Schnitt der Abbildungsstahen berechnet werden.

6. TRITOP - Photogrammetrie-System zur 3D Koordinatenbestimmung

Das Photogrammetriesystem TRITOP wird als mobile 3D Koordinatenmessmaschine für die unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt. In Kombination mit 3D Scannern dient es oft

als Lieferant für die 3D Referenzpunkte (Bild 8), über die die einzeln gescannten Teilstücke zu einem Gesamtergebnis zusammengefügt werden [4]. Hierfür werden je nach Anwendung sowohl manuelle als auch vollautomatisch messende Systemlösungen eingesetzt.

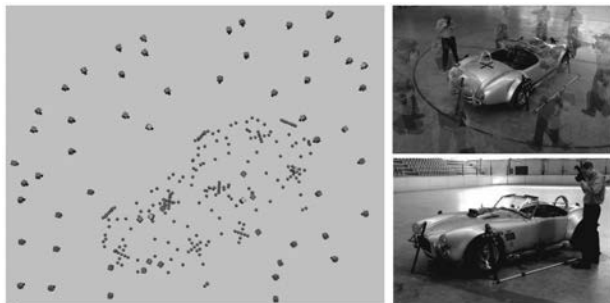


Bild 8: Photogrammetrische Erfassung von Referenzpunkten für den 3D Scanner ATOS

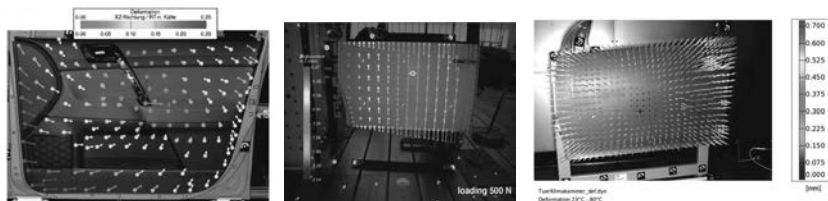


Bild 9: Links: Verzugmessung an einer Türinnenverkleidung nach Klimakammertest
Mitte: Türverformung an offener Tür durch Gewichtsbelastung
Rechts: Thermisch bedingte Türverformung 23° zu 80°C

Werden zwei oder mehr Zustände eines Objektes erfasst, so erfolgt die Identifikation der Messpunkte in der Regel automatisch und erlaubt eine einfache Bestimmung von 3D-Verschiebungen (siehe Bild 9) [5,6].

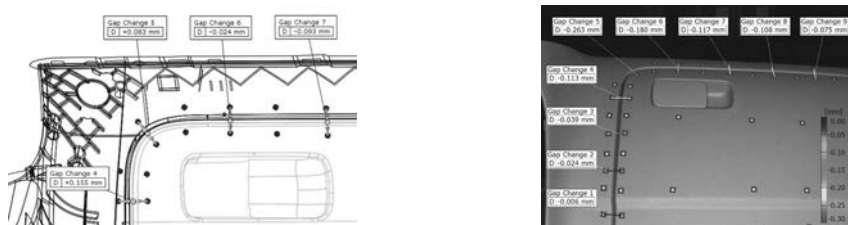


Bild 10: Kombination von photogrammetrischen Messwerten mit CAD-Daten zur Kontrolle der belastungsabhängigen Spaltmaße eines Handschuhfachs

Der zusätzliche Import von CAD-Daten ermöglicht eine exakte Ausrichtung des Messkoordinatensystems an das vorgegebene Bauteilkoordinatensystem, einen Formvergleich sowie präzise Kontrolle eventuell vorgegebener Verformungsgrenzen (siehe Bild 10).

Nutzung logischer Komponenten und Adapter

Bei vielen komplexen Messaufgaben können die benötigten Informationen oft nicht direkt durch die Mitte einer optischen Marke markiert werden.

Daher bietet eine leistungsfähige Auswertesoftware für die Nachverarbeitung z.B. auch die Option, verschiedene Elemente auf Basis der Messpunkte zu konstruieren (Ebenenfit, Zylinderfit, Kugelfit, Linienfit, Konstruktion von Schnittlinien, Schnittpunkten, etc..)

Auch lassen sich logische Komponenten definieren, die aus einer Gruppe von Messpunkten bestehen. Über die relative Lage der Messpunkte in einer Komponente ist diese eindeutig identifizierbar. Zusätzlich können diverse weiterführende geometrische Informationen und Konstruktionsgrößen in eine Komponente integriert werden (eigenes Koordinatensystem, CAD-Daten, STL-Daten, CT-Daten, Bezugspunkte, Bezugsachsen, Ebenen, Zylinder, ...). Komponenten sind daher sehr leistungsfähige Auswertewerkzeuge für automatisierte Berechnungen. So zeigt Bild 11 einen Testaufbau zur inkrementellen Umformung. Hier ist zunächst die Ausrichtung der beiden sich gegenüberstehenden Roboterarme bezüglich des Werkstücks gesucht. Die rechte Seite des Bildes zeigt den Werkzeughalter mit der Werkzeugspitze. Auf der linken Seite sieht man den Gegenhalter. Durch Fit von zylindrischen Elementen in die Messpunkte auf dem Werkzeughalter und Gegenhalter kann hochgenau die Lage ihrer Achsen und der genaue Kontaktpunkt zum späteren Werkstück bestimmt werden, obwohl dieser Punkt selbst nicht mit einer Messmarke versehen werden kann.

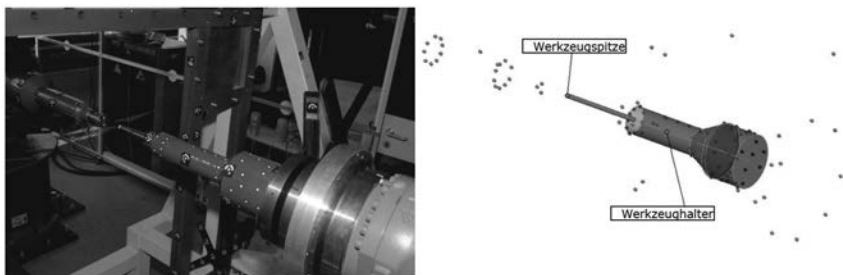


Bild 11: Links: Testaufbau für inkrementelle Blechumformung mit zwei gegenüberstehenden Roboterarmen. Rechts: die logische Komponente des Werkzeughalters (Werkzeugspitze, Messpunkte, Achse und Geometrieelemente)

Im späteren Versuch rotiert der Werkzeughalter um seine Achse während die Werkzeugspitze über das Blech fährt und dieses stufenweise eindrückt. Mit einem Stereosensor (PONTOS bzw. ARAMIS) soll später die Bewegung und Lage des rotierenden Werkzeughalters im Einsatz bestimmt werden. Hierfür werden mit TRITOP alle Messpunkte auf dem Werkzeughalter, seine Achse und der Kontaktpunkt als eine logische Komponente definiert (Bild 11 rechts zeigt die Komponente) und als Datensatz an ARAMIS/PONTOS für die spätere Bewegungsanalyse übergeben.

Für manche Messaufgaben ist auch die Kombination aus flächenhafter optischer und taktiler 3D-Messung eine ideale Antwort. Dafür stehen z.B. diverse Adapter und Taster als fertige und geometrisch bekannte Komponenten zur Verfügung, die auf Basis Ihrer optischen Messpunkte direkt Informationen zu ausgewählten mechanischen Größen übermitteln können (Lage von Löchern, Kanten, Achsen,...).



Bild 12: Einsatzfertige Adapter zur optischen Erfassung mechanischer Größen z.B. Bohrungen, Bolzenachse und Kanten

7. ARGUS: Flächenhafte Verformungsanalyse auf Basis von Punktmarken

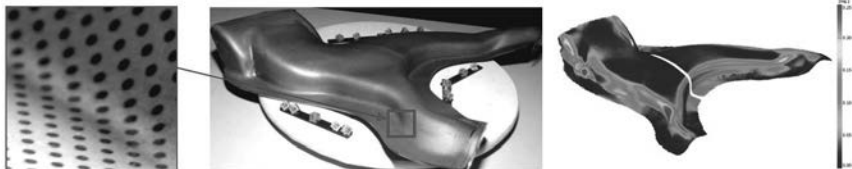


Bild 13: ARGUS: Flächenhafte Koordinaten-, Verschiebungs-, und Dehnungsbestimmung auf der Basis von flächenhaften Punktmarkierungen

Auch das ARGUS System setzt den photogrammetrischen Messansatz ein [7]. Es ermöglicht nicht nur die Erfassung einzelner Punktmarken, sondern vielmehr einer sehr großen Anzahl von flächenhaft verteilten Messpunkten, die im Ausgangszustand rechteckig zueinander angeordnet sind. Es wird bevorzugt in der Blechumformung eingesetzt, wo die Formänderung von Blechbauteilen durch den Tiefziehprozess anhand der Verzerrung von Punktmustern bestimmt werden kann. Hier haben sich die Punktmuster (geätzt oder gelasert) als beson-

ders robust gegenüber den Belastungen der Oberfläche durch den Tiefziehprozess herausgestellt.

Dabei wird nicht nur die geometrische Lage der Messpunkte im Raum, sondern im unverformten und verformten Zustand jeweils die gleiche logische Nachbarschaft und damit eine eindeutige Zuordnung der homologen Punkte hergestellt. Dies ermöglicht neben der Bestimmung der Verschiebung der Messpunkte auch die Bestimmung der Dehnungen in der Oberfläche (den vollständigen Oberflächendehnungstensor) aus der Verzerrung der Nachbarschaft.

Durch intelligente Strategien der Bildaufnahme und Auswertung können auch komplexe Bauteile mit sehr großen Punktmengen komplett erfasst und ausgewertet werden. In Bild 14 wurden z.B. ca. 1.300.000 Messpunkte auf dem Bauteil erfasst.



Bild 14: Flächenhafter Vergleich der Hauptformänderung zwischen Simulationsergebnis (links) und ARGUS Messergebnis (Mitte), rechts ist die Differenz dargestellt.

Werden Simulationsergebnisse in die ARGUS Software importiert, so ist ein direkter Vergleich der gemessenen und der simulierten Dehnungsverteilungen möglich [7,8]

8. Dynamische Bewegungs- und Verformungsanalyse auf Basis von Punkten

Mit einem Stereokamerasystem kann eine dynamische Bewegungsanalyse von Punktmarken erfolgen [5]. Die erreichbare Bildrate und Auflösung variiert je nach eingesetzter Kamera. Heutzutage sind Bildraten bis über 100.000Hz sehr einfach umsetzbar. Das System ARAMIS (oder PONTOS) wird für Messungen mit Punktmarken oft mit einem integrierten Beleuchtungs- bzw. Blitzsystem ausgeliefert (Bild 15), was sehr kurze Belichtungszeiten ermöglicht und besonders einfach in der Handhabung ist.



Bild 15: ARAMIS 3D Kamera mit integrierter Beleuchtung

Ein großer Vorteil der optischen Messsysteme ist die Möglichkeit der Anpassung an unterschiedlichste Messvolumen. Durch eine geeignete Wahl der Kamerabasis, Objektive und Messabstände können auch sehr große Objekte dynamisch erfasst werden (Bild 17).

In Bild 18 ist die schon weiter oben angesprochene dynamische Messung des Werkzeughalters dargestellt. Die Diagramme zeigen den zeitlichen Verlauf der 3D-Koordinate der unsichtbaren Werkzeugspitze.

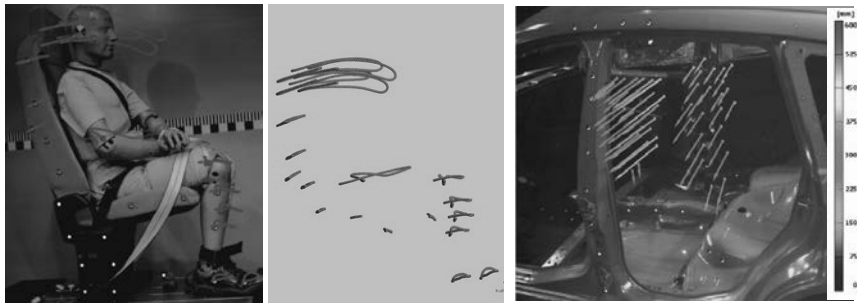


Bild 16: Links/Mitte: 3D Bewegungsanalyse beim Schlittencrash, rechts: Verformung einer B-Säule bei Seitenaufprall

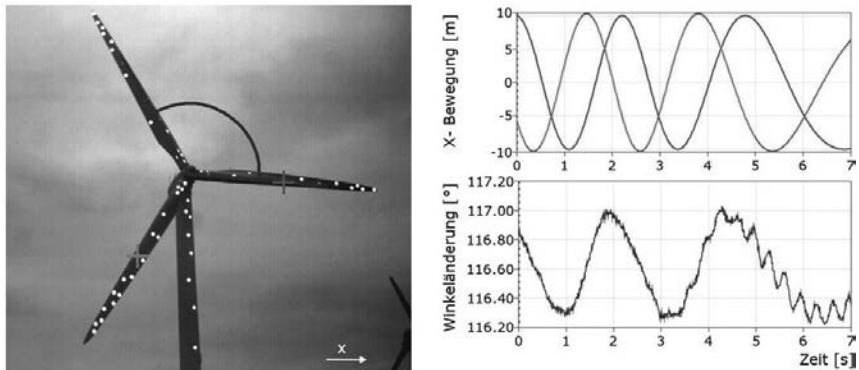


Bild 17: Bewegungsanalyse an einem drehenden Windrad

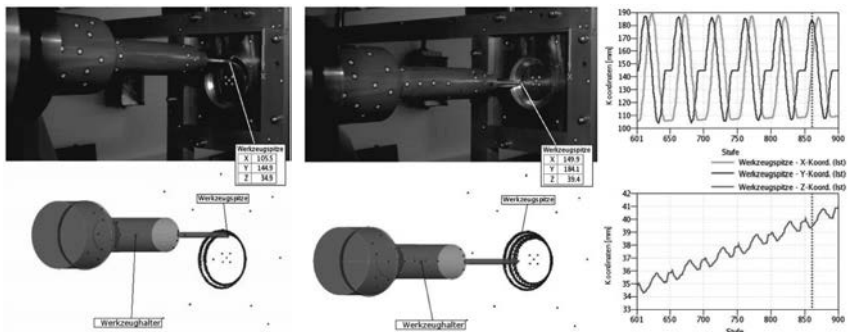


Bild 18: Dynamische Bestimmung von unsichtbarer Werkzeugschulter und Achsenlage des drehenden Werkzeugs bei inkrementeller Umformung mit vordefinierter Komponente

Der Werkzeughalter ist rundherum mit Messpunkten versehen und wurde als bekannte Komponente aus einer vorausgehenden photogrammetrischen Messung mit dem TRITOP System importiert. Somit kann seine Lage trotz der fortlaufenden Rotation um seine Mittelachse und der dadurch ständig verschwindenden und wieder erscheinenden Messpunkte durchgehend für jedes aufgezeichnete Bildpaar ermittelt werden.

9. ARAMIS Digitale Grauwertkorrelation

Wird die oben beschriebene digitale Grauwertkorrelation in Verbindung mit Stereosensoren eingesetzt, so können statische oder dynamische Untersuchungen flächenhafter Bereiche an Proben oder Bauteilen durchgeführt werden. Für jeden aufgezeichneten Lastzustand wird die vollständige 3D-Kontur-, Verschiebungs-, und Dehnungsverteilung von der Proben- oder Bauteiloberfläche (Messfläche) bestimmt (Bild 19).

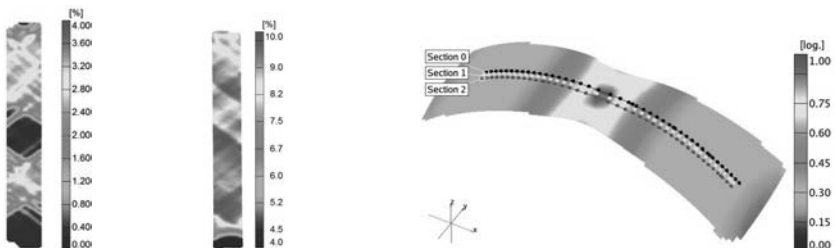


Bild 19: ARAMIS bei verschiedenen Materialversuchen: Links: Zugversuch mit Lüdersbändern bei Stahlblech mit ausgeprägter Streckgrenze, Mitte: Fließfronten an einer

Messzugprobe, Rechts: Dehnungsverteilung beim Nakajima-Versuch unmittelbar vor dem Probenbruch



Bild 20: ARAMIS 3D Stereosensoren auf verschiedenen Blechprüfmaschinen zur Bestimmung von Grenzformänderungskurven oder biaxialen Fließkurven im Bulgetest

Mit ARAMIS erzeugte Materialkennwerte werden typischerweise als Eingabeparameter für numerische Simulationen eingesetzt, wie z.B. E-Modul, R- und N-Wert aus Zugversuchen, Grenzformänderungskurven (FLC) aus Nakajima-Versuchen [10] nach ISO 12004 oder auch die biaxialen Fließkurven aus dem Bulgeversuch nach ISO 16808 [11]. Hierfür kann der Sensor bei Bedarf sehr einfach in bestehende Prüfaufbauten integriert werden (Bild 20).

Die optische 3D Messtechnik wird zusätzlich für die Weiterentwicklung von Materialmodellen eingesetzt, wenn keine oder nicht ausreichend genaue Standardmaterialkennwerte zur Verfügung stehen. Ein Beispiel hierfür ist die Vorhersage des Versagens- und Bruchverhaltens von Blechwerkstoffen bei der Umformung und für Crashanwendungen. In diesem Bereich werden heute verschiedene Testverfahren eingesetzt und weiterentwickelt, um das Versagensverhalten in Abhängigkeit von den Belastungszuständen zu bestimmen.

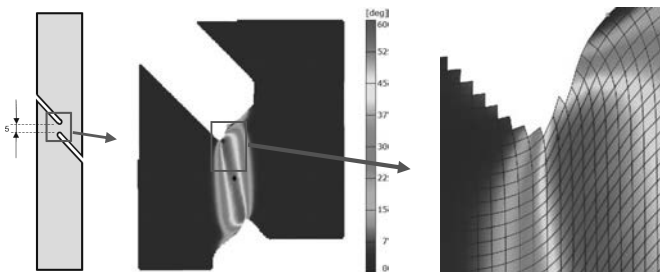


Bild 21: Scherwinkel bei einem ASTM Schertest, Messflächengröße ca. 12,5x10mm, Messpunktabstand im Anfangszustand 0,075mm

Insbesondere bei Scherversuchen findet das Versagen in sehr kleinen Bereichen mit hohen lokalen Verformungsgradienten statt. Daher ist es ein großer Vorteil der optischen Mess-

technik, dass durch die Verkleinerung der Messflächengröße das Materialverhalten mit sehr hoher Ortsauflösung charakterisiert werden kann [12]. Bild 21 zeigt einen Ausschnitt einer Scherprobe, bei der für eine geeignete Abbildung des lokalen Probenverhaltens in einer Messfeldgröße von nur 12,5x10 mm ein Messpunktabstand von 0,075mm genutzt wurde.

Darüber hinaus dient das ARAMIS Messsystem (wie auch schon das ARGUS System) auch als Werkzeug für die Verifikation von numerischen Simulationen. Dies kann per manuellem Vergleich z.B. in der Form von Diagrammen mit Punkt- und Schnittdaten, farbigen Bildinformationen oder auch per automatischem vollflächigem Vergleich direkt in der ARAMIS Software durchgeführt werden. Bild 22 zeigt am Beispiel eines CFK-Rotorblattes den vollflächigen Vergleich zwischen den Ergebnissen einer ARAMIS 3D-Messung und der numerischen Simulation im Fall eines Biegetests an der Rotorwurzel.

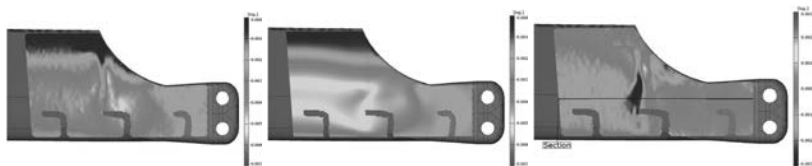


Bild 22: Vergleich von ARAMIS Messdaten und Ergebnissen aus numerischer Simulation

Links: ARAMIS Messergebnis; Mitte: Simulationsdaten auf die Messdaten gemappt;

Rechts: Differenz dargestellt (Farbquelle: waagerechte Dehnung im Bild)

Im Falle von sehr komplexen Fragestellungen bietet ARAMIS darüber hinaus die Möglichkeit mehrere 3D-Sensoren zu kombinieren und ihre Ergebnisse zusammenzuführen. Damit können z.B. Bauteile von allen Seiten aus simultan erfasst und ausgewertet werden. Bild 23 zeigt den schematischen Aufbau von mehreren ARAMIS Sensoren, die ein ehemals rotations-symmetrisches Bauteil unter Torsions- und Zuglast von allen Seiten gleichzeitig erfassen und die dazugehörigen vollflächigen Messergebnisse unmittelbar vor dem Versagen der Probe.

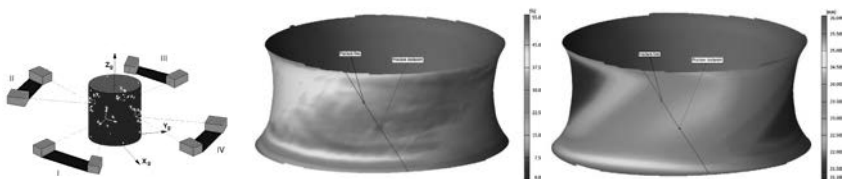


Bild 23: Links: Schematischer ARAMIS-Multisensor-Aufbau für 360° Umfangserfassung, Mitte: Hauptformänderung; Rechts: radiale Verschiebung unmittelbar vor Bruch.

10. Zusammenfassung

In diesem Artikel wurden ein paar technische Grundlagen für die optische Bewegungs- und Verformungsanalyse auf Basis applizierter Muster und Marken vorgestellt und verschiedene Anwendungsmöglichkeiten dieser Messtechniken aufgezeigt.

Durch die große Flexibilität hinsichtlich der Muster, ihrer Aufbringung, der realisierbaren Messflächen und der Kombinationsmöglichkeit mehrerer Messansichten auch für komplexe geometrische Aufgaben, sind diese Messverfahren entsprechend vielseitig einsetzbar. Die vielfältigen fortschrittlichen Auswertoptionen und Kombinationsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Messansätzen bzw. Systemen machen aus diesen Messtechniken heute entsprechend universelle und leistungsfähige Messwerkzeuge. Daher finden sie insbesondere in der Material- und Bauteilprüfung vielfältig Anwendung.

Literatur

- [1] Thomas Luhmann: Nahbereichsphotogrammetrie ISBN 987-3-97907-479-2 Wichmann-Verlag 2010
- [2] Winter, Detlef: Optische Verschiebungsmessung nach dem Objektrasterprinzip mit Hilfe eines flächenorientierten Ansatzes, Disstertation TU-Braunschweig, 1993
- [3] Thesing, J. / Behring, D. / Haig, J. / VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik / Verein Deutscher Ingenieure in VDI BERICHTE; 1996 2007.; 231-242; Optische Messung technischer Oberflächen in der Praxis; VDI Verlag, Düsseldorf; 2007
- [4] Winter, D., Bergmann, D., Galanulis, K., Thesing, J. Qualitätssicherung und Digitalisierung mit Photogrammetrie und Streifenprojektion, Optische Formerfassung, Berichtsband 70, 45-53. VDI/DVE - GMA und Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Stuttgart, 1999.
- [5] Erne, O.; Friebe, H.; Galanulis, K.: Ist konventionelle Weg- und Beschleunigungssensorik ersetzbar? Lösungsansätze mit Hilfe von optischer 3DMesstechnik (GOM) herausgegeben in: "Fahrzeugversuch Methoden und Verfahren", Expert Verlag, ISBN-13: 978-3-8169-2579-8 Dipl.-Ing. (FH) Peter Ullrich (Hrsg.) und 29 Co-Autoren, March 2006, P66-73
- [6] Behring, D., Thesing, J., Becker, H., Zobel, R.: Optical measuring techniques for the determination and visualization of 3D displacements in crash investigations. SAE, 2001
- [7] Schneider, M., Friebe, H., Galanulis, K.: Validation and optimization of numerical simulations by optical measurements of tools and parts. In: Proceedings of IDDRG 2008, 16th – 18th June 2008, Olofström, Sweden, pp 373-384, ISBN 978-91-633-2948-7.
- [8] Friebe, H., Klein M., Galanulis, K Numerical comparison and verification of FEA in sheet metal forming by optical measurements of large and complex parts. In.: Proceedings of IDDRG 2010, Graz, Austria, pp. 935-944, ISBN 978-3-85125-108-1.
- [10] Hotz, W., Merklein, M., Kuppert, A., Friebe H., Möller, T., Klein, M: Time dependent FLC determination – Comparison of different algorithms to detect the onset of unstable necking before fracture, In: Proceedings of IDDRG 2012, Mumbai, India, pp. 258 – 264.
- [11] Keller, S., Hotz, W., Friebe, H.: Yield curve determination using the bulge test combined with optical measurement. In: Proceedings of IDDRG 2009, 1th – 3rd June 2009, Golden, CO, USA, pp 319-330, ISBN 978-0-615-29641-8
- [12] Friebe, H.; Klein, M.; Grube, A. Optical 3D Metrology in Sheet Metal Development an Production. In Tagungsband: New Developments in Sheet Metal Forming 2016, Prof. Mathias Liewald, Fellbach 10-11.05.2016, Inventum GmbH ISBN 987-3-88355-411-2

Optische Messtechniken in der Werkstoff- und Bauteilprüfung

Eine Einführung

Optical Measurement Techniques for Material and Component Testing

An Introduction

Prof. Dr.-Ing. **Andreas Ettemeyer**,
NTB Interstaatliche Hochschule für Technik, Buchs, Schweiz

Kurzfassung

Optische Messverfahren sind häufig das Mittel der Wahl für die Werkstoff- und Bauteilprüfung, da sie sich durch berührungslose und damit rückwirkungsfreie Messung, hohe Messgeschwindigkeit und – besonders vorteilhaft – ganzflächige Messung auszeichnen. Die Messung technischer Bauteile ist für optische Verfahren allerdings eine besondere Herausforderung. Die Oberflächeneigenschaften können sehr unterschiedlich sein und für verschiedene optische Messverfahren gerade besonders günstig oder hindernd wirken. Insbesondere in der Werkstoff- und Bauteilprüfung ist eine Vorbehandlung der Oberflächen in der Regel nicht möglich. Daher muss für die jeweilige Aufgabenstellung das adäquate Messverfahren eingesetzt werden.

In dieser Präsentation werden verschiedene optische Messverfahren für die Bauteilprüfung erläutert und ihre Einsatzbereiche dargestellt. Insbesondere wird auch auf die physikalischen Grenzen und Randbedingungen hingewiesen. Der Beitrag geht auf den Unterschied zwischen dimensioneller Messung und Bauteilprüfung ein, beleuchtet musterbasierte Messverfahren und stellt eine Übersicht über interferometrische Messverfahren vor.

Abstract (optional)

Optical measuring techniques often show significant advantages in material and component testing. Noncontact measurement without influence onto inspected object, high measuring speed and – in many cases essential – full field measurement are some key features. On the other hand, optical inspection may be quite challenging on technical surfaces. Surface properties of the measured component has significant influence on the measurement result. In material and component inspection typically a surface treatment is not allowed. Consequently, for each task the appropriate optical measuring technique has to be selected.

In this presentation, different optical inspection techniques for component testing will be presented. Especially, the physical limitations and conditions will be explained. The difference between dimensional measurement and component testing will be covered, pattern based techniques will be explained and an overview of interferometric measurement techniques will be presented.

Detektion von verborgenen Schäden an Kunstwerken mit Hilfe von Shearographie

Dipl.-Phys. **Dominic Buchta**, Prof. Dr. **Wolfgang Osten**,
Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart;
Prof. Dr. **Christoph Krekel**,
Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart

Kurzfassung

Für die Untersuchung von Beschädigungen an Kunstwerken spielen insbesondere solche eine große Rolle, die nicht mit bloßem Auge bzw. vergrößernden Optiken zu erkennen sind. Die Shearographie bietet die Möglichkeit auch Imperfektionen unterhalb der Oberfläche zu detektieren. Um allerdings eine ausreichende Sensitivität zu gewährleisten muss die Art der Belastung an das Messobjekt angepasst werden. Hier werden unterschiedliche Methoden zur Belastung anhand typischer Defekte verglichen. Die Methoden werden neben ihrer Detektionswahrscheinlichkeit auch hinsichtlich ihrer Gefährdung für Kunstwerke analysiert.

1. Einleitung

Um immer mehr Menschen den Zugang zu Kunstwerken zu ermöglichen hat sich die Zahl der Ausstellungen in den letzten Jahren deutlich erhöht [1]. Die damit einhergehenden Transporte führen allerdings nicht selten zu ungewünschten Veränderungen der Werke. Schon kleine Schwankungen in Temperatur oder Luftfeuchtigkeit können irreversible Beschädigungen hervorrufen [2]. Nicht immer sind diese mit bloßem Auge zu erkennen und somit für den Restaurator nur schwer zu bestimmen bzw. zu reparieren. Typische Beschädigungen wie das ablösen tiefer Malschichten müssen deshalb mit speziellen Messmethoden detektiert werden. Um dem Restaurator von Nutzen zu sein muss die Messmethode sowohl stabil als auch sensitiv gegenüber unterschiedlichen Schadensklassen sein und darüber hinaus die Möglichkeit bieten große Flächen in kurzer Zeit zu vermessen. Eine Technik die alle diese Anforderungen erfüllt ist die Shearographie. Sie bietet die Möglichkeit durch Messung von kleinsten Oberflächenveränderungen während einer Belastung des Objekts Rückschlüsse auf tiefer liegende Defekte zu ziehen. Durch das Prinzip der Selbstreferenzierung und des

einfachen Messaufbaus kann die Shearographie auch in nicht stabilen Umgebungen wie Museen und Ausstellungssälen zum Einsatz kommen. Während die Shearographie in der Automobil- oder Flugzeugindustrie längst eingesetzt [3-4] wird, bleibt die Verwendung für Kunstwerke bisher auf das Labor beschränkt [5-6]. Ein bei der Shearographie entscheidende Parameter für die Sensitivität des Messsystems stellt die ausgewählte Belastung dar [4]. Aufgrund des einfachen Aufbaus und der guten Ergebnisse wird zumeist eine thermische Belastung eingesetzt [7]. Für Kunstwerke spielt allerdings nicht nur die Detektionseffizienz eine Rolle sondern auch die Beschädigung durch die eingebrachte Belastung. Im Folgenden werden unterschiedliche Belastungsarten untersucht und im Hinblick auf Sensitivität und Folgeschäden bewertet. Da die notwendige Belastung nicht nur vom Objekt sondern auch von der Art des Schadens abhängt, werden hier Probekörper mit den typischsten Beschädigungen analysiert.

2. Prinzip der Shearographie

Ein typischer Aufbau wie er bei der Shearografie genutzt wird, besteht aus einem aufgeweiteten Laser, einer Einheit zur Belastung des Objekts sowie einem Michelson-Interferometer mit Kamera. Wenn der aufgeweitete Laserstrahl auf ein Objekt mit rauer Oberfläche trifft, entstehen Speckle [8], deren Muster abhängig von der Oberfläche ist.

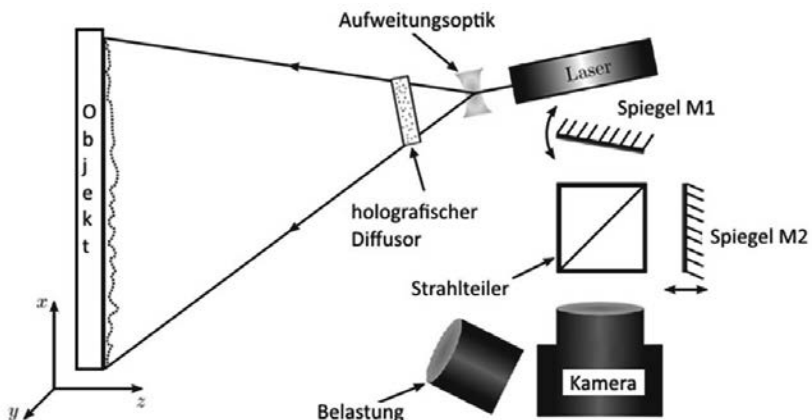


Bild 1: Typischer Shearografie Aufbau

Durch einen gekippten Spiegel wird das speckle-Muster mit einer leicht verschobenen Version von sich selbst überlagert. Geht man von einer Verschiebung in x-Richtung mit dem Betrag Δx aus, überlagern zwei Punkte $P_1(x,y)$ und $P_2(x+\Delta x,y)$ auf der Kamera. Durch die entstehende Interferenz ergibt sich folgende Intensitätsverteilung:

$$I = 2I_0(1 + \gamma \cos(\varphi)) \quad (1)$$

Wobei I_0 die Hintergrundhelligkeit, γ der Kontrast und φ die Phasendifferenz der beiden Punkte P_1 und P_2 ist. Durch Belastung wird nun eine leichte Verformung der Oberfläche erreicht, die besonders an Stellen mit tiefer liegenden Defekten auftritt. Diese Verformung sorgt nun für eine Änderung der Phasendifferenz φ [9]. Ändert sich die Phasendifferenz um $\Delta\varphi$ ergibt sich somit eine neue Intensität I' auf der Kamera:

$$I' = 2I_0(1 + \gamma \cos(\varphi + \Delta\varphi)) \quad (2)$$

Die zusätzliche Phasendifferenz $\Delta\varphi$ ist direkt mit dem Differenzenquotienten entlang des Sensitivitätsvektors verbunden, enthält also die Information über die Oberflächenveränderung. Um φ bzw. $\varphi+\Delta\varphi$ zu bestimmen wird in den meisten Fällen die Phasenschiebetechnik eingesetzt [10]. Hierbei wird einer der beiden Spiegel bewegt und mit Hilfe der dabei aufgezeichneten Interferogramme die Phase zurück gerechnet. Nachdem sowohl φ als auch $\varphi+\Delta\varphi$ bestimmt worden sind wird durch eine Subtraktion beider Phasen schließlich $\Delta\varphi$ gewonnen. Durch Annahme einer infinitesimal kleinen Verschiebung Δx und einer geeignet gewählte Beleuchtung ist es möglich einen direkten Zusammenhang zwischen der Ableitung

der Verformung $\frac{\delta w}{\delta x}$, die senkrecht zur Oberfläche entsteht, und der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ herzustellen:

$$\Delta\varphi(x,y) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\delta w}{\delta x} \Delta x \quad (3)$$

wobei λ die Wellenlänge und Δx der Verschiebebetrag in x Richtung ist.

2. Aufbau und Probekörper

Der Aufbau orientiert sich im Wesentlichen an Abbildung 1. Zur Aufweitung wird neben einer Linse ein holografischer Diffuser eingesetzt, der eine gleichmäßige Ausleuchtung des Objekts gewährleistet. Als Lichtquelle kommt ein frequenzverdoppelter Nd-YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 532nm sowie einer Leistung von 400mW zum Einsatz. Um das Phasenschieben zu ermöglichen wird Spiegel M2 auf einer Piezoverschiebeeinheit montiert und über den Computer angesteuert. Als Kamera kommt eine PCO 1200s CMOS mit 1280x1024 Pixel zum Einsatz. Um das Objekt später zu belasten werden sowohl eine Infrarotlampe als auch eine Kammer verwendet, die vorne verglast ist. Mit Hilfe einer Pumpe (Vaccubrand 510NT) kann der Druck in Kammer dann verändert werden.

Für die folgenden Untersuchungen wurde die Belastung während einer Minute variiert und während dieser Zeit mehrere Shearogramme aufgenommen. Dies ist wichtig um den optimalen Betrag der Belastung zu ermitteln. Bei zu geringer Belastung verformt sich die Oberfläche nicht stark genug, wohingegen bei zu großer Belastung eine Dekorellation der speckle eintritt, die eine Auswertung verhindert.

Als Messobjekte kommen vier unterschiedliche Probekörper zum Einsatz, die an der Akademie der bildenden Künste entstanden sind [11]. Die Probekörper sind in Abbildung 2 gezeigt. Bei der Herstellung der Probekörper auf Holz (1-3) wurde jeweils ein Kreidegrund aufgetragen der geeignet manipuliert wurde und später eine Deckschicht überlagert. Der erste Probekörper repräsentiert dabei unterschiedlich große Ablösungen von tiefen Malschichten. Probekörper 2 repräsentiert längliche Ablösungen von Malschichten sowie eine Überlagerung von abgelösten Malschichten und sichtbaren Rissen (gestrichelte Kreise). Beim dritten Probekörper wurde in das Holz gebohrt, was einem Befall von Holzwürmern entspricht. Der vierte Probekörper stellt letztlich ein Leinwandobjekt mit Rissen sowohl an wie auch unter der Oberfläche dar.

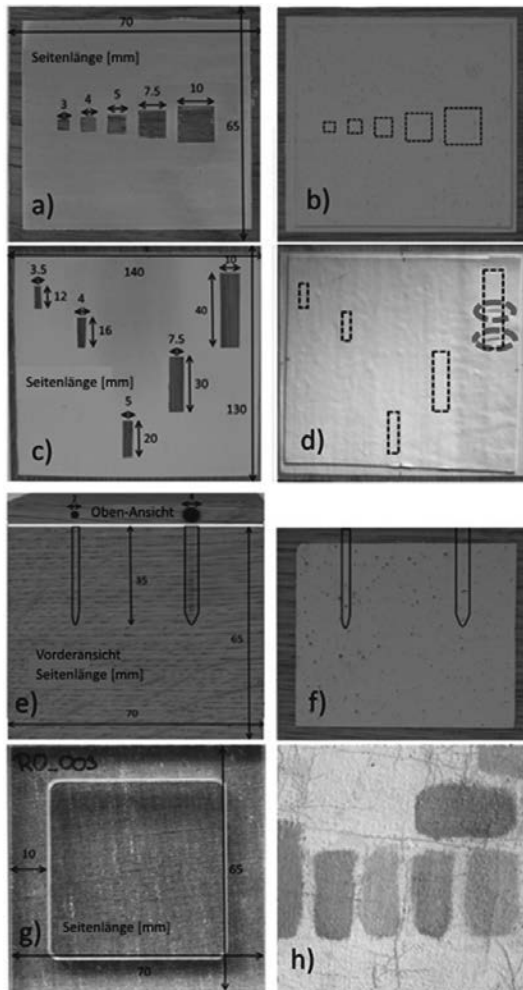


Bild 2: Untersuchte Probekörper

3. Experimentelle Ergebnisse

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse für den ersten Probekörper bei unterschiedlicher Belastung gezeigt.

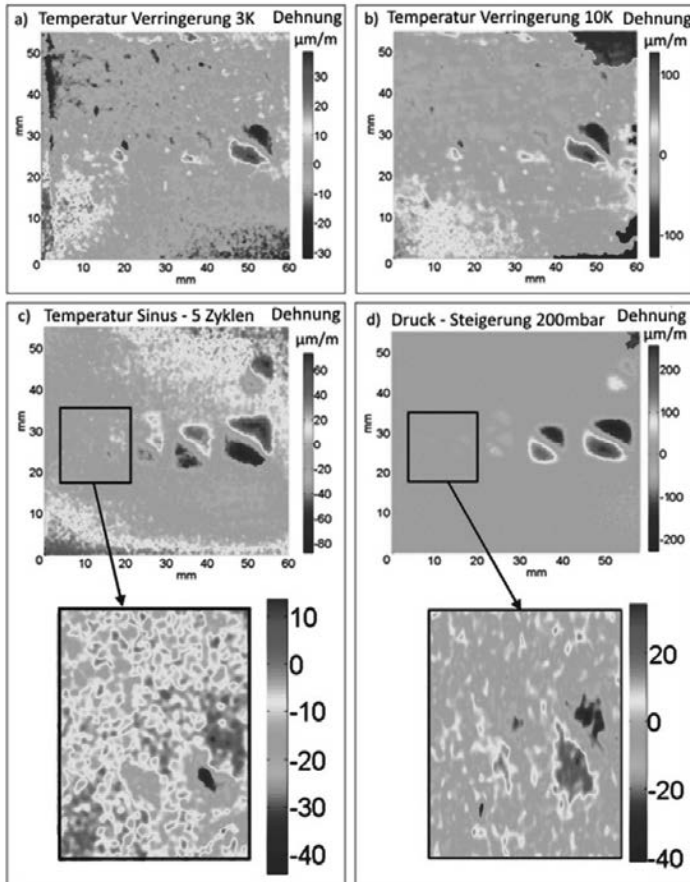


Bild 3: Shearogramme von Probekörper 1 mit unterschiedlichen Belastungsarten

Für eine Belastung mit einer Infrarotlampe (Abb. 3 a) ist deutlich ein Signal im Bereich des größten Schadens erkennbar. Allerdings gehen kleinere Schäden im Rauschen unter. Erhöht man die Temperatur weiter (Abb 3 b) so ändert sich offenbar nichts an der Defektsensitivität

allerdings erhöht sich die Dehnung sowohl im Bereich des Schadens als auch außerhalb. Nimmt man die Dehnung außerhalb eines Defektes als Maß für die Gefahr ein Kunstwerk durch die Belastung zusätzlich zu schädigen, kann gesagt werden, dass eine große Temperaturerhöhung mehr Nachteile als Vorteile bringt. Eine weitere Möglichkeit der Anregung besteht in einer sinusförmigen Modulierung der Infrarotlampe. Der Vorteil dieser Technik besteht in einer „einstellbaren“ Eindringtiefe der thermischen Welle [12]. Mit einer Frequenz von 100mHz ergibt sich ein deutlich erhöhte Defekterkennung (Abb 3c). Da sich die Gesamterwärmung des Probekörpers allerdings nicht ändert bleibt die hohe Dehnung in Randbereich bestehen und die Gefährdung des Objektes hoch. Geht man von der Änderung der Temperatur allerdings über in eine Änderung der Druckverhältnisse ändert sich das Ergebnis drastisch (Abb 3d). Eine vergleichsweise kleine Änderung des Drucks um 200mbar sorgt dafür, dass selbst die kleinsten Schäden noch detektiert werden können und zusätzlich die Dehnung im intakten Bereich des Objektes nur sehr klein ist. Für Malschichtablösungen stellt die Methode der Druckänderung also eine sehr gute Methode zur Detektion dar. Die Frage die sich nun stellt ist, ob auch Schäden detektiert werden können, die einen Luftaustausch mit der Umgebung ermöglichen, da davon ausgegangen werden muss, dass

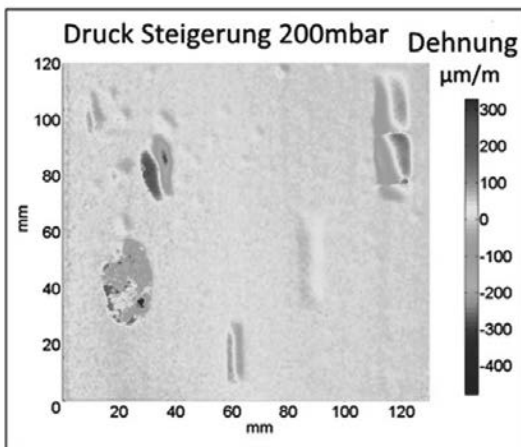


Bild 4: Shearogramm von Probekörper 2 bei Druckbelastung von 200mbar

ein solcher Druckausgleich eine Detektion verhindert. Hierfür wurde Probekörper zwei getestet, der zwei deutlich sichtbare Risse im Bereich des größten Schadens aufweist.

Wie in Abb. 4, die das Shearogramm bei einer Druckbelastung von 200mbar zeigt, zu sehen ist, wird der größte Schaden immer noch detektiert. Es ist jedoch auffällig dass sich positive und negative Dehnung bei diesem Defekt gerade umgekehrt verhalten, als bei allen anderen. Dies bedeutet dass sich Schäden ohne Risse nach oben wölben wohingegen Schäden mit Rissen sich nach innen wölben. Messungen über einen längeren Zeitraum zeigten, dass der Effekt des Druckausgleichs dafür sorgt dass sich der Bereich nahe den Rissen aufwölbt, was automatisch eine nach innen gerichtete Wölbung des restlichen Bereichs einhergeht. Es können somit sowohl die Risse als auch die Ablösung der Malschicht detektiert werden. Wenn ein Druckausgleich allerdings schneller ermöglicht wird, wie im Fall von Probekörper 3, dessen Bohrlöcher praktisch permanenten Luftstrom erlaubt, funktioniert eine Anregung mit Druck nicht mehr.

Nachdem mit den Holzprobekörpern eine Gattung untersucht wurde die wenig Ganz-Körper-Verformung zeigt, soll im Folgenden das Leinwandbild (Probekörper 4) näher betrachtet

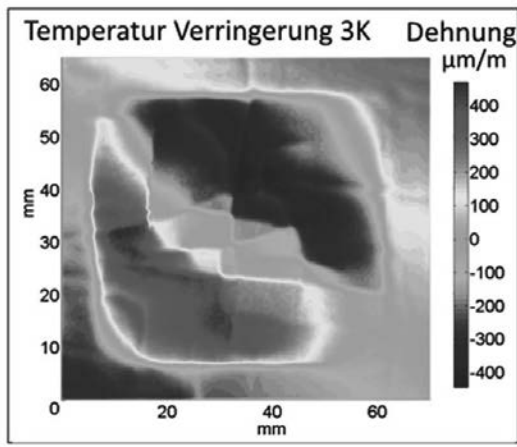


Bild 5: Shearogramm von Probekörper 4 bei Temperaturänderung von 3K

werden. Hierbei kann eine hohe Belastung nicht nur zu Beschädigungen des Kunstwerks führen sondern eine Verformung der gesamten Leinwand kann eine Detektion von Schäden erschweren oder sogar verhindern. Durch eine Anregung mit Temperatur entsteht schon bei

einer Erhöhung um 3k eine deutlich sichtbare Ganzkörperverformung, was in Abb. 5 gezeigt ist.

Vergleicht man die entstanden Dehnungen mit denen der Holzprobekörper fällt sofort auf das sie ca. einen Faktor 10 höher sind. Es lässt sich also sagen dass eine Temperaturerhöhung nicht geeignet scheint um Kunstwerke auf Leinwand zu untersuchen. Wendet man allerdings erneut die Anregung mit Druck an ergibt sich ein deutlicher Unterschied. In Abb. 6 ist das Shearogramm unter Druckanregung zu sehen.

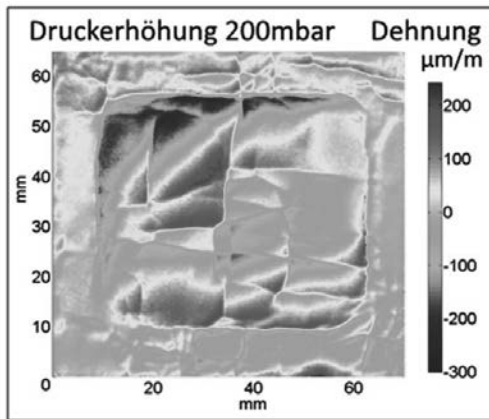
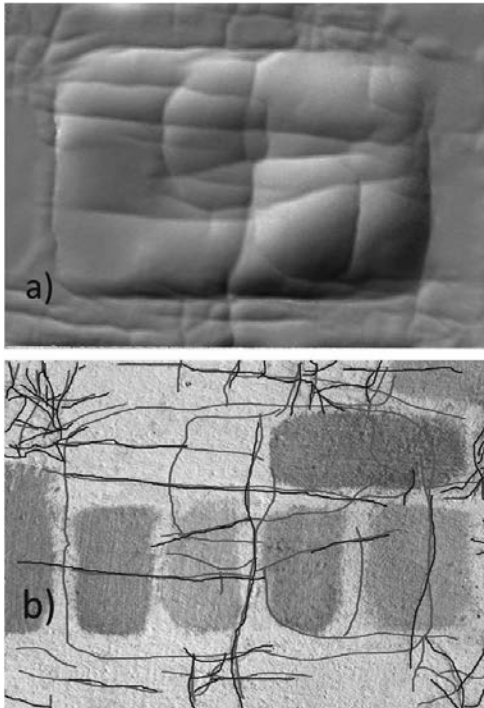


Bild 6: Shearogramm von Probekörper 4 bei Druckänderung von 200mbar

Es ist auffällig, dass die Dehnung sich immer noch auf einem hohen Niveau befindet, allerdings deutlich lokalisierter in der Nähe der Risse. Auf den ersten Blick lassen sich also auch Risse auf Leinwandgemälden zuverlässig erkennen. Um dies zu überprüfen wurde das Graustufenbild des Shearogramms (Irregularitäten sind dort leichter zu erkennen) verglichen



mit einem hochauflösenden Foto des Probekörpers. Hierbei wurden alle sichtbaren Risse schwarz markiert wohingegen und die Irregularitäten im Shearogramm rot. Der Vergleich in Abb. 7 zeigt das praktisch alle sichtbaren Risse von der Shearographie erkannt wurden und zusätzlich noch weitere, wahrscheinlich unterhalb der Oberfläche laufende, Risse detektiert werden konnten. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Shearographie mit einer Druckanregung dazu geeignet ist sowohl Gemälde auf Holz als auch Leinwandgemälde zu vermessen. Das System besitzt eine hohe Sensitivität für die Messung typischer Schäden wie Malschichtablösungen oder Rissen. Wird allerdings ein schneller Druckausgleich ermöglicht können keine Beschädigungen mehr festgestellt werden. Allerdings bedeutet ein Druckausgleich eine große Öffnung nach außen, die meist ohnehin sichtbar ist.

Bild 7: a) Shearogramm von Probekörper 4 unter Druckerregung (Graustufenbild) b) Vergleich Shearogramm mit sichtbaren Rissen

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Untersuchungen im Rahmen des Projektes: „Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte: Untersuchungen zu Detektion und Unterscheidung transport- und alterungsbedingter Schäden an Kunstwerken

[1] ThamerH (2012) Das zweite Museumszeitalter: Zur Geschichte der Museen seit den 1970er Jahren. Museen Zwischen Qualität Relevanz: Denkschrift zur Lage Museen 30:33–42

[2] Mecklenburg, M. [Art in transit: studies in the transport of paintings], National Gallery of Art, Washington D.C. (1990)

[3] Hung Y (1996) Shearography for non-destructive evaluation of composite structures. Opt Lasers Eng 24:161–182

[4] Kalms M, Osten W (2003) Mobile Shearography system for the inspection of aircraft and automotive components. Opt Eng 42(5): 1188–1196

[5] Groves R, Osten W, Doulgeridis M et al (2007) Shearography as part of a multifunctional sensor for the detection of signature features in movable cultural heritage. Proc SPIE 6618:661810–661811

[6] Groves R, Praderutti B, Kouloumpi E, Osten W, Notni G (2009) Structural diagnostics of artwork using shearography and terahertz imaging. NDT & E Int 42:543–549

[7] Tornari V, Bonarou A, Castellini P et al (2001) Laser based systems for the structural diagnostic of artwork an application to XVIIcentury Byzantine icons. Proc SPIE 4402:172–183

- [8] Rigden J, Gordon E (1962) The granularity of scattered optical maser light. Proc IRE 50:2367–2368
- [9] Goodman J (1975) Laser speckle and related phenomena, J.C. Danty, 9–75, Springer Verlag, New York
- [10] Creath K (1985) Phase-shifting speckle interferometry. Appl Opt 24(18):3053–3058
- [11] Heinemann C, Hein N, Krekel C, Morawitz M, Pedrini G, Osten W (2014) Digitale Shearografie zur Zustandanalyse von Gemälden. Z Kunsttechnologie Konservierung 28(1):51–64
- [12] Carslaw HS, Jaeger JC (1959) Conduction of heat in solid. Oxford University Press, London

Analyse von Eigenspannungen in beschichteten Oberflächen durch Laser-Ablation und digitale Holographie

Residual stress analysis of ceramic coating by laser ablation and digital holography

Dr. **G. Pedrini**, Prof. Dr. **W. Osten**, Institut für Technische Optik (ITO), Universität Stuttgart;

V. Martínez-García, Dr. **M. Wenzelburger**, Dr. **A. Killinger**,

Prof. Dr. **R. Gadow**, Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB), Universität Stuttgart;

P. Weidmann, Prof. Dr. **S. Schmauder**, Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF), Universität Stuttgart

Kurzfassung

Es wird eine Methode zur Eigenspannungsermittlung in beschichteten Oberflächen beschrieben. Dazu werden orts aufgelöste Verfahren zur Freisetzung von Eigenspannungen mittels Laserbelastungen eingesetzt. Es werden dadurch Oberflächenverformungen erzielt und mittels optischer Verfahren gemessen, aus denen die in der Schicht vorliegenden Eigenspannungen numerisch bestimmt werden.

Abstract

A method for residual stress analysis of ceramic coatings by applying a laser for quasi non-destructive material removal and measuring the 3D displacement around the machined area by means of high-resolution digital holography is described. The residual stresses are retrieved by numerical calculations using the finite element method (FEM) from the measured 3D displacements, the profile of the machined hole and the material parameters of the coating and substrate.

1. Einleitung

Beschichtungen werden oft verwendet, um funktionale (etwa Korrosions- oder Verschleißschutz, Sensorik) oder dekorative Eigenschaften einer Objektoberfläche zu gewährleisten. Schichten besitzen aber häufig herstellungsbedingte Eigenspannungen, die unerwünschte Effekte erzeugen (z. B. Schichtabplatzung, Rissbildung).

Zur Bestimmung von Eigenspannungen in Schichten und Schichtverbundwerkstoffen ist eine Vielzahl von Techniken bekannt. Mehrere Methoden, wie z. B. der Einsatz von Beta-Strahlern oder die Röntgenfluoreszenz-Technik, sind jedoch reine Labormessverfahren, die für den industriellen Einsatz nur bedingt geeignet sind. Mit der Röntgen- und Neutronen-Diffraktometrie können Eigenspannungen mit sehr hoher räumlicher Auflösung bestimmt werden [1], [2], [3]. Diese Untersuchungen sind jedoch sehr zeitaufwendig und daher nicht für Messungen während eines Schichtentstehungsprozesses geeignet. Techniken, wie z.B. Wirbelstrommessverfahren, Barkhausen-Rauschen oder induktive Messverfahren können nur für Messungen auf leitenden bzw. magnetisierbaren Proben eingesetzt werden [4].

Vergleichsweise kostengünstig können hingegen Bohrloch- oder Ringkernverfahren eingesetzt werden. Das Bohrlochverfahren ist eine „minimal-destruktive“ Methode, die in der Praxis oft verwendet wird und den Stand der Technik in der praktischen Anwendung darstellt [5], [6], [7]. Durch die Bohrung eines Loches werden Eigenspannungen freigesetzt, also relaxiert. Dabei ergibt sich eine Verformung der Oberfläche. Die Messung der Oberflächenverformungen erlaubt in Kombination mit geeigneten Kalibrierfunktionen (welche für Schichtverbunde simuliert werden müssen) die quantitative Bestimmung der Eigenspannungen. Durch inkrementelles Bohren in kleinen Schritten können so Eigenspannungstiefenprofile ermittelt werden. Anhand von Simulationen wurde gezeigt, dass das Bohrlochverfahren für die Bestimmung von Eigenspannungen in Beschichtungen mit Hilfe von fallsensitiven Kalibrierungen angewendet werden kann [8], [9]. Die Bohrlochmethode in Kombination mit DMS hat den praktischen Nachteil der Notwendigkeit, DMS direkt auf das Testobjekt aufzubringen; zudem ist die Beschränkung auf eine Messung von 2D-Deformationen als weiterer Nachteil zu werten. Weil hierbei der Messabstand von der Bohrung stets vergleichsweise groß ist, bestehen zudem Einschränkungen sowohl hinsichtlich der örtlichen Auflösung als auch hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit bei kleinen Proben bzw. gering ausgedehnten planaren Oberflächen und einer Messung von nur schwer zugänglichen Bereichen. Weiterhin sind diese Messungen sehr fehleranfällig gegenüber Asymmetrien der Bohrung bzw. der Positionierung der DMS-Messgitterrosette.

Optische Techniken erlauben eine hochaufgelöste, flächenhafte Erfassung von Oberflächenverformungen und wurden daher in Kombination mit dem Bohrlochverfahren für die Bestimmung von Eigenspannungen eingesetzt. Ein weiterer Vorteil der optischen Messung ist die Erfassung der tatsächlichen Bohrlochgeometrie, die bei der Simulation von Kalibrierfunktionen im Einzelfall berücksichtigt werden können, um die Genauigkeit zu erhöhen.

In [10] und [11] wurde ein kompaktes Speckle-Interferometrie (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)-System für die Bestimmung von nicht-homogenen Eigenspannungen beschrieben. Um das System kompakt zu bauen, wurde ein computergeneriertes Hologramm (CGH) zur Strahlmodulation eingesetzt. Für die Messung der Oberflächenverformungen können ebenfalls Korrelations-Verfahren verwendet werden [12], [13].

Bisherige Arbeiten zur Eigenspannungskontrolle während thermischer Spritzprozesse konzentrieren sich hauptsächlich auf die Messung der resultierenden Eigenspannungen, z.B. auf den zeit- und schichtdickenabhängigen Verlauf der Eigenspannungen im Prozess unter Verwendung geometrisch vereinfachter Referenzproben [14].

Hier wird eine Methode für die Ermittlung von Eigenspannungen in beschichteten (realen, also spritzrauh) Oberflächen mittels einer Kombination von kontaktlosen optischen Messverfahren und kontinuumsmechanischen Berechnungen beschreiben. Die Ermittlung von Eigenspannungen in verschiedenen Tiefen erfolgt durch inkrementelle Laserablation, so dass stufenweise Löcher entstehen, die das vorhandene mechanische Gleichgewicht stören und Verformungen produzieren, welche zunächst optisch vermessen werden, um daraus anschließend die Eigenspannungstiefenverläufe mittels einer FEM basierten Kalibrierung zu berechnen. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ist in Ref. [15] ausgeführt.

2. Holografisches Projektionsmodul

Um Eigenspannungen in den Probenoberflächen freizusetzen, wurde die beschichtete Oberfläche mit Laserpulsen beaufschlagt. Dabei wurde ein Teil der Schicht lokal entfernt, um eine Verformung der Oberfläche durch Relaxation von Eigenspannungen zu erreichen.

Für die Untersuchungen wurde ein Nd:YAG-Pulslaser (INNOLAS SpitLight 600) verwendet, der bei einer Pulslänge von 7 ns Pulse mit Energien von 800 mJ ($\lambda=1064$ nm), 400 mJ ($\lambda=532$ nm) bzw. 200 mJ ($\lambda=355$ nm) erzeugen kann. Die maximale Wiederholrate liegt bei 20 Pulsen pro Sekunde. Für die Messungen wurde Licht im Infrarot-Bereich verwendet ($\lambda=1064$ nm).

Zwei verschiedene Aufbauten wurden verwendet um Löcher oder Freiform-Strukturen auf der beschichteten Oberfläche zu erzeugen. Abbildung 1.a zeigt eine Belastungsanordnung, welche einen einfachen Aufbau aufweist. Der vom Puls laser emittierte Strahl wird durch eine Linse auf die Beschichtung fokussiert. Die durch die Beugung begrenzte minimale Größe des Laserspots ist $S_{\text{spot}} = \lambda f/D$, wobei D , f und λ : der Öffnungsdurchmesser des Strahls, die Brennweite der Linse und die Wellenlänge des Lasers sind. Bei einer Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm, einer Brennweite $f = 200$ mm und einer Öffnung $D = 10$ mm wird ein Spotdurchmesser von etwa 20 μm erzielt. Die Größe des Laserspots auf der Oberfläche kann durch Bewegen der Linse verändert werden. Das erlaubt das Bohren von z.B. größeren Löchern, wenn

genügend Leistungsdichte ($> 10^9 \text{ W / cm}^2$) zur Verfügung steht. Abbildung 1.b zeigt ein Loch mit 200 μm Tiefe, dessen Durchmesser sich von 600 μm auf 450 μm mit der Tiefe verkleinert (kegelförmig).

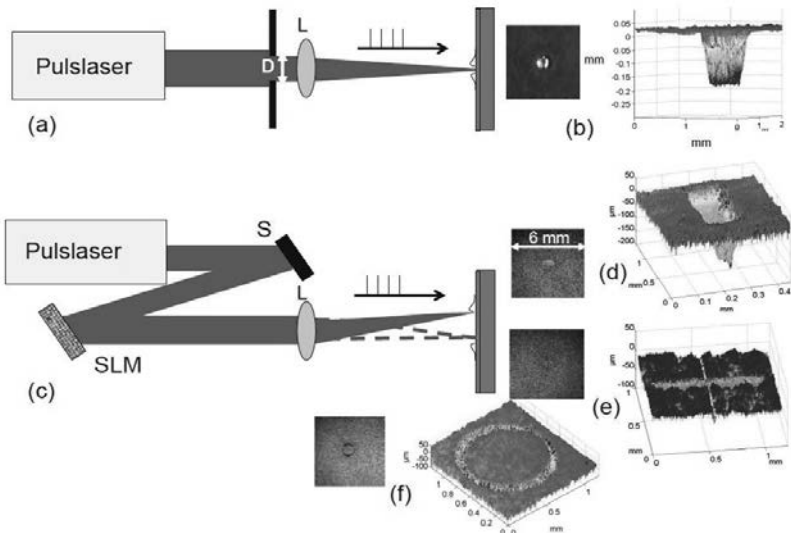


Bild 1: Lochbohren durch Fokussierung des Laserstrahls auf der Probe (a); Foto und 3D-Tiefenprofil des erzeugten Lochs (b). Aufbau für das Bohren komplexerer Lochmuster mit Verwendung eines SLM (c). Strich (d), Ring (e) und kreisförmige (f) Löcher mit Profilometrie.

Um komplexere Lochmuster zu erzeugen wurde ein Aufbau mit einem räumlichen Lichtmodulator (engl. Spatial Light Modulators, SLM) verwendet (siehe Abbildung 1.c). Der vom Laser erzeugte Lichtstrahl wird durch das Schreiben eines Phasen / Amplitudenmusters (computergeneriertes Hologramm) auf dem SLM steuerbar moduliert, so dass auf dem Objekt die gewünschte Lichtverteilung erzeugt wird. So ist es möglich gezielt einen Teil der Oberflächenschicht des Objekts lokal zu entfernen. Das Loch kann kreisförmig, ellipsenförmig, strichförmig sein oder eine andere komplexere Form haben. Die Abbildungen 1. d, e, f, zeigen Beispiele von Mustern mit unterschiedlichen Topographien, die mit dem Aufbau von Abbildung 3.c erzeugt wurden. Die Topographien wurden mit einem Weißlicht-Interferometer gemessen. Die Tiefe des Lochs kann durch die Anzahl von Laserpulsen oder durch die Pulsenergie gesteuert werden. Neben dem offensichtlichen Vorteil der schnellen und örtlich variablen

Anregung bietet das Verfahren den Vorteil, beliebige Anregungsmuster generieren zu können. Den einzigen Nachteil stellt die Lichtempfindlichkeit der SLMs dar, die durch zu hohe Bestrahlungsstärke ($>1 \text{ MW/cm}^2$) beschädigt werden können. In unserem Versuch verwendeten wir einen LCOS (Holoeye LC-R 3000) mit 1920×1200 Pixeln und einer Pixelgröße von $9,5 \text{ }\mu\text{m}$.

3. Bestimmung von Oberflächenverschiebung

Abbildung 2 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus für die Laserbelastung des Objektes und die Messung der 3D- Oberflächenverschiebungen. Die Messung der resultierenden 3D-Verschiebungen erfolgt durch digitale Holografie. Ein CW-Nd:YAG-Laser (ROITHNER LASERTECHNIK GmbH, CW532-100, Wellenlänge 532 nm , Leistung 100 mW) wurde als Lichtquelle verwendet. Das Laserstrahlenbündel wird durch den ersten Strahlteiler ST in zwei Teilstrahlenbündel aufgeteilt. Ein Teilstrahlenbündel wird durch die Linse L1 in eine Monomoden-Faser eingekoppelt und als Referenzwelle für die holografische Messanordnung verwendet. Das andere Teilstrahlenbündel wird durch drei Strahlteiler und zwei Spiegel wieder in vier Lichtstrahlenbündel geteilt. Diese Lichtstrahlenbündel beleuchten die Oberfläche des Objekts aus vier Richtungen, um vier Sensitivitätsvektoren für die 3D-Messung zu erzeugen. Das von der Oberfläche des Objekts gestreute Licht wird vom Farfilter (HS) in Richtung des Messsystems reflektiert. Die Linse L2 bildet die Oberfläche des Objekts auf den Detektor ab. Mit der Aperturblende AP kann die Specklegröße angepasst werden, um eine optimale Aufnahme des Hologramms zu erreichen. Das von der Oberfläche des Objekts gestreute Licht interferiert mit dem Referenzstrahlenbündel. Das Interferenzmuster wird vom CCD-Detektor (Vistek, ECO655 mit 2448×2050 Pixel, Pixelgröße $3,45 \times 3,45 \text{ }\mu\text{m}^2$) aufgezeichnet und stellt danach ein digitales Hologramm dar. Es werden vor der Belastung des Objekts vier Hologramme durch Beleuchtung aus vier verschiedenen Richtungen registriert (bei Beleuchtung aus einer Richtung erhält man nur die Verformung entlang eines Sensitivitätsvektors). Um die 3D-Verformung zu bestimmen werden mindestens drei Beleuchtungsrichtungen benötigt. Die Beleuchtung aus vier Richtungen verbessert nochmals die Auswertung. Nach der Ablation werden erneut Hologramme registriert. Nach Auswertung der Hologramme wird die 3D-Verformung zwischen dem unbelasteten und dem belasteten Zustand ermittelt. Dieser Prozess kann wiederholt werden, so dass verschiedene Ablationstiefen erzeugt werden und so die 3D-Verformung als Funktion der Laserelastung ermittelt wird.

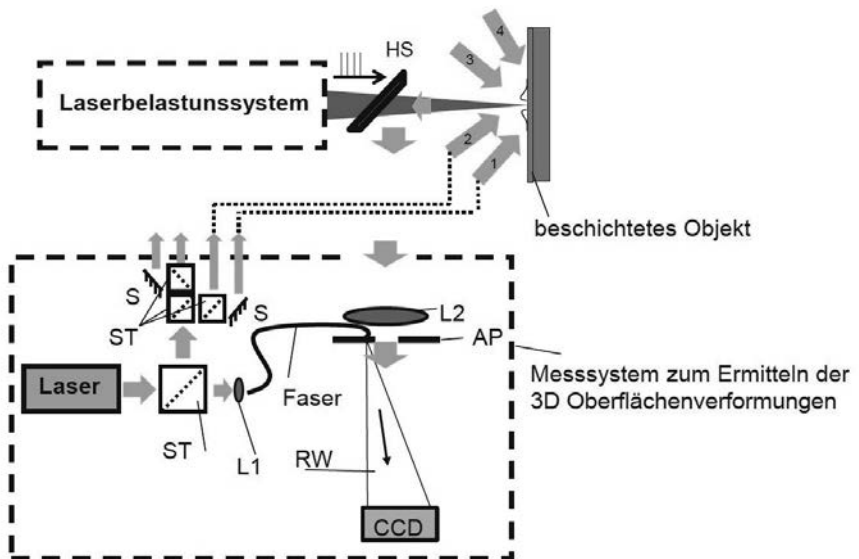


Bild 2: Laserbelastungssystem und Messsystem zur Ermittlung von 3D-Oberflächenverformungen..

4. Messung von Prüfobjekten

Zur Laserablation von beschichteten Proben wurden zwei Ablationsmethoden angewendet und die erzeugten 3D-Oberflächenverschiebungen und Musterprofile wurden bestimmt. Abbildung 3 zeigt die Verschiebung, die mit Hilfe des Aufbaus aus Abbildung 1.a und bei Laserelastung einer beschichteten Objektoberfläche (Schichtdicke 200 µm) gemessen wurde. Obwohl insgesamt Löcher mit 16 verschiedenen Tiefen untersucht wurden, sind in Abbildung 3 zur Verdeutlichung nur Verschiebungen für zwei unterschiedliche Lochtiefen von 70 bzw. 200 Mikrometer gezeigt. Abbildung 4 zeigt 3D-Verformungen, die aus dem Einschreiben einer Nut (Länge 1 mm, Breite 100 µm und Tiefe 100 µm) in eine Beschichtung mit Schichtdicke 200 µm resultieren. Hier wurden ebenfalls durch inkrementelle Belastung Profile mit verschiedener Tiefe erzeugt und die resultierenden Verschiebungen gemessen. Es wurden sowohl Kreuze als auch Ringe in die Beschichtung eingeschrieben und 3D-Oberflächenverschiebungen und Profile gemessen [15].

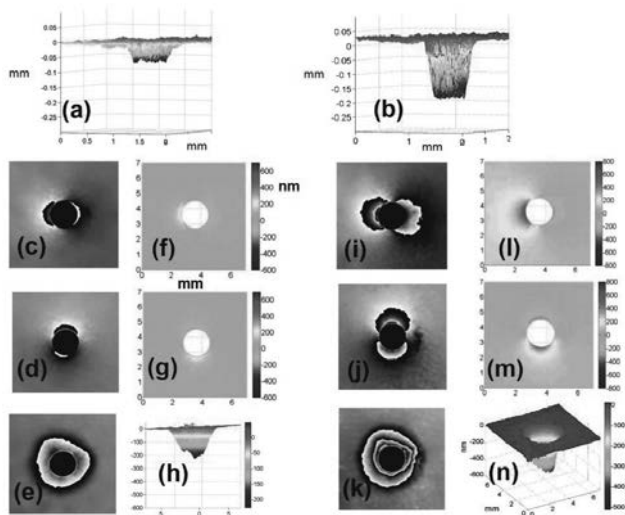


Bild 3: Konische Lochprofile mit Tiefe 70 μm (a) und 200 μm (b). Phase Modulo 2π und berechnete Verschiebungen entlang der x (c, f), y (d, g) und z (e, h) Richtungen erzeugt durch das 70 μm Loch. Phase Modulo 2π und berechnete Verschiebungen x (i, l), y (j, m) und z (k, n), erzeugt durch das 200 μm Loch. x und y bezeichnen Koordinaten in der Oberflächenebene und z senkrecht zur Oberfläche.

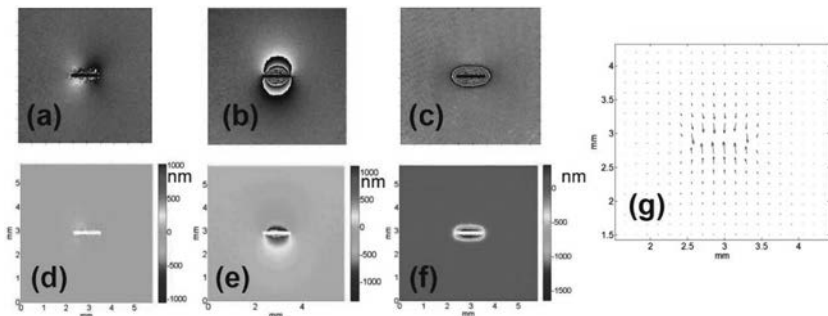


Bild 4: Phase Modulo 2π und berechnete Verschiebungen entlang der x (a, d), y (b, e) und z (c, f)-Richtungen, erzeugt durch das Bohren einer horizontalen Nut mit Tiefe 120 μm . In-Plane (in der x-y Ebene)-Darstellung der Verschiebungen (g). Die Pfeile zeigen resultierende Verformungen in Richtung der Nut (daraus lassen sich Druckspannungen erkennen).

4. Ermittlung von Eigenspannungen

Die Bestimmung der Eigenspannungen für die Laserablationsmethodik durch inkrementelles Bohren in verschiedenen Schichttiefen wird aus den 3D-Verschiebungen und der Topographie des jeweiligen Loches unter Verwendung geeigneter Kalibrierkurven durchgeführt. Weiterhin wurden Kontrollmessungen der Lochgeometrien und Referenzmessungen der Eigenspannungszustände anhand der Bohrlochmethode durchgeführt. Im Folgenden ist jeweils eine zum Vergleich durchgeführte mechanische Eigenspannungsermittlung mitangegeben. Für diese wurde eine neue und eigens für diese Probe erzeugte Kalibrierung nach der Integralen Methode angewandt. Die Auswertung der ermittelten Verschiebungsfelder bei Einbringung eines Laserlochs zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen der klassischen Bohrlochmethode (s.a. Abbildung 5.a). Die vergleichsweise hohe Streuung (Ausreißer bei 170 μm) ist hauptsächlich auf geometrische Unsicherheiten zurückzuführen. Die Auflösung für die Nutmethode mit den entsprechenden Verschiebungsfeldern (s.a. Abbildung 5.b) ist deutlich besser, ebenso weist diese eine minimierte Streuung auf. Die Abweichungen zur mechanischen Bohrung sind vermutlich auf Unsicherheiten in der Tiefenbestimmung zurückzuführen. Die sehr hohe Eigenspannung beim ersten Messwert ist vermutlich auf die hohe Ungenauigkeit bei geringer Tiefe zurückzuführen, da hier die erzielte Oberflächenverschiebung sehr gering ist. Interessant ist jedoch der Umstand, dass die ermittelten oberflächennahen XRD-Werte mit -596 MPa auch vergleichsweise hoch sind.

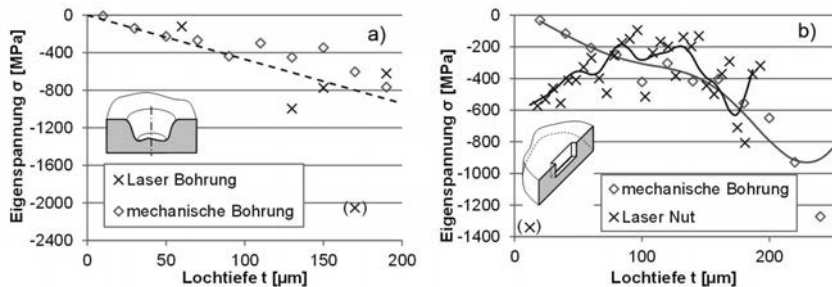


Bild 5: Ermittelter Eigenspannungsverlauf für: a) einfache Lochgeometrie sowie b) Nutgeometrie

5. Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Untersuchungen im Rahmen des Projektes: "Ermittlung von Eigenspannungen in beschichteten Oberflächen".

6. Literaturverzeichnis

- [1] M. E. Fitzpatrick, A. T. Fry, P. Holdway, F. A. Kandil, P. Shackleton und L. Suominen, „Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2“. *Practice Guide No. 52, National Physical laboratory*.
- [2] J.-S. Park, U. Lienert, P. R. Dawson und M. P. Miller, „Quantifying Three-Dimensional Residual Stress Distributions Using Spatially-Resolved Diffraction Measurements and Finite Element Based Data Reduction,“ *Experimental Mechanics*, Bd. 53, pp. 1491-1507, 2013.
- [3] V. Hauk Ed., „Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods,“ *Elsevier, Amsterdam*, 1999.
- [4] M. Rabung, I. Altpeter, C. Boller, G. Dobmann und H. Herrmann, „Non-destructive 25 evaluation of the micro residual stresses of IIIrd order by using micro magnetic methods,“ *NDT & E International*, pp. 7-10, 2014.
- [5] ASTM Standard E 837-13, „Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method,“ 2013.
- [6] M. Wenzelburger, D. López und R. Gadow, „Methods and Application of Residual Stress Analysis on Thermally Sprayed Coatings and Layer Composites,“ *Surf. Coat. Technol.*, Bd. 201, pp. 1995-2001, 2006.
- [7] M. Buchmann, M. Escribano und R. Gadow, „Residual Stress Analysis in Thermally Sprayed Layer Composites, using the Microhole Milling and Drilling Method,“ *J. Therm. Spray Technol.*, Vol. 14, No. 1, 100-108, (2005)., Bd. 14, Nr. 1, pp. 100-108, 2005.
- [8] E. Obelode und J. Gibmeier, „Residual Stress Analysis on Thick Film Systems by the Incremental Hole-Drilling Method - Simulation and Experimental Results,“ *Experimental Mechanics*, Bd. 53, pp. 965-976, 2013.
- [9] E. Held, „Application of the incremental hole-drilling method on thick film systems- an approximate evaluation approach .,“ Bd. 55), pp. 499-507 , 2015.

- [10] M. Viotti und A. Albertazzi, „Compact sensor combining digital speckle pattern interferometry and the hole-drilling technique to measure nonuniform residual stress fields,“ *Optical Engineering*, Bd. 52, p. 101905, 2013.
- [11] J. Nobre, M. Oliveira, A. Albertazzi, M. Viotti, A. Batista, L. Coelho und M. Marques, „Assessing shot-peening residual stresses by using the incremental hole-drilling technique and laser interferometry (DSPI),“ *Advanced Materials Research.*, Bd. 996, 2014.
- [12] M. A. Sutton, J. J. Orteu und H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, New York: Springer Science & Business Media, 2009.
- [13] A. Baldi, „Residual Stress Measurement Using Hole Drilling and Integrated Digital Image Correlation Techniques,“ *Experimental Mechanics*, Bd. 54, p. 379–391, 2014.
- [14] J. Matejcek und S. Sampath, „In situ measurement of residual stresses and elastic moduli in thermal sprayed coatings“. Part 1: apparatus and analysis,“ *Acta Mater.*, Bd. 51, Nr. 3, pp. 863-872, 2003.
- [15] G. Pedrini, V. Martínez-García, P. Weidmann, M. Wenzelburger, A. Killinger, U. Weber, S. Schmauder, R. Gadow und W. Osten, „Residual Stress Analysis of Ceramic Coating by Laser Ablation and Digital Holography,“ *Experimental Mechanics*, pp. DOI 10.1007/s11340-015-0120-3, 2015.

Systeme zur Messung komplexer Oberflächen und ihre Leistungsbewertung

Systems for measurement of complex surface and their performance evaluation

Dr.-Ing. **D. Imkamp**, Dipl.-Ing. **E. Schuster**, Carl Zeiss IMT, Oberkochen;
Dipl.-Ing. **M. Basel**, **H. Daxauer**, **A. Fuchs**, Dipl.-Ing. **T. Mayer**,
Carl Zeiss Optotechnik GmbH, Neubeuern

Kurzfassung

Die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Messsysteme zur Erfassung der Oberflächengestalt industriell gefertigter Produkte hat erheblich zugenommen. Neben den klassischen Koordinatenmessgeräten mit taktilen und optischen Sensoren gibt es heute weitere Systeme die erfolgreich zur Anwendung kommen. Dafür etabliert sich auch in der Normung der Begriff der Koordinatenmesssysteme. In diesem Beitrag werden verbreitete Ausführungen und ihre Leistungsbewertung vergleichend dargestellt.

Abstract

The variety of available measuring system for capturing surface shape of industrial manufactured products has increased significantly. Besides the classical coordinate measuring machines with tactile and optical sensor, there are nowadays many further systems that are successfully operating in industry. Therefore the more general term coordinate measuring system is used. In this paper several systems are presented and compared according to their application and performance.

1. Einführung: Komplexe Teile

Unter Komplexität wird hier die Komplexität der Oberfläche der Produktgestalt verstanden. Das betrifft sowohl die Oberfläche an sich als auch ihre Spezifikation. Beides hat in den letzten Jahren zugenommen. Die Anforderungen hinsichtlich Integration beziehungsweise Kombination von Funktionalität in einem einzigem Teil sowie die Anforderungen an die Ästhetik von Bauteilen haben die Oberflächen komplizierter werden lassen. Gleichzeitig wird durch die Forderung nach Einhaltung engerer Toleranzen die Spezifikation der Flächen komplexer, weil genauere Festlegungen zur eindeutigen Definition der Anforderungen an die

Toleranzen erforderlich sind. Letzteres wird durch Erweiterung der Normen der Geometrischen Produktspezifikation deutlich [1].

Im Bereich komplexer Flächen werden die Anforderungen heute vorwiegend durch ein rechnergestütztes Modell (CAD Modell) spezifiziert. Zur Tolerierung wird eine Linien- oder Flächenformtoleranz nach DIN EN ISO 1101 verwendet, wenn nicht produktspezifische Toleranzen (Beispiele: Asphären, Turbinenschaufeln) verwendet werden. Mit Hilfe eines Koordinatenmesssystems wird die Fläche durch Punkte erfasst. Der Vergleich der aufgenommenen Punkte mit dem Modell liefert die Information über die Abweichungen zwischen Soll- und Istfläche. Zur Visualisierung dient dabei häufig eine chromatische Darstellung („Falschfarbendarstellung“), bei der die Farben ein Maß für die Abweichungen darstellen.

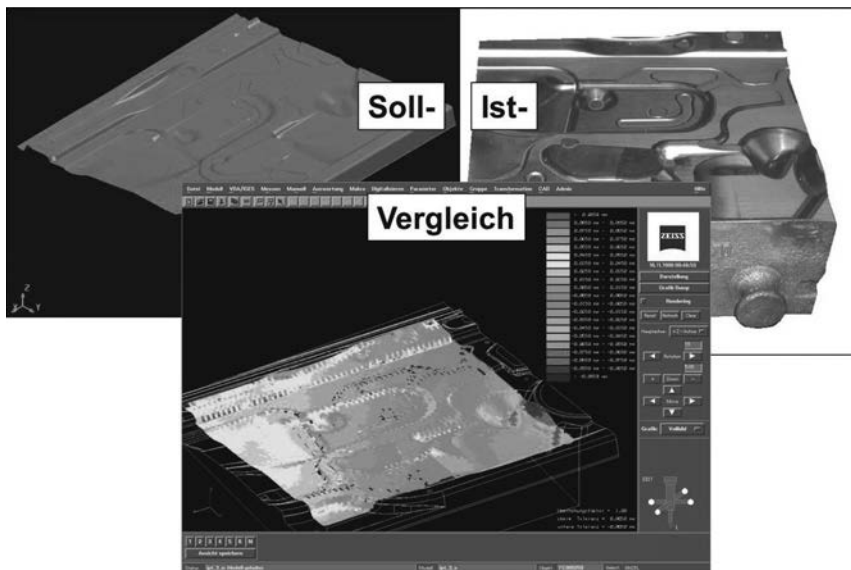


Bild 1: Soll- (CAD Modell) Ist-Vergleich an einem Formwerkzeug mit chromatischer Darstellung der Abweichungen

2. Registrieren und Ausrichten zur Auswertung

Für den Vergleich zwischen den aufgenommenen Punkten und der Fläche werden häufig Ausgleichsverfahren verwendet, bei denen die mittlere oder die maximale Abweichung

minimiert wird. Bei diesem Vorgehen wird nur die Fläche betrachtet. Im Hinblick auf ihre Funktion sind aber die meisten Flächen an ein Bezugssystem gebunden. Dabei kann es sich beispielsweise um ein aus Montageflächen gebildetes System handeln.

Bild 2 zeigt die Bildung eines Bezugssystems aus den Führungszylindern eines zweiteiligen Schmiedegesenks. Im CAD System werden nur die Funktionsflächen für Ober- und Unterteil beschrieben. Beide Flächen werden zur Prüfung auf ein Koordinatensystem bezogen, dessen räumliche Orientierung (Primärbezug) aus der Symmetrieachse der beiden Achsen der Führungszylinder gebildet wird und dessen Sekundärbezug aus der Verbindungsgerade zwischen den Achsen in der Ausgleichsebene der Führungszylinderdeckflächen gebildet wird. Durch den Bezug der Flächenformtoleranz auf dieses Koordinatensystem wird sichergestellt, dass nicht nur die einzelnen Funktionsflächen der beiden Gesenkhälften innerhalb der geforderten Flächenformtoleranz liegen sondern auch die Flächen zueinander richtig liegen, so dass das Gesenk funktioniert [2].

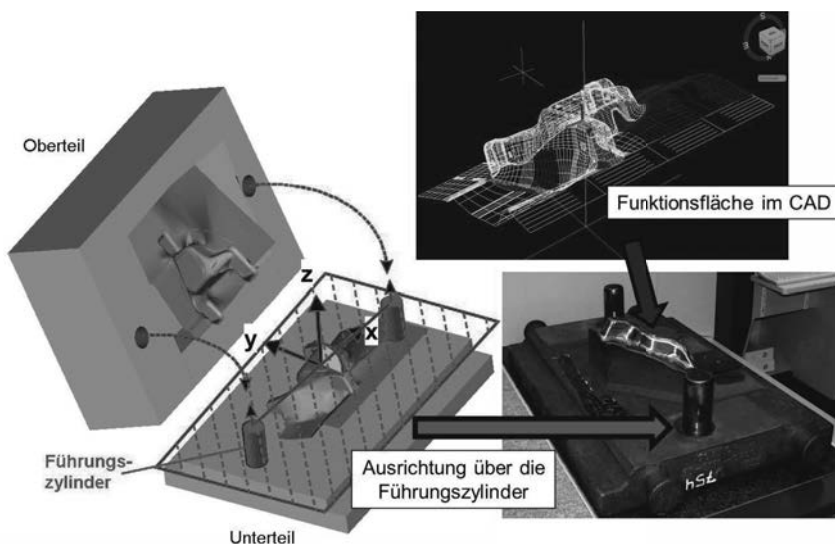


Bild 2: Funktionsgerechte Ausrichtung an einem Gesenk

3. Messsysteme: Übersicht

Es gibt heute eine große Bandbreite unterschiedlicher Koordinatenmesssysteme zur Erfassung der Oberflächengestalt in der industriellen Produktion [3, 4]. Sie lassen sich in ortsfeste und mobile Systeme einteilen. Daneben gibt es die bildgebenden Systeme, die sich von anderen Systemen dadurch unterscheiden, dass sie in einer einzigen „Sensorposition“ einen räumlichen Ausschnitt der Oberflächengestalt zumeist in Form einer Punktwolke ermitteln. Diese Systeme werden auch als Sensoren auf den anderen Systemen verwendet, wie beispielsweise ein Streifenprojektionssystem auf einem Koordinatenmessgerät [5] oder einem Roboter [6]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die bildgebenden Sensoren wesentlich größer und schwerer sind als Einzelpunkt- und Liniensensoren. Die vergleichende Betrachtung in diesem Beitrag beschränkt sich auf die ortsfesten sensortragenden Systeme und die bildgebenden Systeme.



Bild 3: Systematisierung von Techniken in der Koordinatenmesstechnik (Basis: [3])

4. Messsysteme: Sensortragende „Mover“

Für die Erfassung der Produktgestalt in der industriellen Produktion werden seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts Koordinatenmessgeräte verwendet. Dabei handelt es sich um sensortragende Systeme mit zumeist drei luft- oder rollengelarten Bewegungsachsen, die ein kartesisches Koordinatensystem bilden, und linearen Maßstäben an den Achsen. Im weiteren Sinn lassen sich auch Formprüfgeräte und Tastschnittgeräte, die vorwiegend mit

Gleitführung ausgerüstet sind, dieser Messgeräteklasse zuordnen. Neben diesen speziellen Systemen werden heute auch Roboter als Sensorträger für Koordinatenmessungen verwendet (Bild 4). Allgemein hat sich für diese Systeme aus Bewegungsachsen der englische Begriff des „Movers“ etabliert.

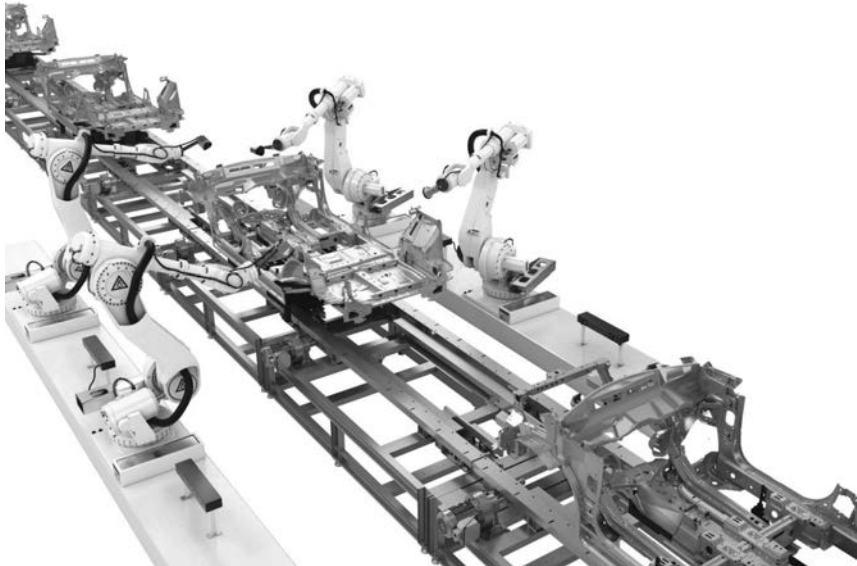


Bild 4: Sensortragende Roboter zur optischen Prüfung von Autokarosserien [6]

Für diese Systeme steht eine große Bandbreite unterschiedlicher Sensoren zur Verfügung. Neben den taktilen Sensoren gibt es optische Abstandssensoren (z. B.: Triangulationssensoren, konfokale Sensoren) und Kamerasensoren [7, 8].

Bild 5 zeigt die Aufgabenverteilung zwischen einem taktilen Sensor zur Bestimmung der Ausrichtung an den glänzenden Führungszylindern eines Gesenkes, die sich kaum optisch genau erfassen lassen, und einem Lasertriangulationssensor zur schnellen Bestimmung der Toleranzhaltigkeit der Funktionsflächen bezüglich dieser Ausrichtung.

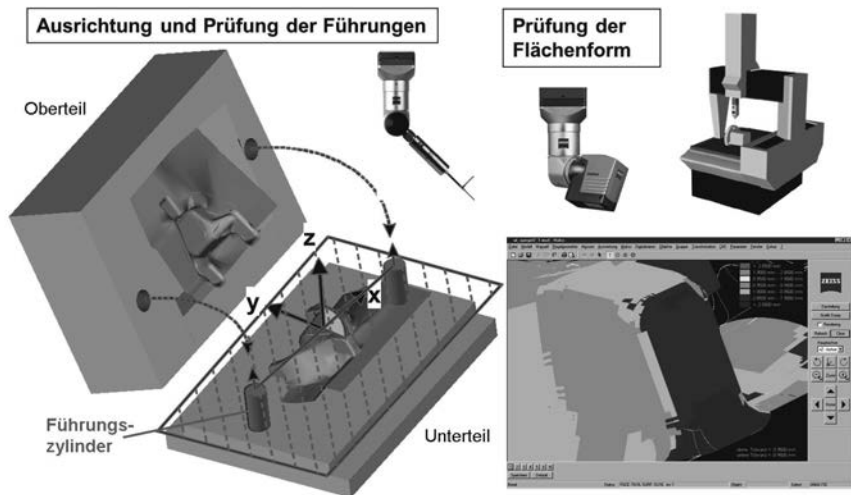


Bild 5: Prüfung der Funktionsoberflächen des Gesenks aus Bild 2 mit einem Lasertriangulationssensor bezüglich einer mit einem taktilen Sensor gemessenen Ausrichtung [9]

5. Messsysteme: Bildgebende mobile Koordinatenmesssysteme

Im Bereich der bildgebenden Koordinatenmesssystem haben die Streifenprojektionssysteme [10] und die Photogrammetriesysteme [11] die größte Verbreitung erzielt.

Bild 6 zeigt das Streifenmuster eines Photogrammetriesystems auf einer komplexen Gesenkoberfläche. Daneben ist die aufgenommene Punktwolke zu sehen. Deutlich sind fehlende Punkte in Abschattungsbereichen zu erkennen. Bild 7 zeigt das Gesenk auf dem Drehtisch des Systems, mit dem automatisch verschiedene Ansichten der Oberfläche erfasst werden können. Durch die Kombination der aufgenommenen Punkte aus verschiedenen Ansichten wird eine vollständige Erfassung der komplexen Oberfläche ohne fehlende Bereiche infolge von Abschattungen möglich. Die Überlagerung der einzelnen Punktwolken aus den verschiedenen Ansichten erfolgt mit Hilfe von Markern oder anhand von ausgeprägten Objektkonturen.

Bild 8 zeigt ein Photogrammetriesystem, das die Messpunkte mit Hilfe eines Linientriangulationssensors auf der Bauteiloberfläche aufnimmt. Damit entsteht ein manuelles „Koordinatenmessgerät“ mit optischer statt physischer Maßverkörperung.

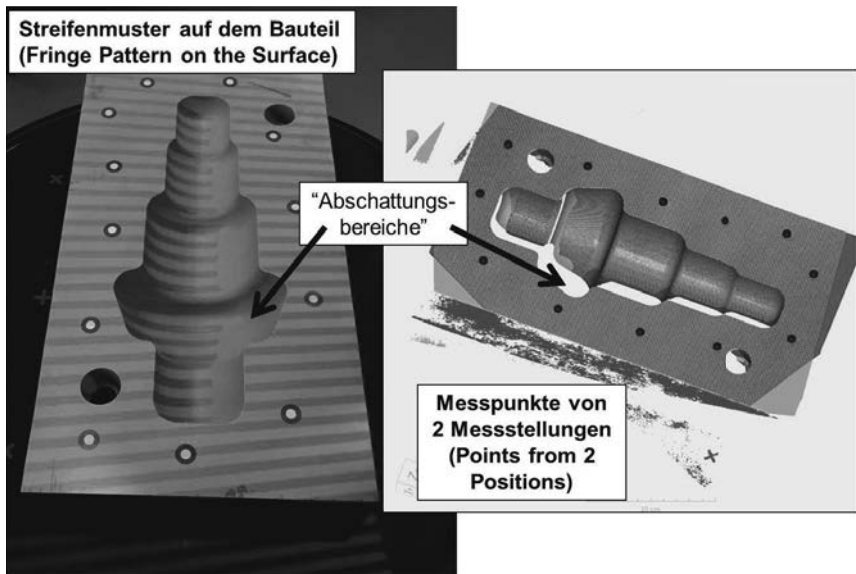


Bild 6: Streifeprojektion an einem Schmiedegesenk: Beispiel für Projektionsmuster und Messpunkte

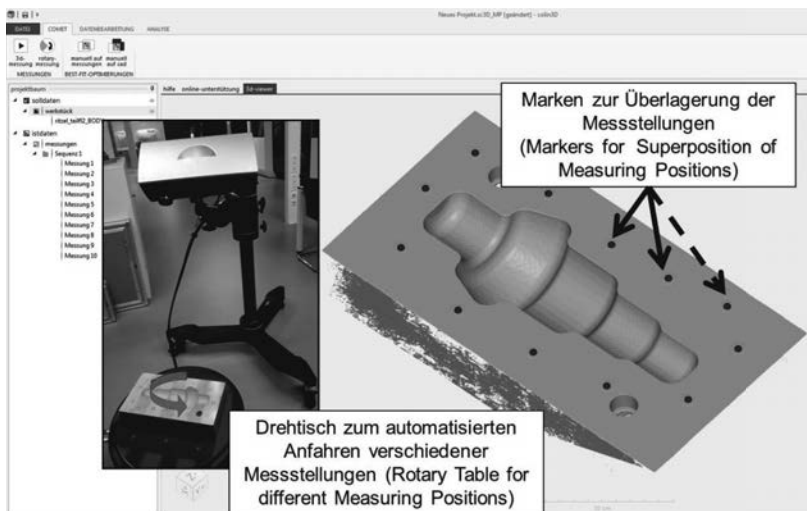


Bild 7: Streifeprojektion an einem Schmiedegesenk: Überlagerte Punktwolke aus 10 Messstellungen

Tracker mit 3 Kameras zur photogrammetrischen Erfassung der Sensorposition und von Markern am Bauteil)
(Tracker with 3 Cameras for recording sensor position and markers on the part)

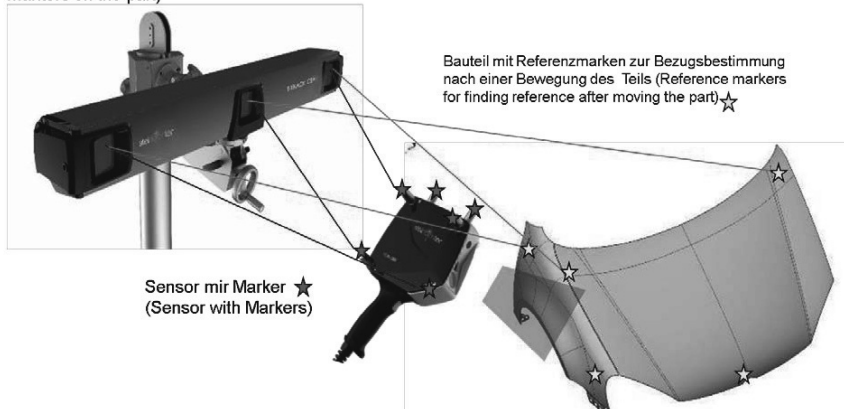


Bild 8: Photogrammetriemesssystem mit einem manuellen optischen Liniensensor

6. Messsysteme: Metrotomographie (Computertomographie zur Koordinatenmessung)

Die industrielle Anwendung der Computertomographie basiert auf den gleichen Grundlagen wie die medizinische Computertomographie. Durch die Überlagerung von aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommenen Durchstrahlungsbildern wird ein räumliches Modell des Untersuchungsgegenstandes erzeugt. Durch eine Skalierung dieses Modells lässt es sich zur Bestimmung von Maßen der Produktgestalt nutzen [12, 13].

Im Unterschied zu allen zuvor beschriebenen Verfahren ist die Computertomographie in der Lage auch von außen nicht zugängliche oder nur sehr schwer zugängliche Elemente der Produktgestalt ohne zusätzliche Aufwände zu erfassen. Das ist gerade bei kleinen, verschachtelten Bauteilen, wie bei dem in Bild 9 gezeigten Stecker der Fall.

Allerdings begrenzen die zur Verfügung stehende Leistung und das damit verknüpfte Auflösungsvermögen der verfügbaren Systeme den messtechnischen Anwendungsbereich der Computertomographie. Je größer die Dichte und die zu durchstrahlende Bauteildicke sind, desto größer ist die erforderliche Leistung und desto geringer ist die Auflösung. Bei kontrastreichen Durchstrahlungsbildern lässt sich durch Interpolation eine Messabweichung erzielen, die deutlich unter der Auflösung liegt. Dennoch beeinflusst die Auflösung die erreichbare Messabweichung wesentlich.

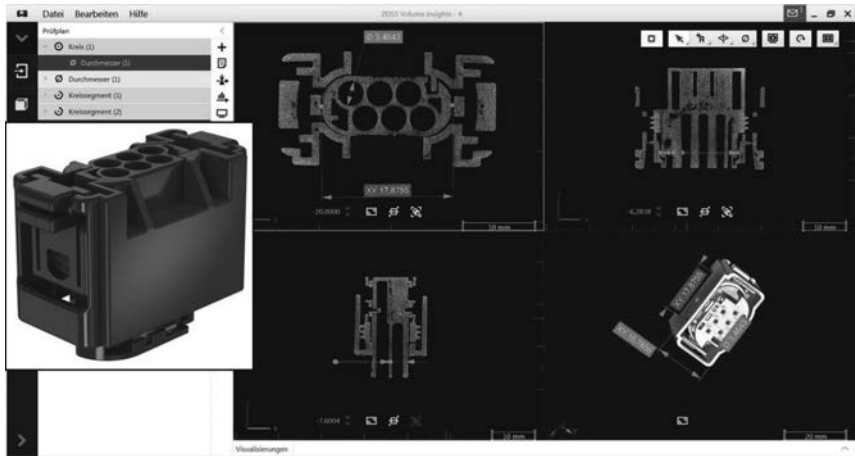


Bild 9: Messtechnische Auswertung von Computertomographiedaten eines Kunststoffsteckers

7. Leistungsbewertung

Die Leistung eines Messsystems zur Erfassung einer Produktoberfläche wird zuallererst an den Messabweichungen des Systems festgemacht. Zur Bestimmung dieser Abweichungen gibt es seit Jahren standardisierte Vorgehensweisen, die im Bereich der sensortragenden Koordinatenmessgeräte entstanden sind [14]. Sie ermitteln mit Hilfe von Längenmaßverkörperungen in Form von Endmaßen oder Kugelstäben eine Längenmessabweichung und vorwiegend mit Hilfe von Kugeln eine Antastabweichung. Die Längenmessabweichung lässt auf die zu erwartende Abweichung bei der Bestimmung von Abstandsmaßen übertragen. Die Antastabweichung liefert Informationen zu der zu erwartenden Abweichung bei Formmessungen und zu einer möglichen zusätzlichen Abweichung bei Abstandsmessungen aufgrund der Sensorantastabweichung.

Die zuvor beschriebenen Verfahren eignen sich nur bedingt zur Abschätzung der zu erwartenden Messabweichung bei der Bestimmung der Formabweichung an komplexen Oberflächen. Daher wurden in den letzten Jahren verschiedene aufgabenspezifische Normale entwickelt [15]. Diese liefern allerdings nur brauchbare Informationen, wenn die zu messenden Bauteile den Normalen sowohl was Form und Größe betrifft sehr ähnlich sind. Daher sind auch sehr viele verschiedene Normale entstanden (Bild 10 zeigt nur wenige Beispiele), was die Verfügbarkeit dieser Normale sehr einschränkt.

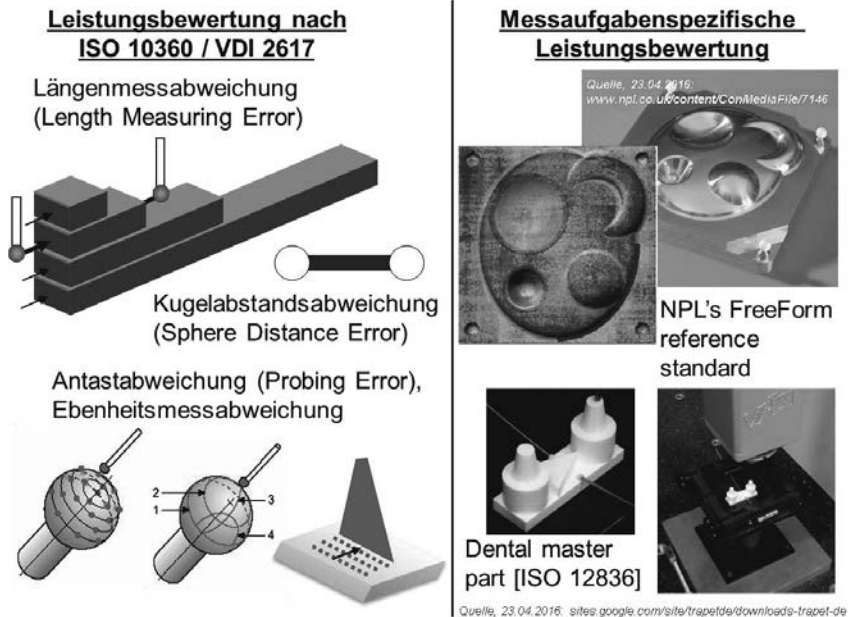


Bild 10: Verfahren zur Bewertung der Messabweichung bei Koordinatenmesssystemen für die Erfassung komplexer Oberflächen

8. Zusammenfassung

Alle zuvor beschriebenen Systeme sind erfolgreich im industriellen Einsatz, was deutlich macht, dass sie je nach Anwendungsbereich systemspezifische Vorteile aufweisen. Bild 11 zeigt in einem Netzdiagramm die Bewertung nach verschiedenen Kriterien. Desto größer der Wert bei einem Kriterium desto besser wird das Kriterium von einem System erfüllt.

Deutlich ist zu erkennen, dass die optische Koordinatensysteme Vorteile bei der Mobilität Schnelligkeit und Bedienbarkeit haben. Dem stehen Vorteile der Computertomographie und der Koordinatenmessgeräte bei der Automatisierbarkeit gegenüber. Natürlich erreicht ein optisches Koordinatenmesssystem beispielsweise in Form eines Streifenprojektionssensors einen vergleichbaren Automatisierbarkeitsgrad wie ein Koordinatenmessgerät, wenn es als Sensor auf einem Mover (z. B. Roboter) installiert wird, wobei allerdings die Mobilität und je nach Anwendung auch die Bedienbarkeit weniger gut ausfallen. Hinsichtlich der Genauigkeit

und der Flexibilität aufgrund der großen Zahl unterschiedlicher Sensoren sind Koordinatenmessgeräte im Vorteil. Die Fähigkeit der Computertomographie auch unzugängliche Strukturen zu erreichen wurde hier nicht aufgeführt.

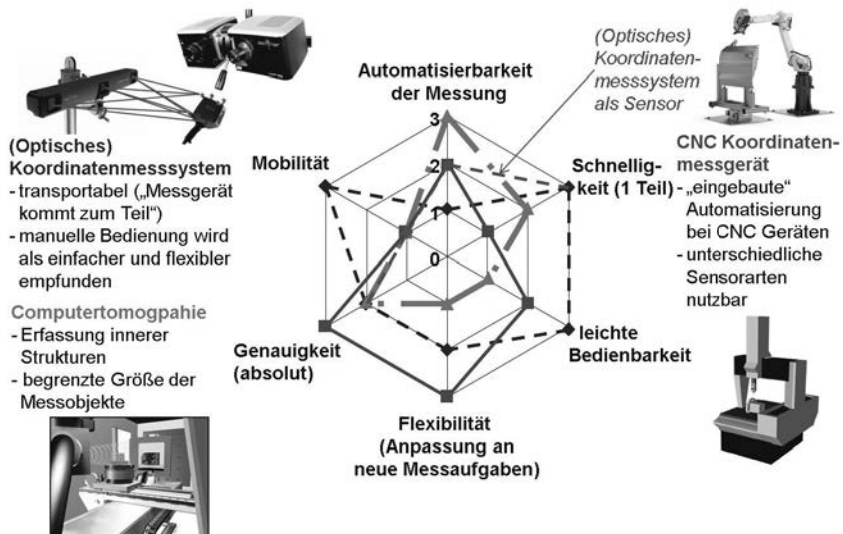


Bild 11: Vergleich der Koordinatenmesssysteme

- [1] Gröger, S.: Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und –verifikation, Habilitation, Technischen Universität Chemnitz 2013.
- [2] Imkamp, D.: Selektive Freiformflächenmessung zur effizienten Korrektur von Gestaltsänderungen an Formwerkzeugen, Dissertation, RWTH Aachen, 2001.
- [3] Schmitt, R., Jatzkowski, P., Nisch, S., Imkamp, D.: Größer, genauer und integrierter – Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020 (Teil 5) in: Qualität und Zuverlässigkeit QZ, 54. Jg., 2009, Nr. 9, S. 31-33.
- [4] Savio, E., De Chiffre, L., Schmitt, R.: Metrology of freeform shaped parts, in: Annals of the CIRP Vol. 56/2/2007; S. 810-835.
- [5] Zacher, M.: Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen, Dissertation, RWTH Aachen, 2004.

- [6] http://www.zeiss.de/industrial-metrology/de_de/produkte/systeme/prozesskontrolle-und--inspektion/karosseriemesstechnik.html (29.04.2016)
- [7] Imkamp, D.: Multisensorsysteme zur dimensionellen Qualitätsprüfung, in: PHOTONIK Fachzeitschrift für optische Technologien, AT-Fachverlag GmbH Fellbach, Ausgabe 06/2015 (Internet, 14.02.2016: www.photonik.de/multisensorsysteme-zur-dimensionellen-qualitaetspruefung/150/21002/317557).
- [8] Weckenmann, A., et al.: Multisensor Data Fusion in Dimensional Metrology, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 701–722.
- [9] Hoben, F., Imkamp, D.: Multi Application Sensor System (MASS) – mehr als die Summe der Sensoren, in: Innovation Messtechnik Spezial Nr. 9, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen 2007. (English: Hoben, F., Imkamp, D.: Multi Application Sensor System (MASS) - "Greater than the Sum of Its Sensors", in: Innovation Metrology Special Nr. 9, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen, Germany 2007) (Internet: www.zeiss.de/imt)
- [10] Breitbarth, A.: Muster- und Streifenprojektionsverfahren, Hochdynamische 3D-Verfahren. In: Fraunhofer Vision - Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik, Band 14 (2014).
- [11] Luhmann, T.: Industriephotogrammetrie. In: Fraunhofer Vision - Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik, Band 14 (2014).
- [12] Kruth, J. P., et al.: Computed tomography for dimensional metrology, CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 821–842.
- [13] Hornberger, P.; Aichinger, C.; Hiller, J.: Dimensionelles Messen mit Computertomographie. In: Fraunhofer Vision - Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik, Band 15 (2015).
- [14] Neuschaefer-Rube, U.: Normale, Normen und Richtlinien. In: Fraunhofer Vision - Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik, Band 14 (2014).
- [15] Acko, B.; McCarthy, M.; Härtig, F.; Buchmeister, B.: Standards for testing freeform measurement capability of optical and tactile co-ordinate measuring machines, in: Journal: Measurement Science and Technology Year: 2012, Volume: 23, Issue: 9. (Internet, 23.04.2016: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/23/9/094013>)

Normung: Taktile und optische Oberflächenmesstechnik – Spezifikationen und Kalibrierung

Ludger Koenders, Andre Felgner, Rolf Krüger-Sehm i. R.,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Kurzfassung

Übersicht über den Stand der Normung für taktile und optische Oberflächenmesstechnik.

1. Einleitung

Zur Charakterisierung der Rauheit von technischen Oberflächen bildet bislang die 2D-Profilmesstechnik basierend auf internationalen Normen den Stand der Technik ab. Allerdings haben sich den letzten Jahren die Anforderungen an das funktionale Verhalten von Oberflächen dominant in Richtung einer höheren Komplexität verschoben. Man denke an den Lotus-Effekt, haptische Oberflächen u.v.a.m. Derartige 3 dimensionale Funktionsoberflächen können mit einfachen Profilschnitten nicht mehr hinreichend erfasst und charakterisiert werden. Um aussagekräftige Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächen und ihres funktionalen Verhaltens zu ermitteln, sind flächenhafte Messungen und flächige Auswertungen unumgänglich geworden. Neben aufwändigen taktilen Messverfahren ermöglichen moderne optische Messmikroskope Topographien der Oberfläche deutlich schneller und berührungslos zu erfassen und abzubilden.

Die flächenhaften Kenngrößen sind in der ISO 25178-2 beschrieben, für taktile Geräte liegen die ISO 25178-601 und die 701 bereits als Norm vor, die zum einen die Gerätemerkmale spezifiziert und die Grundlagen für die Kalibrierung vorgibt. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher physikalischer Messverfahren und Prinzipien optischer Messgeräte ist eine pauschale Aussage zur korrekten Einstellung dieser Geräte deutlich schwieriger. Hier helfen nur eine strikte Normung und Angaben zu Gerätespezifikationen sowie präzise Vorgaben bzgl. der Kalibrierung, um aussagekräftige und vergleichbare Messergebnisse zu erzielen. Dies wurde in den letzten Jahren im VDI 3.41 „Oberflächenmesstechnik im Mikro- und Nanometerbereich“ und in der WG16 „Areal and profile surface texture“ des ISO/TC 213 umgesetzt.

So entstanden im VDI GMA FA 3.41 Richtlinien zur Kalibrierung von Interferenz-, Weißlicht-, und Konfokal-Mikroskopen (VDI 2655 Blatt1.1 & 1.2) und für den Anwendungsfall der Mikroformmessung (VDI 2655 Blatt 1.3). In der WG 16 des ISO/TC 213 sind auf internationaler Basis die Spezifikationen und die Grundlagen für die Kalibrierung für einige der wichtigsten optischen Topographie-Messverfahren erarbeitet worden. Einige liegen schon als Norm vor,

andere sind noch in der Entwurfsphase, haben aber schon einen gesicherten Stand erreicht (DIS, etc.), so dass in absehbarer Zeit auch hier mit einer internationalen bzw. nationalen Norm zu rechnen ist.

2. Oberflächenmodell und Messverfahren

2.1 Mechanischen und elektromagnetische Oberfläche

In der Messtechnik unterscheidet man zwischen zwei Modellen der Oberfläche: der mechanischen und der elektromagnetischen Oberfläche. Gründe hierfür sind unterschiedliche Wechselwirkungen und -bereiche der jeweiligen Sonde mit der Oberfläche und Grenzfläche. Taktile Messsonden, die mechanisch auf die Oberfläche einwirken, üben eine entsprechend gerichtete Kraft aus. In jeder Messung wird zudem durch den Einfluss der Tastspitzengeometrie eine „Faltung“ mit den Oberflächenstrukturen vorgenommen. Die mechanische Oberfläche wird über die Kontaktpunkte an der Messgeometrie punktförmig gemessen, die Oberfläche quasi mittels morphologischer Operation, der „Dilatation“, erfasst. Bei hinreichend gut bekannter Geometrie der Tastspitze kann so aus dem gemessenen Profil durch eine morphologische „Erosion“ eine bessere Näherung der eigentlichen mechanischen Oberfläche erreicht werden. Erreichen kann man dies z. B. über eine Messung des Radius der Tastspitze (ISO 16610-41). Andererseits kann das Material der Oberfläche je nach aufgebrachtener Kraft, Radius des Tasters und der damit verbundenen Kontaktfläche mit elastischen und plastischen Verformungen reagieren. Bei zu hohen Kräften oder weichen Materialien können kurz- oder langfristige Verformungen oder sogar Kratzer auftreten.

Optische Verfahren hingegen messen mit Licht und erfahren entsprechende Wechselwirkung mit den Oberflächenschichten. Man spricht hier von der Erfassung der elektromagnetischen Oberfläche. Diese ist abhängig von den optischen Oberflächeneigenschaften und dem Aufbau der Oberflächenschichten. So zum Beispiel werden mit Röntgen- oder mit Infrarotlicht andere Oberflächen abgebildet bzw. erfasst als mit Licht aus dem sichtbaren Bereich. Ferner kann unter einer transparenten Oxidschicht von einigen 100 Nanometern Dicke immer noch die Topographie einer strukturierten Metall-Oberfläche gemessen werden. Hier findet die eigentliche Messung also unterhalb der Oberfläche statt. Gewissermaßen wird dabei eine Grenzflächentopographie erfasst und nicht die eigentliche Oberflächentopographie. Ferner limitiert die Wellenlänge des verwendeten Lichtes zusätzlich die räumliche Auflösung.

2.2 Taktile 2D und 3D

Bei den taktilen Verfahren werden definierte Tastspitzen (meist ein Diamant), die über die Oberfläche geführt. Dabei übt die Tastspitze eine gewisse Kraft auf die Oberfläche aus. Die durch die Topographie bedingten Auslenkungen der Tastspitze werden über einen Hebelarm

verstärkt und mittels induktiven, kapazitiven oder optischen Messwandlern in eine Spannung umgesetzt, gemessen und als Funktion des Zeit (konstanter Geschwindigkeit) bzw. des Ortes gespeichert. Neben vielen nicht axialen Systemen mit einem Hebelarm, der bei großen Auslenkungen mit seiner Drehbewegung zu einer Veränderung im Antastpunkt führt, gibt es auch neuere Entwicklungen für direkt axial messende Systeme. Für eine flächenhafte Erfassung der Oberfläche werden mit den Tastern parallel zueinander verlaufende Schnitte gemessen, sogenanntes Rastern der Oberfläche. Bedingt durch die Geschwindigkeiten von 0,1 bis 1 mm/s kommt es bei großen Messfeldern bzw. einer hohen Zahl von Linien zu sehr langen Messzeiten, in denen das Messgerät und die Umgebung stabil bleiben müssen. Vielfach werden derartige Geräte als Referenzgeräte in nationalen Metrologieinstituten eingesetzt.

2.3 Optische 2D und 3D

Vorteil der optischen Methoden ist eine berührungslose Messung, die deshalb auch schneller erfolgen kann. Dabei gibt es zwei Gruppen: rein punktförmig bzw. linienförmig arbeitende und bildhaft erfassende Systeme, d.h. die eine Fläche in einem Scan erfassen.

2.3.1 Profilhafte Verfahren

Im Vergleich zu taktilen Systemen ersetzt hier ein optischer Punktsensor die Tastspitze. Dieser wird profilhaft über die Oberfläche geführt, wobei über die Messung das Signal punktförmig gemessen und gespeichert wird. Neben Systemen wie dem Fasersensor als konfokalen Punktsensor gibt es noch einen weit verbreiteten konfokal chromatischen Sensor. Dieser nutzt den Effekt der chromatischen Aberration von Objektiven aus, um in einem Scan in konstanter Höhe über der Oberfläche aus der Wellenlänge des am stärksten fokussierten, zurückreflektierten Lichtes die Höheninformation abzuleiten.

2.3.2 Bildhafte Verfahren

Ein flächenhaftes Sensorfeld (CCD- oder CMOS-Chip, ...) nimmt ein Abbild der Oberfläche auf. In der Anwendung gibt es interferometrisch basierte Verfahren, wie z. B. das hochauflösende Phasenschiebe-, das Weißlicht- (engl. Coherence Scanning Interferometry (CSI)) und das Streifenprojektionsverfahren. Konfokale- und Fokusvariationsverfahren basieren auf Intensitätsverläufen und Kontrastveränderungen, welche sich je nach Abstand zwischen Probe und Optik verändern. In vertikal äquidistanten Abständen werden jeweils Intensitätsbilder einer Ebene aufgenommen und diese Bilddaten in einem sogenannten Stacks abgespeichert. Am Ende der Messung steht ein Bild der Oberfläche bzw. eine aus dem Datensatz berechnete Topographie zu Verfügung.

2.4 Grenzen des Modells und der Messtechniken

Die Unterscheidung in mechanisch und optisch angetastete Oberfläche bedingt auch einen Unterschied in den gemessenen Daten und daraus ermittelten Kennwerten für die Oberfläche. Nach ISO 25178-1 für die Zeichnungseintragung muss insofern auch die zu benutzende Methode mit in die Zeichnungen eingetragen werden.

Im Vergleich zur mechanischen Abtastung ist die Wechselwirkung von Licht mit den oberflächennahen Schichten, wie. z.B. Wasserschichten, Kontaminationen und Ölfilmen, transparenten Oberflächenschichten deutlich vielfältiger und damit auch anfälliger für Fehlinterpretationen. Andererseits gibt es ähnlich wie bei der taktilen Messung durch die Tastspitze bedingt auch bei der optischen Sonde Bereiche, die nicht zugänglich sind. Bei großen Steigungen wird das Licht aus dem Mikroskop nicht oder nur teilweise wieder in das Objektiv zurückreflektiert und liefert somit keine oder nur eine bedingt nutzbare Information über diesen Bereich. Bei taktilen Geräten können feinere Tastspitzen etwas helfen, die Auflösung zu verbessern: in der Optik entspricht dies der Nutzung von Objektive mit höherer numerischer Apertur. Letzteres schränkt aber gleichzeitig das Bildfeld ein.

Weitere bekannte Effekte / Phänomene im Bereich der Optik sind Oberflächenstrukturen, die durch Lichtübersprechen zwischen benachbarten Pixeln das eigentliche Signal stören, sog. „Bat-wings“ an Kanten; dünne Filme und Oxidschichten, die zu Veränderungen des Korrelogramms bei Weißlichtinterferenzmikroskopen (WLI) führen und von automatischen Auswertungen missinterpretiert werden; konkave Strukturen, die einen zusätzlichen Fokuspunkt ermöglichen, u.v.a.m. Bei taktilen Methoden sind bei weichen Materialien Verformungen zu berücksichtigen, bei zu großen Kräften können diese zu unerwünschten Kratzern führen.

3. Kenngrößen 2D – 3D

Für die profilhaften Messungen sind die Parameter und die Messbedingungen in ISO 4287, ISO 4288 sowie der ISO 13565-2 beschrieben. Kenngrößen für die flächenhafte Charakterisierung sind in der ISO 25178-2 definiert. Hier unterteilt man (siehe Abb. 1.) in Amplituden (S_a , S_q , S_z , ...), räumliche (S_{al} , S_{tr} , ...) und hybride, eine Mischung von vertikal und horizontaler Skale, z. B. Steigungen (S_{dq} , S_{dr} , ...), ferner in funktionsorientierte Kenngrößen, z. B. von Verteilungsfunktionen in 3D (S_k , S_{pk} , S_{vk} , ACF , ...) und damit verbunden volumenhafte (V_m , V_v , ...) und strukturorientierte Kenngrößen. Letztere beziehen sich auf die Darstellung einzelner Strukturen, wie z. B. Riefenkanälen, Wasserscheiden, etc. Zur Charakterisierung werden hier Techniken der Orographie einem Spezialgebiet der Geowissenschaften benutzt, wobei z. B. Gebirgslandschaften charakterisiert werden.

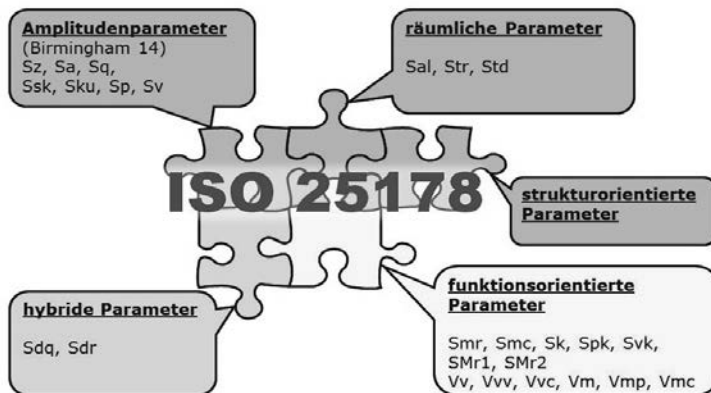


Bild 1: Zusammenstellung der flächenhaften Kenngrößen nach Amplituden, räumlichen, hybriden, funktionsorientierten und strukturierten Parametern.

4. Geräteeigenschaften – taktil - optisch

Bei der Aufstellung der ISO 25178 Serie (Tabelle 1) wurde zwischen Gerätespezifikationen und der Gerätekalibrierung unterschieden. Ohne hier auf die geschichtliche Entwicklung eingehen zu wollen, sollen alle verfahrensunabhängigen Eigenschaften in der ISO 25178-600 zusammengestellt werden. Die spezifischen Eigenschaften von Geräten sind dann in den folgenden Blättern der 600 Serie beschrieben (siehe Tabelle 2). Zur Kalibrierung bzw. Verifizierung der Geräte sollen im Regelfall Normale benutzt werden. Dabei setzt man voraus, dass die Hersteller schon eine gewisse Grundkalibrierung des Gerätes, wie. z. B. nach VDI/VDE GMA 2655 Blatt 1.1 bzw. Blatt 1.2, durchgeführt haben.

Tabelle 1: Normen der ISO 25178 Serie (www.din.de Stand Mai 2016)

| Teil | Bezeichnung | Status | Jahr |
|------|---|-----------------|---------|
| 1 | Flächenhaft Eintragung von Oberflächenbeschaffenheit | DIN-Normentwurf | 2013-02 |
| 2 | Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen | DIN-Norm | 2012-09 |
| 3 | Spezifikationsoperatoren | DIN-Norm | 2012-11 |
| 6 | Klassifizierung von Methoden zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit | DIN-Norm | 2010-06 |
| 70 | Maßverkörperungen | DIN-Norm | 2014-08 |
| 71 | Software Normale | DIN-Norm | 2013-03 |
| 72 | XML Dateiformat x3p | DIN-Normentwurf | 2015-10 |
| 600 | Metrological characteristics for areal-topography measuring methods | ISO in Arbeit | |
| 601 | Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster) | DIN-Norm | 2011-01 |
| 602 | Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde) | DIN-Norm | 2011-01 |
| 603 | Merkmale von berührungslos messenden Geräten (phasenschiebe interferometrische Mikroskopie) | DIN-Norm | 2014-02 |
| 604 | Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Weißlicht-Interferometrie) | DIN-Norm | 2013-12 |
| 605 | Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Punkt-Autofokus-Sensor) | DIN-Norm | 2014-06 |
| 606 | Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Fokusvariation) | DIN-Normentwurf | 2013-02 |
| 607 | Merkmale von berührungslos messenden Geräten (konfokale Mikroskope) | ISO in Arbeit | |
| 700 | Calibration of metrological characteristics | ISO in Arbeit | |
| 701 | Kalibrierung und Normale für berührend messende Geräte (mit Taster) Deutsche Fassung | DIN-Norm | 2011-01 |

Ein Kernpunkt der Blätter der 600ff und 700ff Serie sind die metrologischen Merkmale der Geräte, wobei die Blätter 600 und 700 die allgemeinen Merkmale enthalten. Verfahrensspezifische Merkmale sind nach Vereinbarung in den folgenden Blättern angeführt. Die Blätter der 600 Serie definieren die Merkmale; die Blätter der 700 Serie beschreiben für den Regelfall die Verfahren zur Kalibrierung.

Tabelle 2: Allgemeine und spezifische Geräteeigenschaften (nach ISO 25178-600)

| Metrologische Merkmale | Symbol | Größter Einfluss entlang | Reference in ISO 25178-600:2015 |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Verstärkungskoeffizient | $\alpha, \alpha_v, \alpha_i$ | x, y, z | 3.1.8. (siehe Abb. 2) |
| Linearitätsabweichung | $\alpha_{x,y,z}$ | x, y, z | 3.1.9 (siehe Abb. 2)) |
| Ebenheitsabweichung | Z_{FLT} | z | 3.1.10 |
| Messrauschen | N_M | z | 3.1.13 |
| Räumliche Topographieauflösung | W_R | z | 3.1.18. |
| Rechtwinkligkeitsabweichung | $\Delta_{PERxy}, \Delta_{PERz,xy}$ | x, y | 3.1.11. |
| Topographietreue | T_{FI} | x, y, z | 3.1.24 |
| Maximal messbare Steigung | Φ_{Ms} | z | 3.1.22 |

5. Normale

Für den Vergleich von Kenngrößen ist es unabdingbar die Geräte zur Messung auf eine einheitliche Basis zu stellen. Hierzu soll man im Regelfall Normale benutzen, mit denen die Geräte kalibriert werden. Normale und Testkörper zur Verifizierung sind in der 25178-70 aufgelistet, wobei für neue Techniken/Verfahren weitere hinzukommen könnten.

Die in 25178-70 gelisteten Normale sind in Tabelle 3 und 4 auszugsweise angeführt. Unterscheiden kann man hierbei in Normale die im Regelfall zur Kalibrierung von metrologischen Merkmalen eingesetzt werden, d.h. die Rückführung sicherstellen und eine Korrektur vornehmen. Dazu zählen die Tiefeneinstell- Stufenhöhen und Lateralnormale. Daneben gibt es noch Normale bzw. Testproben, mit deren Hilfe die Grenzeigenschaften von Geräten verifiziert werden können. So werden z. B. Auflösungsnormale zur Verifizierung der räumlichen Auflösung eines Gerätes eingesetzt.

Tabelle 3: Normale für profilhaft messende Geräte (Auszug aus ISO 25178-70)

| Typ | Bezeichnung | ISO 5436-1: 2000 | ISO 25178-701: 2010 |
|-----|--------------------------------------|------------------|---------------------|
| PPS | Periodische Sinusform | B2 oder C1 | |
| PPT | Periodische Dreiecksform | B2 oder C2 | |
| PPR | Periodische Rechteckform | | |
| PPA | Periodische Bogenform | B2 oder C4 | |
| PGR | Rille, rechteckförmig | A1 | |
| PGC | Rille, kreisförmig | A2 | |
| PRO | Unregelmäßiges Profil | D1 | |
| PCR | Kreisförmiges, unregelmäßiges Profil | D2 | |
| PRI | Prisma | E2 | |
| PRB | Rasierklinge | B3 | |
| PAS | Angenäherte Sinusform | C3 | |
| PCS | Konturnormal | | CS |
| PDG | Doppelrille | | ER1 |
| | | | |

Tabelle 4: Normale für flächenhaft messende Geräte (Auszug aus ISO 25178-70)

| Typ | Bezeichnung | ISO 5436-1: 2000 | ISO 25178-701: 2010 |
|-----|-----------------------|---------------------|------------------------|
| AGP | Rillen, senkrecht | | ER2 |
| AGC | Rille, kreisförmig | | ER3 |
| ASP | Halbkugel | | |
| APS | Ebene – Kugel | | ES |
| ACG | Kreuzgitter | | CG2 |
| ACS | Gekreuzt, sinusförmig | | |
| ARS | Radial, sinusförmig | | |
| ASG | Sternförmige Rillen | | |
| AIR | Unregelmäßig | | |
| AFL | Flache Ebene | | |
| APC | Photochromes Muster | | |
| | | | |

Ähnlich wie bei der Blättern der 600 Serie sind die für alle Geräte im Blatt 700 die Kalibrierungen für den Regelfall zusammengefasst. Die weiteren Blätter der 700 Serie sollen nur noch die speziellen Merkmale der jeweiligen Verfahren beschreiben (siehe auch Tabelle 2). Von der Entwicklung her lagen aber zum Zeitpunkt dieser Entscheidung in der WG 16 des ISO/TC213 Komitees bereits einige Spezifikations-Normen ausgearbeitet vor. Diese sollen erst bei der nächsten Revision überarbeitet werden.

Zu den Kalibrieraufgaben gehört die Kalibrierung der Raumachsen des Gerätes. Hier werden im Regelfall Tiefeneinstell- bzw. Stufenhöhen- und Lateralnormale (Tabelle 3 und 4) benutzt mit denen die Achsen der Geräte auf die SI Einheit der Länge zurückgeführt werden. Im Vergleich zum Kalibrierschein kann man einen Korrekturfaktor ermitteln, der entweder zur Korrektur der Geräteeinstellungen oder aber bei der Korrektur der Auswertung der Messdaten benutzt werden sollte.

Der zweite Typ von Normalen oder Testproben dient dazu, Bereiche und Eigenschaften einzugrenzen. Welchen Radius hat die taktile Sonde, die für die Messung der Topographie eingesetzt wird? Dieser begrenzt durch das „Auflösungs- und/oder Übertragungsverhalten“, d.h. stellt die untere Bandgrenze der Messung dar, während der halbe Raster- oder Bildbereich eine obere Grenze darstellt.

Bei taktilen Messgeräten z. B. ist dies die Tastspitze. Hierfür sollten die Parameter der Tastspitze (Radius, Öffnungswinkel) und die benutzte Antastkraft bekannt sein bzw. mit entsprechenden Proben verifiziert worden sein. Bei optischen Verfahren ist das laterale Auflösungsvermögen intensitätsbedingt durch die Wellenlänge und numerische Apertur der benutzten Optik gegeben. Benötigt wird aber das Übertragungsverhalten für topographische Strukturen. Dieses ist im Regelfall größer als das aus Intensitätsauswertungen bekannte Auflösungs-

vermögen. Zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens gibt es Normale/Testproben, die die untere Grenze aufzeigen können, z: B. Chirpnormal oder Siemensstern.

Neue Normalgenerationen wie z. B. Multistufennormale ermöglichen eine schnelle Überprüfung der Linearität der vertikalen Achse. Diese können zur direkten Kalibrierung der vertikalen Achse über einen größeren Messbereich eingesetzt werden. Wichtig ist dies für Formmessungen, bei denen Nichtlinearitäten in den Achsen zu Verzerrungen und Fehlmessungen führen.

In Bezug auf die Rauheitsmesstechnik werden Raunormale eingesetzt, die mit sehr speziellen Eigenschaften eine Verifizierung der Geräteeignung für die Rauheitsmesstechnik ermöglichen. In 2D haben sich profilhafte, d.h. geschliffene oder gedrehte Oberflächenstrukturen mit einer Profilwiederholung als besonders geeignet herausgestellt. Damit kann man einfach prüfen, ob das benutzte Gerät für die Messung eingesetzt werden kann, auch wenn die Messposition nicht genau eingehalten wird. Für die flächenhafte Messung sind verschiedene Proben entwickelt und am Markt verfügbar. Eine Kalibrierung wäre derzeit streng normgerecht allerdings nur mit taktilen Geräten möglich, da nur hierzu die entsprechenden Normen (ISO 25178-601, ISO 25178-701) vorliegen. Andererseits gibt es für optische Geräte einen großen Bedarf. Hier sollte man jedoch die weiterführenden Arbeiten zu den Blättern der 600 bzw. 700 Serie abwarten. Eine profilhafte Kalibrierung von flächenhaften Normalen lässt leider nur sehr begrenzte Aussagen zu.

7. Messdaten und –aufbereitung 2D – 3D

Rauheit ist nach ISO 3274 eine höhere Abweichung der Oberfläche von ihrer gewünschten Gestalt, d.h. ein verbleibender Rest, der nach einem entsprechenden Formabzug und Abtrennung der Welligkeit übrigbleibt. Insofern müssen die aufgenommenen Messdaten um diese Beiträge entfernt werden. Dargestellt ist dies für die flächenhafte Messung von Kenngrößen in Bild 2.

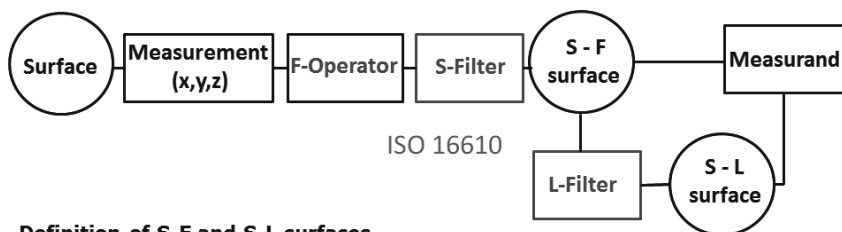


Bild 2: : Aufbereitung der Messdaten für flächenhafte Kenngrößen.

Grundsätzlich gilt es die Daten bzgl. des Rauschens zu optimieren. Hier wird analog zur profilhalten Messtechnik ein S-Filter eingesetzt, das im Wesentlichen als Tiefpassfilter alle höheren Frequenzen oberhalb des „Informationslimits“ abschneidet. In der profilhalten Messtechnik liegt dieser Wert beim halben Durchmesser der Tastspitze. Angewendet wird hier im Regelfall ein phasenkorrektes Gaußfilter mit einer Dämpfung von 50% beim L_s -Wert. Die verschiedenen nutzbaren Filter sind in der Norm ISO 16610 der WG 15 „Filter“ des ISO/TC213 Komitees beschrieben. Damit verbunden sind gewisse Messlängen einzuhalten, die in sog. Nesting-Index-Tabellen, getrennt nach mechanischer (Tabelle 5) und optischer Abtastung (Tabelle 6), definiert worden sind.

Tabelle 5: Profilhafte Filter der ISO 16610-Serie

| ISO 16610 Teil | Bezeichnung | Status |
|----------------|---|---------|
| 1 | Überblick und Definitionen | 2015-11 |
| 20 | funktionsweise lineare Filter | 2015-12 |
| 21 | Gaußfilter | 2013-06 |
| 22 | Splinefilter | 2016-04 |
| 28 | Profilfilter: Endeffekte | 2015-09 |
| 29 | Lineare Profilfilter: Spline-Wavelets | 2016-04 |
| 30 | funktionsweise robuste Filter | |
| 31 | Robuste Profilfilter: Gaußsche Regressionsfilter | 2015-09 |
| 32 | robustes Splinefilter | |
| 40 | Morphologische Profilfilter: Grundlegende Konzepte | 2012-10 |
| 41 | Morphologische Profilfilter: Filter mit Kreisscheibe und horizontaler Strecke | 2015-12 |
| 49 | Morphologische Profilfilter: Skalenraumverfahren | 2015-12 |

Tabelle 6: Flächenhafte Filter der ISO 16610-Serie

| ISO 16610 Teil | Bezeichnung | Status (DE) |
|----------------|---|----------------|
| 60 | Lineare Flächenfilter | 2016-03 |
| 61 | Lineare Flächenfilter: Gauß-Filter | 2016-04 |
| 62 | Lineare Flächenfilter: Spline | |
| 69 | Lineare Flächenfilter: Spline Wavelets | |
| 70 | Robuste Flächenfilter | |
| 71 | Robuste Flächenfilter: Gaußsche Regressionsfilter | 2014-12 |
| 72 | Robuste Flächenfilter: Spline | |
| 80 | Morphologische Flächenfilterung | |
| 81 | Morphologische Flächenfilterung: Kugel und horizontal segmentierende Filter | |
| 85 | Morphologische Flächenfilterung: Segmentierung | 2013-05 |

Tabelle 7: Nesting Index für taktile und optische Methoden

| S-Filter Nesting Index | Max. Messpunktabstand μm | Max. Tastspitzenradius μm |
|------------------------|--|---|
| ... | ... | ... |
| 0,001 | 0,2 | 0,7 |
| 0,002 | 0,4 | 1,4 |
| 0,0025 | 0,5 | 2,0 |
| 0,005 | 1,0 | 3,5 |
| 0,008 | 1,5 | 5,0 |
| 0,010 | 2,0 | 7,0 |
| ... | ... | ... |

Tabelle 8: Nesting Index für optische Methoden

| S-Filter Nesting Index | Max. Messpunktabstand μm | Max. laterale Periode μm |
|------------------------|--|--|
| ... | ... | ... |
| 0,001 | 0,3 | 1,0 |
| 0,002 | 0,6 | 2,0 |
| 0,0025 | 0,8 | 2,5 |
| 0,005 | 1,5 | 5,0 |
| 0,008 | 2,5 | 8,0 |
| 0,01 | 3,0 | 10 |
| ... | ... | ... |

Für die Form sollen sog. Form Operatoren eingesetzt werden. Bei einfachen Oberflächen ist dies eine Ebene erster Ordnung, bei zylinder- oder kugelförmigen Oberflächen, der Abzug einer angepassten Zylinder- oder Kugelform. Komplexere Oberflächenstrukturen, wie z. B. periodische Gitter oder komplexere periodische Oberflächenfeatures, können über entsprechende Operatoren berücksichtigt werden. Allerdings sind hier die Vorgaben seitens der Normung noch sehr eingeschränkt. Nach Abzug der Form sorgt das L-Filter für die Entfernung der Welligkeit. Übrig bleibt ein S-L Datensatz, aus dem die flächenhaften Kenngrößen berechnet werden können.

Neben den flächenhaften Kennwerten können aber durch Extraktion einzelner Profile und Anwendung entsprechender Operatoren bzw. Filter auch profilhafte Kennwerte ermittelt werden. Bei Ansatz für eine 2D-Norm, die in der WG 16 des ISO/TC 213 Komitees in Bearbeitung ist, möchte man dieses umsetzen.

8. Messung und Messunsicherheit

Bei der Messung an Oberflächen müssen die Erkenntnisse der Oberfläche und des Gerätes angepasst werden. Welchen Bereich der Oberfläche muss ich erfassen, um eine Aussage über die gesamte Oberfläche zu ermöglichen? An wieviel Stellen muss ich messen, um eine sichere Statistik und stabile und aussagekräftige Kennwerte zu erhalten? Ähnlich wie bei der

profilhalten Norm, bei der in Richtung der größten zu erwartenden Rauheit zu messen ist, gibt es in der flächenhaften Messung das Problem der richtigen Stichprobenentnahme. Sicherlich sollte man vor der Messung sein Gerät kalibrieren und sich durch Messung an Raunormalen vergewissern, dass das Gerät für diese Aufgaben geeignet ist. Der größte Anteil an der ermittelten Information über die Oberfläche rührt aber aus der Erfahrung des Experten vor Ort und dessen Wissen über die Oberfläche und das gewünschte funktionale Verhalten her. Dies spiegelt sich letztendlich in der Messunsicherheit wieder. Bild 3 zeigt ein Diagramm, dass die verschiedenen Beiträge zur Messunsicherheit bei profilhaften Messungen darstellt. Während bei Tiefeneinstellnormalen noch ein Großteil aus der Rückführung und den Geräteeigenschaften stammt, nehmen mit steigender Komplexität der Oberfläche die unbekannten systematischen und die statistischen Anteile stark zu.

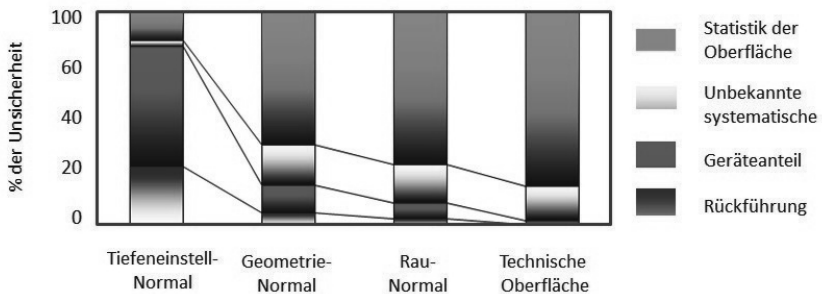


Bild 3: Anteile der Messunsicherheit bei profilhafter Messung an verschiedenen Normalen und Technischen Oberflächen aus Rückführung, aus Geräteanteil, durch unbekannte systematische und statistische Eigenschaften bei verschiedenen Normaltypen.

Beiträge zur Messunsicherheit bei deflektometrischen Messverfahren

Systematische und stochastische Störeinflüsse

Prof. Dr.-Ing. **Rainer Tutsch**, Dr.-Ing. **Marc Fischer**,
Institut für Produktionsmesstechnik, TU Braunschweig

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden die deflektometrischen Verfahren zur Messung spiegelnder Oberflächen und transparenter Objekte erläutert. In allen Fällen dienen Flachbildschirme zur Erzeugung der Referenzmuster und elektronische Kameras zur Bildaufnahme. Nichtideales Verhalten des Monitors führt zu unterschiedlichen systematischen Messabweichungen, deren wichtigste hier diskutiert werden. Der Störeinfluß der Kameras wird im Wesentlichen durch ihr Rauschen bestimmt. Eine neu entwickelte Vorgehensweise zur Abschätzung der resultierenden stochastischen Abweichungen wird vorgestellt.

Abstract

In this paper we present deflectometric techniques for the measurement of specular surfaces and transparent objects. In both cases flat screen monitors are applied for the generation of reference patterns and electronic cameras are used for image capture. Non-ideal properties of the monitor give rise to systematic errors. The most critical ones are discussed in the paper. The main error source caused by the electronic cameras is their noise. An innovative procedure for the estimation of the resulting stochastic errors is presented.

1. Deflektometrische Messverfahren

In diesem Manuskript werden optische Abbildungssysteme stark abstrahiert dargestellt, wie es in der Photogrammetrie üblich ist (Bild 1).

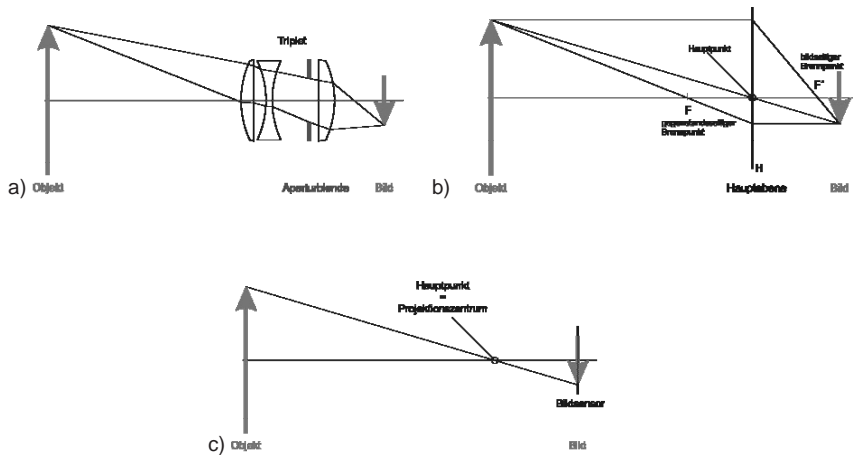


Bild 1: Darstellung von Abbildungsstrahlengängen

- a) Strahlverfolgung durch ein Linsensystem
- b) Abstraktionsstufe 1: Ersetzen des Linsensystems durch eine Hauptebene und zwei Brennpunkte
- c) Abstraktionsstufe 2: Ersetzen des Linsensystems durch einen Hauptpunkt

Auf dem Triangulationsprinzip basierende optische Messgeräte kommen in vielen industriellen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Sie basieren entweder auf einer strukturierten Beleuchtung der Oberfläche, z.B. mit definierten Streifenmustern und der Aufnahme der beleuchteten Oberfläche mit einer elektronischen Kamera (aktive Triangulation) oder auf der Kombination zweier oder mehr elektronischer Kameras (Photogrammetrie, passive Triangulation).

Die Verfahren der aktiven und passiven Triangulation setzen eine optische Abbildung der Werkstückoberfläche auf den Bildsensor voraus. Dies erfordert einen hinreichend großen diffusen Anteil im von der Oberfläche rückgestreuten Licht. Bei spiegelnden Oberflächen ist der diffus gestreute Anteil sehr klein, im Idealfall verschwindet er sogar. Eine ideal spiegelnde Fläche ist daher nicht direkt sichtbar, ihr Vorhandensein kann sich jedoch auf die Abbildung anderer Objekte auswirken.

Es ist eine alltägliche Beobachtung, dass durch gekrümmte spiegelnde Oberflächen erzeugte Spiegelbilder charakteristische Verzerrungen aufweisen, die eine Information über die geometrische Form der Oberfläche enthalten. Seit langem wird dies genutzt, um die Gleich-

förmigkeit polierter Oberflächen zu prüfen, indem regelmäßige Linienmuster daran gespiegelt werden. Zur flexiblen und schnell wechselbaren Darstellung der Linienmuster kommt meist ein Flachbildschirm zum Einsatz. Der Vergleich mit einem als Gutteil bekannten Meisterteil ist z.B. dadurch möglich, dass das Meisterteil in der Prüfvorrichtung durch das zu prüfende Serienteil ersetzt wird. Eine elektronische Kamera liefert je ein Bild des am Meisterteil und am Serienteil gespiegelten Musters, welche in einem Messrechner gespeichert und mittels digitaler Bildverarbeitung verglichen werden. Abweichungen im gespiegelten Muster weisen auf Formabweichungen des Serienteils hin [1].

Diese als Deflektometrie bekannte Technik eignet sich sehr gut zum schnellen Vergleich, nicht aber für die Absolutmessung der Oberflächenform. Der Grund dafür ist, dass es in der Regel mehrere Möglichkeiten gibt, Spiegelemente so zu formen und zu positionieren, dass aus einer vorgegebenen Blickrichtung das Bild eines Objekts eine bestimmte Verzerrung aufweist.

Zur Aufhebung der Mehrdeutigkeit ist zusätzliche Information erforderlich. Im einfachsten Fall werden Annahmen über die spiegelnde Oberfläche gemacht, z.B. dass sie durch eine stetige Funktion beschreibbar ist. Wird dann die Position eines einzelner Oberflächenpunkts mit einem anderen Messgerät bestimmt, kann von diesem ausgehend eine eindeutige Spiegelfläche berechnet werden [2].

Als besonders leistungsfähige Ansätze der absolut messenden Deflektometrie haben sich einerseits Verfahren herausgestellt, bei denen zwei Kameras mit unterschiedlicher Betrachtungsrichtung eingesetzt werden (Bild 2) [3], andererseits Verfahren, bei denen der Monitor, auf dem die Referenzmuster dargestellt werden, zwischen zwei Messpositionen verschoben wird (Bild 3) [4].

Die Kombination dieser beiden Ansätze ermöglicht auch die Bestimmung der Oberflächen transparenter Objekte, z.B. von optischen Linsen (Bild 4, Bild 5). Mit dieser Technik kann erstmals die Oberflächengeometrie beider Linsenflächen, ihre relative Lage und Orientierung und der Brechungsindex des Linsenmaterials mit einem einzigen Messvorgang ermittelt werden [5].

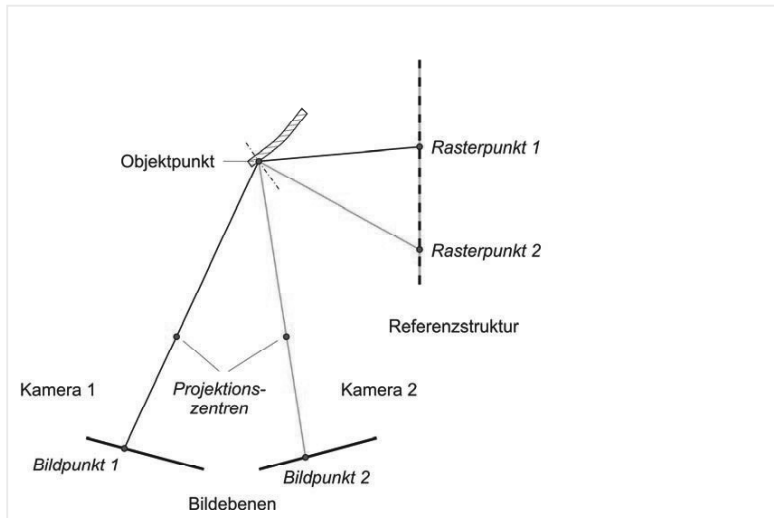


Bild 2: Absolut messende Deflektometrie mittels zweier Kameras
(Referenzstruktur = Monitorbild)

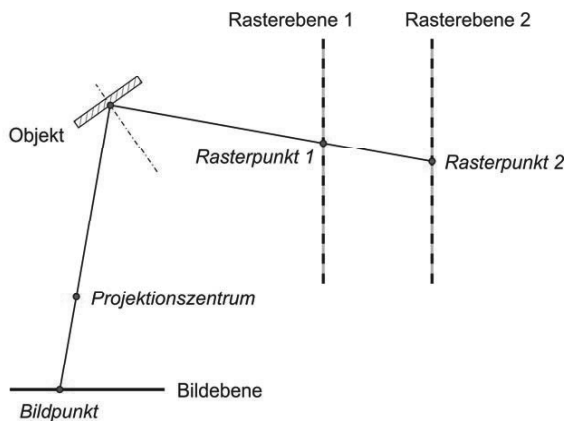


Bild 3: Absolut messende Deflektometrie mittels eines verschiebbaren Monitors
(Rasterebene = Monitorbild)

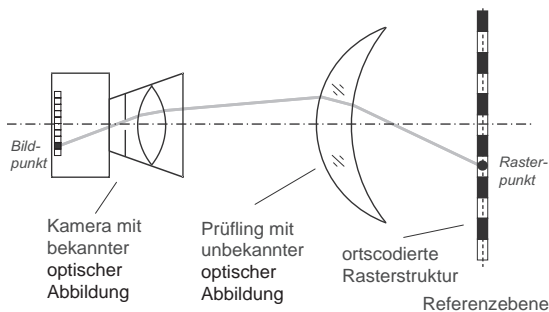


Bild 4: Prinzip der Deflektometrie in Transmission, Messen der Geometrie einer Linse

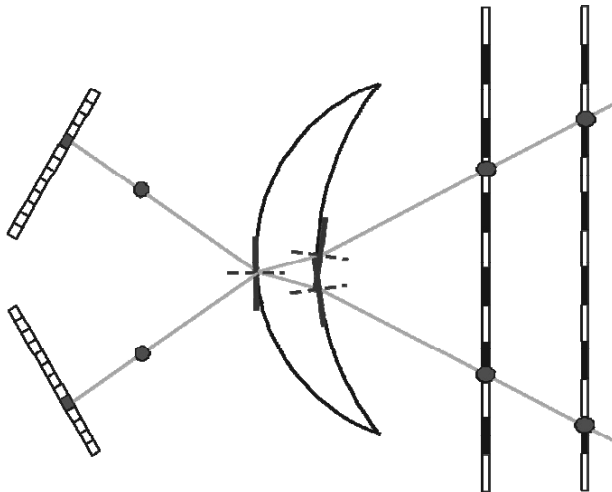


Bild 5: Kombination der Verschiebung des Monitors und des Einsatzes mehrerer Kameras

2. Systematische Störeinflüsse

Bei deflektometrischen Messverfahren dient ein Flachbildschirm zur Darstellung von Referenzmustern, in der Regel Streifenmuster mit sinusförmigem Helligkeitsverlauf. Für Präzisionsmessungen muss berücksichtigt werden, dass LCD-Monitore keine idealen Komponenten sind. Insbesondere entsteht das Bild nicht auf der Bildschirmoberfläche, sondern in einer Flüssigkristallschicht hinter einer Glasplatte, was aufgrund der Brechung zu einem Strahlver-

satz führt. Die Monitorfläche ist auch nicht ideal eben und die Helligkeitsverteilung ist – je nach Bauart des Monitors – von der Blickrichtung abhängig.

a) Einfluss der Glasplatte

Bild 6 zeigt die Ablenkung des Lichts beim Durchgang durch die Glasplatte. Aus der Betrachtungsrichtung α sieht man einen Punkt des in der LCD-Schicht dargestellten Musters, der nicht der geradlinigen Verlängerung des Sichtstrahls entspricht.

Der Versatz aufgrund der Brechung beträgt: $\Delta x = d \tan\left(\arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right)\right)$

Bei bekannten Werten für Dicke und Brechungsindex der Platte kann die Abweichung korrigiert werden, allerdings sind diese Angaben für Seriengeräte nicht verfügbar.

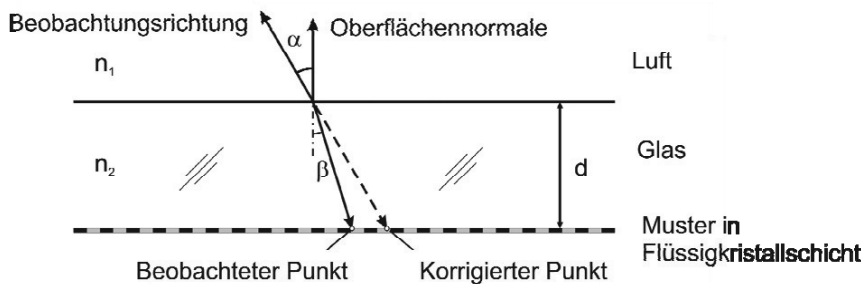


Bild 6: Ablenkung des Lichts beim Durchgang durch eine Glasplatte

Bild 7 zeigt eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Dicke und des Brechungsindizes der Glasplatte. Eine Anzahl von Marken wird auf die Oberfläche der Glasplatte geklebt. Andere Marken werden mit dem LCD-Bildschirm dargestellt. Bei einer Änderung der Blickrichtung wandern die aufgeklebten und die dargestellten Marken relativ zueinander und aus dieser Relativbewegung sind die Parameter berechenbar [6].

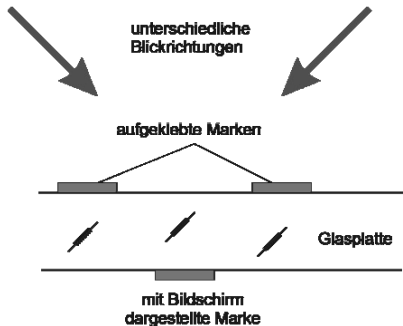


Bild 7: Ermittlung der Parameter der Glasplatte

b) Ebenheitsabweichung des Monitors

Flachbildschirme haben keine ideal ebene Oberfläche. In Bild 8 ist die gemessene reale Oberflächenform eines Computermonitors dargestellt. Die Ebenheitsabweichung beträgt etwa $\pm 0,5\text{ mm}$, was als typischer Wert angesehen werden kann. Bei Präzisionsmessungen muss dies berücksichtigt werden.

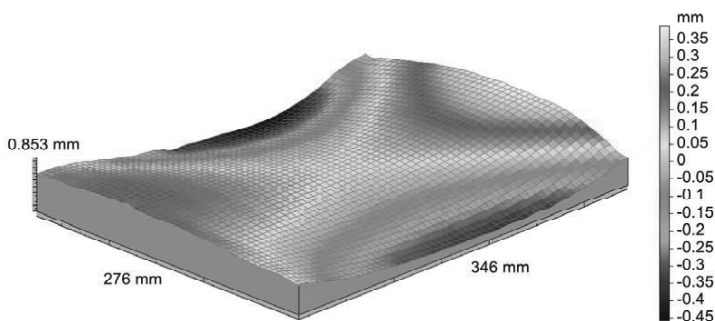


Bild 8: Ebenheitsabweichung eines Computermonitors

c) Winkelabhängiger Kontrast

Es ist ein bekanntes Phänomen, dass sich der Bildeindruck bei einem LCD-Bildschirm ändert, wenn man aus verschiedenen Richtungen auf den Monitor blickt. Wie stark ausgeprägt dieser Effekt ist, hängt von der Bauform des Monitors ab. Kostengünstige Einstiegsgeräte

basieren meist auf der „Twisted Nematic“ (TN) Technik. Wie in Bild 9 zu sehen, werden die Flüssigkristalle bei diesen durch das elektrische Feld aus der Bildebene herausgedreht. Dies führt zu einer stark blickwinkelabhängigen lokalen Helligkeitskennlinie (Bild 10). Bei „Multi-Domain Vertical Switching“ (MVA) Monitoren ist die Blickwinkelabhängigkeit durch Kombination mehrerer Kipprichtungen der Flüssigkristallmoleküle in einem Pixel reduziert, aber für deflektometrische Anwendungen ebenfalls zu hoch. Dagegen verläuft bei „In Plane Switching“ (IPS) Flachbildschirmen die Drehung innerhalb der Monitorebene (Bild 9) und die Helligkeit ist nahezu unabhängig von der Betrachtungsrichtung. Als Konsequenz sollten ausschließlich IPS-Monitore zur Erzeugung der Referenzmuster in der Deflektometrie eingesetzt werden [7].

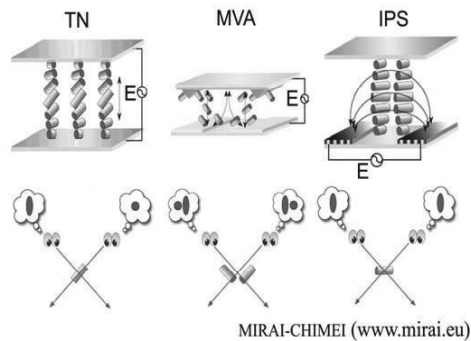


Bild 9: Betrachtungswinkelabhängigkeit unterschiedlicher LCD-Bauformen

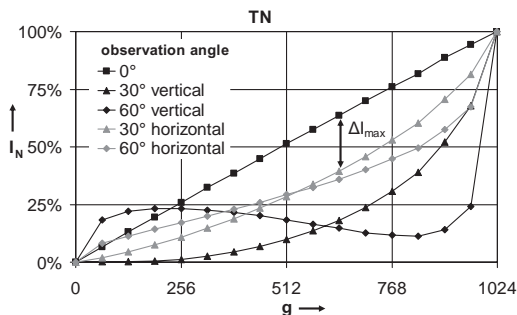


Bild 10: Abhängigkeit der Intensitätskennlinie bei einem TN-Monitor vom Betrachtungswinkel
g: Ansteuerwert für die Helligkeit. Dieser Monitor wird mit 10 Bit angesteuert, der Wert von g kann daher zwischen 0 und 1023 variieren
 I_N : Tatsächliche (gemessene Helligkeit)

3. Stochastische Störeinflüsse

Das am weitesten verbreitete Verfahren in der optischen 3D-Messtechnik zur Identifikation von Punkten einer Szene ist das Phasenschiebeverfahren, das auf der strukturierten Beleuchtung mit einer Serie von Sinusmustern basiert (Bild 11). Für jedes Kamerapixel wird aus den nacheinander aufgenommenen Intensitätswerten ein Phasenwert berechnet. Diese Phasenwerte liefern unter Berücksichtigung des durch die Kalibrierung ermittelten geometrischen Aufbaus des Messsystems die 3D-Geometrie des Messobjekts.

Jedes Messsignal enthält einen gewissen Anteil an störendem Rauschen, so auch die Intensitätsmesswerte der einzelnen Pixel. Wie stark das Rauschen sich als stochastische Abweichung auf den berechneten Phasenwert und damit auf das Messergebnis auswirkt, hängt von der mittleren Helligkeit und dem Hell/Dunkel-Kontrast des Streifenmusters sowie von Kenndaten der verwendeten Kamera ab, die gemäß des Industriestandards EMVA1288 spezifiziert sind und von vielen Herstellern im Datenblatt angegeben werden.

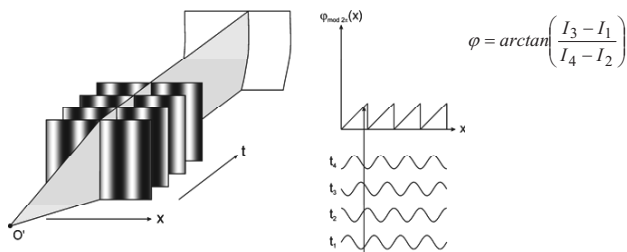


Bild 11: Prinzip des Phasenschiebeverfahrens am Beispiel des weit verbreiteten 4-Schritt-Algorithmus (vier um je 90° verschobene Sinusmuster)

Eine Weiterentwicklung des Phasenschiebeverfahrens ermöglicht es, für jeden Messpunkt zusätzlich zu den berechneten Koordinaten auch eine Unsicherheitsabschätzung anzugeben. Dabei wird das Phasenrauschen für jeden Messpunkt direkt aus den aufgezeichneten Intensitäten ermittelt. Bild 12 zeigt dies am Beispiel einer Kugeloberfläche, wobei die Größe $\frac{2\pi}{\sigma_\varphi}$ dargestellt ist. Dies entspricht der in der interferometrischen Formprüfung üblichen Skalierung auf Bruchteile einer Wellenlänge. Der Zahlenwert „100“ entspricht dann

einem Rauschpegel entsprechend $\frac{\lambda}{100}$. Je größer der Zahlenwert, um so geringer das Rauschen. Bild 12 a zeigt die aus der statistischen Analyse von 100 Wiederholmessungen resultierende Standardabweichung jedes einzelnen Messpunktes. Diesen experimentell ermittelten Unsicherheiten werden die aus einer einzelnen Messung abgeschätzten Unsicherheiten gegenübergestellt (Bild 12 b). Die Übereinstimmung ist sehr gut [8].

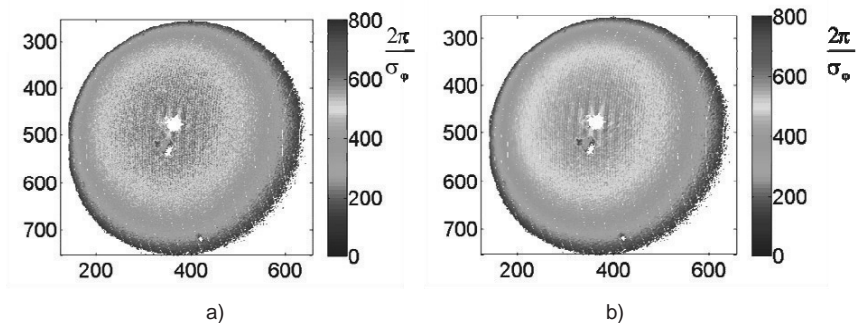


Bild 12: a) Experimentell ermitteltes Phasenrauschen aus Referenzmessung mit 100 Wiederholungen
b) Online-Vorhersage des Phasenrauschens aus den Intensitäten einer Messung

Literatur

- [1] Horneber, C.: Phasenmessende Deflektometrie: ein Verfahren zur hochgenauen Vermessung spiegelnder Oberflächen. Dissertation. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2006
- [2] Li, W. ; Sandner, M. ; Gesierich, A. ; Burke, J.: Absolute optical surface measurement with deflectometry. SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics. 2012, 84940G–84940G
- [3] Knauer, M. C. ; Kaminski, J. ; Häusler, G.: Absolute Phasenmessende Deflektometrie. In: DGaO Proceedings 105. 2004, A 15
- [4] Petz, M., Tutsch, R.: Rasterreflexions-Photogrammetrie zur Messung spiegelnder Oberflächen. tm - Technisches Messen 71 (2004) 7-8, S. 389-397
- [5] Fischer, M. ; Petz, M. ; Tutsch, R.: Modellbasierte deflektometrische Messung von transparenten Objekten. Tm - Technisches Messen 81 (2014) Nr. 4, S. 190–196
- [6] Petz, M. ; Fischer, M. ; Tutsch, R.: Systematic errors in deflectometry induced by use of liquid crystal displays as reference structure. In: 21st IMEKO TC2 Symposium on Photonics in Measurement (Gdansk, Poland, 16.–18. Sep. 2013)
- [7] Fischer, M. ; Petz, M. ; Tutsch, R.: Bewertung von LCD-Monitoren für deflektometrische Messsysteme. In: Sensoren und Messsysteme 2010, Vorträge der 15. ITG/GMA-Fachtagung. (Nürnberg, 18.–19. Mai 2010). VDE VERLAG GmbH, 2010, S. 159–165
- [8] Fischer, M. ; Petz, M. ; Tutsch, R.: Vorhersage des Phasenrauschens in optischen Messsystemen mit strukturierter Beleuchtung. In: tm-Technisches Messen 79 (2012) Nr. 10, S. 451–458

Neuartige Kalibrierinterferometer mit 5 Freiheitsgraden

Kalibrierinterferometer zur simultanen Messung von Weg, Winkel und Geradheit

Dr.-Ing. **Walter Schott**, Dr.-Ing. **Ilko Rahneberg**,
Dr.-Ing. **Denis Dontsov**, SIOS Meßtechnik GmbH

Kurzfassung

In die erreichbare Genauigkeit von linearen Positionierachsen und auch aus ihnen aufgebauten Systemen gehen sämtliche rotatorischen und translatorischen Abweichungen der einzelnen Achsen von der idealen linearen Bewegungsbahn ein. Die messtechnische Beschreibung der Bewegungsbahn eines linear geführten Maschinenteils ist folglich eine der wesentlichsten Aufgaben bei der Inbetriebnahme und Abnahme von Maschinen und Geräten mit linearen Positionierachsen. Eine exakte Kenntnis der Abweichungen ermöglicht sowohl eine Charakterisierung der Gesamtpositionierungsunsicherheit als auch die Erstellung von Korrekturfeldern zur Kompensation systematischer Abweichungen der Bewegungsabläufe. In diesem Beitrag werden neuartige Kalibrierinterferometer vorgestellt, die die hochgenaue Erfassung der linearen Position, des Nick- und Gierwinkels sowie der Geradheitskomponenten ermöglichen. Es wird zunächst die Funktionsweise der Interferometer und die Ausrichtung der Messsysteme erläutert sowie auf die erreichbare Messunsicherheit der jeweiligen Messung durch die Kalibrierinterferometer eingegangen. Anschließend werden spezifische Vorteile der synchronen Messung mehrerer Freiheitsgrade anhand von Anwendungsbeispielen diskutiert.

1. Einleitung

Lineare Positionierachsen kommen, als grundlegende Baugruppen in vielfältigen Anwendungen der Fertigungs-, Mess- und Gerätetechnik, wie z. B. Werkzeugmaschinen und Koordinatenmessgeräten zum Einsatz. Dabei ergibt sich, anwendungsspezifisch (Werkzeugmaschine, Positioniersystem, Werkzeugmaschine etc.) ein breites Spektrum an Positionierbereichen und Genauigkeitsanforderungen.

In die erreichbare Genauigkeit des Gesamtsystems gehen dabei sämtliche rotatorischen und translatorischen Abweichungen der einzelnen Achsen von der idealen linearen Bewegungsbahn ein (s. Abbildung 1). Die messtechnische Beschreibung der Bewegungsbahn eines linear geführten Maschinenteils ist folglich eine der wesentlichsten Aufgaben bei der Inbetriebnahme und bei der Abnahme von Maschinen und Geräten mit linearen Positionierachsen. Eine exakte Kenntnis der Abweichungen ermöglicht sowohl eine Charakterisierung der

Gesamtpositionierungsunsicherheit als auch die Erstellung von Korrekturfeldern zur Kompensation systematischer Abweichungen der Bewegungsabläufe. Interferometrische Verfahren sind in der Maschinenvermessung etabliert und ermöglichen in unterschiedlichen Aufbauten hochgenaue Positions- und Winkelmessungen, wobei die einzelnen Bewegungskomponenten typischerweise nacheinander aufgenommen werden. Neben der hohen erreichbaren Messauflösung und der Linearität ist ein entscheidender Vorteil der interferometrischen Messungen die Rückführbarkeit auf die Meterdefinition durch Anschluss der als Maßstab eingesetzten Laserquellen.

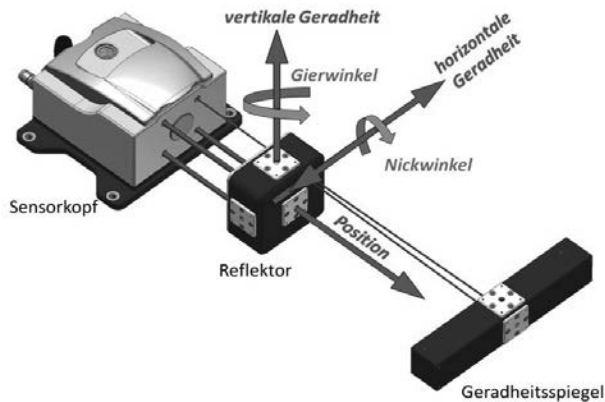


Bild 1: Messgrößen des Kalibrierinterferometers

Die hier vorgestellten neuartigen Kalibrierinterferometer ermöglichen die hochgenaue Erfassung der linearen Position, des Nick- und Gierwinkels sowie der Geradheitskomponenten, wobei jeweils vier Bewegungskomponenten synchron gemessen werden.

2. Aufbau und Eigenschaften des Kalibrierinterferometers

Die Längen- und Winkelmessung mit dem Kalibrierinterferometer basiert auf dem bereits in Planspiegelinterferometern eingesetzten Homodyn-Michelson-Interferometer-Prinzip [1,2]. Die Messung der Geradheitskomponenten erfolgt mit einem Geradheitsinterferometer, basierend auf Wollaston-Prisma und Winkelspiegel [6].

Die Funktionsgruppen des Interferometers sind in Abbildung 2 dargestellt.

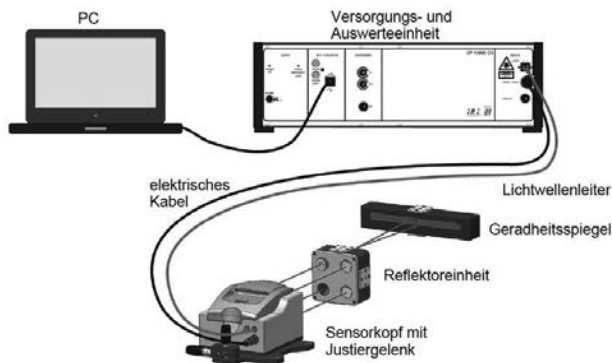


Bild 2: Funktionsgruppen des Kalibrierinterferometers

Durch den Aufbau mit fasergekoppeltem Sensorkopf, Reflektoreinheit und räumlich getrennter Versorgungs- und Auswerteeinheit wird eine einfache Handhabung und Systemausrichtung gewährleistet. Im Sensorkopf des Kalibrierinterferometers befinden sich die Interferometeroptiken für drei unabhängige Längenmesskanäle zur Messung der linearen Position, des Nick- und Gierwinkels sowie ein weiterer Interferometerkanal zur Erfassung der horizontalen und vertikalen Geradheit der Reflektoreinheit. Der Sensorkopf ist über einen Lichtwellenleiter (LWL) und ein Signalkabel mit der Versorgungs- und Auswerteeinheit verbunden. Die drei Kanäle zur Längen- und Winkelmessung werden alle durch denselben stabilisierten HeNe-Laser mit einer Frequenzstabilität $< 2 \cdot 10^{-8}$ versorgt, der den Maßstab der Messung darstellt. Die Messauflösung der interferometrischen Längenmessung beträgt 20 pm. Der Messbereich der Geradheitsmessung beträgt ± 4 mm. Durch die LWL-Kopplung wird eine thermische Beeinflussung des Messobjektes bzw. der Messumgebung durch die Laserquelle verhindert.

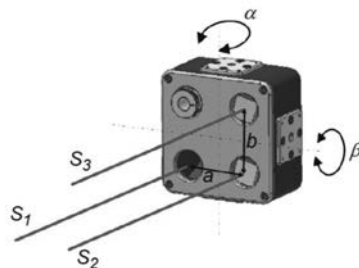


Bild 3: Basisabstände im Messreflektor

Die Reflektoreinheit (s. Abbildung 3) ist eine Kombination aus drei Retroreflektoren zur Längen- und Winkelmessung und einem Wollaston-Prisma zur Geradheitsmessung. Der Einsatz von Retroreflektoren in Form von Tripelspiegeln ermöglicht gegenüber Planspiegelinterferometern gleicher Bauart [3] eine Erhöhung des maximalen Kippwinkels der Reflektoren, also des Messbereichs der Winkelmessung auf über $\pm 5^\circ$, wobei jedoch im Unterschied zu typischen Interferometern mit Tripelreflektoren die Messstrahlen in sich reflektiert werden und somit die Messachsen repräsentieren. Die drei Retroreflektoren sind in einem Abstand von 50 mm angeordnet. Mit diesen Basisabständen und der interferometrischen Messauflösung folgt eine Winkelmessauflösung von 0,0004 Winkelsekunden ($0,002 \mu\text{rad}$).

$$\alpha = \arcsin \frac{s_2 - s_1}{a}$$

Als Geradheitsoptik dient ein Wollaston-Prisma, das einen Laserstrahl unter dem Winkel 2γ v-förmig in zwei Messstrahlen aufspaltet. Die Messstrahlen werden am Geradheitsspiegel reflektiert.

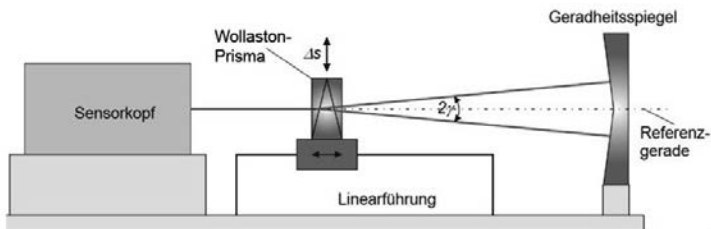


Bild 4: Strahlengang der interferometrischen Geradheitsmessung

Die Spiegelflächen des Geradheitsspiegels sind entsprechend dem Aufspaltwinkel des verwendeten Wollaston-Prismas geneigt. Relativverschiebungen Δs von Wollaston-Prisma und Geradheitsspiegel bewirken proportionale Änderungen der optischen Weglängen der beiden Teilstrahlen. Das eingesetzte Wollaston-Prisma realisiert einen Aufspaltwinkel der Messstrahlen für die Geradheitsmessung von etwa $1,5^\circ$, wodurch eine Messauflösung von $0,01 \mu\text{m}$ erreicht wird. Dabei stellt die Symmetrieachse des Geradheitsspiegels die Referenzgerade dar, zu der die Geradheit in senkrechter Richtung erfasst wird. Um Messabweichungen durch Winkelbewegungen des Geradheitsspiegels zu vermeiden, wird die Messung zumeist mit ruhendem Geradheitsspiegel und bewegtem Wollaston-Prisma durchgeführt. Der mögliche achsiale Verfahrbereich wird durch die Länge der zu den Geradheitsmessstrahlen jeweilig senkrecht stehenden Teilsiegelflächen des Geradheitsspiegels bestimmt.

Der Abstand zwischen dem Messreflektor und dem Geradheitsspiegel muss zwischen 0,1 m und 6,5 m liegen und ist im linearen Messbereich frei wählbar.

Durch einen im Sensorkopf integrierten optoelektronischen Detektor (PSD) wird die laterale Position des rücklaufenden Messstrahls erfasst. Dies ermöglicht eine Messung der Verschiebung des Messreflektors quer zur Achse der Messstrahlen, und außerdem kann in Kombination mit einem in den Messreflektor eingesetzten Justierspiegel die Winkellage der Reflektornormalen zur Strahlachse absolut erfasst werden. Während die vom Abstand L des Reflektors abhängige Verlagerung des Reflexes (s. Abbildung 5) bei langen Führungen auch visuell beurteilt werden kann, ermöglicht die Auflösung der PSD im Mikrometerbereich auch bei sehr kurzen Positionierachsen eine exakte Ausrichtung des Kalibrierinterferometers.

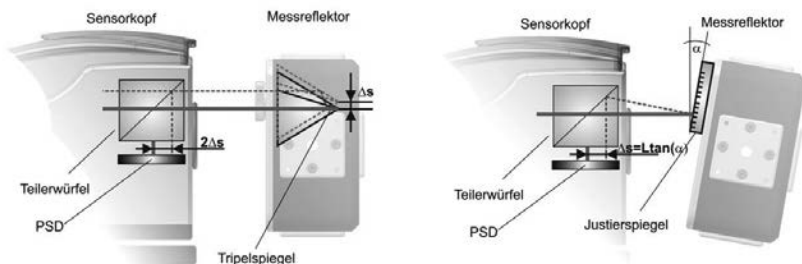


Bild 5: Strahlengang bei Ausrichtung der lateralen Verschiebung (links) und der Verkipfung des Messreflektors mit Justierspiegel (rechts)

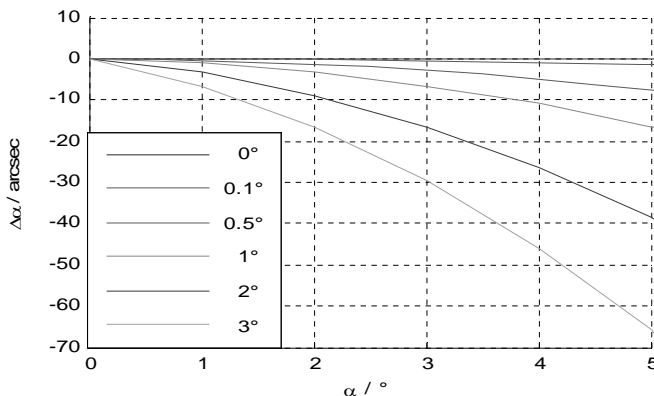


Bild 6: Winkelmessabweichungen in Abhängigkeit vom Messwert für verschiedene Startwinkel

Die Winkeljustage des Messreflektors bezieht sich dabei auf die interferometrische Winkelmessung, bei der prinzipbedingt durch einen in Ausgangslage nicht senkrecht auf den Messtrahlen stehenden Reflektor relative Messabweichungen auftreten. Obwohl die Abweichungen selbst bei Startwinkeln von 3° nur im Bereich von 0,5% liegen, können so in Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen im Zusammenhang mit dem großen Winkelmessbereich relevante Abweichungen auftreten. Durch die zuvor beschriebene Ausrichtung des Messsystems mit der PSD können selbst für kurze Verfahrbereiche ($<10\text{ mm}$) Startwinkel unter $0,1^\circ$ realisiert werden, wodurch die resultierenden Abweichungen vernachlässigbar werden.

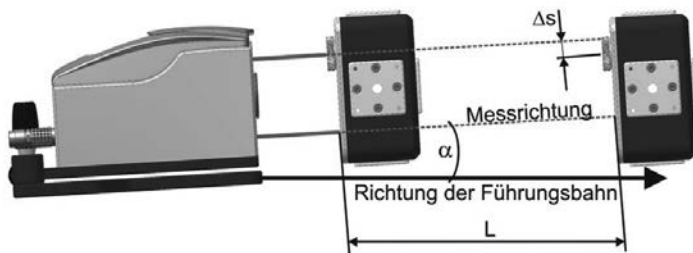


Bild 7: Messabweichungen durch Ausrichtung der Messachse

Die ebenfalls PSD-gestützte Erfassung der lateralen Verschiebung ermöglicht eine genaue Ausrichtung von Verfahrachse und Messachse des Interferometers um Messabweichungen der Form $\Delta L_{\cos} = L \cdot (1 - \cos \alpha)$ zu vermeiden. Für große Führungen genügt eine visuelle Ausrichtung auf unter $\Delta s < 1\text{ mm}$, bei kurzen Führungslängen hingegen ist eine genaue Ausrichtung zwingend erforderlich. So beträgt die Messabweichung $\Delta l_{\text{relativ}} = 200\text{ nm/m}$ bei $\Delta s = 1\text{ mm}$ bei einer Führungslänge von 50 mm , während dieser Anteil bei Ausrichtung mit PSD auf $\Delta s < 10\text{ }\mu\text{m}$ auf $0,02\text{ }\mu\text{m/m}$ fällt.

3. Messunsicherheitsbeiträge

Im Folgenden werden die wesentlichsten Einflüsse auf die Messung mit dem Kalibrierinterferometer dargestellt, und es werden die zu erwartenden Messunsicherheitsbeiträge für die jeweiligen Messgrößen angegeben.

Tabelle 1: Kenngrößen Umweltmessdatenerfassung

| Messgröße | Messbereich | Genauigkeit |
|-------------|----------------|-------------|
| Temperatur | +4...+50 °C | ±0,1 °C |
| Luftdruck | 800...1150 hPa | ± 50 Pa |
| Luftfeuchte | 1%...99% | ±3% |

3.1 Positionsmessung

Wie bereits erwähnt basiert die interferometrische Längenmessung mit dem Kalibrierinterferometer auf der Verwendung der Wellenlänge stabilisierter HeNe-Laser als Maßstab. Die der Messung zugrundeliegende Wellenlänge in Luft ist

$$\lambda_{Luft} = \frac{\lambda_0}{n_{Luft}} = \frac{c_0}{f n_{Luft}}$$

mit Vakuumwellenlänge λ_0 , Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 , Frequenz f und Luftbrechzahl n_{Luft} . Die Frequenzstabilität der Laserquelle von $2 \cdot 10^{-8}$ liefert dabei einen vernachlässigbaren Unsicherheitsbeitrag. Die Unsicherheit der Messung mit Laserinterferometern in Luft hängt deshalb maßgeblich von der Genauigkeit der Bestimmung der Luftbrechzahl entlang der Messstrecke ab. Die Luftbrechzahl ist in erster Linie von folgenden Zustandsgrößen der Luft abhängig: Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Weitere Faktoren wie z. B. die Luftzusammensetzung (CO_2 -Gehalt) sind in den meisten Fällen vernachlässigbar. Zur Bestimmung der Wellenlänge in Luft wird die optimierte Edlen-Formel verwendet wobei für erweiterte Bereiche der Zustandsgrößen auch die Ciddor-Formel anwendbar ist [4, 5]. Die Brechzahlkorrektur erfolgt in der Auswertelektronik anhand von mit entsprechenden Umweltsensoren erfassten Werten für Lufttemperatur, -druck und -feuchte. Für die in Tabelle 1 gegebenen Werte ergibt sich ein resultierender Unsicherheitsbeitrag von ±0,1 ppm, wobei auch weitere Faktoren wie Laserstabilität, Demodulationsabweichungen und mögliche Linearitätsfehler enthalten der Interferometer enthalten sind.

3.2 Interferometrische Winkelmessung

Wie in im ersten Abschnitt beschrieben stellt die Ausrichtung des Messreflektors (Startwinkel) eine mögliche Ursache für auftretende Messabweichungen dar. Diese Abweichungen sind hier berücksichtigt, wobei angenommen werden kann, dass eine PSD-basierte Ausrichtung von Nick- und Gierwinkel im Bereich von $< 0,1^\circ$ möglich und der Rollwinkel des Reflektors durch übliche Ausrichtmethoden $< 0,5^\circ$ justierbar ist. Weiterhin geht die Unsicherheit der

Basisabstandskalibrierung als relative Messabweichung in die Winkelmessung ein, sie beträgt $5\text{ }\mu\text{m}$. Der aus allen Beiträgen resultierende relative Messunsicherheitsbeitrag ist $\pm 0,015\%$. Hinzu kommt ein messwertunabhängiger Unsicherheitsbeitrag von $\pm 0,0085$ Winkelsekunden, der maßgeblich aus möglichen Linearitätsabweichungen des Interferometers resultiert.

3.3 Interferometrische Geradheitsmessung

Die Messunsicherheit bei der interferometrischen Geradheitsmessung mit dem Kalibrierinterferometer setzt sich aus drei Anteilen zusammen: einem konstanten Messunsicherheitsbeitrag, einer relativen Messabweichung und einem Beitrag, der von der Messstrecke abhängig ist. Der konstante Anteil resultiert, wie bei der Winkelmessung, aus Nichtlinearitäten und anderen Effekten in Kombination mit der Empfindlichkeit der Geradheitsmessung und ist kleiner als $\pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$. Die relative Messabweichung liegt im Bereich von $0,1\%$. Sie ergibt sich aus Empfindlichkeitsabweichungen durch Fertigungstoleranzen der eingesetzten Wollaston-Prismen sowie Ausrichtfehlern bei der Messung (maximale Drehung des Geradheitsspiegels von 2° um die Verfahrachse).

Der wesentliche Messunsicherheitsbeitrag folgt aus der Topologie des eingesetzten Geradheitsspiegels. Während der Messung wird der Messreflektor entlang der zu charakterisierenden Führung verschoben und die Messstrahlen des Geradheitsinterferometers überstreichen die Spiegelflächen des Geradheitsspiegels, wodurch Abweichungen der Spiegelflächen von idealen Ebenen direkt in das Messergebnis eingehen. Dieser Unsicherheitsbeitrag kann durch Messung nach der Umschlagmethode erheblich reduziert werden. Dabei wird die Messung mit um 180° gedrehtem Geradheitsspiegel wiederholt und der Mittelwert gebildet, sodass sich die Spiegelgeometrie heraushebt, da sie in den zwei Teilmessungen in jeweils entgegengesetzter Richtung in das Messergebnis eingeht.

Der Unsicherheitsbeitrag durch die Spiegelgeometrie wurde aus den auftretenden Grenzwerten bei der Untersuchung mehrerer aufgebauter Geradheitsspiegel ermittelt und beträgt $\pm 0,1\text{ M}^2$ in μm , wobei M der achsiale Verfahrbereich in Metern ist.

Tabelle 2: Übersicht Kennwerte der Messgrößen des Kalibrierinterferometers

| Messgröße | Messbereich | Auflösung | Genauigkeit |
|----------------------|---|--|---|
| Weg | Maximal 50 m | 0,002 nm | $\pm 0.1 \text{ ppm}$ |
| Nick- /Gierwinkel | $\pm 5^\circ$ | 0,002 μrad 0,0004 arcsec | $\pm 0,015 \% \pm 0,0085 \text{ arcsec}$ |
| Geradheit | Messstrecke 0,1...6,5 m, lateral 4 mm | 0,01 μm (0,005 μm) | $\pm 0.1\% \pm 0.1 M^2 \pm 0.1 \mu\text{m}$ |

4. Anwendungsbeispiele und Vorteile der synchronen Messung von Position, Winkel und Geradheit

Die Kalibrierinterferometer dienen wie eingangs beschrieben der Charakterisierung der rotatorischen und translatorischen Führungsabweichungen von linearen Positionierachsen und aus solchen Baugruppen aufgebauten Gesamtsystemen. In Abbildung 8 sind zwei typische Anwendungen dargestellt. Die Linearachse verfügt über einen großen Verfahrbereich, wobei jedoch große Abweichungen von der lineargeführten Bewegung auftreten. Durch die erweiterten Messbereiche für die Winkel- und Geradheitskomponenten sind die Kalibrierinterferometer robust und variabel einsetzbar. Obwohl das Hauptanwendungsgebiet im Bereich der Präzisionswerkzeugmaschinen und Koordinatenmessgeräte liegt, können sie somit auch für derartige Anwendungen reduzierter Genauigkeitsklasse eingesetzt werden. Der Planartisch in Abbildung 8 rechts weist in seinem Verfahrbereich Positionierabweichungen $< 0,1 \mu\text{m}$ und Winkelabweichungen im unteren Winkelsekundenbereich auf.

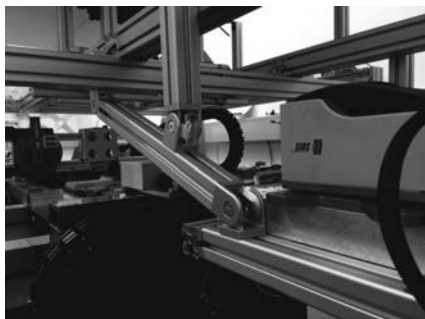


Bild 8: Messung einer Linearführung mit 6 m Positionierbereich (links); Messung an einem luftgelagerten Präzisionsplanartisch mit einem Verfahrbereich von 400x400 mm² (rechts)

Durch die simultane Messung mehrerer Freiheitsgrade wird die erforderliche Messzeit für Abnahmen, Kalibrierungen und Systemanalysen gesenkt.

Ein wesentlicher Vorteil neben der daraus folgenden Kostenreduzierung ist die direkte Zuordnung der Messergebnisse der Einzelgrößen zueinander. Im Folgenden werden einige Zusammenhänge anhand einer typischen Messung einer linearen Positionierachse erläutert. In Abbildung 9 sind die Messwerte der horizontalen und vertikalen Geradheitskomponente dargestellt. Die horizontale Geradheit weist geringe Abweichungen auf, die mit großer Wahrscheinlichkeit aus Fertigungstoleranzen der Führungsflächen resultieren. Die vertikale Geradheit weist klar auf eine Durchbiegung der Führung hin.

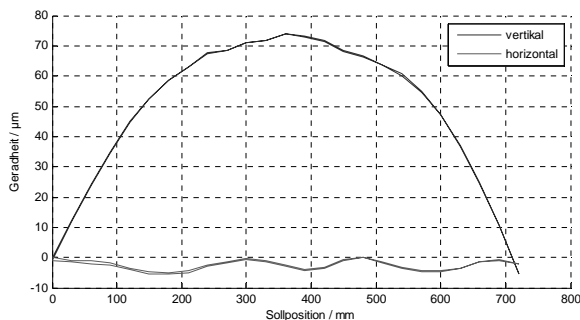


Bild 9: Horizontale und vertikale Geradheit der linearen Positionierachse

Dies wird durch die in Abbildung 10 dargestellten Messwerte für Nick- und Gierwinkel bestätigt. Der Gierwinkel bleibt unter 7 Winkelsekunden und bildet qualitativ den Verlauf der horizontalen Geradheit ab. Der leichte lineare Anstieg weist auf eine geringfügige Durchbiegung in horizontaler Richtung hin, die bei genauer Betrachtung auch in der Messung der horizontalen Geradheit zu erkennen ist.

Der Nickwinkelverlauf der Führung entspricht klar der gemessenen horizontalen Geradheit. Im Gegensatz zu Messverfahren die sich den Zusammenhang von Winkelverlauf und Geradheit zunutze machen, geht bei der hier angewendeten direkten Geradheitsmessung die unbekannte wirksame Schlittenlänge nicht in das Ergebnis der Geradheitsmessung ein. Durch die simultane Messung mehrerer Freiheitsgrade wird die erforderliche Messzeit für Abnahmen, Kalibrierungen und Systemanalysen gesenkt.

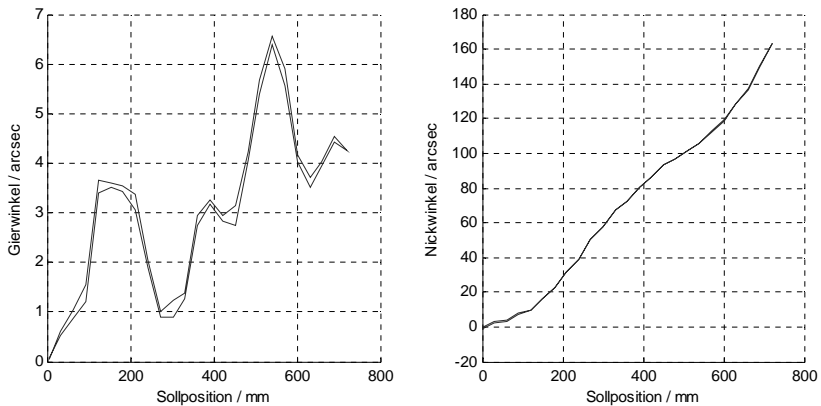


Bild 10: Nick- und Gierwinkel der linearen Positionierachse im Bereich von 720 mm

Der zur Messung eingesetzte Reflektor kann, wie auch Funktionsgruppen beim Einsatz der Positionierachse, normalerweise konstruktiv nicht in Flucht mit der zu messenden linearen Positionierachse angeordnet werden. Hierdurch entstehen bei der Positionsmessung die in Abbildung 11 dargestellten Messabweichungen der Form $\Delta l_{Abbe} = d_{Abbeoffset} \cdot \sin \alpha$, wobei der Abbeoffset den Abstand von Messachse und Positionierachse und α den entsprechenden Kippwinkel des Führungsschlittens bezeichnet. Bei bekanntem Winkel und Abbeoffset kann die Abweichung in der Positionsmessung korrigiert werden. Dies ist allerdings nur bei simultaner Messung von Winkel und Position vollständig möglich, da hier auch zufällige systematische Abweichungen erfasst werden.

In Abbildung 12 ist links die gemessene Gesamtpositionsabweichung dargestellt. Sie resultiert aus den durch die Durchbiegung der Führung verursachten Winkelbewegungen des Führungsschlittens und dem Abbeoffset in vertikaler Richtung, der für den Messaufbau etwa 167 mm beträgt. Durch Korrektur der Winkelbewegungen entfällt der lineare Anteil der Positionsabweichung fast vollständig.

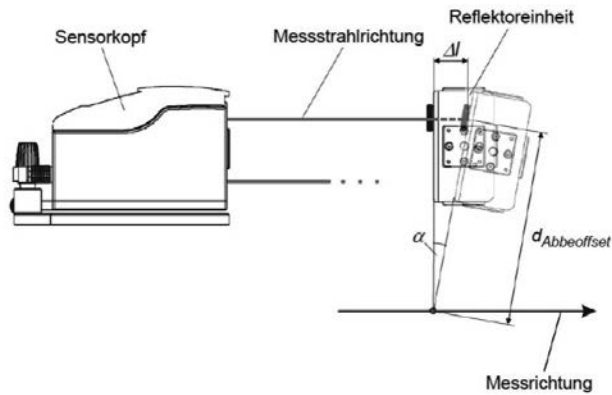


Bild 11: Messabweichungen der linearen Positionsmessung durch Winkelbewegungen des Führungsschlittens

Die Positionsabweichung sinkt von ca. 130 μm auf unter $\pm 4,5 \mu\text{m}$. Woraus ersichtlich wird, dass die Messabweichung deutlich größer als die eigentliche Positionierungsunsicherheit der Führung war und eine Bewertung des Positioniersystems nur durch die simultane Erfassung mehrerer Freiheitsgrade möglich ist.

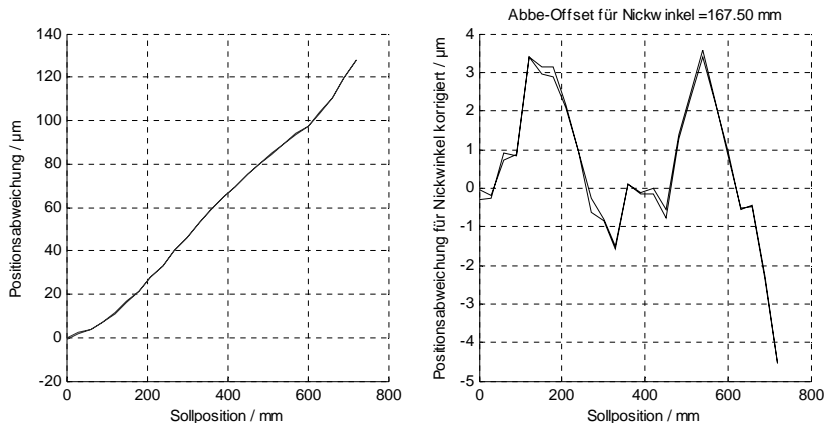


Bild 12: Gemessene Positionsabweichung (links); Mit bekanntem Abbeoffset für den Nickwinkel korrigierte Positionsabweichung (rechts)

5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden neuartige Kalibrierinterferometer zur simultanen synchronen Messung von Position, Nick- und Gierwinkel und horizontaler und vertikaler Geradheit vorgestellt. Die Kalibrierinterferometer ermöglichen Positionsmessungen bis zu 50 m, wobei basierend auf den Kenngrößen der Umweltmessdatenerfassung Genauigkeiten von $1 \cdot 10^{-7}$ erreicht werden können. Der Winkelmessbereich beträgt 5° bei einer Winkelmessauflösung von 0.0004 Winkelsekunden und systematischen Messabweichungen $< \pm 0,015\%$. Für die Geradheitsmessung wird in einem Verfahrbereich von 6,5 m eine Messunsicherheit von $\pm 0,1\% \pm 0,1 \text{ m}^2 \pm 0,1 \mu\text{m}$ erreicht (M Verfahrbereich in m). Anhand von Messungen wurden die Zusammenhänge von Winkelmesswerten, Geradheit und Positionsmesswerten erörtert. Anhand der Beispielmessung wurde gezeigt, dass zur Ermittlung der Positionierungsunsicherheit von Präzisionspositionierachsen die simultane Mehrgrößenbestimmung zwingend erforderlich ist, da durch die Messanordnung verursachte systematische Messabweichungen nur so sicher identifiziert und korrigiert werden können.

6. Literatur

- [1] D. Dontsov, W. Pöschel, W. Schott: Mehrkanalige laserinterferometrische Messverfahren mit höchster Genauigkeit. Photonik 3/2008
- [2] H. Büchner, G. Jäger: Interferometrisches Messverfahren zur berührungslosen und quasi punktförmigen Antastung von Messoberflächen. Technisches Messen 59 (1992) 2. Pp. 43-47
- [3] H. Büchner, G. Jäger: A novel plane mirror interferometer without using corner cube reflectors. Measurement science and technology. - Bristol: IOP Publ, ISSN 13616501, Bd. 17 (2006), 4, S. 746-752
- [4] Birch, K. P. und Downs, M. J. Correction to the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air. Metrologia. 1994, Bd. 31, S. 315-316
- [5] Ciddor, P. E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. Applied Optics. 1996, Bd. 35, 9, S. 1566-1573.
- [6] VDI/VDE - Gesellschaft Mess- und Regelungstechnik. VDI Berichte 548. Dokumentation Laserinterferometrie in der Längenmesstechnik. Düsseldorf: VDI Verlag, 1985.

Maschinenintegration von interferometrischen Präzisions-sensoren

Peter Lehmann, Stanislav Tereschenko,
Lehrstuhl für Messtechnik,
FB Elektrotechnik/Informatik, Universität Kassel

Kurzfassung

Interferometrische Messverfahren spielen aufgrund ihrer hohen Messgenauigkeit und der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten eine wichtige Rolle in der Fertigungsmesstechnik. Zur Topographiemessung an optischen Funktionsflächen bieten hochauflösende interferenzmikroskopische Anordnungen die besten Voraussetzungen. Allerdings werden interferometrische Messungen aufgrund ihrer Schwingungsanfälligkeit in der industriellen Messtechnik kaum außerhalb von Messräumen durchgeführt. Der vorliegende Beitrag zeigt, wie interferometrische Sensoren gestaltet werden können, damit sie sich für dynamische, maschinennahe und maschinenintegrierte Messungen eignen. Als Schlüsselkomponente kommt dabei ein oszillierender Referenzspiegel zum Einsatz, mit dem die optische Weglänge im Referenzarm des Interferometers periodisch variiert wird.

Den Schwerpunkt des Beitrags bildet ein flächenhaft messendes Weißlichtinterferometer mit oszillierendem Referenzspiegel, in das ein schnelles Laserinterferometer integriert ist. Das Laserinterferometer wird mit Infrarotlicht betrieben. Es zeichnet Abstandsänderungen während des Tiefenscans des Weißlichtinterferometers mit hoher zeitlicher Auflösung auf. Diese Messdaten werden nachfolgend genutzt, um eine Höhenkorrektur der einzelnen Abtastwerte der Interferogramme vorzunehmen und so bspw. schwingungsbedingte Störungen zu kompensieren. Dies wird am Beispiel einer In-situ-Messung in einer Schwingprüfmaschine demonstriert.

1. Optische Topographiemessung, Stand der Technik

Optische Topographiemessverfahren haben sich seit geraumer Zeit in der industriellen Messtechnik etabliert. Messprinzipien, die sich sowohl an spiegelnden als auch an rauen Oberflächen einsetzen lassen, sind die konfokale Mikroskopie und die Weißlichtinterferometrie [1, 2]. Bei beiden Verfahren besteht der Messprozess in einem sogenannten Tiefenscan, bei dem sich der Abstand zwischen Objektiv und Messobjekt kontinuierlich ändert, während die Kamera eine Serie von Bildern aufnimmt. Die Weißlichtinterferometrie zeichnet sich wie alle interferometrischen Messverfahren dadurch aus, dass die Höhenauflösung unabhängig von der

Größe des jeweiligen Messfeldes im Nanometerbereich liegt. In Bild 1 sind die am weitesten verbreiteten interferenzmikroskopischen Anordnungen dargestellt. Für industrielle Anwendungen haben sich Mirau-Interferometer aufgrund ihrer Kompaktheit als besonders robust und kostengünstig erwiesen. Bei geringerer Vergrößerung und numerischer Apertur (NA) würde sich beim Mirau-Interferometer der im Strahlengang befindliche Referenzspiegel störend auswirken, so dass hier die Michelson-Anordnung zu bevorzugen ist. Bei hoher Vergrößerung ist die Linnik-Anordnung vorteilhaft, bei der der volle Arbeitsabstand des Mikroskopobjektivs zur Verfügung steht. Im Gegensatz zu Mirau-Interferometern ist bei Michelson- und Linnik-Interferometern der Referenzspiegel zudem frei zugänglich.

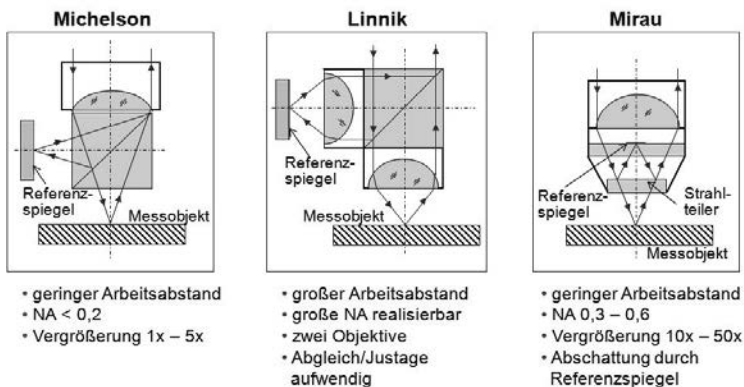


Bild 1: Anordnungen zur Interferenzmikroskopie.

Gegenüber konfokalen Mikroskopen verfügen Interferenzmikroskope über eine integrierte Referenzfläche, auf die die gemessenen Höhenwerte bezogen werden. In der Weißlicht-Interferometrie wird für jedes Kamerapixel anhand des zugehörigen Interferenzsignals zunächst die Höhenlage bestimmt, für die ein maximaler Interferenzkontrast resultiert (Hüllkurvenauswertung). Bei näherungsweise spiegelnden Oberflächen lässt sich die Genauigkeit durch Auswertung der Phasenlage der Interferenzsignale weiter steigern. Dabei werden die Phasenwerte in Höhenwerte umgerechnet. Die Problematik, dass sich die Phasenlage nur innerhalb eines 360° -Intervalls eindeutig bestimmen lässt, wird vermieden, indem das jeweilige 360° -Intervall anhand der vorangegangenen Hüllkurvenauswertung bestimmt wird.

Diese Vorgehensweise funktioniert fehlerfrei, solange die Abweichungen zwischen den Höhenmesswerten, die aus der Hüllkurven- und der Phasenauswertung resultieren, konstant sind. Ändern sie sich über dem Messfeld um mehr als eine viertel Lichtwellenlänge, kommt es

zu Phasensprüngen und somit zu fehlerhaften Höhenmesswerten. Dies kann an steilen Flanken oder Höhenstufen der Fall sein [3-7].

Alternativ kann die 3D-Topographie bei stetigen Topographieverläufen durch sogenannte Phase-Unwrapping-Algorithmen auch allein anhand der gemessenen Phasenwerte benachbarter Pixel rekonstruiert werden [1]. Dies setzt voraus, dass die Mikrostruktur der zu messenden Oberfläche lateral aufgelöst wird, so dass sich keine Speckle bilden.

2. Anforderungen an die Maschinenintegration

Die Maschinenintegration von Topographiemessverfahren, die auf einem Tiefenscan basieren, scheitert in der Regel an störenden Abstandsänderungen zwischen Sensor und Messobjekt, die häufig durch Umgebungsschwingungen hervorgerufen werden.

In der Regel verfügt die Vorrichtung zur Durchführung des Tiefenscans über ein integriertes Positionsmesssystem. Dieses Messsystem enthält einen internen Bezug, d. h. es erfasst, um welche Strecke sich der Scanner aus seiner Nulllage bewegt hat, nicht jedoch wie groß die tatsächliche Abstandsänderung gegenüber dem Messobjekt ist.

Außerdem ist zu beachten, dass es sich bei störenden Schwingungseinflüssen nicht nur um monofrequente Schwingungen handelt, sondern auch um multifrequente und transiente Störungen. Überschreiten diese ungewollten Abstandsänderungen die Soll-Schrittweite beim Tiefenscan (20 nm – 75 nm), so können sie zu gänzlich unbrauchbaren Messdaten führen.

Voraussetzung für eine maschinenintegrierte Topographiemessung ist deshalb die Kompensation der störenden Umgebungseinflüsse. Eine Möglichkeit, Schwingungseinflüsse zu eliminieren, stellen sogenannte Single-Shot-Verfahren dar, die die 3D-Topographiedaten aus einem einzigen Kamerabild ermitteln. Ein Beispiel für eine solche Technik basiert auf der phasenschiebenden Interferometrie in Verbindung einer sog. pixelated Phase-Mask, bei der vier in einer quadratischen Matrix angeordnete Kamerapixel jeweils um 90° phasenverschobene Interferenzsignale aufnehmen [8].

In der Vergangenheit wurden auch für tiefenscannende Messverfahren unterschiedliche Methoden der Schwingungskompensation vorgestellt [9-14]. Dabei lässt sich zwischen aktiver und passiver Kompensation unterscheiden.

Bei der aktiven Kompensation werden höherfrequente Abstandsänderungen zunächst erfasst und in Echtzeit mittels einer Regelschleife und eines Stellgliedes kompensiert [9-11]. Als Stellglied eignet sich z. B. ein Piezoaktor, der den Referenzspiegel oder das gesamte Interferometer entlang der optischen Achse bewegt.

Bei der passiven Kompensation werden zeitliche Abstandsänderungen zwischen Sensor und Messobjekt ebenfalls mit hoher Präzision erfasst. Die Kompensation der störenden Abstands-

änderungen erfolgt jedoch erst im Anschluss an den eigentlichen Tiefenscan, indem die Messsignale entsprechend modifiziert werden [15, 16]. Die passive Schwingungskompensation, wie sie nachfolgend beschrieben wird, lässt sich folglich mit weitaus geringerem gerätetechnischen Aufwand realisieren.

Neben der Kompensation störender Schwingungseinflüsse kann sich die Kompensation auch auf niederfrequente Abstandsänderungen beziehen, die z. B. durch thermische Drifteffekte bedingt sein können, oder auf Linearitätsabweichungen des Tiefenscanners.

Zusätzlich erfordert die maschinenintegrierte optische Topographiemessung in der Regel saubere Oberflächen, die z. B. frei von Kühl-Schmiermittel sind.

3. Prinzip der zeitlichen Weglängenmodulation

Um die Interferenzphase zu ermitteln, ist in der Regel eine Modulation der optischen Weglänge in einem Arm des Interferometers erforderlich. Dabei kann es sich um eine räumliche oder eine zeitliche Weglängenmodulation handeln. Bei der konventionellen phasenschiebenden Interferometrie geschieht die zeitliche Weglängenmodulation dadurch, dass zwischen zwei Bildaufnahmen der Referenzspiegel um jeweils eine achteil Lichtwellenlänge entlang der optischen Achse bewegt wird, so dass aufeinander folgende Interferogramme um jeweils 90° gegeneinander phasenverschoben sind [1].

Eine Alternative stellt die sinusförmige optische Weglängenmodulation dar, die zu einer sinusförmigen Phasenmodulation der entsprechenden Interferenzsignale führt [17].

Für ein Zweistrahl-Interferenzsignal lässt sich die zeitabhängige Intensität $I(t)$ durch folgende Grundgleichung beschreiben:

$$I(t) = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\varphi(t)) = I_0 + \Delta I(t). \quad (1)$$

Dabei sind I_R die Referenz-, I_O die Objektintensität und $\varphi(t)$ die zeitabhängige Phasenverschiebung zwischen Referenz- und Objektwelle. Für die Lichtwellenlänge λ und eine sinusförmige Phasenmodulation mit der Amplitude \hat{z} und der Frequenz f_0 gilt:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi \hat{z}}{\lambda} \sin(2\pi f_0 t) + \Delta\varphi(t). \quad (2)$$

Dabei bezeichnet $\Delta\varphi(t)$ die (niederfrequente) Abweichung des aktuellen Phasenverlaufs vom vorgegebenen sinusförmigen Phasenverlauf. Die Wechselanteile $\Delta I(t)$ entsprechender simulierter Signalverläufe sind in Bild 2 dargestellt. Die beiden dargestellten Signale unterscheiden sich durch eine Änderung des angenommenen Abstands zwischen Interferometer und Messobjekt um 100 nm.

Für nahezu ganzzahlige Werte $f_0 t$ lässt sich die Sinusfunktion durch ihr Argument approximieren und es folgt:

$$\varphi(t) = \frac{8\pi^2 \hat{z}}{\lambda} f_0 t + \Delta\varphi(t). \quad (3)$$

Einsetzen in Gl. (1) führt auf die Interferenzintensität

$$\Delta I(t) = 2\sqrt{I_R I_O} \cos\left(\frac{8\pi^2 \hat{z}}{\lambda} f_0 t + \Delta\varphi(t)\right), \quad (4)$$

deren Phase sich linear mit der Zeit ändert. Ein entsprechender Signalabschnitt zwischen den beiden Umkehrpunkten 1 und 2, für den dies gilt, ist in Bild 2 blau hinterlegt.

Durch diskrete Fouriertransformation der Funktion $\Delta I(t)$ bei der Frequenz

$$f_m = \frac{4\pi \hat{z}}{\lambda} f_0 \quad (5)$$

ergibt sich die gesuchte Phasenlage $\Delta\varphi(t)$, die im Falle eines Tiefenscans sowohl den linearen Phasenlauf als auch höherfrequente Abweichungen enthält. Für die beiden in Bild 2 dargestellten Signale beträgt die Phasendifferenz ca. $\pi/2$, was einer Abstandsänderung von 100 nm entspricht.

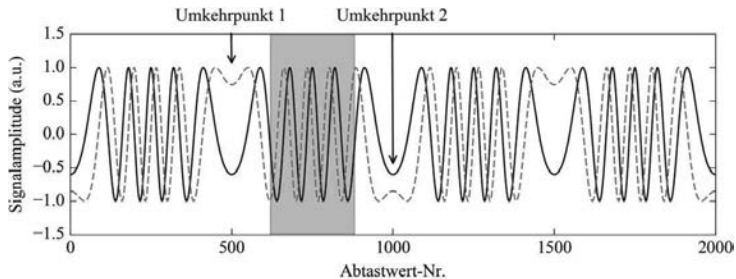


Bild 2: Sinusförmig phasenmodulierte Interferenzsignale für eine Abstandsänderung von 100 nm.

Im Fachgebiet Messtechnik der Universität Kassel wurden in unterschiedlichen Forschungsprojekten mehrere nach diesem Prinzip arbeitende Sensoren realisiert, u. a. Punktsensoren, die zum Teil Datenraten von mehreren hundert Kilohertz erreichen [18-20], sowie ein Linien-sensor, der in einem Kooperationsprojekt mit der PTB zur präzisen Formmessung an rotationssymmetrischen Bauteilen, z. B. optischen Linsen, eingesetzt wird [21].

4. Sensoraufbau mit integrierter Schwingungsmessung

In den hier beschriebenen Sensor auf Basis eines Michelson-Weißlichtinterferometers ist zusätzlich ein längenmessendes Interferometer integriert, das mit infrarotem Laserlicht betrieben wird und mit einer Datenrate von mehreren Kilohertz Abstandsänderungen zwischen Sensor und Messobjekt erfasst [15, 16]. Der Aufbau des Sensors ist schematisch in Bild 3 dargestellt. Das längenmessende Interferometer nutzt denselben optischen Strahlengang wie das flächenhaft messende Weißlichtinterferometer. Der Messfleck auf dem Messobjekt hat einen Durchmesser von ca. 100 µm, das verwendete Mikroskopobjektiv (MO) führt in Verbindung mit der Tubuslinse zu einer 5-fach vergrößerten Abbildung auf der CCD-Kamera. Die schnelle Erfassung von Abstandsänderungen basiert auch hier auf einem entlang der optischen Achse schwingenden Referenzspiegel, der ein phasenmoduliertes Interferenzsignal hervorruft. Dieses wird von einer Fotodiode erfasst und hinsichtlich seiner Phasenlage analysiert. Ein Infrarot-Sperfilter sorgt dafür, dass keine Infrarotstrahlung auf die CCD-Kamera gelangt, während ein Kaltlichtreflektor verhindert, dass sichtbares Licht auf die Photodiode des längenmessenden Interferometers fällt.

Eine Triggerelektronik, die mit dem Anregungssignal für den Schwingungsspiegel synchronisiert ist, triggert den elektronischen Shutter der CCD-Kamera und gleichzeitig die Weißlicht-LED, die bei jedem Triggerereignis einen kurzen Beleuchtungspuls aussendet. Die Synchronisation bewirkt, dass nur ein Beleuchtungspuls während der Integrationszeit der Kamera emittiert wird, und zwar genau dann, wenn sich der schwingende Referenzspiegel gerade in einem seiner Umkehrpunkte befindet. Dadurch werden Bewegungsunschärfen in den von der Kamera aufgezeichneten Interferenzbildern verhindert. Der Tiefenscan wird mittels einer Linearachse realisiert, die den gesamten Sensor in Richtung des Messobjektes bewegt. Ein in die Linearachse integriertes Inkrementalmesssystem erfasst, wie es in der Weißlichtinterferometrie üblich ist, zwar die lineare Bewegung des Sensors, jedoch nicht die tatsächliche Abstandsänderung zwischen Sensor und Messobjekt. Da sowohl das Weißlichtinterferometer als auch das IR-Interferometer denselben Strahlengang nutzen, ist die interferometrische Messung von Abstandsänderungen im Gegensatz zu der Encodermessung frei von Abbe-Fehlern.

Anhand der Positionsmessdaten des längenmessenden IR-Interferometers lassen sich die zeitlich äquidistant von der Kamera aufgezeichneten Interogramme entsprechenden Abstandswerten zuordnen. In einem ersten Schritt werden die Bilder so sortiert, dass der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt von Bild zu Bild abnimmt. In den resultierenden Korrelogrammen, haben die Abtastwerte dann zwar die richtige Reihenfolge, jedoch sind sie noch nicht äquidistant in Bezug auf die Höhenlage entlang der z-Achse. Dies wird durch eine nach-

folgende Interpolation der Abtastwerte erreicht. Bei vergleichsweise geringen Störschwingungen ist eine lineare Interpolation ausreichend. Stärkere Störungen lassen sich durch eine trigonometrische Interpolation eliminieren. Die resultierenden Korrelogramme weisen schließlich äquidistante Abtastwerte auf und lassen sich folglich mit den aus der Weißlichtinterferometrie bekannten Signalverarbeitungsalgorithmen weiter auswerten.

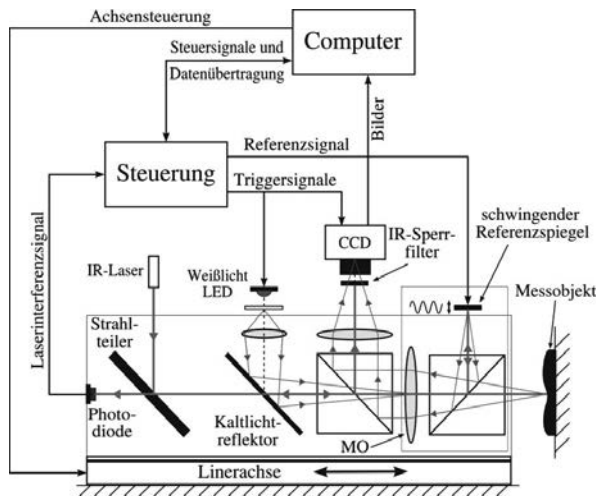


Bild 3: Schematischer Aufbau des Weißlichtinterferometers mit integrierter Schwingungskompensation [15, 16].

Bild 4 zeigt ein Foto des Sensors, der sich auf einer Positioniervorrichtung befindet. Der Michelson-Interferenzaufsatz mit dem schwingenden Referenzspiegel ist eine Eigenkonstruktion. Als Aktor zur Bewegung des Referenzspiegels dient ein Tauchspulenantrieb, der bei einer Frequenz von 2 kHz betrieben wird und eine Schwingungsamplitude von ca. 1 μm hervorruft. Mittels der linearen und rotatorischen Positionierachsen lässt sich der Sensor in Bezug auf die Oberfläche des Messobjektes ausrichten.

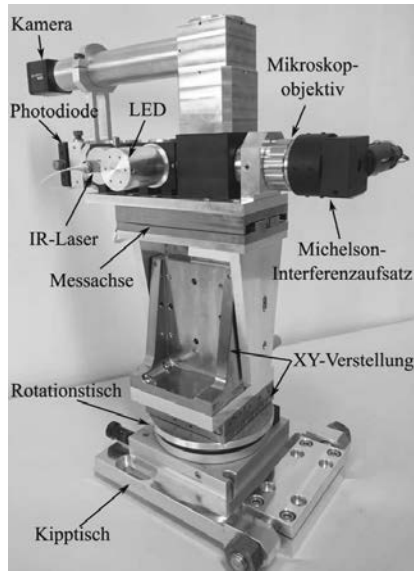


Bild 4: Foto des Sensors mit integriertem längenmessenden Interferometer und Positionierachsen zur Justage.

5. In-situ Topographieerfassung mit Schwingungskompensation

Der oben beschriebene Sensor wurde zunächst unter Laborbedingungen getestet und anschließend im Fachbereich der Maschinenbau der Universität Kassel (Frau Prof. Brückner-Foit, Institut für Werkstofftechnik, Qualität und Zuverlässigkeit) in eine servohydraulische Schwingprüfmaschine integriert. Bild 5 zeigt den Sensor in der Schwingprüfmaschine mit einem zu untersuchenden Messobjekt. Die Schwingprüfmaschine erzeugt durch zyklische Be- und Entlastung des Prüflings eine künstliche Materialermüdung, die bis zum Ermüdungsbruch führen kann. Bevor ein solcher Ermüdungsbruch auftritt, kommt es zu charakteristischen Veränderungen der Oberflächenmikrotopographie, die messtechnisch erfasst und quantifiziert werden sollen. Da diese Änderungen im Nanometerbereich liegen, ist ein hochauflösendes Messsystem unabdingbar. Gleichzeitig sind die Messbedingungen aufgrund der unruhigen Umgebung, hervorgerufen u. a. durch in Betrieb befindliche Pumpen, weitere Maschinen, menschliche Aktivitäten etc., für präzise Messungen äußerst ungünstig.

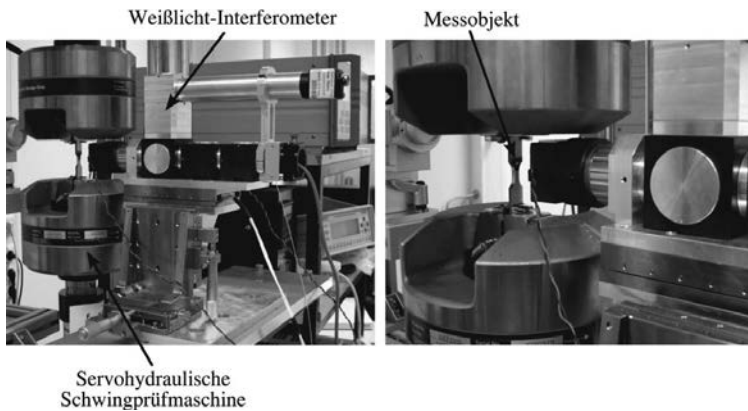


Bild 5: links: Foto des Sensors an der Schwingprüfmaschine,
rechts: vergrößerter Bildausschnitt mit Messobjekt.

Bild 6 zeigt Ergebnisse von Topographiemessungen, die mit dem beschriebenen Messsystem ermittelt wurden.

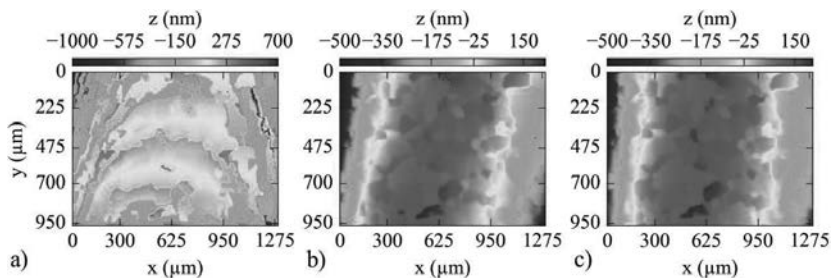


Bild 6: a) in einer Schwingprüfmaschine gemessene, nicht-korrigierte Oberflächentopographie, b) anhand derselben Messdaten, jedoch unter Verwendung der Schwingungskompensation ermittelte Topographie, c) Ergebnis einer Vergleichsmessung unter Laborbedingungen.

In Bild 6 (a) ist die gemessene Topographie dargestellt, die man erhält, wenn keine Schwingungskompensation vorgenommen wird. Bild 6 (b) zeigt den gemessenen Topographieverlauf unter Verwendung des oben beschriebenen Verfahrens zur passiven Schwingungskompensation. Die Korngrenzen des Materials und die globale Ebenheitsabweichung (konvexe Krüm-

mung) der Oberfläche sind klar zu erkennen. In Bild 6 (c) ist zum Vergleich ein unter Laborbedingungen gemessener Topographieausschnitt des weitgehend identischen Oberflächenareals dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Ergebnis der maschinenintegrierten Messung aus Bild 6 (b).

Die während der Messung in der Schwingprüfmaschine vorhandenen Umgebungsschwingungen werden sichtbar, wenn von den Abstandsmessdaten des IR-Laserinterferometers der lineare Verlauf, der sich aufgrund des Tiefenscans ergibt, subtrahiert wird. Das entsprechende Ergebnis ist in Bild 7 (a) dargestellt.

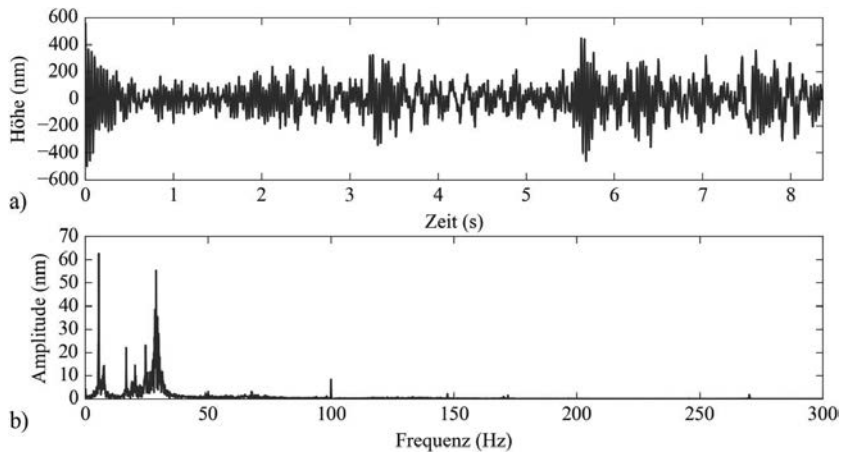


Bild 7: a) Schwingungsbedingte Abstandsänderung während des Tiefenscans, b) zugehöriges Amplitudenspektrum.

Die maximalen Schwingungsamplituden betragen bis zu 500 nm. Der zeitabhängige Kurvenverlauf offenbart außerdem, dass es sich um eine Kombination aus stationären und transienten Schwingungen handelt. Das zugehörige Amplitudenspektrum ist in Abb. 7 (b) dargestellt. Es zeigt sich, dass die relevanten Schwingungsfrequenzen kleiner als 100 Hz sind und somit die Bandbreite von 1000 Hz für die Erfassung der Störschwingungen ausreichend ist. Außerdem zeigt das Ergebnis, dass zahlreiche Frequenzkomponenten zu dem Störsignal beitragen.

6. Fazit

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methode zur maschinenintegrierten Topographieerfassung basiert auf der Weißlichtinterferometrie und zeichnet sich durch eine große Robustheit gegenüber Störschwingungen aus. Der zusätzliche gerätetechnische Aufwand gegenüber konventionellen Weißlichtinterferometern besteht in der Integration eines IR-Laserinterferometers, das

denselben optischen Strahlengang nutzt wie das Weißlichtinterferometer und zur hochfrequenten interferometrischen Messung von Abstandsänderungen dient. Zur Modulation der optischen Weglänge des Laserinterferometers wird ein durch einen mechanischen Aktor angetriebener Referenzspiegel verwendet. Auf diese Weise lässt sich mit geringem gerätetechnischem Zusatzaufwand eine äußerst effektive Schwingungskompensation erreichen, die beispielsweise bei der Messung in einer Schwingprüfmaschine erprobt wurde.

Neben dem Einsatz zur Schwingungskompensation lässt sich die Methode auch nutzen, um den in der Weißlichtinterferometrie erforderlichen Tiefenscan mit vergleichsweise unpräzisen, jedoch kostengünstigen Scanachsen durchzuführen. Dies konnte durch Untersuchungen mit einer schrittmotorgetriebenen Spindelachse nachgewiesen werden.

Die im Rahmen dieses Beitrags durchgeführten Forschungsarbeiten wurden teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Geschäftszeichen LE992/9-1 gefördert.

Literatur

- [1] Malacara, D. (ed.), Optical Shop Testing. John Wiley 2007.
- [2] Corle, G. R., Kino, T. S., Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems. Academic Press 1996.
- [3] de Groot, P., Colonna de Lega, X., Kramer, J., Turzhitsky, M.: Determination of fringe order in white-light interference microscopy. Appl. Opt. 41 (2002) S. 4571-4578.
- [4] Harasaki, A., Wyant, J. C.: Fringe modulation skewing effect in white-light vertical-scanning interferometry. Appl. Opt. 39 (2000) S. 2101-2106.
- [5] Lehmann, P.: Systematic effects in coherence peak and phase evaluation of signals obtained with a vertical scanning white-light Mirau interferometer. SPIE Proc. 6188 (2006) S. 11-1 – 11-11.
- [6] Lehmann, P., Kühnhold, P., Xie, W.: Reduction of chromatic aberration influences in vertical scanning white-light interferometry, Meas. Sci. Technol. 25 (2014) 065203 (9pp).
- [7] Xie, W., Lehmann, P., Niehues, J.: Lateral resolution and transfer characteristics of vertical scanning white-light interferometers, Appl. Opt. 51 (2012) 1795-1803.
- [8] Wiersma, J. T. and Wyant, J. C. "Vibration insensitive extended range interference microscopy," Appl. Opt. 52 (2013) 5957-5961.
- [9] Martin, H., Wang, K. and Jiang, X.: Vibration compensating beam scanning interferometer for surface measurement," Appl. Opt. 47 (2008) 888-893.

- [10] Zhao, C. and Burge, J. H.: Vibration-compensated interferometer for measuring cryogenic mirrors, *Proc. SPIE* 3782 (1999) 399-406.
- [11] Schäfer, P., Broschart, D. und Seewig, J.: Aktive Schwingungsdämpfung eines Weißlichtinterferometers, *Technisches Messen* 80 (2013) 16-20.
- [12] Mun, J. II, Jo, T., Kim, T. and Pakk, H. J., Residual vibration reduction of white-light scanning interferometry by input shaping, *Optics Express* 23 (2015) 464-470.
- [13] Deck, L.L.: Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry, *Applied Optics* 48 (2009) 3948-3960.
- [14] Park, J. and Kim, S.: Vibration-desensitized interferometer by continuous phase shifting with high-speed fringe capturing, *Optics Letters* 35 (2009) 19-21.
- [15] Tereschenko, S., Lehmann, P. Gollor, P., Kühnhold, P.: Robust Vertical Scanning White-light Interferometry in Close-to-Machine Applications, *SPIE Proceedings* 9525 (2015) 95250Q.
- [16] Tereschenko, S., Kühnhold, P. Lehmann, P., Zellmer, L., Brückner-Foit, A.: Tiefenscannende Weißlichtinterferometrie in maschinennaher Umgebung, *Technisches Messen* 81 (2014) 269-279.
- [17] De Groot, P.: Design of error-compensating algorithms for sinusoidal phase shifting interferometry, *Appl. Opt.* 48 (2009) 6788-6796.
- [18] Knell, H., Schake, M., Schulz, M., Lehmann, P.: Interferometric sensors based on sinusoidal optical path length modulation, *SPIE Proceedings* 9132 (2014) 91320I.
- [19] Schulz, M., Lehmann, P.: Measurement of distance changes using a fibre-coupled common-path interferometer with mechanical path length modulation, *Meas. Sci. Technol.* 24 (2013) 065202 (8pp).
- [20] Schulz, M., Wagner, T., Lehmann, P.: Fiber-coupled interferometric sensor for high-speed measurement of optical surfaces, Dirckx, J. (Ed.) *Optical Measurement Techniques for Structures & Systems III*, Shaker Publishing 2016, 277-287.
- [21] Knell, H., Laubach, S., Ehret, G., Lehmann, P.: Continuous measurement of optical surfaces using a line-scan interferometer with sinusoidal path length modulation, *Optics Express* 22 (2014) 29787-29798.

Absolute Formmessung in CNC-Drehmaschinen mit einem optischen Sensor

Optical in-situ shape measurements in CNC metal working lathes

Dipl.-Ing. **Robert Kuschmierz**, PD Dr.-Ing. habil. **Andreas Fischer**, Prof. Dr.-Ing. habil. **Jürgen Czarske**, Professur für Mess- und Sensortechnik, Technische Universität Dresden

Kurzfassung

Ein optisches Messsystem für die absolute Formmessung in CNC-Drehmaschinen für eine 100% Fertigungskontrolle wird vorgestellt. Mit einem einzigen Messkopf wird gleichzeitig der Durchmesser und das Oberflächenprofil des Werkstücks mit einer Messunsicherheit kleiner $1\text{ }\mu\text{m}$ bestimmt. Das Messsystem wurde erstmals in einer Werkzeugmaschine eingesetzt. Die in-situ Messungen werden mit Referenzmessungen einer taktilen Koordinatenmessmaschine verglichen.

Abstract

In this article, we propose an optical measurement system for first part quality manufacturing. The absolute shape, meaning the diameter and surface profile, of the workpiece is determined from its tangential velocity and the surface distance. In order to allow keyhole access, both measurands are determined simultaneously with a single sensor. Measurements inside a metal working lathe show that the standard uncertainty for the absolute shape measurement is below $1\text{ }\mu\text{m}$. The in-situ measurements are compared to measurements with a tactile coordinate measurement machine for reference.

1. Einleitung

Die erreichbare Präzision von CNC-Drehmaschinen ist durch Temperatureffekte, Werkzeugabnutzung und Vibrationen limitiert [1]. Zwar lassen sich diese Effekte zum Teil durch entsprechende Messungen und Modellierungen kompensieren [2,3], um eine Formabweichung kleiner $1\text{ }\mu\text{m}$ zu garantieren, ist eine Messung der Werkstückform dennoch unerlässlich. Den Goldstandard stellen hierfür taktile Koordinatenmessgeräte (KMM) dar. KMM messen die Werkstückform außerhalb der Werkzeugmaschine (WZM) nach der Bearbeitung und benötigen vergleichsweise viel Zeit für die Messung. Dadurch ist eine direkte Regelung der WZM

auf die gemessene Form des Werkstücks nicht möglich. Optische Sensoren wie Triangulation, chromatisch konfokale Sensoren, absolute Distanz Interferometrie oder Streifenprojektion [4–8] ermöglichen hohe Messraten von mehreren kHz, können Messunsicherheiten kleiner 1 µm erreichen und wurden bereits fertigungsnah oder sogar in einer WZM eingesetzt. Allerdings verschlechtern sich die Messeigenschaften dieser Sensoren an optisch rauen und vor allem bewegten Oberflächen auf Grund des Speckle-Effekts. Zusätzlich erlauben die Sensoren nur die Vermessung des Oberflächenprofils. Zur Messung des absoluten Durchmessers sind weitere Sensoren notwendig, um die relative Lage zwischen Rotationsachse des Werkstücks und Sensor zu bestimmen. Andernfalls führen Vibrationen und temperaturbedingte Drifts der Rotationsachse zu Messunsicherheiten.

Als alternative mit nur einem optischen Messkopf kann der Laser-Doppler-Distanzsensor mit Phasenauswertung (P-LDD Sensor) eingesetzt werden [9]. Neben der Positionsmessung ermöglicht der P-LDD Sensor gleichzeitig die Messung der Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Werkstücks in der WZM. Dadurch lassen sich neben dem Oberflächenprofil gleichzeitig der Umfang und damit der Durchmesser bestimmen.

2. Messprinzip

Die absolute dreidimensionale Form eines gedrehten Werkstückes lässt sich mit dem Radius $r(\alpha, \bar{z})$ in Zylinderkoordinaten beschreiben. Mit dem P-LDD Sensor wird dieser indirekt gemessen. Es gilt:

$$r(\alpha, \bar{z}) = \bar{r} + \Delta r(\alpha, \bar{z}) = \frac{\bar{v}}{\omega} + z(\alpha, \bar{z}) - \bar{z}, \quad (1)$$

wobei \bar{r} den mittleren Radius des Werkstücks, \bar{v} die mittlere Umfangsgeschwindigkeit, ω die konstante Winkelgeschwindigkeit und $z(\alpha, \bar{z})$ und \bar{z} die winkel- und höhenaufgelöste bzw. mittlere Oberflächenposition beschreiben, siehe Bild 1 (links).

Das Messprinzip des P-LDD Sensors basiert auf mehreren, ineinander verschachtelten La-

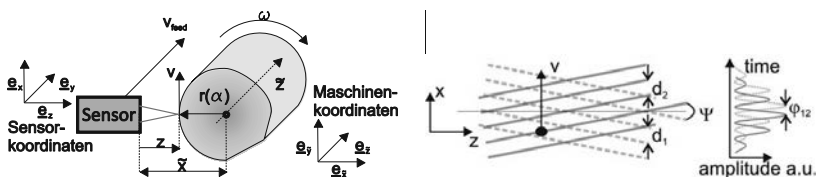


Bild 1: Schematische Darstellung des Messprinzips. Tangentialgeschwindigkeit und Oberflächen-position des rotierenden Werkstücks werden zeitgleich gemessen. Zusätzlich-cher Vorschub des Sensors erlaubt eine 3D Formmessung (links). Zwei zueinander verkippte Interferenzstreifensysteme eines P-LDD Sensors und die zugehörigen Zeitsignale eines Streuzentrums mit der Geschwindigkeit v und der Position z (rechts). Aufgrund der Verkipfung der Streifensysteme ändert sich der Phasenversatz φ entlang z [11].

ser Surface Velozimetern [10] (LSV). LSVs nutzen Interferenzstreifensysteme mit dem Streifenabstand d zur Messung der Oberflächengeschwindigkeit $v = f_d/d$ quer zum Interferenzstreifensystem, wobei die Dopplerfrequenz f_d aus der Frequenz des Streulichtsignals bestimmt wird. Durch Überlagerung mehrerer zueinander verkippter Interferenzstreifensysteme ist eine gleichzeitige Messung der axialen Position z möglich. Dazu wird der von der axialen Position abhängige laterale Versatz zwischen den Interferenzstreifensystemen ausgewertet, welcher sich in einer Phasenverschiebung φ der Streulichtsignale äußert, siehe Bild 1 (rechts). Für die gemessene Position gilt:

$$z = \varphi \cdot s^{-1} \approx \varphi \cdot \frac{d}{2\pi \tan \Psi}, \quad (2)$$

wobei Ψ den Verkippfungswinkel zwischen den Interferenzstreifensystemen mit den identischen Streifenabständen d beschreibt. Für eine minimale Positionsunsicherheit σ_z ist entsprechend Gl. (2) ein großer Anstieg s der Kalibrierfunktion zu wählen. Allerdings führt die Phasenauswertung zu einem verkürzten Eindeutigkeitsbereich der Kalibrierfunktion $\varphi(z)$, da der Eindeutigkeitsbereich der Phase auf das Intervall $[-\pi; \pi]$ beschränkt ist. Um den Messbereich zu erweitern wird ein drittes Interferenzstreifensystem mit abweichendem Verkippfungswinkel überlagert. Die resultierenden Interferenzstreifensysteme und Kalibrierfunktionen sind in Bild 2 (links) schematisch dargestellt.

3. Experimenteller Aufbau

Ein robuster Sensor wurde für den Einsatz in einer WZM entwickelt. Durch die Nutzung fasergekoppelter Laserdioden und Detektoren wurde ein kompakter Messkopf (Größe $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$) ohne aktive Bauelemente realisiert. Der Messkopf ist schematisch in Bild 2 (rechts) dargestellt. Durch den Einsatz von Invar als Sensorplattenmaterial wird die temperaturbedingte Dejustage des Messkopfes reduziert. Die Laserdioden sind temperaturstabil-

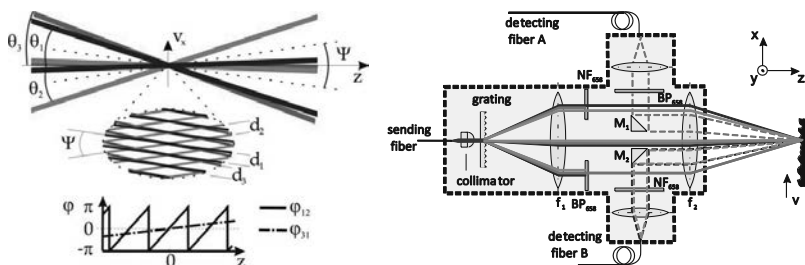


Bild 2: Links: Schematische Darstellung des Messvolumens. 3 gegeneinander verkippte Interferenzstreifensysteme und resultierende Kalibrierfunktion. Die Kalibrierfunktion φ_{31} dient zur eindeutigen Positionsmessung. φ_{12} dient zur Positionsmessung mit hoher Auflösung. Rechts: Fasergekoppelter Messkopf. Die Interferenzstreifensysteme werden mittels Transmissionsbeugungsgitter und Keplerteleskop erzeugt [11].

siert, um temperaturbedingte Wellenlängendriffs zu reduzieren. Das Laserlicht ($\lambda_1 = 638 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 658 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 685 \text{ nm}$) wird über zwei Y-Koppler in eine Singlemode Faser gekoppelt und zum Messkopf geführt. Mittels geblaztem Transmissionsbeugungsgitter ($g = 4 \text{ }\mu\text{m}$) wird das Licht örtlich aufgeteilt. Schmalbandige Filter blocken die +1. Beugungsordnung von λ_2 und -1. Beugungsordnung von λ_1 und λ_3 . Die verbleibenden ± 1 . und 0. Beugungsordnungen werden mittels Keplerteleskop ($f_1 = f_2 = 40 \text{ mm}$) im Messvolumen überlagert. Als Resultat werden 3 Interferenzstreifensysteme mit $d \approx 4 \text{ }\mu\text{m}$, einem lateralen Durchmesser $2 \cdot w_0 \approx 50 \text{ }\mu\text{m}$ und einer axialen Länge $l_z \approx 600 \text{ }\mu\text{m}$ im Kreuzungsbereich der Laserstrahlen erzeugt. Der Verkippungswinkel $\Psi_{12} \approx 9,3^\circ$ resultiert aus der Nutzung der unterschiedlichen Beugungsordnungen für λ_1 und λ_2 . Der Verkippungswinkel $\Psi_{31} \approx 0,3^\circ$ resultiert aus der Wellenlängendifferenz von λ_3 und λ_1 .

Das Streulicht wird über die Spiegel M_1 und M_2 , entsprechende Filter und Linsen in zwei Multimodfasern fokussiert. Zur Trennung von λ_3 und λ_1 wird eine fasergekoppelte Wellenlängendemultiplexeinheit verwendet. Fasergekoppelte Avalanche-Fotodioden detektieren die 3 Streulichtsignale. An einem PC werden die Signale digitalisiert und ausgewertet.

Mittels diskreter Fourier-Transformation werden zunächst die Dopplerfrequenzen f_d bestimmt. Die Phasendifferenzen φ werden mittels Kreuzkorrelation ermittelt. Mit Hilfe der Kalibrierparameter d und s werden anschließend die Geschwindigkeit und Position berechnet. Zur Berechnung von f_d und φ sind jeweils Zeitreihen aufzunehmen und auszuwerten. Während der Dauer der Zeitreihe bewegt sich die rotierende Oberfläche, wodurch die laterale Auflösung in Umfangsrichtung reduziert wird. Um eine konstante laterale Auflösung von 1 mm zu gewährleisten, wird Vorwissen über die Rotationsfrequenz und den erwarteten Durchmesser genutzt. Die laterale Auflösung entlang der Rotationsachse beträgt $2 \cdot w_0 \approx 50 \text{ }\mu\text{m}$.

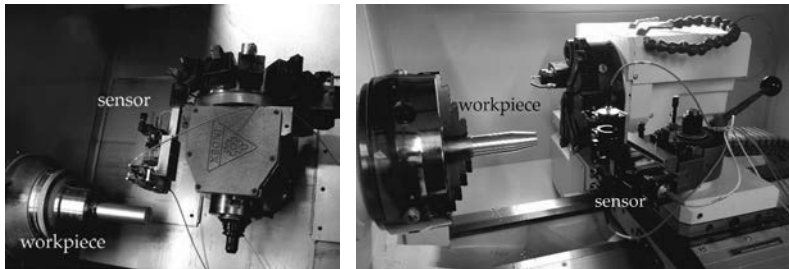


Bild 3: Sensor in zwei verschiedenen CNC Drehmaschinen. Links: Frei positionierbar montiert auf dem schwenkbaren Werkzeughalter. Rechts: Montiert gegenüber vom Werkzeug zum gleichzeitigen Bearbeiten und Messen.

Um die Eignung des Sensors für die absolute Formmessung in WZM zu untersuchen, wurden Experimente in zwei unterschiedlichen CNC-Drehmaschinen durchgeführt (Index G200 und CD402). Wellen mit unterschiedlichen Durchmessern, Formen und Rauheiten wurden gefertigt und direkt nach der Bearbeitung mit dem P-LDD Sensor vermessen. Als Referenz dienen taktile Messungen mittels KMM (ULM 600). Für die in-situ Messungen wurden zwei unterschiedliche Anordnungen gewählt. In der Index G200 wurde der Messkopf direkt auf dem schwenkbaren Werkzeugrevolver montiert, siehe *Bild 3* (links). Dadurch kann der Sensor frei positioniert werden, zum Beispiel mit dem gleichen Programm, welches zur Fertigung eingesetzt wird. In der CD402 wurde der Messkopf gegenüber dem Werkzeug montiert, siehe *Bild 3* (rechts). Dies erlaubt prinzipiell eine in-prozess Messung, da Bearbeitung und Messung gleichzeitig von gegenüberliegenden Seiten durchgeführt werden können. Für die ersten Tests wurde der Sensor während der Bearbeitung aus der WZM entfernt, um ihn vor Spänen und Kühlschmiermittel zu schützen. Für die Messung betrugen die Rotationsfrequenz der Spindel zwischen 25 und 30 Hz und der Vorschub zwischen 36 und 1000 mm/min.

4. Messunsicherheit

Mit einer lateralen Auflösung von $50\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ mm}$ liefert der P-LDD Sensor mehrere 100.000 Messpunkte je Werkstück. Eine vollständige Gegenüberstellung zwischen den Messwerten des P-LDD Sensors und den Referenzmessungen der KMM ist entsprechend nicht möglich. Zur Charakterisierung der Messunsicherheit des P-LDD Sensors beim Einsatz in einer WZM wird daher zunächst die Standardabweichung der Radiusmessung σ_r des P-LDD Sensors aus der relativen Standardabweichung der Geschwindigkeitsmessung σ_v/v und der Standardabweichung der Positionsmessung σ_z bestimmt. Dafür werden die vermessenen Werkstücke als ideal rund angenommen und jede Abweichung der gemessenen Position und Ge-

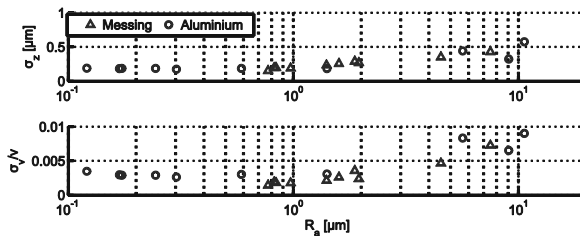


Bild 4: Standardabweichung der Positionsmessung (oben) und relative Standardabweichung der Geschwindigkeitsmessung (unten) für verschiedene arithmetische Mittenrauwerte und Materialien.

schwindigkeit als Messabweichung betrachtet. Eine Messunsicherheitsfortpflanzung von Gl. (1) führt dann zu:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_{\bar{r}}^2 + \sigma_z^2}, \quad \text{mit} \quad \sigma_{\bar{r}} = \frac{\sigma_v}{v} \cdot \frac{\bar{r}}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

wobei N die Anzahl der Messpunkte auf der Werkstückoberfläche beschreibt. Entsprechend Gl. (3) führt eine Erhöhung der Positionsunsicherheit σ_z zu einer Erhöhung der Formunsicherheit σ_r . Weiter ist σ_r von der relativen Geschwindigkeitsunsicherheit σ_v/v und dem mittleren Radius \bar{r} des Werkstücks abhängig. Dieser Unsicherheitsbeitrag lässt sich durch Mittelung über N Geschwindigkeitswerte reduzieren.

Um den Einfluss der mikrogeometrischen Eigenschaften des Werkstücks auf die Formmessunsicherheit zu charakterisieren, wurden zunächst Messungen an zylindrischen Proben unterschiedlicher Rauheit durchgeführt. Die Rauheit mit $100 \text{ nm} \leq R_a \leq 10 \text{ µm}$ wurde bei der Fertigung durch die Verwendung unterschiedlicher Materialien und unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeiten eingestellt. Die erreichten Standardabweichungen sind in *Bild 4* dargestellt. Für $100 \text{ nm} \leq R_a \leq 1 \text{ µm}$ werden Standardabweichungen $\sigma_z \approx 200 \text{ nm}$ und $\sigma_v/v \approx 0,3\%$ erreicht. An raueren Oberflächen nimmt die Standardabweichung leicht zu. Es wird davon ausgegangen, dass diese Zunahme in tatsächlich vorliegenden Formabweichungen des Werkstücks begründet ist, welche mit steigender Rauheit ebenfalls zunehmen. Für die Formmessunsicherheit folgt mit $\bar{r} = 20 \text{ mm}$ und $N = 100.000$, $\sigma_r \approx 300 \text{ nm}$ für $R_a \leq 1 \text{ µm}$ und $\sigma_r \approx 700 \text{ nm}$ für $R_a = 10 \text{ µm}$. Selbst an rauen Werkstücken sind also Messunsicherheiten $\sigma_r < 1 \text{ µm}$ erreichbar. Weiter zeigt sich das Werkstückmaterial keinen Einfluss auf die Messunsicherheit, siehe *Bild 4*. Neben verschiedenen Rauheiten und Materialien wurde auch die Vorschubgeschwindigkeit zwischen 1 mm/s und 17 mm/s variiert. Dabei konnte kein Ein-

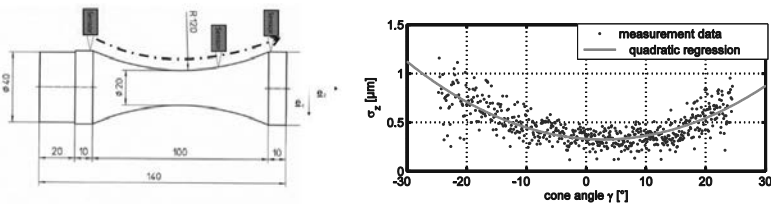


Bild 5: Links: Schematische Darstellung des Werkstücks mit kontinuierlich geändertem Kegelwinkel. Zur Charakterisierung fährt der Sensor mit konstantem Abstand zur Oberfläche über das Werkstück. Der Sensor misst dabei stets senkrecht zur Rotationsachse. Rechts: Standardabweichung der gemessenen Distanz σ_z in Abhängigkeit vom Kegelwinkel γ . Jedes σ_z berechnet sich aus 100 aufeinanderfolgenden Messwerten. Die Regression zeigt ein quadratisches Verhalten für $\sigma_z(\gamma)$.

fluss der Vorschubgeschwindigkeit auf σ_v/v und σ_z festgestellt werden. Folglich kann der P-LDD Sensor auch mit hohen Scanraten eingesetzt werden.

Auch der Einfluss makrogeometrischer Formmerkmale auf die Messunsicherheit wurde experimentell untersucht. Dabei wurden zwei Aspekte betrachtet. Zum einen die Verkipfung der Oberflächennormale zur Messachse des Sensors und zum anderen der mittlere Werkstückradius \bar{r} . Die Verkipfung γ der Oberflächennormale zur Messachse stellt für optische Messsysteme aus zwei Gründen eine Herausforderung dar. Zum einen nimmt die Leistung des in den Detektor gestreuten oder reflektierten Lichtes mit steigendem γ ab, so dass das Signal-zu-Rausch Verhältnis sinkt. Zum anderen ändert sich mit steigendem γ die Oberflächenposition innerhalb des Messvolumens. Gerade letzteres führt beim P-LDD Sensor zu zunehmenden Messabweichungen für zunehmende Verkipfungswinkel. Auf Grund des vergleichsweise großen Messvolumendurchmessers von 50 μm folgt bereits für $|\gamma| = 25^\circ$ eine maximale Änderung der Oberflächenposition innerhalb des Messvolumens von $\pm 10 \mu\text{m}$. Auf Grund des Speckle-Effektes werden diese unterschiedlichen Abstände zufällig gewichtet. In Bild 5 (links) ist der experimentelle Aufbau zur Untersuchung des Einflusses von γ auf die Messunsicherheit sowie die erreichte Standardabweichung der Positionsmessung in Abhängigkeit von γ dargestellt (rechts). Dabei zeigt sich ein quadratischer Zusammenhang für $\sigma_z(\gamma)$, sodass nur für $|\gamma| < 20^\circ$ eine Formmessunsicherheit kleiner 1 μm eingehalten werden kann.

In der Praxis lässt sich das Problem verkippter Oberflächen gerade für moderne CNC-Drehmaschinen umgehen, da die etwaige Makrogeometrie des Werkstücks a priori vorliegt und der Sensor im Werkzeughalter senkrecht zur Werkstückoberfläche ausgerichtet werden

kann. Dieser Ansatz wurde an einem Kegelstumpf mit $\gamma = 9^\circ$ getestet. Dazu wurde zunächst eine Messung senkrecht zur Rotationsachse und anschließend senkrecht zur Werkstückoberfläche vorgenommen. Die Standardabweichung der Position konnte dadurch wie erwartet von $\sigma_z \approx 500$ nm auf $\sigma_z \approx 280$ nm gesenkt werden.

Neben dem Einfluss des Kegelwinkels soll auch der Einfluss des mittleren Werkstückradius \bar{r} auf die Messunsicherheit betrachtet werden, da dieser entsprechend Gl. (3) die Formmessunsicherheit signifikant beeinflusst. Dazu wurden Messungen an einer Stufenwelle mit $\bar{r} = 2,5; 5; 10; 20$ mm durchgeführt. Die Drehzahl der Welle betrug stets 25 Hz und die laterale Auflösung entlang dem Wellenumfang 1 mm. Interessanterweise zeigen sowohl $\sigma_z \approx 280$ nm als auch $\sigma_v/v \approx 0,3\%$ keine Abhängigkeit von \bar{r} . Entsprechend folgt aus Gl. (3) eine konstante relative Standardabweichung für den mittleren Radius $\frac{\sigma_{\bar{r}}}{\bar{r}} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{N}}$. Daher sinkt $\sigma_{\bar{r}}$ linear mit abnehmendem mittleren Radius auf 25 nm für $\bar{r} = 2,5$ mm. Das bedeutet, dass die Messunsicherheit der Form für kleine Radien nicht mehr durch die Geschwindigkeitsmessung limitiert ist. Außerdem zeigt die Messung, dass σ_r unabhängig von der Umfangsgeschwindigkeit v ist. Entsprechend eignet sich der P-LDD Sensor auch für die Messung an sehr schnellen Oberflächen, z.B. beim Hochgeschwindigkeitsdrehen.

5. Absolute Formmessung

Um die Fähigkeit des P-LDD Sensors zur absoluten Formmessung in WZM zu demonstrieren, wurden vergleichende Messungen mit dem P-LDD Sensor in-situ und mit einer KMM ex-situ vorgenommen. Das betrachtete Werkstück besteht aus einem Kegelstumpf ($\gamma = 9^\circ$, Länge 40 mm) mit anschließendem Zylinder (Länge 35 mm, Radius 19 mm). In den Zylinder sind 2 Kerben (Breite 3 mm, Tiefe 80 μ m und 200 μ m) eingestochen. In *Bild 6* (links) ist ein

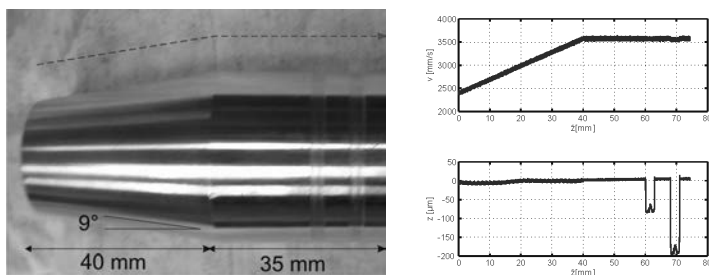


Bild 6: Links: Foto, des in-situ vermessenen Werkstücks. Die rote gestrichelte Linie zeigt die Trajektorie des Sensors an. Rechts: Gemessene Geschwindigkeit (oben) und Oberflächenposition (unten) entlang der Länge des Werkstücks z .

Foto des Werkstücks dargestellt. Für die Fertigung des Werkstücks betrugen die Rotationsfrequenz 30 Hz und der Vorschub 100 $\mu\text{m}/\text{Umdrehung}$. Für die In-situ Messung betrug die Rotationsfrequenz ebenfalls 30 Hz. Um eine hohe Dichte an Messpunkten zu erhalten betrug der Vorschub 20 $\mu\text{m}/\text{Umdrehung}$. Aus der Gesamtlänge von 75 mm und mit einer Gesamtmesdauer von 125 s ergeben sich so 625.000 Datenpunkte auf der Oberfläche. Da die Radiusänderung am Kegelstumpf den axialen Messbereich des P-LDD Sensors überschreitet, wurde der Sensor für die Messung hier parallel zur Werkstückoberfläche verfahren. Entlang des zylindrischen Profils mit den Einstichen wurde der Sensor lediglich parallel zur Rotationsachse traversiert.

In *Bild 6* (rechts) sind die gemessene Geschwindigkeit (oben) und Oberflächenposition (unten) dargestellt. Der Kegelstumpf und das zylindrische Profil sind direkt in den Geschwindigkeitsdaten sichtbar. Sowohl die Einstiche als auch ihr konvexes Profil werden in den Abstandsmessungen deutlich. In den Abstandswerten sind periodische Oszillationen erkennbar. Diese nehmen von 10 μm an der Spitze des Kegelstumpfes hin zu 3 μm an der Einspannung am Ende des Zylinders ab. Weiter entspricht die Frequenz dieser Oszillation der Rotationsfrequenz und sie ist unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit und damit keine Funktion der Werkstückgeometrie. Entsprechend wird die Oszillation einer Taumelbewegung der Maschinenachse zugeordnet und bei der Formmessung nicht berücksichtigt. Unter Vernachlässigung der Taumelbewegung folgt für die Standardabweichung der Distanzmessung abermals $\sigma_x \approx 280 \text{ nm}$ und für die Standardabweichung der Geschwindigkeit $\sigma_v/v \approx 0,3\%$. Für die Standardabweichung der absoluten Form folgt entsprechend Gl. (3) wieder $\sigma_r \approx 300 \text{ nm}$. Die absolute Form des Werkstücks folgt aus dem gemessenen Geschwindigkeits- und Abstandprofil sowie der Sensortrajektorie. In *Bild 7* (links) ist die resultierende absolute 3D Form dargestellt. Am zylindrischen Profil wurde ein mittlerer Durchmesser von 37,9469 mm bestimmt. Ex-situ Referenzmessungen mit einer taktilen KMM (ULM600) zeigen einen mittleren Werkstückdurchmesser von 37,9429 mm. Die resultierende Differenz ist auf Temperaturunterschiede zwischen den Messungen zurückzuführen.

Neben dem absoluten Durchmesser wurden Formabweichungen gemessen und mit ex-situ Messungen verglichen. So weist das Werkstück eine Elliptizität von 0,6 μm auf, siehe *Bild 7* (rechts, oben). Referenzmessungen mit einem Rundheitsmessgerät an 3 Querschnitten ergab eine übereinstimmende Elliptizität zwischen 0,3 und 0,8 μm . Weiter wurde eine konische Formabweichung von 0,1 $\mu\text{m}/\text{mm}$ in-situ gemessen. Ex-situ Messungen mit dem ULM 600 ergaben eine konische Formabweichung von $0,04 \pm 0,05 \mu\text{m}$.

Außerdem konnten Riefen mit einer Breite von 100 μm und einer Tiefe von 1,2 μm in-situ gemessen werden. Ex-situ Messungen mit einem Konfokalmikroskop (NanoFocus μsurf)

zeigen eine übereinstimmende Breite von 100 μm und Tiefe von 1,1 μm , siehe *Bild 7* (rechts, unten).

6. Zusammenfassung und Diskussion

Der Laser-Doppler Distanzsensor mit Phasenauswertung (P-LDD Sensor) ermöglicht eine absolute, 3-dimensionale Formmessung in CNC-Drehmaschinen mit Schlüssellochzugang und sub-mikrometer Unsicherheit. Die Messunsicherheit ist nahezu unabhängig von der Scangeschwindigkeit und Werkstückrauheit. Neben dem Werkstückdurchmesser erlaubt der P-LDD Sensor die Auflösung mikrogeometrischer Riefen und elliptischer Formabweichung im Mikrometerbereich. Für eine Regelung des Fertigungsprozesses wird zunächst eine echtzeitfähige Signalverarbeitung benötigt. Weiter ist der Einfluss der Werkstücktemperatur und von Kühlmittelrückständen auf der Werkstückoberfläche zu klären. Zur Vermessung komplexerer Geometrien ist die laterale Auflösung des Sensors zu verbessern.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre finanzielle Unterstützung (DFG Cz 55/29-1), sowie DMT Drehmaschinen (B. Klausmann), Optolution Messtechnik GmbH (Dr. Müller) und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (Prof. Bosse) für ihre fachliche Unterstützung.

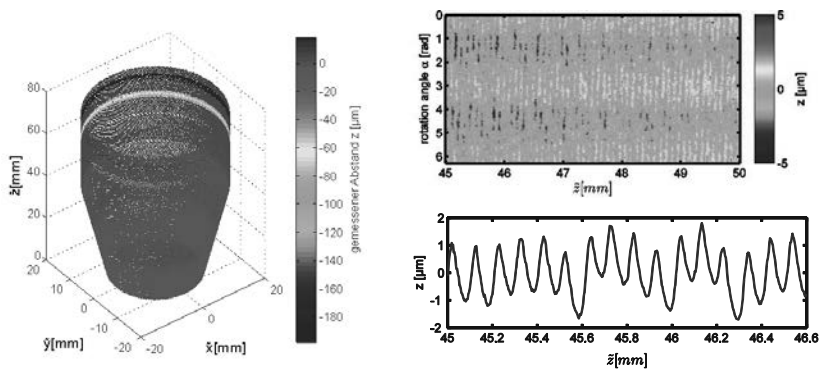


Bild 7: Links: In-situ gemessene, absolute Form des Werkstücks. Rechts: Oberflächenprofil aus in-situ Messung, mit elliptischer und konischer Formabweichung sowie Riefen (oben) aus in-situ Messung. Ex-situ Referenzmessung gemessen mit NanoFocus μsrf (unten). Beachten Sie die unterschiedliche Skalierung zwischen den Darstellungen [11].

Foto, des in-situ vermessenen Werkstücks. Die rote gestrichelte Linie zeigt die Trajektorie des Sensors an. Rechts: Gemessene Geschwindigkeit (oben) und Oberflächenposition (unten) entlang der Länge des Werkstücks \tilde{z} .

Literaturhinweise

- [1] H. K. Tönshoff, C. Arendt, and R. B. Amor, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **49**, 547 (2000).
- [2] H. K. Tönshoff and I. Inasaki, *Sensors Applications, Volume 1, Sensors in Manufacturing* (2001).
- [3] J. A. Ghani, M. Rizal, M. Z. Nuawi, M. J. Ghazali, and C. H. C. Haron, in *Wear* (2011), pp. 2619–2624.
- [4] S. Ettl, O. Arold, Z. Yang, and G. Häusler, *Appl. Opt.* **51**, 281 (2012).
- [5] P. Lehmann, *In-process Laser-Messmethoden auf der Grundlage der Fourieranalyse* (expert, 2003).
- [6] S. Heist, A. Mann, P. Kühmstedt, P. Schreiber, and G. Notni, *Opt. Eng.* **53**, 112208 (2014).
- [7] T. Grübler and P. Drabarek, in *Proc. SPIE 9525* (2015), pp. 95250O.
- [8] S. Matthias, M. Kästner, and E. Reithmeier, in *Proc. SPIE 9525* (2015), pp. 952513.
- [9] P. Günther, T. Pfister, L. Büttner, and J. Czarske, *Tm - Tech. Mess. Plattf. Für Methoden Syst. Anwendungen Messtech.* **77**, 479 (2010).
- [10] B. E. Truax, F. C. Demarest, and G. E. Sommargren, *Appl. Opt.* **23**, 67 (1984).
- [11] R. Kuschmierz, A. Davids, S. Metschke, F. Löffler, H. Bosse, J. Czarske, and A. Fischer, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **1** (2016).

VDI-Fachtagung
Form- und
Konturmesstechnik

Das System der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung

Prof. Dr.-Ing. habil. **S. Gröger**, Professur Fertigungsmesstechnik, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz

Kurzfassung

Das System der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) ist ein internationales Normenkonzept, mit dem geometrische Eigenschaften von Bauteilen sowohl bezüglich der funktionalen Eigenschaften als auch die zum Nachweis der Eigenschaften benötigten Verfahren und Geräte einheitlich beschrieben werden. Es werden geometrische Merkmale, wie z. B. Größenmaß, Ort, Richtung, Form und Oberflächenbeschaffenheit, behandelt. Der Beitrag gibt einen Überblick zum Aufbau des Systems und den grundlegenden Regeln. Der Nutzen für die Anwendung im Unternehmen wird aufgezeigt.

1. Geometrische Produktspezifikation als Sprache

Die Kommunikation sowohl im Unternehmen als auch über Unternehmens- und Ländergrenzen hinweg bildet die Grundlage für erfolgreiches Agieren in Bezug auf die Qualität von Produkten. Mit einer wachsenden weltweiten Vernetzung der Unternehmen als Kunde oder Lieferant und dem Bestreben nach kostengünstigen Produkten muss auch die Kommunikation über die Grenzen hinweg funktionieren. Bild 1 verdeutlicht, dass die örtliche und länderspezifische Sprache schnell eine Barriere für den weltweiten Handel darstellt.

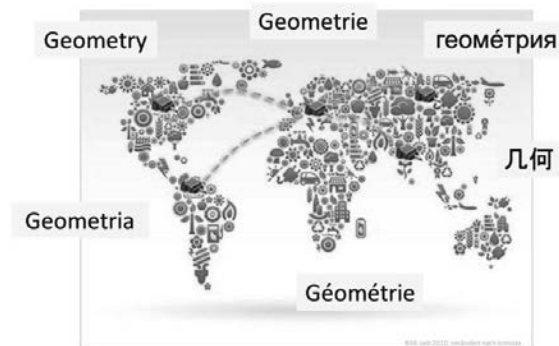


Bild 1: Sprachliche Grenzen als Barriere im Weltmarkt

Der Vergleich des GPS-Systems mit einer Sprache, die entsprechend dem Duden [1] als ein „System von Zeichen und Regeln, das einer Sprachgemeinschaft als Verständigungsmittel dient“ bezeichnet wird, bildet einen wesentlichen Ansatz zum Verständnis der in den Normen aufgebauten Regeln. Durch die Eintragung von definierten Symbolen und Werten in technischen Zeichnungen oder an 3D-Modellen kann damit in allen Bereichen der Technik auf internationaler Ebene non-verbal kommuniziert werden.

2. Das internationale Normenkonzept der Geometrischen Produktspezifikation

Mit der Zusammenführung nationaler und internationaler Normen und neuer Erkenntnisse aus Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden die Vorgehensweisen der geometrischen Spezifikation und Verifikation in dem System der Geometrischen Produktspezifikation seit über 20 Jahren zusammengefasst und strukturiert. Erarbeitet werden die Normen des GPS-Systems im ISO/TC 213, das sich aus 25 teilnehmenden und 28 beobachtenden Ländern zusammensetzt (Bild 2).



Bild 2: Mitgliedsstaaten im ISO/TC 213 (blau. teilnehmende Länder, orange: beobachtende Länder) [2]

Ziel der Normungsarbeit ist die Verknüpfung, der an der Entstehung und Bewertung beteiligten Fachgebiete, um durch eindeutige funktionale Beschreibungen, klare Vorgaben für die Herstellung und den Nachweis der Bauteile ableiten zu können. Dabei steht die funktionale geometrische Beschreibung im Fokus. Der Zusammenhang zwischen der Funktion, die durch die Spezifikation als geometrische Merkmale abgebildet wird, den Herstellprozessen und den Schritten zur Verifikation verdeutlicht Bild 3. Mit den Normen des GPS-Systems wird

angestrebt, dass die Unsicherheit, die bereits bei der Abbildung der Funktion durch die geometrische Spezifikation entsteht, durch eindeutige Spezifikationen reduziert wird. Je weiter die Spezifikation von der tatsächlichen Funktion entfernt ist, desto größer wird die Unsicherheit, die Funktion tatsächlich erfüllt zu können. Im weiteren Fortschritt der Produktentstehung sind bei unzureichender Spezifikation zusätzlich Mehrdeutigkeiten für die Ableitung der Fertigungsverfahren und -parameter als auch für die Verifikationsstrategien und -kriterien möglich.



Bild 3: Zusammenhang zwischen Funktion, Spezifikation, Herstellung und Verifikation

Mit der Annahme, dass die Toleranzgrenzen den Funktionsgrenzen entsprechen, wird in der grundlegenden Norm des GPS-Systems der ISO 8015 [2] aus dem Jahre 2011 dieser funktionale Aspekt festgeschrieben. Eine Überschreitung der Toleranzgrenzen wird als Funktionsausfall betrachtet und eine Einhaltung der Toleranzgrenzen wird entsprechend als Funktionserfüllung bewertet. Beispiele aus der Praxis widerlegen diese Aussagen teilweise, was einerseits auf eine unzureichende Kenntnis der Funktionseigenschaften und andererseits auf nicht eindeutige Spezifikationen schließen lässt.

Im Bild 4 sind die elementaren Grundsätze basierend auf den aufgezeigten Annahmen zur Interpretation der Toleranzgrenzen zusammengefasst. Beispielhaft werden einige dieser Grundsätze nachfolgend kurz erläutert. Der Grundsatz des Aufrufens, auch als Invokationsprinzip bezeichnet, legt fest, dass sobald ein Teil des GPS-Systems aufgerufen wird, das gesamte GPS-System gilt, außer es wurde durch die Angabe alternativ geltender Dokumente andere Regeln vorgegeben. Somit ist bereits mit der Verwendung eines Symbols z. Bsp.

für die Spezifikation der Rauheit, der Angabe einer Passung oder dem Aufrufen der Allge-meintoleranzen das komplette System aufgerufen, auch wenn kein Hinweis auf die ISO 8015 auf der Zeichnung zu finden ist.

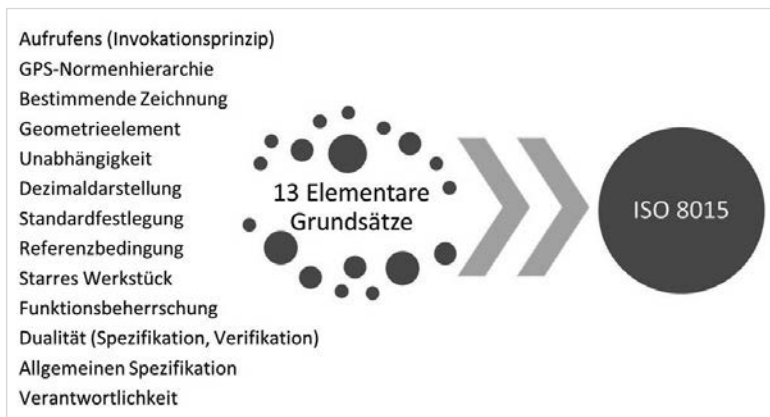


Bild 4: Elementare Grundsätze der ISO 8015

Der Grundsatz der GPS-Normenhierarchie beschreibt, dass eine Hierarchie zwischen den Normen besteht (Bild 5). Es werden fundamentale, allgemeine und komplementäre Normen unterschieden. Bis zum Erscheinen des Masterplans, der als Norm ISO 14638 [4] vorliegt, wurden die fundamentalen GPS-Normen in GPS-Grundnormen und globale GPS-Normen unterschieden.

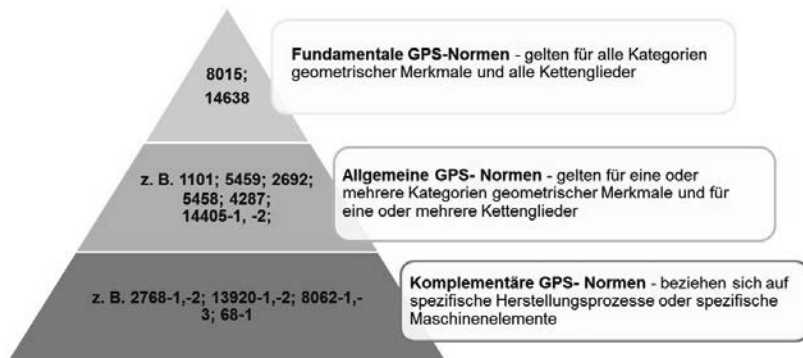


Bild 5: Hierarchischer Aufbau des GPS-Systems nach ISO 14638

Besondere Bedeutungen für die Interpretation von Spezifikationen sind mit dem Unabhängigkeitsprinzip, dem Grundsatz des Geometrieelementes und dem Grundsatz der allgemeinen Spezifikation festgelegt. Das Unabhängigkeitsprinzip der ISO 8015 [2] besagt: „*standardmäßig muss jede GPS-Anforderung an ein Geometrieelement oder eine Beziehung zwischen Geometrieelementen unabhängig von anderen Anforderungen erfüllt werden.*“ Das kann durch zusätzlich Angaben, z. Bsp. für die Hüllbedingung oder die gemeinsame Zone (zukünftig als kombinierte Zone bezeichnet), außer Kraft gesetzt werden. Die bis 2011 in Deutschland ohne Zeichnungseintrag geltende DIN 7167, die standardmäßig die Hüllbedingung festgelegt hat, wurde damit ersetzt. Die Interpretation der Eintragung von Größenmaßen hat sich damit maßgeblich verändert und muss beachtet werden.

Ein Bauteil wird als eine Verknüpfung einzelner Geometrieelemente, z. Bsp. Linien, Flächen, Zylindern, Kegeln oder Kugeln, betrachtet. Der Grundsatz des Geometrieelementes besagt dazu: „*standardmäßig gilt jede GPS-Spezifikation für ein Geometrieelement oder eine Beziehung zwischen Geometrieelementen für das gesamte Geometrieelement und jede GPS-Spezifikation gilt nur für ein einziges Geometrieelement oder eine einzige Beziehung zwischen Geometrieelementen.*“ Auch damit wird verdeutlicht, dass die Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Geometrieelementen ein zentrales Spezifikationskriterium ist.

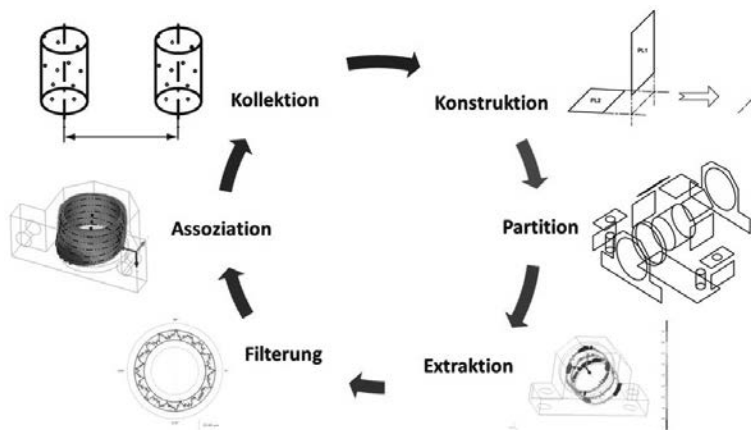


Bild 6: Operationen an Geometrieelementen nach ISO 17450-1

Grundlegende Operationen an Geometrieelementen (Bild 6) bilden die Basis für die Spezifikation und Verifikation im GPS-System. Ausgehend von der Partitionierung in einzelne Ge-

ometrieelemente werden Extraktion, Filterung, Assoziation, Kollektion und Konstruktion unterschieden. Als Spezifikationsoperator wird im Grundsatz der Dualität der ISO 8015 die Festlegung von Operationen in vorgegebener Reihenfolge definiert, die unabhängig von dem Verifikationsoperator sind. Wobei der Verifikationsoperator ebenfalls Operationen in vorgegebener Reihenfolge definiert, die den Spezifikationsoperator widerspiegeln sollen.

Den Überblick über die im GPS-System betrachteten geometrischen Eigenschaften und Spezifikations- sowie Verifikationsfunktionen gibt das Matrix-Modell der ISO 14638 (Bild 7). Ziel der internationalen Normungsarbeit ist das Füllen der Matrix mit Normen zur Definition der einzelnen geometrischen Eigenschaften z. Bsp. bezüglich der Symbole für die Zeichnungseintragung, die Festlegung von Toleranzzonen oder auch die Strategien für die Messung mit den notwendigen Eigenschaften der Messgeräte und deren Funktionsnachweis durch Kalibrierung. Im Bild 7 sind die Bereiche der Matrix für die Spezifikation und Verifikation gekennzeichnet.

| | Kettenglieder | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------------|---|---------|---------------------|--------------|
| | A | B | C | D | E | F | G |
| | Symbole und Angaben | Anforderungen an Geometrieelemente | Merkmale von Geometrieelementen | Übereinstimmung und Nicht-Übereinstimmung | Messung | Messgeräte | Kalibrierung |
| Größenmaß | Spezifikation | | Vergleich | | | Verifikation | |
| Abstand | | | | | | | |
| Form | | | | | | | |
| Richtung | | | | | | | |
| Ort | | | | | | | |
| Lauf | | | | | | | |
| Oberflächenbeschaffenheit: Profil | | | | | | | |
| Oberflächenbeschaffenheit: Fläche | | | | | | | |
| Oberflächenunvollkommenheit | | | | | | | |

Bild 7: Matrix-Modell für GPS-Normen nach ISO 14638

Die geometrischen Eigenschaften können in Eigenschaften am Geometrieelement, z. Bsp. Größenmaß, Form, Welligkeit und Rauheit und die Beziehung zwischen Geometrieelementen, z. Bsp. Richtung, Ort und Lauf, unterschieden werden. Mit der Zuordnung der wichtigsten Normen gibt das Bild 8 einen Überblick über die im GPS-System definierten geometrischen Eigenschaften.



Bild 8: Einteilung der geometrischen Eigenschaften

Die ISO 1101 [5] umfasst die Festlegungen zur geometrischen Tolerierung für Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen. Der in dieser Norm beschriebene Toleranzrahmen (Bild 9) mit den einzelnen Feldern dient dabei, wie die Grammatik einer Sprache, zur Verknüpfung der Vokabeln und der Umsetzung der Regeln.

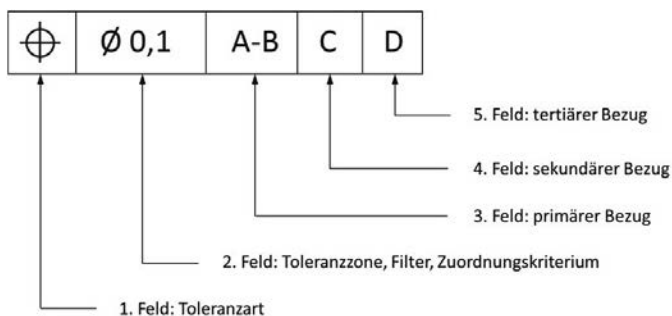


Bild 9: Toleranzrahmen entsprechend der ISO 1101 als Grammatik

Zulässige Abweichungen werden bei der geometrischen Tolerierung entsprechend der ISO 1101 durch Toleranzzonen festgelegt. Die möglichen Toleranzzonen sind im Bild 10 veranschaulicht. Die Zuordnung der Toleranzzone zur geometrischen Eigenschaft und dem tolerierten Geometrieelement ist in der Norm beschrieben. Aus der Eintragung im Toleranz-

rahmen wird die zugeordnete Toleranzzone nicht ersichtlich und erfordert damit das Auswendiglernen der Zuordnung.



Bild 10: Toleranzzonen als Vokabeln der GPS-Sprache

Die Interpretation der GPS-Spezifikation setzt die Kenntnisse der Vokabeln und Grammatik voraus. Kritisch ist dafür die ständig steigende Komplexität des GPS-Systems durch die in den letzten Jahren neu veröffentlichten Normen und Symbole. Bei konsequenter Umsetzung im gesamten Unternehmen sind jedoch erhebliche Vorteile nachweisbar.

3. Nutzen des GPS-Systems für das Unternehmen

Der mit der Einführung entstandene Aufwand kann durch mehrere Aspekte des Nutzens für das Unternehmen gerechtfertigt werden. Allein aus rechtlicher Sicht bilden die Normen den Stand der Technik ab und sind im Produkthaftungsfall für den Nachweis heranzuziehen. Ein ordnungsgemäßes Verhalten kann bei Anwendung der gültigen GPS-Normen somit leichter nachgewiesen werden.

Aus der Sicht des Welthandels können die GPS-Normen als Sprache angesehen werden. Im Umgang mit den internationalen Handelspartnern wird damit die bereits aufgezeigte sprachliche Barriere reduziert. Zeichnungen nach ISO Normen des GPS-Systems (Bild 11) werden weltweit gleich interpretiert.

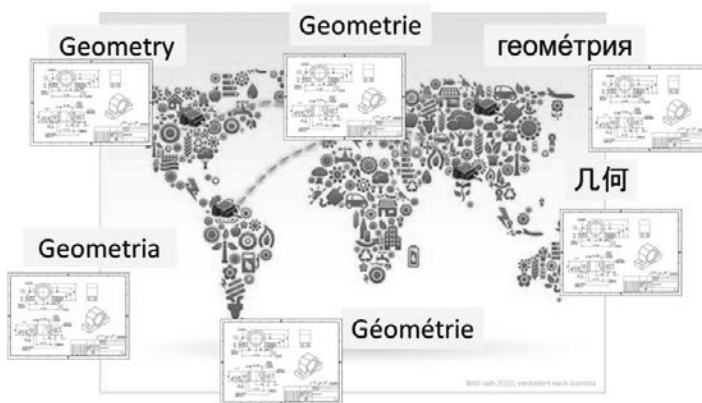


Bild 11: Auflösung der Kommunikationsgrenzen mit GPS

Unabhängig von der Überschreitung der Ländergrenzen lässt sich der Nutzen für das Unternehmen in der Unterstützung der einzelnen Abteilungen ableiten (Bild 12). Mit der eindeutigen Abbildung der Funktionsgrenzen wird die Qualität der Produkte besser sichergestellt. Das Potential zur Reduzierung von Entwicklungszeiten wird auch im Zusammenhang zur Simulation von Fertigungstoleranzen oder Bauteilverformungen zur optimierten Auslegung von Produkteigenschaften erkannt. Für die Auswahl von Fertigungsverfahren ist das Vermeiden von Angsttoleranzen auf Grund bekannter Funktionsgrenzen und eindeutiger Spezifikationen ein direkter Kostenfaktor.

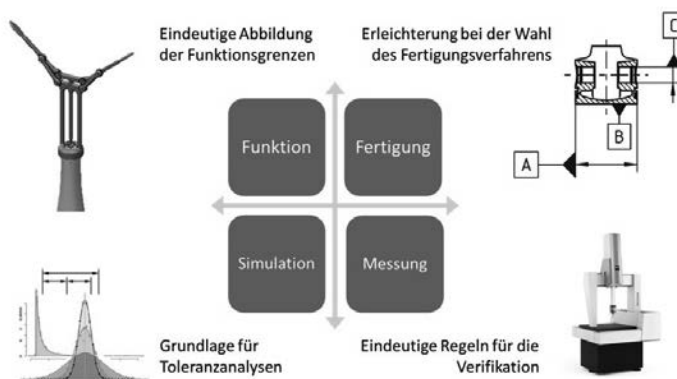


Bild 12: Nutzen des GPS-Systems für die verschiedenen Abteilungen eines Unternehmens

Aus Sicht der Messtechnik sind eindeutige Regeln für den Nachweis die Grundlage für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und die Sicherstellung des Nachweises der Produkt- oder Prozesseigenschaften. Leider sind derzeit die Festlegungen für den messtechnischen Nachweis noch an vielen Stellen unzureichend, um ohne weitere Absprachen zwischen Lieferanten und Kunden agieren zu können.

4. Zusammenfassung

Das internationale Normensystem zur Beschreibung geometrischer Eigenschaften bietet erhebliches Potential zur Optimierung von Produkten und der Reduzierung von Kosten. Es setzt dafür voraus, dass die beschriebenen Regeln und Symbole eindeutig interpretiert werden können, sowohl aus funktioneller, fertigungstechnischer aber auch messtechnischer Sicht. Auch die GPS-Sprache ist mehr als Worte.

Literaturhinweise:

- [1] <http://www.duden.de/> abgerufen am 04.05.2016
- [2] <http://isotc213.ds.dk/> abgerufen am 04.05.2016
- [3] DIN EN ISO 8015:2011, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln (ISO 8015:2011)
- [4] DIN EN ISO 14638:2015, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – MatrixModell
- [5] DIN EN ISO 1101:2014, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf

Fachausschuss VDI/VDE-GMA 3.21 Formmesstechnik

Dr. Joachim Hägele-Görlitz, Mahr GmbH, Göttingen

Kurzfassung

Der VDI ist mit über 155.000 persönlichen Mitgliedern der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten arbeiten jedes Jahr aktiv an der Förderung und Zukunfts-Gestaltung des Technik-Standorts Deutschland mit. Zusammen mit dem Verband der Elektrotechnik (VDE) betreibt der VDI die Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, in deren Fachbereich Fertigungs-messtechnik auch der Fachausschuss 3.21 Formmesstechnik angesiedelt ist [1].

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Aktivitäten dieses Ausschusses. Außerdem wird die Richtlinienreihe VDI/VDE 2631 kurz vorgestellt und einige Änderungen der letzten Jahre sowie aktuelle Themen aus der Zusammenarbeit mit DIN, ISO und anderen VDI-Fachausschüssen präsentiert.

1. Überblick über die Aktivitäten

Der Fachausschuss VDI/VDE-GMA 3.21, 1989 gegründet, gehört zum Fachbereich 3, Fertigungsmesstechnik, in der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) im VDI e.V.. Als Gemeinschaftsausschuss mit dem Normenausschuss DIN NATG-C 2.13 Formmesstechnik ist er auch als Spiegelgremium zu ISO TC213 tätig. Die Zahl der ehrenamtlichen Mitglieder beträgt ca. 15 und pro Jahr finden 2-3 Sitzungen an jeweils zwei Sitzungstagen statt. Fachliche Schwerpunkte sind die Beschreibung von Messverfahren und Auswerteparametern nicht normativ fixierter Formmessungen und die Interpretation vorhandener und neuer Normen der Formmesstechnik für den industriellen Anwender [1].

Ziele der Arbeiten sind:

- Erarbeitung von VDI/VDE-Richtlinien zur Formmesstechnik für die industrielle Praxis (Richtlinie VDI/VDE 2631, Formmesstechnik)
- Begleitung der internationalen Normung zur Formmesstechnik im ISO TC 213
- Vorbereitung von Fachtagungen zur Formmesstechnik

2. Die Richtlinienreihe VDI/VDE 2631, Formmesstechnik

Die Richtlinienreihe VDI/VDE 2631 umfasst aktuell zehn Blätter, ein elftes befindet sich in Vorbereitung.

Blatt 1 bis Blatt 3 beschreiben Formmessgeräte und die Grundlagen der Formmesstechnik. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Verarbeitung der von der vorhandenen Sensorik aufgenommenen Messprofile sowie deren Filterung, insbesondere der Eliminierung der kurzwelligen Rauheits-Anteile.

Formmessgeräte werden im Wesentlichen über die technischen Daten der vorhandenen Dreh- und Linearachsen spezifiziert. Blatt 4 bis Blatt 7 beschreiben Normale und Verfahren die zum Nachweis der Einhaltung der Spezifikation in der Annahme- und Abnahmeprüfung eingesetzt werden.

Über den Zeitraum von einigen Monaten und Jahren, den ein Messgerät im industriellen oder wissenschaftlichen Einsatz ist, verändern sich die Eigenschaften des Gerätes, z.B. durch Verschleiß. Daher empfiehlt es sich, die wesentlichen Geräte-Kenngrößen einer regelmäßigen Überwachung zu unterziehen. In Blatt 8 wird die Vorbereitung und Durchführung einer solchen Überwachung beschrieben, ein beigelegter Datenträger enthält Vorlagen für Formblätter, die sich in der Praxis bewährt haben.

Schließlich gibt es noch das Blatt 9, welches eine Reihe von Mess- und Auswertebedingungen für typische Anwendungen in Form von Messplänen enthält.

Aktuell wird die Richtlinienreihe ergänzt durch ein Blatt 10 zur Messunsicherheits-Ermittlung von Formmessungen, und Blatt 11 zur harmonischen Fourieranalyse wird demnächst veröffentlicht.

3. Änderungen in der VDI/VDE 2631 seit 2013

Die VDI-Richtlinien werden auf Basis der Richtlinie VDI 1000 [2] erstellt. In der Regel erfolgt alle 5 Jahre eine Überarbeitung. Da auch die VDI 1000 im Lauf der Zeit Änderungen unterliegt, lag in den letzten Jahren ein Haupt-Augenmerk auf der redaktionellen Vereinheitlichung der Blätter.

2015 erfolgte aus Gründen formaler Korrektheit („Messung ist nur dann eine Prüfung, wenn dabei ein Vergleich mit einer Forderung verbunden ist“, siehe [3]) die Umbenennung des Ausschusses von „VDI/VDE-GMA FA 3.21 Formprüfung“ in „VDI/VDE-GMA FA 3.21 Formmesstechnik“, was sich neuerdings auch im Titel der Richtlinien abbildet.

Ein weiterer Beschluss im Fachausschuss hatte zur Folge, dass aktuelle Richtlinien keine Prüfanweisungen mehr enthalten. Hier wird jeweils auf Blatt 9 hingewiesen, um Doppelungen zu vermeiden.

Der aktuelle Richtlinienstand ist Tabelle 1 zu entnehmen, welcher auch jederzeit aktuell im Internet unter www.vdi.de/2631 abgerufen werden kann.

Tabelle 1: Aktueller Stand der VDI/VDE 2631, Formmessung
Richtlinienreihe VDI/VDE 2631 Formprüfung/Formmesstechnik

| Blatt | Name | Ausgabe | Status |
|-------|---|---------|--------|
| 1 | Grundlagen zur Bestimmung von Form- und Lageabweichungen | 1999-06 | Ü |
| 1 | Grundlagen | 2015-05 | E |
| 2 | Überprüfung der Signalübertragungskette | 2014-06 | |
| 3 | Eigenschaften und Auswahl von Filtern | 2007-08 | Ü |
| 4 | Ermittlung der radialen Drehführungsabweichung | 2014-06 | |
| 5 | Ermittlung der axialen Drehführungsabweichung | 2015-06 | |
| 6 | Bestimmung der Geradführungsabweichungen | 2005-09 | Ü |
| 6 | Ermittlung der Geradführungsabweichungen | 2015-05 | E |
| 7 | Bestimmung der Lageabweichung von Formmessgeräteachsen | 2012-02 | |
| 8 | Stabilitätsüberwachung von Formmessgeräten | 2013-09 | |
| 9 | Beispiele für Mess- und Auswertebedingungen | 2014-10 | |
| 10 | Ermittlung der Messunsicherheit von Formmessungen | 2014-12 | |
| 10 | Ermittlung der Messunsicherheit von Formmessungen - Berichtigung zur Richtlinie VDI/VDE 2631 Blatt 10:2014-12 | 2015-02 | |
| 11 | Fourieranalyse, Harmonische | | P |

Legende: Ü = Überprüft E = Entwurf P = Projekt

Das Blatt 1 der Richtlinie „Grundlagen“ beschreibt kurz und präzise die Aufgabenstellung der Formmesstechnik und den Aufbau von Formmessgeräten. Diese Einführung war bisher in Ermangelung einer entsprechenden Norm von erheblicher Bedeutung. In der ISO ist zur Zeit der Entwurf einer „Formmessgeräte-Norm“ als „Revision of ISO 4291“ in der Diskussion (siehe auch Kapitel 4), der diesem Blatt zukünftig eine normative Grundlage geben könnte. Verglichen mit der Vorgänger-Version der Richtlinie wurde die Beschreibung des Aufbaus von Formmessgeräten modernisiert, die Beschreibung der Geräteachsen aus dem Kapitel Messwert-Einflüsse präzisiert und der Gerätebeschreibung zugeordnet.

Das Kapitel „Einflüsse auf den Messwert“ wurde umstrukturiert in die aus Sicht des Ausschusses wichtigsten Größen Messgerät, Umgebung, Messtechniker, Messstrategie und Messobjekt. Zahlreiche Grafiken verdeutlichen die jeweiligen Sachverhalte. Hinweise auf Unterschiede zwischen alter und neuer Normungslage (GPS, siehe auch [4], [5]) sowie zur Bedienung und auf mögliche Fehlerquellen runden den Inhalt ab. Als Beispiele seien hier der Schwingungseinfluss bei der Rundheitsmessung (siehe Bild 2) und der Einfluss des Tastkuglradius auf das Messergebnis (siehe Bild 3) angeführt.

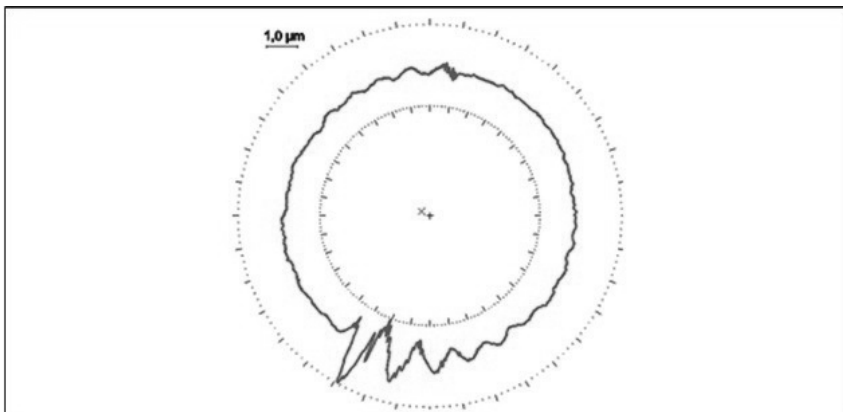


Bild 2: Schwingungseinfluss bei der Rundheitsmessung

In Bild 2 wird der Einfluß einer Impulsstörung auf einen nicht-berührenden optischen Tastarm verdeutlicht. Die Auswirkung der Störung ist erheblich größer als die am Teil aufgenommenen Tasterausschläge, das Abklingen der Störung wird ebenfalls deutlich sichtbar.

In Bild 3 wird die mechanische Filterwirkung einer Tastkugel auf Grund ihres Durchmessers verdeutlicht. Kurzwellige Strukturen werden im aufgenommenen Profil nicht mehr korrekt wiedergegeben, das aufgenommene Profil wird „glatter“.

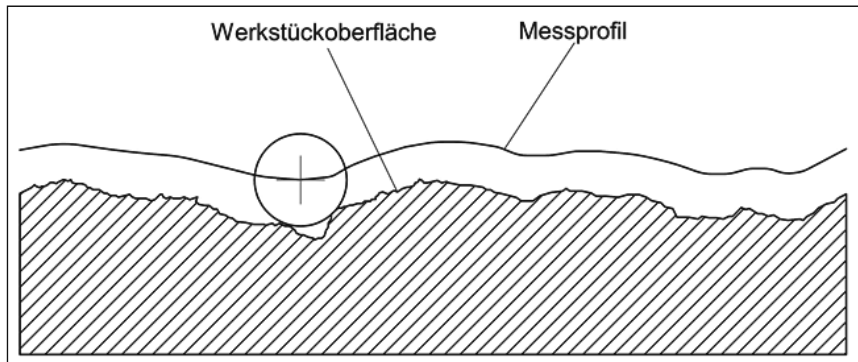


Bild 3: Einfluss des Tastkugelradius auf das Messergebnis

Als weiteres Beispiel für den Inhalt der Richtlinie sei hier der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf Messergebnisse genannt, der im Allgemeinen nicht exakt zu beschreiben ist. In der Richtlinie werden Anwender darauf hingewiesen, auf welche Fälle gegebenenfalls zu achten ist:

Die Feuchtigkeit der Luft kann auf unterschiedlichem Weg Einfluss auf das Messergebnis haben:

- Durch Beeinflussung der Geometrie des Messgeräts und des Messobjekts (z. B. bei Komponenten aus Granit, Keramik oder Kunststoff). Ein Einfluss ist zu erwarten, wenn Teile ihr Volumen in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit verändern.
- Durch Korrosion und das Binden von Staubpartikeln auf Führungen. Die Gefahr von Korrosion ist vor allem bei Führungen aus Stahl zu berücksichtigen. Auch Messobjekte aus Stahl können davon betroffen sein (z. B. Teile, die zur Messung entfettet wurden und dann für einige Stunden ohne Korrosionsschutz im Messraum liegen).
- Durch Beeinflussung der Sensoren, z. B. bei kapazitiven Sensoren.

Blatt 2 der Richtlinie beschreibt die Signalübertragungskette eines Formmessgeräts, die das gemessene Profil an einem Geometrieelement mechanisch und elektrisch in das Ergebnis-Profil umwandelt, an dem schließlich die Bewertung der Geometrieabweichung - z.B. der Rundheitsabweichung - erfolgt. Die Kalibrierung der Empfindlichkeit der Signalübertragungskette erfolgt mit Formabweichungsnormalen. Hier wurden jetzt die Endmaßstufen in der Richtlinie ergänzt, die insbesondere in der Abnahmeprüfung einfacher manueller Formmessgeräte ihre Anwendung finden. Auch die Verwendung hochgenauer Linear-Maßstäbe in Referenz-Formmessgeräten wurde neu in die Richtlinie aufgenommen.

Die Überarbeitung von Blatt 3 „Filterung“ ist vor dem Hintergrund aktueller Normungen in der ISO 16610 erfolgt. Besonderes Augenmerk gilt der Nutzbarkeit für den Anwender, also nicht nur der Definition und Beschreibung von Filtern und Parametern, sondern auch deren Auswahl, die in der Normung nur unvollständige Berücksichtigung findet. Als Beispiel dafür sei auf eine Tabelle aus DIN EN ISO 12181 hingewiesen (Tabelle 4), die häufig zur Ermittlung korrekter Tastkugeldurchmesser zur Rundheitsmessung angeführt wird. Diese Tabelle ist bei der Auswahl der „richtigen“ Tastkugel aber nur von begrenztem Nutzen. Einerseits, weil sie von der Grenzwellenzahl ausgeht, jedoch unerwähnt lässt, woher diese stammt oder ob es einen Defaultwert gibt. Andererseits kommt man in vielen (den meisten?) Praxisfällen zu empfohlenen Tastkugeldurchmessern mehr oder weniger deutlich unter 1 mm, was bei den üblichen Tastkräften im cN-Bereich beim Formmessgerät oder auch beim Koordinaten-Messgerät zu Beschädigungen am Messobjekt führen kann.

Tabelle 4: Grenzwerte für UPR [4]

| Filter überträgt von 1 UPR bis | Tiefpassfilter | |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| | Mindestanzahl von Antastpunkten | Mindestverhältnis d/r^a |
| 15 | 105 | 5 |
| 50 | 350 | 15 |
| 150 | 1 050 | 50 |
| 500 | 3 500 | 150 |
| 1 500 | 10 500 | 500 |

^a d/r ist das Verhältnis zwischen dem Durchmesser d des Referenzkreises und dem Radius r der Tastelemente. Wenn das Verhältnis d/r kleiner ist als der angegebene Wert, werden die hohen UPR-Schwingungen des Geometrieelements innerhalb des Übertragungsbandes durch den Einfluss des Tasterradius verfälscht.

Aus diesem Grund wurde in Blatt 3 nach ausführlicher Diskussion eine vereinfachte Vorgehensweise in Form eines Ablaufdiagramms dafür beschrieben, wie ein Messtechniker aus-

gehend von Zeichnungsvorgaben zu passenden Filterparametern, Messpunkt-Abständen und Tastkugeldurchmessern kommt. Die Ermittlung maximal zulässiger Tastkugeldurchmesser für die vorhandene Messaufgabe ist dabei mathematisch korrekt über Formeln und für die meisten Standardfälle auch durch Ablesung in Diagrammen möglich.

Blatt 4 bis Blatt 7 zur Annahme-/Abnahmeprüfung wurden inhaltlich nur geringfügig überarbeitet, jedoch wurde der Aufbau der Blätter weitgehend vereinheitlicht. Sie beschreiben die Überprüfung von radialer und axialer Drehführungsabweichung des Formmessgeräts sowie von Geradheits- und Lageabweichungen der vorhandenen Linearachsen. Blatt 7 zur Ermittlung der Lageabweichungen von Formmessgeräteachsen enthält in der Überarbeitung zusätzlich eine tabellarische Übersicht mit Fotos der verwendeten Normale.




| | Parallelität | | Rechtwinkligkeit | |
|---|---|---|---|---|
| | Prüfzylinder)* | Kontrollsäule)* | Pianglasplatte | 90°-Winkelnormale |
| |  |  |  |  |
| Rechtwinkligkeit R- zu C-Achse in C-R-Ebene | | X | X | X |
| Parallelität Z- zu C-Achse in C-R-Ebene | X | X | | |
| Parallelität Z- zu C-Achse in C-Y-Ebene | X | X | | |

Bild 5: Übersicht über Normale zur Ermittlung der Lageabweichungen

In Blatt 8 „Stabilitätsüberwachung“ wurde bei der Überarbeitung besonderer Wert auf die Vorbereitung dieser Maßnahme gelegt. Zu diesem Zweck gibt es Hinweise zur Festlegung von Referenzteilen, zur Auswahl der zu überwachenden Merkmale, zu Stichprobengrößen, Eingriffsgrenzen und Prüfintervallen bis hin zur Durchführung, Dokumentation und Bewertung. Dazu werden beispielhaft Qualitätsregelkarten zu denjenigen Merkmalen eines Formmessgeräts gezeigt, die üblicherweise auch in der Annahme-/Abnahmeprüfung gemessen werden. Die Beispiele sind auch auf einem der Richtlinie beiliegenden Datenträger zur Weiterverwendung verfügbar.

Blatt 9 „Beispiele für Mess- und Auswertebedingungen“ ist im Wesentlichen eine Ansammlung von Messplänen für die typischen Formmessaufgaben. Es wurde versucht, möglichst jeden Parameter, der zur vollständigen Dokumentation einer Formmessung benötigt wird, aufzulisten, zu erläutern und in einem übersichtlichen Messplan abzubilden.

Neu in der Richtlinienreihe VDI/VDE 2631 ist Blatt 10 zur Ermittlung der Messunsicherheit von Formmessungen. Motivation für die Erstellung dieser neuen Richtlinie war die weit verbreitete „Irritation“ im Umgang mit Messunsicherheit und GUM [6] und die damit verbundene schleppende Einführung der enthaltenen Gedanken („Ein Messergebnis ist nur komplett, wenn die zugehörige Messunsicherheit angegeben wird“) in den industriellen Alltag.

Ausgehend von einem einfachen mathematischen Modell werden die wesentlichen Einflussgrößen und die zugehörigen Unsicherheitsbeiträge für Formmessungen aufgezeigt:

- Empirische Standardabweichung des Anzeigewerts der Spitze-zu-Tal-Form-Abweichung $s(FA^*)$
- Führungsabweichung $\Delta LD1$
- Tastersignal $\Delta LD2$
- Thermische Drift $\Delta LD3$
- Formabweichung des Messobjekts $\Delta LD4$
- Ausrichtung, Deformation des Messobjekts $\Delta LD5$
- Sauberkeit des Messobjekts $\Delta LD6$

Jeweils ein Berechnungs-Beispiel für eine Rundheits- und eine Geradheitsmessung erleichtern es den Anwendern, ein eigenes Messunsicherheitsbudget aufzustellen. Tabelle 6 zeigt das Beispiel für die Standardmessunsicherheit einer Rundheitsmessung. Für jeden Unsicherheitsbeitrag ist beschrieben, wie er ermittelt wurde. Die angegebenen Gleichungen sind in den vorhergehenden Kapiteln der Richtlinie erklärt.

Tabelle 6: Berechnungsbeispiel Standardmessunsicherheit bei einer Rundheitsmessung

| Quelle | Bezeichnung | Ergibt sich aus | Beitrag in μm |
|---------------------|--|---|-----------------------------|
| $s(\overline{ROM})$ | Standardabweichung Anzeige | Standardabweichung 15 Wiederholmessungen, Gleichung (8) | 0,104 |
| $u(\Delta LD_1)$ | Führungsabweichung | Spezifikation Hersteller | 0,050 |
| $u(\Delta LD_2)$ | Einmessung/Rückführung | Gleichung (11) | 0,096 |
| $u(\Delta LD_3)$ | Drift | Erfahrungswert | 0,030 |
| $u(\Delta LD_4)$ | Variation der Formabweichung des Messobjekts | Messungen außerhalb Mitte | 0,057 |
| $u(\overline{ROM})$ | Standardmessunsicherheit der Rundheitsabweichung | Gleichung (7) | 0,180 |

In Vorbereitung befindet sich aktuell das Blatt 11 der Richtlinienreihe VDI/VDE 2631, in dem Grundlagen, Anwendungsbereiche und Wirkungen der Fourieranalyse an Formmessungen dargestellt werden. Es betrifft jegliche Arten von Formmessungen, die hinsichtlich harmonischer Inhalte (periodische Wellenanteile) untersucht werden sollen. Die Erkennung dieser periodischen Anteile kann Aufschlüsse über die Ursachen von Funktionsproblemen oder Teileversagen, aber auch Informationen über Umgebungs- oder Messgeräteeinflüsse geben.

Neben den üblichen Begriffserläuterungen und Hinweisen zur Auswahl von Messparametern gibt es Beispiele für die Fourieranalyse an offenen und geschlossenen Profilen. Bild 7 zeigt ein Rundheitsprofil und die zugehörige Fourieranalyse, welche neben einer dominierenden Ovalität (2 W/U) auch höherfrequente dominante Anteile aufzeigt (16 W/U und 46 W/U).

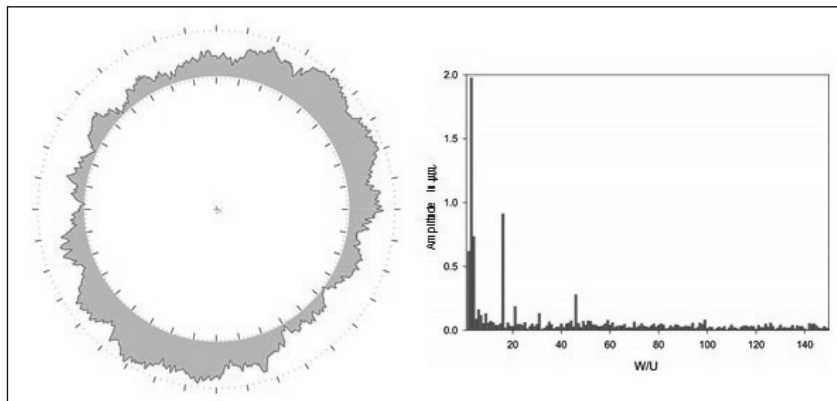


Bild 7: Gegenüberstellung eines Rundheitsmessprofils und einer zugehörigen Fourieranalyse

In einer weiteren Tabelle werden die wesentlichen Ursachen für typische dominante Wellenzahlen aufgelistet, die sich im Wesentlichen aus der Art des Fertigungs- bzw. Messprozesses ergeben (Tabelle 8).

Das Blatt 11 der Richtlinie VDI/VDE 2631 soll 2016 veröffentlicht werden.

Tabelle 8: Dominante Wellenzahlen und ihre Ursachen

| Wellenzahl (W/U) | Ursache |
|------------------|---|
| 1 | Restexzentrizität (Zentrierfehler), wird nicht betrachtet |
| 2 | Ovalität. Ursache z. B. Neigung des Werkstücks zur Spindelachse bei der Messung oder außermittige Aufspannung bei Bearbeitung. Dominierend bei fast allen realen Werkstücken. |
| 3-7 | Ursache in Werkstückaufspannung bei Bearbeitung oder Messung, z. B. in Backenfuttern |
| 8-15 | Art des Fertigungsprozesses, Instabilität der Werkzeugmaschinen (z.B. defekte Lager). |
| >15 | Instabilität der Werkzeugmaschinen, Wechselwirkung Werkstoff, Werkzeug, Schmiermittel. Umgebungsstörungen bei der Messung (Vibrationen). |

4. Aktuelle Zusammenarbeit mit ISO, DIN und weiteren Ausschüssen

Der VDI/VDE-GMA FA 3.21 ist als Gemeinschaftsausschuss mit dem DIN NATG-C 2.13 Formmesstechnik als Spiegelgremium zu ISO TC213 im Bereich Form-Messtechnik tätig. Seit 2007 wurden mehrfach Kommentare zu den ISO-GPS-Normen zur Messung von Formtoleranzen erarbeitet, also zur DIN EN ISO 12180 (Zylindrizität), DIN EN ISO 12181 (Rundheit), DIN EN ISO 12780 (Geradheit) und DIN EN ISO 12781 (Ebenheit).

Im Jahr 2013 wurde der Ausschuss über den Entwurf „Proposal to develop modern ISO Rotary type form measuring instrument“ informiert, welcher in ISO TC 213 WG 6 eingereicht worden war. Als Begründung für diese neue Norm wurde zum Einen die Weiterentwicklung der Formmesstechnik seit 1985 genannt, die in einen ISO-Standard abgebildet werden sollte, zum Anderen die Weiterentwicklung der Auswertennormen. Die einzig verfügbare „Form“-Norm ISO 4291 von 1985 zur Ermittlung der Rundheitsabweichung kannte z.B. noch keine Gaussfilter und die ISO/GPS 12180-12781 Normserie war damals noch nicht vorhanden. Die nationale Entsprechung der ISO 4291 von 1987 wurde bereits 2005 zurückgezogen. Da aktuelle Formmessgeräte inzwischen in der Lage sind, auch komplexere Toleranzen als die Rundheit zu messen und auszuwerten, z.B. Koaxialität, Zylinderform oder Rechtwinkligkeit, sollte eine neue Norm auch in diesem Punkt einen größeren Umfang haben.

Aktuell befasst sich der Fachausschuss VDI/VDE-GMA 3.21 in einer Arbeitsgruppe damit, Kommentare zu diesem Norm-Entwurf zu erarbeiten und über das DIN in die internationale Normung einzubringen.

Als weitere Aktivität zu erwähnen ist die Zuarbeit zum Fachausschuss 3.31 Koordinaten-Messtechnik hinsichtlich Überarbeitung der VDI/VDE 2617 Blatt 2.2 „Formmessung auf Koordinatenmessgeräten“. Auch wegen personeller Überschneidungen gibt es einen regelmäßigen inhaltlichen Austausch mit dem Fachausschuss 3.24 Konturmesstechnik, dem Fachausschuss 3.25 Oberflächenmessung sowie dem Fachausschuss 3.13 Messräume.

5. Zusammenfassung

Seit Juni 2013 hat der Fachausschuss VDI/VDE-GMA 3.21 neben der Organisation der aktuellen Form & Konturtagung sieben Mal getagt und dabei acht Richtlinien-Blätter überarbeitet und zwei neue Blätter der Richtlinienreihe VDI/VDE 2631 Formmesstechnik erstellt. Dazu kam eine Reihe von Beiträgen zur internationalen Normung.

Wir schauen somit auf drei Jahre intensiver Arbeit zurück, neue Aufgaben liegen vor uns. Mögliche Themen für neue Richtlinienblätter wurden bereits an den Ausschuss herangetragen, z.B. Lageabweichungen, Nockenmessung oder optische Formmessung.

6. Literatur

- [1] www.vdi.de
- [2] VDI 1000:2010:06, VDI-Richtlinienarbeit, Grundsätze und Anleitungen, Beuth-Verlag, Berlin
- [3] DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Messtechnik, Teil1: Grundbegriffe, Beuth-Verlag, Berlin
- [4] DIN EN ISO 12181-1/2:2011-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Rundheit, Beuth-Verlag, Berlin
- [5] DIN EN ISO 12780-1/2:2014-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geradheit, Beuth-Verlag, Berlin
- [6] DIN V ENV 13005:1999-06 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Fassung ENV 13005:1999 (Guide to the expression of uncertainty in measurement; German version ENV 13005:1999). Beuth Verlag, Berlin

Messen von Form- und Lageabweichungen mit Form- und Koordinatenmessgeräten

Anwendung der in ISO 8015 formulierten GPS-Grundsätze der Dualität und Verantwortlichkeit in der Praxis

Measuring of Form, Orientation, Location and Run out Deviations with Form- and Coordinate Measuring Devices

Use of the ISO 8015 GPS principles of Duality and Responsibility in practice

Prof. Dr.-Ing. habil. **U. Lunze**, Westsächsische Hochschule Zwickau;
Dr.-Ing. Dipl.-Math. techn. **R. Roithmeier**, Carl Zeiss IMT GmbH

Kurzfassung

Zu den in DIN EN ISO 8015 formulierten Grundsätzen der geometrischen Produktspezifikation gehören die Grundsätze der Funktionsbeherrschung, Dualität und Verantwortlichkeit. Ausgehend vom Grundsatz der Funktionsbeherrschung, d.h. die GPS- Spezifikationen in der technischen Zeichnung/CAD-Modell beschreiben vollständig die Funktionsanforderungen an die Bauteilgeometrie, wird die Bedeutung der Grundsätze der Dualität und Verantwortlichkeit bei der Festlegung der Messstrategie an Beispielen diskutiert.

Abstract (optional)

In ISO 8015 principles of the geometrical product specification are postulated. The principles of functional control, duality and responsibility belong to them. Based on the use of functional control principle, this means that GPS specifications completely describe the functional requirements to the workpiece geometry. The importance of the principles of duality and responsibility are be discussed in order to define the measuring strategy.

1. GPS-Grundsätze von DIN EN ISO 8015 [1]

In DIN EN ISO 8015 sind Grundsätze des ISO-Systems der geometrischen Produktspezifikation formuliert, die für jede Zeichnung gelten. Abweichungen von diesen Grundsätzen sind gesondert zu deklarieren. Neben den Grundsatz der Unabhängigkeit, dem Grundsatz der Referenzbedingungen und weiteren gehören dazu auch die Grundsätze der Funktionsbeherrschung, Dualität und Verantwortung. Der Grundsatz der Funktionsbeherrschung sagt

aus, dass die GPS-Spezifikationen (Nennmaße, Toleranzen u.a.) in der technischen Zeichnung/CAD-Darstellung die Funktion des Bauteiles beschreiben. Für deren Eindeutigkeit und Vollständigkeit ist der Konstrukteur verantwortlich (Grundsatz der Verantwortung). Der Grundsatz der Dualität beinhaltet, dass die GPS-Spezifikationen unabhängig von irgendeinem Messverfahren oder Messgerät sind, also nicht vorschreiben wie gemessen bzw. geprüft werden soll. Die Verifikation (Messstrategie) ist gesondert festzulegen. Sie muss gewährleisten, dass unter Beachtung der Messunsicherheit die Einhaltung der GPS-Spezifikationen nachgewiesen wird. Dafür ist das für die Qualitätsprüfung zuständige Personal verantwortlich.

Von Vorteil und oft unumgänglich ist das Zusammenwirken aller Verantwortungsträger hinsichtlich einer prüfgerechten Konstruktion und der Festlegung der Messstrategie.

Im Weiteren werden, ausgehend von der eindeutigen Beschreibung der Bauteilfunktion durch die GPS-Spezifikation, die sich ergebenden Anforderungen und Freiräume an die Festlegung der Messstrategie betrachtet.

2. Rundheitstoleranz

Bild 1 zeigt die Angabe einer Rundheitstoleranz. Diese Spezifikation bedeutet, dass die erfasste Umfangslinie in jedem Querschnitt zwischen zwei in derselben Ebene liegenden konzentrischen Kreisen sein muss, deren Radiendifferenz dem Toleranzwert 0,05mm entspricht.

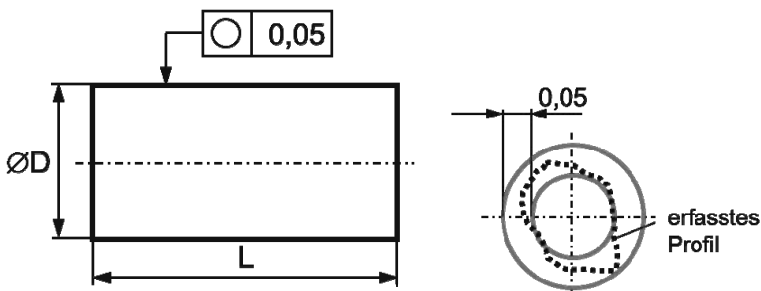


Bild 1: Rundheitstoleranz – Spezifikation und Interpretation

In diesem Fall ist eine vollständige Verifikation der Zeichnungsangabe gar nicht möglich, da zumindest unter den Bedingungen einer industriellen Fertigung nicht in jedem Querschnitt gemessen werden kann. Zusatzinformationen sind erforderlich, um eine praktikable Anzahl von Querschnitten festzulegen. Im Extremfall genügt das Messen eines Querschnittes, sofern aus der Kenntnis der Fertigungseinflüsse auf eine nahezu konstante Rundheitsabwei-

chung (in der Größenordnung der Messunsicherheit liegende) in allen Querschnitten geschlossen werden kann, bzw. dieses durch Messen repräsentativer Teile nachgewiesen wurde. Als Kompromiss hat sich bei vielen praktischen Anwendungen die Festlegung der Anzahl der Querschnitte entsprechend Tabelle 1 als tragfähig erwiesen [2]. Deren Anwendbarkeit muss in Verantwortung des für die Qualitätsprüfung zuständigen Personals sorgfältig geprüft werden.

Tabelle 1: Festlegung der Anzahl der Querschnitte nach dem Verhältnis Länge/Durchmesser [2].

| | |
|------------------------|----------------|
| $L < D$ | 1 Querschnitt |
| $D \leq L < 3 \cdot D$ | 3 Querschnitte |
| $3 \cdot D \leq L$ | 5 Querschnitte |

Ähnliche Überlegungen sind bei einer Rundheitsmessung hinsichtlich der Festlegung des Filters und damit Messpunktanzahl, Tasterdurchmesser notwendig.

Schließlich sei darauf hingewiesen, dass es Situationen geben kann, in denen das Berechnen der Rundheitsabweichung nach dem Tschebyscheff-Kriterium (minimale Zone) nicht zwingend notwendig ist. Ein Lieferant kann die Einhaltung der Rundheitsspezifikation auch durch Anwendung des Gauß-Kriteriums (Methode der kleinsten Quadrate) nachweisen, da dieses Kriterium immer einen größeren Wert für die Formabweichung (im Grenzfall den gleichen Wert) liefert. Von Nachteil ist, dass i.O.-Teile als n.i.O.-Teile deklariert werden können.

3. Rechtwinkligkeitstoleranz – erfasste mittlere Linie

Eine Rechtwinkligkeitstoleranz wie sie in dem Tolerierungsbeispiel von Bild 2 zu sehen ist, bezieht sich nach ISO 1101 [3] auf die erfasste mittlere Linie. Diese muss in einer zylindrischen Toleranzzone liegen, welche einen Durchmesser von 0,3 mm hat und rechtwinklig zum Bezugsebene angeordnet ist.

Die Schritte zur Prüfung dieser Toleranzangabe sind in Bild 3 dargestellt. Insbesondere erfolgt das Bilden dieser erfassten mittleren Linie dabei nach DIN EN ISO 14660-2 [5] und DIN EN ISO 17450-1 [6] ausschließlich an Hand der Oberfläche des tolerierten Geometrieelementes – unabhängig vom Bezug und der tolerierten Eigenschaft. Es ist daher zunächst die Achse eines Gaußzylinders zu bilden, welche dann die Richtung der zu messenden Umfangslinien definiert, deren Gaußkreismittelpunkte dann die tolerierte erfasste mittlere Linie darstellen.

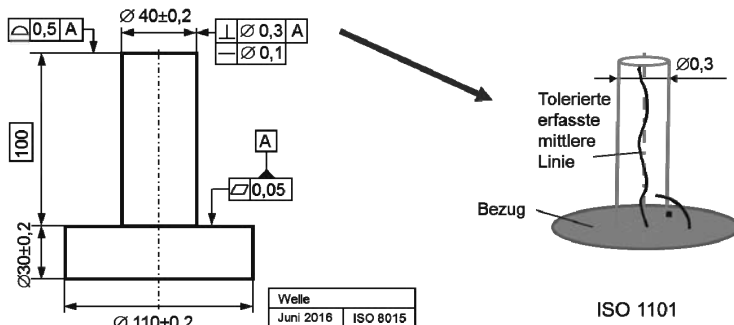


Bild 2: Rechtwinkligkeitstoleranz – Spezifikation und Interpretation

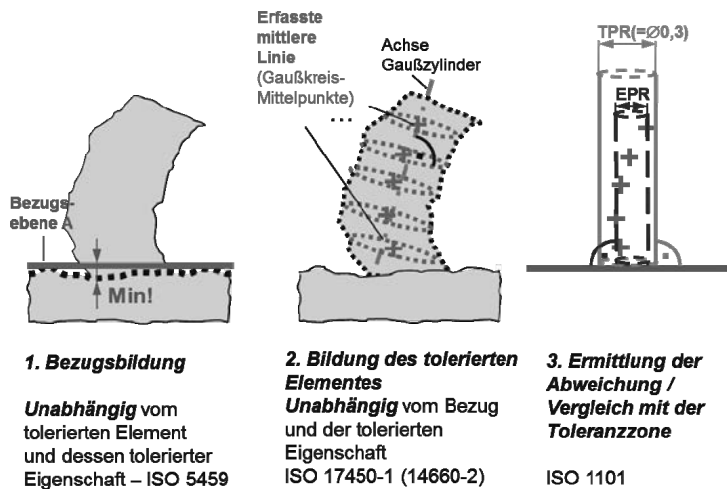


Bild 3: Schritte zum Prüfen einer Lagetoleranz

Zur Verifikation erscheint daher eine mehrstufige Messstrategie unumgänglich: Erfassen von Messpunkten zur Ermittlung der Gaußzylinderachse und dann Scannen in Querschnitten rechtwinklig zu dieser Achse. Das führt aber unmittelbar zu einer zeitaufwändigeren Messstrategie.

Die Alternative besteht in einer vereinfachten Verifikation. Dabei wird die Richtung der Querschnitte durch andere Elemente festgelegt, im vorliegenden Fall parallel zum Bezug A. Bei

Überlagerungen von Maß-, Form- und Lageabweichungen sind die entstehenden Differenzen in vielen Fällen vernachlässigbar klein. Bild 4 zeigt dieses an einem Beispiel der Überlagerung von Geradheits- und Rechtwinkligkeitsabweichung.

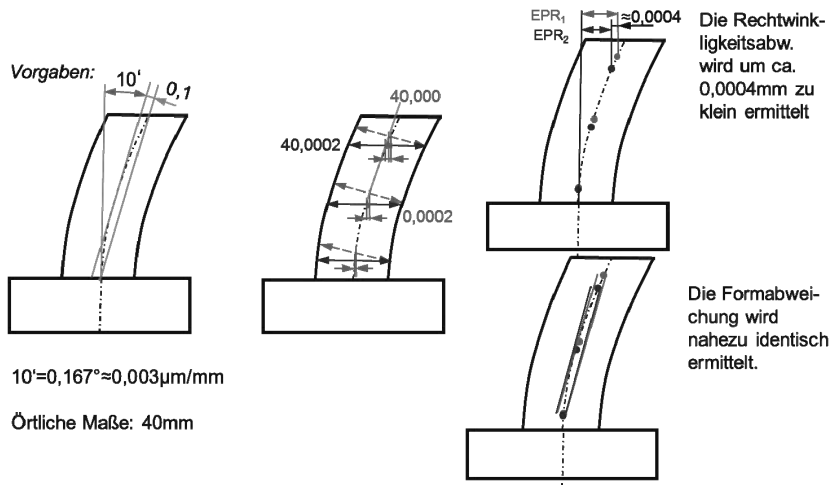


Bild 4: Mögliche Einflüsse unterschiedlicher Antaststrategien

4. Fazit

Vereinfachte Verifikationen sind nach dem Grundsatz der Dualität von DIN EN ISO 8015 prinzipiell möglich und in bestimmten Fällen auch unumgänglich (Festlegung der Anzahl von Querschnitten).

Ihre Anwendbarkeit muss jedoch in jedem Fall untersucht werden unter Beachtung von

- Ziel der Prüfung (Produktprüfung, Prozessüberwachung, Prüfprozesseignung / Kalibrierung,
- Verhältnis zu prüfender Toleranz und Messunsicherheit,
- Informationen aus dem Fertigungsprozess über Art und Größe zu erwartender Abweichungen, insbesondere Formabweichungen.

Gegebenenfalls sind an Vorserienteilen ausführlichere Untersuchungen notwendig, um Entscheidungsgrundlagen zu einer vereinfachten Verifikation zu bekommen und diese zu dokumentieren. Der damit zusätzlich entstehende Aufwand ist in der Regel nur einmal erforderlich – gleichbleibende Fertigungsbedingungen vorausgesetzt.

Er kann minimiert werden durch eine verstärkte Hinwendung der ISO-Normung zu Verifikationsfestlegungen. Das ist jedoch ein sehr langwieriger Prozess und infolge der Komplexität geometrischer Spezifikationen sind eher nur punktuelle Ergebnisse zu erwarten.

Das Sammeln und systematische Aufbereiten von Anwenderwissen, wie es zum Beispiel mit dem Messstrategien Cookbook [2] erfolgt, ist ein alternativer Weg. Diesem wendet sich auch das Ausbildungskonzept von AUKOM Ausbildung Koordinatenmesstechnik e.V. zu [7]. Neben der Vermittlung von Wissen und Kenntnissen auf dem Gebiet der Koordinaten- und Formmessung steht die systematische Erfassung, Verdichtung und Weitervermittlung der Praxiserfahrungen der Messtechniker zunehmend im Vordergrund.

- [1] DIN EN ISO 8015: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln (2011);
- [2] Messstrategien Cookbook (taktill) für die Koordinatenmesstechnik. Zeiss Business Group Industrial Metrology Global Application Knowledge Management 2/2016;
- [3] DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikation – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (2014);
- [4] DIN EN ISO 5459: Geometrische Produktspezifikation – Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme (2013);
- [5] DIN EN ISO 14660-2: Geometrische Produktspezifikation - Geometrieelemente – Definitionen einer erfassten Achse eines Zylinders und eines Kegels, erfasste mittlere Oberfläche, örtliches Maß eines erfassten Geometrieelements (1999);
- [6] DIN EN ISO 17250-1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Grundlegende Konzepte — Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Verifikation;
- [7] Ausbildung Koordinatenmesstechnik e.V. Lehrgangsunterlagen AUKOM Stufen 2,3, Form und Lage

Möglichkeiten und Grenzen des Formscanning auf Koordinatenmessgeräten im Drei- und Vierachsbetrieb

Dr. rer. nat. **Otto Jusko, Helge Reimann**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig;
Dipl.-Ing. **Ralf Bernhardt**, Carl Zeiss IMT GmbH, Oberkochen

Kurzfassung

Die messtechnische Eignung eines 3D-Koordinatenmessgerätes (KMG) für scannende Formmessungen wurde untersucht. Dazu wurden an Formnormalen von einfacher Geometrie (Kugeln, Zylinder) und solche mit komplexeren Profilen wie z. B. Mehrwellennormale mittels eines aktuellen KMG in Portalbauweise Scans im Drei- und Vierachsmodus durchgeführt. Es wurde untersucht, wie unterschiedliche Antastkräfte, Tastkugeldurchmesser und –materialien sowie Scangeschwindigkeiten das Ergebnis beeinflussen und welche diesbezügliche Parametrisierung empfohlen werden kann. Es wurden sowohl Rundheits- wie Geradheitsscans durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass man mit 3D KMG unter bestimmten Bedingungen Formmessergebnisse von hoher Reproduzierbarkeit und akzeptabler bis guter Messunsicherheit erzielen kann. Die aktuellen Grenzen des Verfahrens werden diskutiert.

1. Einführung

Koordinatenmessgeräte (KMG) sind in der Industrie für zahlreiche dimensionelle Messaufgaben im Einsatz. Sie werden für fast alle denkbaren dimensionellen Messgrößen benutzt wie z. B. Länge, Durchmesser, Lage (speziell z. B. Parallelität) und Winkel (speziell z. B. Rechtwinkligkeit). Bei vielen dieser Anwendungen wurde schon früh gewünscht, auch Formmessungen wie Rundheit, Geradheit, Zylindrizität und Ebenheit in der gleichen Aufspannung des Werkstücks mit durchführen zu können, um z. B. Kostenvorteile durch Wegfall von Umspannvorgängen auf spezialisierten Messgeräten, wie etwa Formmessgeräten, zu erzielen. Daher implementierten KMG-Hersteller vor ca. 20 Jahren erstmals Scanningmodi für den Dreiachsbetrieb, also beim Scan mit den kartesischen Achsen eines 3D KMG in Portalbauweise. Zunächst jedoch wurden aus heutiger Sicht nur stark verrauschte Messprofile oder extrem gefilterte Messprofile publiziert. In den letzten Jahren jedoch optimierten die KMG Hersteller die Scanningeigenschaften, um den

Anforderungen der Industrie besser gerecht zu werden. Die Verbesserungen betrafen sowohl den Dreiachs-Scanningmodus mit kartesischen Achsen („3A“), der nun auch komplexere Bahnverläufe wie helikale Scans erlaubte, als auch Erweiterungen um weitere scanningfähige Achsen wie z. B. durch einen Drehtisch ähnlich zu den in Formmessgeräten genutzten Drehtischen („4A“). Die erreichbare Genauigkeit wurde aber kaum systematisch untersucht.

Für die Praxis ergab sich als weiteres Problem, dass sich die Normung der 3D Koordinatenmesstechnik und der Formmesstechnik in sehr unterschiedlicher Weise und parallel entwickelt hat [1, 2]. So war bis vor einem Jahr der 4A Modus in keiner Richtlinie oder Norm hinreichend berücksichtigt. Inzwischen fließen erste Ergebnisse in die Normung ein [3].

Daher haben sich die PTB und die Carl Zeiss IMT GmbH im Jahr 2012 entschieden, ein dreijähriges gemeinsames Pilotprojekt zum Stand der Technik durchzuführen. In dieser Studie sollten typische Formmessaufgaben mittels Scanning mit dem Schwerpunkt auf 4A Scanning, dem zu Formmessgeräten ähnlichsten Messmodus, gelöst werden. Typische Aufgaben für Formmessgeräte sind Rundheits- und Geradheits- (incl. Parallelitäts-) messungen an einfach geometrischen Formnormalen ((Halb-)Kugeln, Ringe, Dorne, Zylinder) und komplex geometrischen Normalen (Flicks, Mehrwellennormale (MWN)). Diese sollten in möglichst unveränderter Messstrategie auf dem KMG durchgeführt werden. Die PTB verfügt für die angesprochenen Messaufgaben über geeignete hochqualitative Normale mit sehr geringer oder gut definierter Formabweichung, so dass Einflüsse, die dem Normal zuzuordnen sind, minimiert werden konnten. Die erzielten Ergebnisse sollten als Grundlage zur Änderung von Richtlinien und Normen der Koordinatenmesstechnik dienen.

Einige Ergebnisse dieser Arbeit wurden in Auszügen schon früher publiziert und sollen hier noch einmal zusammen mit aktuellen Ergänzungen im Zusammenhang dargestellt werden [4-7].

2. Messtechnik

2.1 Formmessgeräte

Für die Kalibrierung der Normale wurden die gleichen Formmessgeräte eingesetzt, die auch zur Realisierung der entsprechenden CMCs (calibration and measurement capabilities, Kalibrier- und Messmöglichkeiten) der PTB genutzt werden. Diese sind ein Taylor Hobson Talyrond 73 [8], eine Mahr MarForm MFU 110 WP [9] und eine modifizierte MarForm MFU 8/800 Retro [10]. Diese Messgeräte werden zum Teil mit deutlich unterschiedlichen Messparametern z. B. hinsichtlich der Scangeschwindigkeit betrieben. Dies liegt begründet in der

unterschiedlichen Konstruktion der Drehführungen. So ist die Drehführung des Talyrond 73 als hydrostatisches Spindellager ausgeführt, während die MFU 8/800 Retro einen luftlagerten Drehtisch und die MFU 110 WP einen wälzgelagerten Drehtisch besitzt. Die optimale Winkelgeschwindigkeit des Talyronds beträgt z. B. 6 min^{-1} und lässt sich kaum variieren. Die optimale Winkelgeschwindigkeit der MFU Drehtische liegt eher im Bereich unter 3 min^{-1} .

2.2 Koordinatenmessgerät

Für das Projekt wurde von der Carl Zeiss IMT GmbH ein Prototyp einer Zeiss PRISMO 7 ultra mit den Tastsystemen VAST GOLD oder RDS-VAST-XXT und einem luftgelagerten Drehtisch RT-AB 300 zur Verfügung gestellt. Drehtische für KMG wie der RT-AB 300 sind im Gegensatz zu solchen für Formmessgeräte nicht mit einer Kipp-/Zentriereinheit ausgerüstet. Daher müssen KMG während eines Scans immer alle Achsen simultan bewegen - auch im 4A Modus. Der RT-AB 300 kann Massen bis zu 600 kg tragen. Im Rahmen des Projekts wurden jedoch keine größeren Massen als etwa 20 kg eingesetzt. Die 3A Scanning Spezifikation der PRISMO betrug $MPE_{\text{RONT}} = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$. Für den 4A Betrieb war keine explizite Spezifikation festgelegt.

3. Parametrisierung der Scans

Der Parameterraum der zu untersuchenden möglichen Messstrategien war sehr groß. Eine Abschätzung zeigte, dass nur wenige Variationen von Scangeschwindigkeit, Antastkraft, Aufspannung, Tastkugelmateriale, Antastgeometrie, Startwinkel der Messung, Werkstück (bzw. Normal) und 3A bzw. 4A Modus zusammen mit einer für statistische Signifikanz ausreichenden Zahl von Wiederholmessungen zu mehreren Millionen durchzuführender Scans geführt hätte. Daher wurden einige Einflüsse (wie etwa Tastkugelmateriale) vorab untersucht und einige Variationen nur mit einzelnen Normalen durchgeführt. So konnte die Anzahl der Scans auf einige 10000 reduziert werden. Für die folgenden Betrachtungen wurden für alle Rundheits- (ROM [11]) bzw Geradheitsauswertungen (STR [12]) nur die Gaußauswertung benutzt (LSCI, LSLI). Alle Filterungen wurden mit einem Gaußfilter nach DIN EN ISO 16610-21 durchgeführt [13].

3.1 Tastkugeldurchmesser

Bei Formmessungen ist zu beachten, dass eine zu groß gewählte Tastkugel eine morphologische Filterung des Messprofils bewirken kann. Daher wurde lange Zeit bezweifelt, das KMG für Formmessungen geeignet sind, da bei diesen aus praktischen Gründen wie

etwa Länge und Steifigkeit des Tasterschafts häufig relativ große Tastkugel von z. B. $\varnothing = 8$ mm oder mehr verwendet werden. In Richtlinien [3, 14] sind jedoch Tabellen und Grafiken hinterlegt, die auf eine Arbeit von Bosse zurückgehen [15], die zeigen dass für die meisten Normale und viele industrieübliche Werkstücke der Einfluss geringer ist als vielfach vermutet wird. Der geometrische Ursprung dieser Rechnungen ist in Bild 1 veranschaulicht. Für die Messungen dieser Arbeit wurden nur die Tastkugeldurchmesser $d = 1$ mm, 3 mm und 8 mm verwendet. Ein Einfluss durch morphologische Filterung konnte für die betrachteten Normale außer den Flicks vernachlässigt werden.

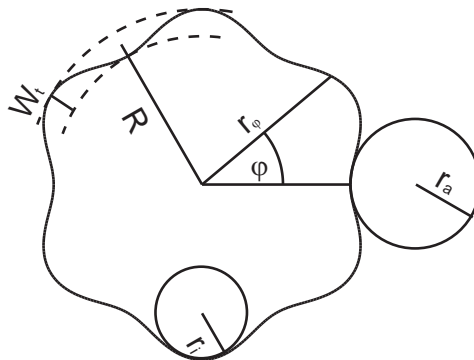


Bild 1: Maximal mögliche Tastkugelradien ohne morphologische Filterung an einem sinusförmigen Rundheitsprofil mit der Wellentiefe W_1 .

Mit r_φ : variierender örtlicher Radius des Werkstücks, R : mittlerer Radius des Werkstücks, φ : Scanwinkel, r_a und r_i : Tastkugelradien bei Außen- bzw. Innenantastung

3.2 Tastkugelmateral

Es ist bekannt, dass die Kombination von Tastkugelmateral und Werkstückmaterial die Tribologie des Scanprozesses beeinflusst. Dies ist bei Kombinationen wie Rubin (Al_2O_3) / Aluminium durch die chemische Ähnlichkeit nachvollziehbar. Ein weiterer bekannter Fall ist der erhöhte Abtrag von Rubin auf Stahlflächen, in deren Oberfläche Reste von Diamantschleifmitteln gebunden sind. Nicht immer sind die Effekte jedoch leicht vorhersagbar und verständlich. Von besonderem Interesse ist die Lebensdauer der Tastkugel bis zu dem Zeitpunkt, bei dem ein signifikanter Abtrag sichtbar wird. Einige Formmessgeräte sind mit einer zusätzlichen Option für 2-Punkt Durchmesser ausgestattet

[9, 10]. Bei diesen ist der Abtrag der Tastkugel ein direkter Einfluss auf das Messergebnis bzw. dessen Unsicherheit. In der Praxis werden daher Tastkugeln ohne Prüfung regelmäßig getauscht. Ohne Wissen über die Tribologie kann der Austausch aber sowohl zu früh (unwirtschaftlich) wie zu spät (Verfälschung von Messergebnissen) erfolgen. In der Koordinatenmesstechnik wurde der Abtrag meistens als Langzeitphänomen angesehen, das nur bei größeren Antastkräften wie 400 mN ... 1000 mN signifikant wird. Diese Annahmen beruhen jedoch oft nur auf Erfahrungen von Scans im 3A Modus. Da bei diesen der Antastpunkt auf der Tastkugel umläuft und so die Tastkugel am gewählten Umlaufkreis (z .B. dem Äquator) weniger verschleißt (siehe Bild 2). Im 4A Modus bleibt der Antastpunkt jedoch bei einer gewählten Tastrichtung ortsfest und verschleißt daher diesen stärker. Da in vielen Messstrategien die 5 Zenitpunkte der Tastkugel, die in die entsprechenden kartesischen Achsrichtungen des KMG (-X, +X, -Y, +Y, -Z) zeigen, bevorzugt genutzt werden, ist der Verschleiß im 4A Betrieb bei diesen Antastpunkten besonders groß.

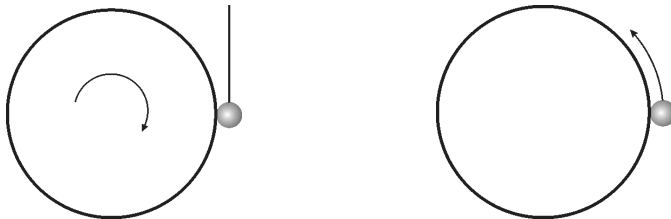


Bild 2: Vergleich der Scanmodi 4A (links) und 3A (rechts). Im 4A Modus dreht sich das Werkstück und die Tastkugel bleibt ortsfest d. h. auch der Antastpunkt bleibt ortsfest auf der Kugel. Im 3A Modus bleibt das Werkstück ortsfest und die Tastkugel läuft um. Dabei bleibt ihre räumliche Orientierung erhalten d. h. der Antastpunkt läuft auf der Tastkugel um.

Da in das Rundheitsmessergebnis (*ROM*) im 3A Modus die Rundheit der Tastkugel selbst eingeht, können abwechselnd ausgeführte 3A und 4A Rundheitsscans zu fehlerhaften Ergebnissen führen. So vergrößerte sich innerhalb einer Messserie von je 10 abwechselnden 3A und 4A Scans mit $F = 400$ mN am Äquator einer Präzisionskugel (Material Si_3N_4 , $ROM = 0,008 \pm 0,006$ μm , $\varnothing = 25$ mm) die gemessene Rundheitsabweichung im 3A Modus um den Faktor 2 [4, 5]. Jede 4A Messung schlopfte ein wenig von der Tastkugel ab. Dieser Abschliff war sogar im Mikroskop erkennbar. Diese Probleme lassen sich vermeiden, wenn man einkristalline Volldiamantantastkugeln verwendet und weitgehend vermeiden, wenn man diamantbeschichtete Tastkugeln (DCP = diamond coated probes) verwendet [16, 17]. Daher wurden für die weiteren Untersuchungen nur noch

Diamantastkugeln verwendet. Da Volldiamantastkugeln nur in den Durchmessern 1 mm und 3 mm (wie in Bild 3) am Markt erhältlich sind, wurde in den Fällen, wo davon abweichende Durchmesser benötigt wurden, DCP Tastkugeln verwendet.

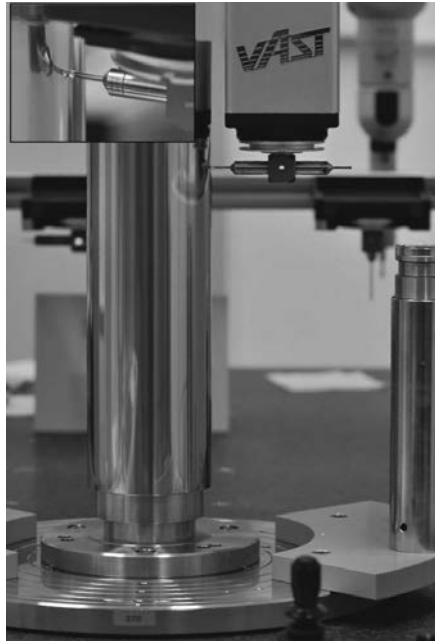


Bild 3: Scannende Formmessung an einer Kontrollsäule. Die Ausschnittsvergrößerung zeigt die benutzte Volldiamantastkugel.

3.3 Antastkraft

Bei Rundheitsmessungen zeigte sich, dass unter typischen Messbedingungen die Antastkraft ein unkritischer Parameter ist. So konnte bei Rundheitsmessungen kein signifikanter Unterschied zwischen Messergebnissen von mit den Antastkräften $F = 50$ mN, 100 mN und 200 mN aufgenommenen Messprofilen gefunden werden. Bei Geradheitsmessungen war der Einfluss der Steifigkeit des Messobjekts und seiner Aufspannung wesentlich kritischer. Insgesamt lässt sich eine Empfehlung von $F = 100$ mN als bester Kompromiss für alle betrachteten Messaufgaben ableiten.

3.4 Scangeschwindigkeit und Abtastrate

Es wurden für 4A Scans Winkelgeschwindigkeiten für den Drehtisch gewählt, die den typischen meistgenutzten Winkelgeschwindigkeiten von Drehtischen- oder spindeln von Formmessgeräten gleichen. Diese sind z. B. $0,5 \text{ min}^{-1}$ bis 3 min^{-1} . Daraus ergaben sich Bahngeschwindigkeiten von ca. 1 mm / s bis 8 mm / s . Diese wurden auch für die 3A Scans sowie Geradheitsmessungen gewählt. Obwohl diese Vorschubgeschwindigkeiten für die Antriebe des KMG relativ geringe Werte darstellen, sind sie doch typisch für Formmessungen und führen zu akzeptablen Messzeiten. Innerhalb dieses Scangeschwindigkeitsintervalls wurde kein signifikanter Einfluss auf die Messergebnisse beobachtet. Höhere Scangeschwindigkeiten sind zum Teil nicht nur mechanisch sondern auch die maximale Samplingrate des KMG begrenzt. Bei den genutzten Scangeschwindigkeiten konnten z. B. 9000 Messpunkte abgetastet werden.

4. Einmessung der Drehachse

Bevor Messungen im 4A Modus durchgeführt werden können, muss die Lage der Drehtischachse im Gerätekoordinatensystem (GKS) eingemessen werden. Dazu empfiehlt VDI/VDE 2617 Bl. 2.2 [3] mehrere Methoden, die hinsichtlich Ihrer Stabilität und Wirksamkeit untersucht wurden. Die Stabilität der Drehtischachse ist zwar gegenüber der Hartgesteinbasis des KMG sehr stabil, das GKS spiegelt jedoch vor allem die Lage des Portals zur Basis und die Lage der Pinole zum Portal wieder. Diese können sich z. B. durch thermische Einflüsse verändern. Zur Einmessung der Drehtischachse können auf dem Drehtisch mit verschiedenen Strategien Normale angetastet werden und daraus die Drehtischachse berechnet werden. Es sind dabei Messabläufe und Aufspannungen möglich, die ein oder mehrere Normale nutzen, die in ein oder mehreren Höhen bzw. Drehtischpositionen gemessen werden. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde der Drehtisch um Auskragungen erweitert, um so in einem Experimentieraufbau mehrere Methoden testen zu können.

Für Prüflinge mit geringer Höhe kann mit einer Messhöhe eingemessen werden (1-Ebenen-Methode). Bei hohen Prüflingen müssen zwei Messhöhen genutzt werden (2-Ebenen-Methode). Für beide Methoden gibt es verschiedene Verfahren / Normale zur Einmessung der RT-Achse.

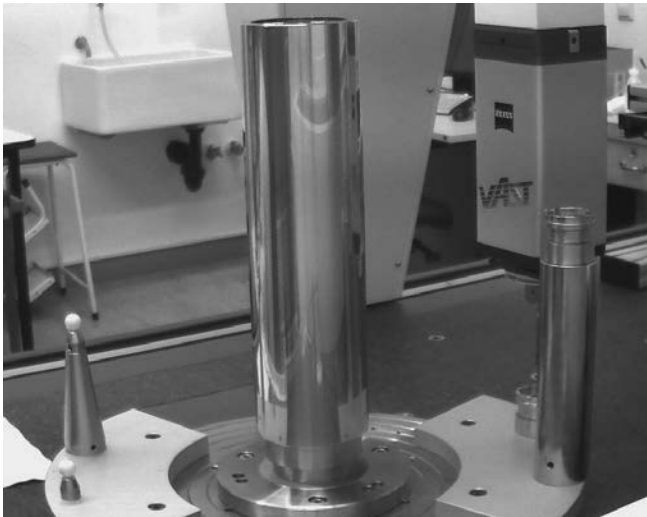


Bild 4: Drehtisch mit verschiedenen Normalen zur Einmessung der Drehachse. Einige Normale sind auf Auskragungen montiert.

Die genutzten Normale zum Einmessen der Drehtischachse waren:

a) Triple

Beim Triple handelt es sich um ein Normal, dass aus einem Trägerzylinder und drei kleinen Präzisionszylindern aufgebaut ist, deren Achsen etwas nach unten und innen zur fiktiven Stirnfläche des Trägerzylinders verkippt sind und auf ein gemeinsames Kegelzentrum zeigen. Die Antastung des Triple erfolgt selbstzentrierend. Diese Methode ist schneller als die Mehrfachantastungen, die bei anderen Normalen wie z. B. Kugeln notwendig sind. In Bild 4 stehen rechts außen zwei Tripel auf verschiedenen hohen Trägern hintereinander. Für die Untersuchungen wurde ein einzelner Tripel und zwei Tripel mit $\Delta z = 200$ mm verwendet.

b) Kugel

Wie bei fast allen Einmessvorgängen von KMG können Kugeln auch für die Drehtischachseneinmessung genutzt werden. Die Vorteile von handelsüblichen Kugeln sind: perfekte Symmetrie, durch die einige Fehlerquellen umgangen werden können sowie hohe Oberflächenqualität und sehr geringe Formabweichung.

Außerdem sind Kugeln leicht erhältlich und mit geringer Messunsicherheit kalibrierbar. In Bild 4 stehen links außen zwei Kugeln auf verschiedenen hohen Kegelträgern hintereinander. Für die Untersuchungen wurde eine einzelne Kugel und zwei Kugeln mit $\Delta z = 100 \text{ mm}$ und 200 mm verwendet.

c) Zylinder

Die direkteste Methode zur Einmessung der Drehtischachse nutzt ein Zylindernormal, wie es in Bild 4 zentrisch auf dem Drehtisch montiert ist. Zylindernormale sind jedoch kostenintensiv bei hohen Anforderungen an Oberfläche, Formabweichung und evtl. zusätzlich geringer Parallelität der Mantellinien. Das abgebildete Zylindernormal hat die Maße $\varnothing 100 \times 360 \text{ mm}$. Am Zylindernormal wurden zur Drehtischachsenbestimmung axiale Rundheitsprofile in zwei Ebenen aufgenommen.

Bild 5 und 6 zeigen die Abhängigkeit der Reproduzierbarkeit der Drehtischachsenlage (X- bzw. Y-Winkelkomponente des Richtungsvektors bezogen auf die Z-Richtung im GKS). vom Einmessverfahren. Dabei steht Tripel_u (Kugel_u) für einen Tripel auf der unteren Ebene bzw. Tripel_o (Kugel_o) für einen Tripel (eine Kugel) auf der oberen Ebene. Kugel_u2 / _o2 bezeichnen eine Lage der Kugelpositionen wie in Bild 4. Bei Kugel_u / Kugel_o waren die Kugeln um 180° versetzt auf dem Drehtisch aufgebaut. Alle Standardabweichungen liegen unter $0,2''$ mit Bestwerten von $0,03''$ (Kugel_u2 / _o2). Auch die Abweichungen vom Mittelwert liegen bei etwa $0,1''$. Unter der Annahme, dass die wahre Achsrichtung beim Mittelwert liegt, beschreibt die Achse einen Taumelkegel mit knapp $0,25 \text{ }\mu\text{m}$ Öffnungsdurchmesser bei 200 mm Z-Abstand, der direkten Einfluss auf Messgrößen wie z. B. die Parallelität hat, wenn diese mit dem Drehtisch bestimmt werden. Bild 6 zeigt eine entsprechende Gegenüberstellung von 2-Ebenen basierter Einmessmethoden der Drehtischachse. Es fällt auf, dass die Streuungen mit $0,6''$ und die Abweichungen vom Mittelwert mit $0,4''$ deutlich größer ausfallen als bei den 1-Ebenen Einmessmethoden aus Bild 5. Der Grund hierfür ist, dass bei der 1-Ebenen-Methode immer ein Kreismittelpunkt und ein Lot der Ebene das Ergebnis bildet. Das Lot für den Winkel ist nicht höhenabhängig und sehr stabil. Bei der 2-Ebenen-Methode wird die Achse durch die Mittelpunkte von zwei Kreisen gebildet. Jeder einzelne Kreismittelpunkt hat zwar eine für sich geringe Messunsicherheit, aber die Position der Mittelpunkte zueinander hat eine große Messunsicherheit. Damit hat die Achse

durch die beiden Mittelpunkte auch eine große Messunsicherheit für ihren Winkel. Einmessungen basierend auf 2 Ebenen am Zylinder zeigen ähnliche Streuungen.

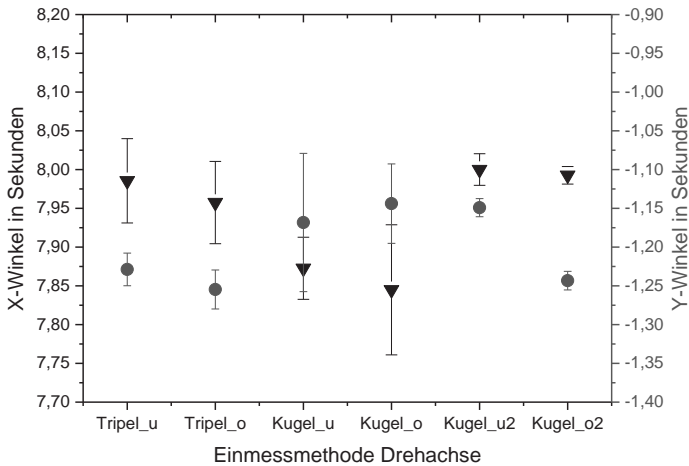


Bild 5: Vergleich verschiedener Einmessverfahren der Lage der Drehtischachse (X- und Y-Winkelkomponente separat) bei Anwendung der 1-Ebenen Methode. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen der Wiederholmessungen.

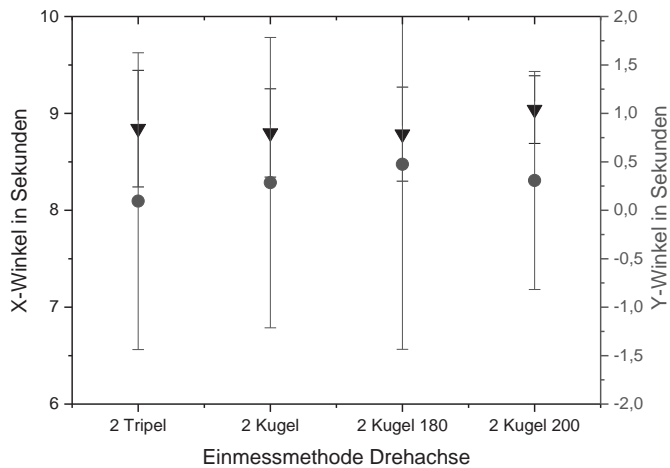


Bild 6: Vergleich verschiedener Einmessverfahren der Lage der Drehtischachse bei Anwendung der 2-Ebenen Methode

5. Rundheitsmessungen

5.1 3A vs 4A Modus

Beim gewählten KMG zeigte sich, dass alle Rundheitsmessungen im 3A Modus einen systematischen Offset von ca. $+0,2 \mu\text{m}$ zu den 4A Scans hatten. Dies lässt sich als Einfluss des Restfehlers der CAA (CAA = computer aided accuracy: 3D Bahnkorrektur der KMG Steuerung) in der XY-Ebene erklären. Die radiale Drehführungsabweichung des Drehtisches wurde vom Hersteller zu ca. $0,06 \mu\text{m}$ gemessen.

5.2 Kleinste erzielte Formabweichung

Um die Grenzen des KMG bzgl. Rundheitsmessung zu finden, wurde ein möglichst hochwertiges Rundheitsnormal (Glashalbkugel, $ROMt = 0,010 \pm 0,006 \mu\text{m}$) unter optimalen Bedingungen gescannt. Dabei wurde zusätzlich die sogenannte Kegelkorrektur der KMG Software „Calypso“ aktiviert, um Einflüsse der nicht äquatorialen Antastung zu eliminieren. Diese Korrektur korrigiert den Rundheitsmesswert um ca. $0,15 \mu\text{m}$. Der so erzielte Bestwert eines 4A Scans lag bei $ROMt = 0,077 \mu\text{m}$ bei einer Filterung mit einer Grenzwellenzahl von 50 W/U. Typische Werte lagen immer unter $0,1 \mu\text{m}$.

5.3 Vergrößerungsnormale

Die Längenrückführung von Formmessgeräten wird in den allermeisten Fällen mittels kalibrierter Flicks realisiert. Dies sind Zylinder mit einem kleinen Anschliff. Diese Anschliffe können auch als zusätzliche Komponente eines komplexeren Prüfkörpers implementiert sein z. B. beim Universalprüfzylinder (auch „Zylindernormal mit zwei Flicks“) [18]. Die Kalibrierung von Flicks ist selbst für erfahrene NMI Laboratorien eine anspruchsvolle Aufgabe [19]. Dies gilt insbesondere für Flicks mit Formabweichungen $ROMt > 50 \mu\text{m}$. Die Herausforderung liegt in Einflüssen durch Restnichtlinearitäten bei der Einmessung der Tastsysteme in Formmessgeräten sowie der Faltung der realen Tastkugel mit den Anschliffändern des Flicks.

Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde ein Prüfkörper mit zwei Anschliffen von $ROMt = 8,3 \pm 0,2 \mu\text{m}$ und $ROMt = 260,3 \pm 1,4 \mu\text{m}$ gewählt. Daran wurden Scans mit den Tastkugeldurchmessern $d = 8 \text{ mm}$ und $d = 3 \text{ mm}$ durchgeführt. Die erzielte Reproduzierbarkeit war mit Standardabweichungen $\sigma < 0,010 \mu\text{m}$ für Filtergrenzwellenzahlen $n < 150 \text{ W/U}$ und kleiner mindestens auf dem Niveau von typischen Formmessgeräten. Für diese Filterung wurde innerhalb der Messunsicherheit keine Abweichung zu den Kalibrierwerten gefunden. Für die Wellenzahl 500 W/U waren die Standardabweichungen mit rund $0,020 \mu\text{m}$ etwas größer. Da die Einmessung der Längenskala des Tastsystems sowie

deren Linearisierung nur werkseitig erfolgt waren, ließ sich eine hohe Langzeitstabilität sowie Korrektheit des Verfahrens feststellen.

5.4 Mehrwellennormale

Mehrwellennormale sind Verkörperungen von räumlichen überlagerten harmonischen Wellen. Sie können z. B. eingesetzt werden, um die Signalübertragungskette von Formmessgeräten oder KMG zu prüfen [20]. In letzter Zeit wurden sie auch für ähnliche Zwecke bei CT-Anlagen (Röntgencomputertomografie) eingesetzt [21]. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde ein Mehrwellennormal („MWV1“) gewählt, dass bereits in einer internationalen Vergleichsmessung benutzt wurde, sodass Kalibrierwerte mehrerer NMIs existierten [22]. Der Kalibrierschein der PTB weist eine Messunsicherheit von $U = 0,050 \mu\text{m}$ für die Höhe der dominanten spektralen Amplituden aus. Als „dominant“ werden diejenigen Wellenzahlen bezeichnet, deren spektrale Amplituden sich sehr deutlich vom Hintergrundrauschen unterscheiden. Typische Festlegungen dafür sind ein Signal-Rauschverhältnis von 100 oder eine Mindestamplitudenhöhe von $0,1 \mu\text{m}$. Bild 7 zeigt das gemessene Spektrum (Höhe der spektralen Amplitude vs. Wellenzahl W/U) des Mehrwellennormals und die entsprechenden Kalibrierdaten. Die aus Messprofilen berechneten Abweichungen der Amplitudenhöhen zu den Kalibrierwerten sind für alle Wellenzahlen kleiner als $0,02 \mu\text{m}$ und für Wellenzahlen $\leq 150 W/U$ kleiner als $0,01 \mu\text{m}$. Die Ergebnisse dieser Messgröße unterschieden sich nicht zwischen 3A und 4A Scans, da der oben erwähnte CAA Fehler bei der hier gewählten Auswertemethode keinen Einfluss hatte. Sowohl aus der Betrachtung dieser Ergebnisse als auch der aus den Flick Messungen in Kapitel 5.3 lässt sich der Schluss ableiten, dass eine Filterung mit mindestens $150 W/U$ zu empfehlen ist, um optimale Ergebnisse zu erhalten. Oberhalb dieser Wellenzahl sind Einflüsse durch Rauschen und Vibration in den Messprofilen deutlicher sichtbar. Diese Wellenzahl wird von vielen deutschen Industrieunternehmen auch in internen Hausnormen für Formmessungen favorisiert und stellt daher keine große Einschränkung für die Praxis dar.

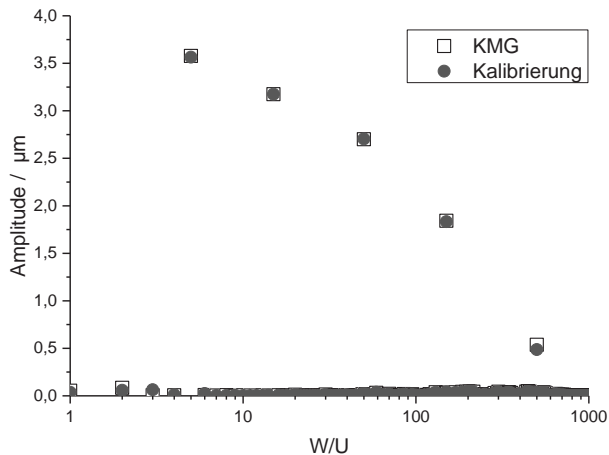


Bild 7: Amplitudenspektrum des Mehrwellennormals MWN1: KMG Messung im Vergleich zu den Kalibrierdaten (Formmessgerät)

5.5 Exzentrische Werkstücklage

Wie bereits erwähnt muss die KMG Steuerung im 4A Modus mit allen Achsen dem Werkstück folgen, um Zentrier- und Nivellierfehler auszugleichen. Um diesbezügliche Einflüsse zu vermeiden, sollten daher Werkstücke auf dem Drehtisch zumindest grob zentriert und nivelliert aufgespannt werden. Um die Größenordnung des Einflusses und die Grenzen der Bahnsteuerungsdynamik zu bestimmen, wurde eine Kugel bewusst exzentrisch um 1 mm, 5 mm und 60 mm aufgebaut und im 4A Modus gescannt. Dabei erhöhte sich die gemessene Rundheitsabweichung bei 60 mm Exzentrizität um ca. 0,8 μm auf 0,94 μm [5]. Bis zu 5 mm Exzentrizität war noch kein signifikanter Einfluss sichtbar. Das heißt für die Praxis, dass für rotationsymmetrische Werkstücke eine Vorzentrierung nach Augenmaß ausreichend ist. Gleichwohl ist die zu erwartende Messabweichung grob exzentrischer Zylinder wie z. B. bei Hubzapfen von Kurbelwellen für viele Anwendungen noch akzeptabel.

6. Geradheitsmessungen und Parallelitätsauswertungen

Bei Geradheitsmessungen an einem Zylinder mit dem KMG wird der Drehtisch nicht direkt für den Scan genutzt. Allerdings gibt es dennoch einen wesentlichen Unterschied zu KMGs ohne Drehtisch, da die Antastung der verschiedenen Geradheitsmesslinien am Zylinder – also z. B. die 0°, 90°, 180 und 270° Position – ohne Drehtisch nur mit einem Tasterstern oder

einer sehr langen Verlängerung in -Z – Richtung erreicht werden kann. Bei Nutzung des Drehtisches hingegen kann die gewünschte Position z .B. in die +X – Richtung des KMG gedreht werden und dort mit einem einzelnen seitlich auskragenden Taster in -X Richtung angetastet werden. Diese Antaststrategie ähnelt den entsprechenden Messabläufen bei Formmessgeräten.

Geradheitsmessungen wurden an Ringen, Dornen, Universalprüfzylindern und Kontrollsäulen durchgeführt. In Bild 2 ist z. B. die Geradheitsmessung mit dem KMG an einer Kontrollsäule der Größe $\varnothing 100 \times 360$ mm gezeigt. Bei dieser Messung wurden nur geringe Abweichungen von den Kalibrierwerten gefunden. Es fiel jedoch ein signifikant höherer Welligkeitsanteil in den erzielten Messprofilen gegenüber den kalibrierten Messprofilen auf. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Messergebnisse in erheblich kürzerer Zeit erzielt wurden. Während die Kalibrierung durch die Umsetzung eines Fehlertrennverfahrens viele Stunden benötigte [23], wurden die KMG Messungen innerhalb von einigen 10 Minuten durchgeführt.

Für alle Geradheitsmessprofilpaare wurden auch Parallelitätsauswertungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Übereinstimmung mit den Kalibrierwerten für kleinere Messlängen deutlich besser als für größere Messlängen ist. Dies war möglicherweise durch den bei größeren Messlängen dominanteren Einfluss von Restfehlern der Rechtwinkligkeitsabweichung des KMG bezüglich des Drehtisches bedingt.

Auf die Parallelität hat auch die korrekte Einmessung der RT-Achse mit der 2-Ebenen Methode großen Einfluss. Eine Kontrolle der Einmessung ist zur Erreichung kleiner Messunsicherheiten unbedingt erforderlich.

7. Fazit und Ausblick

Für viele Anwendungen kann Rundheitsscanning mit einem KMG spezialisierte Formmessgeräte ersetzen, da mindestens im 4A Modus Ergebnisse erzielt werden können, die denen von Formmessgeräten nahekomen. Dies gilt etwas eingeschränkter auch für Geradheitsscans, insbesondere wenn auch die Parallelität ausgewertet werden soll.

Zukünftige Arbeiten werden sich auch komplexeren Scanbahnen widmen, wie sie etwa bei der Verzahnungs- bzw. der Nockenwellenmesstechnik benötigt werden.

Die erzielten Ergebnisse werden bereits in Normungsgremien wie etwa dem VDI/VDE Fachausschuss 3.21 „Formmesstechnik“ diskutiert.

- [1] ISO 10360-3 Geometrical Product Specification (GPS) – Acceptance Test and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) – Part 3: CMMs with a rotary table as the fourth axis
- [2] ISO 10360-4 Geometrical Product Specification (GPS) – Acceptance Test and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) – Part 4: CMMs used in scanning modus
- [3] VDI/VDE 2617 Blatt 2.2 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Formmessung
- [4] O. Jusko, M. Neugebauer, H. Reimann, R. Bernhardt, State of the art in CMM based form measurement by multi - axis scanning, Proc. XIth International Conference Coordinate Measuring, 2014, S. 58 -62
<http://www.wtp.pl/conf/11/index.html>
- [5] Jusko, M. Neugebauer, H. Reimann, R. Bernhardt, Recent progress in CMM based form measurement, Proc. 14th Int. Conf. of EuSPEN, ISBN 14: 978-0-9566790-3-1, Vol 2. S. 412-415
- [6] O. Jusko, M. Neugebauer, H. Reimann, R. Bernhardt, Recent Progress in CMM-Based Form Measurement, International Journal of Automation Technology (IJAT) Vol.9, No.2, Mini Special on Virtual Manufacturing, 2015, S. 170-174, auch online: <http://www.fuipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=IJATE000900020009.xml>
- [7] O. Jusko, H. Reimann, R. Bernhardt, The state of the art of form measurements with coordinate measurement instruments, Proc. 4. Innovation Messtechnik, Wien, ISBN 978-3-8440-3560-5
- [8] M. Neugebauer, Uncertainty analysis for roundness measurements by the example of measurements on a glass hemisphere, Measurement Science and Technology, Volume 12, Issue 1, pp. 68-76 (2001)
- [9] O. Jusko, M. Neugebauer, H. Reimann, P. Drabarek, M. Fleischer, T. Gnausch, Form Measurements by Optical and Tactile Scanning, Proc. of SPIE, Proc. 5th International Symposium on Instrumentation Science and Technology (ISIST), 2008, ISBN 9780819473677
- [10] F. Lüdicke, O. Jusko, H. Reimann, Form and Length Measurements by Use of a Modified Commercial Form Measurement Instrument, Proc. ASPE Annual Meeting 2000, ISBN 1-887706-24-0, 389-392
- [11] ISO 12181-1 & -2:2011. Geometrical product specifications (GPS) – Roundness
- [12] ISO 12780-1 & -2:2011. Geometrical product specifications (GPS) – Straightness

- [13] ISO 16610-21:2011. Geometrical product specifications (GPS) -- Filtration -- Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters
- [14] VDI/VDE 2631 Blatt 3, Formprüfung – Eigenschaften und Auswahl von Filtern
- [15] H. Bosse, Aspekte der Filterung in der Formmesstechnik, PTB-Bericht, PTB-F-13, 1994
- [16] M. Neugebauer. S. Bütetisch. T. Dziomba. S. Koslowski. H. Reimann. High-resolution investigation and application of diamond-coated probing spheres for CMM- and form metrology. Proc. 13th Int. Conf. EuSPEN. Vol 1(2013). ISBN 978-0-9566790-2-4. 75-78
- [17] A. Küng, A. Nicolet, and F. Meli, Study of wear of diamond-coated probe tips when scanning on different materials, Proc. Macroscale 2015, Meas. Sci. Technol. 26 (2015) 084005 (7pp)
- [18] VDI/VDE 2631 Blatt 2, Formprüfung – Bestimmung der Empfindlichkeit der Signalübertragungskette
- [19] R. Thalmann, J. Spiller, A. Küng, O. Jusko, Calibration of flick standards, Proc. Macroscale 2011, Meas. Sci. Technol., 23 (2012), 094008 (7pp)
- [20] O. Jusko, F. Lüdicke, Mehrwellennormale - Ein Durchbruch in der Formmesstechnik, Innovation Spezial Messtechnik, 2, 2000, Carl-Zeiss, Oberkochen, 38-39
- [21] F. A. Arenhardt, Chr. R. Baldo, , T. L. Fernandes, G .D. Donatelli, Experimental Investigation of the Influencing Factors on the Structural Resolution for Dimensional Measurements with CT Systems, Proc. Conference: 6th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT), Wels, Österreich, 2016, http://www.ndt.net/article/ctc2016/papers/ICT2016_paper_id32.pdf
- [22] O. Jusko, H. Bosse, D. Flack, B. Hemming, M. Pisani, and R. Thalmann, A Comparison of Sensitivity Standards in Form Metrology - Final Results of the EURAMET Project 649, Meas. Sci. Technol. 23 (2012) 054006 (7pp).
- [23] O. Jusko, H. Lüllmann, M. Neugebauer, H. Reimann, Improved technical implementation of an extended reversal calibration procedure for cylinders, Proc. 2nd International Congress on Mechanical Metrology (II CIMMEC) and Metrologia 2011, Anais Proceedings (CD), ISBN 978-85-86920-08-0

Bezugsbildung

Assoziation und Funktion

M. Weißgerber, Prof. S. Gröger, Technische Universität Chemnitz

Kurzfassung

Bedingt durch die Entwicklungsvorgänge in der Tolerierung und Produktion gewinnt die Bildung von Bezügen auch in der Formmesstechnik zunehmend an Bedeutung. Deren Definition und Bewertung ist dabei von einer Vielzahl von Anforderungen und Rahmenparameter abhängig. Dazu werden in diesem Beitrag eine Auswahl von Assoziationskriterien, deren Eigenschaften und eine Möglichkeit der Bewertung von Bezugselementen anhand eines Stabilitätsindex vorgestellt.

1. Einleitung – Bezugsbildung und Formmesstechnik

In der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung sind Bezüge und Bezugssysteme von essentieller Bedeutung. Sie binden nicht nur Freiheitsgrade und beschreiben somit die Lage und Orientierung von Geometrieelementen oder Bauteilen im Raum, sondern definieren auch die Beziehung zwischen Geometrieelementen und somit die Lage von Toleranzzonen, welche die Basis der Tolerierung bilden. Dieser Beitrag beschäftigt sich dabei vorrangig mit ebenen Bezugselementen in Drei-Ebenen-Bezugssystemen (siehe Bild 1).

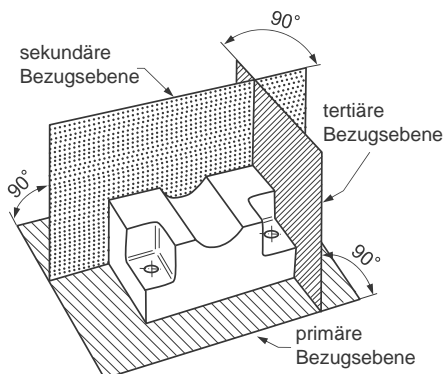


Bild 1: Drei-Ebenen-Bezugssystem nach DIN ISO 5459:1982 [1]

Die Gründe für die Notwendigkeit der Verwendung von Bezügen und Bezugssystemen in Verbindung mit der Messung von Form und Kontur sind vielseitig. So gehen die Ansprüche an die geometrische Messtechnik grundsätzlich mit den Ansprüchen an die Produktion und deren Entwicklung einher. Mit der seit vielen Jahren anhaltenden Flexibilisierung der Produktion und zugehöriger Produkte, bis hin zu den Zielen des „Konstruktives“ Industrie 4.0 (siehe Bild 2), ergeben sich deshalb speziell im Hinblick auf Messgeräteauswahl und -einsatz neue Herausforderungen.

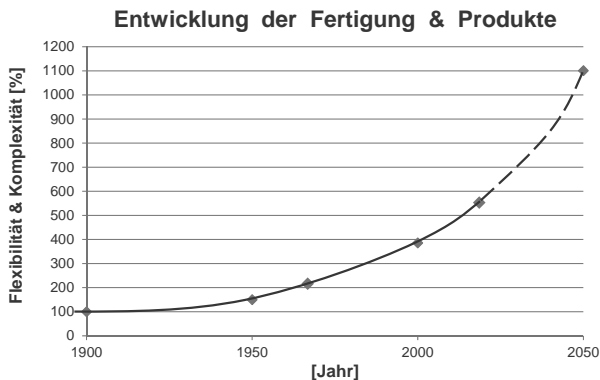


Bild 2: Entwicklung der Flexibilität & Komplexität von Produkten und Fertigung

Messgeräte müssen in der Lage sein, eine Vielzahl an Geometrieelementen verschiedenster Größe zu erfassen und geometrische Merkmale des Maßes, der Form sowie des Ortes und der Richtung, abhängig oder unabhängig voneinander, bewerten zu können. Boten in der Vergangenheit, beispielsweise für eine Rundheitsprüfung, in vielen Fällen lediglich Formmessgeräte ein angemessenes Verhältnis aus Messzeit und Messgenauigkeit, sind heute vermehrt auch Koordinatenmessgeräte in der Lage, diesen Ansprüchen zu genügen. Einer der wesentlichen Faktoren dafür ist die steigende Genauigkeit der Geräte, was die Entwicklung über die letzten Jahrzehnte im Bild 3 zeigt. Koordinatenmessgeräte (KMG) erhalten daher sowie aufgrund ihrer deutlich höheren Vielseitigkeit, immer häufiger den Vorzug gegenüber merkmalsgruppen-spezifischen Messgeräten, wie zum Beispiel Formmessgeräten. Mit der Nutzung von Koordinatenmessgeräten ist die Verwendung und Berücksichtigung von Bezugssystemen unumgänglich.

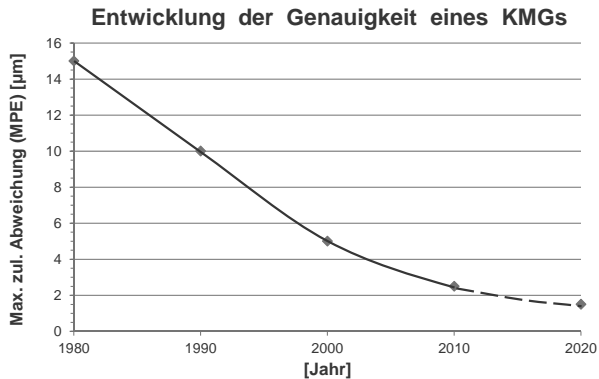


Bild 3: Entwicklung der Genauigkeit von KMG (in Anlehnung an [2])

Ein weiterer, bedeutender Aspekt ist die eindeutige Spezifikation von Anforderungen an ein Bauteil sowie an die Geometrieelemente, welche es beschreiben und deren sichere Verifikation, mit dem Ziel der Sicherstellung einer definierten Funktion. So ist die Bewertung von Abständen ohne Berücksichtigung der Form des Geometrieelementes häufig unzweckmäßig und nicht eindeutig. Das Bild 4 der DIN EN ISO 14405-2 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

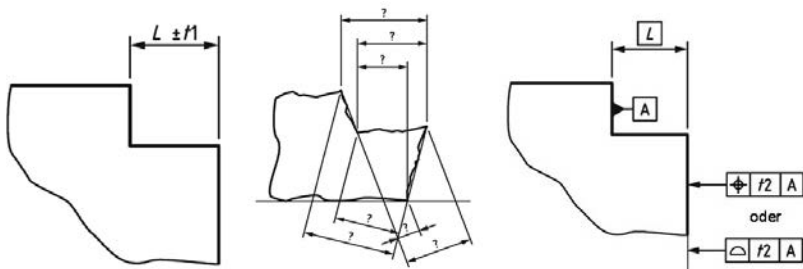


Bild 4: Linearer Abstand zwischen zwei Geometrieelementen [3]

Erst durch die Festlegung eines Bezuges und die Einschränkung der Flächenform über eine Profil- oder Positionstoleranz, in Abhängigkeit des theoretisch exakten Maßes zum Bezug, wird der Abstand zwischen den beiden abgebildeten Geometrieelementen eindeutig beschrieben. Dies bietet auch die Möglichkeit einer eindeutigen Beschreibung von Übergängen zwischen Geometrieelementen sowie von Konturen.

Zusätzlich finden Bezüge und Bezugssysteme häufig bei der Tolerierung funktionaler Formelemente Anwendung. Notwendig ist dies für den Fall, dass Profile einer beliebigen Linie oder Fläche nicht nur hinsichtlich ihrer Formabweichung zu bewerten sind, sondern auch hinsichtlich ihres Ortes in Bezug auf vorhandene Funktions- oder Referenzflächen. Ein zugehöriges Beispiel aus der DIN EN ISO 1101 zeigt die folgende Abbildung.

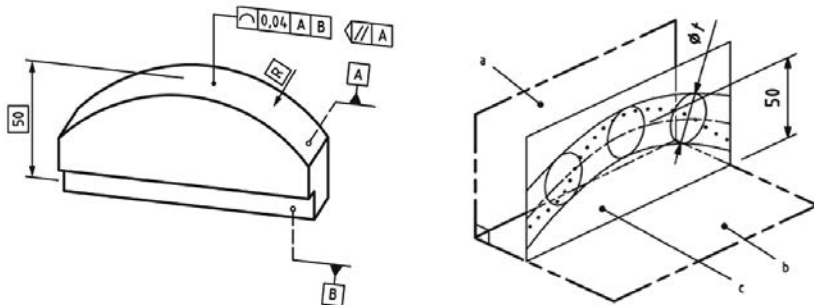


Bild 5: Profiltoleranz einer Linie im Bezugssystem A, B und zugehörige Toleranzzone [4]

Die angeführten Aspekte machen deutlich, dass der Bildung von Bezügen, nicht zuletzt durch industrielle Entwicklungstendenzen, auch in der Formmesstechnik eine erhöhte Bedeutung zukommt. Die Berücksichtigung und Einschränkung von Formabweichungen ist zudem ein adäquates Werkzeug der Geometrischen Produktspezifikation für eine eindeutige und funktionsorientierte Tolerierung von Abständen, Kanten und Radien.

2. Anforderungen an einen Bezug

Die Anforderungen an einen Bezug sind grundsätzlich nicht ohne weiteres global definierbar. Sie stehen vielmehr in direktem Zusammenhang mit der Anwendung des Bezugs oder Bezugssystems und bestehenden Rahmenbedingungen. Arten der Anwendung können zusammenfassend in drei Hauptgruppen unterteilt werden, welche im Bild 6 aufgeführt sind.

Nach aktuellem Normungsstand sind Bezüge als von der materialfreien Seite anliegende Elemente definiert [5]. In der Praxis zeigt sich allerdings, dass häufig auch mittlere Elemente zum Einsatz kommen, speziell dann, wenn eine hohe Stabilität und Reproduzierbarkeit des Bezugs gefordert ist, unabhängig von der verwendeten Messmaschine und eventuell vorhanden Abweichungen der Oberflächenstrukturen zwischen verschiedenen Bauteilen gleicher Art (basisorientiert, Referenzbezugssysteme).

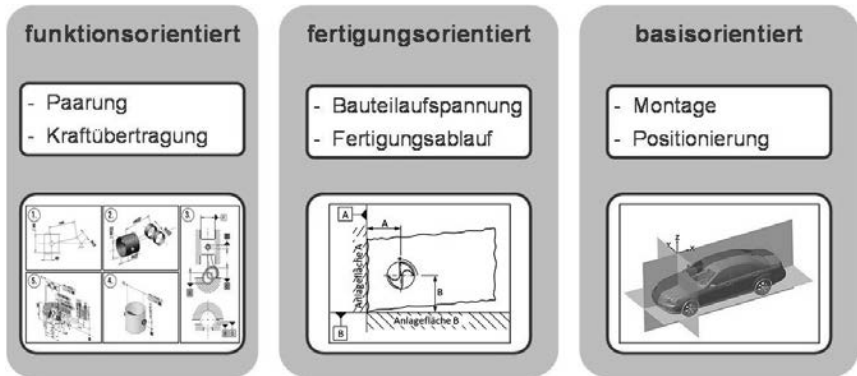


Bild 6: Einteilung von Bezugssystemen auf Basis der Anwendung [6] [7]

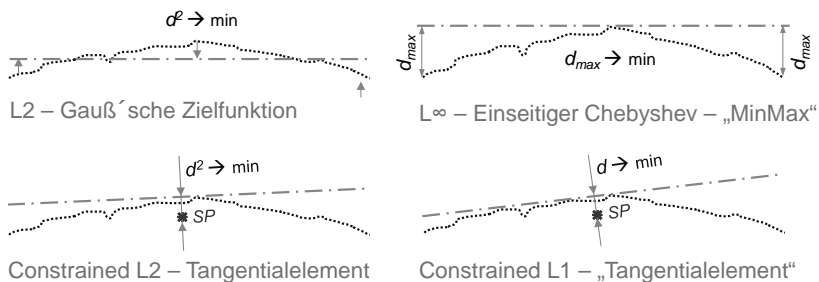
Im Falle fertigungsorientierter Bezüge und Bezugssysteme soll hingegen die durch die Aufspannung bedingte Ausrichtung bei der Bearbeitung reproduziert werden, was in der Regel anliegender Elemente, hoher Stabilität bedarf. Die reale Orientierung und Position eines Bauteils durch Paarung mit einem oder mehreren weiteren Bauteilen hingegen soll mit Hilfe funktionsorientierter Bezüge abgebildet werden. Jene Art Bezug ist dementsprechend stark von realen, charakteristischen Oberflächeneigenschaften des gesamten Geometrie-elementes abhängig. Dies sind hierbei lediglich Beispiele und entsprechende Anforderungen können in Abhängigkeit der spezifischen Anwendung auch in Verknüpfung stehen.

Für die Definition und Bildung eines anforderungsgerechten Bezugs, als Einzelbezug oder im Bezugssystem, gibt es eine Vielzahl direkter und indirekter Stellgrößen. Neben der Auswahl der Bezugselemente, der Bezugsart und der Definition der Erfassungsstrategie, sind es besonders die Wahl des Assoziationskriteriums sowie die Definition zusätzlicher, geometrischer Einschränkungen (Nebenbedingungen, Form- und Richtungstoleranzen), die die Eigenschaften des resultierenden Bezugs begründen. Auf diese Weise lassen sich zudem auch Aussagen über die Eignung eines Geometrieelementes als Bezugselement treffen.

Im Fokus der nachfolgenden Ausführungen sollen in erster Linie Assoziationskriterien für Geraden und Ebenen sowie die weiterführende Spezifikation von Bezugselementen durch geometrische Einschränkungen, wie die Bedingung „nicht-konvex (NC)“, stehen.

3. Assoziationskriterien für Geraden und Ebenen

Laut DIN EN ISO 5459 sind Bezüge von der materialfreien Seite anliegende Elemente. Deren Bildung ist allerdings lediglich für den Ausnahmefall: „Wenn das Ergebnis dieses Verfahrens nicht eindeutig ist“ [5], eindeutig definiert. Es handelt sich dabei um das Min-Max-Element, auch einseitiger Chebyshev genannt, welches im Bild 7 anhand eines Geradenprofils schematisch dargestellt ist. Zusätzlich zeigt es eine Auswahl weiterer Assoziationskriterien (Zuordnungselemente), die aktuell in Softwareanwendungen implementiert sind, in Veröffentlichungen vorgestellt wurden sowie in Normungsgremien diskutiert werden [8] [9]. Diese werden nachfolgend näher erläutert.



$d...$ Abstände der (gefilterten) Messpunkte zum assoziierten Element

SP... Schwerpunkt des Bezugselementes – „Centroid“

Bild 7: Assoziationskriterien für Geraden (und Ebenen) [5] [8] [9]

Wie bereits in der schematischen Darstellung deutlich wird, kann es auch in der Praxis, in Abhängigkeit der Oberflächengestalt des betrachteten Bezugselementes, zu unterschiedlichen Orientierungen der assoziierten Elemente kommen. Neben einer möglichen, abweichenden Ausrichtung unterscheiden sich die Assoziationskriterien besonders im Hinblick auf deren Bildungsprinzipien, Stabilität und Abbildung der Ausrichtung der Oberfläche bei Oberflächenpaarung, beispielweise mit einem Gegenkörper nach dem Vorbild einer Messplatte.

L2 – ohne Nebenbedingung: Das Kriterium definiert eine mittlere Ebene oder Gerade ohne spezifische Nebenbedingung und ohne eine abschließende Verschiebung des assoziierten Elementes. Dabei wird die Summe der Abstandsquadrate d^2 aller erfassten (gefilterten) Messpunkte zu diesem Element minimiert. Das Kriterium bietet maximale Stabilität und Reproduzierbarkeit, definiert jedoch kein vollständig bestimmtes, „real“ anliegendes Element:

Das heißt eine solches Element, in Verwendung als Primär oder Einzelbezug, liegt nicht über drei Auflagepunkte von der materialfreien Seite der Oberfläche des Bezugselementes an.

Constrained L2: Dieses Kriterium definiert eine von der materialfreien Seite anliegende Ebene beziehungsweise Gerade. Dabei wird die Summe der Abstandsquadrate d^2 aller erfassten (gefilterten) Messpunkte zum anliegenden Element, unter Berücksichtigung des Elementschwerpunktes SP , minimiert. Das Kriterium bietet ebenfalls eine hohe Stabilität und Reproduzierbarkeit. Das resultierende Element ist zwar ein von der materialfreien Seite anliegendes, doch bedingt durch das Bildungsprinzip kann dieses beispielsweise an lediglich einem Punkt anliegen, da es sich um ein Ausgleichselement handelt (nicht „real“ anliegend). [8] [9]

L_{∞} – MinMax: Der verschobene Chebyshev definiert ein von der materialfreien Seite anliegendes Element, welches den maximalen Abstand d_{max} der erfassten (gefilterten) Messpunkte zum assoziierten Element minimiert. Das Kriterium bietet in der Praxis eine gute Stabilität und Reproduzierbarkeit, auch bei der Verwendung unterschiedlicher Messmaschinen und Erfassungsstrategien, allerdings handelt es sich auch in diesem Fall bei einer Vielzahl von Oberflächenformen um keine „real“ anliegenden Elemente. Der Grund dafür die Einpassung in Abhängigkeit der höchstgelegenen sowie insbesondere der tiefstgelegenen Oberflächenstrukturen. [5] [10]

Constrained L1: Dieses Kriterium definiert ebenfalls eine von der materialfreien Seite anliegende Ebene beziehungsweise Gerade. Dabei wird die Summe der Abstände d aller erfassten (gefilterten) Messpunkte zum anliegenden Element, unter Berücksichtigung des Elementschwerpunktes SP , minimiert. In dieser Form wird nach jenem Element gesucht, welches an drei Punkten anliegt, sodass der Abstand des assoziierten Elementes zu einem definierten Schwerpunkt minimal wird. [8] [9] [10]

Als Schwerpunkt können der Flächenschwerpunkt der konvexen Hülle, der Masseschwerpunkt des Bauteils oder auch ein unabhängig davon definierter Schwerpunkt dienen (siehe Bild 8). Das Kriterium Constrained L1 bietet somit einen sehr vielseitigen und funktionsorientierten Ansatz. Allerdings reagiert der Bildungsalgorithmus in der Praxis an verschiedenen charakteristischen Oberflächenformen instabil. Dies betrifft besonders charakteristische Oberflächenformen [11], die auch bei der Paarung mit einem formidealen Gegenstück, wie zum Beispiel einer Messplatte, zum Kippen neigen. [10]

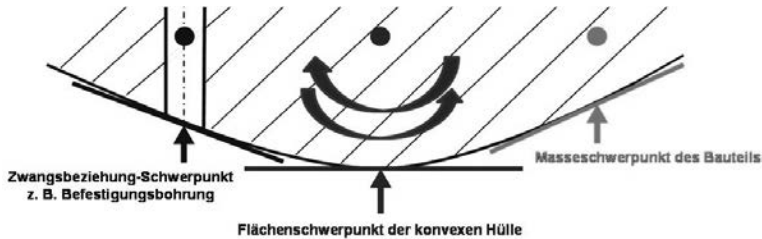


Bild 8: Constrained L1 unter Verwendung verschiedener Schwerpunkte [10]

4. Bewertungsmöglichkeit für Bezugselemente

Derzeitige Tolerierungsgrundsätze und Empfehlungen gehen von der Grundannahme aus, dass die Eignung eines Bezugselementes über die Einschränkung der Form (an Einzel- und Primärbezügen) und Richtung (innerhalb von Bezugssystemen) sowie den Zusatz „nicht konvex“ (NC), hinreichend spezifiziert und bewertet werden kann, sodass ein Kippen (Instabilität) nach dem Prinzip des Bildes 9 eingrenzbar ist. [4] [11]

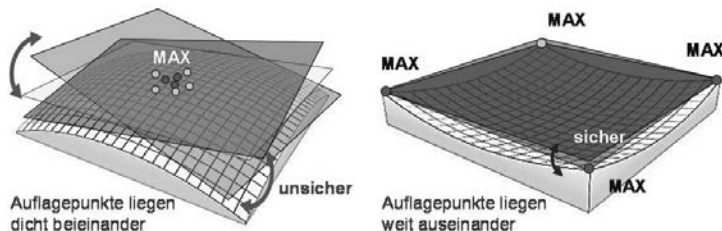


Bild 9: Kippneigung von Bezugselementen am Beispiel abweichender Oberflächenformen

Derartige, kippanfällige Oberflächenformen sind besonders bei der Verwendung der funktionsorientierten Constrained L1-Assoziationkriterien zu vermeiden, da eine leicht veränderte Messpunktlage (Umspannung des Bauteils, Messung auf verschiedenen Maschinen) zu einer deutlichen Veränderung der Orientierung des assoziierten Elementes führen kann. Dies hat mitunter zur Folge, dass die Lage und Orientierung davon angängiger Toleranzzonen verändert und somit die Einhaltung geforderter Toleranzen beeinflusst wird.

Die im ersten Absatz dieses Abschnittes beschriebene Grundannahme zur Einschränkung von Form und Richtung an Bezugselementen hat häufig sehr enge Toleranzfelder zu Folge, was einen erhöhten Aufwand für Fertigung und Messung nach sich zieht. Fertigungs- und Messverfahren sind somit steigenden Genauigkeitsansprüchen ausgesetzt,

welchen sie beispielsweise unter Berücksichtigung der Messunsicherheit („goldenen Regel der Messtechnik“) nicht mehr nachkommen können. Die ergänzende Einschränkung der Art der Oberflächenform durch den Zusatz „NC“ führt ebenso nicht zwangsweise zu einer Vermeidung der Kippneigung eines Bezugselementes. Dies hat den Grund, dass NC nicht eindeutig, mit Grenzen versehen spezifiziert ist und nicht eindeutig verifiziert werden kann. Als Beispiel dazu sind in der nachfolgenden Abbildung zwei mit einem einfachen Abtastschema erfasste Oberflächen, mit deren überhöht dargestellten Formabweichungen (für beide Flächen rund 30 μm) abgebildet. Eine der beiden Flächen neigt zu einem instabilen Verhalten, was aus verschiedenen Untersuchungen bekannt ist. Eine Abgrenzung und qualitative Bewertung ist ohne weiteres nur schwer möglich

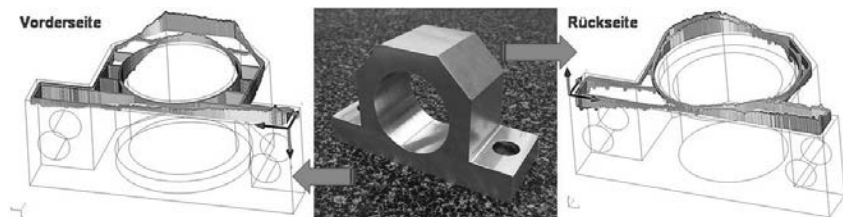


Bild 10: Oberflächen des Versuchsbauteils „Lagerbock“

Aus diesem Grund wurde durch die Professur Fertigungsmesstechnik Chemnitz in Zusammenarbeit mit der Firma Carl Zeiss IMT GmbH und der PTB Braunschweig im Rahmen eines Verbundprojektes, ein Bewertungskriterium für die Stabilität von ebenen Bezugselementen auf Basis des Assoziationskriterium Constrained L1 entwickelt. Das als Stabilitätsindex bezeichnete Bewertungskriterium gibt dabei die maximale Verkippung sowie Kipprichtung des anliegenden Elementes unter definierten Bedingungen aus (siehe Bild 11).

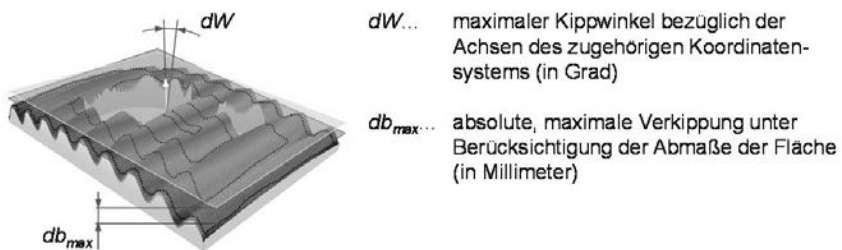
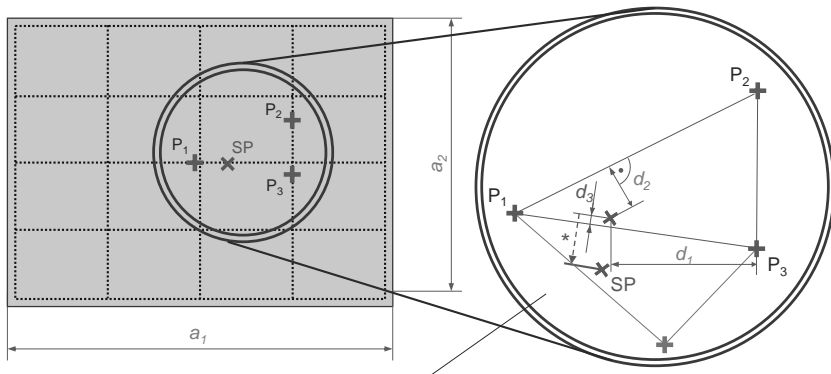


Bild 11: Kennwerte zur Beurteilung der Stabilität eines Bezugselementes [10]



Bsp.: Ist der Abstand $d_3 < \tau \cdot a_{\min}$, dann erfolgt eine Verschiebung des Schwerpunktes SP um $2\tau \cdot a_2$ ($= a_{\min}$) zur Verbindungslinie der Auflagepunkte P_1P_3 . Als τ wird der Verschiebefaktor bezeichnet.

Bild 12: Grundlage der Bestimmung des Stabilitätsindex [10]

Das Bild 12 zeigt die Grundlagen zur Bestimmung des Stabilitätsindex anhand einer Prinzipskizze. Hat der betrachtete Schwerpunkt SP, unabhängig davon, woraus dieser entstammt, auch zur zweiten und dritten Verbindungslinie zwischen den Auflagepunkten einen Abstand kleiner dem festgelegtem Grenzwert ($\tau \cdot a_{\min}$), dann erfolgt auch an diesen Verbindungslinien eine Verschiebung des Schwerpunkts. Ausgehend von jenen Hilfsschwerpunkten werden erneut anliegende Elemente berechnet. Aus den maximal vier resultierenden Elementen wird nun die maximale Verkipfung berechnet, welche das Bewertungskriterium darstellt.

Als Verschiebefaktoren τ , welche den Grenzwert in Zusammenhang mit der minimalen Flächenausdehnung beschreiben, haben sich im Rahmen der Untersuchungen im Verbundprojekt 3DBBS Werte zwischen 0,01 und 0,15 bewährt. Je größer der Verschiebefaktor gewählt werden kann, ohne dass eine Verkipfung eintritt ($db_{\max} > 0$), als umso stabiler und somit geeigneter kann ein Bezugselement eingestuft werden. Ein Stagnieren des Stabilitätsindex bei weiter steigendem Verschiebefaktor ist zudem ein Indiz für eine eingeschränkte Eignung. Diesbezüglich soll in naher Zukunft eine Möglichkeit der Einteilung in Stabilitätsklassen erarbeitet werden.

Die Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung des Stabilitätsindex anhand des Kennwertes db_{\max} . Dabei wird der Vorteil dieses zusätzlichen Bewertungskriteriums deutlich. War eine Abschätzung der Kippneigung im Voraus nicht möglich, kann nun eine sichere Abgrenzung zwischen den Eigenschaften der Vorder- und Rückseite erfolgen.

Das Kippen der Rückseite des Lagerbocks lässt sich zudem auch über die Prüfung der Stabilität der Lage auf einer Messplatte nachvollziehen.

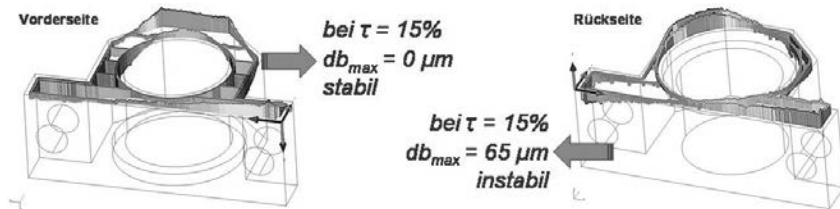


Bild 13: Kennwerte des Stabilitätsindex an der Vorder- und Rückseite des Lagerbocks

5. Zusammenfassung und Ausblick

In einer von Flexibilisierung geprägten Produktion mit fortwährend steigender Bauteilkomplexität und höchsten Qualitätsansprüchen gewinnt die Bezugsbildung auch in der Messung von Form und Kontur zunehmend an Bedeutung. Sie bildet die Grundlage einer eindeutigen und funktionsorientierten Tolerierung zur Sicherstellung vielfältigster Anforderungen an ein Bauteil, eine Baugruppe sowie ein Gesamtprodukt.

In Abhängigkeit der Verwendung eines Bezugs oder Bezugssystems ist es dabei notwendig, geeignete Bezugselemente, Erfassungsstrategien, Assoziationskriterien sowie zusätzliche geometrische Einschränkungen festzulegen, um den aus der Verwendung hervorgehenden Anforderungen nachkommen zu können. Zu den Assoziationskriterien wurde ein Überblick zusammengestellt, grundlegende Eigenschaften der Kriterien angeführt und die Bildung anliegender Elemente nach dem Prinzip Constrained L1 sowie damit in Verbindung stehende funktionale Ansätze näher erläutert. Welche Kriterien für welche Anwendungs- und Funktionsfälle am besten geeignet sind, muss Inhalt zukünftiger, weiterführender Untersuchungen und anwendungsorientierter Forschungsprojekte sein.

Einen weiteren essentiellen Bestandteil dieses Beitrages bildet das vorgestellte Bewertungskriterium Stabilitätsindex für ebene Bezugselemente, mit dessen Hilfe definierte Aussagen über die Eignung eines Elementes auf Basis dessen Kippneigung getroffen werden kann. Es ergänzt somit die Einschränkung von Form und Lage an Bezugselementen sowie zusätzliche Angaben, wie beispielsweise „nicht konvex“ (NC). Der Stabilitätsindex soll zudem zukünftig auf zylindrische Bezugselemente erweitert und die Einstellung von Rahmenparametern, wie dem Verschiebefaktor, systematisiert werden.

Literaturhinweise:

- [1] DIN ISO 5459:1982: Technische Zeichnungen; Form- und Lagetolerierung; Bezüge und Bezugssysteme für geometrische Toleranzen.
- [2] Imkamp, D., Schmitt, R., Berthold, J.: Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik. tm - Technisches Messen, Vol. 79, 2012.
- [3] DIN EN SIO 14405-2:2012: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 2: Andere als lineare Maße.
- [4] DIN EN ISO 1101:2014: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf.
- [5] DIN EN ISO 5459:2013: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme.
- [6] Weißgerber, M.; Ebermann, M.; Gröger, S.; Leidich, E.: Requirements for Datum Systems in Computer Aided Tolerancing and the Verification Process. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT), Göteborg, Elsevier, 2016.
- [7] Bohn, M.; Hetsch, K.: Toleranzmanagement im Automobilbau. Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [8] Shakarji, C., M.; Srinivasan, V.: A constraint L2 based algorithm for standardized planar datum establishment. Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Houston, Texas, 2015.
- [9] Shakarji, C., M.; Srinivasan, V.: Theory and Algorithms for L1 Fitting Used for Planar Datum Establishment. Proceedings of the ASME 2012, International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Portland, Oregon, 2013.
- [10] Schlussbericht Verbundprojekt 3DBBS: Qualifizierung der 3D-Koordinatenmesstechnik zur standardisierten Bildung von Bezügen und Bezugssystemen. TU Chemnitz, PTB Braunschweig, Carl Zeiss IMT, 2015.
- [11] Jorden, W.; Schütte, W.: Form- und Lagetoleranzen – Handbuch für Studium und Praxis, 8. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2014.

Strukturauflösung in der Koordinatenmesstechnik

Dr. rer. nat. **J. Illemann**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Kurzfassung

Koordinatenmessgeräte (KMG) werden zur Messung allgemeiner dreidimensionaler Oberflächen eingesetzt. In der einschlägigen Normung wird die *Strukturauflösung* als ein wichtiger Begriff zu ihrer Leistungsbewertung eingeführt, aber bisher nicht genau definiert. In diesem Beitrag wird zuerst beschrieben, wozu man diese – auch gerade im Hinblick auf Form- und Konturmessung – benötigt und was bisher der Stand von Normung und Technik ist. Ein kürzlich von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) veröffentlichtes Konzept, dass auf einer krümmungsbasierten Beschreibung basiert, wird vorgestellt und anhand praktischer Messungen mit taktilem Taster, optischem Sensor und Röntgencomputertomographie (CT) veranschaulicht.

1. Wozu Strukturauflösung in der (Multisensor-) Koordinatenmesstechnik?

Form- und Konturmessung können zunehmend auch mit Koordinatenmessgeräten bewerkstelligt werden. Dazu werden taktile Sensoren scannend im dynamischen Messmodus betrieben oder andere Sensoren mit hoher Datenrate verwendet. Insbesondere bei den bildhaft messenden optischen Sensoren können bei begrenzter Messzeit Oberflächenpunkte genügend dicht angetastet werden, um eine Oberfläche lückenlos darstellen zu können. Einen Spezialfall stellt die CT dar, da sie zusätzlich die Bestimmung verdeckter und innerer Oberflächen zulässt. Der Anwender steht bei der Entscheidung, auf welche Technologie er zurückgreift, vor der Frage, welche seinen Anforderungen genügt. Die Anforderung an die Genauigkeit dimensioneller Messungen, insbesondere auch an die Formabweichung, steht konträr der Anforderung an genügende Detailtreue gegenüber: der Einsatz analoger (auf der Sensorseite) oder digitaler (in der Datenverarbeitung) Filter verbessert zwar die Anstatabweichung – aber auf Kosten der Detailtreue.

In Katalogen und Broschüren von KMG findet man bisher üblicherweise nur Angaben, die den eigentlichen Sensor beschreiben: so zum Beispiel bei Konfokalmikroskopen die optische Auflösung des Objektivs, die Pixelauflösung und eine grunddrauschäquivalente vertikale Auflösung. Bei Mikro-Röntgen-Computertomographen werden z.B. die Röntgenfokusgröße und die Voxelgrößen bei gegebenen geometrischen Vergrößerungen angegeben. Bei beiden

Angaben ist zumindest außer Acht gelassen worden, dass die (Pixel der) bildgebenden Detektoren keine ideale Übertragungsfunktion aufweisen, da sie z.B. Toträume haben oder die Empfindlichkeit über die Detektorfläche variiert. Auch ist der mechanische Einfluss durch Vibration oder Drift nicht angegeben. Dazu kommen physikalische Probleme der Sensorprinzipien wie z.B. Strahlaufhärtung und Streustrahlung beim CT, spiegelnde Reflektion nach außerhalb der Apertur und Retroreflexion bei optischen Sensoren. Bei taktilen Messgeräten ist das Stick-Slip-Verhalten – auch gerade in Abhängigkeit von Messkraft, Geschwindigkeit und der Materialpaarung von Taster und Oberfläche – schwer vorher zu sehen.

Das heißt, aus den in den Katalogen angegebenen Eigenschaften könnte bestenfalls nur darauf geschlossen werden, was mit Sicherheit nicht mehr gemessen werden kann, es enthält keine Angabe darüber, was mit Sicherheit noch gemessen werden kann. Eine Definition einer entsprechenden Strukturauflösung in der Koordinatenmesstechnik soll diese Detailtreue – auch für die Formmesstechnik – messtechnisch relevant beschreiben und dabei die Vergleichbarkeit verschiedener Technologien bzw. Sensorprinzipien ermöglichen.

2. Stand von Normung und Technik

In VDI/VDE 2617 Blatt 6.1:2007-05 [1] und Blatt 6.2:2005-10 [2] wird der Begriff der Strukturauflösung beschrieben als „die Fähigkeit eines Systems, eine am Eingang des Systems vorliegende Struktur (Objekt) innerhalb bestimmter noch zu spezifizierender Fehlergrenzen an den Ausgang übertragen zu können“. Diese Definition kommt aus der linearen Systemtheorie, die üblicherweise in der Optik erfolgreich eingesetzt wird. Da sich beide Richtlinien [1, 2] mit KMG mit optischer Antastung befassen, ist dies naheliegend. Allerdings bezieht sich die dort angesprochene Modulationsübertragungsfunktion ($MÜF^1$) nur auf diskrete skalare Felder (Bilder $f(x_i, y_j)$), bzw. Grauwerte $f(x_i, y_j, z_k)$, die auf einem äquidistanten Gitter $\{x_i, y_j, z_k\}$ angeordnet sind. Die $MÜF$ kann immerhin bei der Messung von Texturen, also Oberflächen, die eindeutige Höhenwerte über einer ebenen Fläche haben, berechnet werden. Dazu setzt man die Höhenwerte als Funktionswerte $h(x_i, y_j)$ ein. Zusätzlich müssen die Werte sinnvoll auf einem äquidistanten Gitter angeordnet sein – oder umgerechnet werden können. Darauf bauen die konkreteren Vorschläge in [2] für KMG mit optischen Abstandssensoren auf: Strukturnormal (z.B. Loch/Rille mit kalibrierter Tiefe), Kantennormal oder Wellennormal.

¹ Englisch: MTF *modulation transfer function*. Sie ist der Betrag der allgemeineren optischen Übertragungsfunktion (ÖÜF bzw. engl. OTF), die komplexwertig ist und auch eventuelle Phasenverschiebungen der sinusförmigen Anteile beschreibt.

Im allgemeinen Fall von dreidimensionalen Koordinaten versagt diese „Definition“. Auch wird bei taktilen Messungen gegen die Grundannahme der Linearität verstoßen, da die taktile Messung einer morphologischen Filterung entspricht [3, 4]: offenbar kann ein konvexes hervorstehendes Oberflächenmerkmal mit einer Tastkugel wesentlich besser aufgelöst werden, als ein konkaves mit Krümmungsradius kleiner als dem Tastkugelradius, dass gar nicht angetastet wird.

Der Stand der Normung wird daher besser und zutreffend durch die neuere VDI/VDE 2617 Blatt 13:2011-12 [5] im Anhang A beschrieben: *„Die Strukturauflösung beschreibt die Größe der kleinsten dimensionell messbaren Struktur. ... Um die Vergleichbarkeit verschiedener Koordinatenmessgeräte mit unterschiedlichen Technologien sicherzustellen, wird in einer separaten Richtlinie der Richtlinienreihe die Problematik der Strukturauflösung detailliert behandelt werden. ... In dieser Richtlinie werden lediglich Vorschläge für mögliche Verfahren angegeben, um in der Übergangszeit eine erste Handlungsrichtlinie zur Verfügung zu stellen.“* Ein wichtiger Unterschied zu anderen Auflösungsdefinitionen wie z.B. die optische Auflösung (für flache Bilder) mit den sie genauer spezifizierenden Kriterien (Abbe, Rayleigh, Sparrow... siehe z.B. [4]) oder der Auflösung mit Hilfe der optischen Übertragungsfunktion, die auch auf den dreidimensionalen Fall in der CT [6] angewendet werden kann, ist, dass sich die Strukturauflösung auf die kleinste *dimensionell messbare* Struktur bezieht. Das heißt auf eine Oberflächenstruktur, die sich bemaßen lässt und die messbar ist. Kriterien, ab wann eine dimensionelle Größe messbar ist, wurden bisher nicht festgelegt. An dieser Stelle entsteht zusätzlich eine gewisse Konfusion, weil die verschiedenen Anwender von Koordinatenmessgeräten (oder Form- und Konturmessgeräten) es so verstehen, dass die Strukturauflösung die Größe der kleinsten Struktur entsprechend ihrer jeweiligen Hauptanwendung *sein* müsse (z.B. eine kleinste Strukturbreite eines Rechteckprofils oder die kleinste Tiefe eines rechteckigen Grabens), die – nach gewissen willkürlichen Kriterien – messbar ist. Nach obigem Zitat aus [5] hat die Strukturauflösung aber nur die Funktion zu *beschreiben*, was die kleinste dimensionell messbare Größe ist. Sinnvollerweise sollte die Strukturauflösung als *beschreibende* Größe eine Länge sein, die auf das Einheitensystem rückführbar ist.

Trotz der oben angeführten Kritik hat die Verwendung der linearen Systemtheorie und der MÜF den besonderen Charme, dass das Ergebnis nicht nur eine einfache Länge ist (bzw. Ortswellenlänge), die eine Ja-Nein-Entscheidung bewertet, sondern eine Theorie enthält, die auch Vorhersagen über mögliche Abweichungen von Konturmessungen kleiner Strukturen ermöglichen könnte – also Messunsicherheitsabschätzungen. In jedem Fall reicht die MÜF zur Beschreibung der Strukturauflösung nicht aus, da jeder Gerätehersteller, der die MÜF, bzw. OÜF, seiner Geräte ja messen könnte, diese mit Hilfe des Faltungssatzes aus den

Rohdaten korrigieren würde und sollte. Diese Umkehrung wird allerdings durch das aufgeprägte Rauschen verhindert, das durch das Rauschleistungsspektrum charakterisiert ist. Verschiedene Gruppen, auch die PTB, forschen deshalb weiter an der Realisierung von Prüfkörpern zur Bestimmung der MÜF [7, 8], bei der zum Beispiel die klein gewählte Höhenamplitude über einer Modellfläche (Zylinder, Ebene) als Grauwert betrachtet wird. Es ist vorgesehen, dass nach erfolgreicher Forschungsarbeit und Diskussion in den Normungsgremien, letztendlich eine Definition der Strukturauflösung mit zugehörigen Erläuterungen zu den Ausführungsmöglichkeiten z.B. in die Normenreihe DIN EN ISO 10360-X voraussichtlich als Blatt 13 (für CT) aufgenommen werden soll. Das zur MÜF alternative Konzept der PTB wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

3. Ein neues einheitliches Konzept für taktile und andere Sensoren

Die Grundidee des Konzeptes [10, 11, 12] stammt aus einer Überlegung der Differentialgeometrie, dass jede (geschlossene, zweimal differenzierbare) Oberfläche sich eindeutig durch ihre beiden Hauptkrümmungen in ihren Oberflächenpunkten darstellen lässt. Der Messprozess überführt jeden Oberflächenpunkt in einen neuen der gemessenen Oberfläche, wobei die ihm zugeordneten Hauptkrümmungen verändert werden (s. Bild 1, links). Beim optimalen Messprozess werden die Krümmungen eins zu eins übertragen – beim realen Messprozess führt Unschärfe bei zunehmend kleineren Krümmungsradien (d.h. hoher Krümmung) zu einer geringeren Übertragung. Zusätzlich gewinnt das Rauschen bei hoher Krümmung an Bedeutung, da das Punkt-zu-Punkt Rauschen bei Bestimmung der Krümmung aus der Topographie zweimal differenziert wird und gleichzeitig die gemessene Zahl an Datenpunkten auf einer typischen Länge des Krümmungsradius abnimmt.

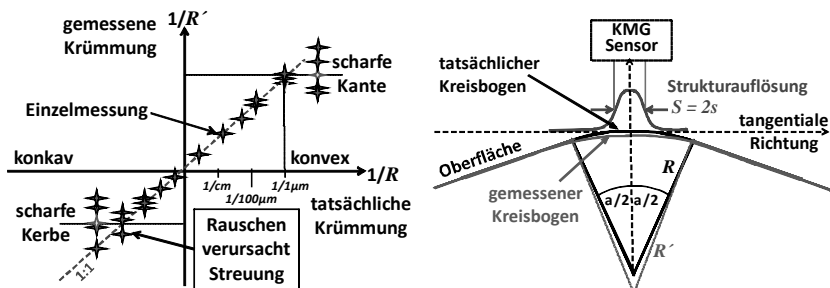


Bild 1: Das Konzept der krümmungsbasierten Übertragungsfunktion KBÜF (links) und das definitorische Messprinzip einer äquivalenten Strukturauflösung.

Da offenbar die Bestimmung der Krümmung in nur einem Punkt messtechnisch nicht lösbar ist, ist der hier verwendete Ansatz die Messung einer kreisförmig verrundeten „Schneidkante“ (s. Bild 1, rechts), dessen Radius R aus einer Kalibrierung bekannt ist. Es wird von einem gut gefertigten Prüfkörper ausgegangen, dessen Profil aus zwei Geradenstücken unter dem Schnittwinkel α besteht, die mit einem angepassten Kreisbogen vom Radius R verbunden sind. Tastet nun ein idealisiertes KMG das Profil ab, entsteht ein modifiziertes Profil. Die Idealisierung besteht darin, dass das KMG eine ideale Faltung mit einem Gaußprofil entlang der tangentialen Achse ausführen soll – die volle Breite stellt die neu definierte Strukturauflösung dar. Da der Radius R im Vorhinein bekannt ist, kann ein Intervall von $\pm R \cdot \sin(\alpha/2)$ um die Profilmitte ausgeschnitten werden und dort ein Kreis mit Radius R' nach dem Verfahren der kleinsten quadratischen Abweichung eingepasst werden. Dies wird als Messwert angenommen, auch wenn das tatsächliche Profil geringfügig von einem Kreissegment abweicht. Aus dem Verhältnis R'/R kann auf die Strukturauflösung geschlossen werden. In Bild 2 ist das gerechnete Ergebnis in Abhängigkeit des Kantenschnittwinkels in einem Nomogramm aufgetragen. Die Werte wurden berechnet, indem die Faltung mit einem Gaußprofil durch numerische Integration mit anschließender Kreiseinpassung nach obiger Vorschrift durchgeführt wurde.

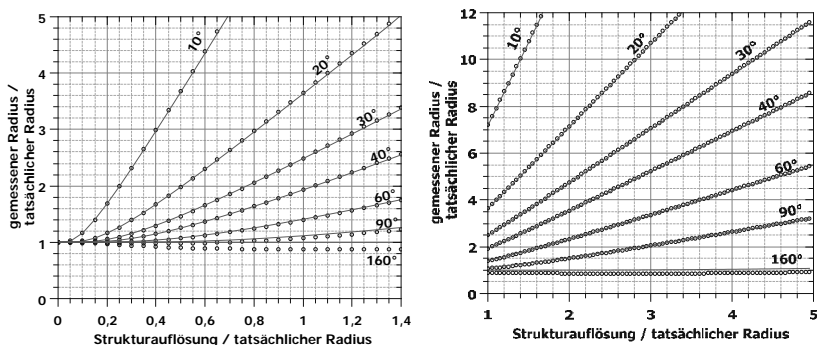


Bild 2: Nomogramm zur Bestimmung der Strukturauflösung. Die Punkte stellen Ergebnisse numerischer Berechnung dar, die Linien die analytische Näherung. Als Parameter dient der Kantenwinkel α .

Die durchgezogenen Linien stellen die analytische Näherung dar [12], die durch Betrachtung des Konvergenzverhaltens für kleine und große Strukturauflösung gewonnen wurde:

$$R'/R \approx \operatorname{erf} \left(\frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{s/\sqrt{2}} \right)^{-1} \approx 1 + l \cdot e^{-1.06/l}, \quad l = \frac{0.628 \cdot s}{\tan \frac{\alpha}{2}}. \quad (1)$$

Diese Näherung gilt sehr gut für Kantenwinkel α bis etwa 90° , für Rasierklingschneiden (z.B. $\alpha = 160^\circ$) versagt sie. Kreisbögen mit Kantenwinkel kleiner 30° sind aufgrund der sehr kleinen Pfeilhöhe ebenfalls praktisch nicht zu nutzen. Für Winkel um 90° ist die Abhängigkeit des gemessenen Radius von der Strukturauflösung schon gering. Normale sollten daher Winkel zwischen 30° und 60° aufweisen.

Ein reales KMG kann Abweichungen zur Annahme einer Gaußverbreiterung haben. Dies ist aber in der Regel nicht zu erwarten, da beim Vorhandensein mehrerer Ursachen vergleichbarer Größe, aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes, sich der Gesamtfehler einer Gaußverteilung annähert. Die Angabe des Wertes *beschreibt* zudem ein vergleichbares KMG mit äquivalenter Gaußverbreiterung. Mit Kenntnis der *krümmungsbasierten Übertragungsfunktion* KBÜF² könnte man die Rohdaten nun korrigieren.

Wie bereits in Abschnitt 2 bezüglich der MÜF beschrieben, wird dieses durch das Vorhandensein von Rauschen behindert: die Korrektur würde zu einer schlechteren Reproduzierbarkeit der Radiusbestimmung führen. Um die Gültigkeit der Bestimmung der Strukturauflösung festzustellen, wird daher eine zusätzliche Forderung an die Reproduzierbarkeit der Radiusbestimmung aufgestellt [12].

Die Idee der KBÜF ähnelt der MÜF, nur dass hier die Information aus lokalen punktförmigen Flächenelementen übertragen wird, anstatt aus der globalen Superposition von sinusförmigen Amplituden. Daher stellt die KBÜF deutlich weniger Ansprüche an die Linearität des Sensors als die MÜF. Die KBÜF kann insbesondere zu konkaven und konvexen Krümmungen hin asymmetrisch sein, was durch die Wahl der Sinusfunktion als Funktionsbasis bei der MÜF unmöglich ist. Damit ist die Modellierung einer taktilen Messung mit Tastkugel oder Tastspitze wesentlich realistischer möglich, wenn auch, genau so wenig wie mit der MÜF, die morphologische *filling*-Filterung [4] nicht beschrieben werden kann.

² Englisch: *curvature-based transfer function* CBTF. Das Akronym CTF ist in der Optik bereits für *contrast transfer function* belegt.

Die Krümmung ergibt sich entlang eines Profilschnittes in Richtung x folgendermaßen:

$$\kappa(x) = \frac{d^2 y / dx^2}{\left(1 + \left(dy/dx\right)^2\right)^{3/2}}. \quad (2)$$

Basierend auf der Annahme, dass die erste Ableitung dy/dx , aufgrund kleiner Amplitude, gegen eins zu vernachlässigen ist, vereinfacht sich die Gleichung (2) zu:

$$\kappa(x) \cong d^2 y / dx^2. \quad (3)$$

Das Oberflächenprofil kann als Fourierintegral mit komplexen Amplitudenfunktion $y(k)$ angenommen werden. Damit ergibt sich mit k als Wellenzahl die Krümmung κ als:

$$\kappa(x) \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{d^2}{dx^2} \int_{k=-\infty}^{\infty} y(k) \cdot e^{-ikx} dk = \frac{-1}{\sqrt{2\pi}} \int_{k=-\infty}^{\infty} k^2 y(k) \cdot e^{-ikx} dk. \quad (4)$$

Wird der Messprozess durch die lineare Systemtheorie beschrieben und ist $a(k)$ die komplexwertige OÜF, so ist die gemessene Krümmung:

$$\tilde{\kappa}(x) \cong \frac{-1}{\sqrt{2\pi}} \int_{k=-\infty}^{\infty} k^2 a(k) y(k) \cdot e^{-ikx} dk. \quad (5)$$

Das bedeutet, dass die Krümmungsübertragungsfunktion bis auf den Faktor k^2 identisch zur OÜF ist, bzw. zu ihrem Betrag, der MÜF. Nach der Annahme beim Übergang von Gleichung (2) nach (3) kann die MÜF als Kleinsignalnäherung der KBÜF verstanden und durch eine Gewichtung der Fourierkoeffizienten umgerechnet werden. So gesehen ist eine praktische Realisierung der Messung der KBÜF auch dadurch denkbar, dass die MÜF gemessen und die KBÜF daraus berechnet wird. Dies setzt voraus, dass sich das KMG genügend linear verhält. Zu beachten ist, dass das Rauschen ebenfalls gewichtet und die Oberfläche nur an einer endlichen Anzahl von Punkten angetastet wird. Daraus ein vergleichbares Kriterium für die Strukturauflösung zu gewinnen, erfordert noch weitere Forschungsarbeiten.

4. Beispieldaten

Die folgenden experimentellen Ergebnisse dienen zur Veranschaulichung der praktischen Umsetzung des vorgeschlagenen Konzeptes und wurden bereits in [12] genauer beschrieben. Zusätzlich zu [12] ist hier das Ergebnis einer taktilen Messung am verwendeten Prüfkörper ergänzt, um die mögliche Anwendbarkeit auch für taktile Messungen zu demonstrieren. Der Prüfkörper, der zur Bestimmung der Strukturauflösung entwickelt wurde, ist in Bild 3 abgebildet. Er besteht aus einem Kupferkern, der auf einer Spritzenkanüle befestigt ist, und mit einer amorphen Nickel-Phosphor-Schicht galvanisch beschichtet wurde. In diese Schicht

wurde mittels einer Diamantdrehmaschine zylindersymmetrisch eine Profilstruktur eingearbeitet.

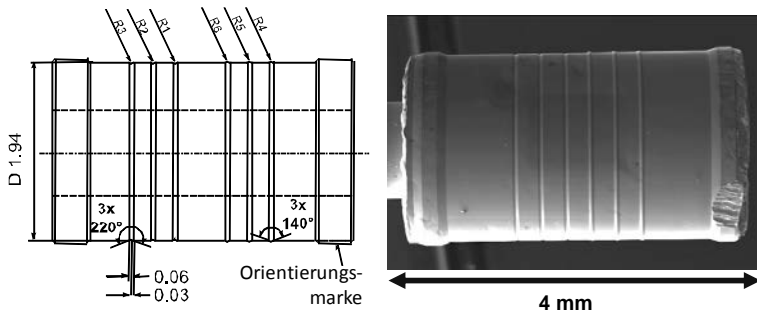


Bild 3: Prüfkörper: Zeichnung und rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (Design leicht geändert). Die gemessenen Radien liegen im Bereich von $\sim 0,1 \mu\text{m}$ bis $7 \mu\text{m}$.

Das Profil weist je drei definiert abgerundete Kerben und drei definiert abgerundete Grate auf. Die Form ist stumpfwinklig mit 140° für die Grate bzw. 220° für die Kerben. Das heißt, die Abrundungen stellen Kreissegmente mit 40° Öffnungswinkel dar. Um die Krümmungsradien zu kalibrieren, wurde rasterkraftmikroskopisch das Profil gemessen. In Bild 4 ist exemplarisch die Auswertung einer Kerbe dargestellt.

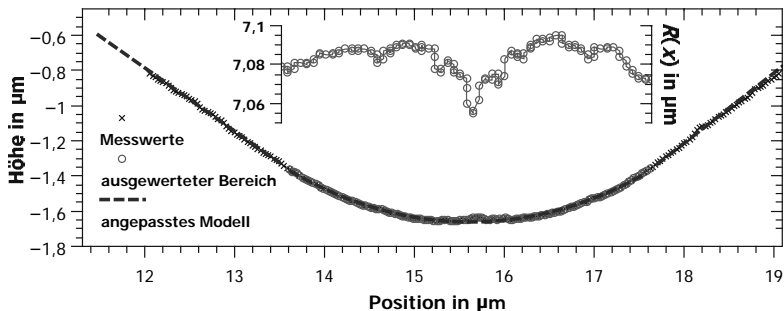


Bild 4: Rasterkraftmikroskopische Messung einer diamantgedrehten Rille. $R(x)$ gibt den Abstand zum Mittelpunkt des angepassten Kreisbogens an.

Iterativ bis zur Konvergenz wurde in ein Auswertintervall der Breite $2 \cdot \sin(20^\circ) \cdot R$ ein Kreisbogen angepasst, die Flanken wurden symmetrisch als Geraden mit 40° Winkel zueinander angenommen. In Bild 4 ist zusätzlich der Abstand der einzelnen gemessenen Kreisbogenpunkte zum Mittelpunkt aufgetragen: daraus ist ersichtlich, dass die Formabweichung des Bogens nur 30 nm bei einem Wert von etwa $7,1 \mu\text{m}$ beträgt. Dies ist dadurch erreicht wor-

den, dass ein kreisförmig geschliffenes Diamantwerkzeug verwendet wurde, das offenbar nicht mehr Formabweichung über einen Winkel von -20° bis $+20^\circ$ aufgewiesen hat. Das Artefakt in der Profilmitte ist möglicherweise dadurch entstanden, dass das Werkzeug zuvor beim Bearbeiten der ebenen Profilelemente am Berührungspunkt in der Mitte verschlissen wurde. Dieses Werkstück ist dennoch hochwertig, aber auch einfachere, kostengünstigere würden als Prüfkörper für viele Zwecke ausreichen.

Ein Überblick über eine Grattmessung mit einem optisch konfokalen bildgebenden Mikroskops (Sensofar PLμ Neox) ist in Bild 5, links, gezeigt. Es arbeitet bei einer Wellenlänge von 460 nm mit einem 100-fach vergrößernden Objektiv mit numerischer Apertur von 0,9. Damit beträgt die mikroskopische Auflösung etwa 310 nm, die Pixelgröße der ausgegebenen topographischen Bilder beträgt 170 nm. Der Absatz im Profil des Grades in der rechten Flanke ist fertigungsbedingt, da mit dem Werkzeug zweimal angesetzt wurde.

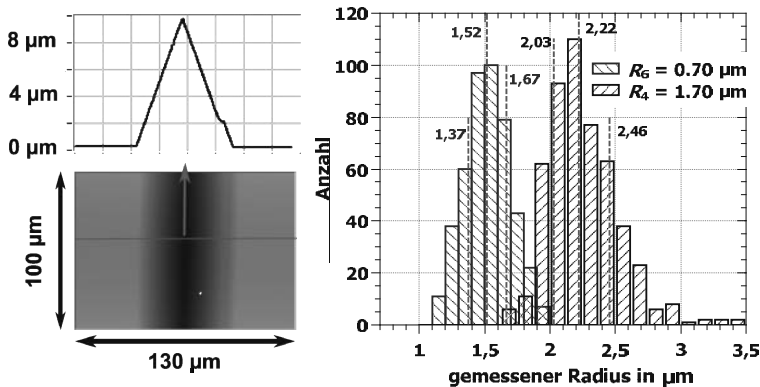


Bild 5: Messung eines abgerundeten Grades mit einem konfokalen bildgebenden Mikroskop. Im Histogramm sind die zeilenweisen Auswertungen der Radien der Abrundung für zwei verschiedene Strukturen gezeigt.

Im Bild 5, rechts, ist die Auswertung dargestellt: aus den topographischen Bildern zweier unterschiedlicher Strukturen wurden Zeilen als Profilschnitte extrahiert. Die Radien der Strukturen waren vorher rasterkraftmikroskopisch kalibriert worden und als 0,7 µm bzw. 1,7 µm bekannt. Aus den Profilen wurden daher die zentralen drei bzw. sieben Werte genommen ($2 \cdot \sin(20^\circ) \cdot R / 0,17 \mu\text{m}$), um darin Kreise einzupassen. Die somit bestimmten Radien wurden in das Histogramm eingetragen. Die Medianwerte der Verteilungen betragen 1,52 µm bzw. 2,22 µm. Nach Gleichung 1 bzw. unter Benutzung des Nomogramms in Bild 2, kann man aus

den Verhältnissen $1,52 \mu\text{m} / 0,70 \mu\text{m} = 2,17$ und $2,22 \mu\text{m} / 1,70 \mu\text{m} = 1,31$ die normierte Strukturauflösung als 1,16 bzw. 0,55 angeben. Multipliziert mit den bekannten Radien ergibt sich als Strukturauflösung $0,81 \mu\text{m}$ bzw. $0,93 \mu\text{m}$, im Mittel $0,87 \mu\text{m}$. Dieses ist ein fast dreimal größerer Wert als die berechnete mikroskopische Auflösung, die allerdings auch nur für krümmungsfreie Absorptionen in der Ebene gilt.

Für die Messung mit einem Mikro-Röntgencomputertomographen (Nikon® XT-H 225) in Bild 6 ist die Angabe einer Strukturauflösung aufgrund des Rauschens (= zufällige Oberflächenformabweichung von Punkt zu Punkt) nicht unmittelbar möglich. Ein Einpassen von Kreisen in verrauschte Profile führt zu einer sehr weiten Streuung der Radien, bis hin zur Vorzeichenumkehr. In der CT wird die ganze Oberfläche auf einmal gemessen, es fallen große Mengen an flächenhafter Information an. Die Punkte des vom Prüfkörper gemessenen Oberflächennetzes wurden exportiert und sind in Bild 6, rechts, ausschnittsweise aufgetragen: die Punkte stammen aus einem $80 \mu\text{m}$ langen und $60 \mu\text{m}$ breiten Oberflächenelement. Aufgrund des Rauschens gibt es auch Punkte von Poren im Volumeninneren, die automatisch erkannt und ignoriert werden. Wird vorausgesetzt, dass die Strukturauflösung an einer Kante mit im Vorherein bekannt gleichbleibenden Profil bestimmt wird, können über die Profildaten entlang der Kante Mittelwerte gebildet werden. Die Mittelung in Richtung des Profils ist zusätzlich sinnvoll und richtig insofern die Filterbreite deutlich kleiner als die erwartete Strukturauflösung (z.B. $2 \mu\text{m}$) bleibt.

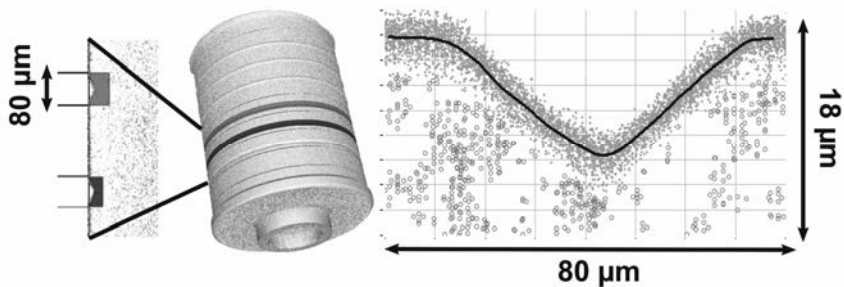


Bild 6: Röntgen-Mikro-CT Aufnahme des Prüfkörpers. Rechts: exportierte Punktwolke und gemitteltes Profil. Fehlerhafte volumeninnere Punkte (Kreise) werden ignoriert.

Für obige Messung wurde der Computertomograph mit großer geometrischer Auflösung benutzt, so dass die Voxel-Auflösung (= 3D-Pixel) etwa $1,7 \mu\text{m}$ betrug. Zusätzlich wurde die Elektronenstrahlleistung auf sehr geringe zwei Watt gedrosselt, so dass der Durchmesser des Brennflecks auf der Anode weniger als vier Mikrometer betrug. Das Ergebnis der Kreis-

anpassung und Bestimmung der Strukturauflösung S für zwei verschiedene Strukturen ist in Tabelle 1 aufgeführt. Die Auswertung wurde auf dem Zylinderumfang 100-mal wiederholt, so dass sich eine Verteilung ähnlich wie in Bild 5 ergibt. Die Verteilung wird z.B. beschrieben durch den Medianwert P_{50} , das 50 % Perzentil³, das 20 % Perzentil P_{20} und das 80 % Perzentil P_{80} . Aus P_{50} wird nach Gleichung 1 der Strukturauflösungswert bestimmt, die Spanne von P_{20} zu P_{80} kann zur Bewertung der Gültigkeit der Werte herangezogen werden. Zum Vergleich wurde die Auswertung mit Mittelungslänge L über 6 μm quer zur Profilrichtung wiederholt. Für eine Mittelung über $L = 60 \mu\text{m}$ in Querrichtung ergibt die Bestimmung der Strukturauflösung für beide Strukturen einen Wert von etwa 6,0 μm .

Tabelle 1: Auswertung der CT-Messung zur Bestimmung der Strukturauflösung S

| R in μm | L in μm | P_{20} in μm | P_{50} in μm | P_{80} in μm | S in μm |
|----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| 6,72 | 6 | 10,0 | 13,2 | 18,2 | 6,86 |
| | 60 | 10,4 | 11,8 | 13,4 | 5,92 |
| 4,50 | 6 | 7,4 | 10,0 | 14,2 | 5,35 |
| | 60 | 10,1 | 11,2 | 12,6 | 6,11 |

Zuletzt zeigt Bild 7 die taktile Messung eines Grates mit einem Multisensor-KMG (Werth Videocheck® UA). Als taktile Sensor wurde ein „3D-Fasertaster“ mit einer Tastkugel von etwa 100 μm Durchmesser benutzt. Eine Tastkugel zur Bestimmung der Auslenkung ist an eine Glasfaser angeschmolzen. Während des Ab tastens des Profils wird die X/Y-Auslenkung der Tastkugel per Bildsensor erfasst und in die X/Y-Auslenkung der Tastkugel umgerechnet. Die Faser hängt an einer sehr weichen Feder, deren Z-Auslenkung mithilfe eines optischen Abstandssensors ebenfalls in Echtzeit detektiert wird. Durch das gleichzeitige Erfassen der drei Auslenkungen und der Maschinenkoordinaten wird eine dynamische Profilmessung ermöglicht. Durch die kleinen Federkonstanten der Aufhängung und der Faser bleibt die Antastkraft im Bereich weniger 10 μN . Die in Bild 7 dargestellte Messung wurde mit einer Scangeschwindigkeit von 30 $\mu\text{m/s}$ durchgeführt. Der Prüfkörper wurde ausschließlich seitwärts angetastet, so dass im Wesentlichen nur eine Auslenkung des Tastelementes in X-/Y-Richtung stattfindet.

³ Das x %-Perzentil ist der Wert einer Menge, bei dem x % der Anzahl der Einträge minus eins kleiner sind und 100 % - x % größer. Ist die Anzahl der Einträge gerade, wird sinngemäß zwischen dem nächstkleineren und nächstgrößeren Wert gemittelt. Das heißt, sortiert man die 100 Werte der Größe nach, so ist das 50 % Perzentil der Mittelwert aus dem 50. und 51. Wert.

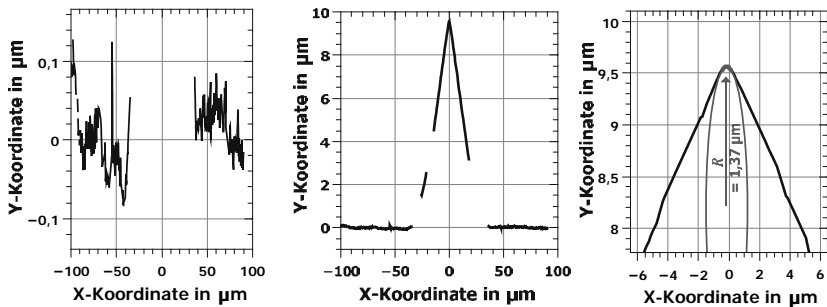


Bild 7: Taktile Messung eines scharfen Grates mit 3D-Fasertaster an einem Multisensor-KMG. Die Basislinie der gesamten Messung (Mitte) ist links vergrößert dargestellt, die abgerundete Spitze mit eingepasstem Kreis rechts.

Die Berechnung der dargestellten Oberflächenkontur wird mit einer eigens entwickelten Software ausgeführt, die auch statistische Überlegungen zum Stick-Slip-Verhalten berücksichtigt. Kernstück ist eine morphologische Filterung, die aus den (aus Maschinenposition und Auslenkung berechneten) Kugelmittelpunktskoordinaten die Oberflächenpunkte rekonstruiert. In Bild 7, Mitte, ist bereits implizit eine Aussage über die Unsicherheit der einzelnen Messpunkte enthalten, indem Punkte mit deutlich erhöhter Unsicherheit ausgelassen wurden: Konturpunkte, die von der Tastkugel nicht berührt werden können, treten in der Rekonstruktion nicht oder nur bei großer Streuung auf. Die optische Messung, die in Bild 5 dargestellt ist (X-Koordinate gespiegelt), zeigt, dass in der linken Flanke des Profils eine Schulter vorhanden ist, die mit der Tastkugel berührt werden kann, die Kehlungen daneben hingegen nicht.

Die Kalibrierung der Spitze der dargestellten Kontur ergab einen Krümmungsradius von $1,7 \mu\text{m}$, die Kreiseinpassung in die taktilen Messpunkte ergibt einen Radius von $1,37 \mu\text{m}$. Um eine statistische Aussage über das Ergebnis und über die Strukturauflösung machen zu können, bedarf es weiterer Messungen. Durch die Faltung mit einem Gaußprofil kann ein Profil nur abflachen (vergleiche Gleichung 1). Ggfs. muss die Theorie auch erweitert werden, um den Fall des „Nachschärfens“ von Konturen beschreiben zu können. Bei der taktilen Messung kann dies z.B. durch eine Abweichung vom angenommenen Tastkugelradius herbeigeführt werden.

5. Zusammenfassung

Die Strukturauflösung in der Koordinatenmesstechnik ist bisher noch nicht normativ zufriedenstellend definiert. Es gibt in den technischen Regeln der Reihe VDI/VDE 2617 den Hinweis darauf, dass die Modulationstransferfunktion, die aus der linearen Systemtheorie stammt, eingesetzt werden könnte. Ein universelles Konzept, dass insbesondere die Vergleichbarkeit zwischen KMG mit verschiedenen Sensorprinzipien herstellen würde, ist nicht aufgezeigt. Dies wäre aber für eine einheitliche Angabe der Strukturauflösung, z.B. in der Normenreihe DIN EN ISO 10360, die die „Annahme- und Bestätigungsprüfung von Koordinatenmesssystemen“ definiert, wichtig.

Die PTB im Fachbereich Koordinatenmesstechnik hat ein Konzept zur Bestimmung einer Strukturauflösung entwickelt und vorgestellt, das auf lokaler Krümmung basiert und beschreibt, wie sie der Messprozess verändert. Dabei wird die Modulationstransferfunktion als Kleinsignalnäherung verstanden. Eine Realisierung der Bestimmung der Strukturauflösung beruht auf der Radiusmessung an stumpfwinkligen abgerundeten „Schneidkanten“ und ergibt eine Länge, die der Breite eines gauß'schen Faltungskernes entspricht.

Es wurden bereits Prototypen eines Normals hergestellt, auf das zylindersymmetrisch ein Profil mit verrundeten Kerben und Graten eingearbeitet wurde. An diesem konnten Radiusbestimmungen mit optischen und taktilen Messgeräten und einem Computertomographen durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind konsistent und plausibel. Die mit dem neuen Verfahren in 3D bestimmte Strukturauflösung optischer Messgeräte ist dabei deutlich geringer als die optische Auflösung von Grauwerten in der Ebene. Dennoch ist weitere wissenschaftliche Diskussion nötig, um Messbarkeitskriterien, die z.B. ein Wiederholbarkeitskriterium sein können, in das Konzept zu integrieren. Erste Untersuchungen wurden bereits in [12] veröffentlicht.

Derzeit wird daran gearbeitet zu prüfen, inwiefern auch leichter herzustellende Normale eingesetzt werden können und wie andere Verfahren in Übereinstimmung zu bringen sind. Nach erfolgreicher Forschungsarbeit in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen soll dann dieses Konzept zunächst in die deutsche und dann in die internationale Normung eingebracht werden und dann gegebenenfalls auf benachbarte Bereiche übertragen werden.

Danksagung

Der Autor möchte den im eigenen Fachbereich beteiligten Kollegen für die kreative und offene Zusammenarbeit danken, der Fertigungstechnologie und Oberflächentechnologie der PTB für hervorragende Leistung bei der Planung und Fertigung der Prüfkörper, A. Felgner, T. Dziomba und J. Schlie für die Messungen am Konfokalmikroskop, Rasterkraftmikroskop und Multisensor-KMG.

Literatur

- [1] VDI/VDE 2617 Blatt 6.1:2007-05, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Sensoren für laterale Strukturen
- [2] VDI/VDE 2617 Blatt 6.2:2005-10, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Abstandssensoren
- [3] F. Torner et al., „Einfluss der physikalischen Eigenschaften optischer und taktiler Messeinrichtungen bei der Form- und Konturmessung“ VDI-Fachtagung Form- und Konturmesstechnik, 2013, S.13-25
- [4] F. Torner et al. „Vergleich taktiler und optischer Antastung“, VDI-Berichte 2243, 2014, S.55-72
- [5] VDI/VDE 2617 Blatt 13:2011-12; VDI/VDE 2630 Blatt 1.3:2011-12
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren - VDI/VDE 2630 Blatt 1.3: 2011, Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren
- [6] DIN EN 16016-3:2012-12, „Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie - Teil 3: Durchführung und Auswertung“, Deutsche Fassung EN 16016-3:2011
- [7] F.A. Arenhart, C.R. Baldo, T.L. Fernandes, G.D. Donatelli,
“Experimental Investigation of the Influencing Factors on the Structural Resolution for Dimensional Measurements with CT Systems”.
Proc. 6th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT), Wels, Austria, 2016

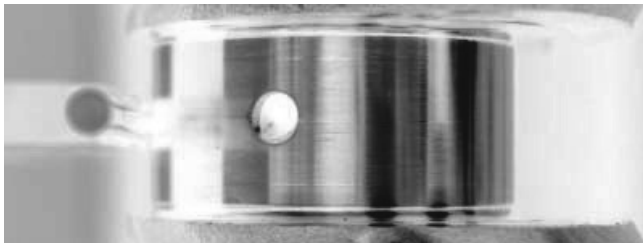
- [8] M. Fleßner et al. "Determination of metrological structural resolution of a CT system using the frequency response on surface structures", MacroScale 2014 - Recent developments in traceable dimensional measurements, doi>10.7795/810.20150223B, <http://www.macroscale.org>
- [9] Normenreihe DIN EN ISO 10360: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG)
- [10] J. Ille mann, M. Bartscher, O. Jusko, F. Härtig, U. Neuschaefer-Rube, K. Wendt, "Procedure and reference standard to determine the structural resolution in coordinate metrology.", Proc. of ISMTII 2013, the 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, 2013
- [11] U. Neuschaefer-Rube, J. Ille mann, M. Bartscher, F. Härtig, O. Jusko, K. Wendt, „Strukturauflösung in der berührungslosen Koordinatenmesstechnik“, *Inspect*, (2014), **2**, 56 – 58, <http://www.inspect-online.com/file/track/7073/1>
- [12] J. Ille mann, M. Bartscher, O. Jusko, F. Härtig, U. Neuschaefer-Rube, K. Wendt, „Procedure and reference standard to determine the structural resolution in coordinate metrology. *Measurement Science and Technology*: **25** (2014), 6, [dx.doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/064015](https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/064015)

Spektralanalyse auf unterbrochenen Profilen

Dr. Raimund Volk, M.Sc Lysann Megel,

Inhalt

- Exzentrische Ausrichtung des Werkstücks – Messfehler
- Grenzen der FFT-Auswertung – Ausblendungen
- Normung
- Ausblick



Exzentrizität

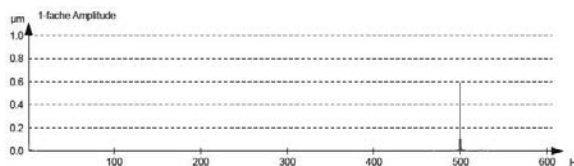
Exzentrizität

Szenarien für Exzentrizität

- Gerät = okay, Werkstück = exzentrisch
- ... umgekehrt
- beides exzentrisch

Testreihe

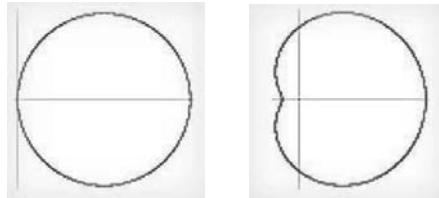
- Werkstück: Einwellennormal FN500
- Referenz: Exzentrizität = Null
- Versuch: Exzentrizität bis 200 μm



Exzentrizität

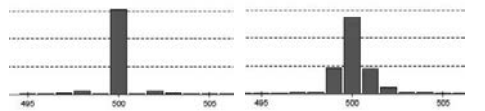
Exzentrizitätsfehler: RONT

- Limaçon
- $0,2 \mu\text{m}$ mehr bei $\varepsilon = 200 \mu\text{m}$ auf $\varnothing 80 \text{ mm}$



Exzentrizitätsfehler: Spektrum

- Frequenzverschiebung
- Amplitudenabsenkung
- Verbreiterung

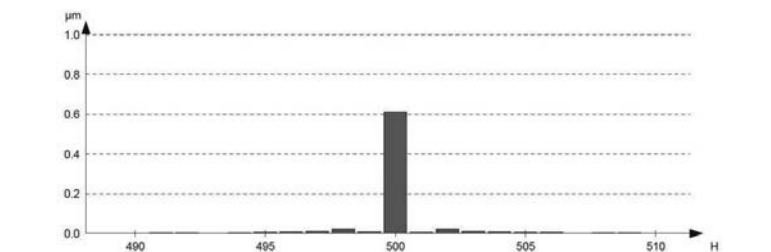


Exzentrizität

Einwellennormal – Exzentrizitätsreihe

- $\varepsilon = 0 \mu\text{m}$
- Amplitude = $0,610 \mu\text{m}$

0

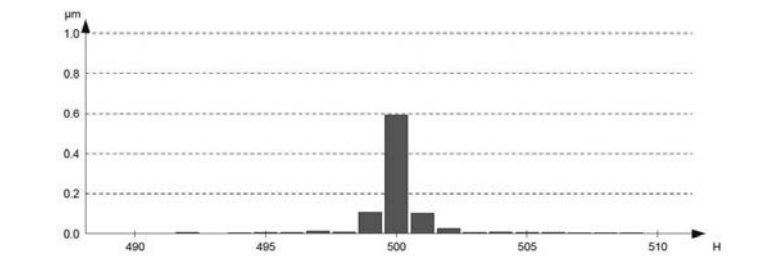


Exzentrizität

Einwellennormal – Exzentrizitätsreihe

- $\varepsilon = 25 \mu\text{m}$
- Amplitude = 0,592 μm

25

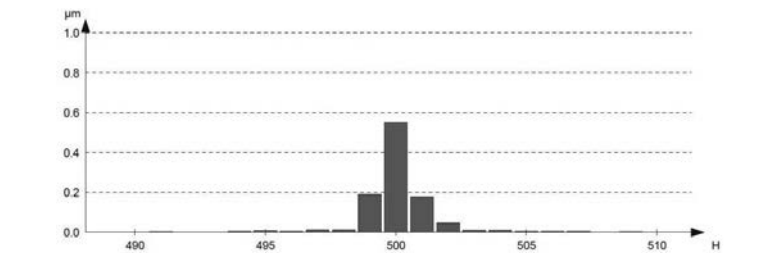


Exzentrizität

Einwellennormal – Exzentrizitätsreihe

- $\varepsilon = 50 \mu\text{m}$
- Amplitude = 0,549 μm

50

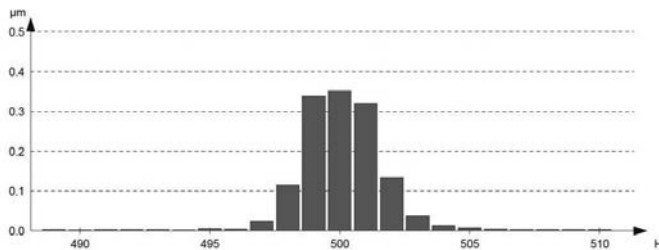


Exzentrizität

Einwellennormal – Exzentrizitätsreihe

- $\varepsilon = 100 \mu\text{m}$
- Amplitude = 0,351 μm

100

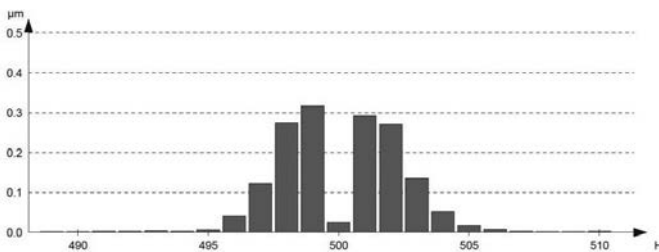


Exzentrizität

Einwellennormal – Exzentrizitätsreihe

- $\varepsilon = 200 \mu\text{m}$
- Amplitude = 0,025 μm

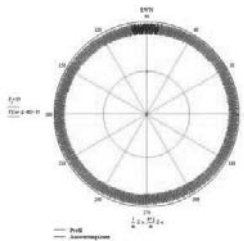
200



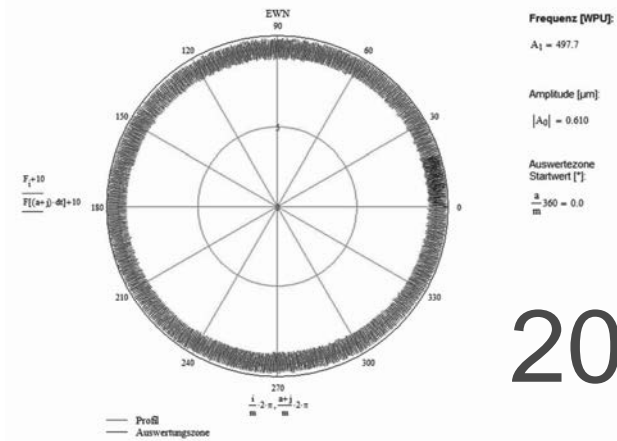
Exzentrizität

Einwellennormal – Sinusfit

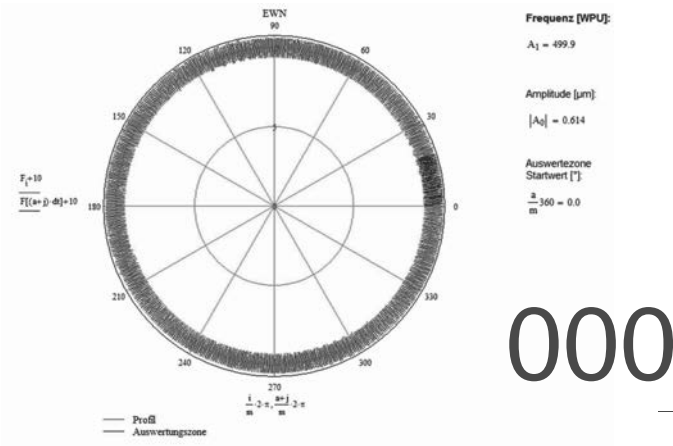
- Sinusfit fortlaufend an 5 % Zone
- Amplitude nahezu gleichbleibend
- Frequenz veränderlich



Exzentrizität



Exzentrizität



Unterbrochene Profile

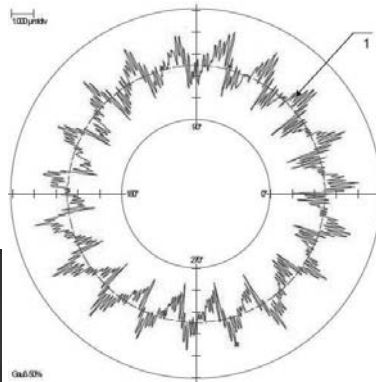
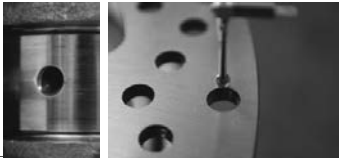
Unterbrochene Profile

Unterbrechungen – Beispiele

- 2 x 30° Ölbohrungen, simuliert (am Flansch)
- Bremsscheiben

Spektren

- FFT – Hamming-Fensterung
- Sinus-Fit



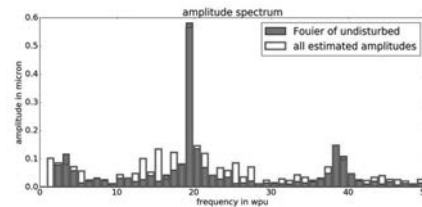
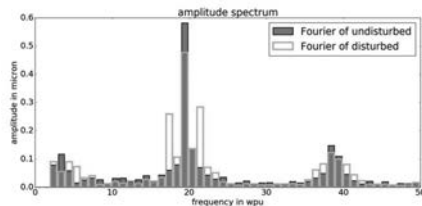
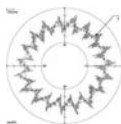
Unterbrochene Profile

FFT - Fensterung

- Hauptlinie kleiner:
48 statt 58 µm
- Nebenlinien
- Verbreiterung

Sinus-Fit

- Hauptlinie nur wenig kleiner:
57 statt 58 µm
- Nebenlinien (teilweise selber als unsicher erkannt)

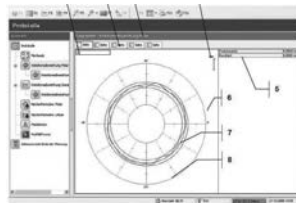
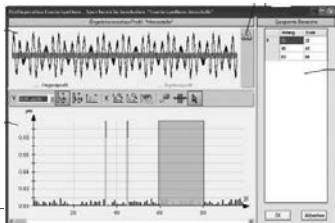


Normen

Normung – polar

Unterschiedlichste Erscheinungsformen

- FFT
- Rattermarken



Normung - linear

Unterschiedlichste Erscheinungsformen

- FFT
- Randzone – cos (tapered)

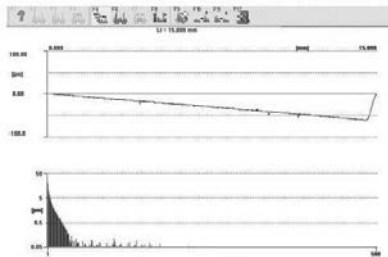


Bild 1-67: Fourier-Analyse mit Tapered-Funktion

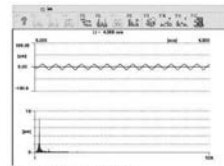


Bild 1-68: Fourier-Analyse - Amplitudenspektrum

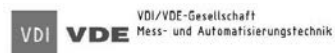
Normung – VDI 3.21 Form

VDI 3.21 Arbeitsgruppe

- Fachausschusses VDI/VDE-GMA FA 3.21 Formmesstechnik / DIN-NA152-03-02-13 UA Formprüfung:
- VDI/VDE: Arbeitsgruppe Form
- Nationales DIN- /ISO-Spiegelgremium
- Weitere Mitarbeiter willkommen

VDI/VDE 2631 Normenreihe

- Blatt 1 bis 10 „Formmesstechnik“
- Blatt 3 „Filter“
- Blatt 11 „Harmonische Analyse“



Normung – VDI 3.21 Form

Blatt 11 „Harmonische Analyse“

- Fourieranalyse an Formmessungen
- Neue Verfahren
- Vereinheitlichung
- Dominante Welligkeit [VDA 2007]
- ...

Zusammenfassung

Harmonische Analyse

- Geschlossene Profile lassen sich weitgehend widerspruchsfrei auswerten
- Begriffsvielfalt bei den Methoden und Parametern
- Unterbrochene Profile reagieren sehr stark auf unterschiedliche harmonische Analysemethoden
- Alternativen zur FFT ergeben teilweise funktionsgerechtere Ergebnisse

Ausblick

- Normung für die harmonische Analyse beim VDI 3.21 in Arbeit
- Neue harmonische Analyseverfahren sollten erprobt werden
- Morphologische Korrektur der Antastkugel

Anwendung der harmonischen Analyse in der Wälzlagerfertigung

Dipl.-Ing. **Michael Hutzler**,
Schaeffler Technologies AG &Co. KG, Herzogenaurach

Kurzfassung

Die Anforderungen an Wälzlager bezüglich des erzeugten Geräuschs haben sich stetig erhöht. Das hat zur Folge, dass auch die geometrischen Anforderungen hinsichtlich Welligkeit der Einzelkomponenten stetig gewachsen sind. Neben der Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie, um solche Bauteile produzieren zu können, hat sich hierbei auch die Prüftechnik entsprechend verändert.

Dieser Bericht beinhaltet die Vorstellung verschiedener Prüfmethoden sowie den Einsatz der harmonischen Analyse zur Detektion von Welligkeiten an Wälzlagerkomponenten. Ebenso wird ein Ausblick gegeben, wie sich die Prüftechnik für diese Merkmale weiterentwickeln wird.

1. Einleitung

Laufgeräusche von Wälzlagern werden maßgeblich von Geometrie, Oberflächen und Schmierung des Lagers bestimmt. In diesem Artikel soll auf den Einfluss der Welligkeit von Lagerkomponenten sowie die Möglichkeiten, diese im Produktionsprozess zu detektieren, eingegangen werden.

Ausgeprägte Welligkeit, wie in Bild 1 dargestellt, führt zu einer harmonischen Anregung des Lagers, die sich wiederum als störendes Geräusch auswirkt. Dabei wird nicht so sehr das breitbandige Geräuschverhalten verändert, das sich als allgemeiner Geräuschpegel (umgangssprachlich die Lautstärke des Lagers) zeigt. Vielmehr führt eine solche Welligkeit zu einem Ton, der unter Umständen durch Modulationen als an- und abschwellend und damit als sehr störend empfunden wird. Modulationen werden abhängig vom ursächlich drehenden Bauteil durch die Veränderung des Übertragungspfades erzeugt

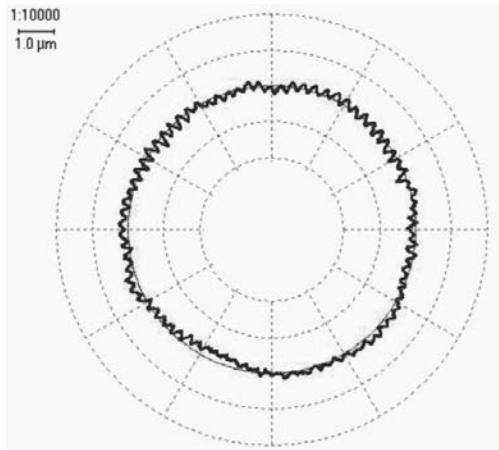


Bild 1: Rundheitsschrieb eines welligen Bauteils

Welligkeit ist hierbei eine annähernd periodisch wiederkehrende Gestaltabweichung des Bauteils. Es können verschiedene Arten von Welligkeiten unterschieden werden:

- Umfangswelligkeit an einem Kreisprofil (Bild 2)
- Längswelligkeit an einem linearen Profil (Bild 3)
- Kurvenwelligkeit an einem beliebigen Kurvenprofil (Bild 4)

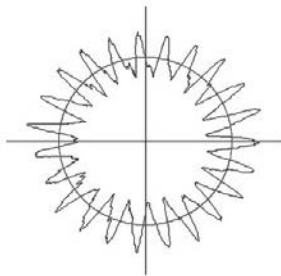


Bild 2: Umfangswelligkeit



Bild 3: Längswelligkeit

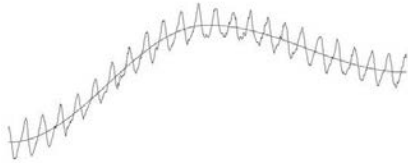


Bild 4: Kurvenwelligkeit

2. Entstehung der Welligkeit

Im Herstellprozess von Wälzlagerkomponenten (Innenring, Außenring, Wälzkörper) entstehen zeitlich veränderliche äußere und innere Kräfte, die die Werkzeugmaschinen verformen. Daraus ergibt sich eine Beeinflussung der Fertigungsgenauigkeit durch Relativbewegungen an der Bearbeitungsstelle. Weiterhin wird der Leistungsbereich der Maschine durch dynamische Störungen eingeschränkt. Diese dynamischen Störungen führen zu Schwingungen an der Maschine, die häufig Ursache für Welligkeiten an den Bauteilen sind.

Folgende Arten von Schwingungen an Werkzeugmaschinen können hierbei unterschieden werden:

- freie Schwingungen
- fremderregte Schwingungen
- selbsterregte Schwingungen

Freie Schwingungen entstehen nach anfänglicher Anregung. Diese Anregung ist oft impulsartig und breitbandig und führt zu gedämpften Schwingungen in der Eigenfrequenz der Maschine. Anregungsquellen können hier z.B. Staplerverkehr oder Pressen sein. Die äußeren Ursachen für freie Schwingungen lassen sich meist durch technische oder organisatorische Maßnahmen abstellen.

Fremderregte Schwingungen können durch eine Kraft- oder eine Weganregung entstehen. Die Auswirkungen auf die Werkzeugmaschine hängen von der Schwingungsfähigkeit (Eigenverhalten) der Maschine ab.

Typische Anregungsquellen sind:

- Unwucht
- Fluchtungsfehler
- Druckschwankungen in der Hydraulik

- Zahneingriffsfehler in Getrieben
- Lagerschäden
- Werkzeugeingriff
- wellige Bezugsflächen

Viele dieser Ursachen können durch technische Maßnahmen meist beseitigt werden, was zu einer Vermeidung der fremderregten Schwingungen führt.

Selbsterregte Schwingungen werden durch den Bearbeitungsprozess selbst hervorgerufen. Abhilfe ist im Regelfall durch eine Änderung der Prozessparameter möglich. Auch eine gezielte Versteifung der Werkzeugmaschine und dadurch ein geändertes Verhalten bzgl. Eigenfrequenzen kann oft selbsterregte Schwingungen verhindern.



Bild 5: Beispiel einer welligen Oberfläche beim Rundschleifen

3. Auswirkungen von Welligkeit

Welligkeiten auf Wälzlagerkomponenten können im Einbaufall zu fremderregten Schwingungen führen, die wiederum ein erhöhtes Geräuschniveau nach sich ziehen. Dabei ist die Erhöhung des Geräuschniveaus von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängig, z.B. der Eigenfrequenz der umgebenden Konstruktion, der Steifigkeit, aber auch der Komponente, an der die Welligkeit auftritt. Den größten Einfluss haben hierbei üblicherweise die Wälzkörper, dann der drehende Ring und zuletzt der stehende Ring.

Bild 6 zeigt das Schwingungsverhalten eines Lagers mit welligen Rollen (rote Linie) bzw. ohne wellige Rollen (grüne Linien).

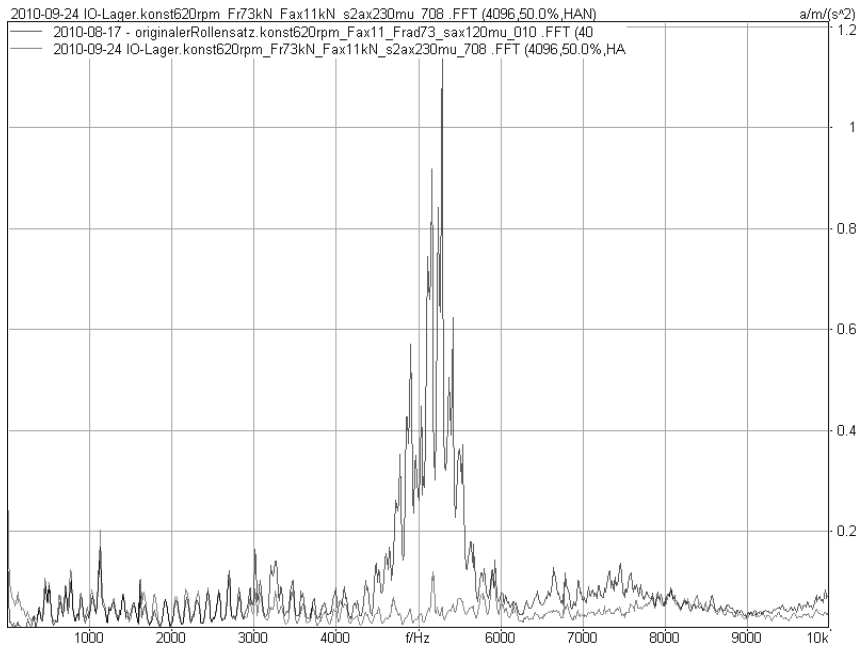


Bild 6: Einfluss der Wälzkörper auf das Schwingungsverhalten eines Lagers

4. Prüfung von Bauteilen auf Welligkeit

Die bei Schaeffler am häufigsten vorkommende Welligkeit ist die Umfangswelligkeit an Kreisprofilen. Grund hierfür ist die Geometrie der Wälzlager. Die Umfangswelligkeiten können dabei an radialen Kreisprofilen (alle radialen Lager) oder axialen Kreisprofilen (Axiallager) auftreten (Bild 7).

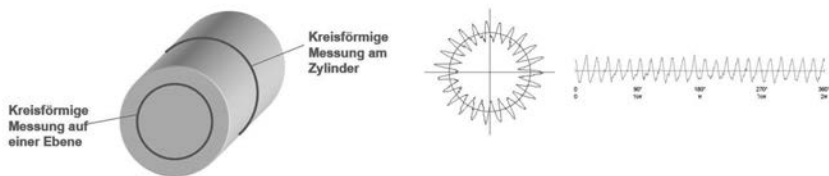


Bild 7: Welligkeitsprüfung an Kreisprofilen

Zur Prüfung der Bauteile auf Welligkeit werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Hierbei entscheidet der Einsatzfall darüber, welches Verfahren verwendet wird.

- Messung der manuellen statischen Welligkeit

Hierbei handelt es sich um eine manuelle Messung, die fertigungsnah eingesetzt werden kann. Das Messprinzip ist in Bild 8 dargestellt.

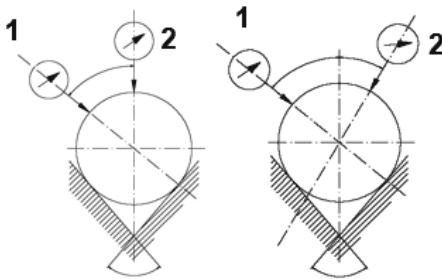


Bild 8: Manuelle statische Welligkeit

Die Messung wird vorzugsweise mit Taster 2 durchgeführt. Ausgewertet wird die Anzeigedifferenz (Spannweite Max – Min). Bedingung für den Einsatz dieses Verfahrens ist die Grenzwertermittlung sowie stichprobenartige Gegenmessung mit einem höherwertigen Verfahren (z.B. harmonische Analyse). Im manuell noch handhabbaren Durchmesserbereich sind allerdings Wellenanzahlen > 25 W/U nicht mehr eindeutig erkennbar.

- Rundheitsmessung

Durch Einsatz geeigneter Filter sowie optional zusätzlicher Einschränkungen bei der Auswertung kann auch aus einer Rundheitsmessung auf mögliche Welligkeiten am Bauteil geschlossen werden.

Hierbei kommt ein Bandpass-Filter zum Einsatz, z.B. mit den Grenzwellenlängen 15 – 500 W/U. Abhängig von dem restlichen Formfehler wird die Rundheitsabweichung zum Referenzkreis nach MZC_i des gesamten Kreisprofils oder nur eines Ausschnitts bewertet (Bild 9).

Zusätzlich zur Bewertung der Rundheitsabweichung muß bei dieser Methode auch die Profilgrafik mit beurteilt werden, da Welligkeiten nicht immer am Messwert alleine erkennbar

sind. Weiterhin muß die Anwendung technologisch begründet sein, d.h. die zu erwartenden restliche Formfehler müssen technologiebedingt konstant bleiben.

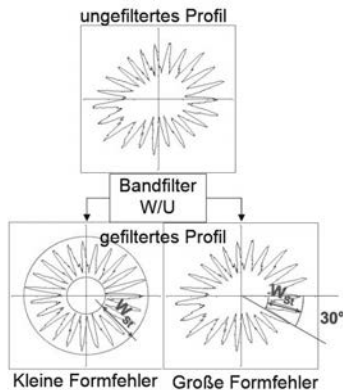


Bild 9: Statische Welligkeit

- Dynamische Welligkeitsmessung

Bei der dynamischen Welligkeitsmessung wird das Teil mit einer Bezugsdrehzahl von mehreren hundert bis über eintausend min^{-1} gedreht und dabei die Oberfläche mit einem Taster erfasst (Bild 10)

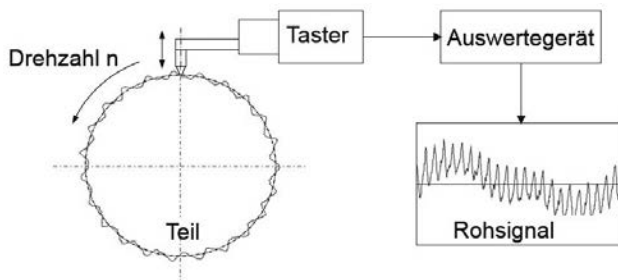


Bild 10: Dynamische Welligkeit

Durch eine spektrale Analyse erhält man die Verteilung der Tastergeschwindigkeit über die Harmonischen. Dieses Spektrum kann entsprechend bewertet werden. Nachteil an dieser Methode ist, dass Welligkeiten $> 250 \text{ W/U}$ nicht mehr eindeutig detektiert werden können.

Außerdem ist ein Einsatz an großen Bauteilen aufgrund der hohen notwendigen Umdrehungszahl nicht mehr trivial umsetzbar.

- Harmonische Analyse

Die harmonische Analyse basiert auf einer Rundheitsmessung an Standard-Formprüfgeräten. Durch entsprechende Software-Module wird am Kreisprofil eine Spektralanalyse durchgeführt. Als Ergebnis erhält man für die einzelnen Harmonischen die Amplituden bzw. Wellentiefen (Bild 11)

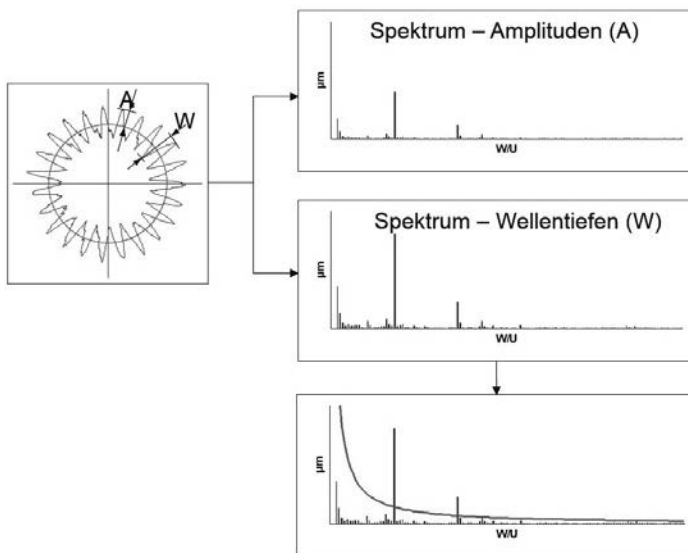


Bild 11: Harmonische Analyse

Bauform- und technologieabhängig lassen sich Grenzkurven definieren. Werden diese Grenzen eingehalten ist davon auszugehen, dass die gemessenen Bauteile keine Geräuschauffälligkeiten zeigen.

Aufgrund der sehr kleinen Toleranzen im höheren Frequenzbereich sind die Anforderungen an die Prüftechnik allerdings deutlich höher als bei reinen Rundheitsauswertungen, da die Frequenzbereiche einzeln bewertet werden und nicht das aufsummierte Signal.

Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den Einfluss von Schwingungsanregungen aus der Umgebung des Messgeräts zu richten. Das können über den Boden übertragene Vibrationen sein, ebenso aber auch Störungen durch Luftbewegungen. Nicht zuletzt spielt natürlich auch die Stabilität des Messgeräts als solches eine Rolle.

Weiterhin sind für den Eignungsnachweis eines Messgeräts erweiterte Anforderungen zu stellen. Die Standardspezifikationen der Messgerätehersteller sind hierzu nicht ausreichend, da im Regelfall die Rundheitsabweichungen der Spindeln mit den Filtereinstellungen 15 W/U bzw. 50 W/U spezifiziert sind.

Ebenfalls wichtig ist die Überprüfung, ob nach der harmonischen Analyse die Amplituden der einzelnen Harmonischen richtig berechnet wurden. Ursache für Fehler sind hier häufig mechanische Ausrichtungsprobleme des Winkelgebers an der Spindel. Zur Überprüfung kann ein Mehrwellennormal mit bekannten Amplituden bei einzelnen Harmonischen verwendet werden.

5. Ausblick

Um den Einfluss einzelner Wälzlagerkomponenten auf das Geräuschverhalten des Lagers hinsichtlich der Welligkeit noch besser beurteilen zu können, ist das Geschwindigkeits-Spektrum gegenüber dem Weg-Spektrum zu bevorzugen. Die Ergebnisse aus der harmonischen Analyse lassen sich hierbei problemlos anhand einer vorzuziehenden Bezugsdrehzahl umrechnen.

Allerdings sind die im Abschnitt 4 dargelegten Anforderungen an die Prüftechnik noch kritischer zu betrachten, da durch die Umrechnung in das Geschwindigkeits-Spektrum gerade die Anteile höherer Harmonischer stärker gewichtet werden. Da diese Bereiche bereits bei der harmonischen Analyse die kritischsten sind, sind vor einer flächendeckenden Einführung dieser Auswertemethode noch Untersuchungen zur Eignung der Formprüfgeräte durchzuführen. Evtl. daraus abzuleitende Maßnahmen wären dann noch umzusetzen.

Software-Normale und Referenzsoftware für Filterung nach ISO 16610

Dr. habil. **Dorothee Hüser**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Kurzfassung

Unterschiedliche Gestaltsanteile an Werkstücken werden durch entsprechende mathematische Operationen voneinander separiert. Für die verschiedenen Gestaltsanteile gibt es entsprechende Modelle. Zu Formen und Konturen gibt es anwendungsspezifische Geometrien. Welligkeit und Rauheit werden mittels Tiefpassfilter voneinander separiert. Die Spezifikation der Filterverfahren ist genormt (ISO 16610), um eine Vergleichbarkeit der statistischen Kenngrößen, über die die Welligkeit und die Rauheit charakterisiert werden, zu erzielen. Für eine zuverlässige Vergleichbarkeit ist es erforderlich, dass die Auswerteverfahren unterschiedlicher Gerätehersteller dieselben mathematischen Algorithmen enthalten. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Softwaretests in der Rauheitsmesstechnik gegeben. Ferner wird skizziert, welche Filterverfahren zur Trennung von Gestaltsanteilen genormt sind und welche Charakteristik die unterschiedlichen Filter aufweisen.

Abstract

Different shape components of a workpiece are separated by appropriate mathematical procedures accordingly. There exist different models for the various trends. Forms and contours are parameterized by geometric models according to their application. Waviness and roughness are detrended by lowpass filtration. The specification of the lowpass filters is standardized (ISO 16610). A reliable compatibility requires that the analysis procedures of different manufactures employ the same mathematical algorithms. In the following, a short review on software testing in roughness metrology is given. Furthermore, it will be outlined, which filtration procedures are standardized and which characteristics the differing filters have.

1. Einleitung

Zur dimensionellen Charakterisierung von Werkstückgeometrien gehört die wohldefinierte Trennung unterschiedlicher Gestaltsanteile. Die Form von Flächen und Konturen ist zu separieren von Ebenheits- und Geradheitsabweichungen oder von Rundheitsabweichungen. Merkmale, die hinsichtlich geometrisch determinierter Formen als Abweichung betrachtet werden, sind Texturen auf der Oberfläche eines Objektes, die in der Rauheitsmesstechnik gemäß ihrer Größe aufgeteilt werden in Welligkeit und Rauheit. Die Topographie wird nach den spektralen Anteilen des Ortsfrequenzspektrums unterteilt. Im Bereich der dimensionellen Messtechnik dient der sogenannte Formoperator zur Trennung zwischen Form und Welligkeit, der die Trennung an der Ortswellenlänge λ_f vornimmt. Der Formoperator richtet sich nach der Anwendung und wird bei geometrisch spezifizierten Werkstücken durch das entsprechende Geometriemodell definiert. Bei gemessenen Ausschnitten auf der Oberfläche eines Werkstücks ohne konkret festgelegter Geometrie werden vielfach Polynome (Gerade, Parabel und ggf auch Polynome höherer Ordnung) oder Tiefpassfilter wie Gauß oder glättender Spline verwendet. Diese Tiefpassfilter, insbesondere das Gaußfilter, werden für die Trennung von Welligkeit und Rauheit an der Ortswellenlänge λ_c (auch mit L_c gekennzeichnet) verwendet, sowie für das Abtrennen hochfrequenter Anteile an der Ortswellenlänge λ_s (auch mit L_s gekennzeichnet). Die genannten Ortswellenlängen bilden die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Anteilen an der Gestalt bzw. Topographie einer Oberfläche und werden in diesem Kontext deshalb auch Grenzwellenlänge genannt (für den Allgemeinfall im Folgenden λ_g bezeichnet). Das Gaußfilter ist im Unterschied zu Filtern, die sich durch einfache analoge Schaltungen realisieren lassen, phasenkorrekt. Ein Erhalt der Phase bei einer relativ breitbandigen Übertragung eines Signal lässt sich mit analogen Schaltungen nur näherungsweise realisieren. Im Rahmen der Digitalisierung wurde vor zwei Jahrzehnten ein Filter eingeführt, dessen Übertragungsfunktion phasenerhaltend und an der Grenze eine 50% Dämpfung hat. Seine Übertragungsfunktion ist wie folgt definiert

$$H(\lambda) = 2^{-(\lambda_g/\lambda)^2}$$

und als ISO 11562 genormt (das Symbol \wedge bedeutet Exponent – also 2 hoch minus dem Quadrat von (λ_g/λ)).

Während der letzten Jahre wurden die Normen für die Rauheitsmesstechnik überarbeitet. Die Normen zur Filterung haben jetzt alle die Nummer 16610 und bieten eine Serie von Filtern, die in unterschiedlichen Teilen der ISO-Norm 16610 spezifiziert sind. Der Teil, der das phasenkorrekte Gauß spezifiziert, hat die Nummer ISO 16610-21 für Profile und 16610-61

für flächenhafte Topographiedaten. Die Norm ISO 16610-21 löst die Norm ISO 11562 ab. Als Ergänzung ist in Teil -28 die Möglichkeit hinzugekommen, die Endeffekte, die bei Filterung offener Profile auftreten, zu minimieren.

Als Alternative zur Tiefpassfilterung mit einem Gaußkern wird in der Normenreihe unter der Nummer ISO 16610-22 ein glättender Spline spezifiziert. Er ist dort so beschrieben, dass er wie das Gaußfilter für äquidistante Stützstellen gilt. Er lässt sich aber auf einfache Weise für nichtäquidistante Stützstellen umschreiben, was ihn für die Form- und Konturmesstechnik interessant macht.

Um eine stabile Möglichkeit zur Filterung von funktionalen Flächen, also beispielsweise solche mit ausgeprägten Furchen zur Aufnahme von Schmieröl oder Näpfchen für Beschichtungsmaterial, zu erhalten, wurde die Möglichkeit definiert, robuste Filter zu verwenden. Diese sollen das in ISO 13565-1 definierte Verfahren ablösen, bei dem das phasenkorrekte Gaußfilter nur noch genau ein weiteres Mal, und zwar auf die Rauheitsasperitäten oberhalb der Welligkeit, angewendet wird. Die robuste Filterung ist in den Teilen -30 und -31 definiert. In ISO 16610-30 werden mehrere robuste Schätzer vorgeschlagen, darunter die Tukey'sche Gewichtsfunktion als M-Schätzer und die Verwendung des Medians der Residuen zum vollständigen Unterdrücken weit außerhalb liegender Werte. Die Tukey'sche Gewichtsfunktion wird für die robuste Filterung mit Regressionsgauß in ISO 16610-31 verwendet.

Die genannten Filter beziehen sich auf einzelne Profilschans. Die Erweiterung auf flächenhafte Messungen, wie sie vor allem von optischen Geräten geliefert werden, wird in den Teilen mit den Nummern 60 und aufwärts geliefert. Ferner liefert die Serie der neueren Filternormen ISO 16610 Spezifikationen zur morphologischen Filterung. Dies sind Filter, die dazu dienen, einzelne Merkmale definierter Größenordnung zu extrahieren.

Die genannten Normen definieren den Filterkern und damit die Übertragungsfunktion des jeweiligen Tiefpassfilters. Sie spezifizieren jedoch keine konkrete numerische Implementierung. Auch bei den Normen zur Rauheitsmesstechnik, die die statistischen Kenngrößen zur Charakterisierung von Oberflächentexturen definieren, gibt es Interpretationsspielraum. Zu Beginn der neunziger Jahre haben deshalb metrologische Staatsinstitute in Kooperation mit der Industrie angefangen, für die dimensionelle Messtechnik Softwaretests durchzuführen.

2. Softwarenormale

In der dimensionellen Messtechnik werden Messgeräte oft dadurch miteinander verglichen, dass definierte Messobjekte als Maßverkörperungen (Prüfkörper) gemessen werden. Die

von einem Gerät gelieferten Ergebnisse sind dabei im allgemeinen nicht die Signale, die unmittelbar von der Sensorik gewonnen werden, sondern Werte, die vom Hostrechner, mit dem das Gerät bedient wird, berechnet werden. Die Berechnungen können auf komplexeren Verfahren und numerischen Algorithmen basieren. Für eine Bewertung, welche Differenzen zwischen verschiedenen Geräten aus dem Messprozess und den Einflüssen auf das Gerät und welche Differenzen aus den Berechnungsverfahren resultieren, müssen Gerät und Berechnungsverfahren entkoppelt getestet werden. Wie in Bild 1 skizziert werden Geräte anhand eines identischen Messobjekts verglichen und ihre Berechnungsverfahren anhand von identischen Testdaten.

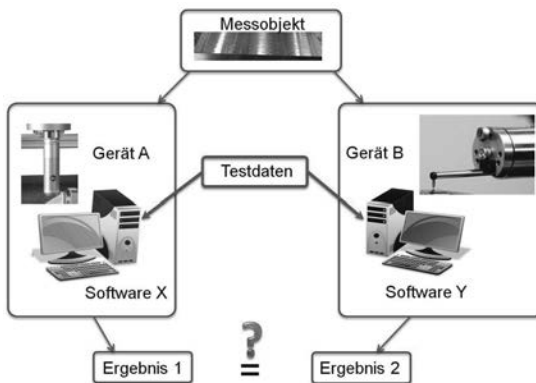


Bild 1: Vergleich von Messgeräten anhand von identischem Messobjekt, der Maßverkörperung und anhand von identischen Testdaten

Die Bewertung von Berechnungsverfahren beinhaltet zwei Komponenten [1]

- (1) die Qualität der mathematischen Modelle und Algorithmen und
- (2) die Qualität ihrer numerischen Implementierung.

Zur Überprüfung von Software in der Fertigungsmesstechnik wurden bereits zu Beginn der neunziger Jahren Ringvergleiche durchgeführt, die darin bestanden, bestimmte Datensätze auszutauschen und die daraus gewonnen Auswerteergebnisse miteinander zu vergleichen, sowohl in der Koordinatenmesstechnik als auch in der Rauheitsmesstechnik. Internationale Projekte und ein von der EU-Organisation EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) gefördertes Verbundprojekt unter dem Titel „*Traceability for Computationally-Intensive Metrology*“, kurz *TraCIM*, haben dazu gedient, geeignete Testdatensätze zu entwickeln und anhand derer dann Softwaretests als Dienstleistung anzubieten. *TraCIM* wird

über ein Nachfolgeprojekt weiter geführt. In der Reihe der Normen zur geometrischen Produktspezifikation ist definiert, dass Testdaten als Maßverkörperungen gelten können, und sogar Implementierungen der Berechnungsverfahren, die gewissen Anforderungen genügen müssen. Testdatensätze werden dort Softwarenormale (engl. *soft gauges*) oder Referenzdatensätze genannt. Für die Rauheitsmesstechnik sind dies die Normen ISO 5436-2 und ISO 25178-71. Die Norm ISO 5436 ist eine zweiteilige Norm, die Maßverkörperungen für die auf Einzelprofile basierende Messung von Rauheit und Welligkeit, spezifiziert, in Teil 1 die physikalischen Prüfkörper und in Teil 2 die softwaremäßigen. Die Normenreihe ISO 25178 besteht aus sehr vielen Teilen für die flächenhaft messenden Verfahren der Rauheitsmesstechnik, bei der in Teil 71 spezifiziert ist, was Softwarenormale sind. Referenzdatensätze werden in den Normen ISO 5436-2 und 25178-71 Normale vom Typ F1 bezeichnet und Referenzanalysesoftware wird Normal vom Typ F2 bezeichnet.

Die Anforderung an einen Referenzdatensatz ist, dass das Ergebnis der daraus zu berechnenden Parameter genau bekannt sein muss. Das kann dadurch erreicht werden, dass die Referenzdaten eine direkte analytische Berechnung zulassen und keinen statistischen Schwankungen unterliegen, für die numerische Optimierungsverfahren oder dergleichen erforderlich wären. Das kann auch dadurch erreicht werden, dass die Statistik der Daten wohl bekannt ist und dass eine Analyse mit deutlich höherer Maschinengenauigkeit durchgeführt und als Referenz definiert wurde als bei der Gleitkommaarithmetik der gängigen Rechentechnik.

Die Anforderungen an eine Analysesoftware, die als Referenz gilt, sind höher als bei den Datensätzen. Die Software selbst muss ihrerseits sehr sorgfältig getestet worden sein. Bei der Implementierung mathematischer Verfahren als Computerprogramme ist darauf zu achten, wie sich die endliche Maschinengenauigkeit auswirkt. Rundungsfehler und Fehler durch Überschreitung der Größe der Zahlendarstellung, also maximale Gleitkommazahl, und Auflösung der Gleitkommadarstellung sind dabei die Herausforderungen. Das Rechnen mit Gleitkommazahlen ist wie das Bewegen von Sandhaufen, wird ein Sandhaufen an einen anderen Platz gebracht, wird etwas Dreck mit dazugeschaufelt und etwas Sand geht verloren. Die Qualität der numerischen Umsetzung eines mathematischen Problems kann das Ergebnis beeinflussen, insbesondere wenn es sich um sehr große Datenmengen handelt.

Die Staatsinstitute der USA, also das NIST, Großbritanniens, also das NPL, und Deutschlands, also die PTB, bieten als Dienstleitung Software an, die als Referenzsoftware genutzt werden kann. Die Programme des NIST, *SMATS* genannt, und der PTB, *RPTB* genannt, sind ungefähr seit dem Jahr 2004 online erreichbar und können über das Internet interaktiv

genutzt werden, *SMATS* ist derzeit erreichbar über die URL <http://physics.nist.gov/VSC/jsp/> und *RPTB* über die URL <https://www.ptb.de/rptb>. Zu *SMATS* wurde 2006 ein Artikel veröffentlicht [2]. Das NIST bietet unter diesem Link sowohl eine Auswertung von Profilen als auch flächenhafter Scans an, die PTB bislang nur für Profildaten. Für die PTB-Software wurde im April 2015 ein Upgrade aufgespielt, bei dem Komponenten hinzugefügt wurden, die zum Zeitpunkt der VDI-Fachtagung Form und Kontur (Juni 2016) noch nicht durch Ringvergleiche und andere Tests validiert wurden waren. In der PTB wird eine flächenhafte Analysesoftware für den Onlinezugriff über das Internet entwickelt. Das NPL bietet seine Referenzsoftware zum Download an, damit der Nutzer sie lokal auf seiner Maschine laufen lassen kann. Sie läuft unter Java und der Downloadlink ist derzeit <http://resource.npl.co.uk/softgauges/install.htm>.

Die Programme der Staatsinstitute verwenden für die Filterung das 2RC und das Gaußfilter nach ISO 11562, die gleich der ISO 16610-21 ist. Bei *RPTB* wurde das 2RC-Filter vor einem Jahr entfernt. Bei den bisherigen Projekten zu Softwareringvergleichen für Profilauswertung [1] und Vergleichen für die Auswertung flächenhafter Scans [3], [4] in der Rauheitsmesstechnik wurden die statistischen Kennwerte der Profile der Rauheit, Welligkeit und des Primärprofils miteinander verglichen. Es wurden dabei jedoch nicht Ergebnisse zu Untersuchungen an den Profilen durch Vergleich der einzelnen Höhenwerte publiziert. Die Kennwertberechnung erfolgt ohne die Randbereiche der Profile, die eine Breite gemäß der ganzen oder halben Grenzwellenlänge des Filters haben. Die Gaußfilterung nach ISO 11562, die Gaußfilterung der oberen Asperitäten nach 13565-1, sowie die Kennwertberechnung nach ISO 4787 und nach ISO 13565-2 von *RPTB* wurden auf unterschiedliche Weise getestet und waren unter anderem auch an dem Ringvergleich [1] beteiligt, aber die Filter nach Teilen den 22, 28 und 31 der Norm ISO 16610 noch nicht. Sie sind zwar in die Software *RPTB* eingefügt, können aber noch nicht als Referenzsoftware angesehen werden! Die Welligkeits- und Rauheitsprofile werden von *SMATS* ohne die Randbereiche ausgegeben. Die verschiedenen Profile der unterschiedlichen Filterungsstufen bei *RPTB* können heruntergeladen werden, wenn der Nutzer sich den entsprechenden Download-Link freischalten lässt. Bereits im Jahr 2002 wurden Programme zur flächenhaften Analyse, die in einer Matlab-Umgebung liefen, zur Verfügung gestellt. Bei diesem Programmpaket werden die Randgebiete der Profile gemäß ISO 16610-28 nach einer Methode, die an der Universität Hannover [5] entwickelt wurde, behandelt. Das Paket wurde unter dem Namen *SCOUT* im Rahmen eines aus EU-Mitteln geförderten Verbundprojekts, an dem Partner aus der Automobil- und Stahlindustrie mit mehreren Universitäten beteiligt waren, zusammen gestellt und über einen Server der Uni-

versität Brunell verfügbar gemacht [6]. Nach Ende der Projektlaufzeit wurde es nicht weiter betreut und wegen der Inkompatibilität mit neueren Matlabversionen vom Netz genommen.

3. Die ISO 16610-Filteralgorithmen der Teile 22, 28 und 31

In Teil 22 der ISO-Normreihe 16610 wird ein glättender Spline definiert, bei dem der Regularisierungsparameter r eine Funktion der Grenzwellenlänge ist [7].

$$r(\lambda_c) = (1/2 \sin(\pi \Delta x / \lambda_c))^4$$

Das Splinefilter ist dort für äquidistante Stützstellen spezifiziert worden und sowohl für offene Profile als auch für geschlossenen Profile, die insbesondere für die Rundheitsmesstechnik relevant sind. Bislang wird es in der Rauheitsmesstechnik kaum verwendet. Für die Formmesstechnik ist es interessant, weil es sich sehr leicht für nicht-äquidistante Stützstellen umschreiben lässt. Für Stützstellenintervalle Δx , die sehr klein gegenüber der Größe der Grenzwellenlänge sind, d.h. für $\Delta x / \lambda_c$ klein, kann er nicht eingesetzt werden; denn der Sinus der kleinen Größe ist ebenso klein und die vierte Potenz kann ihn kleiner als die Maschinengenauigkeit des Rechners werden lassen und den Kehrwert zum Overflow bringen. Das Splinefilter enthält einen Spannungsparameter β , der beeinflusst, wie stark das Filter den Krümmungen, also der Gestalt der gemessenen Strukturen folgt. Wird er auf Null gesetzt, bleiben die Krümmungen im tiefpassgefilterten Signal erhalten, wird er auf den Wert 0,625242 gesetzt, bekommt das Signal eine dem gaußgefilterten sehr ähnliche Charakteristik [8]. Anhand zweier synthetisch gemäß den Gleichungen

$$\mathcal{A}(x) = 140 \sin(3,5 \pi x / L) + 10 \sin(104 \pi x / L) - 40 (x - 2)^2 \quad (1)$$

und

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(x) = & 50 \sin(9 \pi x / L) \\ & + 20 \sin(104 \pi x / L) - 420 \exp(-(1/2)((x - 2.7)/0.1)^2) \end{aligned} \quad (2)$$

erzeugten Profile, wird die Wirkungsweise der verschiedenen Filter veranschaulicht. Bild 2 zeigt den Unterschied des Welligkeitsprofils für $\beta = 0$ und $\beta = 0,625242$.

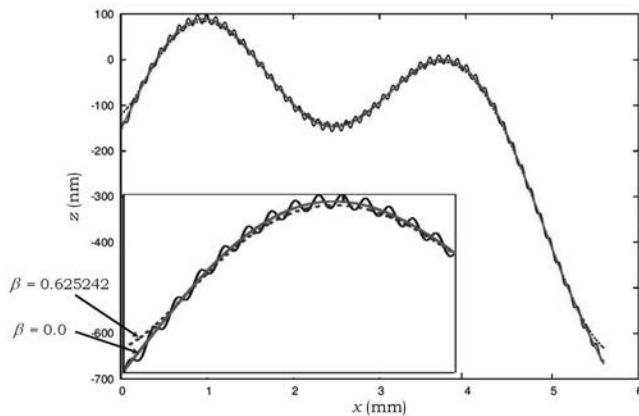


Bild 2: Synthetisch erzeugtes Profil nach Gl. (1) (schwarze durchgezogene Kurve) und mittels glättendem Spline berechnete Welligkeitsprofile. Für minimale Spannungsenergie des Spline, d.h. Spannungsparameter $\beta = 0$, folgt die Welligkeit der Gestalt (rote durchgezogene Kurve). Für $\beta = 0,625242$ wird die Übertragungscharakteristik an die des Gaußfilters mit an den Enden umgewichtetem Filterkern (äquivalent zum Regressionsgauß mit $p = 0$) angepasst (blaue gestrichelte Kurve).

In Teil 28 dieser Normenreihe werden die Filter mit gaußförmigem Faltungskern beschrieben, die dazu dienen, die Endeffekte offener Profile zu reduzieren. Diese sind Regressionsgaußfilter mit Regressionspolynomen nullten Grades (dem Mittelwert) und ersten Grades (der Geraden). Regressionsgaußfilter sind eine Kombination aus Savitzky-Golay-Filter und Gauß-Filter [5], [9].

Regressionsgaußfilter zweiten Grades und höher sorgen dafür, dass das tiefpassgefilterte Signal (für die Rauheitsmesstechnik mit L_c als Grenzwellenlänge dann das Welligkeitsprofil, in der Form- und Konturmesstechnik kann es das mit L_f abgetrennte Formprofil sein) die Ausprägung der Krümmungen besser erhält. Die Gestalt der Kontur bleibt erhalten. Bild 3 zeigt den Unterschied zwischen den Welligkeitsprofilen, dem Profil nach dem traditionellen Gaußfilter und den Profilen nach den beiden Regressionsfiltern für die beiden Polynomgrade $p = 0$ und $p = 1$.

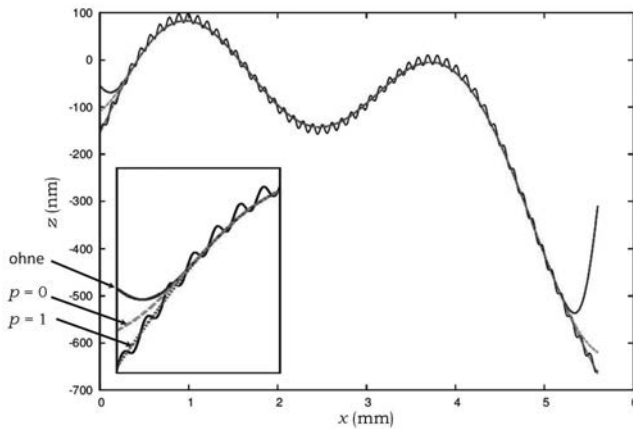


Bild 3: Synthetisch erzeugtes Profil nach Gl. (1) (schwarze durchgezogene Kurve) und mittels Gaußfilter nach ISO 16610-21 und Regressionsgaußfilter nach ISO 16610-28 berechnete Welligkeitsprofile. Die Filterung beim herkömmlichen Gaußfilter nach ISO 16610-21 bzw. ISO 11562 ist ohne Berücksichtigung der Verkürzung des Integrationskerns in den Randbereichen. Die daraus resultierende Welligkeit ist durch eine blaue, durchgezogene Kurve dargestellt. Wird der Verkürzung des Kerns an den Profilenden Rechnung getragen, indem auch der verkürzte Kern auf Eins normiert wird, erhält man das als grün gestrichelte Kurve eingezeichnete Welligkeitsprofil. Die mit roten kurzen Stricheln gezeichnete Kurve stellt das Welligkeitsprofil aus der Regressionsgaußfilterung mit Polynomgrad $p = 1$, also mit Regressionsgerade, dar.

Für die robuste Filterung wird in ISO 16610-31 spezifiziert, das Regressionsgaußfilter zweiter Ordnung zu verwenden und nur für tiefe Poren das Regressionsgaußfilter nullter Ordnung. In ISO 16610-30 wird dargelegt, welche robusten Schätzer möglich sind, unter anderem die Schätzung mit der L1-Norm in der zu optimierenden Zielfunktion und die Wahl eines M-Schätzers. Die Differenzen zwischen den aus den geschätzten Parametern resultierenden Werten und den Eingangswerten heißen in der Statistik Residuen. Das tiefpassgefilterte Signal ist das resultierende Signal (zB die Welligkeit) und das ursprüngliche Profil (zB das Primärprofil) ist das Eingangssignal. Dann bilden die Residuen das Rauheitsprofil. Bei linearen Filtern und bei *Least-Mean-Square*-Schätzungen, deren Optimierungsaufgabe linearisiert werden kann, erhält man die Lösung ohne Iterationsschritte. Mit dem Begriff M-Schätzer ist gemeint, dass die zu minimierende Summe der Quadrate der Residuen gewichtet wird mit einer Funktion, die von den Residuen einer vorangegangenen Schätzung abhängt. Als M-

Schätzer wird in der Norm ISO 16610-30 unter anderem die Tukey'sche Gewichtsfunktion genannt, die für die robuste Schätzung mit den Regressionsgaußfiltern in Teil -31 normativ ist.

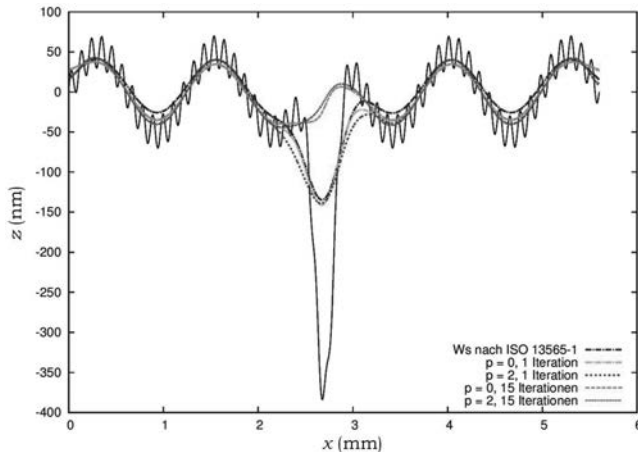


Bild 4: Synthetisch erzeugtes Profil nach Gl. (2) mit schwarzem, durchgezogenen Strich gezeichnet. Bei der Filterung nach ISO 13565-1 wird genau ein weiterer Schritt zum Abschneiden von Poren und Riefen vorgenommen, indem als Eingangsdaten für diese zweite Filterstufe die Asperitäten oberhalb des Welligkeitsprofils, verwendet werden, was zur mit dunkelblauer Strich-Punkt-Kurve gezeichneten Welligkeit führt. Es liegt überall ein Stück oberhalb der Talsohlen. Die türkise Strich-Punkt-Kurve zeigt die Welligkeiten nach genau einem Iterationsschritt für $p = 0$ und die violette gestrichelte Kurve für $p = 2$. Beide Kurven zeigen, dass sich nach einem Iterationsschritt die Welligkeit ähnlich tief in die Pore wie beim Sonderfilter nach ISO 13565-1 biegt. Nach genügend Iterationsschritten interpoliert die Welligkeit über die Pore hinweg (grüne gestrichelte und rote gepunktete Kurven). Die rote gepunktete Kurve ($p = 2$) zeigt ein ausgeprägteres Krümmungsverhalten.

Bei der Filterung nach ISO 13565-1 wird genau ein weiterer Schritt zum Abschneiden von Poren und Riefen vorgenommen, indem als Eingangsdaten für diese zweite Filterstufe die Asperitäten oberhalb des Welligkeitsprofils, verwendet werden. In den Bereichen mit Werten unterhalb der Welligkeit, werden die Werte des Welligkeitsprofils verwendet. Das resultierende Welligkeitsprofil ist in Bild 4 mit dunkelblauer Strich-Punkt-Kurve dargestellt. Es liegt überall ein Stück oberhalb der Talsohlen. Bei der robusten Filterung mit dem M-Schätzer werden die Residuen symmetrisch behandelt, so dass die Welligkeiten besser der der Profil-

gestalt folgen. Wenn hier ebenfalls genau nur ein Iterationsschritt erfolgt, biegt sich die Welligkeit ähnlich tief in die Pore wie beim Sonderfilter nach ISO 13565-1, wie es in Bild 4 als türkise Strich-Punkt-Kurve für $p = 0$ und violette gestrichelte Kurve für $p = 2$ gezeigt wird. Hier ist zu bedenken, dass es sich um einen praxisfernen, illustrativen Datensatz handelt. Nach genügend Iterationsschritten interpoliert die Welligkeit über die Pore oder den Graben hinweg (grüne gestrichelte und rote gepunktete Kurven). Die rote gepunktete Kurve ($p = 2$) weist ein ausgeprägteres Krümmungsverhalten auf.

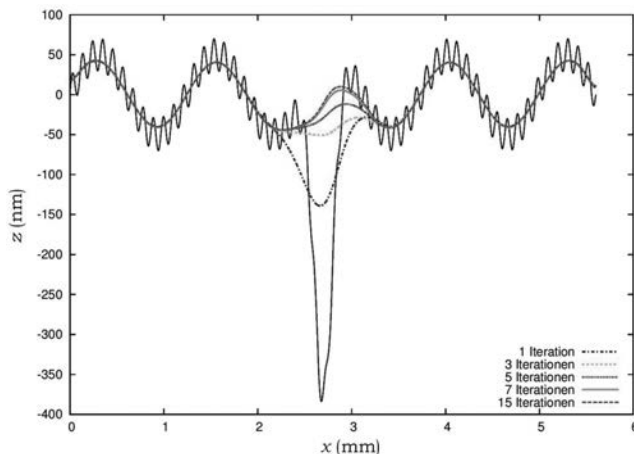


Bild 5: Vergleich der Ergebnisse für unterschiedliche Anzahl von Iterationen bei der robusten Filterung nach ISO 16610-31 für Grad $p = 2$ des Regressionspolynoms der Savitzky-Golay-Komponente des Regressionsgaußfilters. Die schwarze, durchgezogene Kurve zeigt das nach Gl. (2) synthetisch erzeugte Profil.

Bild 5 stellt dar, wie mit zunehmender Anzahl an Iterationsschritten für den M-Schätzer die Pore oder der Graben vom Welligkeitsprofil überbrückt wird, was der Charakterisierung funktionaler Kenngrößen wie sie in der ISO 13565 definiert sind, besser gerecht wird als eine einzige Iteration. Seewig [9] definiert als Abbruchkriterium für die Iterationen

$$|c_{m+1} - c_m| < c_m \cdot \varepsilon \quad \text{mit} \quad c_m = 4,4478 \cdot \text{median}(R)$$

wobei m der Zähler für die Iterationsschritte ist, R die Menge der Residuen und ε eine vorgegebene sehr kleine Zahl, die in der Software *RPTB* vom Nutzer ausgewählt werden kann.

Literatur

- [1] R.K. Leach, C.L. Guisca, H. Haitjema, C. Evans, X. Jiang. Calibration and verification of areal surface texture measuring instruments, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 64 (2). pp. 797-813, 2015, doi: 10.1016/j.cirp.2015.05.010
- [2] S.H. Biu und T.V. Vorburger. Surface metrology algorithm testing system. *Prec. Eng.* 37, pp. 218-225, 2007, doi: 10.1016/j.precisioneng.2007.01.002
- [3] P.M. Harris, I.M. Smith, R.K. Smith, R.K. Leach, C.L. Guisca, X. Jiang, P. Scott. Software measurement standards for areal surface texture parameters: part 1 – algorithms. *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012) 105008 (11pp), doi: 10.1088/0957-0233/23/10/105008
- [4] P.M. Harris, I.M. Smith, C. Wang, C.L. Guisca, R.K. Leach. Software measurement standards for areal surface texture parameters: part 2 – comparison of software. *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012) 105009 (8pp), doi: 10.1088/0957-0233/23/10/105009
- [5] J. Seewig, *Praxisgerechte Signalverarbeitung zur Trennung der Gestaltsabweichungen technischer Oberflächen*. Shaker-Verlag, 2000
- [6] F. Sacerdotti, A. Porrino, C. Butler, S. Brinkmann, M. Vermeulen. SCOUT - Surface Characterization Open-Source Universal Toolbox. Design Note in *Meas. Sci. Technol.* 13 (2002) N21–N26
- [7] M. Krystek. Transfer functions of discrete spline filters. In *Advanced Mathematical Tools in Metrology III*, 45, in *Advances in Mathematics for Applied Sciences*, pp. 203-210, 1997. doi:10.1142/9789814530293
- [8] J. Seewig. The linear spline filter (Abschnitt 4.2.4.1), in: R. Leach (Hrsg.), *Characterisation of Areal Surface Texture*, Springer, pp. 92–93, 2013. doi:10.1007/978-3-642-36458-7
- [9] J. Seewig. Linear and robust gaussian regression filters. *Journal of Physics: Conference Series*, 13(1), pp. 254-257, 2005. doi:10.1088/1742-6596/13/1/059

Strategien zur messtechnischen Validierung von Form- und Lagetoleranzen nach ISO GPS in der Praxis

„Damit das Mittelmaß nicht die Größe bestimmt“

Dipl.-Ing. **Beata Schönberg**, Senior Tolerance Engineer

Kurzfassung

Die ISO-GPS-Normen mit neuen Spezifikations-Operatoren und -Modifikatoren beschreiben zwar die geometrischen Anforderungen an Werkstücken eindeutiger, stellen die Messtechniker jedoch vor eine große Herausforderung bei der Interpretation. Da die Deutungshoheit letztendlich auch beim Messtechniker liegt, erfordert die normkonforme Messung eine hohe Methodenkompetenz. Eine praxisnahe Messstrategie kann die Adaption der neuen ISO-GPS-Normen erleichtern. Dieser Vortrag beschreibt die Erarbeitung einer Messstrategie zur Validierung von Form- und Lagetoleranzen, speziell für die taktile Messung, und die dabei aufgetretenen messtechnischen Herausforderungen.

Abstract

The ISO-GPS-Standards with new specification operators and – modifiers describe the geometrical requirements for work pieces more clearly, but mean a big challenge for the measurement inspector regarding interpretation. Because the sovereignty of interpretation is in the expertise of the measurement inspector, a compliant measurement demands a high competence. A hands-on measurement strategy could ease the adoption process of the new ISO-GPS standards. This paper describes the preparation of a measurement strategy for validation of form- and positional tolerances, in particular for the tactile measurement, and the related challenges from a measurement point of view.

1. Einführung

Generell gilt: CAD beschreibt die Geometrie, GD&T (Geometrical Dimensioning & Tolerancing) die funktionellen Anforderungen eines Werkstücks.

GD&T benutzt eine internationale Symbolsprache, präsentiert in ISO- und ASME-Standards, die zyklischen Änderungen und Ergänzungen unterliegen.

Standards präsentieren immer unser bestes Verständnis eines Themas zu der Zeit, in der sie veröffentlicht werden. Erfahrungsgemäß hilft eine firmenspezifische Messstrategie dabei, die Unsicherheiten, die sich aus der anhaltenden Überarbeitung der GPS-Standards ergeben, zu verringern. Eine firmenspezifische Messstrategie sollte daher folgende Ziele haben:

- Limitierung der verschiedenen Toleranzangaben auf der Zeichnung (z.B. durch äquivalente Schreibweise)
- Umgang mit potenziellen Interpretationskonflikten, z.B. ISO 1101:2012 (Unabhängigkeitsprinzip) vs ISO 5458:1998 (implizierte Verbundtoleranzzone)
- Sicherstellung der messtechnischen Verifizierbarkeit von Toleranzangaben (qualitative Softwaretests)
- Gleiches Verständnis und Messen bei Lieferant und Kunde

2. Dynamik in den ISO-GPS Normen

In den vergangenen Jahren wurden einige ISO-GPS-Normen bereits überarbeitet, andere sind mitten in der Überarbeitung. Diese Änderungsdynamik in den ISO-GPS-Normen ergibt sich aus dem Anspruch nach:

- Einhaltung des allgemeinen Grundsatzes der Vollständigkeit
- Ergänzung
- Widerspruchsfreiheit

Die Industrie benötigt im Allgemeinen 3 Jahre, um die Neuerungen der ISO-GPS-Normen in die Konstruktion und Messsoftware zu übernehmen. Setzt man diesen Zeitraum in einen zeitlichen Bezug zu dem in der ISO TC 213 „Standards Roadmap“ abgebildeten Arbeitsplan der publizierten, revidierten und der im Entwurf befindlichen ISO-Normen, kann man durchaus eine Dynamik erkennen [1],[2].

Tabelle 1: Auswahl relevanter publizierter oder im Entwurf befindlicher ISO-GPS Normen

| Publiziert | Revision | Entwurf |
|------------------|----------------|--------------------------------|
| ISO 2692: 2006 | ISO 2692: 2014 | - |
| ISO 5459: 2011 | | ISO 5459: 2016 (Entwurf) |
| ISO 5458: 1998 | | ISO 5458: 2016 (Entwurf) |
| ISO 1101: 2004 | ISO 1101: 2012 | ISO/DIS 1101.2:2015 (Entwurf) |
| ISO 14405-1:2010 | | ISO/FDIS 14405-1:2015-10 (E) |
| ISO 14405-2:2011 | | - |
| - | | ISO/DIS 14405-3.2 (Entwurf) |
| - | | ISO/DIS 1660:2013-09 (Entwurf) |

Ich empfehle, den Blickwinkel um die GD&T-Standards der American Society of Mechanical Engineers (ASME), ASME Y14.5- 2009 und deren Vorgänger ASME Y 14.5-1994, zu erweitern. Zukünftig interessant wird zum Beispiel, dass in der derzeit als Entwurf existierenden Revision der ASME Y14.5-2009 die Eliminierung der Koaxialitäts- und Symmetrietoleranz vorgesehen ist [12],[4].

3. Herausforderung für die Messtechniker & Software

Beim Messen in der Praxis verbleibt die Deutungshoheit bei Interpretationskonflikten einer technischen Zeichnung doch oft beim Messtechniker, obwohl nach ISO 8015 der Konstrukteur für die allgemeine Spezifikation verantwortlich ist.

Auch die Unterschiede zwischen ISO und ASME bedeuten oft eine Herausforderung für Messtechniker und Messsoftware, da die ASME 14.5-2009 nur zu 70-80% kompatibel zu den ISO-GPS Standards ist [5].

Auf mögliche Interpretationskonflikte weist bereits die ISO 8015: 2011 unter Punkt 6.2 mit folgender Anmerkung hin:

„Derzeit bieten die GPS-Normen der ISO nicht für alle Spezifikationsoperationen bei allen standardmäßigen Spezifikationsoperatoren Standards an. Folglich sind viele Standard-Spezifikationsoperatoren der ISO nicht vollständig.“

Um mit diesen Konflikten und den zahlreichen Neuerungen in den ISO-GPS Normen und der zögerlichen Umsetzung in der Software praxisnah umzugehen, sollte im Unternehmen der Aufbau einer eigenen Methodenkompetenz auf Basis „Geometrie und Funktion“ gefördert werden. Unterstützt wird diese Kompetenz durch einen validierten Lernprozess, der als

Kompass dient. Validierter Lernprozess bezieht sich hier auf die Validierung von Hypothesen durch Experimente mit der Messsoftware.

4. Unterschiede zwischen ISO und ASME

Im Bild 1 werden einige Toleranz-Spezifikatoren und -Modifikatoren aus der ISO mit der AS-ME, die auch für die Messstrategie genauer getestet wurden, gegenübergestellt.

Insbesondere die abweichenden Default-Regeln, für Hüllbedingung / Unabhängigkeitsprinzip sowie Simultaneous / Separate Requirement führen zu merklichen Unterschieden in der Messauswertung.




| UNTERSCHIEDE TOLERIERUNG ISO UND ASME | | |
|---------------------------------------|---|---|
| Subjekt | ISO GPS Spezifikation | ASME 14.5-2009 |
| Hüllbedingung |  | default [Rule #1] |
| Unabhängigkeitspr./ Independency | default |  |
| Gemeinsame Toleranzzone | CZ | - |
| Gemeinsame Toleranz | CT | - |
| Continuous Feature | - |  |
| Koaxialität / Symmetrie | [Extrahierte mittlere Linie] | [Median Points] |
| Simultaneous Requir. | CZ | default |
| Separate Requirement | default [Unabhängigkeitspr.] | SEPT REQ |

Bild 1: Beispiele für Unterschiede in der Tolerierung nach ISO und ASME

5. Strategischer Ansatz zur messtechnischen Validierung

Da die geometrische Beschreibung eines Einzelteils nach GPS-Design-Philosophie gemäß seiner Funktion in der Endbaugruppe erfolgt, sollte eine Messstrategie praktische und funktionelle Aspekte berücksichtigen, siehe Bild 2.

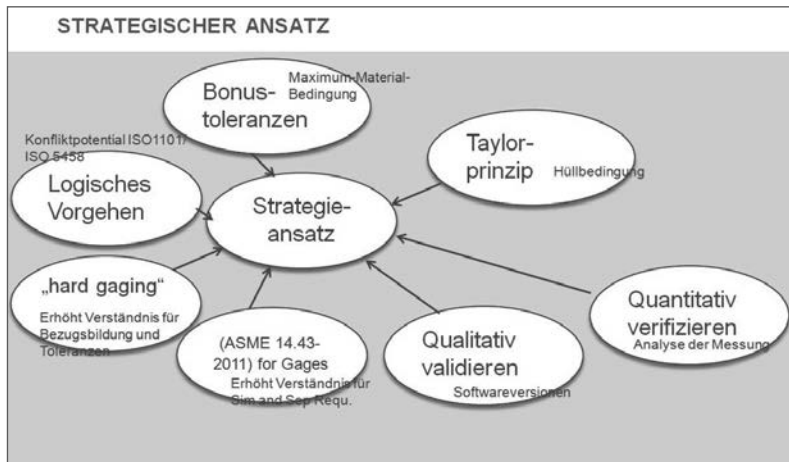


Bild 2: Strategischer Ansatz für die Entwicklung einer Messstrategie

6. Vorgehensweise beim Aufbau der Messstrategie

Zunächst sollten die wichtigsten Toleranz-Spezifikatoren und -Modifikatoren für die Messstrategie identifiziert werden, gegebenenfalls mit einer Priorisierung nach:

- Relevanz für das Unternehmensprodukt
- verfügbares Messverfahren/ Messsoftware
- dem fachlichen Wissensstand von Konstruktion / Lieferant
- Verfügbarkeit äquivalenter Schreibweisen

Die hier beschriebene Messstrategie wurde an einem Koordinatenmessgerät für taktile Messungen erarbeitet, wobei auch die unterschiedlichen Mess-softwareversionen von PC-DMIS berücksichtigt wurden.

Getestet wurde unter Zuhilfenahme des ISO GPS Pocket Guides [6], da darin sehr gut auch äquivalente Schreibweisen für Toleranzangaben erläutert sind.

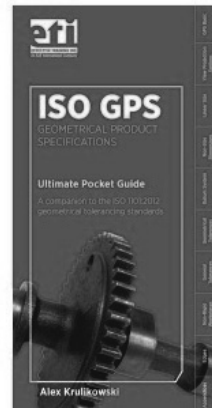


Bild 3: ISO-GPS Guide [6]

6.1. Eingrenzung der Toleranz-Spezifikatoren und -Modifikatoren

Im Rahmen der Messstrategie wurde die Anzahl der verwendeten Toleranz-Spezifikationen eingegrenzt und einige noch nicht in der Software implementierten Toleranzsymbole vorerst vermieden. Insbesondere die neuen Symbole wie z.B. GG (Gaußzylinder), GN (Hüllzylinder), GX (Pferchzylinder) können durch eine äquivalente Schreibweise ersetzt werden. Verzichtet wurde auf Symbole wie NC „Not Convex“ und CC (umfangsbezogener Durchmesser, calculated circumference), CA (flächenbezogener Durchmesser, calculated area). Entweder sind diese Funktionen in der Messsoftware noch nicht verfügbar (z.B. CC, CA, CV) oder sind in der ISO-GPS Norm nicht eindeutig genug beschrieben (z.B. NC).

Aber folgende Symbole und Spezifikationen sollten unbedingt im Rahmen der Messstrategie validiert werden, z.B. Hüllbedingung, Combined Toleranzzone, Composite-Positionstoleranz und Maximum-Material-Prinzip, siehe Bild 4.



Bild 4: Auszug aus dem Spektrum der GPS-Spezifikationen

6.2. Unterschiedlicher Umsetzungsgrad der neuen Symbole in der Messsoftware

Es wird berücksichtigt, dass eine Messsoftware nicht immer alle neuen Notationen / Symbole für Toleranzen und Spezifikatoren als Icon abbildet.

Dies lässt sich am Beispiel „Gemeinsame Toleranzzone“ CZ [engl. Combined Zone] zeigen.

In der verwendeten Messsoftware ist das Icon weder in der neuesten Version 2015.1 noch in den Vorgängerversionen vorhanden, man kann aber bei Profil- und Positionstoleranzen alternativ den Parameter „Simultane Auswertung“ für die „Gemeinsame Toleranzzone“ benutzen, siehe Bild 5.

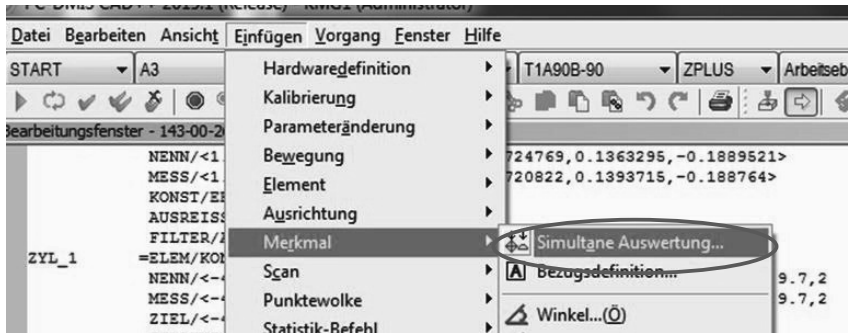


Bild 5: Screenshot aus dem Software-Menü PC-DMIS

Mit der simultanen Auswertung können jedoch keine gemeinsamen Toleranzzonen für Coplanare Flächen oder koaxiale Bohrungen messtechnisch ausgewertet werden. Für diese Fälle müssen entweder ein gemeinsamer Zylinder oder eine gemeinsame Ebene im Messprogramm konstruiert und ausgewertet werden. Einige dieser wichtigen Anwendungsfälle für die gemeinsame Toleranzzone CZ sind im Bild 6 dargestellt.

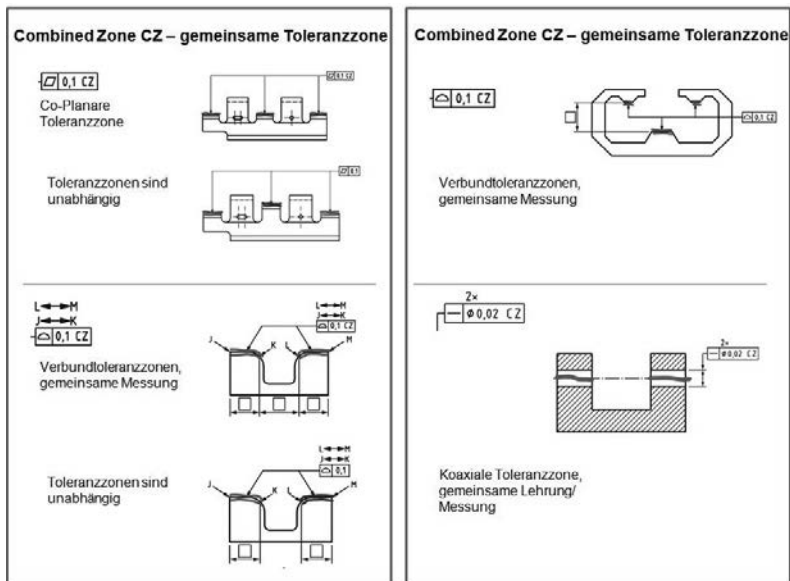


Bild 6: Anwendungsfälle Combined Zone „CZ“

6.2. Nutzung äquivalenter Schreibweisen

Bild 7 zeigt 3 äquivalente Schreibweisen für die Hüllbedingung am Beispiel einer Welle. Das Envelopesymbol legt nach dem Taylorschen Grundsatz eine maximale Hülle von $\varnothing 35,1$ mm fest. Wenn der Wellendurchmesser den erlaubten Größtwert hat, darf die Formabweichung nur noch Null sein, um die Paarung mit einem Gegenstück noch zu gewährleisten. Das untere Durchmessermaß wird als Zweipunktmaß gemessen.

Äquivalent dazu können auch die Spezifikationsmodifikatoren GN (minimales umschließen des Hüllelement) und LP (Zweipunktmaß) verwendet werden, da dies ebenfalls dem Hüllprinzip entspricht. Gleiches gilt für die 3. Abbildung mit der Nulltoleranz im Bild 7 für die Geradheit der Achse in Verbindung mit der Maximum-Material-Bedingung.

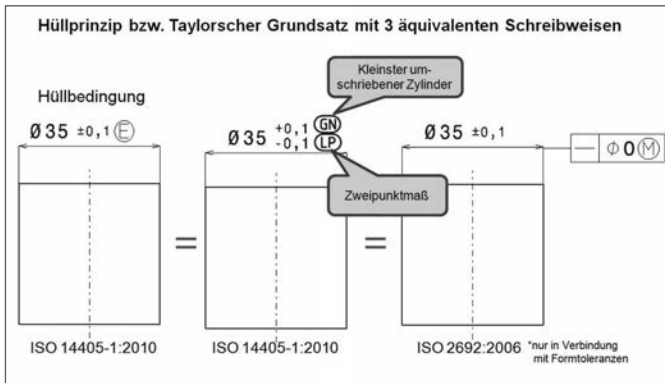


Bild 7: Äquivalente Schreibweisen für Hüllbedingung [7], [8]

6.3. Speziell untersuchte Problemstellungen

Insbesondere folgende zwei Anwendungsfälle der ISO-GPS-Standards wurden eingehender untersucht:

- Separate und simultane Auswertung von Lochmustern
- Composite Positionstoleranz/ Verbund-Positionstoleranz

Bei der Positions-Tolerierung von Lochmustern, bei denen nicht alle Freiheitsgrade geblockt sind, sondern ein Rotationsfreiheitsgrad offen ist, führen die schon „betagte“ ISO 5458:1998 und die ISO 1101:2002 zu einem Interpretationskonflikt.

Während nach ISO 5458:1998 solche Lochmuster implizit als gemeinsame Muster (gemeinsame Messauswertung/ Lehrgang) angesehen werden, gilt nach ISO 1101:2012 als „default“ das Unabhängigkeitsprinzip (separate Messauswertung/ Lehrgang).

Erst die im Entwurf befindliche ISO/DIS 5458 [9], [10] löst diesen Konflikt mit den Symbolen CZ (Verbundtoleranz, innerhalb eines Lochmusters) und SIM (simultane Auswertung mehrerer Lochmuster). In den Bildern 8, 9 ist die separate und simultane Prüfung mit stark abstrahierten schematischen Prüflingen dargestellt. Aus Gründen der Vereinfachung sind die Lehren-Stifte nicht extra als „expandible“ sondern als „starr“ ausgeführt, obwohl hier „expandible“ Stifte verwendet werden müssten. Denn starre Lehrenstifte werden nur bei Maximum-Material-Bedingung angewendet, und „selbstaufweitende“ Stifte wenn keine Maximum-Material Bedingung vereinbart ist.

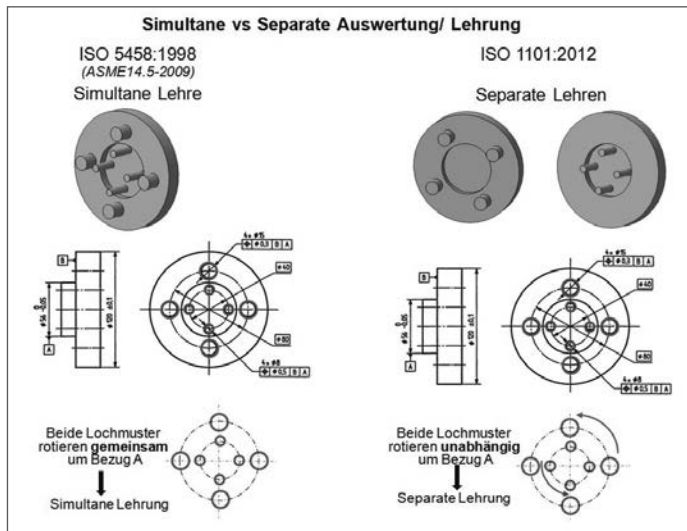


Bild 8: Lochmusterauswertung nach ISO5458:1998 und nach ISO1101:2012

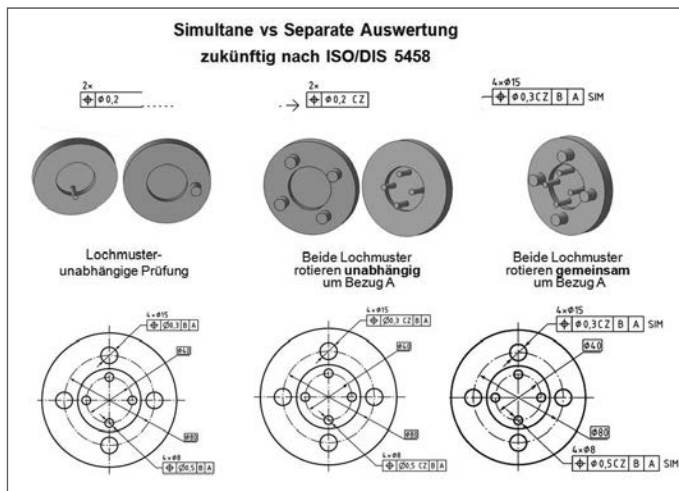


Bild 9: Eindeutige Lochmusterauswertung nach Entwurf ISO/ DIS 5458

In der getesteten Messsoftware PC-DMIS muss für eine gemeinsame Auswertung von Geometrieelementen (Position oder Profil) der Parameter „Simultane Auswertung“ immer extra angewählt werden.

Im Rahmen der Messstrategie wurde auch die „Composite“-Positionstolerierung / Verbundtolerierung näher betrachtet. Diese Tolerierung ist geeignet, wenn innerhalb eines Lochmusters eine engere Positionstoleranz erforderlich ist, als für das gesamte Lochmuster zum Bezugssystem. Die „Composite Tolerance“ ist in der ASME 14.5 ausführlich beschrieben, siehe Bild 10.

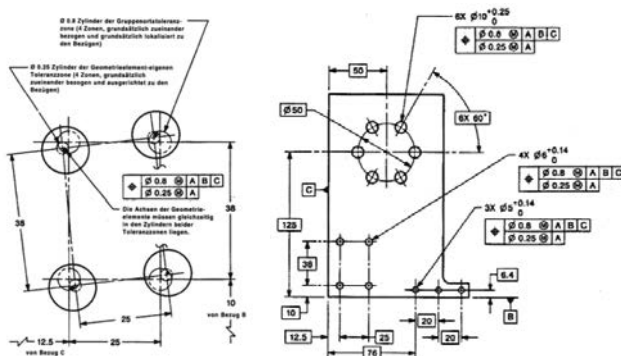


Bild 10: Verbundtolerierung von Lochmustern, ASME 14.5M-1994

Die eingesetzte Messsoftware kann die „Composite Tolerance“ sowohl nach ISO als auch nach ASME-Standard messen und auswerten. Bild 11 zeigt am Beispiel eines Würfels Positionsauswertung als Verbundtoleranz.

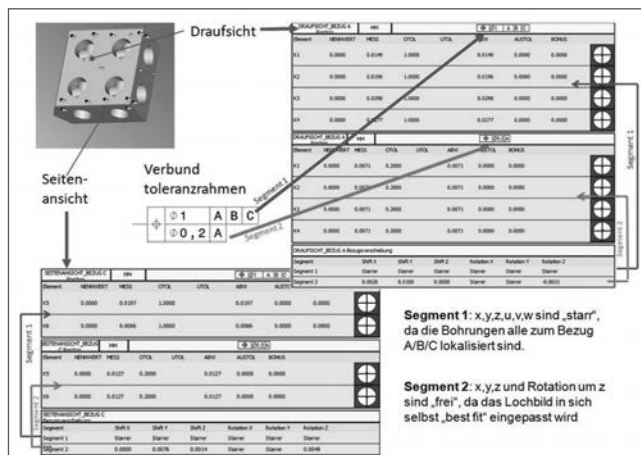


Bild 11: Verbund-Positionstoleranz, Auszüge aus einem Messprotokoll

6.4. Nutzen der Messstrategie

Als Leitfaden intern und auch bei der Kommunikation mit Lieferanten werden die Ergebnisse der Messstrategie genutzt, um einheitliche Messergebnisse sowie eine funktionsorientierte geometrische Dimensionierung der Bauteile zu gewährleisten. Das Verständnis insbesondere der neuen Spezifikatoren und Modifikationen wird durch diesen Leitfaden praxisnah gefördert.

| | Subject | Toleranzbeispiel | Messsoftware (Beispielsweise PCDMIS) |
|----------------|---|---|--|
| | Hüllbedingung, Envelope Principle ISO 14405-1: 2011 | | |
| a) (E) | Außendurchmesser Welle | $\varnothing 35 \pm 0,1 \text{ (E)}$ | -oberes Maß als Hüllzylinder (max. 35,1mm) -unteres Maß als örtliches Zweipunktmaß (min 34,9 mm/ max 35,1mm) |
| b) (E) | Innendurchmesser Bohrung | $\varnothing 35 \pm 0,1 \text{ (E)}$ | -oberen Maß als örtliches Zweipunktmaß (min 34,9 mm/ max 35,1mm) -unteres Maß als Pferrchzylinder (min 34,9 mm) |
| c) siehe a) | Außendurchmesser Welle | $\varnothing 35 \begin{matrix} +0,1 \\ -0,1 \end{matrix} \text{ (GN LP)}$ | -oberes Maß als Hüllzylinder (max. 35,1mm) -unteres Maß als örtliches Zweipunktmaß (min 34,9 mm/ max 35,1mm) |
| d) siehe b) | Innendurchmesser Bohrung | $\varnothing 35 \begin{matrix} +0,1 \\ -0,1 \end{matrix} \text{ (LP GX)}$ | -oberen Maß als örtliches Zweipunktmaß (min 34,9 mm/ max 35,1mm) -unteres Maß als Pferrchzylinder (min 34,9 mm) |

Bild 12: Auszüge aus der Messstrategie


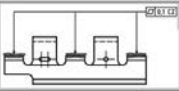

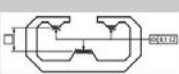
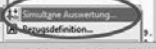





| | | | |
|---|---|---|--|
| CZ | Gemeinsame Toleranzzone | ISO 1101 | |
| a) CZ  | Gemeinsame Toleranzzone Co-planare Ebenen |  | – Erst die einzelnen Ebenen messen, dann eine gemeinsame Ebene aus allen Einzelebenen konstruieren bilden und die Ebenheitstoleranz auswerten |
| b) CZ  | Gemeinsame Toleranzzone Profiltoleranz |  | – Simultane Auswertung als Merkmal einstellen – Profilform simultan (gemeinsam) auswerten  |
| c) CZ  | Gemeinsame Toleranzzone Profiltoleranz |  | – Simultane Auswertung als Merkmal einstellen – Profilform simultan (gemeinsam) auswerten – Profilform von J bis K und von L bis M messen  |
| d) CZ  | Gemeinsame Toleranzzone Koaxiale Bohrungen |  | – Erst die beiden einzelnen Zylinder messen, dann einen gemeinsamen Zylinder „konstruieren“ und auswerten |

Bild 13: Auszüge aus der Messstrategie

8. Lessons Learned der Messstrategie

Die Ableitung der Messstrategie war mit einem ausgiebigen Testen der Messsoftware PC-DMIS (> 2 Monate) und einem intensiven Normenstudium von ISO und ASME [9], [12] verbunden. Die unterschiedlichen Software Versionen für die taktile Messung am Koordinatenmessgerät spiegelten die ständige Anpassung durch die Software-Entwickler wider. Erst die aktuellste Software Version 2015.1 ermöglichte die Auswertung nach den aktuellen ISO-Standards.

LESSONS LEARNED...

1. Die Idee einer Messstrategie ist nur der Anfang, auf die firmenspezifische Umsetzung kommt es an
2. Unternehmens- und produktspezifische Tolerierungsanforderungen definieren und darauf beschränken
3. Vertrauen auf ein kompetentes Messtechniker-Team
4. Testen der Annahmen mit der Mess-Software, qualitativ validieren, quantitativ verifizieren
5. GD&T ist eine nicht-intuitive Symbolsprache, die nicht eins zu eins in den Icons der Mess-Software wiedergespiegelt wird
6. Lieferant frühzeitig in die Messstrategie mit einbinden
7. Unterschiedliche Versionen der Messsoftware beachten
8. Limitierung der Toleranzangaben durch Nutzung äquivalenter Schreibweise

Bild 14: Lessons Learned Erkenntnisse

9. Literaturangaben

- [1] http://isotc213.ds.dk/roadmap/GPS_Standards_Roadmap_2015-09-23.pdf
- [2] http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc
- [3] ASME 14.5M-1994: Dimensioning and Tolerancing
- [4] ASME Y14.5-2009: Dimensioning and Tolerancing
- [5] <http://www.etinews.com>
- [6] Krulikowski, A.: ISO GPS – Ultimate Pocket Guide – A Companion to the ISO 1101:2012 and Related Geometrical Tolerancing Standards, USA 2015
- [7] DIN-Tagung GPS 2014: ISO-GPS-Normen zur Spezifikation und Verifikation von Funktionsanforderungen – Technische Produktdokumente, Beuth Verlag 2014
- [8] Charpentier, F.: Leitfaden für die Anwendung der Normen zur geometrischen Produktspezifikation (GPS), Beuth Verlag 2014
- [9] ISO/DIS 5458 – Geometrical Tolerancing – Positional and pattern tolerancing
- [10] DIN EN ISO 2692 – Maximum-Material-Bedingung (MMR), Minimum-Material-Bedingung (LMR) und Reziprokenbedingung (RPR)
- [11] Krulikowski, A.: The Ultimate GD&T Pocket Guide – A Companion to the ASME Y14.5-2009 Dimensioning & Tolerancing Standard, USA 2009
- [12] ASME Y14.43-2011: Dimensioning and Tolerancing Principles for Gages and Fixtures

Optische Form- und Welligkeitsmessung im Nanometerbereich

B. Brodmann, R. Brodmann, K. Konovalenko, OptoSurf, Ettlingen

Kurzfassung

Die hochgenaue Messung der Formabweichung wie Rundheit, Geradheit und Welligkeit von funktionskritischen Oberflächen wird bisher überwiegend taktil mit Formmessgeräten oder optisch mit interferometrischen Verfahren durchgeführt. Um mit diesen Messgeräten Genauigkeiten im Nanometerbereich zu erreichen, muss man einen relativ großen Aufwand betreiben, da Störschwingungen aus der Umgebung das Ergebnis unmittelbar beeinflussen. Eine Anwendung in der rauen Fertigung ist damit ausgeschlossen. In diesem Beitrag wird ein gegen Vibrationen unempfindlicher optischer Sensor vorgestellt, der Formabweichungen über eine Winkelmessung erfasst. Anhand von Beispielen aus der Wälzlager- und Halbleiterindustrie wird gezeigt, dass der Sensor Rundheitsabweichungen $< 0,2 \mu\text{m}$ und Welligkeitsamplituden $< 0,01 \mu\text{m}$ auch in der Fertigung sicher messen kann.

Grundlagen Streulichtsensor

Die winkelaufgelöste Streulichtmethode nach VDA 2009 [1] ist überwiegend bekannt im Bereich der Rauheitsmessung feinbearbeiteter Oberflächen wie Rollieren, Feinschleifen und

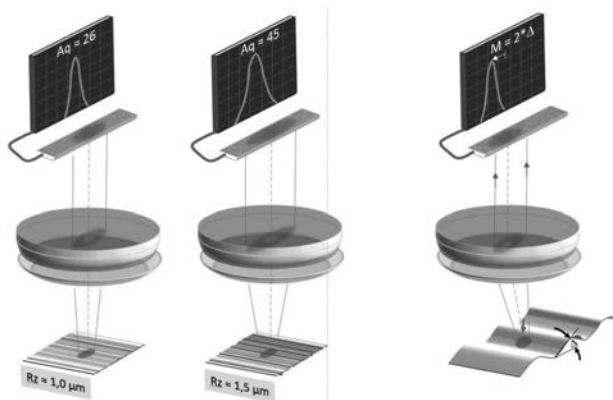


Bild 1. Streulichtsensor: links und Mitte Rauheitsmessung, rechts Formmessung

Finishen. Eine vereinfachte Darstellung des Messprinzips ist in Bild 1 dargestellt. Eine Oberfläche wird mit einem Lichtfleck (Durchmesser je nach Anwendung 0,9 mm oder 0.03 mm)

beleuchtet. Eine Optik nimmt dann das gestreute Licht auf und lenkt es auf eine lineare Diodezeile. Bei der Rauheitsmessung ergeben sich je nach Struktur und Rauheit der Oberfläche unterschiedliche Intensitätsverteilungen die statistisch ausgewertet werden. Der Rauheitswert A_q ist dabei die Varianz der Verteilung und entspricht dem Profilwinkelkennwert Rd_q . Bei gleichem Bearbeitungsverfahren kann auch eine Korrelation zu den Rautiefenkenngrößen R_a , R_z oder R_k hergestellt werden. Die Grundlagen der Rauheitsmessung mit dem Streulichtsensor werden in den Referenzen [1], [2] und [3] beschrieben.

Das Prinzip der Formmessung erkennt man im Bild 1. rechts. Ein lokaler Formabweichungswinkel Δ verschiebt die gesamte Streulichtverteilungskurve auf dem Detektor um den Winkelwert M . Der M -Wert ist der Schwerpunkt der Verteilung (1.statistisches Moment) und entspricht aufgrund des Reflexionsgesetzes exakt dem doppelten Profilsteigungswinkel Δ . Wird nun der Sensor oder die Oberfläche bewegt und dabei in äquidistanten Abständen der M -Wert gemessen, so zeichnet der Sensor von der Oberfläche ein Steigungsprofil auf, dass mathematisch der Ableitung des Formprofils entspricht.

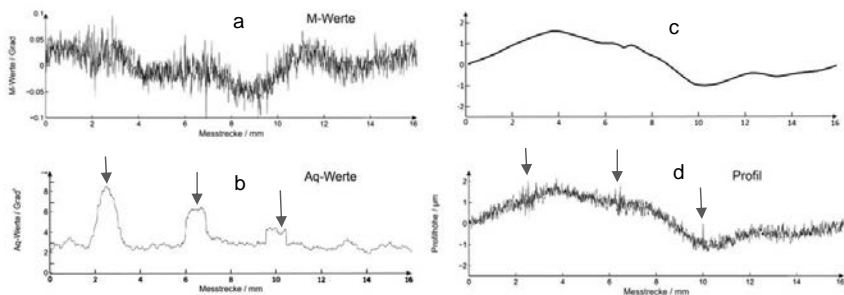


Bild 2. a: gemessenen Winkelwerte M , b: gemessene Rauheitswerte A_q ,
c: integrierte Winkelwerte, d: taktile Messung. Rote Pfeile: erhöhte Rauheit.

Werden die gemessenen M -Werte aufsummiert, so kann daraus das Formprofil berechnet werden. Ein simuliertes Beispiel wird in Bild 2. gezeigt. Die gemessenen M -Werte sind in Bild 2 a. dargestellt, in b der gleichzeitig gemessene Rauheitsverlauf A_q , c zeigt den integrierten M -Wert (das Formprofil) und d entspricht einer taktile Messkurve. Die roten Pfeile deuten auf Stellen mit erhöhter Rauheit hin. Im A_q -Verlauf erkennt man deutlich die lokal erhöhte Rauigkeit.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst anhand eines rückführbaren Geometrienormals gezeigt, dass die optische Form- und Welligkeitsmessung mit taktilen Messungen absolut vergleichbar ist. Danach werden Applikationsbeispiele aus den Bereichen Maschinenbau (Wälzlagerkomponenten) und der Halbleiterindustrie (rückseitig geschliffene Wafer-oberflächen) vorgestellt.

2.1 Ergebnisse Wellennormal

Die Rückführbarkeit ist für jedes Messgerät ein wichtiges Merkmal, um vergleichbare und genormte Messwerte zu garantieren. Man bedient sich hierzu spezieller Normale mit definierten Merkmalen, die von referenzierten Messgeräten überprüft werden können. In Bild 3. wird eine Messung an einem PTB zertifiziertem Wellennormal gezeigt, das auf einem 80 mm Durchmesser verschiedenen Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen und Amplituden aufweist. Die Messungen wurden an der Universität Kaiserslautern (Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, Prof. Seewig) an einem Mahr Rundheitsmessgerät durchgeführt.

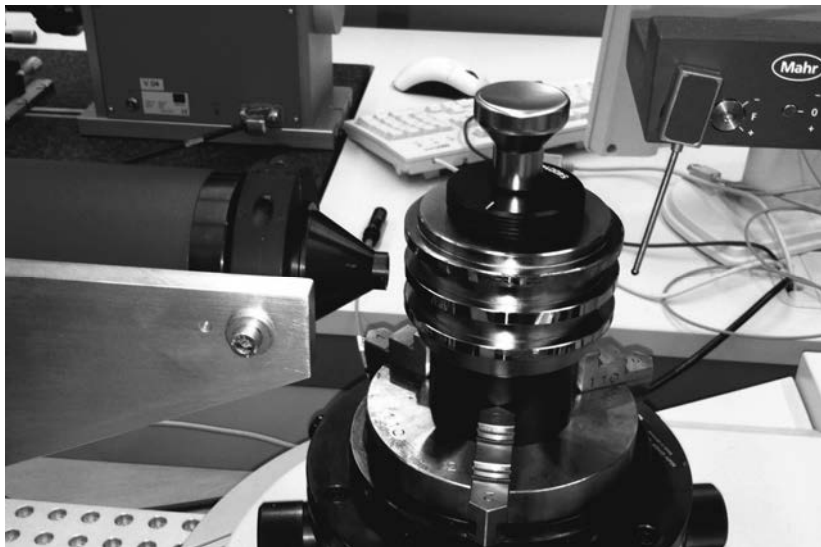


Bild 3: Mahr Mehrwellennormal, Messsystem MMQ 200. Rechts: Induktivtaster, links Opto-Surf OS 500 Streulichtsensor

Der taktile Induktivtaster nimmt auf dem Umfang 3.600 Höhenmesswerte auf und berechnet daraus die Rundheit nach einer LSC - Ausgleichsrechnung, die die Exzentrizität eliminiert.

Mit Hilfe der Fast Fourier Transformation (FFT) werden anschließend die Amplituden und Ordnungen der Wellen ermittelt. Der optische Streulichtsensor erfasst auf dem Umfang 4096 lokale Steigungswerte mit einem 0,03 mm Messfleck. Da der lineare Detektor mit Hilfe der speziellen Sensoroptik direkt Winkelwerte misst, werden die gemessenen Winkel einfach summiert (Integration), um das absolute Formprofil zu erhalten. Auch hier wird eine LSC Ausgleichsrechnung durchgeführt und die Wellen mit einer FFT-Analyse ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt.

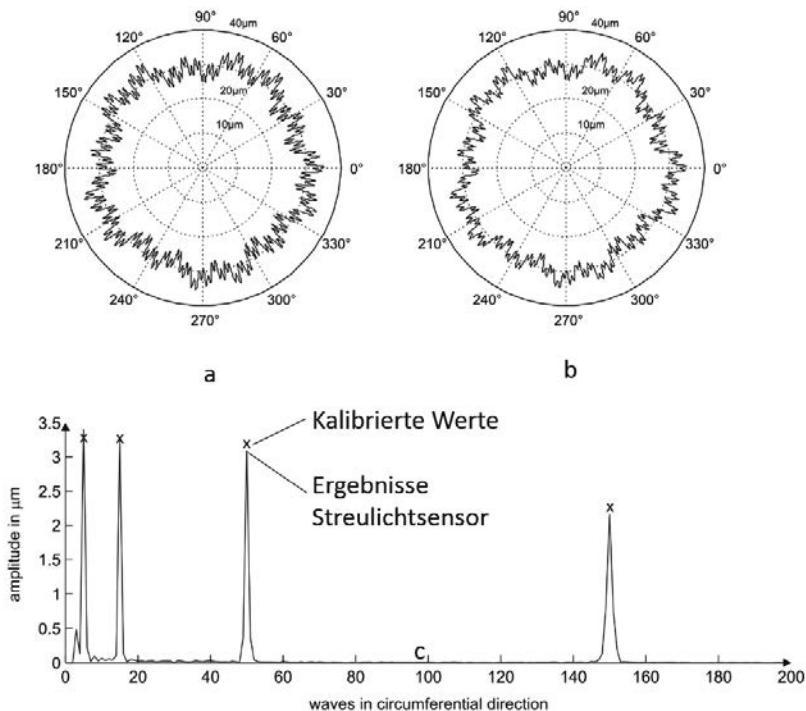


Bild 4: Ergebnisse Mehrwellennormal. a: taktiles Ergebnis, b: Ergebnis Streulichtsensor, c: Berechnung FFT. Vergleich optische und kalibrierte Messwerte.

Die Vergleichbarkeit zwischen den beiden Messverfahren ist sehr gut und man erhält im Rahmen der Messunsicherheit identische Werte. Die vorgegebenen Amplituden sind bei diesem Normal allerdings noch relativ groß und liegen im μm – Bereich. Da in der Praxis aber bereits Welligkeiten im Nanometerbereich eine Rolle spielen wurde ein neues Normal gefer-

tigt, das höhere Ordnung und bedeutend kleinere Amplituden aufweist. Auf einem Zylinder von 30 mm Durchmesser wurden 300 Wellen mit 100 Nanometer Amplitude mit Hilfe einer Ultrapräzisionsmaschine aufgebracht. Auch hier kam der 0,03 mm Messfleck zum Einsatz. In Bild 5 links ist das Normal mit dem Sensor zu sehen und rechts das Ergebnis der FFT-Analyse.

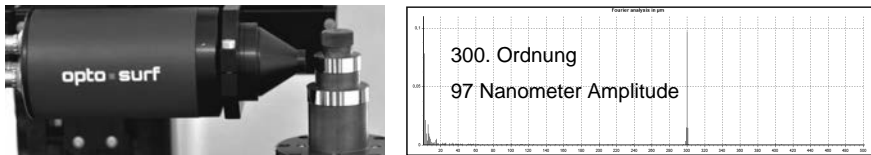


Bild 5. Wellennormal mit 300 Wellen auf Durchmesser 30 mm, Amplitude 100 nm

Die Messungen wurden auf einem relativ einfachen Rotationstisch mit einer Rundlaufgenauigkeit von ca. 0,2 µm durchgeführt. Die Wiederholgenauigkeit ist sehr hoch und Messungen nach Bosch Verfahren 1 (25 Wiederholungsmessungen) ergaben eine Standardabweichung der Amplitude von < 0,1 nm. Vergleichsmessungen mit einem taktilen Standardrundheitsmessgerät an der Universität in Kaiserslautern ergaben nahezu identische Werte.

In den nachfolgenden Kapiteln wird gezeigt, dass der Streulichtsensor auch an geschliffenen und gefinishten Oberflächen Ergebnisse im Nanometerbereich erreichen kann.

3. Applikationen

Wälzlagerkugeln, Nadellagerringe, Linearführungen und Kugelumlaufspindeln sind einige Beispiele aus der Wälzlagerindustrie an die bezüglich der Formgenauigkeit und Feinwelligkeit sehr hohe Anforderungen gestellt werden. Die Messung der Welligkeit spielt dabei eine große Rolle, da sie unmittelbar für Geräusche im Motor und Getriebe verantwortlich sind. In einigen Fällen reichen bei hohen Ordnungen schon Amplituden von wenigen hundertstel Nanometer aus, um eine Lagerkomponente als Ausschuss zu klassifizieren.

Die Halbleiterindustrie ist dafür bekannt, dass der Nanometer-Bereich zum Alltag gehört. Beim rückseitigen Dünnen von prozessierten Wafern (Wafer mit fertigen Chips auf der Frontseite) aber auch beim Polieren (Planarisieren) von Wafern können prozessbedingte Welligkeiten auftreten, die zu Stress führen und Chips zerstören können. Diese in der Halbleiterindustrie als Nanotopografie bekannte Strukturen weisen Wellenlängen im mm-Bereich auf deren Amplituden wenige Nanometer betragen. Aus jedem dieser Bereiche werden jetzt Beispielmessungen vorgestellt.

3. 1 Beispiele aus der Wälzlagerindustrie

In Bild 6. wird die Messung an einem relativ großen Wälzlager - Außenring gezeigt. Links ist die Messanordnung zu sehen.

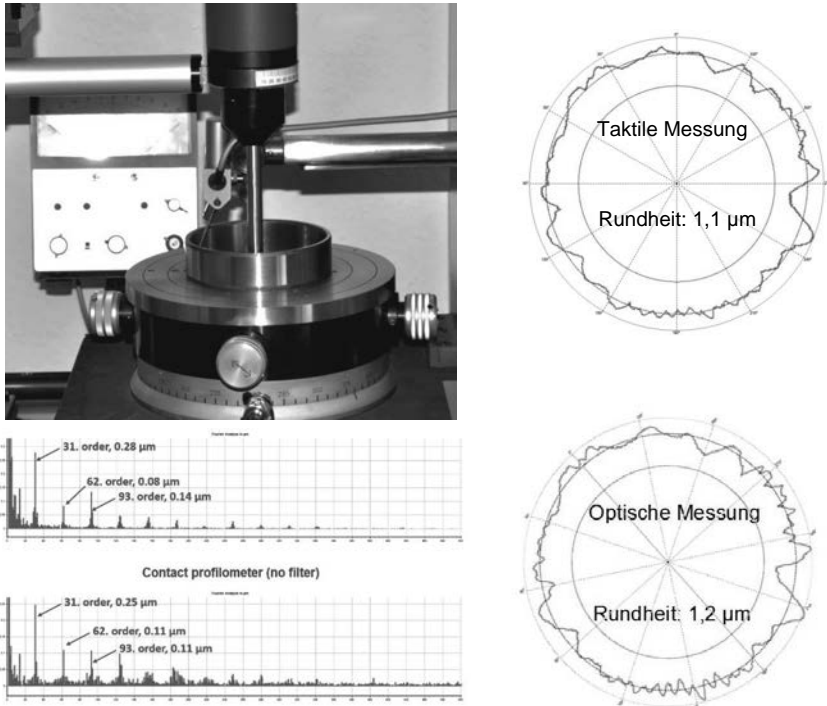


Bild 6. Optische und taktile Form- und Welligkeitsmessung an einem Außenring

Der Lagerring wurde auf einem präzisen Rundheitstisch gespannt (Mahr MMQ3) und nacheinander taktil mit einem Induktivtaster und optisch mit dem Streulichtsensor gemessen. Um Oberflächeneinflüsse auszuschließen, wurde jeweils auf der gleichen Umfangsbahn gemessen. Sowohl bei der taktilen als auch bei der optischen Messung kam die gleiche Software zum Einsatz.

Auch hier zeigt sich die hohe Übereinstimmung von der taktilen und optischen Messung. Wichtig ist aber eine gut gesäuberte Oberfläche, die optisch sicher kritischer ist als bei der taktilen Messung. Unstimmigkeiten sind aber meistens auf die Oberflächen selbst zurückzuführen. Bereits geringe Abweichungen des Messortes können Abweichungen insbesondere

bei der FFT-Analyse hervorrufen. Das gilt sowohl für die taktile als auch für die optische Messung.

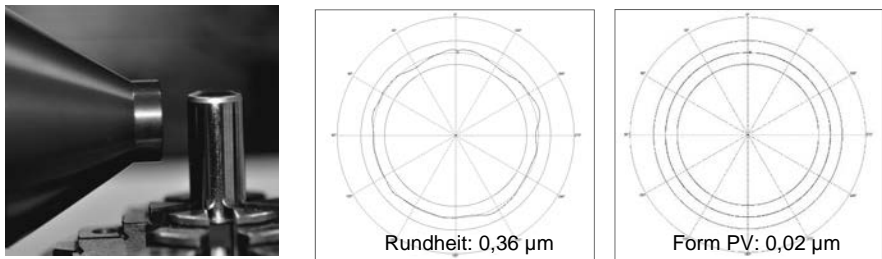


Bild 7. Links: Präzisionsrolle mit Sensor, Mitte: Rundheit Rolle, rechts: Stillstandsmessung.

Die hohe Messgenauigkeit des Sensors wird in Bild 7. bei der Messung einer 10 mm Durchmesser Präzisionsrolle demonstriert. Die gemessene Rundheit liegt bei $0,36\text{ }\mu\text{m}$. Eine Stillstandsmessung (Bild 7. rechts) simuliert eine perfekte Oberfläche und eine perfekte Rotationsachse. Die Auswertung ergibt eine „Formabweichung“ von 20 nm , was die untere Nachweisgrenze des Messsystems bei einer Formmessung entspricht. Bei Welligkeitsmessungen treten größere Formabweichungswinkel auf, so dass noch feinere Abweichungen messbar sind.

3.2 Applikation Silizium Waferoberflächen

Moderne Halbleiterbauelemente zeichnen sich neben Ihrer hohen Packungsdichte von elektronischen Elementen vor allem dadurch aus, dass sie immer kleiner werden. Wafer die im Ausgangszustand knapp 1 mm dick sind, müssen deshalb auf bis zu $30\text{ }\mu\text{m}$ gedünnt werden. Der notwendige Schleifprozess muss sehr sorgfältig und kurz vorm Ende des Prozesses nur noch mit geringen Schleifkräften den Schleifprozess beenden. Die Rauheit soll dann nur noch $1\text{--}2\text{ nm Ra}$ betragen. Die Messung der Welligkeit kann bis heute nur lokal mit hochwertigen Interferometern durchgeführt werden. Deflektometrische Methoden (Lichtablenkung) arbeiten überwiegend qualitativ (Normarski Bilder). Die oben beschriebene Formmessung mit dem Streulichtsensor ist im Prinzip auch eine deflektometrische Methode, die aber durch Integration quantitative Profile ergibt.

In Bild 8 links wird eine Messmaschine gezeigt, die eine 300 mm Durchmesser Wafer vollständig in 30 s messen kann. Der Streulichtsensor bewegt sich bei rotierendem Wafer von der Kante zum Zentrum, so dass die Oberfläche spiralförmig abgetastet wird. Je nach Auflösung werden zwischen 60.000 und 300.000 einzelne Rauheitswerte aufgenommen. Rechts oben

in Bild 8 wird das Ergebnis der Rauheitsmessung gezeigt. Die Farbskala gibt unmittelbar Ra-Werte wieder, da die Aq-Rauheitskennwerte vorher mit einem Konfokalmikroskop korreliert wurden. Die orangen Bereiche entsprechen 10-11 nm Ra und die grünen ca. 8 nm.

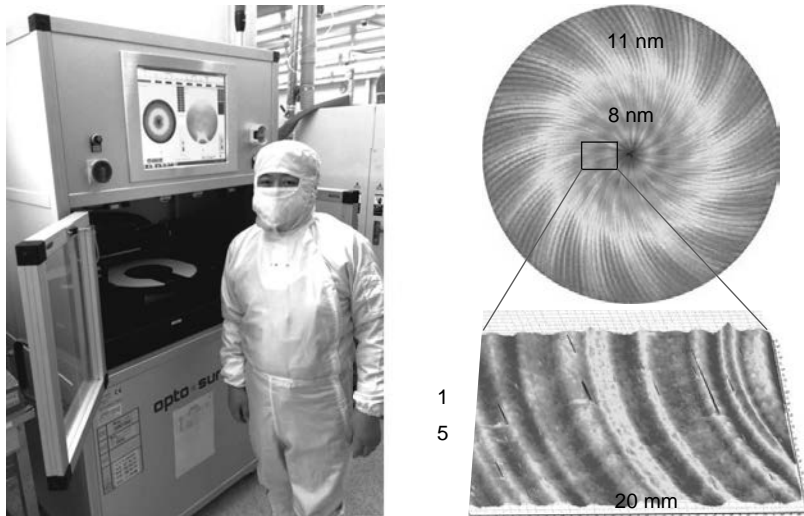


Bild 8. Messmaschine WaferMaster 300 (links), Vollflächige Rauheitsmessung 300 mm Wafer (mittlere Rauheit $R_a = 8 - 10 \text{ nm}$) (rechts oben), Welligkeitsmessung (Ausschnitt) mit Amplituden $< 10 \text{ nm}$ (rechts unten)

Während die Rauheitsmessung mit einem relativ großen Messfleck ($0,9 \text{ mm}$) erzeugt wurde, gibt die Grafik rechts unten einen kleinen Ausschnitt der Oberfläche nahe dem Zentrum wieder. Zum Einsatz kam hier der kleine Messfleck mit $0,03 \text{ mm}$. Die deutlich sichtbaren kreisförmigen Wellen weisen eine Amplitude von $< 10 \text{ Nanometern}$ auf. Die Anwendung des Streulichtensors im Halbleiterbereich steht noch ganz am Anfang, es konnten aber bereits an vielen unterschiedlich bearbeiteten Wafern prozessbedingte Rauheits- und Welligkeitsunterschiede nachgewiesen werden. Mit dem Vorstoß bei der Welligkeitsmessung in den Nanometerbereich ist der Streulichtsensor aufwendigen Interferometern ebenbürtig.

Zusammenfassung

Die Streulichtmethode nach VDA 2009 eignet sich nicht nur für Messungen der Rauheit bis in den Nanometerbereich sondern auch für Form- und Welligkeitsmessung. Hierbei misst der Sensor in äquidistanten Abständen den Schwerpunkt der Streulichtverteilung und ermittelt damit ein Oberflächensteigungsprofil der Makrostruktur. Durch einfache Integration kann daraus ein absolutes Formprofil berechnet werden. Messungen an Welligkeitsnormalen und Anwendungsbeispiele aus der Wälzlagerindustrie zeigen, dass die Übereinstimmung mit taktilen Messungen sehr gut ist. Vorgestellt wurden auch Ergebnisse aus der Halbleiterindustrie wobei mit einer speziellen Messmaschine die Rauheit und Welligkeit von Waferoberflächen gemessen werden kann. Dabei können noch Welligkeiten mit Amplituden im Nanometerbereich sicher gemessen werden.

Literatur

- [1] VDA 2009 Geometrische Produktspezifikation Oberflächenbeschaffenheit, Winkelaufgelöste Streulichtmesstechnik, Definition, Kenngrößen und Anwendung (07/2010), (<http://www.dkf-ev.de/gesetzvv.htm>)
- [2] R. Brodmann, et al., Kenngrößen der Mikrostruktur definiert. VDA-Richtlinie für die Oberflächenmessung mit Streulicht. QZ 2008, 53 (7), S. 46–49.
- [3] J. Seewig et al., Extraction of shape and roughness using scattering light, Proc. SPIE 7389, 73890N (2009)

Konturmessung an Nockenwellen

Daniel Beiler, thyssenkrupp Presta TecCenter AG

Kurzfassung

Der Schwerpunkt des vorliegenden Beitrages ist das Thema

Form einer bezugsabhängigen Linie laut ISO 1101 und die praktische Umsetzung der Normvorgabe bei thyssenkrupp Camshafts anhand von 3 Fallbeispielen.

Im Vortrag werden folgende Punkte angesprochen:

→ Unterschiedliche Nockenbezugsysteme, die auf die unterschiedlichen Anwendungen der Messtechnik zugeschnitten sind. Hierbei geht es vor allen darum, in welchem Prozessschritt und mit welcher Antaststrategie die Nocken gemessen werden.

→ Ein weiterer Schwerpunkt ist die optische 100% Messung von Nockenwellen, die bei thyssenkrupp Camshafts in vielen Fällen mittels einer flexiblen inline Messtechnik realisiert wird.

→ Fallbeispiel 1: Messungen einer Nockenwelle mit mehreren Lasertriangulationssensoren. In diesem Beispiel wird lediglich die Form der Nocke in radialer Richtung betrachtet.

→ Die Taktile Messtechnik wird vor allem im Labor als Referenzmessung angewendet. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den weltweiten Standorten innerhalb der thyssenkrupp Camshafts und auch dem Kunden gegenüber sicherzustellen.

→ Fallbeispiel 2: Messung einer einbaufertigen Nockenwelle, Formabweichung in radialer Richtung.

→ Fallbeispiel 3: „Formabweichung“ in axialer Richtung mittels Linearscann zur Bestimmung der Mantellinie einer Nocke.

1. Nockenbezugsysteme

Für die unterschiedlichen Antastungen werden die Sollkonturdaten auf die einzelnen Erhebungsdaten umgerechnet.

So werden die Polarkoordinaten für die Messung mit Lasertriangulationssensoren verwendet, bei denen der Antastpunkt und Messpunkt direkt auf der Oberfläche der Kontur aufliegt. Die Rollentaster-Erhebung kommt bei Rundmessfühlern zum Einsatz, die zum Teil durch den Kunden vorgegeben werden. Anwendung finden diese bei Rollenstößeln. Die Flachtaster-Erhebung kommt bei Flachmessstücken zum Einsatz, die vor allem bei spitzen Nocken verwendet werden. Anwendung in der Praxis findet man bei Nocken für Tassenstößel. Für die Fräs- und Schleifbearbeitung wird die Erhebung auf den jeweiligen Werkzeugdurchmesser berechnet. In folgendem Bild ist der Berührungspunkt P aller Antastungen an der gleichen Stelle, aber der Winkel, unter dem das Antastelement steht, ist jeweils ein anderer. Die Umrechnung benötigt viel Mathematik und genaue Kenntnis der Kontur. Die Gerade durch den Berührungspunkt und den Taster Mittelpunkt M_t ist rechtwinklig zur Tangente.

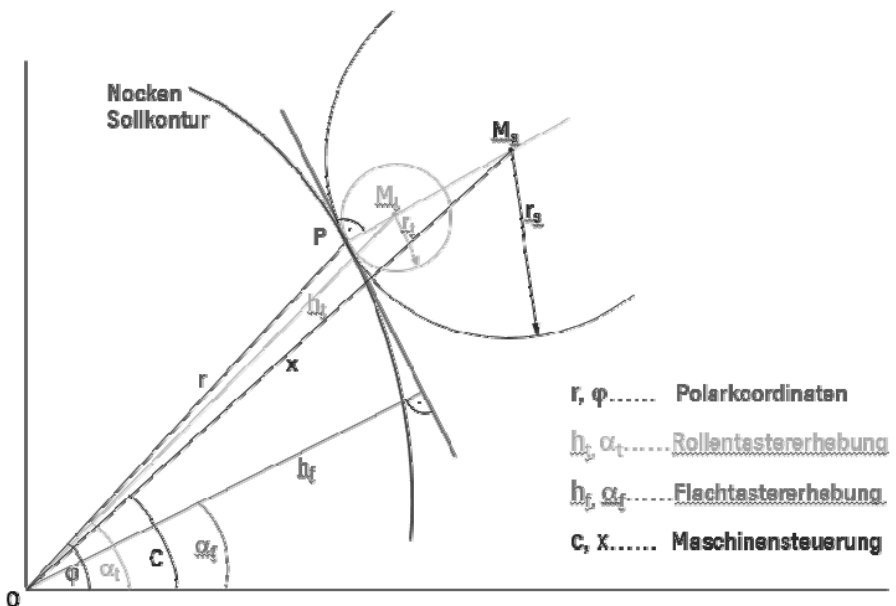


Bild 1: Nockenbezugsysteme

2. Fallbeispiel 1: 100% inline Messung mit Lasertriangulationssensoren

Bei montierten Rohnockenwellen werden die Nockenkonturen, Nockenwinkel und Axialpositionen mittels Lasersensoren zu 100% inline gemessen.

Die Abbildung zeigt zunächst den prinzipiellen Aufbau einer solchen inline-Messmaschine einschließlich der Achskinematik zur Positionierung der Lasersensoren.

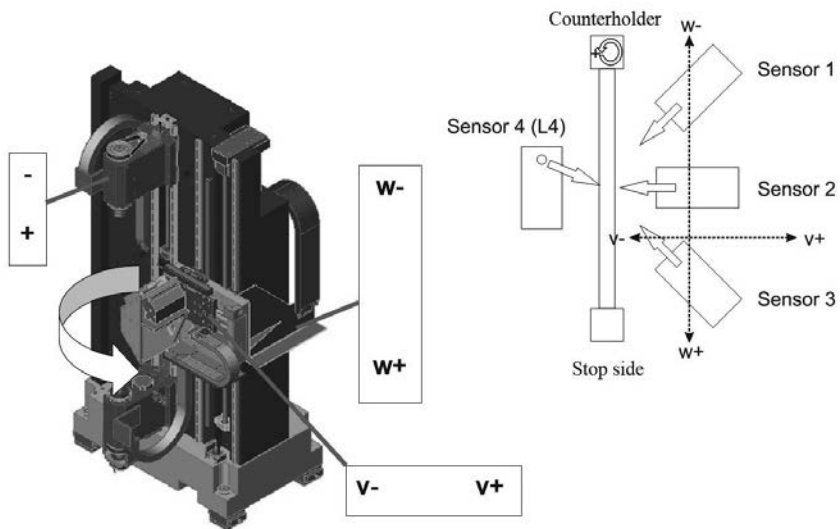


Bild 2: Laser-Messmaschine zur inline-Messung von Nockenwellen, Quelle: nokra GmbH (2011)

Durch den Aufbau und die Steuerungstopologie der Maschine, die es ermöglicht, die Daten mehrerer Sensoren exakt zu einander synchronisiert aufzunehmen, können die Messdaten unterschiedlicher Sensoren, die auf unterschiedlichen Geometrieelementen der Nockenwelle antasten, untereinander in Bezug gesetzt werden. Konkret kann beispielsweise die Kontur einer Nocke mit einem radial angeordneten „Sensor 2“ aufgenommen werden, während eine Passfedernut in einem Endstück als möglicher Winkelbezug mit einem „Sensor 4“ erfasst wird.

Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch die radiale Antastung einer Nockenumfangsline mit einem Lasertriangulationssensor.

Lasertriangulationsmessung

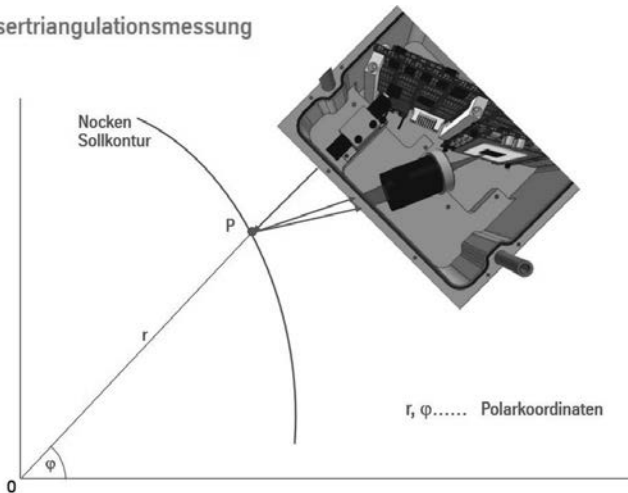
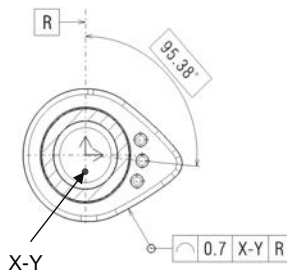


Bild 3: Lasertriangulationssensor und Polarkoordinaten, Quelle Sensor: nokra GmbH (2011)

Die Nockenwelle wird dabei zwischen Spitzen in der Messmaschine gespannt. Durch Rotation der Nockenwelle um den 0 Punkt – im Beispiel ist das die Achse X-Y – werden die Messdaten in radialer Richtung aufgenommen.

Die Daten werden untereinander synchronisiert erfasst und wenn nötig in das Bezugssystem der Nockenwelle transformiert (Exzentrizitätskorrektur). Wenn das Bezugssystem die Zentren der Welle sind, ist keine Exzentrizitätskorrektur erforderlich.



Das Messergebnis beinhaltet:

- Effektive Form der Nocke
- Effektive Lage zur Achse X-Y
- Effektiver Winkel zum Be-

Bild 4: Eintragsbeispiel Nockenform

3. Fallbeispiel 2: Taktile Messung geschliffene Nockenform

Die Nockenwelle wird zwischen den Zentren der Zylinderkoordinaten - Messmaschine gespannt. Nach der Datenaufnahme liegen die Rohdaten in Maschinenkoordinaten vor. Die Daten werden durch eine Exzentrizitätskorrektur auf die Bezugsachse A-B umgerechnet. Diese wird beispielsweise durch die Kreismittelpunkte benachbarter Radiallagerstellen gebildet. Damit enthält der Formfehler auch die Exzentrizität zur Bezugsachse. Die Grundkreismerkmale und der Nockenwinkel werden dabei separat betrachtet, um die Bearbeitungsmaschine entsprechend korrigieren zu können. Im Bild 5 sind die Nockensollkontur und die dazugehörige Rollentaster Erhebung dargestellt. Wenn sich die IST Kontur mit der SOLL Kontur deckt, wird die Rollentaster Erhebung rechtwinklig auf die Kontur zurückgerechnet und entspricht somit der Abweichung laut ISO 1101.

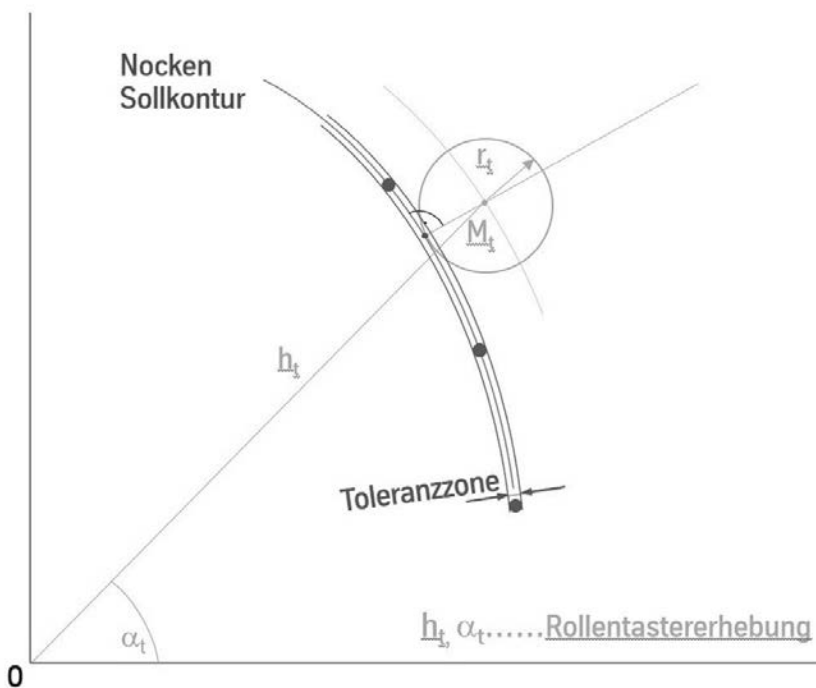


Bild 5: Anlagepunkt Tastrad rechtwinklig zur Sollkontur

Durch den Formfehler liegt der tatsächliche Berührungspunkt bei α_p und der Abstand des Tastrades zum Nullpunkt liegt bei h_t .

In diesem Fall ist der Rechte Winkel zur Tangente nicht mehr gegeben. Die Auslenkung des Tastrades entspricht dem Formfehler, jedoch an einer anderen Winkelposition. D.h., das Tastrad läuft durch den geänderten Berührungspunkt im Winkel vor oder nach.

Im Prinzip bildet diese Form der Auswertung funktional das Verhalten des Rollenstößels im Ventiltrieb, also den realen Einsatzfall, nach. Dies ist dann gegeben, wenn der Tasterradius r_t auch dem im Ventiltrieb verwendeten Rollenradius entspricht. In den meisten Fällen wird mit einem Standard Tastrad gearbeitet und die Erhebungswerte auf dieses umgerechnet.

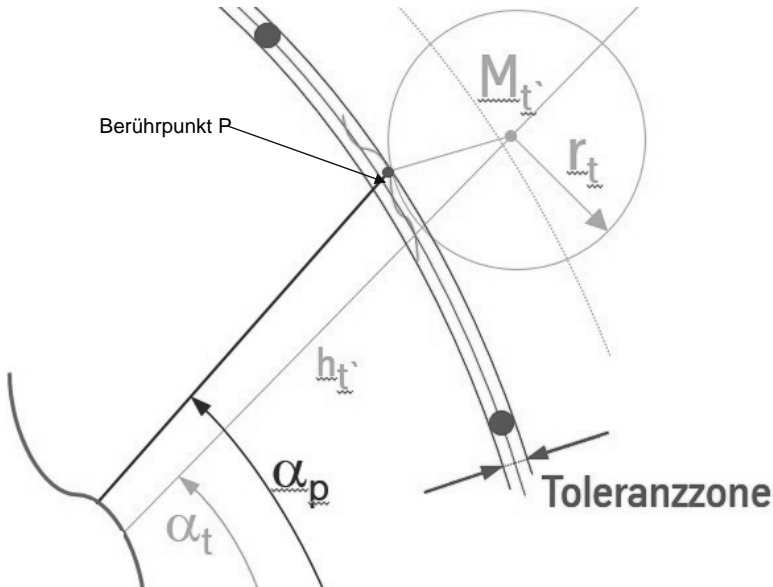


Bild 6: Anlagepunkt Tastrad bei Formfehler nicht rechtwinklig zur Sollkontur

Eintragungsbeispiel:

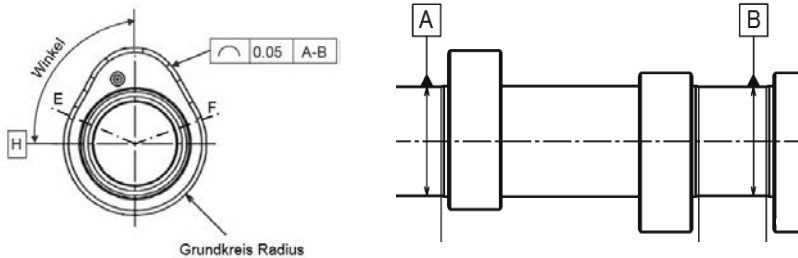


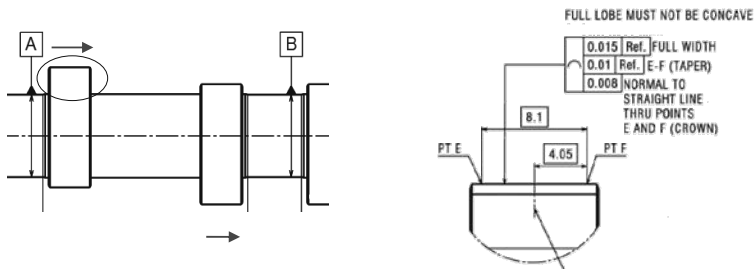
Bild 7: Eintragungsbeispiel Linienform zu einem Achsbezug

Das Messergebnis beinhaltet:

- ➔ Effektive Form der Nocke im Bereich der Erhebung. Zwischen Punkt E und F
- ➔ Effektive Lage zu Achse A-B

4. Fallbeispiel 3: Formabweichung in axialer Richtung

Die Nockenwelle wird auch hier zwischen den Zentren der Zylinderkoordinaten - Messmaschine gespannt und die Achsbezüge gemessen. Anschliessend wird die Nocke in axialer Richtung abgefahren. Zumeist geschieht dies im Bereich der Nockennase, also am höchsten Punkt. Da die Nocken auch in axialer Richtung toleranzbehaftet sind, wird nicht die komplette Nockenbreite abgescant. Bei der anschliessenden Berechnung der Merkmale werden diese auf die gesamte Nockenbreite interpoliert.



Ref. = A-B

Bild 8: Skizze Datenaufnahme und Eintragungsbeispiel

Die Nocke wird zwischen den Punkten E und F in axialer Richtung gescannt. Dies ergibt die Ist Kontur.

In die aufgenommenen Daten wird eine Best fit Parabel eingepasst. Die Höhe h der Parabel im rechten Winkel zur Geraden die durch die Punkte E-F geht, ist die Balligkeit.

Für das Merkmal Parallelität wird die Referenzachse A-B parallel durch den niedrigsten Punkt und parallel durch den höchsten Punkt verschoben. Die Distanz H ist in diesem Beispiel das Ergebnis für die Parallelität. H_F ist die interpolierte Parallelität auf die gesamte Nockenbreite (FULL WIDTH).

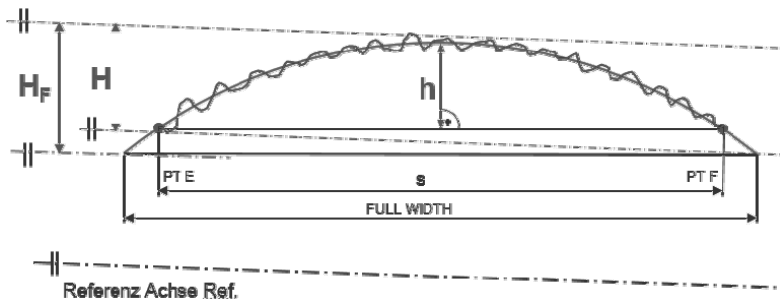


Bild 9: Skizze Datenaufnahme und Interpretation

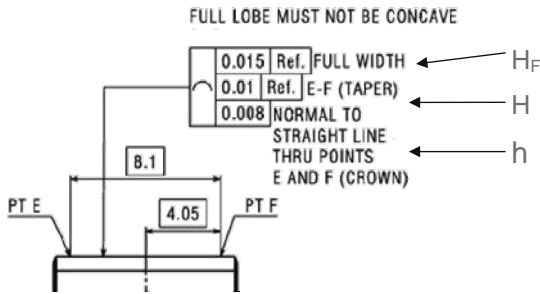


Bild 10: Eintragsbeispiel mit Bezug auf die Messergebnisse.



VDE Mess- und
Automatisierungstechnik

ISBN 978-3-18-092285-0

<https://doi.org/10.51202/9783180922850> - Generiert durch IP 218.73.218.36, am 18.01.2028, 02:24:48. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede unberechtigte Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts in Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.