

PTB

Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft

mitteilungen

4. 2007

Themenschwerpunkt
Koordinatenmesstechnik



Koordinatenmesstechnik als Schlüsseltechnologie der mechanischen Produktion – Herausforderungen für die PTB

Heinrich Schwenke¹, Frank Härtig², Ulrich Neuschaefer-Rube³, Otto Jusko⁴, Jürgen Hirsch⁵

1 Einleitung

Die Koordinatenmesstechnik hat sich zu einer zentralen Technologie für die Qualitätssicherung und für die Steuerung einer modernen mechanischen Produktion entwickelt. Die PTB hat die Entwicklung der Koordinatenmesstechnik von Anfang an begleitet und die Industrie bei der messtechnischen Absicherung, der Erhöhung der Messgenauigkeit, der Entwicklung von neuen Verfahren und bei der Erarbeitung von Normen maßgeblich unterstützt. Im Folgenden werden nach einem kurzen Rückblick die Herausforderungen für die Koordinatenmesstechnik diskutiert und die Aktivitäten der PTB eingeordnet. Zentrale Themengebiete werden in den folgenden Fachbeiträgen dieses Bandes weiter vertieft.

2 Rückblick

Ihren Ursprung hat die moderne Koordinatenmesstechnik in den 70er Jahren, als die ersten numerisch gesteuerten Messmaschinen mit mechanischer Antastung entwickelt wurden. Sie begannen zunehmend, manuelle Messmittel und Lehren in der Qualitätssicherung zu ersetzen. Von Anfang an spielte die Frage der Messgenauigkeit eine zentrale Rolle in der Entwicklung, da sich schon die ersten Geräte mit jahrzehntelang erprobten Verfahren vergleichen mussten.

Die Entwicklung von Verfahren zur Prüfung der Geräte [1] und die zugehörige Normung hat das Vertrauen der Anwender gefördert und die Grundlage für die heutige Verbreitung gelegt. Allein in Deutschland sind heute etwa 25 000 Koordinatenmessgeräte im Einsatz. Der weltweite Umsatz mit dieser Technik liegt bei etwa 1,5 Milliarden Euro pro Jahr. Deutsche Unternehmen sind auf diesem Markt zum Teil mit Marktführerschaft positioniert; die Messtechnik ist für Deutschland ein wichtiges Exportgut. Die PTB hat die Entwicklung der Koordinatenmesstechnik von Anfang an maßgeblich beeinflusst. Eine Vielzahl heute weit verbreiteter Prüfkörper wurde in der PTB entwickelt. Im Jahr 1973 wurde das erste Gerät in der PTB beschafft und

mit der Gründung des Fachbereiches Koordinatenmesstechnik im Jahre 1988 wurde damit ein Schwerpunkt der Abteilung Fertigungsmesstechnik aufgebaut. Heute ist der Fachbereich mit etwa 30 Mitarbeitern und insgesamt 7 Koordinatenmessgeräten verschiedensten Typs in der internationalen Forschungslandschaft sehr gut positioniert, um den Herausforderungen der Zukunft in Zusammenarbeit mit der deutschen Industrie zu begegnen.

3 Herausforderungen für die PTB

Der Fortschritt der Koordinatenmesstechnik war in den vergangenen Jahren getrieben durch die Anforderungen der Anwender und die Entwicklungen in der Elektronik und Optoelektronik. Aus den Trends der letzten Jahre resultieren für die PTB Herausforderungen, die im Folgenden zusammengefasst werden.

3.1 Vielfalt von Messprinzipien

Heute sind unter dem Oberbegriff der Koordinatenmesstechnik die unterschiedlichsten Messverfahren zusammengefasst, die 3D-Geometrieinformation erfassen. Das Spektrum der eingesetzten Messprinzipien umfasst:

- Konventionelle Koordinatenmessgeräte mit mechanischen Achsen und taktile und/oder optischer Messwerterfassung [2, 3],
- Optische 3D-Messverfahren wie Photogrammetrie- und Streifenprojektionssysteme [4, 5, 6],
- Mobile Messtechnik wie Messarme, Lasertracker oder Laserradar [7],
- Optisch/mechanische Messgeräte für die Mikromesstechnik wie Weisslichtinterferometer, konfokale Mikroskope oder Flächenfokussysteme [4, 5],
- Produktionsintegrierte Messtechnik auf Werkzeugmaschinen, in Fertigungsstraßen und durch Roboter [8],
- Dimensionelle Computertomographie [9, 10].

1 Dr. Heinrich Schwenke, Vorstand etalon AG, Braunschweig
E-Mail: heinrich.schwenke@etalon-ag.de

2 Dr. Frank Härtig, Leiter des PTB-Fachbereichs Koordinatenmesstechnik
E-Mail: frank.haertig@ptb.de

3 Dr. Ulrich Neuschaefer-Rube, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Optische Sensorik“
E-Mail: ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de

4 Dr. Otto Jusko, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Geometrische Normale“
E-Mail: otto.jusko@ptb.de

5 Dipl.-Ing. Jürgen Hirsch, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Messtechnische Dienstleistungen“
E-Mail: juergen.hirsch@ptb.de

Die PTB unterstützt die Industrie sowohl bei der messtechnischen Weiterentwicklung neuer Messverfahren [7, 11, 12, 13] als auch bei der Rückführung [7, 10, 14, 15, 16] der unterschiedlichen Systeme. Den Wunsch der Anwender, unterschiedliche Techniken direkt vergleichen und alternativ einsetzen zu können, wird zunehmend durch einheitliche Schnittstellen in Software (I++) [17] und Hardware (OSIS) [18] unterstützt. Auch in der Normung ist man bemüht, diese Vergleichbarkeit durch einheitliche Testverfahren zu ermöglichen. Die messtechnische Kompetenz der PTB muss auch in Zukunft die wichtigsten industriellen 3D-Messverfahren abdecken. Nur so kann die PTB in Zusammenarbeit mit der Industrie ihre Kernaufgaben weiter erfüllen.

3.2 Steigerung der Genauigkeit und gesicherte Rückführung

Ein zentrales Arbeitsgebiet der PTB ist seit jeher die Steigerung der Genauigkeit von Messungen. Dies ist nicht nur notwendig, um die Rückführbarkeit von Messungen mit höchster Genauigkeit bereitzustellen, sondern bildet auch die Grundlage für eine Reihe von industriellen Kooperationen [19]. Die große Erfahrung der Mitarbeiter und die sehr gute gerätetechnische Ausstattung sind ein dafür wesentliches Alleinstellungsmerkmal der PTB in der messtechnischen Forschung. Die Kalibrierung von Bezugsnormalen für die Koordinatenmesstechnik wie Endmaßen, Ringen, Zylindern und Kugeln wird von der PTB mit Genauigkeiten realisiert, die im internationalen Vergleich führend sind. Damit sorgt die PTB für das messtechnische Fundament auch ihrer eigenen Forschungsarbeiten. Durch die Einführung der Kugelplatte [20] und insbesondere durch die Entwicklung der numerischen Korrektur von KMG [21] hat die PTB wichtige Beiträge zur Genauigkeitssteigerung der Koordinatenmesstechnik geleistet. Auch in der Zahnradmesstechnik hat die PTB wichtige Impulse gesetzt. Die Getriebetechnik ist immer noch eine Schlüsseltechnologie der deutschen Wirtschaft und als europäisch führende Stelle für die Rückführbarkeit von Verzahnungsmessungen arbeitet die PTB mit Nachdruck und industrieller Kooperation daran, die Messunsicherheit von Verzahnungsmessungen in der Industrie weiter zu senken [22, 23].

Seit den 90er Jahren ist das so genannte „Virtuelle KMG“ ein Schwerpunkt der Arbeit im Fachbereich. Es ermöglicht durch numerische Simulation die Berechnung von aufgabenspezifischen Messunsicherheiten und damit die Rückführung von fast beliebigen Messungen mit KMG [24, 25]. Diese Entwicklung wird zusammen mit internationalen Partnern aus der Messtechnik mit Nachdruck vorangetrieben

und auf neue Anwendungsfelder wie die mobile Messtechnik und die Zahnradmesstechnik übertragen. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung des „LaserTRACERS“ zusammen mit dem National Physical Laboratory in England [13]. Er kann die Messgenauigkeit von KMG für einige Messaufgaben auf deutlich unter einem Mikrometer steigern und außerdem für die Kalibrierung von KMG und Werkzeugmaschinen mit höchster Genauigkeit eingesetzt werden.

3.3 Validierung von Auswertesoftware

Mit zunehmender Komplexität der Auswerteargorithmen ist auch deren Einfluss auf die Genauigkeit eines Messergebnisses gestiegen [26]. Ein zweckmäßiges Mittel, das Vertrauen in eine Auswertesoftware herzustellen, ist deren Prüfung anhand von Testdaten und deren Referenzergebnisse. In Analogie zu geometrischen Normalen, die das gesamte Messgerät prüfen, sind Testdaten als numerische Normale zu betrachten. Sie testen stichprobenartig die Algorithmen. Die Eigenschaften der Testdaten bestehen jedoch darin, dass sie nicht altern, einfach zu erweitern sind und mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand ausgewertet werden können. Hierdurch ist es möglich, das Spektrum der Testdaten stetig auszubauen. Die PTB bietet seit 1993 als erstes metrologisches Institut eine Validierung für die Auswertung von Regelgeometrien an [27]. Der rege Zuspruch und die ca. 100 getesteten Auswerteprogramme für Koordinatengeräte zeigen das große Interesse der Industrie. Treibender Faktor waren und sind oftmals die Qualitätsrichtlinien der Messgerätehersteller oder deren Kunden. Sie finden innerhalb Europa in der PTB die einzige Anlaufstelle, an der ihre Software geprüft werden kann. Seit 2005 bietet die PTB zusätzlich einen Softwaretest für Verzahnungsalgorithmen an [27]. In der Zukunft sollen Testdatensätze auch für weitere Anwendungsfälle, wie z.B. die Messung von Freiformflächen angeboten werden.

3.4 Messung kleinster bis größter Strukturen

Die Koordinatenmesstechnik umschließt heute die Messung von Strukturgrößen von unter 0,1 mm bis zu über 100 m. Beispiele für kleinste Bauteile sind z.B. MEMS, Einspritzsysteme oder Bauteile für die Nachrichtentechnik. Auf der anderen Seite des Spektrums steht die Messung ganzer Flugzeuggrümpfe, Satelliten, Antennen oder Teleskope durch die mobile Messtechnik. Das Spektrum dazwischen umfasst eine fast unbegrenzte Anzahl von Messaufgaben aus dem Automobilbau, dem Maschinenbau, der Medizintechnik und dem Konsumer-Markt. Die messtechnischen Herausforderungen sind jedoch je nach Strukturgröße verschieden: Während

bei der Messung kleiner Strukturen der Antastvorgang oder die Detektion der Oberfläche die eigentliche Herausforderung darstellt, ist es bei der Messung großer Strukturen in der Regel die längenabhängige Messunsicherheit, die die Genauigkeit der Messverfahren begrenzt. Sowohl bei der Antastung mikromechanischer Bauteile als auch bei der Messung größter Strukturen werden deshalb zunehmend optische Verfahren eingesetzt. Die PTB versucht, skalierbare Lösungen für Rückführbarkeit in allen Bereichen anzubieten. Zielrichtung ist die Entwicklung und Validierung grundsätzlicher Ansätze, die unabhängig von dem konkreten Messproblem zur Anwendung kommen können.

3.5 Vollständige Erfassung der Werkstückoberfläche

Bei fast allen Verfahren der Koordinatenmesstechnik wird die Werkstückoberfläche nur an Einzelpunkten erfasst. Aus den erfassten Einzelpunkten wird dann auf die Gestalt der Fläche und – im Falle von tolerierten Bauteilen – auf die Erfüllung der spezifizierten Anforderung geschlossen. Durch diese nur stichprobenhafte Antastung entsteht ein zum Teil bedeutsamer Unsicherheitsanteil. Deshalb ist es ein Bestreben in der modernen Koordinatenmesstechnik, die Anzahl der erfassten Punkte bei gleicher Messzeit zu erhöhen, um so zu einer möglichst vollständigen Erfassung der Werkstückoberfläche zu kommen. Bei antastenden Verfahren wird die Punkteanzahl durch so genanntes Scanning erhöht, also das kontinuierliche Erfassen von Punkten, während sich das Tastelement über die Oberfläche bewegt. Dadurch wird aber nur entlang einer Linie eine hohe Punktdichte erreicht. Andere Verfahren, wie z.B. die optische Streifenprojektion [6] oder die Computertomographie (CT) [9, 10], können jedoch ohne Erhöhung der Messzeit flächenhaft eine sehr hohe Punktdichte erzielen. Auch in der Verzahnungsmesstechnik

findet eine Tendenz zur Erfassung der Zahngeometrie entlang der Flanken- und Profillinie hin zu einer flächenhaften Beschreibung und Erfassung statt [28 - 30].

Ziel der PTB ist es, den Trend der flächenhaften Antastung bei der Bereitstellung und Kalibrierung von Normalen, bei der Entwicklung neuer Messtechnik und bei der Entwicklung des „Virtuellen KMGs“ [24, 25] zu berücksichtigen, um den Anforderungen der Industrie in diesem Bereich auch in der Zukunft gerecht zu werden.

3.6 Steigende Produktionsnähe

Zunehmend wird in modernen Produktionen die Messtechnik zum integralen Bestandteil der Fertigungslinie. Grund dafür sind zum einen die stetig steigenden Qualitätsanforderungen, denen sich Hersteller von Produkten, insbesondere aber auch ihre Zulieferer ausgesetzt sehen. Dies erfordert in nicht seltenen Fällen eine 100%-Kontrolle. In vielen Hochtechnologiebereichen können zudem Produktionsabläufe ohne kontinuierliche Erfassung durch Messtechnik und nachfolgende Regelung nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden. Beispiele hierfür sind die Karosseriefertigung [8] oder die Fertigung von Einspritzsystemen. Eine weiterer Trend, der die Einbindung von Messtechnik in die Produktionsabläufe forciert, ist die zunehmende Verlagerung von der Massenproduktion von Gütern hin zur individualisierten Produktion, also die Herstellung von ähnlichen, aber nicht gleichen Produkten in einer Fertigung. Dies verbietet den Einsatz von starren Lehren und erfordert die schnelle Umstellung der Produktion ohne langwieriges „Einfahren“. Auch dafür ist eine direkte Rückkopplung der Produktionsparameter durch integrierte und flexible Messtechnik notwendig.

Für die Messtechnik heißt dies, dass sie den Bedingungen einer Produktionsumgebung gewachsen sein muss: auch bei Temperaturschwankungen und Temperaturgradienten im



Anzeige AfM
1/4 Seite quer

Raum, Erschütterungen, Schall und Verschmutzung darf die zulässige Messunsicherheit nicht überschritten werden. Die PTB stellt sich dieser Herausforderung mit der Planung eines weltweit einzigartigen Referenzlabors, in dem sich widrige Umgebungsbedingungen reproduzierbar simulieren lassen. Dort sollen grundlegende Untersuchungen zum Umgebungseinfluss auf produktionsnahe Messprozesse durchgeführt werden [8]. In Zusammenarbeit mit den Herstellern und Anwendern von Fertigungsmesstechnik sollen zudem Verfahren entwickelt werden, um die Einflüsse effektiv zu verringern.

3.7 Unterstützende Normung

Normen leisten heute einen wichtigen Beitrag für den Warenverkehr und die industrielle Kooperation. Die Normungsarbeit bildet aus Sicht der PTB ein wesentliches Fundament für die Beziehung zwischen Hersteller und Anwender von Messtechnik als auch für die Anwendung von Koordinatenmesstechnik in der industriellen Praxis. Neben den großen Industrieländern, die aktiv an der Normung mitarbeiten, profitieren insbesondere auch industrielle Schwellenländer von den Ergebnissen, da ihnen durch die Normung ein abgestimmtes Kompendium des aktuellen Wissens zur Verfügung steht. Im Bereich der Koordinatenmesstechnik gibt es sowohl auf nationaler Ebene als auch auf internationaler Ebene eine sehr produktive Normenarbeit, die von Messgeräteherstellern, Anwendern und Forschungsinstitutionen wie der PTB geleistet wird. Der Fachbereich Koordinatenmesstechnik stellt dabei zurzeit nicht nur den Obmann des nationalen Gemeinschaftsausschusses 3.31 von VDI und DIN, sondern vertritt die Interessen des nationalen Gremiums auch durch einen Mitarbeiter in der internationalen Normungsarbeit. Ziel der PTB ist es dabei insbesondere, die Normen im Bereich der Koordinatenmesstechnik so zu gestalten, dass sie wesentliche metrologische Anforderungen erfüllen, aber auch für einen industriellen Anwender umsetzbar sind. Die PTB arbeitet auch darauf hin, dass die Normen offen genug gefasst werden, so dass Sie den technischen Fortschritt nicht hemmen. Insbesondere im Hinblick auf das breite Spektrum von Messprinzipien und Werkstückgrößen wird versucht, eine Vergleichbarkeit der Verfahren unabhängig von Ihrem physikalischen Messprinzip zu erreichen.

4 Fazit und Ausblick

Von der Mikrotechnik bis zum Flugzeugbau wird die Koordinatenmesstechnik heute als zentrales Instrument der Qualitätssicherung in der mechanischen Produktion eingesetzt. Es kommt eine Vielzahl von Messprinzipien zum Einsatz.

Optische Messverfahren gewinnen dabei zunehmend an Bedeutung. Um Ihren Auftrag zur messtechnischen Absicherung und Rückführung bestehender und neuer Messverfahren bestmöglich wahrzunehmen, verfügt der Fachbereich Koordinatenmesstechnik über erfahrenes Personal, hochwertige apparative Ausstattung und eine sehr gute Verzahnung zu anderen Fachabteilungen der PTB. Dadurch können die metrologischen Grundlagen mit hoher Qualität zu Verfügung gestellt werden, um auf der anderen Seite durch Kooperationen mit Industriepartnern, Universitäten und Schwesterinstituten neue Entwicklungen zu begleiten und voranzutreiben.

Es ist das Bestreben der PTB, Routinekalibrierungen möglichst durch private Laboratorien im Rahmen des DKD durchführen zu lassen. So wurden in der PTB entwickelte Verfahren zur Kalibrierung von Kugelplatten, Stufenendmaßen, Zahnrad- und Profilnormalen und insbesondere von Werkstücken auf Basis des „Virtuellen KMG“ bereits erfolgreich transferiert. Dadurch werden im wissenschaftlichen Bereich Freiräume geschaffen. Diese sollen in der Zukunft für neue Aufgabenschwerpunkte wie z.B. die Mikromesstechnik, die produktionsnahe Messtechnik, die Computertomographie und die Entwicklung von numerischen Normalen für den Test komplexer Messsoftware genutzt werden.

Einen wichtigen Beitrag zu Arbeit des Fachbereiches bildet auch die Kooperation mit ausländischen Instituten und Universitäten. Der regelmäßige fachlichen Austausch in internationalen Gremien und Organisationen und Forschungsaufenthalte von Wissenschaftlern z.B. aus Italien, den Niederlanden, Dänemark, Polen, China oder Brasilien in der PTB führen zu einer sehr guten internationalen Verzahnung. Der Fachbereich Koordinatenmesstechnik sieht sich unter den derzeitigen Randbedingungen gut gerüstet, auch in einer zukünftigen europäischen Forschungslandschaft eine tragende Rolle zu spielen.

Literatur

- [1] Neumann, H.J.: Koordinatenmesstechnik im industriellen Einsatz – 10 Jahre Innovation, Verlag Moderne Industrie, München, 2000, ISBN 3-478-93212-2
- [2] Pfeifer, T.: Koordinatenmesstechnik für die Qualitätssicherung, VDI-Verlag Düsseldorf, 1992, ISBN 3-18-401212-3
- [3] Christoph, R., Neumann, H. J.: Multisensor-Koordinatenmesstechnik, Verlag Moderne Industrie, München, 2003, ISBN 3-478-93290-4
- [4] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Kunzmann, H., Pfeifer, T.: Optical methods for dimensional metrology in production

- engineering, CIRP Annals: 51 (2002), 2, 685–699, ISBN 3-905277-38-7 ; ISSN 0007-8506
- [5] Neuschaefer-Rube, U., Wendt, K., Ehrig, W.: Optische Sensoren für die Koordinatenmesstechnik – Prinzipien und Prüfung, PTB Mitteilungen 117, S. 380–389 (in diesem Heft)
- [6] Tagungsband „Optische 3D-Messtechnik“ zum BMBF-Förderschwerpunkt „Elektronisches Auge“, Jena, 1996
- [7] Härtig, F., Keck, C., Kniel, K., Schwenke, H., Wäldele, F., and Wendt, K.: Tracking Laser Interferometer for Coordinate Metrology, Technisches Messen 71 (2004), pp. 227–232
- [8] Wendt, K., Keck, Ch., Schwenke, H.: Prüfprozesseignung von Inline-Messtechnik im Karosseriebau, PTB Mitteilungen 117, S. 417–424 (in diesem Heft)
- [9] Bartscher, M., Hilpert, U., Goebbels, J., Weidemann, G., Puder, H., Jidav, H.-N.: Einsatz von Computertomographie in der Reverse-Engineering Technologie – Vollständige Prozesskette am Beispiel eines Zylinderkopfes –, Materialprüfung (MP), 6/2006, S. 305–311
- [10] Bartscher, M., Hilpert, U.: Industrielle Computertomographie- von der Defekterkennung zum Messmittel für die Geometriebestimmung, VDI-Berichte 1914, 187 - 199, VDI-Verlag Düsseldorf, 2005, ISBN 3-18-091914-0
- [11] Schwenke, H., Weisskirch, Ch., Kunzmann, H.: Opto-taktile Sensor zur 2D- und 3D-Messung kleiner Strukturen mit Koordinatenmessgeräten, Technisches Messen 66 (1999), 12, 485–489
- [12] Neuschaefer-Rube, U., Wissmann, M.: Taktile-optischer Mikrotaster – Anordnungen und Messmethoden, PTB Mitteilungen 117, S. 40–46 (in diesem Heft)
- [13] Kniel, K., Schwenke, H.: Genauigkeitssteigerung und Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten mit dem LaserTRACER, PTB Mitteilungen 117, S. 372–379 (in diesem Heft)
- [14] Neugebauer, M., Neuschaefer-Rube, U.: A new micro artefact for testing optical and tactile sensors, Proc. 5th EUSPEN international conference, Vol. 1, 201–204, 2005, ISBN 92-990035-0-5
- [15] Jusko, O., Lüdicke, F.: Novel multi-wave standards for the calibration of form measuring instruments, Proc. 1st EUSPEN, Bremen, Vol. 2, ISBN 3-8265-6085-X, 1999, 299–302
- [16] Neugebauer, M., Jusko, O., Wäldele, F.: Geometrical Standards for Contour Measuring Instruments, Proc. ASPE Annual Meeting 2003, Portland, Oregon, USA
- [17] Aktuelle Informationen unter www.iacmm.org
- [18] Boucky, O., Ercole, M., Keferstein, C.P., Wallace, D., Züst, R.: Gemeinsamer Standard – Integration optischer Sensoren in Koordinatenmessgeräte, QZ 48, Heft 5, 48 (2003)
- [19] Jusko, O., Neugebauer, M.: Grundlagen der Rückführung von Koordinatenmessgeräten, PTB Mitteilungen 117, S. 354–362 (in diesem Heft)
- [20] Kunzmann, H., Trapet, E., Wäldele, F.: Results of international comparison of ball plate measurements in CIRP and WECC, Annals of the CIRP, Vol. 44/1/1995 (1995), p. 479–483
- [21] Trapet, E., Wäldele, F.: A reference object based method to determine the parametric error components of co-ordinate measuring machines and machine tools, Measurement, 9 (1991), p. 17–214
- [22] Wäldele, F., Härtig, F.: Tendenzen in der Verzahnungsmesstechnik, VDI-Berichte 1673 (2002), S. 113 - 123
- [23] G. Goch, G.: Verzahnungsmesstechnik – ein unverzichtbarer Bestandteil einer Schlüsseltechnologie, VDI-Berichte 1880 (2005), S. 1–23
- [24] VDI/VDE 2617, Blatt 7, Genauigkeit von Koordinationsmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation, 2006–04
- [25] Wäldele, F., Schwenke, H.: Online-Ermittlung der Messunsicherheit mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät, DIN Mitteilungen 11 (2000), S. 797–803, Beuth Verlag, Berlin
- [26] Porta, C., Wäldele, F.: Testing of three coordinate measuring machine evaluation algorithms, Commission of the European communities, BCR report EUR 1090 EN, 1986
- [27] Wäldele, F., Bittner, B., Busch, K., Drieschner, R., Elligsen, R.: Testing of coordinate measuring machine software, Precision Engineering Vol. 15 No 2, April 1993
- [27] Buschhoff, K., Härtig, F.: Zertifizierung von Verzahnungssoftware, VDI-Berichte 1880 (2005), S. 187–198
- [28] W. Lotze, W., F. Härtig, F.: 3D Gear Measurement by CMM, In: Laser Metrology and Machine Performance (2001), p. 333–344
- [29] W. Lotze, W.: Zahnradmessung mit Koordinatenmessgeräten, Grundlagen und Algorithmen für die 3D-Auswertung nach dem Flächenmodell, 2. Auflage ISBN 3-00-015962-2, Eigenverlag, Dresden 2005
- [30] G. Goch, G., A. Günther, A.: Flächenhafte Auswertung von Messdaten modifizierter Zylinderräder, VDI-Berichte 1880 (2005), S. 165–177

Grundlagen der Rückführung von Koordinatenmessgeräten

Otto Jusko¹, Michael Neugebauer²

1 Einleitung

Die Rückführung von Koordinatenmessgeräten (KMG) ist ein metrologisch anspruchsvolles und industriell sehr bedeutendes Feld. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) hat in diesem Aufgabenfeld neben ihrer Aufgabe, die Spitze und damit den Bezug der Rückführungskette oder Kalibrierpyramide bereitzustellen (Bild 1), schon seit vielen Jahren Verfahren und Normale entwickelt und in Normen und Richtlinien umgesetzt, die auch von industriellen Anwendern direkt genutzt werden können. Dies gilt sowohl für anspruchsvolle Kalibrieraufgaben in DKD-Laboratorien wie auch für die tägliche Rückführung von dimensionellen Messungen in der Fertigung. Die Rückführung von KMG durch Prüfkörper hat sich in der Praxis sehr bewährt und ist aus Sicht der PTB eine praktikable Möglichkeit zur Weitergabe der SI-Einheit Länge für industrielle Anwender. Aus Sicht des Anwenders stellen idealisierte Prüfkörper standardisierte Messaufgaben dar, die stellvertretend für seine eigene Messaufgabe z.B. aus der Fertigungsmesstechnik stehen.

2 Definitionen und Grundlagen

Unter dem Begriff „Koordinatenmessgerät“ wird im Folgenden ein beliebiges Gerät zum Erfassen von räumlichen Koordinaten zur Messung von Maßen oder Form- und Lageabweichungen verstanden. Daher können außer dreidimensionalen Koordinatenmessgeräten (KMG) auch Formmessgeräte und Konturenmessgeräte zu den KMG gezählt werden. Die Erfassung der Koordinaten kann beliebig, also z.B. taktil (=mechanisch antastend, KMG mit Taster), lichteoptisch (Photogrammetrie, KMG mit Videosystem, Weißlichtinterferometer, Triangulationssensor, etc.), röntgenoptisch (Röntgen-Computertomografie) erfolgen. Rauheitsmessgeräte, die ebenfalls unter diese erweiterte Definition fallen würden, werden nicht betrachtet. Den Geräteklassen ist dabei gemeinsam, dass sie im praktischen industriellen Einsatz in der Regel über kalibrierte Prüfkörper zurückgeführt werden. Die Kalibrierung von Prüfkörpern für dreidimensionale KMG erfolgt dabei je nach geforderter Messunsicherheit sowohl auf ein- als auch dreidimensionalen Geräten. Die genauere Geräteklasse unterstützt mithin die universellere.

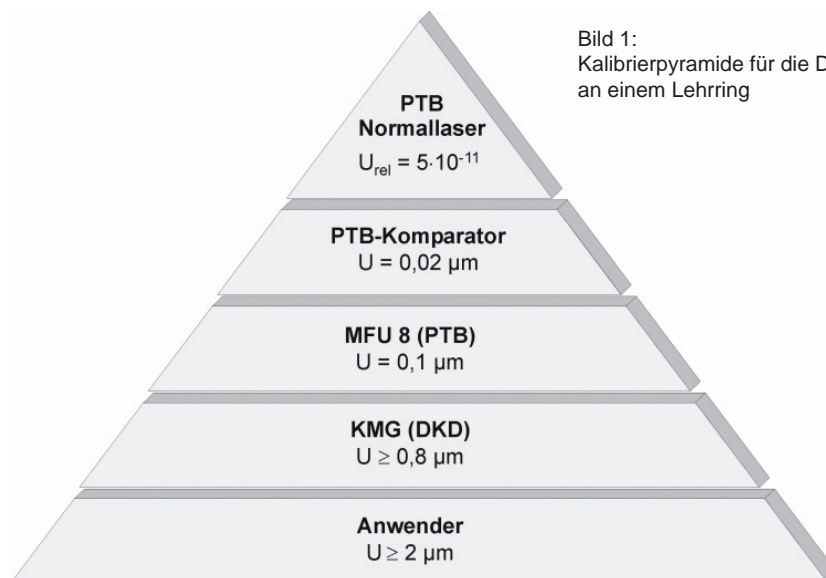


Bild 1:
Kalibrierpyramide für die Durchmessermessung an einem Lehring

1 Dr. Otto Jusko
Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Geometrische Normale“
E-Mail: otto.jusko@ptb.de

2 Dr. Michael Neugebauer
Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe „Geometrische Normale“
E-Mail: michael.neugebauer@ptb.de

3 Herausforderung Genauigkeitssteigerung

Eine besondere Herausforderung für die PTB besteht dabei darin, dass sie im Prinzip die gleichen KMG verwendet, die auch von den industriellen Anwendern genutzt werden. Die zur Rückführung nötige Genauigkeitssteigerung der PTB-Messung muss daher durch besondere Messverfahren, hochstabile Umgebungsbedingungen und geeignete Hard- und Softwareerweiterungen, wie etwa spezieller Auswertesoftware, erreicht werden.

Die PTB verfügt zudem über ein hohes Maß an Kontinuität in der Messtechnik. So werden z.B. einige Messverfahren schon seit Jahrzehnten mit anderen Nationalen Metrologieinstituten (NMI) europa- und weltweit verglichen. So können langfristige Drifteffekte oder unbekannt systematische Abweichungen identifiziert werden. In letzter Zeit ist diese Zusammenarbeit durch den MRA („Mutual Recognition Agreement“) und die dadurch initiierten CIPM-Schlüsselvergleichsmessungen („Key Comparisons“) formalisiert worden.

der Spindelfehler eines Rundheitsmessgeräts vollständig eliminiert. Ein weiteres Beispiel zeigt Bild 3. Hier wurde bei der Kalibrierung eines Zylinders durch ein Umschlagverfahren eine Parallelitätskorrektur der Geradheitsmesslinien durchgeführt.

4 Rückführung von 1D-KMG

4.1 Formmessgeräte

Formmessgeräte dienen zum Messen von Formabweichungen wie Rundheit, Geradheit, Ebenheit und Zylindrizität sowie der Lageabweichung Parallelität. Formmessgeräte besitzen eine oder mehrere hochgenaue Messachsen. Die häufigste Klasse „Zylinderformmessgerät“ verfügt meistens über eine radiale R- oder X-Achse, eine Z-Achse sowie eine C-Achse, die durch einen Drehtisch oder eine Drehspindel verkörpert wird. Für ihre Rückführung ist die Einmessung der Signalübertragungskette vom Tastsystem bis zur Datenerfassung nötig. Dazu dient ein Normal mit einer signifikanten Formabweichung. Da die Drehachse bei allen Formmessgeräten die genaueste ist, wird dazu bevorzugt ein durch eine Rundheitsmessung erfassbares Normal gewählt.

Weitere Normale sind notwendig, um die Führungsabweichungen des Formmessgeräts zu prüfen. Im Prinzip könnte man bei exakter Kenntnis der Führungsprofile die Führungsabweichungen korrigieren. In den meisten Fällen ist es jedoch ausreichend, die Einhaltung bestimmter Obergrenzen sicherzustellen [2].

Moderne KMG mit Scanningeinrichtung können ebenfalls für Formmessungen eingesetzt werden. Es werden dann die gleichen Normale wie für Formmessgeräte zur Rückführung dieser Betriebsart verwendet.

4.1.1 Vergrößerungsnormale

Zu den Normalen mit gezielt verkörperter Formabweichung zählen unter anderem der Flick und das Mehrwellennormal. Beim Flick handelt es sich um einen zylindrischen Grundkörper mit Anschliff. Dadurch ergibt sich gegenüber dem Grundkreis eines axialen Zylinderschnitts eine Vertiefung, die als Maßverkörperung genutzt werden kann. Da dadurch die „Vergrößerung“ d.h. die effektive Signalübertragungskette des Formmessgeräts kalibriert werden kann, wird der Flick zu den Vergrößerungsnormalen gezählt. Ein weiterer Vertreter dieser Klasse ist das Mehrwellennormal (Bild 4). Dieses verkörpert eine oder mehrere überlagerte räumliche harmonische Wellen. Während beim Flick der Kennwert Rundheitsabweichung (RONt) ausgewertet wird, wird beim Mehrwellennormal die Höhe der Amplituden der verkörperten Wellen ausgewertet. Diese sind stabiler zu ermitteln als die Formabweichung eines Flicks [3]. Zur An-

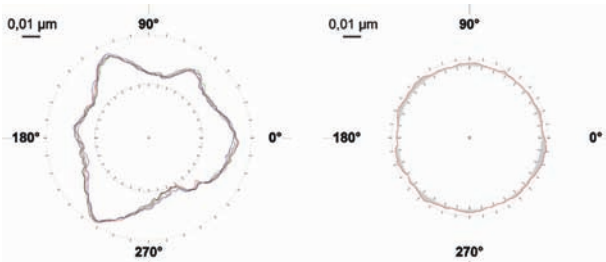


Bild 2: Messrohprofile eines Rundheitsnormals ohne (links) und nach Anwendung eines Fehlertrennverfahrens (rechts)

3.1 Selbstkalibrierverfahren

Zu den Messverfahren mit erhöhter Genauigkeit zählen insbesondere die Fehlertrenn- oder Selbstkalibrierverfahren [1]. Ein Beispiel hierzu zeigt Bild 2. Durch die Anwendung des Fehlertrennverfahrens Mehrlagenmessung wurde

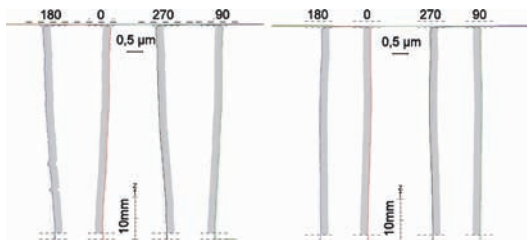


Bild 3: Geradheitsmesslinien eines Zylinders ohne (links) und nach Anwendung eines Umschlagverfahrens (rechts)

wendung und Auswertung von Messungen an Mehrwellennormalen wurde kürzlich ein EURO-MET-Projekt durchgeführt [4].



Bild 4:
Wellen auf einem Mehrwellennormal im Vergleich zu einer Büroklammer

4.1.2 Halbkugeln

Halbkugeln dienen zur Prüfung von hochgenauen Drehführungen von Formmessgeräten oder KMG. Deren Führungsabweichungen sind oft kleiner als $0,1 \mu\text{m}$. Es ist daher erforderlich, Normale mit noch geringerer Formabweichung nutzen zu können. Zur Herstellung von Halbkugeln aus Glas oder Glaskeramik können ähnliche Schleifprozesse eingesetzt werden wie zur Herstellung optischer Linsen. Diese Prozesse werden seit langer Zeit sehr gut beherrscht. Daher lassen sich auf diese Weise die qualitativ hochwertigsten Formverkörperungen fertigen, die bekannt sind. Es lassen sich Halbkugeln herstellen, deren Formabweichung im Rahmen der Messunsicherheit ($U = 6 \text{ nm}$ [5]) praktisch vernachlässigbar ist. So wurde bereits eine Halbkugel von der PTB kalibriert, deren Rundheitsabweichung $\text{RONt} = 7 \text{ nm}$ beträgt. Die Kalibrierung von Halbkugeln erfolgt mit Hilfe des so genannten Mehrlagenverfahrens [6].

4.1.3 Prüfzylinder

Prüfzylinder sind besonders präzise hergestellte Zylinder. Ihre Geradheitsabweichung beträgt typisch $< 0,1 \mu\text{m}$ und ihre Parallelität ist besser als $0,2 \mu\text{m}$ ($U = 0,1 \mu\text{m}$). Typisch ist ein Durchmesser von 20 mm und eine Länge von 100 mm . Auf der Messfläche von Prüfzylindern sind in der Regel zusätzlich zwei Flicks verkörpert. Da auch die Rundheit von Prüfzylindern Lehrenniveau besitzt ($\text{RONt} = 60 \text{ nm}$), lassen sich in einer Aufspannung fast alle Parameter eines Formmessgeräts prüfen.

Prüfzylinder werden entweder direkt mit einem unkorrigierten Formmessgerät kalibriert oder es werden Umschlagverfahren eingesetzt. Die erreichbare Messunsicherheit liegt zur Zeit bei etwa $0,1 \mu\text{m}$ für alle Parameter.

4.1.4 Kontrollsäulen

Kontrollsäulen sind größere Zylinder (z.B. $80 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ oder $100 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$) mit einer oder zwei geschliffenen Stirnflächen. Der bearbeitete Teil der Stirnfläche ist meistens als schmaler Ring ausgebildet. Kontrollsäulen dienen als Verkörperung eines Zylinders, längerer Geradheiten und Parallelitäten und als Rechtwinkligkeitsnormal. Dazu wird der Winkel der Stirnflächenebene zur Achse des Zylinders ausgewertet. Die lokalen und globalen Formabweichungen von Kontrollsäulen sind wesentlich größer als bei Prüfzylindern. Während die Formkalibrierung, die ähnlich wie bei den Prüfzylindern erfolgt, keine größeren Probleme aufwirft, stellt die hochgenaue Kalibrierung der Rechtwinkligkeit hohe Anforderungen an den Messprozess. In der PTB wird zur Kalibrierung der Rechtwinkligkeit ein erweitertes Umschlagverfahren unter Nutzung eines Planspiegel-LI genutzt [7].

4.1.5 Geradheitsnormale

Als Geradheitsnormale werden Lineale aus Metall, Stein oder Glaskeramik eingesetzt. Ihr Einsatzbereich ist vor allem das Prüfen der Geradheit von Linearführungen. Ihre Kalibrierung erfolgt mit Zylinderform-Formmessgeräten oder spezialisierten Geradheitsmesseinrichtungen in der Regel im Umschlagverfahren.

4.2 1D-Längenkomparatoren

Für hochgenaue Längenmessungen wie der Kalibrierung von Längen-Bezugsnormalen werden eindimensionale Abbekomparatoren verwendet. Außer Einzweckmessgeräten wie den reinen Abbe-Komparatoren gibt es noch Formmessgeräte mit integrierter Abbe-Längenmesseinrichtung. Die meisten Vertreter dieser Geräteklasse sind mit Maßstäben ausgestattet. Zur Rückführung auf die SI-Einheit Länge sind dann noch kalibrierte Längenverkörperungen erforderlich. Einige Abbekomparatoren in DKD-Laboratorien und in der PTB sind mit Laserinterferometern (LI) ausgestattet [8]. Messungen dieser Geräte sind damit direkt rückführbar.

4.2.1 Endmaß, Endmaßbrücke

Mittels direkter Interferometrie können Parallelendmaße mit einer Messunsicherheit von $U = 10 \text{ nm}$ kalibriert werden. Die verfügbaren Längen reichen bis 1000 mm . Mittels des hochpräzisen Differenz-Abbekomparators „KOMF“ (Akronym für „Komparator für Maß und Form“) der PTB (Bild 5) kann auch das Außenmaß von Parallelendmaßen direkt kalibriert werden [10]. Bei Kalibrierungen von Parallelendmaßen aus Glaskeramik (Zerodur®) sind mit dem KOMF vergleichbare Messunsicherheiten wie bei der opti-

schen Kalibrierung des Stufenmaßes erreichbar [11]. Der KOMF ist damit das weltweit genaueste Messgerät zur taktilen Messung von Außenmaßen und erreicht auch bei Innenmaßen Spitzenwerte. Längen- und Durchmesserkalibrierungen des Messunsicherheitsbereichs $0,1 \mu\text{m} - 0,3 \mu\text{m}$ werden in der PTB mit Hilfe des Form- und Längenmessgeräts MFU8-PTB durchgeführt. Dazu ist eine Kalibrierung und Rückführung des Tastkugeldurchmessers notwendig. Dies erfolgt indirekt durch eine Kalibrierung einer Endmaßbrücke, einem aus Endmaßen zusammengesetzten Prüfkörper (Bild 6). Die Kalibrierung der Endmaßbrücke erfolgt mit dem KOMF und wird dann zur MFU8-PTB transferiert. Dieses in der PTB schon länger etablierte Verfahren wurde im Rahmen eines Projektes auch erfolgreich zu einem industriellen Anwender zur Rückführung seiner Längenmessgeräte transferiert [12].

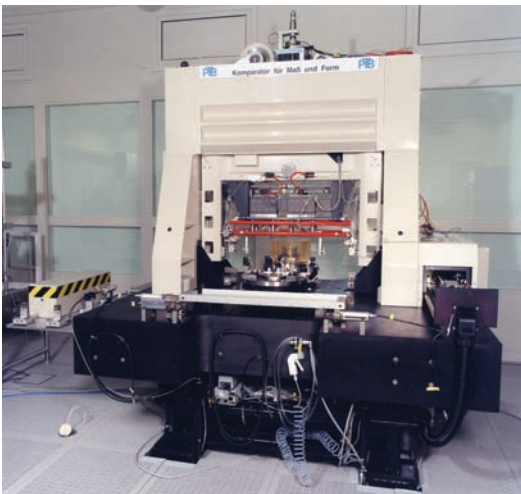


Bild 5:
Komparator für Maß und Form (KOMF) im Reinraumzentrum der PTB

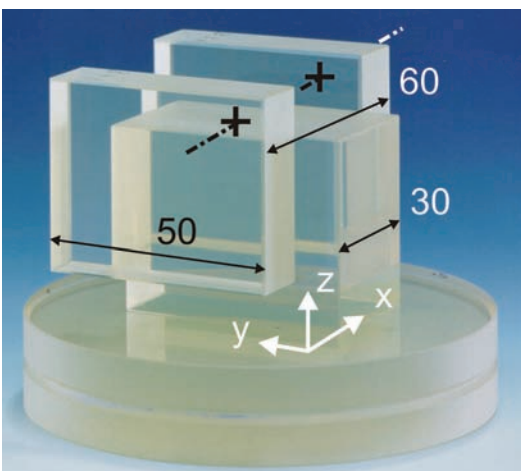


Bild 6:
Endmaßbrücke mit Basisplatte aus Zerodur

4.2.2 Ring, Dorn

Zwar sind Parallelendmaße die am besten kalibrierbaren Längennormale. Sie sind jedoch nur

eingeschränkt als Bezugsnormale für Durchmessermessungen einsetzbar, da die Krümmung von zylindrischen Objekten hinsichtlich Ausrichtung und Auswertung weitere Anforderungen an den Messprozess stellt. Daher sind Ringe und Dorne wichtige Bezugsnormale für Innen- bzw. Außendurchmesser. Ihre hochpräzise Rückführung erfolgt über die separate Kalibrierung der Formabweichungen in mehreren und des Zweipunktdurchmessers in mindestens einer axialen Schnittebene. Dabei sind Messunsicherheiten unter 50 nm erreichbar, die allerdings stark von den lokalen Formabweichungen der Prüflinge abhängen [13]. Beim späteren Einsatz auf KMG wird meistens bei Messungen von Normalen genau genommen nicht der Zweipunktdurchmesser, sondern der mittlere, also Gaußkreisdurchmesser, verwendet. Wenn jedoch sowohl die Formabweichungen als auch die Messunsicherheit des Durchmessers deutlich kleiner als die geforderte Messunsicherheit des mittleren Durchmessers sind, kann dieser Unterschied vernachlässigt werden. Da die Messunsicherheit von KMG jedoch in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert werden konnte, wird in Zukunft die genaue Unterscheidung der Durchmesserdefinition an Bedeutung gewinnen.

5 Rückführung von 2D-KMG (Konturenmessgeräte)

Eine wichtige Klasse von 2D-KMG sind die Konturenmessgeräte (KonMG), deren Bauprinzip von Rauheitsmessgeräten nach dem Tastschnittverfahren abgeleitet ist. Durch aktuelle Weiterentwicklungen in Hard- und speziell in der Software können diese Geräte ähnliche Messaufgaben wie KMG wahrnehmen – allerdings beschränkt auf die X-Z-Ebene. Ihre Rückführung erfordert daher auch ein ähnliches Spektrum von Maß- und Formverkörperungen. Bedingt durch die Geometrie des Messaufbaus lassen sich jedoch die typischen Bezugsnormale für diese Größen nicht oder nur schwer einsetzen. Daher wurden für diese Geräteklasse neue Typen von Bezugsnormalen geschaffen.

5.1 Konturarbeitsnormal

Die VDI 2629 [14] beschreibt ein Annahmeverfahren für Konturenmessgeräte, das einen speziellen Typ von Bezugsnormal nutzt, der in der PTB entwickelt wurde, das Konturarbeitsnormal (Bild 7) [15]. Auf diesem sind konkave und konvexe Kreissegmente und Prismen sowie deren Abstände verkörpert. Die Kalibrierung dieser Normale erfolgt zur Zeit im DKD mittels Umschlagverfahren unter Nutzung des „Virtuellen KMG“ [16]. Zur Zeit befindet sich die Akkreditierung der ersten DKD-Laboratorien für Konturenmesstechnik in Vorbereitung. Das

angestrebte Messunsicherheitsniveau liegt dabei bei ca. 1 µm für die Abstände und ca. 0,1° für die Winkelemente. Das Herstellungsverfahren der Konturnormale erlaubt ein weiteres sehr effizientes Kalibrierverfahren, das auf der optischen Kalibrierung von Folien mit gleicher Kontur beruht, die gleichzeitig mit den Normalen hergestellt wurden [17].

Eine Vergleichsmessung von Konturennormalen unter Beteiligung von acht 3D-KMG und sieben Konturenmessgeräten unterschiedlicher Herstel-

Außerdem erlaubt ein austauschbarer Träger den Austausch der verkörperten Elemente. So kann etwa auch ein in Silicium verkörperter Maßstab auf einem Sinustisch (Bild 9) eingewechselt werden und so analog zu einem Stufenendmaß bei KMG (Bild 10) genutzt werden [19]. Die Kalibrierung erfolgt mit den eindimensionalen Spezialmessverfahren für die Einzelemente. Die Abstandskalibrierung von Elementen erfolgt mit dem KOMF.

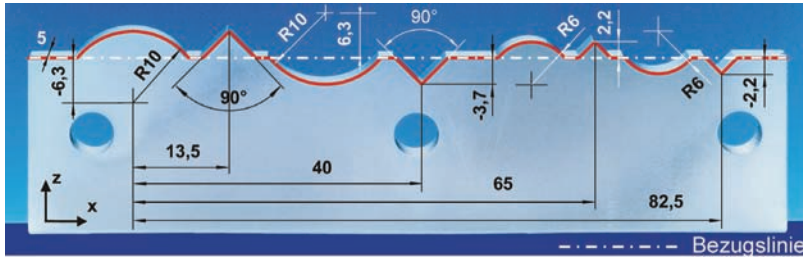


Bild 7: Konturnormal nach VDI/VDE 2629-1

ler zeigte eine sehr gute Übereinstimmung der ausgewerteten Messaufgaben [18]. Ein Beispiel hierzu zeigt Tabelle 1.

Zylindersegment	Konturen-messgeräte		KMG	
	R_{mean} mm	2s µm	R_{mean} mm	2s µm
1	9,9968	2,0	9,9969	2,4
2	10,0023	2,7	10,0026	2,2
3	5,9954	2,2	5,9957	1,6
4	6,0012	2,4	6,0014	2,7

Tabelle 1: Vergleich der Mittelwerte und 2s-Standardabweichungen zwischen sieben Konturen- und acht Koordinatenmessungen an einem Konturnormal nach VDI/VDE 2629-1

Auch bei den anderen Messgrößen besteht eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Mittelwerten und Streuungen von Konturenmessungen und Koordinatenmessungen. Die einzige Ausnahme sind die signifikant größeren Streuungen der lateralen Abstände bei den Konturenmessungen. Ursache hierfür könnte die bei vielen Konturenmessgeräten fehlende Temperaturkompensation sein.

5.2 KonturtransfERNormal

Ein alternativer Ansatz für ein Bezugsnormale für Konturenmessgeräte besteht in dem Design des KonturtransfERNormal (Bild 8). Die Idee besteht darin, hochgenau kalibrierbare Elemente wie Vollkugel und Prisma auf einem Träger anzuordnen und dann eine Tastspur relativ zu einem Ausrichtelement über die Normale zu legen.

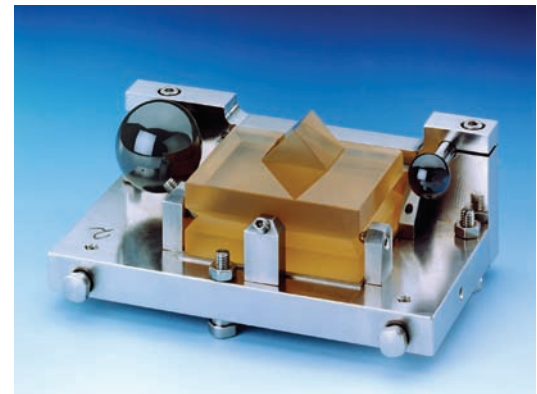


Bild 8: TransfERNormal Konturen mit zwei Präzisionskugeln aus Keramik und einem Zerodurprisma, Basis aus Invar



Bild 9: Längenmaßstab aus Silicium als Maßteilung für das Konturen- TransfERNormal. Tiefe der Strukturen ca. 0,9 mm, Beschichtung mit Titanitrit, Neigung des Maßstabes mit einem Sinustisch.

6 Rückführung von KMG

Dreidimensionale Koordinatenmessgeräte gibt es in verschiedenen Ausführungsformen. Die größte Klasse unter ihnen bilden die kartesischen KMG in den Bauformen Portal- und Horizontalarm-KMG. Unter den Portal-KMG finden sich die genauesten Geräte dieser Klasse. Andere KMG wie etwa (manuelle) Gelenkarm-KMG sind meistens in weniger anspruchsvollen Messunsicherheitsklassen angesiedelt. Die VDI/VDE-Richtlinie 2617 bzw. ihr Normen-Pendant DIN EN ISO 10360 beschreiben u.a. detailliert Annahme- und Bestätigungsprüfungen von KMG unter Nutzung von kalibrierten Normalen. Wichtige Begriffe der darin definierten Terminologie sind dabei die „Längenmessabweichung“ und die „Antastabweichung“, für deren Prüfung jeweils spezielle Normaltypen verwendet werden. Die Längenmessabweichung fußt im Wesentlichen auf der Einmessung des Koordina-

tensystems und seiner Korrektur. Die Antastabweichung ist im Wesentlichen eine Eigenschaft des Messkopfsystems.

6.1 Rückführung von mittelgroßen und großen KMG

Die meisten Erfahrungen bestehen in der Rückführung von KMG mit Messvolumina um 1m^3 . Die Mehrzahl der Kalibrierverfahren und Bezugsnormale wurde für Messbereiche dieser Größenordnung entwickelt. Neben den eindimensional kalibrierten Normalen, wie sie bei den 1D-Geräten angesprochen wurden, existieren eine große Zahl weiterer Normaltypen, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

6.1.1 Vollkugeln, Ringe

Während Vollkugeln bei eindimensionalen Messgeräten nur selten als Bezugsnormale angewandt werden, da ihre Ausrichtung auf dieser Geräteklasse nur schwer möglich ist, stellen sie für KMG einen sehr wichtigen Standardprüfkörper dar, z.B. zum Bestimmen der Antastabweichung des Messkopfsystems. Die Formabweichung von Vollkugeln erreicht meistens nicht ganz das niedrige Niveau von Halbkugeln. Man kann dennoch von einer Formabweichung unter 50 nm ausgehen. So können für das typische Messunsicherheitsniveau von KMG ($> 0,5\ \mu\text{m}$) auch Vollkugeln als ideal betrachtet werden. Da es kein taktil innen antastbares konkaves Gegenstück zur konvexen Vollkugel gibt, werden für die Prüfung oder Einmessung von Innenantastungen oder als Substitutionselement bei Kalibrierungen auch Ringe verwendet.

6.1.2 Stufenendmaß

Viele Einmess- oder Prüfprozesse erfordern eine (regelmäßige) räumliche Anordnung von Antastelementen, die im Messvolumen von KMG in verschiedenen Orientierungen aufgebaut werden kann, um so z.B. der Forderung z.B. der VDI/VDE 2617 nach Prüfung des Messvolumens zu mindestens 66% der Länge der Raumdiagonalen noch nachzukommen. Eine solche stellt das Stufenendmaß (STEM) dar (Bild 10). Eine wichtige Bauform besteht aus zylindrischen Endmaßen, die in einem Träger manuell eingelegt und durch thermische Pressung fixiert werden. Es sind aber auch monolithische oder solche aus angesprengten Parallelendmaße (ähnlich der Endmaßbrücke) gebräuchlich. Typische Längen des Trägers sind 100 mm – 2500 mm . Die Kalibrierung von Stufenendmaßen erfolgt häufig mit Hilfe von spezialisierten Längenkomparatoren, die wegen der Länge des Messobjektes meistens nicht als echter Abbe-Komparator aufgebaut sind. Es sind aber auch Messverfahren gebräuchlich, die Laserinterferometer in Kombination mit KMG einsetzen [20]. Die erreichbare Messunsicherheit liegt bei $U = 0,1\ \mu\text{m} + 0,5 \cdot L$.

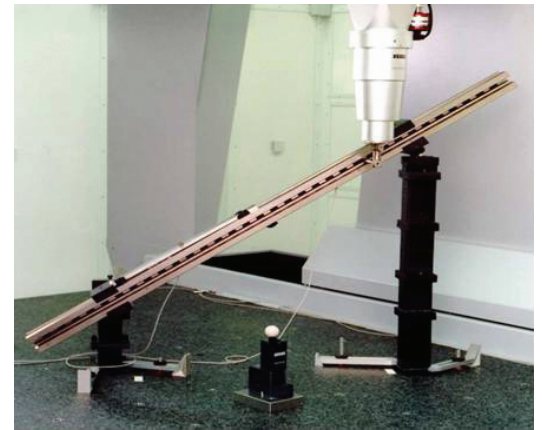


Bild 10:
Stufenendmaß in raumschräger Aufspannung während der Messung

6.1.3 Kugelstab

Ein Kugelstab zählt wie das Stufenendmaß zur Klasse der eindimensionalen Normale. Der Aufbau besteht aus einem Träger in oder an dem in festgelegten Abständen zwei oder mehrere Kugeln eingelassen oder seitlich angebracht sind. In Bild 11 ist ein besondere Bauform dargestellt, bei der der Kugelstab zerlegt und separiert kalibriert werden kann. Die verkörperte Längen sind die Abstände der Kugelmittelpunkte. Die Geometrie von Kugelstäben erlaubt in der Regel keine Kalibrierung durch 1D-Komparatoren. Sie werden daher mit Hilfe von KMG kalibriert. Ihre Anwendung entspricht weitgehend der von STEM. Kugelstäbe können bis zu mehreren Metern lang sein [21].

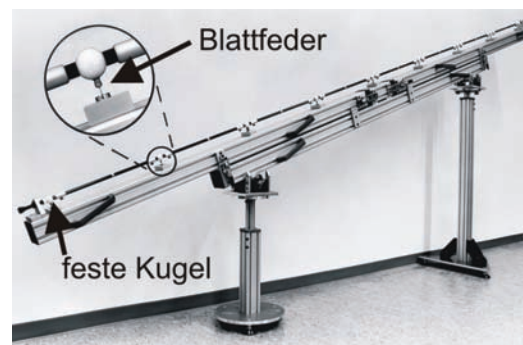


Bild 11:
Zerlegbarer Kugelstab aus kombinierten Kugelstab-Elementen

6.1.4 Kugel-, Lochplatte

Das Prinzip des Kugelstabs lässt sich leicht auf zwei Dimensionen erweitern. So entsteht die Kugelplatte. Diese besteht aus einer Trägerplatte (z.B. aus Glaskeramik) und in Bohrungen eingesetzten Kugeln (Bild 12). Wenn die Bohrungen gut bearbeitet sind, lassen sich die Kugeln auch weglassen. So erhält man eine Lochplatte. Der Vorteil der Kugelplatte ist ihre gegenüber der Plattenebene beidseitige Antastbarkeit und leichte Aufspannbarkeit in verschiedener Orientierung im Messvolumen. Es wird so die Anwendung von Umschlagverfahren vereinfacht. Die erreichbare Messunsicherheit liegt bei $U = 0,5\ \mu\text{m}$.

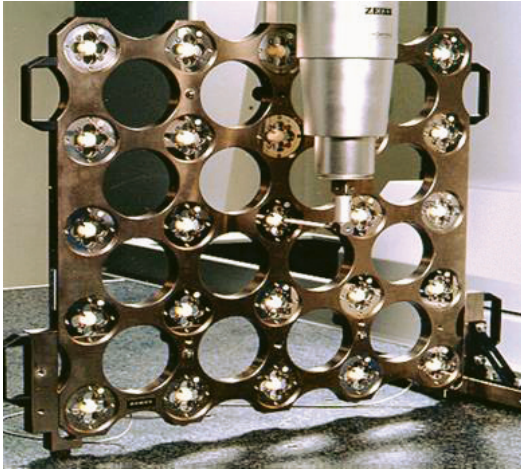


Bild 12:
Kugelplatte (Retter)

6.1.5 Kugelpolyeder (z.B. Kugelwürfel)

Von der Kugelplatte kommt man durch Erweiterung auf die dritte Dimension auf Kugelpolyeder, wie etwa den Kugelwürfel oder Kugeltetraeder. Diese können monolithisch (unüblich), aus Plattenmaterial (z.B. Zerodur) oder Stäben (z.B. CFK) aufgebaut sein (Bild 13). Die Kalibrierung erfolgt über eindimensionale Abstandsmessungen unter Ausnutzung der durch die räumliche Geometrie vorgegebenen Randbedingungen für die Bestimmungsgleichungen der Koordinaten.

Dreidimensionale Normale haben aus verschiedenen Gründen wie z.B. erhöhte Kosten und zum Teil ungünstigere Handhabungseigenschaften eine geringere Verbreitung als ein- und zweidimensionale Normale gefunden.

Bild 13:
Kugeltetraeder „tetronom“ (Metronom AG)



6.2 Rückführung von kleinen und Mikro-KMG

Die Messung von Mikrobautteilen ist eine neue metrologische Herausforderung in der modernen Produktionstechnik. Die Miniaturisierung in der Technik führt zu immer kleineren Bauteilen, wie z.B. Mikro-Zahnrädern und mikrooptischen Komponenten mit Merkmalen von unter 0,5 mm bis zu 1 μm . Für die Messung von Mikrobautteilen werden heute optische, taktile und röntgenographische Mikro-Messsysteme eingesetzt.

Deren Prüfung sollte in Anlehnung an akzeptierte Verfahren der Koordinatenmesstechnik (ISO 10360, VDI/VDE 2617) erfolgen, bei denen Prüfkörper verwendet werden. Die PTB hat deshalb verschiedene Mikro-Prüfkörper entwickelt, die für die Antastung sowohl mit taktilen als auch mit optischen Sensoren „kooperative“ Oberflächen aufweisen bzw. durch ihre Volumeneigenschaften (z.B. Röntgenabsorption) röntgenographisch messbar sind. Bei der Herstellung der Mikro-Prüfkörper wurden unterschiedliche Fertigungsverfahren wie Draht- und Senkerosion oder Diamantdrehen eingesetzt. Beispiele für Mikro-Prüfkörper sind Mikro-Konturnormale (Bild 14) und Mikro-Kugelkalottenwürfel (Bild 15). Vergleichsmessungen mit verschiedenen taktilen und optischen Mikrosensoren an einem Mikro-Konturnormal ergaben Übereinstimmungen von teilweise besser als 1 μm für Abstände und Radien [22]. Mit der Entwicklung der Mikro-Prüfkörper und der zugehörigen Kalibrierverfahren ist jetzt ein entscheidender Schritt für den qualifizierten Vergleich unterschiedlicher Sensoren und deren Rückführung im Mikrobereich gelungen. Teilweise konnten die Prüfkörper im Rahmen von Firmenkooperationen in die Industrie transferiert werden.

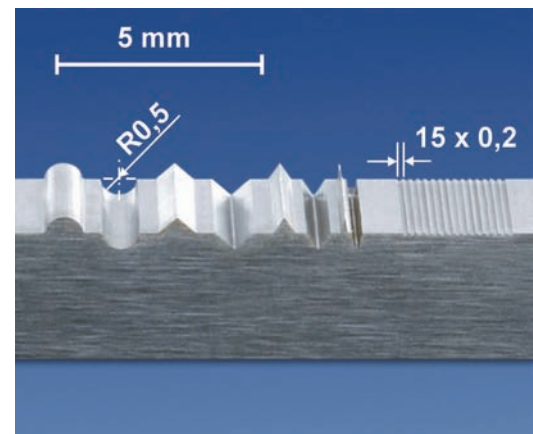


Bild 14:
Mikro-Konturnormal aus Edelstahl (Detail). Das Normal ist mit Drahterosion hergestellt und weist verschiedene Radien, Winkel und Abstände auf. Es ist kommerziell erhältlich.

6.3 Werkstückähnliche Prüfkörper

In der industriellen Produktion werden die benötigten Toleranzen immer enger spezifiziert. Zunehmend zeigt sich dadurch ein sich verschärfendes Problem durch den inkrementellen Messunsicherheitsverlust entlang der Rückführungskette. Zwar werden idealisierte und damit werkstückferne Prüfkörper wie etwa Parallelendmaße mit sehr geringer Messunsicherheit kalibriert. Die Überwachung des Fertigungsprozesses wird dadurch jedoch nicht verbessert. Zunehmend wird daher versucht, Prüfkörper so gestalten, dass die Kalibrierung im Messlaboratorium oder Feinmessraum nur einen geringen

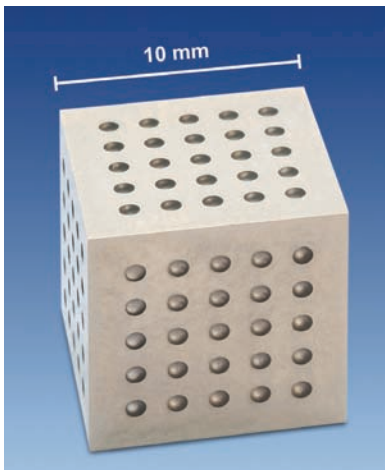


Bild 15: Mikro-Kugelkalottenwürfel aus Titan. Der Würfel ist mit Draht- bzw. Senkerosion hergestellt und hat auf drei Flächen je 5 x 5 Kugelkalotten mit 0,4 mm Radius.

Transferverlust zum realen Werkstück hat. Idealerweise wird direkt ein reales Werkstück kalibriert („Meisterteil“). So wurde in einem Projekt ein KFZ-Zylinderkopf beispielhaft kalibriert und in der Praxis als Meisterteil eingesetzt (Bild 16). Die Vorgehensweise bei der Messunsicherheitsermittlung für diese Verfahren ist bereits normativ festgelegt [23].

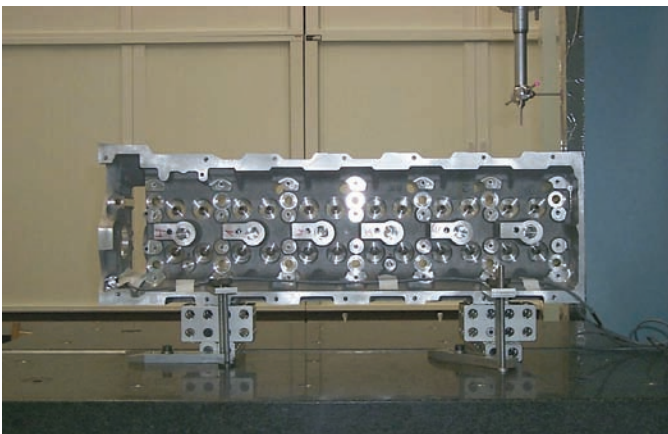


Bild 16: Kalibriertes Werkstücknormal: Zylinderkopf eines KFZ-Motors während der Kalibrierung

6.4 Rückführung von KMG ohne Prüfkörpernutzung

Wie aus den vorangegangenen abschnitten deutlich wird, ist für die Rückführung aller Messaufgaben vom KMG eine große Zahl sehr unterschiedlicher Prüfkörper nötig. Einige von diesen sind teuer, empfindlich und/oder nur mit relativ hoher Unsicherheit zu kalibrieren. Es stellt sich daher die Frage, ob nicht KMG zumindest teilweise ohne Prüfkörper eingemessen, korrigiert und überwacht werden können. Ein möglicher Schritt in diese Richtung ist der Einsatz von Laserinterferometern, wie sie zum Teil schon für Spezialmessaufgaben eingesetzt werden. In der Praxis ist mit normalen LI jedoch nur schwer das

gesamte Messvolumen von KMG überstreichbar. Es wurde daher in der PTB ein nachführbares LI entwickelt, der „LaserTRACER“ [24]. Der kompakte Aufbau ermöglicht eine Aufstellung in der Nähe des KMG oder auf dem Messtisch. Der LaserTRACER wurde bereits erfolgreich z.B. in der Verzahnungsmesstechnik angewandt.

Die bereits angesprochenen Selbstkalibrierverfahren stellen ebenfalls eine Rückführung ohne Prüfkörper dar. Die Rückführung geschieht bei diesen Verfahren über mathematisch ideale Geometrielemente wie Kreis oder Gerade. Sie können jedoch nicht direkt für Absolutmaßbestimmungen eingesetzt werden.

7 Ausblick

Die zunehmende Miniaturisierung ist eine der zukünftig größten Herausforderungen in der Koordinatenmesstechnik. Sie erfordert die Entwicklung neuer Messgeräte und Tastsysteme und ist Triebfeder der Entwicklung von dazu geeigneten Normalen und deren Kalibrierverfahren. Durch die zunehmende Durchdringung der Koordinatenmesstechnik mit optischen oder anderen nicht-taktilen Verfahren wie Röntgen-CT stellt sich zusätzlich die Anforderung,

Oberflächen oder gar Volumen der Prüfkörper so gestalten, dass sie zum Einen mit den neuen Messtechniken kompatibel sind, aber möglichst mit den etablierten Messtechniken kompatibel bleiben, um von deren teilweise geringerer Messunsicherheit zu profitieren. Eine weitere Herausforderung stellt sich in der direkten Rückführung von Werkstückmessungen in der industriellen Praxis möglichst ohne Verlust von Messunsicherheit. Erste Ansätze hierzu wurden bereits erprobt.

Literatur

- [1] Jusko, O., Neugebauer, M.: Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Formmessungen, VDI-Berichte 1945, 2006, ISBN 3-18-091945-0, S. 15–27
- [2] Richtlinienreihe VDI/VDE 2631, Blätter 1–9

- [3] Jusko, O., Lüdicke, F., Novel multi-wave standards for the calibration of form measuring instruments, Proc. 1st EUSPEN, Bremen, Vol. 2, ISBN 3-8265-6085-X, 1999, 299–302
- [4] Jusko, O.: EUROMET Project Nr. 649, Comparison of Sensitivity Standards: Flick and Multi Wave Standards, Report to be published
- [5] Neugebauer, M.: Uncertainty analysis for roundness measurements by the example of measurements on a glass hemisphere, Meas. Sci. Technol. 12 (2001), 68–76
- [6] Sacconi, A., Pasin, W., A. An intercomparison of roundness measurements between ten European national standards laboratories, Measurement 13, 1994, 119–128
- [7] Jusko, O., Neugebauer, M., Reimann, H.: High-Precision dimensional calibration of reference cylinders, Proc. Congress on Metrology, Measurement & Instrument Technology, IMEKO TC 14, 2001, p. 1–7
- [8] Lüdicke, F., Jusko, O., Reimann, H.: Form and Length Measurements by Use of a Modified Commercial Form Measurement Instrument, Proc. ASPE Annual Meeting 2000, ISBN 1-887706-24-0, pp. 389–392
- [9] DIN EN ISO 3650, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Längennormale – Parallelendmaße (ISO 3650:1998)
- [10] Neugebauer, M., Lüdicke, F., Bastam, D., Bosse, H., Reimann, H., Töpferwien, C.: A new comparator for measurement of diameter and form of cylinders, spheres and cubes under clean-room conditions, Meas. Sci. Technol. 8 (1999), pp. 849–856
- [11] Neugebauer, M.: The uncertainty of diameter calibrations with the comparator for diameter and form, Meas. Sci. Technol. 9 (1998) 1053–1058
- [12] Jusko, O., Neugebauer, M., Bastam, D., Reimann, H., Diedrich, M., Wiedenmann, E.: High Precision Length Transfer in Dimensional Metrology, Proc. 8th Int. Symposium on Measurement and Quality Control in Production, Erlangen, Germany, 2004
- [13] Neugebauer, M., Lüdicke, F.: High Precision Diameter Measurement of Ring and Plug Gauges using a new comparator, Proc. ASPE 1998
- [14] VDI/VDE 2629, Blatt 1, Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Konturenmessgeräte nach dem taktilen Tastschnittverfahren, 2005–11
- [15] Franke, M., Jusko, O.; Krystek, M., Neugebauer, M., Neuschaefer-Rube, U., Wäldele, F.: Artefacts and Test Procedures for Contour Measuring Instruments, Proc. 11. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, 2004, ISBN 3-8322-2419-X, Part II, pp.102–107
- [16] Wäldele, F., Schwenke, H.: Online-Ermittlung der Meßunsicherheit mit dem virtuellen Koordinatenmeßgerät, DIN Mitteilungen 11/2000, S. 797–803, Beuth Verlag, Berlin
- [17] Jusko, O., Neugebauer, M., Wäldele, F.: Verfahren zur Herstellung von Prüfkörpern, Patentanmeldung, DPMA, 26.4.2003, DP 10318762
- [18] Neugebauer, M., Berthold, J., Kedziora, H.-J.: Gemeinsamen Nenner bestimmen. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 51 (2006) 1, S.42–44, ISSN 0720-1214
- [19] Neugebauer, M., Jusko, O., Wäldele, F.: Geometrical Standards for Contour Measuring Instruments, Proc. ASPE Annual Meeting 2003, Portland, Oregon, USA
- [20] Härtig, F.; DP DE000010319711A1, Verfahren zur hochgenauen dimensional Messung an Messobjekten
- [21] Bartscher, M., Busch, K., Franke, M., Schwenke, H., Wäldele, F.: New artifacts for calibration of large CMMs, ASPE, Proceedings of the 5th Annual Meeting, p. 542–546, Scottsdale (Arizona), 2000
- [22] Neugebauer, M., Neuschaefer-Rube, U.: A new micro artefact for testing of optical and tactile sensors. Proc. of 5th EUSPEN International Conference, Montpellier, France, May 2005, 201–204, ISBN 92-990035-0-5
- [23] DIN ISO/TS 15530-3, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen (ISO/TS 15530-3:2004)
- [24] Härtig, F., Keck, Chr., Kniel, K., Schwenke, H., Wäldele, F., Wendt, K.: Tracking Laser Interferometer for Coordinate Metrology, Technisches Messen 71 (2004), pp. 227–232

Bestimmung der Unsicherheit von Messungen mit KMG – Status und Ausblick

Heinrich Schwenke¹, Matthias Franke²

1 Einleitung

Richtige und zuverlässige Messungen sind eine wichtige Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Industrieproduktion. Mit Messungen lassen sich arbeitsteilige Produktionsverfahren realisieren, die Funktionszuverlässigkeit von Erzeugnissen garantieren und festgelegte Fertigungstoleranzen überprüfen. Ein Qualitätsmerkmal einer Messung ist deren Messunsicherheit. Sie kennzeichnet die der Messgröße zugeordnete Streuung der Messwerte, die sich aus der immer vorhandenen Unvollkommenheit der Messmittel, der Umgebungsbedingungen und des Messprozesses ergibt. Der Messunsicherheit kommt bei der Auswahl von Messgeräten, bei der Festlegung von geometrischen Produktspezifikationen, bei der Prozesslenkung und bei der Wareneingangs- und -ausgangsprüfung eine besondere Bedeutung zu. Die Unkenntnis der Messunsicherheit führt zur Festlegung zu kleiner Toleranzen, zur Fertigung von fehlerhaften Teilen und Ausschuss sowie zur Freigabe bzw. Annahme von mangelhaften Erzeugnissen. Nur bei Kenntnis der Messunsicherheit kann also das Risiko der Nichtübereinstimmung mit gestellten Forderungen realistisch eingeschätzt werden. Zunehmend wird die Angabe der Messunsicherheit auch in Normen und Richtlinien gefordert. In der DIN EN ISO 9001 in Kapitel 4.11 heißt es beispielsweise hierzu: „Prüfmittel müssen in einer Weise benutzt werden, die sicherstellt, dass die Messunsicherheit bekannt ist.“

2 Aufgabenspezifische Messunsicherheit

Im Allgemeinen werden zur Charakterisierung der Genauigkeit von KMG Grenzwerte oder andere pauschal gehaltene Qualitätskriterien in Spezifikationen angegeben [1, 2]. Diese sind oft Grundlage für den Nachweis der Einhaltung von Abnahmebedingungen, eignen sich jedoch nur sehr eingeschränkt für Unsicherheitsabschätzungen. Die Messunsicherheit muss vielmehr auf die konkrete Messaufgabe bezogen sein. Sie muss also neben der Aufgabe selbst (z.B. Durch-

messer eines Zylinders, Parallelität zweier Flächen) auch die verwendete Messstrategie (Zahl und Verteilung der Messpunkte) und alle in dem jeweiligen Messprozess auftretenden Unsicherheitseinflüsse berücksichtigen. Diese Messunsicherheit wird als *aufgabenspezifische Messunsicherheit* bezeichnet.

3 Methoden zur Ermittlung der Unsicherheit

In dem „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ [3], der nach seinem englischen Titel allgemein auch mit GUM bezeichnet wird, werden die verbindlichen Grundlagen für die Ermittlung der Messunsicherheit beschrieben. Ausgangspunkt ist dabei eine mathematische Modellfunktion $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$, die den Messprozess beschreibt. Sie beinhaltet die funktionale Abhängigkeit des Messergebnisses von allen Einflussgrößen. Die Unsicherheit des Messergebnisses setzt sich demnach aus den Unsicherheitsbeiträgen dieser Einflussgrößen zusammen, die sich in der durch das Modell beschriebene Weise auf das Messergebnis auswirken. Die einzelnen Unsicherheitsbeiträge können aus wiederholten Beobachtungen gewonnen werden oder aus bereits verfügbaren Informationen (z.B. aus Herstellerspezifikationen oder Kalibrierscheinen) abgeleitet werden. Die Standardmessunsicherheit des Messergebnisses, die sich aus Unsicherheiten der Einflussgrößen und der Modellgleichung ergibt, wird mit einem *Erweiterungsfaktor* k multipliziert, um die Messunsicherheit auf ein definiertes Vertrauensniveau umzurechnen. Je größer dieser Faktor ist, desto größer ist das Vertrauen, dass der wahre Wert der Messgröße in dem durch das Messergebnis und die *erweiterte Messunsicherheit* U angegebenen Wertintervall liegt. Wird z.B. $k = 2$ gewählt, beträgt dieses Vertrauensniveau bei einer angenommenen Normalverteilung 95%. Ein vollständiges Messergebnis $y \pm U$ besteht also aus dem Ergebnis y der Messung und der Angabe der Messunsicherheit U zusammen mit dem gewähl-

1 Dr. Heinrich Schwenke
Vorstand etalon AG,
Braunschweig
E-Mail:
heinrich.schwenke@
etalon-ag.de

2 Dipl.-Ing.
Matthias Franke
Mitarbeiter der PTB-
Arbeitsgruppe „Koordinatenmessgeräte“
E-Mail:
matthias.franke@ptb.de

ten Erweiterungsfaktor k , es gilt $U(y) = k \cdot u(y)$. Alle drei im Folgenden beschriebenen Verfahren zur Ermittlung der Unsicherheit bei Koordinatenmessungen basieren auf den Prinzipien des GUM, verfolgen jedoch unterschiedliche Ansätze.

3.1 Aufstellen eines analytischen Unsicherheitsbudgets

Die konventionelle Methode, ein Unsicherheitsbudget aufzustellen, führt über ein analytische Modellgleichung und die Berechnung der Sensitivitätskoeffizienten durch partielle Ableitungen [3]. Zusätzlich müssen evtl. Korrelationen der Eingangsgrößen berücksichtigt werden. Für einfache Messaufgaben ist die Aufstellung einer solchen Modellgleichung auch in der Koordinatenmesstechnik möglich. Ein Beispiel dafür ist z.B. eine Abstandsmessung eines Endmaßes entlang einer Maschinenachse mit jeweils einem Messpunkt auf jeder Seite (zur Vereinfachung sind temperaturinvariante Maßstäbe der Messmaschine angenommen):

$$Y = (M + \alpha \cdot T) \cdot l + 2 \cdot A + 2 \cdot R \quad (1)$$

Bezeichnung	Symbol	Erwartungswert	Standardunsicherheit
Maßstabsfaktor	M	1	u_M
Ausdehnungskoeffizient Werkstück	α	α_E	u_α
Abweichung von 20°C	ΔT	ΔT_E	$u_{\Delta T}$
Messlänge	l	l_E	
Antastabweichung aus Tastsystem	ΔA	0	$u_{\Delta A}$
Abweichung durch Oberflächenrauheit	ΔR	0	$u_{\Delta R}$

Daraus ergibt sich für die Unsicherheit des Messergebnisses:

$$u(l) = \sqrt{(u_M \cdot l_E)^2 + (u_\alpha \cdot T_E \cdot l_E)^2 + (u_T \cdot \alpha_E \cdot l_E)^2 + 2 \cdot u_A^2 + 2 \cdot u_R^2} \quad (2)$$

In der Praxis sind die Messaufgaben in der Koordinatenmesstechnik jedoch weit komplexer: Es werden Ausgleichselemente und Werkstückkoordinatensysteme gebildet, Elemente mit Punkten in Teilbereichen angetastet, Achslagen, Koaxialitäten, Ebenheiten, Kegelwinkel, und Radien berechnet. Zudem werden die Aufgaben mit einem oder mehreren Tastern durchgeführt und mit unterschiedlichen numerischen Verfahren Besteinpassungen von Elementen vorgenommen. Dies führt dazu, das für die meisten Aufgaben die Aufstellung eines konventionellen Unsicherheitsbudgets sehr schwierig oder sogar unmöglich ist. Oder es müssen so große Verein-

fachungen getroffen werden, dass die Aussagekraft des Unsicherheitsbudgets zweifelhaft ist.

3.2 Experimentelles Verfahren bei Verwendung eines kalibrierten Werkstücks

Eine sehr praxisnahe Möglichkeit, Messunsicherheiten durch ein experimentelles Verfahren auf Basis eines kalibrierten Werkstücks zu bestimmen, wird in dem internationalen ISO-Dokument TS 15530-3 [4] und in der Richtlinie VDI/VDE 2617-8 [5] beschrieben. Grundlage des Verfahrens ist der Einsatz eines oder mehrerer unabhängig kalibrierter Werkstücke, die den tatsächlichen Messobjekten in allen messtechnischen Eigenschaften (Größe, Form, Werkstoff) ähneln. Im Allgemeinen wird dazu ein Werkstück aus der laufenden Produktion gewählt. Dieses Werkstück wird dann in mindestens 20 Stichproben in gleicher Weise wie die unbekanntenen Werkstücke gemessen. Zwischen dieser Stichproben sollen die Einflussgrößen wie z.B. Bediener, Tageszeit, Aufspannung so variiert werden, wie es auch im normalen Messprozess geschehen kann. Basis für die Unsicherheitsberechnung ist dann ein Vergleich der gemessenen Werte mit dem Kali-

brierwert. Zur Berechnung der Unsicherheit werden dann nur folgende Größen herangezogen (Bezeichnungen gemäß ISO TS 15530-3):

- Kalibrierunsicherheit des Merkmals u_{cal}
- Streuung der Messwerte bei der experimentellen Untersuchung u_p
- Systematische Abweichung aller Messwerte zum Kalibrierwert b
- Zusätzliche Streuung durch Werkstückeinflüsse u_w

Für die Berechnung der Unsicherheit des Messverfahrens wird in dem oben erwähnten ISO-Dokument TS 15530-3 sowie in der Richtlinie VDI/VDE 2617-8 eine Gleichung

($U = k\sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b|$) angegeben, in der der systematische Anteil b additiv berücksichtigt wird und die deshalb nicht konform mit dem GUM ist. Damit weichen diese Normen auch von den in der PTB festgelegten Richtlinien zur Bestimmung der Messunsicherheit ab, die sich am GUM orientieren. Es ist daher für die Berechnung der Unsicherheit des Messverfahrens die folgende Gleichung zu benutzen:

$$U = k\sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2 + b^2} \quad (3)$$

Die Methode ist ohne Weiteres für den Anwender durchführbar, ihre wesentliche Beschränkung liegt in der Notwendigkeit eines *kalibrierten Werkstücks*. Die Verfügbarkeit eines solchen Werkstücks und die damit verbundenen Kosten machen den wesentlichen Nachteil der Methode aus. Weiterhin ist der Anteil u_w zum Teil schwer zu erfassen. Die Richtlinie VDI/VDE 2617-8 [5] zeigt hierzu jedoch ein Verfahren auf, durch mehrere unkalibrierte Werkstücke zusätzliche Streuungen zu ermitteln.

Bei der Anwendung der Methode ist darauf zu achten, dass die *kalibrierten Werkstücke* mit einer Messstrategie kalibriert werden, die sich möglichst nah an dem „idealen Operator“ gemäß ISO 14660-1 [6] orientiert. Im allgemeinen heißt dies, das mit möglichst vielen Antastpunkten kalibriert werden sollte. Nur so ist gewährleistet, dass die nach dem obigen Verfahren ermittelte Unsicherheit auch Anteile durch die implementierte Messstrategie mit einschließt. Systematische Abweichung aufgrund von reduzierten Punktzahlen im untersuchten Messprozess werden dann in der Messunsicherheit berücksichtigt. Das Verfahren bietet auch die Möglichkeit, durch Korrekturen den systematischen Anteil b zu minimieren und so die Messunsicherheit zu verringern.

In Abschnitt 5.1 ist beschrieben, wie die experimentelle Methode zusammen mit der im Folgenden beschriebenen Simulationsmethode für eine durchgängige Rückführung auch von produktionsnahen Messungen eingesetzt werden kann. Ein konkreter Anwendungsfall aus der Karosseriefertigung ist in [7] beschrieben.

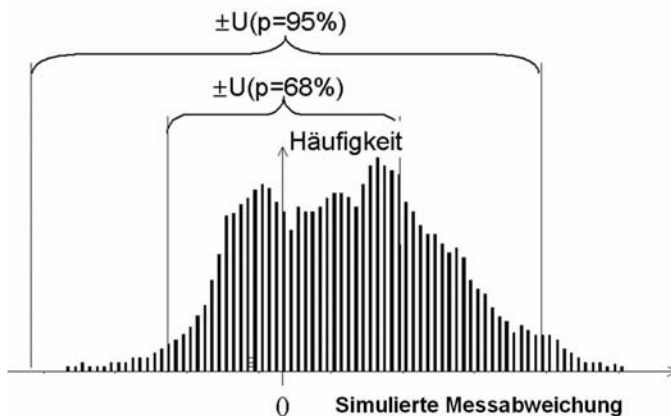
3.3 Simulation des Messprozesses

Eine elegante Alternative, die ebenfalls in Übereinstimmung mit den Grundlagen des GUM steht, ist die Ermittlung der Messunsicherheit durch numerische Simulationsrechnungen [8,9,10]. Die Grundlagen dieser Vorgehensweise sind seit etwa 2 Jahren auch in einen Anhang zum GUM beschrieben [11]. Mit der Anwendung der so genannten „Monte-Carlo-Simulation“ wird die Ermittlung einer realistischen Messunsicherheit auch für sehr komplexen Messaufgaben in der Koordinatenmesstechnik ermöglicht.

Das Modell des Messprozesses und die auf den Messprozess einwirkenden Einflussgrößen sind wie bei dem oben beschriebenen klassischen Unsicherheitsbudget die Basis für die Ermittlung der Messunsicherheit. Die Berechnung erfolgt jedoch nicht über die Lösung von partiellen Ableitungen und Summierung von Unsicherheitsbeiträgen, sondern mit Hilfe eines im Rechner durchgeführten „virtuellen Experimentes“. Grundlage dazu ist das so genannte „Monte Carlo Verfahren“.

Zunächst werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Einflussgröße (z.B. Geometriefehler, Antastabweichungen, Drift, Temperatur) durch Voruntersuchungen und Abschätzungen bestimmt. Die Messunsicherheit ergibt sich dann aus der numerischen Fortpflanzung dieser Verteilungen in einem numerischen Modell, das den Messprozess beschreibt. Bei der Simulation werden die Einflussgrößen, von denen das Messergebnis abhängt, in angenommenen Verteilungen mit Hilfe von Zufallsgeneratoren bei jedem „simulierten Experiment“ so variiert, so dass sich nach einer großen Anzahl von Durchläufen auch für die Messgröße eine resultierende Verteilung ergibt. Aus dieser wird dann die aufgabenspezifische Messunsicherheit numerisch ermittelt. Eine solche Verteilung ist als Histogramm in Bild 1 dargestellt. Daraus kann die Unsicherheit so bestimmt werden, dass sie den Forderungen nach einem definierten Vertrauensniveau und einem symmetrischen Unsicherheitsbereich genügt. Hierzu wird der Unsicherheitsbereich vom Bezugswert aus (alle simulierten Abweichungen = 0) symmetrisch nach beiden Seiten solange erweitert, bis der durch das Vertrauensniveau (z.B. 95%) geforderte Anteil von simulierten Messabweichungen in den Bereichsgrenzen eingeschlossen ist.

Bild 1:
Durch Simulation
erzeugte Wahrscheinlichkeitsverteilung,
Unsicherheitsermittlung



Die Anzahl der Simulationsläufe muss so groß gewählt werden, dass eine ausreichend hohe Aussagesicherheit der aus diesen Ergebnissen ermittelten Messunsicherheit gewährleistet ist. Bei einer Stichprobengröße von 200 und einem Vertrauensniveau von 95% schwanken die Ergebnisse der so ermittelten Unsicherheit U noch in einem Bereich von ungefähr $\pm 5\%$ von U , was als ausreichend genau angesehen werden kann.

Die Simulation entspricht einem realen Experiment, in dem an einem bekannten Werkstück eine große Anzahl von Messungen unter allen wahrscheinlichen Messbedingungen durchgeführt wird, und ist damit in gewisser Weise vergleichbar mit der in Abschnitt 3.2 vorstellten Methode.

4 Das „Virtuelle KMG“

Die numerische Simulation des Messprozesses wurde unter dem Schlagwort „Virtuelles KMG“ in der PTB im Rahmen eines EU-Projektes [12] mit anderen Partnern für die Messung von prismatischen Werkstücken auf KMG umgesetzt. Das „Virtuelle KMG“ ist mittlerweile als Softwaremodul von zwei deutschen Anbietern erhältlich [13,14]. Im Folgenden sind die Grundzüge des „Virtuellen KMG“ kurz beschrieben.

4.1 Einflussgrößen

Das Virtuelle KMG modelliert das Abweichungsverhalten von KMG mit kartesischen Achsen und kann folgende Einflussgrößen berücksichtigen:

Abweichungen des KMG

- Systematische Abweichungen der Führungen (21 Abweichungskomponenten)
- Abweichungen durch thermische Einflüsse (thermische Verformung der Führungen, thermische Ausdehnung der Maßstäbe)
- Abweichungen durch Drift
- Abweichungen aus dem Antastvorgang (Abweichungen durch die Einmessung der Taststifte, richtungsabhängige Abweichungen durch das Tastsystem, Abweichungen durch Verwendung mehrerer Taststifte)
- Abweichungen durch das Werkstück
- Thermische Ausdehnung des Werkstücks
- Rauheit der Oberflächen

Als weitere Einflussgrößen auf die Messunsicherheit von Koordinatenmessungen sind die Messstrategie (Anzahl, Verteilung der Messpunkte) und die Auswertung der Messgrößen (Algorithmus, Verknüpfungsoperationen) zu nennen. Diese werden automatisch berücksichtigt, da die geräteeigene Auswertesoftware in die Simulationen einbezogen ist (vergl. Bild 2).

Die oben erwähnten Einflussgrößen müssen messtechnisch bestimmt oder auf Basis von verfügbaren Daten abgeschätzt werden. So werden z.B. zur Ermittlung der Führungsabweichungen kalibrierte Kugel- oder Lochplatten eingesetzt [8], die in mindestens vier Stellungen mit unterschiedlichen Taststiften gemessen werden – eine sehr effektive Methode, die mittlerweile bei KMG-Herstellern in der Qualitätssicherung und bei der laufenden Überwachung von KMG Eingang gefunden hat.

4.2 Simulation des Messprozesses

Wie schon bisher werden zunächst bei der Messung von Werkstücken auf KMG Antastpunkte gesammelt und geometrisch ausgewertet. Der hierzu gehörige „klassische“ Datenfluss ist in Bild 2 schwarz dargestellt. Neu ist, dass nun die gemessene Punktemenge zusätzlich durch das Virtuelle KMG verarbeitet wird. Diese Software produziert n Punktemengen, die jeweils durch Simulation unterschiedlicher Zustände der KMG-Geometrie, des Tastsystems und der Umgebungsbedingungen entstehen. Jede dieser Punktemengen wird – mit Hilfe der Herstellersoftware – ausgewertet, so dass sich n „virtuelle“ Ergebnisse für jeden gemessenen Parameter ergeben. Aus diesen n Ergebnissen wird dann durch die in Abschnitt 3.3 beschriebene Vorgehensweise eine Unsicherheit $U(y)$ ermittelt, die im Messprotokoll angegeben werden kann (s. Bild 2, grauer Datenfluss).

Für den Anwender stellt sich das Verfahren so dar, dass im Anschluss an die Messung durch die Herstellersoftware automatisch die Simulationen durchgeführt werden und im Messprotokoll zusätzlich zu dem Messergebnis die zugeordnete Messunsicherheit ausgegeben wird. Dadurch ist erstmalig ein komplexes Messgerät realisiert, mit dem ein „vollständiges“ Ergebnis in der Form $y \pm U$ erzeugt werden kann.

Voraussetzung ist eine Auswertesoftware, die fehlerfrei und ohne signifikanten Unsicherheitsbeitrag arbeitet. Ein erster Schritt, Software für die Koordinatenmesstechnik zu validieren, wurde mit dem PTB-Test für die Berechnung von Ausgleichselementen [15] besritten.

4.3 Einfluss von Form und Rauheit

Auf den Einfluss der Form und Rauheit der zu messenden Werkstücke soll hier besonders eingegangen werden. Zu Recht wird dieser Einfluss vielfach als wichtiger Unsicherheitseinfluss in der Koordinatenmesstechnik aufgeführt. Er resultiert daraus, dass von einem Merkmal immer nur einzelne Punkte erfasst werden, obwohl das Merkmal durch seine gesamte Oberfläche definiert ist [6]. Ein ideales Messgerät müsste also unendlich viele Punkte über die gesamte

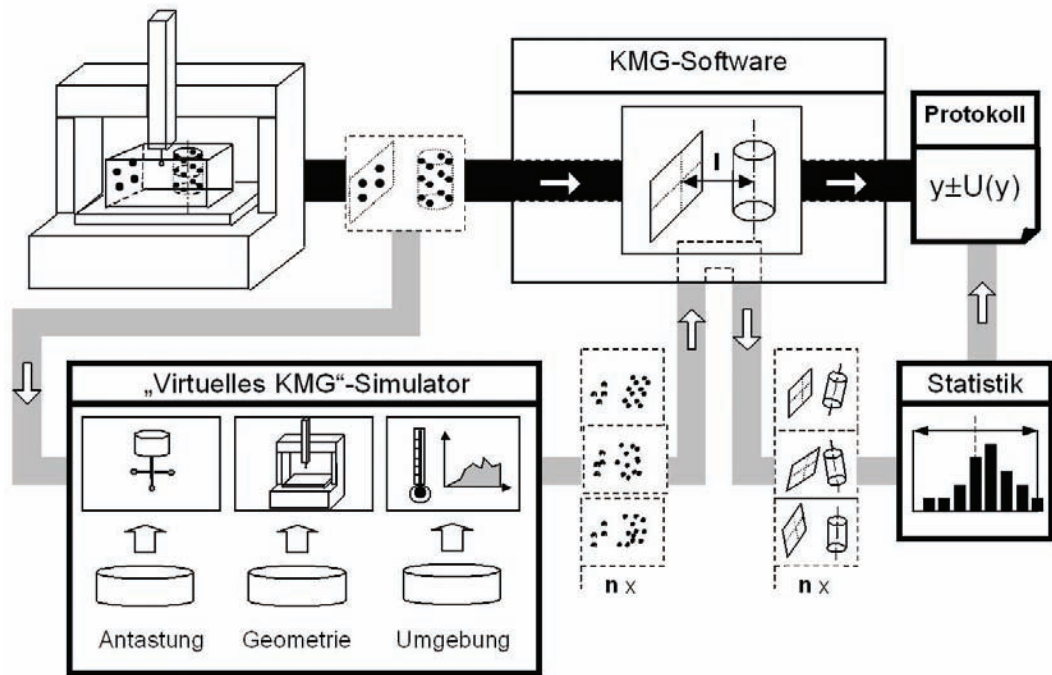


Bild 2:
Datenfluss im Virtuellen
KMG
schwarz: „klassischer“
Datenfluss
grau: Datenfluss durch
die Virtuelle KMG-
Software

tolerierte Oberfläche des gemessenen Merkmals aufnehmen. Dies ist auch bei scannenden KMG nur in einzelnen Schnitten annähernd möglich. Die Größe des Unsicherheitsbeitrags hängt von den Form- und Rauheitsabweichungen des Merkmals, der Punktzahl und der Punktverteilung ab. Die Simulation bietet prinzipiell die Möglichkeit zur Berücksichtigung dieses Einflusses. Ihre Einbeziehung ist aber zur Zeit noch Gegenstand der Entwicklung in der PTB und für Anwender noch nicht verfügbar (vergl. Abschnitt 7).

Für die Anwendung des Verfahrens in akkreditierten Laboratorien hat man zunächst die Vereinbarung getroffen, dass der im Kalibrierschein angegebene Wert sich auf eine genau dokumentierte Punktverteilung bezieht, die zwischen Kunden und Kalibrierlabor abgestimmt werden muss. Diese muss dann im Kalibrierschein sorgfältig dokumentiert sein. Durch diese exakte Definition der Messgröße ist der Einfluss der Formabweichung auf das Messergebnis eliminiert. Dieses Verfahren ist analog zu klassischen dimensionellen Kalibrierungen, wie z.B. beim Endmaß oder beim Lehrring.

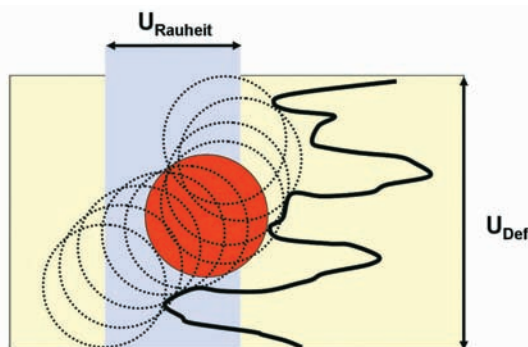


Bild 3:
Einfluss der Rauheit auf die Messunsicherheit

Was jedoch bleibt, ist der Einfluss der Rauheit, da die Antastpunkte auch bei genauester Ausrichtung im Maßstab der Mikrogeometrie nicht reproduzierbar definiert sein können. Diese Definitionsunsicherheit U_{def} resultiert in einem zusätzlichen Messunsicherheitsanteil $U_{Rauheit}$ wie in Bild 3 veranschaulicht.

Dieser Einfluss kann durch verschiedene Verfahren abgeschätzt werden und wird in der Simulation berücksichtigt. Eine erste Abschätzung dieses Unsicherheitsanteils auf den Einzelpunkt ist $U_{Rauheit} = R_z/2$. Dies führt jedoch im Allgemeinen zur deutlichen Überschätzung, da die Filterwirkung der Tastkugel darin nicht berücksichtigt wird. Genauere Werte lassen sich entweder durch Versuche oder durch numerische Auswertung des Oberflächenprofils ermitteln. Hierzu werden in der PTB zurzeit Untersuchungen durchgeführt.

5 Aufbau einer messtechnischen Infrastruktur

5.1 Einrichtung von DKD Laboratorien

Das „Virtuelle KMG“ wurde von 2002-2004 in einem Kooperationsprojekt der PTB in die Industrie transferiert. Als Resultat stehen seit 2004 fünf DKD-Laboratorien zur Verfügung, die in der Lage sind, beliebige prismatische Werkstücke als Referenzwerkstücke oder Einstellmeister im strengen Sinne rückführbar zu kalibrieren. Im Rahmen von umfangreichen Vergleichsmessungen wurde die Funktionsweise des Verfahrens und die Kompetenz der Kalibrierlaboratorien validiert. Insgesamt wurden über 15.000 Messergebnisse und ihre Unsicherheiten mit Referenzwerten verglichen.

Die Industrie kann so mit kalibrierten Normalen versorgt werden, um die Rückführung

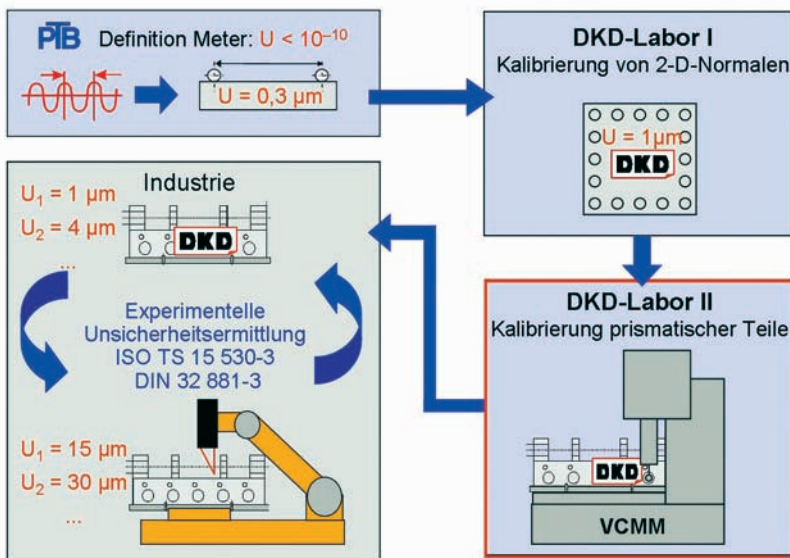


Bild 4:
Konzept zur Rückführung
von beliebigen, dimensionellen
Messprozessen in
der Industrie

von produktionsnahen Messeinrichtungen sicherzustellen. Hierzu ist in Bild 4 die gesamte Kalibrierkette ausgehend von der Meterdefinition bis zur Unsicherheitsermittlung im industriellen Umfeld skizziert. Basis dieses Konzeptes ist die experimentelle Unsicherheitsermittlung mit kalibrierten Werkstücken (verg. Abschnitt 3.2). Die Kalibrierung dieser Werkstücke wird dabei auf einem KMG durchgeführt, das u.a. mit Hilfe einer Kugelplatte (2D-Normal) für die Anwendung des Virtuellen KMG qualifiziert wurde.

5.2 Regelmäßige Überwachung

Durch regelmäßige Überwachungsmessungen muss sichergestellt werden, dass die Annahmen, die der Unsicherheitsberechnung zugrunde liegen, noch den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen. Dies muss alle Unsicherheitseinflüsse mit einbeziehen: die Abweichungen und die Unsicherheit der Geometrie des KMG, die Temperaturbedingungen des Messraums und die Funktionsweise des Tastsystems. Gleichzeitig muss der Aufwand für den Bediener des KMG so gering sein, dass eine regelmäßige Überprüfung in Intervallen von etwa einem Monat problemlos möglich ist. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde der so genannte „Black Box“ Ansatz gewählt. Anstatt die Einflussgrößen einzeln auf die Einhaltung ihres Vertrauensbereiches zu prüfen, wird das ganze System durch Messung an kalibrierten Prüfkörpern verifiziert. Dazu müssen Messaufgaben gewählt werden, bei denen die wichtigsten Unsicherheitseinflüsse und die häufigsten Fehlerursachen sichtbar werden. Nach den umfangreichen Erfahrungen aus Datenmaterial von mehr als 100 KMG [12] aus der Industrie sind dies vor allem:

- Veränderungen des Maßstabs durch Temperaturänderung oder Veränderungen von Temperaturerfassungssystemen

- Änderungen der Rechtwinkligkeiten und der linearen rotatorischen Abweichungen der Achsen durch Langzeitänderungen der mechanischen Strukturen (Setzeffekte), Änderungen von Temperaturgradienten im Raum und Kollisionen.
- Defekte und Dejustierungen im Tastsystem

Zwei Verfahren, die diesen Anforderungen gerecht werden, sind die Messung von Kugelplatten in zwei gekreuzten Aufstellungen (in Anlehnung an VDI 2617 Blatt 5) und die Messung des so genannten Kugelquaders [16]. Die Entscheidung, ob ein KMG noch die „richtigen“ Messunsicherheiten liefert, kann durch Vergleich der aktuell bei der Überwachung erhaltenen Werte und Messunsicherheiten mit den entsprechenden Werten der kalibrierten Prüfkörper ermittelt werden. Falls das KMG diesen Test nicht bestanden hat, müssen genauere Analysen und entsprechende Korrekturmaßnahmen durchgeführt werden.

5.3 Normung

Auch in der Normung hat die Messunsicherheitsermittlung durch Simulation bereits seine Berücksichtigung gefunden. Die Richtlinie VDI/VDE 2617-7 [17] beschreibt die Grundzüge des Verfahrens, die notwendige Dokumentation durch den Anbieter und zeigt Verfahren auf, durch Simulation ermittelte Unsicherheiten zu validieren. Technische Details des Simulationsverfahrens werden in dem Blatt nicht festgeschrieben, auch um den technischen Fortschritt nicht zu behindern. Es gibt jedoch Anwendern und Herstellern eine gemeinsame Grundlage für den Einsatz und bildet damit auch die Grundlage für eine breite Akzeptanz des Verfahrens. Diese Richtlinie war auch die Vorlage für das Dokument ISO 15530-4, das seit diesem Jahr verfügbar ist [18].

6 Zukünftige Entwicklung des Virtuellen KMG

Zu Zeit arbeitet die PTB zusammen mit den Herstellern Zeiss, Hexagon und Mitutoyo an der Weiterentwicklung des Simulationsverfahrens. Ziel der Entwicklung sind insbesondere: Einbeziehung der Formabweichungen des Werkstücks in die Unsicherheitsangabe (verg. Abschnitt 4.3) und die Berücksichtigung der Betriebsart Scanning in die Simulationssoftware. Zusätzlich soll die Erzeugung der Eingangsparameter vereinfacht werden und eine gemeinsame Schnittstelle geschaffen werden. Eine weitere Aktivität der PTB ist die Erweiterung des Verfahrens auch auf andere Messinstrumente. Für Lasertracker wird das Verfahren zusammen mit den zwei führenden Anbietern von Lasertrackern [19,20] und zahlreichen Anwendern entwickelt. Ziel ist auch

hier die automatische Berechnung der Messunsicherheit im Messprotokoll. Auch für die Zahnradmesstechnik wird in einem Industrieprojekt mit an der Implementierung des Verfahrens gearbeitet, was insbesondere die Modellierung von Drehachsen notwendig macht.

7 Zusammenfassung

Die Methode des Virtuellen KMG ist ein sehr vielversprechender Weg zur Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit in der Koordinatenmesstechnik. Der Nutzer eines entsprechend ausgerüsteten KMG erhält so automatisch zu jedem Messergebnis dessen Unsicherheit. Das Virtuelle KMG ist mittlerweile in die kommerzielle KMG-Software von zwei Hersteller integriert worden und hat seine Bewährungsprobe beim Einsatz in mehreren Kalibrierlaboratorien bestanden. Das Virtuelle KMG ist die Basis für eine messtechnische Infrastruktur, mit der die Messunsicherheit – und damit die Rückführbarkeit der Messung – nahe an den Produktionsprozess gebracht werden soll. Diese Infrastruktur beruht auf Kalibrierlaboratorien, die mit dem Virtuellen KMG ausgerüstet sind und so die Industrie mit kalibrierten, werkstückähnlichen Normalen versorgen können. Mittlerweile ist Messunsicherheitsermittlung durch Simulation auch in der Normung beschrieben, was die Voraussetzung für den breiten industriellen Einsatz schafft. Die weitere Entwicklung des virtuellen KMG zielt darauf, den Funktionsumfang der Simulationen zu erweitern. Insbesondere die Einbindung der Formabweichungen des Werkstücks, die Einbindung von Drehtischen und des Scanning-Modus wird von vielen Anwendern gewünscht. Gleichzeitig soll das Konzept so vereinfacht werden, das es auch für KMG außerhalb von Kalibrierlaboratorien anwendbar wird.

Literatur

- [1] VDI/VDE 2617, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten, Blätter 2.1, 5, 6 (1997–2001)
- [2] DIN EN ISO 10360, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teile 2-5 (2000–2005)
- [3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), (1995)
- [4] DIN ISO/TS 15530-3, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen, (2004)
- [5] VDI/VDE 2617-8, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung – Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten, (2006)
- [6] ISO 14660-1: Geometrical Product Specifications (GPS) - Geometrical features – Part 1: General terms and definitions, (1999)
- [7] K. Wendt, C. Keck, H. Schwenke: Prüfprozesseignung von Inline-Messtechnik im Karosseriebau, PTB-Mitteilungen 117, S. 417–424 (in diesem Heft)
- [8] Kunzmann, H.; Trapet, E; Wäldele, F.: A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machines using Reference Objects. In: Ann. CIRP 39 (1990), Nr. 1, S. 561–564
- [9] Trapet, E., Wäldele, F.: The Virtual CMM Concept. Advanced Mathematical Tools in Metrology, World Scientific Publ. Comp., 1996, p 238–247
- [10] Schwenke, H.: Abschätzung von Messunsicherheiten durch Simulation an Beispielen der Fertigungsmesstechnik (Dissertation), PTB-Bericht F36, 1999
- [11] ISO Guide 98 Supplement 1, Ausgabe: 2006–11: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) – Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method (2004)
- [12] E. Trapet et al.: Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine, PTB-Bericht F-25, 1999
- [13] www.zeiss.de, Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen
- [14] www.mtwz.de, Messtechnik Wetzlar GmbH, Wetzlar
- [15] Wäldele, F. et al.: Testing of CMM Software, Precision Engineering (15), 1993, p 121–123
- [16] www.koba.de, Kolb + Baumann GmbH & Co. KG, Aschaffenburg
- [17] VDI/VDE 2617-7, Genauigkeit von Koordinationsmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation (2006)
- [18] DIN ISO/TS 15530-4, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 4: Berechnung der aufgabenspezifischen Unsicherheit durch Simulation (Veröffentlichung in 2007)
- [19] www.leica-geosystems.com, Leica Geosystems AG, Schweiz
- [20] www.faro.com, Faro Europe, Stuttgart

Genauigkeitssteigerung und Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten mit dem LaserTRACER

Karin Kniel¹, Heinrich Schwenke²

1 Einleitung

Für die Messung einachsiger Verschiebungen ist das stabilisierte Laserinterferometer heute in der Präzisionsmesstechnik nicht mehr wegzudenken. Seine überragende Auflösung, Linearität und Stabilität sowie seine direkte Rückführbarkeit auf Frequenznormale machen es für anspruchsvolle dimensionelle Messaufgaben besonders geeignet. Auch in der Koordinatenmesstechnik wird es seit langem zur Kalibrierung der Positionsabweichungen sowie bei der Kalibrierung von Bezugsnormalen eingesetzt.

Für den Einsatz in der mobilen Messtechnik wurde in den 80er Jahren der Lasertracker entwickelt [1]. Es handelt sich dabei um ein interferometrisches Messgerät, das den Messstrahl automatisch einem beweglichen Reflektor nachführt. Als Nachführeinrichtung wird eine mechanische Einheit mit zwei gekreuzten Achsen verwendet. Durch das Auslesen der Winkel und der Verschiebung entlang des Messstrahls lässt sich die Position des Reflektors im Raum bestimmen.

Abgeleitet davon ist die Entwicklung eines hochgenauen nachführbaren Interferometers, das wie ein Lasertracker mit seinem Messstrahl einem Reflektor im Raum folgen kann [2]. Aufgrund einer speziellen optischen Anordnung werden Ungenauigkeiten dieser Bewegung in Richtung des Messstrahls vollständig kompensiert. Im Folgenden wird das Funktionsprinzip dieses so genannten LaserTRACERs kurz erläutert und zwei Verfahren vorgestellt, mit denen der LaserTRACER die Genauigkeit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten deutlich steigern kann.

2 Entwicklung des LaserTRACERs

Kommerzielle Lasertracker erreichen eine Längenmessunsicherheit von etwa $U(k=2) = 10 \mu\text{m} + 30 \mu\text{m}/\text{m}$. Damit sind sie etwa eine Größenordnung ungenauer als hochgenaue Portal-KMG. Zwar ist bei Lasertrackern in der Regel die Ge-

nauigkeit in Richtung des Messstrahls deutlich höher als senkrecht dazu, doch auch in dieser Richtung werden durch die mechanischen Abweichungen der Lagerachsen Grenzen gesetzt. Aus diesem Grund wurde in der PTB in Kooperation mit dem National Physical Laboratory (NPL) in Großbritannien ein neues Funktionsprinzip für ein automatisch nachführendes Interferometer entwickelt [2, 3, 4]. Hierbei stand die Reduzierung des Hauptfehlereinflusses, nämlich der Messabweichungen durch die Messstrahlnachführung, im Vordergrund. In Bild 1 ist eine Prinzipskizze des so genannten LaserTRACERs dargestellt.

Bei herkömmlichen Lasertrackern erfolgt die Strahlnachführung über ein kardanisches aufgehängtes Spiegelsystem. Die Drehbewegungen beim Nachführen des Messstrahls verfälschen den Messwert durch die geometrischen Abweichungen der mechanischen Komponenten.

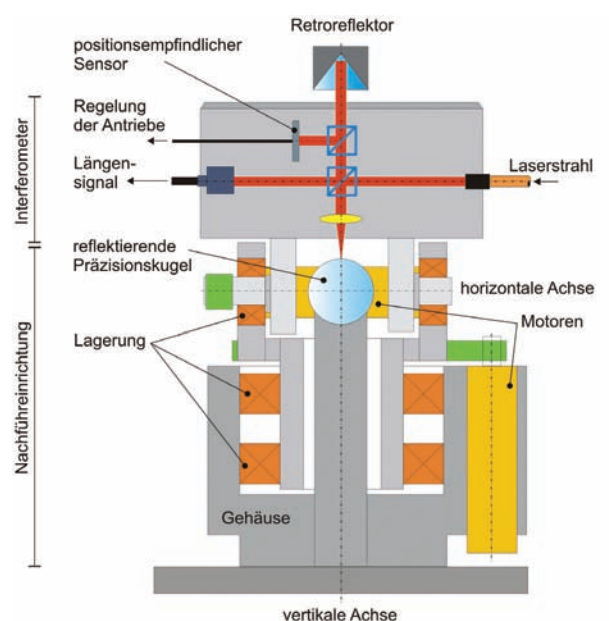


Bild 1:
Prinzipskizze des
LaserTRACERs

1 Dipl.-Ing. Karin Kniel
Leiterin der PTB-
Arbeitsgruppe
„Verzahnung und
Gewinde“
E-Mail:
karin.kniel@ptb.de

2 Dr. Heinrich Schwenke
Vorstand etalon AG,
Braunschweig
E-Mail:
heinrich.schwenke@
etalon-ag.de

Dies führt zu einer größeren Messunsicherheit. Im Gegensatz hierzu stützt sich das Messsignal des LaserTRACERs an einer mechanisch entkoppelten, ortsfesten Präzisions-Stahlkugel ab. Das Interferometer dreht bei diesem Prinzip näherungsweise um das Zentrum dieser Kugel und die Oberfläche der Kugel bildet dabei die Referenzfläche für den Messstrahl. Dadurch beziehen sich alle interferometrischen Messungen auf die Kugeloberfläche. Aufgrund der hohen Formgenauigkeit der Kugel (Formabweichungen < 50 nm) wird so ein nahezu fehlerfreier Referenzpunkt im Raum realisiert. Damit haben Abweichungen der Drehachsen keine Veränderungen des Signalweges zwischen dem Kugelmittelpunkt und dem Reflektor zur Folge. In der PTB wurden zwei Prototypen realisiert, erfolgreich erprobt und eingesetzt. Die Technologie des LaserTRACERs konnte erfolgreich in die Industrie transferiert werden und wurde dort weiterentwickelt. Ein aus der PTB ausgegründetes Unternehmen [5] vertreibt den LaserTRACER inzwischen als kommerzielles Produkt. Bild 2 zeigt beide Entwicklungen.



Bild 2:
PTB-Prototyp (links)
und kommerzielles Pro-
dukt (rechts)

Im Folgenden werden zwei Einsatzgebiete des LaserTRACERs im Bereich der Koordinatenmesstechnik vorgestellt.

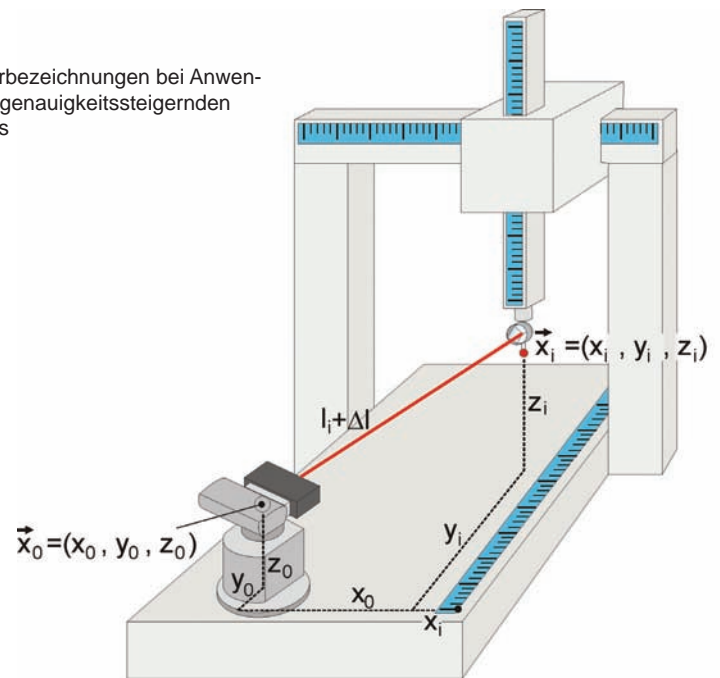
3 Genauigkeitssteigerung von Koordinatenmessgeräten

3.1 Prinzip

Entwickelt wurde dieses Verfahren [6] für Messaufgaben, die eine sehr hohe Messgenauigkeit erfordern, welche über die Möglichkeiten eines konventionellen Koordinatenmessgerätes hinausgehen. Dies gilt beispielsweise für die hochgenaue Kalibrierung von Normalen.

Die Genauigkeitssteigerung wird durch die messtechnische Integration des LaserTRACERs in das Koordinatenmessgerät erreicht (Bild 3). Während der Messung folgt der Messstrahl des LaserTRACERs einem Reflektor am Taster des Koordinatenmessgerätes. Für jeden Messpunkt werden die kartesischen Koordinaten des Koordinatenmessgerätes und die Längeninformation des LaserTRACERs abgefragt.

Bild 3:
Parameterbezeichnungen bei Anwen-
dung des genauigkeitssteigernden
Verfahrens



Das Prinzip zur Reduzierung der Messunsicherheit ist in Bild 4 dargestellt. Die Messunsicherheit einer KMG-Position u_{KMG} wird zunächst

vereinfacht als isotrop angenommen. Dies lässt sich durch einen kugelförmigen Unsicherheitsbereich veranschaulichen. Die Messunsicherheit des LaserTRACERs wirkt dagegen in Richtung des Messstrahls. Der Messunsicherheitsbereich u_l lässt sich daher als Kugelschale um den Referenzpunkt des LaserTRACERs annehmen. Die mathematische Verknüpfung der geometrischen Informationen beider Messmittel ergibt einen resultierenden Unsicherheitsbereich u_{res} in Form eines Ellipsoids. Für einen Messpunkt wird somit die Messunsicherheit in Richtung des Messstrahls minimal. Senkrecht zum Messstrahl lässt sich dagegen keine Genauigkeitssteigerung erzielen. Diese Eigenschaft muss bei der Wahl der Messstrategie und bei der Positionierung des LaserTRACERs berücksichtigt werden. Allgemein gilt: Je besser die Richtung des Messstrahls mit der für die Kalibrierung relevanten Richtung übereinstimmt, desto größer ist die erzielbare Genauigkeitssteigerung. In Abschnitt 3.3 wird dies anhand eines Beispiels verdeutlicht.

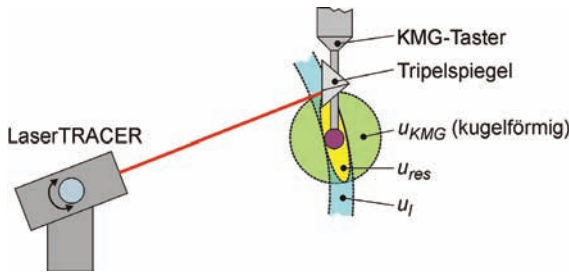


Bild 4: Reduzierung der Messunsicherheit des KMG u_{KMG} durch eine zusätzliche Längeninformation (Messunsicherheit u_l) auf resultierende Messunsicherheit u_{res}

3.2 Mathematische Beschreibung

Für die Berechnung der optimierten Positionen werden die durch das Koordinatenmessgerät ermittelten Koordinaten und die interferometrische Abstandsmessung miteinander kombiniert und ausgewertet. Voraussetzung für diese Berechnung ist die Kenntnis des Referenzpunktes \vec{x}_0 des LaserTRACERs (Bild 3), der durch einen Einmessvorgang ermittelt wird. Zur Bestimmung von \vec{x}_0 wird der Tastkopf des Koordinatenmessgerätes in mindestens vier verschiedene Positionen gefahren. Über einen Vergleich der Messwerte des Koordinatenmessgerätes und des LaserTRACERs und eine numerische Minimierung der Quadratsumme der Abweichungen lässt sich die unbekannte Position \vec{x}_0 mit guter Näherung ermitteln.

Nach der Einmessung des LaserTRACERs erfolgt die eigentliche Messung. Hierbei werden die Punktkoordinaten des Koordinatenmessgerätes und die interferometrische Längeninformation für jeden Messpunkt synchron ausgelesen (Bild 3). Die Berechnung der verbesserten Position \vec{x}' erfolgt unter der Annahme, dass \vec{x}' und die ausgelesene KMG-Position \vec{x} um $\Delta\vec{x}$ differieren. Die mit dem Interferometer ermittelte Entfernung l unterscheidet sich von der Entfernung l' (Abstand der verbesserten Position \vec{x}' vom Referenzpunkt \vec{x}_0) um die Differenz Δl . Deutlich werden diese mathematischen Zusammenhänge durch folgende Gleichungen:

$$\vec{x}' = \vec{x} + \Delta\vec{x} \tag{1}$$

$$l' = l + \Delta l \tag{2}$$

$$l' = |\vec{x}' - \vec{x}_0| \tag{3}$$

Die Berechnung der verbesserten KMG-Position \vec{x}' wird durch eine mathematische Optimierung erzielt. Hierbei erhält die Längeninformation des Interferometers l ein größeres Gewicht als die gemessenen Punktkoordinaten des KMG \vec{x} . Die Beziehung lässt sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Unsicherheiten wie folgt darstellen:

$$\frac{\Delta x^2}{u_{KMG}^2} + \frac{\Delta y^2}{u_{KMG}^2} + \frac{\Delta z^2}{u_{KMG}^2} + \frac{\Delta l^2}{u_l^2} \rightarrow Min \tag{4}$$

mit

$\Delta\vec{x} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ Abweichung KMG

Δl Abweichung TRACER

u_{KMG} Unsicherheit KMG

u_l Unsicherheit TRACER

Der Grad der erzielbaren Genauigkeitssteigerung hängt von der Genauigkeit des LaserTRACERs und der Ausrichtung des Messstrahls zur Messaufgabe ab.

Das Verfahren lässt sich für verschiedenste Messaufgaben zur Reduzierung der Messunsicherheit einsetzen. Die Vielfalt der möglichen Anwendungsgebiete erhöht sich, wenn das Koordinatenmessgerät mit einem Drehtisch ausgerüstet ist. Der Drehtisch dient der Zustellung der Messpunkte in Messstrahlrichtung. Bei einem Koordinatenmessgerät ohne Drehtisch kann das Verfahren z.B. für die Längenmessung von Endmaßen oder Stufenendmaßen eingesetzt werden oder für die Formmessung von Ebenheitsnormalen oder leicht gekrümmten Sphären oder Asphären. Bei einem Koordinatenmessgerät mit einem Drehtisch werden die Möglichkeiten erweitert: Auch Formmessungen an z.B. Ringen, Dornen, Zylindern und insbesondere Verzahnungen [7] werden dann möglich.

3.3 Ergebnisse

Die erzielbaren Ergebnisse werden an einer Ebenheitsmessung demonstriert. Hierfür wurde ein Ebenheitsnormal der PTB mit einer unabhängig kalibrierten Formabweichung von 70 nm auf dem Koordinatenmessgerät mit dem systemintegrierten LaserTRACER gemessen. Das Messprogramm lieferte sowohl die KMG-Koordinaten als auch die nach dem oben beschriebenen Verfahren optimierten Koordinaten. Für beide xyz-Datensätze erfolgte die Ebenheitsauswertung getrennt nach dem Gauß-Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate. Die berechneten Abweichungsvektoren an den Messpunkten bildeten die Grundlage für die Beurteilung der Ebenheit.

In Tabelle 1 werden die numerischen Ebenheitsauswertungen miteinander verglichen. Es werden die Formabweichungen und die entsprechenden Standardabweichungen gegenübergestellt.

	Formabweichung in nm	Standardabweichung in nm
KMG	750	80
mit Verfahren	220	20
Referenz	70	10

Tabelle 1: Vergleich der Formabweichungen

Während für die Messung mit dem Koordinatenmessgerät eine Formabweichung von 750 nm ermittelt wurde, liegt die Formabweichung bei Anwendung des genauigkeitssteigernden Verfahrens bei nur noch 220 nm. Im Vergleich zu der hochgenauen Kalibrierung des Ebenheitsnormals (Formabweichung von 70 nm) konnte damit durch Einsatz des LaserTRACERs das Messergebnis des Koordinatenmessgerätes um ca. 70 % verbessert werden.

In Bild 5 wurden jeweils die Ebenheitsabweichungen der KMG-Messung mit und ohne Anwendung des genauigkeitssteigernden Verfahrens in einem Profilschnitt numerisch erfasst und in ein Diagramm eingetragen. Außerdem wurden die Kalibrierwerte in derselben Schnittebene in das Diagramm mit aufgenommen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Abweichungen zum kalibrierten Profil durch die Genauigkeitssteigerung deutlich verringert wurden.

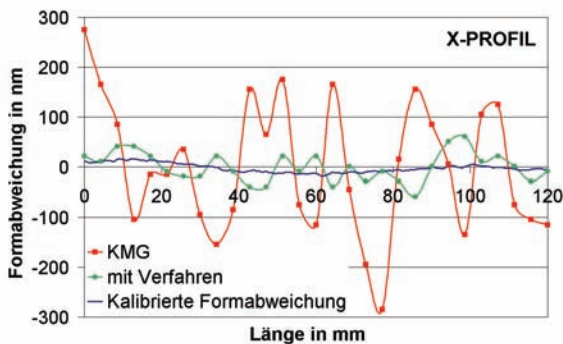


Bild 5: Vergleich der Messergebnisse im Profilschnitt

4 Erfassung und Korrektur von systematischen Geometrieabweichungen

Ein zweiter Einsatzbereich des LaserTRACERs ist die Erfassung von systematischen Geometrieabweichungen von Koordinatenmessgeräten und Werkzeugmaschinen [8]. Die Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten und Werkzeugmaschinen hängt in hohem Maße von den Geometrieabweichungen der Führungen ab. Bis in die 80er Jahre wurden diese durch aufwendige manuelle Handarbeit minimiert. Danach begannen verschiedene Forschergruppen, die mathematische Korrektur von systematischen Führungsabweichungen einzuführen. Basis dafür war das so genannte kinematische Fehlermodell. Es beschreibt die Abweichungen der Führungsachsen durch jeweils 6 Kennlinien für Positionsabweichung, zwei Geradheitsabweichungen und drei rotatorische Abweichungen (Nicken, Gieren, Rollen). Das systematische Abweichungsverhalten einer Maschine mit 3 Achsen kann also durch insgesamt 18 Kennlinien beschrieben werden. Seitdem wurde eine Vielzahl von Verfahren entwickelt, um diese systematischen Abweichungen

zu erfassen. Erfolgreiche Verfahren, die auch zum industriellen Einsatz gekommen sind, sind z.B.:

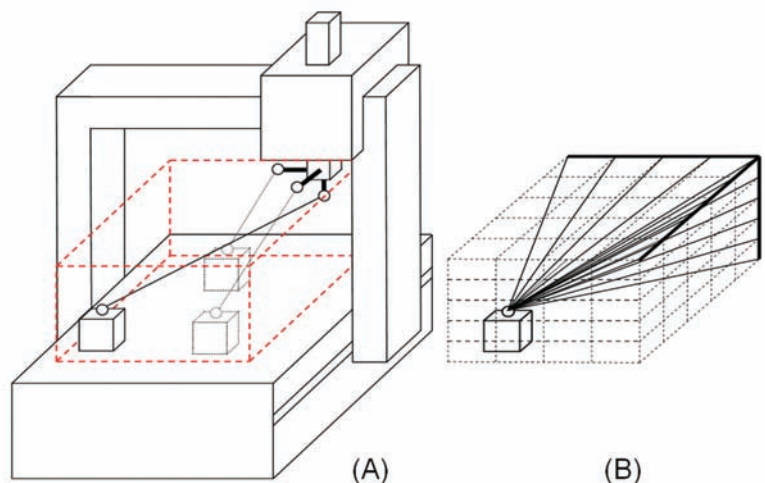
- Direkte Erfassung durch Interferometer, Geradheitsnormale, Neigungswaagen und Rechtwinkligkeitsnormale
- Kinematische Analyse auf der Basis von Kugel- oder Lochplattenmessung [9, 10]
- Einsatz eines beweglichen Kugelstabes für die Erfassung von Geometrieabweichungen bei Werkzeugmaschinen [11]

Vor etwa 5 Jahren begann man in der PTB, den Einsatz von Lasertrackern für die Erfassung von systematischen Geometrieabweichungen zu erproben [12]. In Zusammenarbeit mit Automobilherstellern wurden erste Versuche an Horizontalarmmaschinen mit Lasertrackern durchgeführt. Basierend auf diesen Erfahrungen entwickelte die PTB gemeinsam mit dem NPL ein Verfahren, bei dem durch räumliche interferometrische Längenmessungen von verschiedenen Punkten des Messvolumens aus die Geometrieabweichungen direkt berechnet werden können [13]. Im Folgenden wird das Messprinzip kurz eingeführt und eine Berechnung der Verfahrensunsicherheit basierend auf Monte-Carlo-Rechnungen beschrieben. Abschließend werden aktuelle Ergebnisse des Verfahrens dargestellt und ein Ausblick auf die geplanten Weiterentwicklungen gegeben.

4.1 Prinzip

Das Konzept basiert auf der räumlichen Abstandsmessung zwischen Punkten, die ortsfest zum Werkstücktisch sind und Punkten, die ortsfest zum Tastsystem bzw. Werkzeughalter sind. Diese Messungen erfolgen durch einen Lasertracker, der dem am Tastsystem bzw. Werkzeughalter angebrachten Reflektor automatisch folgt, oder – im Falle von höchsten Genauigkeitsanforderungen – durch den in Abschnitt 2 beschriebenen LaserTRACER. Bild 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

Bild 6: Positionierung des LaserTRACERs in mindestens 3 Positionen auf dem Maschinentisch. (A) Positionen, (B) räumliches Gitter.



Für jede Position des LaserTRACERs wird die Maschine durch ein räumliches Raster bewegt, das entlang der Bewegungsachsen ausgerichtet ist. Das Raster muss dabei nicht notwendigerweise aus einer einzelnen Position das gesamte Arbeitsvolumen abdecken, überlappende Messungen aus verschiedenen Positionen sind ebenso möglich. In jedem Raster-Messpunkt hält die Maschine kurz an und die entsprechende Messlänge wird vom Messsystem zusammen mit den Maschinenkoordinaten abgespeichert. Üblicherweise (je nach Stützstellendichte und Maschinengröße) werden so aus jeder Position 200–400 Messpunkte angefahren. Dies dauert je nach Maschinentyp etwa 10–30 Minuten. Um genügend Informationen für die vollständige parametrische Analyse der Maschine zu ermitteln, müssen aus 4–6 Positionen Längenmessungen durchgeführt werden. Je nach Größe der untersuchten Maschine und der Stützstellendichte dauert die Erfassung damit 1–4 Stunden.

4.2 Auswertung

Grundlage der Auswertung ist die Bildung eines linearisierten Gleichungssystems, das die kinematischen Abweichungen der Maschine in Relation zu den beobachteten Verschiebungen des Laserinterferometers setzt. Bei bekannten (gemessenen) Verschiebungen des Interferometers können dann durch numerische Gleichungslöser die kinematischen Parameter berechnet werden. Bei dem entwickelten Verfahren werden die Längenmessungen näherungsweise an festen Rasterpunkten der Maschinenachsen aufgenommen, so dass sich eindeutige Zuordnungen der Abweichungen zu den Achspositionen bilden lassen. Im Allgemeinen entstehen so lineare Gleichungssysteme mit ca. 3000×400 Elementen, die durch moderne Algorithmen und handelsübliche Rechentechnik in wenigen Sekunden gelöst werden können. Das Ergebnis sind die kinematischen Abweichungen des Systems als Kennlinien in Abhängigkeit der einzelnen Achspositionen.

Zusätzlich können auf Grundlage einfacher Unsicherheitsmodelle für die interferometrische Längenmessung durch integrierte Monte-Carlo Berechnungen Messunsicherheiten für die errechneten kinematischen Parameter bestimmt werden [14]. Diese Unsicherheiten dienen zum einen der Optimierung der Messstrategie (Anzahl der Lasertracker-Positionen, Verfahrenswege, Stützstellendichte). Zusätzlich können die so berechneten Fehlerbalken auch zur optimierten Spline-Interpolation für die Erstellung von Korrekturdaten verwendet werden.

4.3 Ergebnisse

Die erste experimentelle Validierung des Verfahrens fand am National Physical Laboratory

(NPL) an einem hochgenauen KMG mit einem Messvolumen von $1200 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ statt. Das Gerät stand unter guten Messraumbedingungen. Die Messungen wurden mit einem selbst entwickelten Lasertracker des NPL durchgeführt, der wie der oben beschriebene LaserTRACER eine optische Referenzkugel besitzt [15].

Die Ergebnisse wurden mit einem unabhängigen Verfahren verglichen, bei dem die Fehlerparameter auf der Basis von Messungen an hochgenauen Zerodurplatten bestimmt werden [9, 10]. Beide Verfahren zeigten eine sehr gute Übereinstimmung: In Bild 7 ist beispielhaft ein Vergleich der Fehler der y-Achse dargestellt. Für Positionsabweichungen und Geradheiten stimmten die ermittelten Fehlerverläufe innerhalb $1 \mu\text{m}$ überein, für Rotationen ergaben sich maximale Abweichungen von $2 \mu\text{rad}$ (0.4 Winkelsekunden).

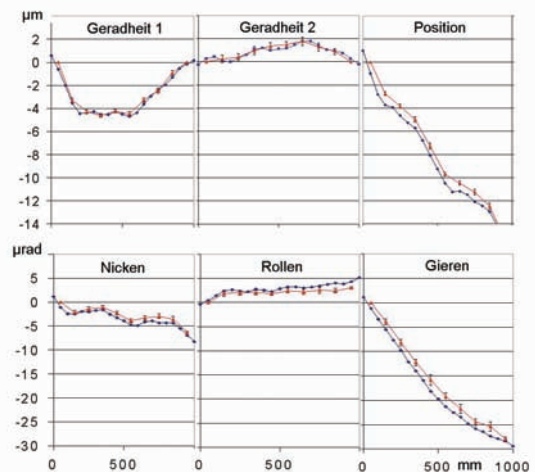


Bild 7:

Vergleich von 6 parametrischen Abweichungen der y-Achse eines unkorrigierten KMG. Die blauen Linien zeigen das Ergebnis einer Messung mit Zerodurlochplatten [9, 10], die roten Linien zeigen die Ergebnisse der Messung durch sequentielle Multilateration. Die Fehlerbalken zeigen die durch Monte-Carlo-Methoden berechneten Unsicherheiten.

Seitdem wurde bereits eine große Anzahl von Koordinatenmessgeräten mit dem neuen Verfahren untersucht. In einigen Fällen wurden auf Basis der Daten Korrekturdatensätze für Koordinatenmessgeräte erzeugt und an Prüfkörpern Vergleichsmessungen durchgeführt. Bild 8 zeigt die Ergebnisse einer Kugelplattenmessung in vertikaler Aufstellung, durchgeführt mit einem korrigierten KMG, dessen Korrekturdatensatz durch sequentielle Multilateration ermittelt wurde. Die Abweichungen liegen unter $0,4 \mu\text{m}$ und sind damit geringer als die Kalibrierunsicherheit der Kugelplatte.

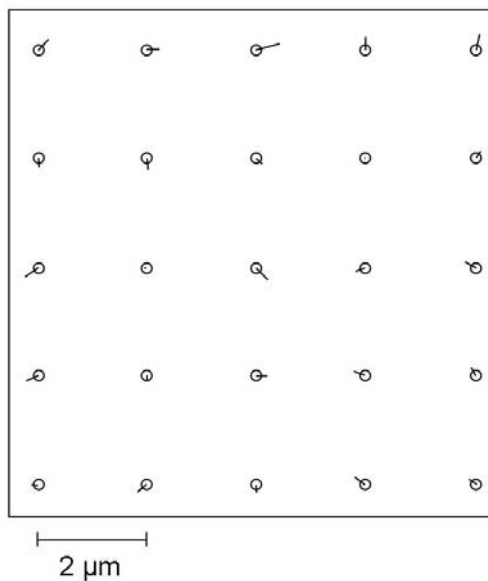


Bild 8:
Abweichungsvektoren der Kugelmittelpunktskoordinaten, gemessen mit einem korrigierten KMG, dessen Korrekturfeld durch sequentielle Multilateration erzeugt wurde. Die Messung wurde an einer vertikal aufgestellten Platte mit einem seitlichen Taster von 150 mm Länge durchgeführt.

5 Zusammenfassung

In dem Beitrag wurden zwei Einsatzfälle für den neu entwickelten LaserTRACER in der Koordinatenmesstechnik gezeigt. Zuerst wurde ein Verfahren vorgestellt, das durch direkte Einbindung des LaserTRACERs in den Messprozess die Messgenauigkeit für bestimmte Aufgaben deutlich steigern kann. Dieses Verfahren wird in der PTB zur Genauigkeitssteigerung bei der Verzahnungsmessung eingesetzt. Der zweite Anwendungsfall ermöglicht die hochgenaue und automatisierte Kalibrierung von KMG durch räumliche Längenmessung. Damit können die systematischen Abweichungen von KMG unterschiedlichster Baugröße in kürzester Zeit ohne Bedienerinfluss erfasst und zur Korrektur verwendet werden. Der LaserTRACER und die Software zur Aufnahme der Geometrieabweichungen sind bereits kommerziell erhältlich, das Verfahren zur Genauigkeitssteigerung steht kurz vor dem Transfer in die Industrie.

Literatur

- [1] Lau, K., Hocken, R.J., Haight, W.C.: Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology. *Precision Engineering* 8/1, 1986, pp. 3–8
- [2] Gebrauchsmuster Nr. 20 2004 007 647.0: Nachführbares Interferometer mit mechanisch und thermisch entkoppeltem, metrologischem Referenzelement (TRACER)
- [3] Härtig, F., Keck, C., Kniel, K., Schwenke, H., Wäldele, F., Wendt, K.: Improvement of

measurement accuracy by combined evaluation of CMM and tracking interferometer measurements. *IXVII IMEKO world congress, June 22–27 2003, Dubrovnik/Croatia*, CD No.132.

- [4] Kniel, K., Härtig, F., Keck, C., Schwenke, H., Wäldele, F., Wendt, K.: *Selbstnachführendes Laserinterferometer für die Koordinatenmesstechnik*. Technisches Messen, Oldenbourg Verlag, München, 71/4, 2004, S. 227–232
- [5] Etalon AG, Braunschweig, www.etalon-ag.com
- [6] Patent DE 101 26 753 B4: Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Koordinatenmessgeräten und Werkzeugmaschinen
- [7] Härtig, F., Kniel, K.: Weitergabe der Längeneinheit für Verzahnungsmessungen. *PTB Mitteilungen 117*, S. 57–66 (in diesem Heft)
- [8] Wendt, K., Schwenke, H., Bösemann, W., Dauke, M.: Inspection of large CMMs by sequential multilateration using a single laser tracker. *Laser metrology and machine performance VI*, 2003, pp. 121–130.
- [9] Trapet, E., Wäldele, F.: A reference object based method to determine the parametric error components of co-ordinate measuring machines and machine tools. *Measurement*, 9, 1991, pp. 17–22
- [10] Kunzmann, H., Trapet, E., Wäldele, F.: Results of international comparison of ball plate measurements in CIRP and WECC. *Annals of the CIRP*, Vol 44/1/1995, pp. 479–483
- [11] Florussen, G.H.J., Delbressine, F.L.M., van de Molengraft, M.J.G., Schellekens, P.H.J.: Assessing geometrical errors of multi-axis machines by 3D length measurements. *Measurement*, 30, 2001, pp. 241–255.
- [12] Busch, K., Kunzmann, H., Wäldele, F.: Numerical Error-Correction of a Coordinate Measuring Machine. *Proc. of Int. Symp. Metrology for Quality Control and Production*, Tokyo, 1984, pp. 278–282.
- [13] Hocken, R., Zhang, G., Veale, R., Charlton, B., Borchardt, B.: Error Compensation of Coordinate Measuring Machines. *Annals of the CIRP*, Vol 34/1/1985
- [14] Schwenke, H., Siebert, B., Wäldele, F., Kunzmann, H.: Assessment of Uncertainties in dimensional Metrology by Monte Carlo Simulation: Proposal of a Modular and Visual Software. *Annals of the CIRP*, Vol. 49/1/2000, pp. 395–398.
- [15] Hughes, E.B., Wilson, A., Peggs, G.N.: Design of a High-Accuracy CMM Based on Multi-Lateration Techniques. *Annals of the CIRP*, Vol. 49/1/2000, pp. 391–394.

Optische Sensoren für die Koordinatenmesstechnik – Prinzipien und Prüfung

Ulrich Neuschaefler-Rube¹, Klaus Wendt², Wiebke Ehrig³

1 Einleitung

In der Koordinatenmesstechnik gewinnen optische Sensoren immer mehr an Bedeutung. Sie werden anstelle von klassischen taktilen Tastern in Koordinatenmessgeräten, aber auch in Stand-Alone-Messgeräten eingesetzt [1]. Teilweise kommen auch mehrere Sensorprinzipien gemeinsam zum Einsatz (Multisensormessung). Die Hauptvorteile optischer Sensoren sind die berührungslose Messung und die schnelle Erfassung vieler Datenpunkte. Dadurch können auch weiche Objekte und Objekte mit empfindlichen Oberflächen gemessen werden. Die schnelle Erfassung der Datenpunkte ermöglicht es, im Vergleich zur taktilen Messung eine umfassendere Information über das Messobjekt in kurzer Zeit zu gewinnen. Wegen der schnellen Messung eignen sich optische Sensoren auch besonders für Messungen in der Fertigungslinie (Inline-Messungen) [2].

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, auch sehr kleine Merkmale zu erfassen. Die klassische taktile Koordinatenmesstechnik ist hier durch die kleinsten verfügbaren Antastelemente ($\varnothing 0,3 \text{ mm}$) begrenzt. Für kleinere Merkmale stehen spezielle taktile-optische Taster (Antastelementdurchmesser $\geq \varnothing 15 \mu\text{m}$) zu Verfügung [3, 4]. Mit optischen Sensoren lassen sich dagegen Strukturauflösungen $< 1 \mu\text{m}$ erreichen.

Auch für die Messung sehr großer Teile wie z.B. Flugzeugbauteile werden zunehmend optische 3D-Messsysteme eingesetzt. Diese Messsysteme sind mobil und bieten überall dort, wo das Messobjekt für einen Transport zu groß oder zu schwer ist, einen entscheidenden Vorteil. Qualitätsrelevante Bauteilmaße können direkt vor Ort erfasst werden, ohne lange Produktionsunterbrechungen oder einen aufwändigen Transport zur Messmaschine.

Den genannten Vorteilen stehen allerdings Nachteile gegenüber. Die Eigenschaften der Objektoberfläche haben bei optischen Sensoren einen größeren und schwerer abschätzbaren Ein-

fluss auf das Messergebnis als bei taktilen Sensoren. Insbesondere stark geneigte Oberflächen können zu Problemen bei der Messung führen, senkrechte Flächen und Hinterschnitte sind grundsätzlich nur schwer optisch zu messen. In Abhängigkeit vom Messprinzip sind Messungen an glänzenden Oberflächen, volumenstreuenden Oberflächen und Oberflächen mit Texturen mit höheren Messunsicherheiten behaftet.

Die in der taktilen Koordinatenmesstechnik verwendeten Prüfkörper weisen in der Regel keine optisch antastbaren Oberflächen auf. Es sind daher angepasste Prüfkörper erforderlich, um die Prüfmethode der taktilen Koordinatenmesstechnik auf die optische Koordinatenmesstechnik zu übertragen. Darüber hinaus ist wegen der Oberflächenabhängigkeit die Rückführung der Messergebnisse optischer Sensoren teilweise noch nicht sichergestellt. Die PTB arbeitet daher intensiv an diesen Aufgabenstellungen, um einen noch breiteren industriellen Einsatz optischer Sensoren zu ermöglichen.

2 Verfügbare optische Sensoren

Im folgenden Kapitel werden optische Sensoren vorgestellt, die in der Koordinatenmesstechnik genutzt werden. Es werden nur Sensoren behandelt, die Objekte mit technischen (also auch rauen) Oberflächen messen können.

2.1 Optische Sensoren an Koordinatenmessgeräten

Bei den optischen Sensoren, die an Koordinatenmessgeräten verwendet werden, kann zwischen Lateralsensoren und Abstandssensoren unterschieden werden.

Lateralsensoren erfassen die Dimensionen des Messobjektes in einer Ebene senkrecht zur Sensorachse. Hierzu werden in optischen Koordinatenmessgeräten heute üblicherweise Bildverarbeitungssensoren verwendet (Bild 1).

Das Messobjekt wird mit einer Durchlicht- bzw. Aufsichtbeleuchtung beleuchtet und durch ein in der Regel telezentrisches Objektiv

1 Dr. Ulrich Neuschaefler-Rube, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Optische Sensorik“
E-Mail: ulrich.neuschaefler-rube@ptb.de

2 Dr. Klaus Wendt, Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe „Koordinatenmessgeräte“
E-Mail: klaus.wendt@ptb.de

3 MSc. Dipl.-Ing. (FH) Wiebke Ehrig, Mitarbeiterin der PTB-Arbeitsgruppe „Optische Sensorik“
E-Mail: wiebke.ehrig@ptb.de

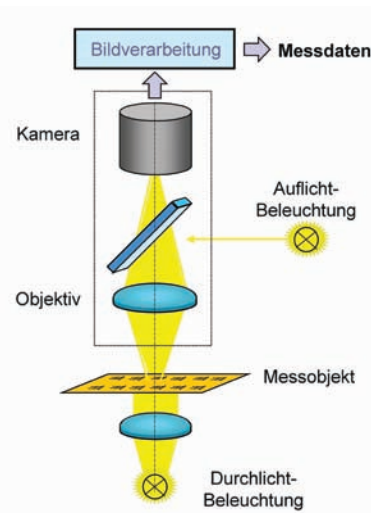


Bild 1: Bildverarbeitungssensor [5]

in die Kameraebene abgebildet. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen werden Kanten identifiziert und so Messpunkte in der Abbildungsebene des Objektivs gewonnen. In die Kantenverläufe können anschließend mit Hilfe von Best-Fit Algorithmen Regelgeometrien (z. B. Kreis, Gerade) eingepasst werden. Die Parameter dieser Regelgeometrien (z. B. Durchmesser, Abstände) sind meist die eigentlichen Messdaten, die mit Sollwerten verglichen werden.

Optische Abstandssensoren erfassen den Abstand des Messobjektes vom Sensor in Richtung der Sensorachse. Dieser Abstand wird sensorabhängig entweder nur an einem einzelnen Messpunkt, entlang einer Linie oder innerhalb eines Flächenausschnitts bestimmt.

Ein optischer Abstandssensor, der die gleiche Hardware wie der Bildverarbeitungssensor nutzt, ist der Autofokus-Sensor (Bild 2). Bei diesem Sensor werden das Objektiv und die Kamera gemeinsam in Richtung der optischen Achse (häufig die z-Achse des Koordinatenmess-

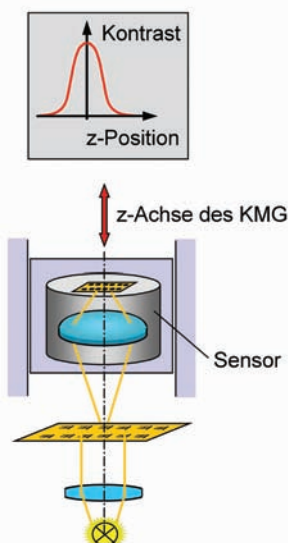


Bild 2: Autofokus-Abstandssensor [5]

gerätes) verschoben und der Kontrast innerhalb eines Auswertefensters im Kamerabild in Abhängigkeit von der z-Position bestimmt. Erreicht der Kontrast sein Maximum, stimmen die Abbildungsebene des Objektivs und die Objektenebene überein. Hieraus lässt sich die mittlere Lage des Objektes innerhalb des Messfensters ermitteln.

Mehrere häufig genutzte optische Abstandssensoren (Bild 3) basieren auf dem Prinzip der Triangulation.

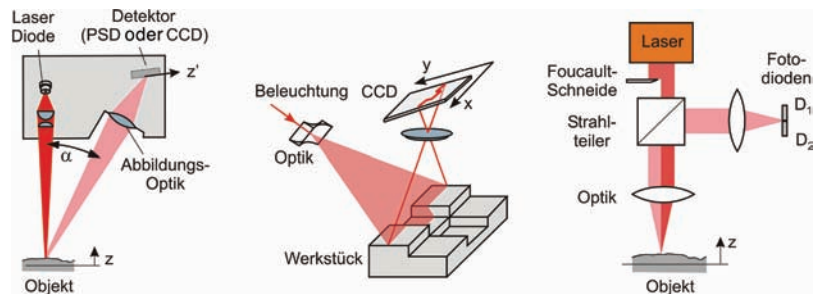


Bild 3: Optische Abstandssensoren nach dem Triangulationsprinzip. Links: Punkttriangulations-Sensor, Mitte: Lichtschnitt-Sensor, rechts: Foucault-Sensor (nach [5])

Beim Punkttriangulations-Sensor (Bild 3 links) wird ein Lichtpunkt auf das Messobjekt projiziert und unter einem anderen Winkel beobachtet. Die Beleuchtungsrichtung und die Beobachtungsrichtung unterscheiden sich um den Triangulationswinkel α . In Abhängigkeit von der z-Höhe wird der Lichtpunkt auf eine andere Position auf dem positionsempfindlichen Detektor abgebildet. Dieser Detektor kann eine positionsempfindliche Diode (PSD) oder eine CCD-Zeile sein. Dieses Messprinzip lässt sich zum linienhaft messenden Sensor (Lichtschnittsensor) erweitern, indem eine Linie auf das Messobjekt projiziert und ein Flächendetektor verwendet wird (Bild 3 Mitte). Zusätzlich wird mit einigen Lichtschnittsensoren flächenhaft gemessen, indem die projizierte Linie das Messobjekt abscannt.

Beim Foucault-Sensor (Bild 3 rechts) bildet der Öffnungswinkel der Optik den Triangulationswinkel. Mit Hilfe einer Foucaultschen Schneide wird die Hälfte des Laserstrahls abgeblendet, wodurch sich der Lichtpunkt bei einer vertikalen Objektverschiebung auf dem Objekt horizontal verschiebt. Diese Verschiebung wird erfasst, indem der Lichtpunkt auf ein Detektorpaar abgebildet wird.

Neben den Abstandssensoren in Bild 2 und 3 existiert eine Vielzahl weiterer Abstandssensoren, die derzeit seltener eingesetzt werden (z. B. konoskopischer Sensor [1, 6], chromatischer Weißlichtsensor [7] und spektrales Kohärenz-Interferometer [8]).

2.2 Optische Stand-Alone Messgeräte für die Messung kleiner Geometrien

Stand-Alone Messgeräte erfassen das Messobjekt in der Regel flächenhaft, d.h. sie ermitteln sowohl die laterale Messinformation als auch die Abstandsinformation innerhalb eines Flächenbereiches. Dadurch kann prinzipiell auf laterale Verstellachsen verzichtet werden. Vorhandene laterale Verstellachsen dienen bei diesen Messgeräten der Positionierung des Sensors und dem Messen von aneinandergesetzten (gestitchten) Flächenbereichen.

Das Mikro-Streifenprojektionsmessgerät (Bild 4, links) [9] ist eine Erweiterung des Lichtschnittsensors zur flächenhaften Messung. Anstelle einer Linie wird eine Folge von Streifenmustern (strukturierte Beleuchtung), z. B. nach dem Greycode-Prinzip, auf das Objekt projiziert. Durch Auswertung der Kamerabilder aller Streifenmuster kann das Höhenprofil des Objektes bestimmt werden.

Beim konfokalen Sensor (Bild 4, Mitte) [1, 10] wird ein Lichtpunkt auf das Objekt projiziert. Eine Lochblende in der konfokalen Fokusebene bewirkt, dass der Detektor diesen Lichtpunkt nur registriert, wenn sich die Objektoberfläche an dieser Stelle in Höhe der Fokusebene des Objektivs befindet. Für die flächenhafte Messung scannt der Lichtpunkt das Objekt mit Hilfe einer Ablenkeinheit oder einer Nipkow-Scheibe ab, wobei von einem Flächendetektor Bilder bei unterschiedlichen Abständen zwischen Objekt und Objektiv aufgenommen werden.

Das Weißlichtinterferometer (Bild 4, rechts) [1, 11] nutzt die kurze Kohärenzlänge von weißem Licht. In einem Interferenz-Mikroskopobjektiv (Mireau-, Linnik- oder Michelson-Anordnung) wird das von der Probe reflektierte Licht mit dem Licht eines Referenzzweigs zur Interferenz gebracht. Wegen der geringen Kohärenzlänge tritt nur dann Interferenz auf, wenn die Weglänge beider Lichtanteile nahezu gleich lang ist. Bei der Messung wird ein Interferenzbilderstapel bei unterschiedlichen Abständen zwischen Objekt und Interferenz-Objektiv aufgenommen. Durch pixelweises Suchen des maximalen Interferenzkontrastes wird anschließend das Oberflächenprofil des Objektes ermittelt.

Der Colour-Focus Sensor stellt die Erweiterung des Video-Autofokus auf die flächenhafte Messung dar. Hierzu ist in einen Mikroskopaufbau eine hochgenaue, motorisierte Fokussierachse (z-Achse) integriert. Der Sensor nimmt vom Objekt einen Bildstapel mit unterschiedlicher Fokuseinstellung auf. Hieraus wird pixelweise die Fokuseinstellung mit dem besten Kontrast bestimmt und so ein Bild des Objektes mit unendlicher Tiefenschärfe und die Oberflächentopographie ermittelt [13].

Besonders der konfokale Sensor, das Weißlichtinterferometer und der Colour-Focus Sensor eignen sich für die Messung sehr kleiner Objekte. Durch den Austausch des Objektivs sind bei diesen Sensoren Messfelder von wenigen mm bis in den Mikrometerbereich möglich. Die kleinsten Messfelder von Streifenprojektions-Messgeräten haben dagegen Abmessungen von wenigen mm.

2.3 Sensoren für Inline-Koordinatenmessungen

Inline-Messstationen sind direkt in die Produktionslinie integriert, so dass bei diesen Sensoren die Messzeit eine entscheidende Rolle spielt. Daher kommen überwiegend Lichtschnitt- und Bildverarbeitungssensoren oder Kombinationen dieser Sensoren zum Einsatz. Die verwendeten Lichtschnittsensoren projizieren oft mehrere Linien auf das Objekt, um die Messzeit weiter zu verkürzen. Die Sensoren werden entweder an stationären Messstationen, aber auch an Robotern eingesetzt.

Die Messaufgabe von Inline-Sensoren ist häufig nicht die reine Geometriebestimmung. Vielmehr soll zum Einen die Stabilität des Fertigungsprozesses durch Bestimmung des zeitlichen Verlaufs einer Messgröße während der Serienfertigung überwacht werden. Hier spielt die absolute Messabweichung des Sensors nur eine untergeordnete Rolle. Zum Anderen sollen mit Inline-Sensoren neben der Geometrie auch von der Geometrie abgeleitete Messgrößen erfasst werden. Im Karosserierohbau in der Automobilindustrie sind dies z. B. Spaltmaße oder die Bündigkeit. Von großer Bedeutung ist dabei die Definition der Messaufgabe. Auf diese Messaufgabendefinition und die Prüfung von Inline-Sensoren geht ein eigener Betrag in diesem Heft ein [2].

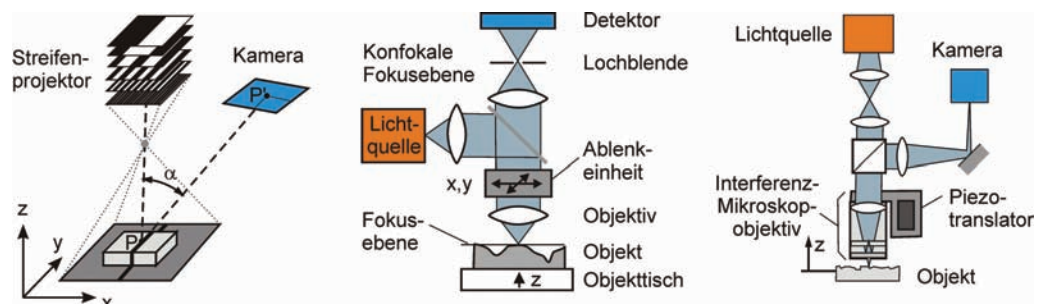


Bild 4:
Flächenhaft messende optische Stand-Alone-Messgeräte für kleine Geometrien [12]. Links: Streifenprojektions-sensor, Mitte: konfokaler Sensor, rechts: Weißlichtinterferometer

2.4 Sensoren für die Messung großer Teile

Optische 3D-Messsysteme für die Messung großer Teile können differenziert werden in Geräte, die auf räumlicher Winkelmessung (Triangulation), auf einer Kombination von Winkelmessung und Abstandsmessung (so genannte Polar-messsysteme) und auf reiner Abstandsmessung (Trilateration oder Multilateration) beruhen [14]. Beispiele für Triangulationssysteme sind Theodolitmesssysteme, photogrammetrische Online- und Offline-Messsysteme zur Messung von Einzelpunkten oder bildgebende Messverfahren mit strukturierter Beleuchtung zur flächenhaften Erfassung von Oberflächen. Polare Messsysteme messen typischerweise von einem festen Bezugspunkt die räumliche Richtung und den Abstand zu einem Messpunkt. Beispiele für derartige Systeme sind der Lasertracker und der Laserscanner bzw. das Laserradar. Trilaterations- oder Multilaterationsverfahren nutzen wie das Global Positioning System GPS Entfernungsinformationen zur Positionsbestimmung. Es wird die Tatsache genutzt, dass im Raum ein Punkt eindeutig geometrisch festgelegt ist, wenn von drei bekannten Bezugspunkten die drei Distanzen zum Messpunkt gemessen werden. Mit höchster Genauigkeit lassen sich häufig jedoch nur Abstandsänderungen ermitteln – z. B. interferometrisch –, so dass Messungen von einem vierten Bezugspunkt notwendig werden, um die relativen Längen gegeneinander abzugleichen.



Bild 5: Optische 3D-Messsysteme für die Messung großer Teile. links: Photogrammetrische Anordnung [14], rechts: Mobiles Streifenprojektions-Messgerät [15]

Typisch für all diese Messverfahren ist, dass sie skalierbar sind. Dies bedeutet, dass die Systeme häufig für unterschiedlich große Messvolumina adaptierbar sind. Sie können relativ einfach umgesetzt werden und dadurch auch Messobjekte erfassen, die größer sind als das eigentliche Messvolumen. Durch Umsetzung des Messsystems lassen sich auch jene Punkte messen, die allein von einem Standpunkt nicht erfasst werden können.

Die erzielbare Genauigkeit ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. Bild 6 stellt die prinzipiell erzielbare Messunsicherheit verschiedener Verfahren gegenüber. Stationäre Koordinatenmessgeräte und Multilaterationsverfahren erlauben Messungen mit einer relativen Messunsicherheit von annähernd $1 \mu\text{m}/\text{m}$. Die

anderen Verfahren, wie Photogrammetrie, Lasertracker und Laserradar, besitzen – da sie sich auf Winkelmessungen stützen – eine relative Unsicherheit von ungefähr $10 \mu\text{m}/\text{m}$. Die im Einzelfall erreichbare Messunsicherheit hängt jedoch von einer Reihe weiterer Faktoren ab, wie beispielsweise Messstrategie, Umgebungs- und Einsatzbedingungen. Insbesondere in rauer Produktionsumgebung können aufgrund ungünstiger Temperaturverhältnisse die Einflüsse der Umgebung dominieren.

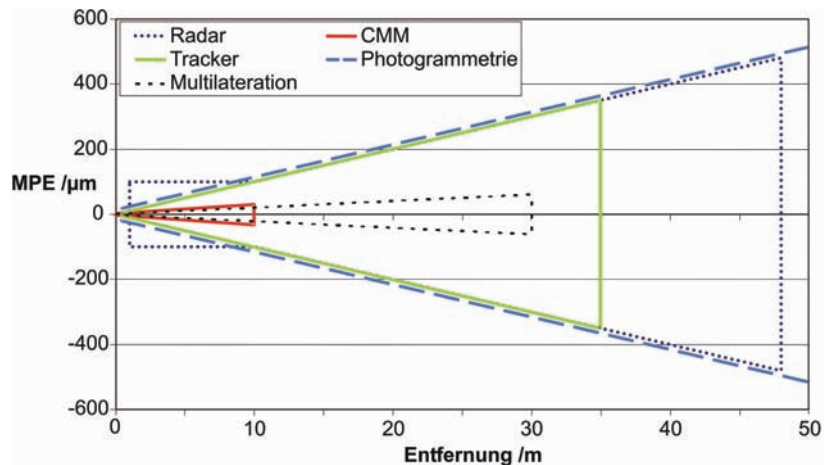


Bild 6: Erreichbare Messunsicherheiten von optischen 3D-Messsystemen zur Messung großer Teile [14]

Optische 3D-Messsysteme für große Teile werden vornehmlich in der Automobilindustrie, dem Waggonbau, der Flugzeug- und der Raumfahrtindustrie sowie dem Schiffbau eingesetzt. Die primären Einsatzbereiche liegen beim Automobilbereich im Design- und Prototypenumfeld, der Fahrzeugentwicklung (Crash-Test) sowie dem Einrichten von Fertigungsstraßen; bei der Flugzeugindustrie im Bereich der Qualitätssicherung, dem Herstellungsprozess von Großbauteilen bzw. der periodischen Überwachung von Form- und Lagetoleranzen an Großbauvorrichtungen.

2.5 Taktill-optischer Sensor

Der taktill-optische Sensor (sog. Fasertaster) kombiniert die taktile Antastung mit der optischen Detektion der Position des Antastelementes [3]. Hierdurch können sehr kleine Antastelemente realisiert werden, mit denen auch an senkrechten Wänden von sehr kleinen Geometrien (z. B. Mikrobohrungen) gemessen werden kann. Auf diesen Taster wird in einem anderen Beitrag in diesem Heft [4] detailliert eingegangen.

2.6 Röntgen-Computertomographie

Mit Hilfe der Röntgen-Computertomographie lassen sich sowohl äußere als auch innere Geometrien (z. B. Kühlkanäle) zerstörungsfrei mes-

sen [16]. Allerdings wirken im Vergleich zu den bisher beschriebenen Sensoren weit mehr Einflussgrößen auf das Messergebnis ein, wodurch umfangreiche Korrektur- und Überwachungsmaßnahmen erforderlich sind, um genaue und zuverlässige Messergebnisse zu erhalten. Diese noch junge Messtechnik mit sehr hohem Anwendungspotential wird derzeit in der PTB intensiv untersucht. Auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen geht ein eigener Beitrag in diesem Heft ein [17].

3 Prüfverfahren

3.1 Normen und Richtlinien

Für die Prüfung von Messsystemen mit optischen Sensoren sollten nach Möglichkeit die gleichen Verfahren angewandt werden, die bereits in der taktilen Koordinatenmesstechnik etabliert sind. Basis der Prüfung ist daher die DIN EN ISO 10360, die die Kenngrößen Antastabweichung und Anzeigenabweichung für Längenmessungen (Längenmessabweichung) definiert. Die Antastabweichung beschreibt dabei die

Längenmessabweichung werden kalibrierte Längenmaßverkörperungen (z. B. Stufenendmaße) in unterschiedlichen Ausrichtungen im Messvolumen gemessen.

Die Anwendung der DIN EN ISO 10360 auf Messsysteme mit optischen Sensoren wird in den Richtlinien VDI/VDE 2617 Blatt 6.1 (optische Sensoren für laterale Strukturen) und 6.2 (optische Abstandssensoren) näher beschrieben. Als Prüfkörper für Lateralsensoren werden insbesondere optisch gut antastbare Chromkreise und Maßstäbe mit Chromstrichen genannt. Für Messsysteme mit optischen Abstandssensoren sollen Kugeln aus Keramik oder Stahl verwendet werden (Bild 7 links). Von großer Wichtigkeit ist dabei die Oberflächenbeschaffenheit der Kugeln. Diese müssen optisch antastbar, also in der Regel matt sein. Darüber hinaus sollte der Kugelwerkstoff nicht volumenstreuend sein. Zur Ermittlung der Längenmessabweichung empfiehlt die VDI/VDE 2617 Bl. 6.2 Kugelstäbe mit zwei oder mehreren Kugeln. Da es sich bei der Messung von Kugelstäben nicht um eine bidirektionale Antastung handelt, muss zur Bestimmung der

Bild 7:
Prüfkörper für optische Abstandssensoren mit matten Oberflächen. Links [15], Mitte: Kugelstab/Kugelleiste zur Bestimmung von Antast- und Längenmessabweichung, rechts: Ebenheitsnormal zur Bestimmung der Ebenheitsabweichung [15]



lokalen Eigenschaften des Messsystems, also vor allem die Reproduzierbarkeit der Sensoren und wird durch Messungen einer vorgegebenen Zahl von Messpunkten an kalibrierten Kugeln bestimmt. Die Antastabweichung ist dabei die Spanne der Einzelpunkte von der in die Messpunkte eingepassten Kugel bzw. des in die Messpunkte eingepassten Kreises. Die Längenmessabweichung beschreibt die globalen Eigenschaften des Messsystems, also die Fähigkeit des Messsystems, Längen bei bidirektionaler Antastung zu messen. Dies beinhaltet neben dem Antastverhalten auch weitere Effekte, wie z. B. die Führungsabweichungen der Verstellsachsen und die Skalierung der Maßstäbe. Zur Ermittlung der

Kenngröße Längenmessabweichung zusätzlich das Antastverhalten berücksichtigt werden (in einer Worst-Case Abschätzung durch Addition der Antastabweichung).

Bild 8 zeigt als jüngste Entwicklungen der PTB Prüfkörper zur Bestimmung der Längenmessabweichung von Messsystemen für kleine Merkmale wie Kugelplatten mit Kugeldurchmessern von 2 mm und 0,5 mm (links), sowie einen Kugelkalottenwürfel mit 0,8 mm Kalottendurchmesser (rechts). Für die Kugelplatten wurden kommerzielle Kugellagerkugeln verwendet, deren Oberfläche in einem weiteren Arbeitsgang aufgeraut werden muss (vgl. Bild 9). Die Kugelkalotten wurden durch Senkerosion gefertigt.

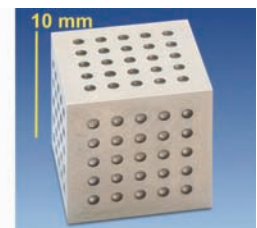
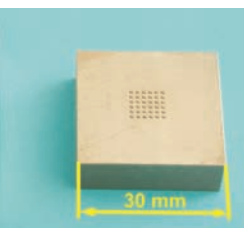


Bild 8:
Prüfkörper zur Bestimmung der Längenmessabweichung von Messsystemen für kleine Merkmale. Links: Kugelplatten mit 2 mm bzw. 0,5 mm Kugeldurchmesser, rechts: Kugelkalottenwürfel mit 0,8 mm Kalottendurchmesser

Um optisch antastbare Prüfkörperoberflächen (sog. kooperative Oberflächen) zu erhalten, wurden in der PTB verschiedene Fertigungsverfahren erprobt. Untersucht wurden ausschließlich Verfahren, die keine Texturen bzw. Vorzugsrich-

tungen wie z.B. Drehriefen auf der Oberfläche erzeugen. Bild 9 gibt einen Überblick über die Verfahren und die dabei erreichten Ergebnisse. Die Oberflächenrauheiten wurden dabei optisch, also nicht normgerecht, gemessen, erlauben aber einen Vergleich der Oberflächen untereinander. Mit allen Verfahren ließen sich kooperative Oberflächen erzeugen. Als besonders geeignet erwies sich das Erodierverfahren, da mit diesen Verfahren die Prüfkörpergeometrie und die kooperative Oberfläche in einem Arbeitsgang erzeugt werden. Um glänzende Oberflächen aufzurauen, sind insbesondere Beizen und Laserbearbeitung geeignet.

Die DIN 32877 behandelt vor allem triangulationsbasierte Messverfahren. Als wichtigste zusätzliche Kenngrößen werden hier die Linearitätsabweichung und die Grenzneigung definiert. Als Prüfkörper beschreibt die Norm hierzu ebene Platten, Kugeln und Zylinder mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften.

Über Normen und Richtlinien hinaus beschäftigt sich die Arbeitsgruppe 3 „Spezifizierung und Leistungsdaten“ der industriellen Initiative „Optical Sensor Interface Standard (OSIS)“ [19] mit der Prüfung optischer Sensoren. Die Definition von Spezifikationen und Prüfkörpern ist aber noch nicht abgeschlossen.




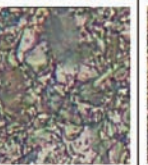


Bearbeitung	Trommel-Polieren	Beizen	Ultraschallbearbeitung	Strahlen mit Glassplittern	Drahterodieren Draht-Ø: 0,1 mm	Gepulster Nd:YVO4-Laser (355 nm) Zufallsmuster
Proben-Geometrie	Ebene	Ebene	Kugel Ø:0,5 mm	Ebene	Ebene	Ebene
Proben-Material	Nicht rostender Stahl	Nicht rostender Stahl	Nicht rostender Stahl	Nicht rostender Stahl	Nicht rostender Stahl	Vernickeltes Kupfer
Darstellung der Oberfläche Maßstab: 20 µm						
Rauheitskennwerte	„Ra“ = 0,2 µm „Rz“ = 1,5 µm	„Ra“ = 1 µm „Rz“ = 5,3 µm	„Ra“ = 0,2 µm „Rz“ = 1,4 µm	„Ra“ = 0,4 µm „Rz“ = 4 µm	„Ra“ = 0,2 µm „Rz“ = 1,2 µm	„Ra“ = 0,25 µm „Rz“ = 1,9 µm

Bild 9: In der PTB erprobte Verfahren zur Erzeugung kooperativer Oberflächen und dabei erreichte Ergebnisse (Oberflächendarstellungen mit Colour-Focus Sensor erzeugt, Rauheitskennwerte mit Weißlichtinterferometer gemessen (5x-Objektiv, Strukturauflösung: 2,67 µm, ungefilterte Daten)

Neben der VDI/VDE 2617 Bl. 6.1 und 6.2 behandeln noch die VDI/VDE Richtlinie 2634 und die DIN 32877 die Prüfung optischer Messsysteme. In der VDI/VDE 2634 werden dabei als zusätzliche Kenngrößen die Ebenheitsabweichung und die Kugelabstandsabweichung definiert. In Bild 7 rechts ist ein Prüfkörper zur Ermittlung der Ebenheitsabweichung dargestellt. Zur Bestimmung der Kugelabstandsabweichung können z. B. Kugelstäbe verwendet werden (vgl. Bild 7 links, Mitte). Einen Prüfkörper zur Ermittlung der Längenmessabweichung in einem großen Messvolumen nach VDI/VDE 2634 zeigt Bild 10.

3.2 Bauteilähnliche Prüfkörper

Bauteilähnliche Prüfkörper werden benötigt, um die in ISO/TS 15530-3 beschriebene Methode zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mit kalibrierten Werkstücken anwenden zu können. Bild 11 zeigt hierzu exemplarisch einen im Fachbereich Koordinatenmesstechnik entwickelten Prüfkörper zur Bestimmung der Messunsicherheit von Inline-Messstationen [2]. Ein Teil eines Karosseriebleches mit einem Langloch wurde mit Referenzelementen (Kreisblenden) versehen. Hierdurch können sowohl die Lage als auch die Abmessungen des Langloches taktil kalibriert werden.

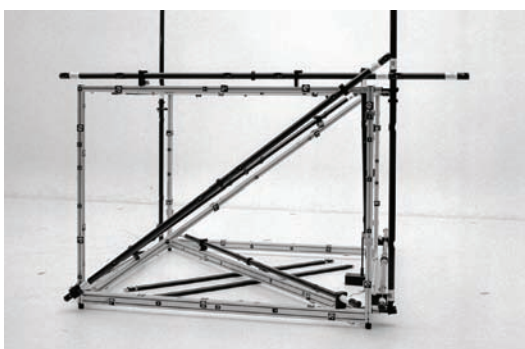


Bild 10: Prüfkörper zur Bestimmung der Längenmessabweichung in einem großen Messvolumen (größte verkörperte Länge: 2,5 m) [18]. Links: Gestell mit Längenmaßverkörperungen in unterschiedlichen Ausrichtungen, rechts: Detail einer kreisförmigen Marke

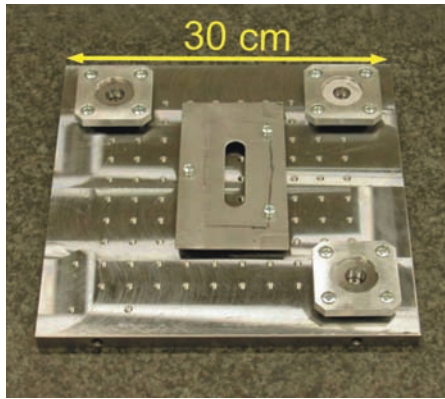


Bild 11: Bauteilähnlicher Prüfkörper aus der Inline-Mess-technik: Ausschnitt aus einem Karosserieblech mit Referenzelementen [2]

Als bauteilähnlicher Prüfkörper für taktile und optische Sensoren für kleine Merkmale wurde in der PTB der in Bild 12 gezeigte Mikroprüfkörper [20] entwickelt. Er verkörpert Zylindersegmente, geneigte Flächen und Stufen in unterschiedlichen Abmessungen. Die Fertigung erfolgt durch Drahterosion, wodurch die Oberflächen optisch antastbar („kooperativ“) sind. Die Kalibrierung erfolgt mit einem patentierten Verfahren [21] mit einem optischen KMG.

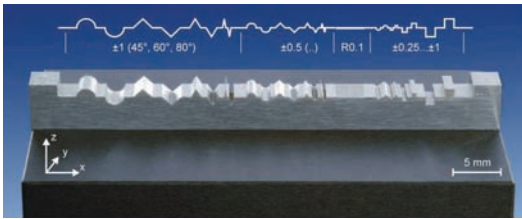


Bild 12: Bauteilähnlicher Mikroprüfkörper für optische und taktile Sensoren zur Messung kleiner Merkmale [20]

Bild 13 zeigt exemplarisch einen Prüfkörper zur Untersuchung von speziellen Effekten der Computertomographie. Ein Stufenzylinder dient zur Untersuchung des Einflusses der durchstrahlten Dicke.

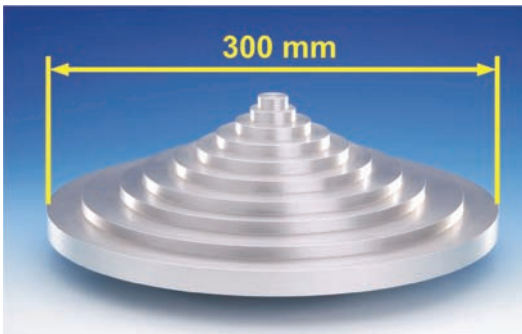


Bild 13: Prüfkörper für Computertomographie: Stufenzylinder zur Untersuchung des Einflusses der durchstrahlten Dicke [17]

4 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden wird exemplarisch auf einige Untersuchungsergebnisse der PTB an optischen Sensoren eingegangen.

4.1 Fehlereinflüsse bei Triangulationssensoren

In der PTB wurden Untersuchungen an Triangulationssensoren durchgeführt [22], um die dominanten Einflüsse auf das Messergebnis zu ermitteln und Korrekturmöglichkeiten aufzuzeigen. Bild 14 zeigt den ermittelten Einfluss der Oberflächenneigung auf die Messergebnisse am Bei-

spiel eines Triangulationssensors, dessen sphärische Aberration der Abbildungsoptik nur wenig korrigiert ist. Dargestellt sind die systematischen radialen Abweichungen in Abhängigkeit von der Oberflächenneigung, wobei die Oberfläche entweder parallel oder senkrecht zur Triangulationsebene geneigt war. Die Messungen erfolgten an einer geläpften Stahlkugel.

Während bei einer Neigung senkrecht zur Triangulationsebene vergleichsweise kleine Abweichungen auftreten, führt eine Neigung parallel zur Triangulationsebene zu deutlich größeren Messabweichungen. Bei kleineren Neigungswinkeln nimmt die Abweichung mit zunehmendem Betrag des Neigungswinkels zu. Dies ist auf die Aberration der Optik zurückzuführen. Besonders große Abweichungen treten nahe dem

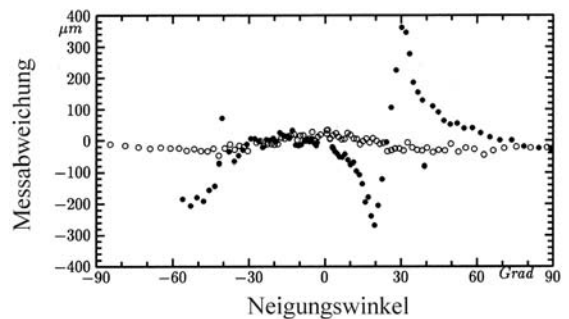


Bild 14: Systematische radiale Messabweichungen eines Triangulationssensor in Abhängigkeit vom Neigungswinkel [22]. Kreise: Neigung senkrecht zur Triangulationsebene, Punkte: Neigung parallel zur Triangulationsebene.

halten Triangulationswinkel auf. In diesem Fall fällt der direkte Reflex von der Oberfläche in den Detektor.

Bild 15 zeigt eine Messung zur Ermittlung des Einflusses von Farbübergängen. Als Messobjekt diente eine ebene Platte mit einem Schwarz-Weiß-Übergang, als Sensor wurde ein Triangulationssensor mit PSD-Detektor (positionsempfindliche Diode) verwendet. Dargestellt ist die scheinbare Abstandsänderung zwischen Sensor und Objekt, die durch den Farbwechsel verursacht wird.

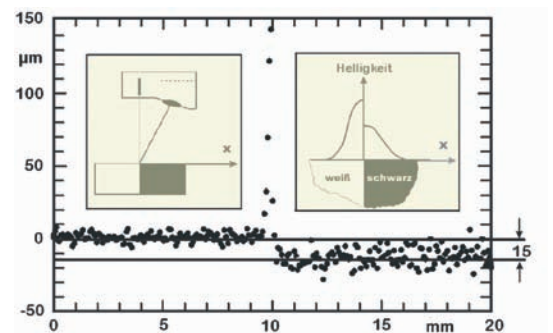


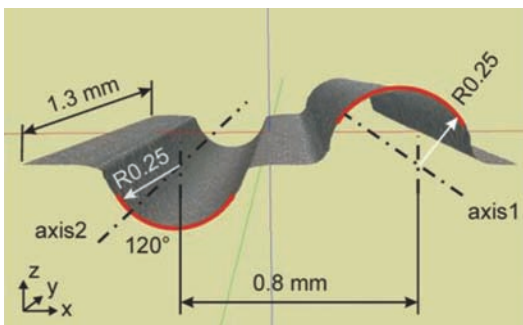
Bild 15: Messwerte eines Triangulationssensors an einer ebenen Platte mit einem Schwarz-Weiß-Übergang [22]

Im Bereich des Übergangs treten große Abweichungen auf. Dies wird durch das ungleichmäßige Intensitätsprofil innerhalb des Messflecks verursacht. Ursache der Höhendifferenz von ca. 15 µm der Plateaus ist eine Strahlverlagerung auf der Objekt Oberfläche durch das Nachregeln der Beleuchtungsintensität.

4.2 Vergleich von optischen und taktilen Mikrosensoren

Mit Hilfe des in Bild 12 gezeigten Mikroprüfkörpers wurden mehrere optische und taktile Mikrosensoren verglichen [20]. Betrachtet wurden folgende Sensoren und Messgeräte:

- Weißlichtinterferometer
- Colour-Focus Messgerät
- Streifenprojektions-Messgerät
- Spektrales Kohärenz-Interferometer
- Foucault-Sensor
- Chromatischer Weißlichtsensor
- Taktil-optischer Mikrotaster (Fasertaster)
- Ultraschall-Mikrotaster



wertung der Messergebnisse. In anonymisierter Form sind Abweichungen der gemessenen Radien, Achsabstände und Winkel zwischen den Achsen vom Mittelwert aller entsprechenden Messergebnisse aufgetragen.

Bei den Radien betragen die Streuungen um den jeweiligen Mittelwert nur wenige µm. Bei mehreren Sensoren (Nr. 1, 2, 3, 5, 8) fällt auf, dass der konkave Radius zu klein während der konvexe Radius zu groß gemessen wurde und umgekehrt. Eine mögliche Ursache für diesen Effekt sind ungenau eingestellte Schwellwerte bei der Datenauswertung. Bei den Achsabständen treten bei einigen Messgeräten vergleichsweise große Abweichungen auf. Eine mögliche Ursache hierfür sind Abbildungsfehler bei flächenhaft messenden Sensoren.

4.3 Mit flächenhaft messenden Systemen messbare Oberflächenneigungen

Um den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die messbaren Oberflächenneigungen verschiedener flächenhaft messender Systeme zu untersuchen,

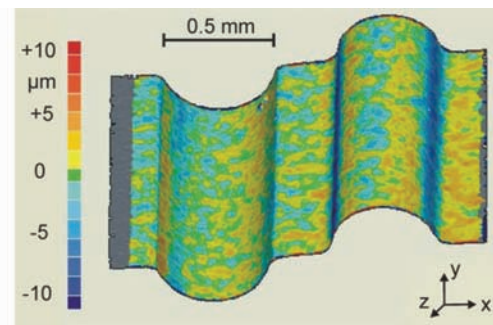


Bild 16: Für den Vergleich der Mikrosensoren verwendetes Detail des Mikroprüfkörpers [20]. Links: Messung mit Colour-Focus Messgerät, rechts: Vergleich der Ergebnisse von zwei flächenhaft messenden Messgeräten

Verglichen wurden die Messergebnisse an einem Detail des Prüfkörpers (Bild 16 links) mit einem konkaven und einem konvexen Zylindersegment (Radius: 0,25 mm).

Bei dem Vergleich der Ergebnisse zweier Messgeräte (Bild 16 rechts) treten die größten Abweichungen im Bereich der größten Oberflächensteigungen auf. Bild 17 zeigt eine detaillierte Aus-

wurde durch Beizen von Kugellagerkugeln (Ø 0,5 mm) ein Prüfkugelsatz mit ansteigender Rauheit erstellt. Die Kugeln verkörpern das komplette Winkelspektrum der Oberflächenneigung. Das messbare Winkelspektrum des Sensors kann daher aus der jeweiligen Messung ermittelt werden. Bild 18 zeigt die ermittelte Abhängigkeit des messbaren Winkelbereiches von der rms-Rauheit.

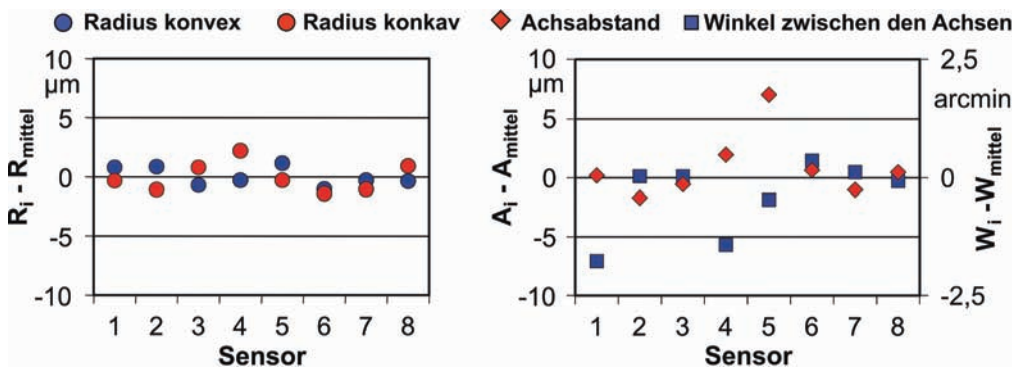


Bild 17: Vergleichsmessungen mit Mikrosensoren an einem Detail eines Mikroprüfkörpers [20]. Dargestellt sind die Abweichungen vom Mittelwert. Links: Radien, rechts: Achsabstände und Winkel zwischen den Zylinderachsen

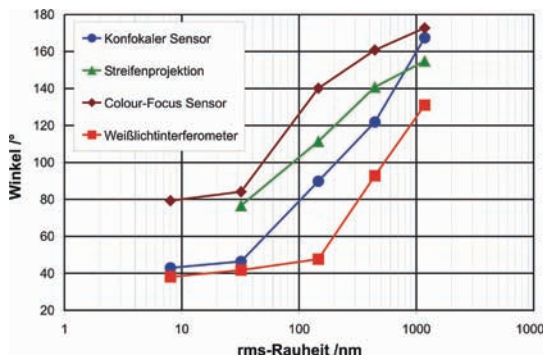


Bild 18: Messung von Kugeln (\varnothing 0,5 mm) mit unterschiedlicher Rauheit mit flächenhaft messenden Systemen. Vergleich des messbaren Winkelspektrums

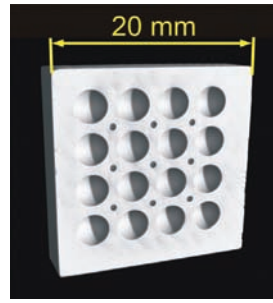
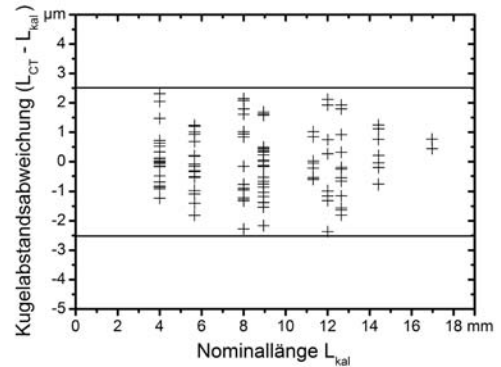


Bild 20: Messung einer Kugelkalottenplatte aus Zerodur mit CT [17]. Links: Rekonstruierte Oberfläche, rechts: daraus ermittelte Kugelabstandsabweichungen



Das messbare Winkelspektrum nimmt bei allen Sensoren mit größer werdender Rauheit zu. Durch die größere Rauheit wird auch an stärker geneigten Flächen noch ausreichend Licht in den Sensor zurück gestreut. Bei einer rms-Rauheit von $1,2 \mu\text{m}$ können je nach Sensor Winkelbereiche von 120° bis 170° gemessen werden.

4.4 Messabweichungen eines photogrammetrischen Messsystems

Das Ergebnis der Prüfung eines photogrammetrischen Messsystems zeigt Bild 19. Dargestellt sind die Längenmessabweichungen, die mit einem Prüfkörper nach Bild 10 ermittelt wurden. Die unterschiedlichen Symbole kennzeichnen die an den unterschiedlichen Stäben ermittelten Abweichungen. Nur wenige Abweichungen sind größer als $\pm 0,1$ mm.

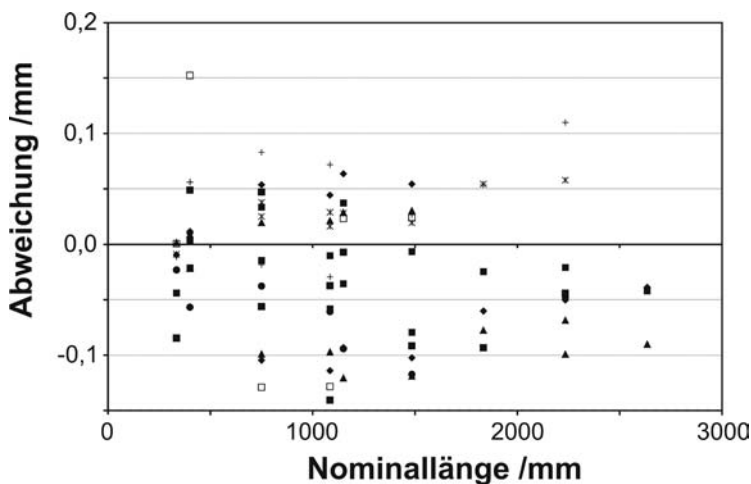


Bild 19: Ergebnis der Prüfung eines photogrammetrischen Messsystems. Am Prüfkörper nach Bild 10 ermittelte Längenmessabweichungen

4.5 Messabweichungen von Computertomographie- (CT-) Messungen

Um die Messabweichungen von CT-Messungen zu ermitteln, wurde eine Kugelkalottenplatte (Kalotten- \varnothing : 3 mm) aus Zerodur erstellt, taktil

kalibriert und anschließend mit CT gemessen (Rekonstruierte Oberfläche in Bild 20 links, Größe der erfassten Volumenelemente (Voxel): $(15 \mu\text{m})^3$).

Im Bild 20 rechts sind die Kugelabstandsabweichungen nach einer Korrektur des Maßstabsfaktors dargestellt. Die Abweichungen betragen max. $2,5 \mu\text{m}$ und sind damit deutlich kleiner als die Voxelgröße.

5 Ausblick

Optische Sensoren werden ein wichtiger Teil der zukünftigen Arbeiten des Fachbereichs Koordinatenmesstechnik sein. Dabei sollen sowohl Sensoren für kleine als auch für große Merkmale untersucht werden. Für die normgerechte Prüfung werden geeignete Prüfkörper gefertigt und kalibriert. Für Sensoren für kleine Merkmale sind dies z. B. Kugelplatten gemäß Bild 8, deren Kugeln mit einem der in Bild 9 genannten Verfahren aufgeraut wurden. Darüber hinaus sollen bauteilähnliche Prüfkörper entwickelt werden, um die aufgabenspezifische Messunsicherheit zu bestimmen. Ein solcher Prüfkörper für die Untersuchung von Sensoren für kleine Merkmale wird z. B. Bauteile eines Mikrogetriebes in Kombination mit Referenzelementen (Kugeln) enthalten. Weiterhin wird ein spezieller Teststand aufgebaut, der in Kombination mit den Prüfkörpern die einfache Bestimmung der Kenngrößen Längenmess- und Antastabweichung, aber auch darüber hinaus gehender Sensoreigenschaften wie z. B. Linearität und Hysterese ermöglicht.

Danksagung

Die Autoren danken den dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projekts „Modulares Multisensorsystem für die 3D-Messung von Mikroteilen (MODUS)“ (Förderkennzeichen 16SV1881). Den Projektpartnern in diesem Projekt und im Projekt „Optisch flächenhaft antastende 3D-Mikro-Messverfahren“ danken wir für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

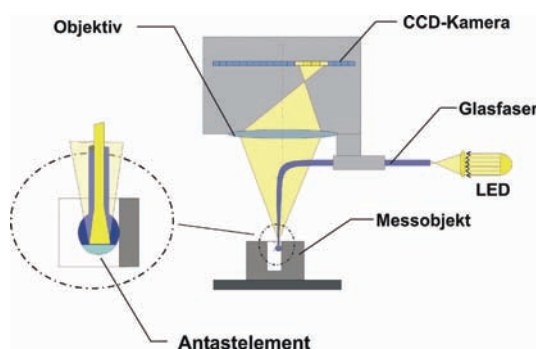
- [1] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Kunzmann, H., Pfeifer, T.: Optical methods for dimensional metrology in production engineering, *CIRP Annals*: 51 (2002), 2, S. 685–699, ISBN 3-905277-38-7 ; ISSN 0007-8506
- [2] Wendt, K., Keck, Ch., Schwenke, H.: Prüfprozesseignung von Inline-Messtechnik im Karosseriebau, *PTB Mitteilungen* 117, S. 417–424 (in diesem Heft)
- [3] Schwenke, H., Weisskirch, Ch., Kunzmann, H.: Opto-taktile Sensor zur 2D- und 3D-Messung kleiner Strukturen mit Koordinatenmessgeräten, *Technisches Messen* 66 (1999), 12, S. 485–489
- [4] Neuschaefer-Rube, U., Wissmann, M.: Taktile-optischer Mikrotaster – Anordnungen und Messmethoden, *PTB Mitteilungen* 117, S. 390–396 (in diesem Heft)
- [5] Christoph, R., Neumann, H. J.: Multisensor-Koordinatenmesstechnik, Verlag Moderne Industrie, München, 2003, ISBN 3-478-93290-4
- [6] Sirat, G.Y.: Conoscopic holography. I. Basic principles and physical basics, *Journal of the Optical Society of America A*, 9, 70–83 (1992).
- [7] Kunkel, M., Schulze, J.: Mittendicke von Linsen berührungslos messen, *Photonik*, 6/2004, 52–54
- [8] Produktinformation „StraDex p300“, ISIS-Sentronics GmbH, Mannheim, www.isis-sentronics.de, 2006
- [9] Frankowski, G., Reissner, H.: Schnelle optische 3D-Messung von Funktionsflächen mit digitaler Streifenprojektion auf Mikrospiegelbasis, *Proc. X. International Colloquium on Surfaces*, Chemnitz, 2000, Verlag Shaker, Aachen, 2000, ISBN 3-8265-6999-7
- [10] Jordan, H.-J., Brodmann, R.: Highly accurate surface measurements by means of white light confocal microscopy, *Proc. X. International Colloquium on Surfaces*, Chemnitz, 2000, Verlag Shaker, Aachen, 2000, ISBN 3-8265-6999-7
- [11] Deck, L., de Groot, P.: High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry, *Applied Optics*, No. 31, p. 7334–7338 (1994)
- [12] Neuschaefer-Rube, U.: Optische Oberflächenmesstechnik für Topografie und Material, *VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8*, Nr. 953, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002, ISBN 3-18-395308-0
- [13] Danzl, R., Helml, F.: Three-dimensional reconstruction of surfaces with steep slopes using an optical measurement system based on a colour focus sensor, *Proc. 6th EUSPEN international conference*, Vol. 1, 516–519
- [14] Schwenke, H., Wendt, K.: Technologien für die mobile Koordinatenmesstechnik, *VDI-Berichte* 1914, S. 37 - 50, VDI-Verlag Düsseldorf, 2005, ISBN 3-18-091914-0
- [15] Messsystem ATOS III, Gom mbH, Braunschweig, www.gom.com, 2006
- [16] Bartscher, M., Hilpert, U.: Industrielle Computertomographie – von der Defekterkennung zum Messmittel für die Geometriebestimmung, *VDI-Berichte* 1914, S. 187–199, VDI-Verlag Düsseldorf, 2005, ISBN 3-18-091914-0
- [17] Bartscher, M., Hilpert, U., Neuschaefer-Rube, U.: Industrielle Computertomographie auf dem Weg zur Koordinatenmesstechnik, *PTB Mitteilungen* 117, S. 47–56 (in diesem Heft)
- [18] Mitteilung von Volkswagen AG, Wolfsburg
- [19] Boucky, O., Ercole, M., Keferstein, C. P., Wallace, D., Züst, R.: Gemeinsamer Standard – Integration optischer Sensoren in Koordinatenmessgeräte, *QZ* 48, Heft 5, 48 (2003)
- [20] Neugebauer, M., Neuschaefer-Rube, U.: A new micro artefact for testing optical and tactile sensors, *Proc. 5th EUSPEN international conference*, Vol. 1, p. 201–204, 2005, ISBN 92-990035-0-5
- [21] Verfahren zur Herstellung von Prüfkörpern, Deutsches Patent Nr. DE 103 18 762
- [22] Hüser, D.: Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit von Triangulationssensoren in der Koordinatenmesstechnik, *PTB Bericht F-22*, PTB, Braunschweig, 1995, ISBN 3-89429-666-6

Taktil-optischer 3D-Mikrotaster – Anordnungen und Messmethoden

Ulrich Neuschaefer-Rube¹, Mark Wissmann²

1 Einleitung

In vielen Industriebereichen werden zunehmend Mikro-Bauteile mit Abmessungen von deutlich kleiner als 1 mm und Toleranzen im μm -Bereich eingesetzt. Beispiele hierfür sind Einspritzdüsen, Mikrozahlräder und mikrooptische Komponenten. Für Messungen an diesen Mikro-Bauteilen steht eine Vielzahl hochauflösender optischer Messverfahren zu Verfügung [1]. Allerdings sind einige kleine Geometrien (z. B. senkrechte Flächen wie Mantelflächen von Mikrobohrungen) für optische Sensoren nicht zugänglich. Daher wurde Ende der 90er Jahre in der PTB der taktil-optische Taster [2, 3], der so genannte Fasertaster, realisiert, mit dem erstmals taktile Koordinatenmessungen an Mikro-Bauteilen möglich wurden. Die Technologie wurde erfolgreich in die Industrie transferiert. Der in ein kommerzielles optisches Koordinatenmessgerät integrierte Taster ist derzeit der am weitesten industriell verbreitete taktile Mikrotaster.



1 Dr. Ulrich Neuschaefer-Rube, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Optische Sensorik“
E-Mail: ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de

2 Dipl.-Ing. Mark Wissmann, Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe „Koordinatenmessgeräte“
E-Mail: mark.wissmann@ptb.de

Gemeinsam mit dem Industriepartner Werth-Messtechnik, Gießen, wurden auch nach dem Technologietransfer Untersuchungen und Entwicklungen mit dem Ziel durchgeführt, das Einsatzspektrum des Tasters zu erweitern. Ein wichtiges Thema war und ist dabei die Erweiterung des Tasterprinzips zum messenden 3D-Taster. Über die Ergebnisse auf diesem Gebiet berichtet der folgende Beitrag.

2 Tasterprinzip

Der taktil-optische Taster kombiniert die Vorteile der taktilen Antastung und der hochgenauen optischen Messung mit Hilfe geeigneter Bildverarbeitung. Der Taster besteht aus einer gebogenen Glasfaser mit einem kugelförmigen Antastelement an deren Ende (Bild 1). Das Antastelement hat dabei typischerweise einen Durchmesser im Bereich $15\ \mu\text{m}$ – $100\ \mu\text{m}$. Durch die geringe Biegesteifigkeit der Glasfaser sind die Antastkräfte von $1\ \mu\text{N}$ – $10\ \mu\text{N}$ wesentlich kleiner als bei konventionellen taktilen Tastern. Das Antastelement selbst befindet sich in der Fokusebene eines Abbildungssystems des optischen KMGs. Bei Durchlichtbeleuchtung ist im Kamerabild das kreisförmige Schattenbild des Antastelementes zu sehen. Wird in das Faserende mit Hilfe einer LED Licht eingekoppelt, ist das Antastelement im Kamerabild als hell leuchtende Scheibe erkennbar (sog. Eigenleuchtmodus).

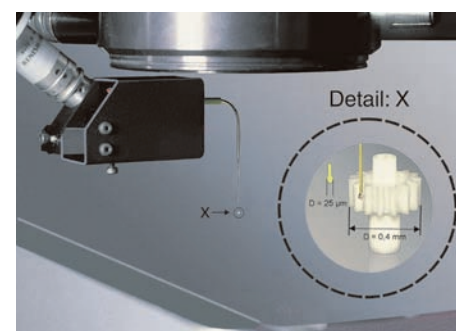


Bild 1: Taktil-optischer Mikrotaster. Links: Prinzip [2], rechts: industrielle Realisierung [4]

Die 2D-Position der Antastkugel senkrecht zur optischen Achse (xy -Ebene) wird durch Auswertung des Kamerabildes mit Bildverarbeitungs-algorithmen und den Maßstabsinformationen des Koordinatenmessgerätes ermittelt. Bei Berührung mit dem zu messenden Werkstück wird das Antastelement ausgelenkt und ändert seine Position im Kamerabild. Die Position des Antastelementes in Richtung der optischen Achse

(z-Achse) ergibt sich direkt aus der Maßstabsinformation des Koordinatenmessgerätes. Es wird dabei vorausgesetzt, dass keine Tasterauslenkung in z-Richtung erfolgt. Bild 2 zeigt Kamerabilder bei der Messung einer Mikrobohrung im Eigenleuchtmodus.

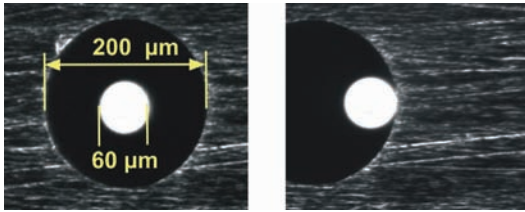


Bild 2: Messung einer Bohrung im Eigenleuchtmodus. (Links: vor der Antastung, rechts: Taster tastet an Bohrungswand an)

Durch die optische Bestimmung der Auslenkung des Antastelementes wird die bei konventionellen taktilen Tastern erforderliche Kraftübertragung über den Tasterschaft nicht benötigt. Daher kann der Tasterschaft sehr dünn ausgeführt werden. Hierdurch werden die bereits genannten Antastelementdurchmesser im µm-Bereich und die sehr kleinen Antastkräfte von wenigen µN erst möglich.

Der taktil-optische Taster ist heute kommerziell erhältlich und wird in größerer Stückzahl erfolgreich industriell eingesetzt. Bild 1 rechts zeigt diese Tasterausführung. Um die Glasfaser zu biegen, wird sie in einer gebogenen Kapillare geführt. Als Abbildungsoptik wird meist eine telezentrische Optik mit 10-facher Vergrößerung verwendet. Dabei ergibt sich ein Abbildungsmaßstab von ca. 1 µm pro Kamerapixel. Die Tasterposition wird mit Subpixelgenauigkeit bestimmt. Die spezifizierte maximale Messabweichung in der xy-Ebene beträgt bei punktweiser Antastung je nach eingesetztem Koordinatenmessgerät typischerweise $MPE_{P2XY} = 0,6 \mu\text{m}$ [4].

3 3D-Messanordnungen

Bei der bisherigen Tasteranordnung kann die z-Position des Antastelementes nur indirekt über die Stellung der Koordinatenachsen des Koordinatenmessgerätes bestimmt werden. Verformungen des Tasters in z-Richtung werden nicht erfasst. Es sind daher nur Messungen an sehr steilen Flächen möglich. Um diese Einschränkung zu überwinden, wird daher eine Messanordnung benötigt, die auch die z-Position des Antastelementes detektieren kann.

Hierzu ist es zum Einen erforderlich, dass der Taster in z-Richtung nachgiebig ist. Die 90°-Biegung des Tasters darf daher nicht wie bisher mit Hilfe einer starren Kapillare erfolgen. Stattdessen wurde die Glasfaser über Ihren Erweichungspunkt erwärmt und dann gebogen.

Zum Anderen muss die Tastelementposition in z-Richtung gemessen werden. Hierbei wurden zwei grundsätzliche Vorgehensweisen untersucht:

- Die Erfassung der z-Position anhand einer Zielmarke am Tasterschaft mit Hilfe einer 2. Kamera oder einer Strahlumlenkung
- Die Gewinnung von z-Messinformation ohne eine 2. Kamera durch geschickte Auswertung des Bildes der 1. Kamera.

3.1 3D-Messanordnung mit 2. Kamera

Bild 3 zeigt die Messanordnung für einen taktil-optischen 3D-Taster bei Verwendung einer 2. Kamera [2]. Zusätzlich zur bekannten Tasteranordnung (Bild 1) erfasst die 2. Kamera die z-Position einer Zielmarke am Tasterschaft.

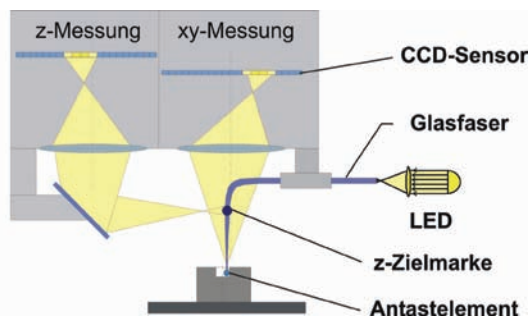


Bild 3: Prinzip der Messanordnung mit 2. Kamera für 3D-Messungen mit dem taktil-optischen Taster (nach [2])

Diese Messanordnung wurde in ein optisches Koordinatenmessgerät (Werth Video-Check HA 400) integriert. Bild 4 zeigt die dafür verwendete Anordnung. Die Bildebene der 2. Kamera kann in drei Achsen justiert werden, um eine scharfe Abbildung der Zielmarke zu erreichen.

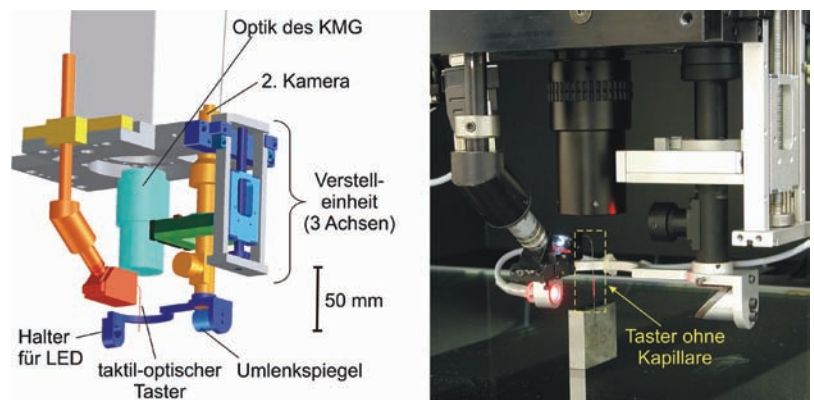


Bild 4: Realisierte Messanordnung mit 2. Kamera für 3D-Messungen mit dem taktil-optischen Taster. Links: Prinzipskizze, rechts: Realisierung einschließlich Taster ohne Kapillare

Um eine geeignete Zielmarke am Tasterschaft zu realisieren, wurden verschiedene Ausführungen untersucht (Bild 5). Im Einzelnen waren dies:

- eine seitlich an den Tasterschaft geklebte Kugel (wie schon in [2] vorgeschlagen),
- eine kugelförmige Verdickung im Tasterschaft, der so genannte Zweikugeltaster,
- ein Übergang des Tasterschaftdurchmessers,
- eine Dünnstelle im Tasterschaft,
- ein kurzes Stück Kapillare, das über die Faser gestülpt und verklebt wird.



Bild 5:
Erprobte Ausführungen
der Zielmarke für den
taktil-optischen 3D-Taster
(Durchmesser der Faser
im Bereich des Taster-
schaftes: 250 μm)

Die besten Eigenschaften zeigte die seitlich angeklebte Kugel. Sie lässt sich als einzige Marke durch eine Best-Fit Einpassung eines Kreises mit Hilfe der Bildverarbeitung lokalisieren. Alle anderen Zielmarken erfordern die Verwendung eines Korrelators, der das Bild der Zielmarke mit einem zuvor aufgenommenen Referenzbild bei nicht ausgelenktem Taster vergleicht. Darüber hinaus lassen sich mit dieser Zielmarke am leichtesten scharf abgebildete horizontale Kanten im Bild erreichen, wodurch die Lokalisierung der Zielmarke in z-Richtung ermöglicht wird.

3.2 3D-Messanordnungen mit Ringauswertung

Die Verwendung einer 2. Kamera in der zuvor beschriebenen Anordnung bedingt einen erhöhten apparativen Aufwand und eine gesteigerte

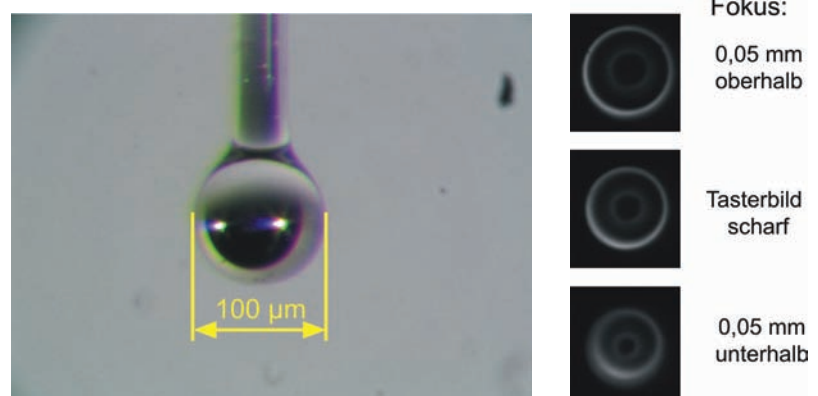
Kollisionsgefahr mit dem Werkstück. Es wurde daher nach Anordnungen gesucht, die 3D-Informationen ohne eine 2. Kamera liefern.

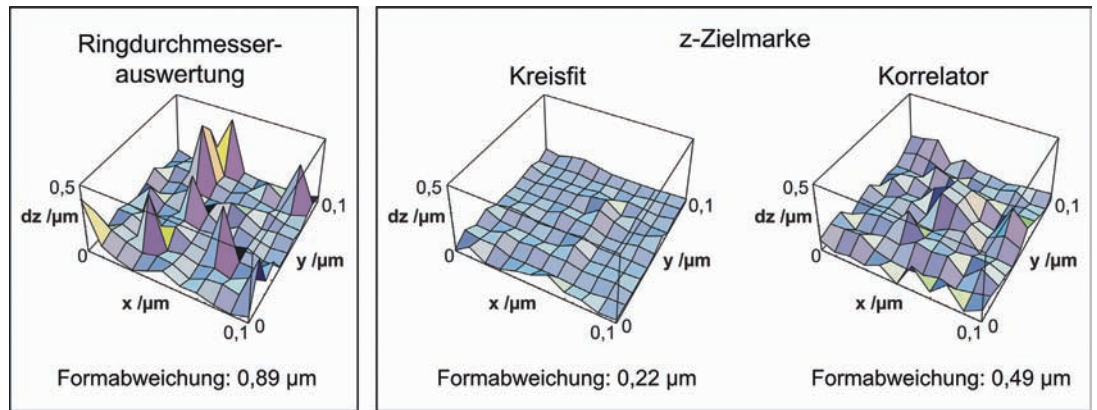
Die Grundidee der 3D-Messung mit Ringauswertung besteht darin, aus der Größe des Tasterelementes oder einer Zielmarke im Bild der 1. Kamera auf die z-Position des Antastelementes bzw. der Zielmarke zu schließen. Bei der bisherigen Anordnung ändert sich diese Größe aber bei einer z-Auslenkung des Tasters praktisch nicht, weil die 1. Kamera eine telezentrische Optik verwendet. Diese ist die Voraussetzung für eine genaue Messung in x- und y-Richtung.

Wird dagegen ein Antastelement mit spiegelnd beschichteter Unterseite verwendet, ist im Eigenleuchtmodus ein leuchtender Ring sichtbar (Bild 6). Zusätzlich wirkt die beschichtete Unterseite des kugelförmigen Antastelementes wie ein Hohlspiegel, weshalb sich die Größe des Bildes des Antastelementes in Abhängigkeit von der z-Verformung des Tasters deutlich ändert (Bild 7). Ein 3D-Taster ergibt sich somit, indem die x- und y-Position aus der Position des Ringes im Kamerabild sowie den Positionen der Achsen des KMGs und die z-Position aus dem Ringdurchmesser (Tasterauslenkung) sowie den Positionen der Achsen des KMGs (Position der Tasterhalterung) bestimmt wird. Die 3D-Anordnung mit Ringauswertung benötigt somit außer dem speziell beschichteten Taster keine zusätzliche Hardware. Zudem ist die Bestimmung des Ringdurchmessers in der Standard-Auswertesoftware optischer KMGs enthalten.

Die Unterseite des nur ca. 100 μm großen Antastelementes (Bild 6) wurde im wissenschaftlichen Gerätebau der PTB verspiegelt. Dabei kamen Beschichtungsverfahren zum Einsatz (Sputtern), die aus der Mikrotechnik stammen. Besondere Anforderungen ergaben sich aus der Notwendigkeit einer gut reflektierenden und bei mechanischen Antastungen haltbaren Schicht sowie geringen Formabweichungen des Antastelementes durch ein kantenfreies Schichtende. Das Antastelement befand sich daher während des Sputterns innerhalb einer speziellen Blende.

Bild 6:
Antastelement mit metall-
beschichteter Halbkugel.
Links: Realisierung,
Rechts: von der Kamera
aufgenommene Tasterbil-
der im Eigenleuchtmodus
bei unterschiedlichen
Fokuszuständen





Die Abhängigkeit des Ringdurchmessers von der z-Auslenkung des Antastelementes muss für jeden Taster individuell eingemessen werden. Hierzu wurde eine horizontale Glasplatte angetastet und bei Änderung der z-Position des KMGs die Änderung des Ringdurchmessers als Maß für die Tasterauslenkung in z-Richtung bestimmt. Bild 7 zeigt das Ergebnis einer solchen Einmessung bei mehreren Helligkeitseinstellungen der LED (mehrere eingestellte TR-Werte in der KMG-Software). Bei der Wahl der Helligkeitseinstellungen wurde dabei darauf geachtet, dass im Kamerabild keine gesättigten Pixel (maximal möglicher Grauwert) auftraten.

Mit den in 3.1 und 3.2 beschriebenen Messmethoden wurden vergleichende Messungen durchgeführt. Bei der Anordnung mit 2. Kamera und Zielmarke wurde ein Taster mit angeklebter Kugel verwendet (vgl. Bild 5 links oben). Die Bestimmung der Zielmarkenposition erfolgte dabei sowohl durch die Best-Fit Einpassung als auch mit Hilfe eines Korrelators.

Bild 8: Ergebnisse von Messungen einer ebenen Fläche mit verschiedenen taktil-optischen 3D-Messmethoden

Bild 8 zeigt die Ergebnisse von Messungen einer ebenen Fläche. Bild 9 zeigt die Ergebnisse der Messung der Kontur einer Kugel mit vernachlässigbarer Formabweichung. Dargestellt ist die gemessene Abweichung von der Best-Fit Einpassung eines Kreises.

Bild 9: Ergebnisse von Messungen einer Kugelkontur mit verschiedenen taktil-optischen 3D-Messmethoden

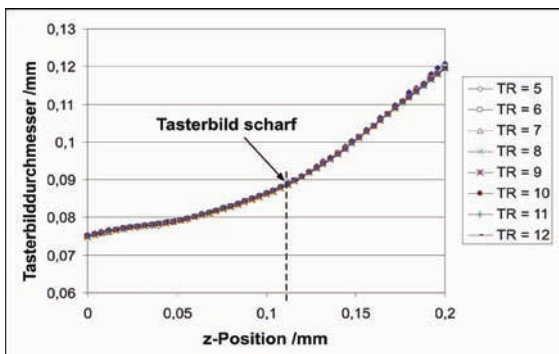
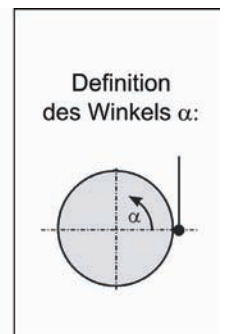
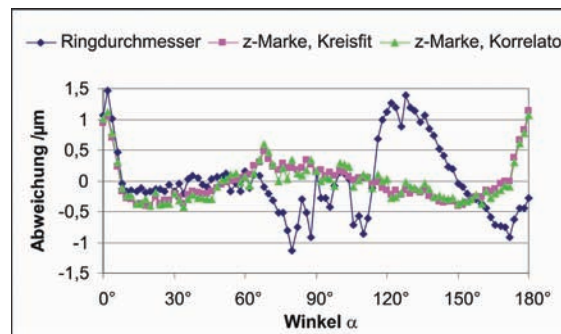


Bild 7: Gemessene Abhängigkeit des Ringdurchmessers von der z-Position als Ergebnis einer Einmessung des 3D-Tasters mit Ringauswertung



Aus den Einmesskurven folgt, dass eine Tasterauslenkung in z-Richtung zu einer ca. 5–10 mal kleineren Änderung des Ringdurchmessers führt. Diese Abhängigkeit ist zudem leicht nicht-linear, lässt sich aber gut durch ein Polynom approximieren. Positiv zu bewerten ist, dass keine Abhängigkeit von der Helligkeit des Tasterbildes besteht.

Es zeigt sich, dass bei der Messung mit Ringauswertung die größten Messabweichungen auftreten (0,89 µm bei der Ebenenmessung, +1,5 µm, -1,2 µm bei der Kugelmessung). Bei der Messung mit Zielmarke sind beide Auswertemethoden gleichwertig. Die Abweichungen betragen bei der Kugelmessung +1 µm und -0,4 µm). Der Korrelator benötigt allerdings eine längere Rechenzeit. Der Anstieg der Abweichungen bei den Winkeln 0° und 180° ist vermutlich auf Formabweichungen des Tastelementes zurückzuführen.

Wegen der „Untersetzung“ um den Faktor 5–10 ist zu erwarten, dass die Unsicherheit der Messung der z-Position des Tastelementes um etwa den gleichen Faktor größer sein wird als die Unsicherheit der Messung der x- und y-Position.

In den folgenden Kapiteln werden zwei weitere Messanordnungen zur taktil-optischen 3D-Messung vorgestellt. Sie sind Weiterentwicklungen der zuvor beschriebenen Anordnungen.

3.3 3D-Messanordnung mit Spiegeln zur Strahlumlenkung

Diese Anordnung basiert auf der Anordnung mit 2. Kamera und Zielmarke. Die 2. Kamera wurde durch ein Spiegelsystem zur Strahlumlenkung ersetzt (Bild 10 links). Hierdurch kann die Zielmarke auch auf die 1. Kamera von der Seite abgebildet werden. Die zwei orthogonalen Beobachtungsrichtungen ermöglichen zusätzlich die Lokalisierung der Zielmarke in x- und y-Richtung. Wegen den orthogonalen Beobachtungsrichtungen wurde kein Taster mit angeklebter Kugel als Zielmarke, sondern ein Zweikugeltaster verwendet (vgl. Bild 5, oben Mitte). Die Lokalisierung der Zielmarke erfolgte deshalb mit Hilfe des Korrelators.

$$\begin{aligned}
 a_{Zx1} &= f_{xx1} & f_{yx1} & f_{zx1} \\
 a_{Zy1} &= f_{xy1} & f_{yy1} & f_{zy1} \\
 a_{Zx2} &= f_{xx2} & f_{yx2} & f_{zx2} \\
 a_{Zy2} &= f_{xy2} & f_{yy2} & f_{zy2}
 \end{aligned} \cdot \begin{pmatrix} a_{Tx} \\ a_{Ty} \\ a_{Tz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{a}_Z = \mathbf{f}_E \cdot \mathbf{a}_T$$

(a_{Zij} : Auslenkung der Zielmarke in Richtung i im Spiegelbild j; a_{Tk} : Auslenkung des Tastelementes in Richtung k)

Bei der eigentlichen Messung muss Gl.(1) invertiert werden, um aus den Positionen der Zielmarke in den Spiegelbildern auf die Auslenkung des Antastelementes zu schließen. Dieses inver-

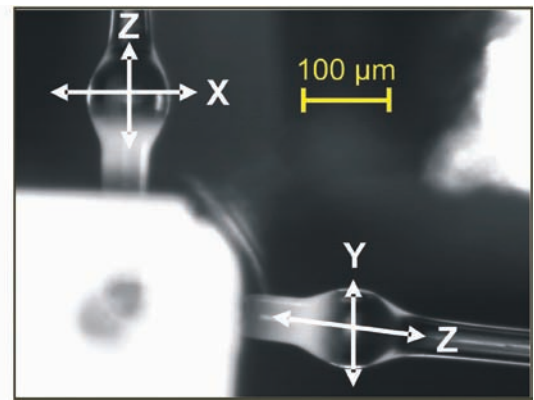
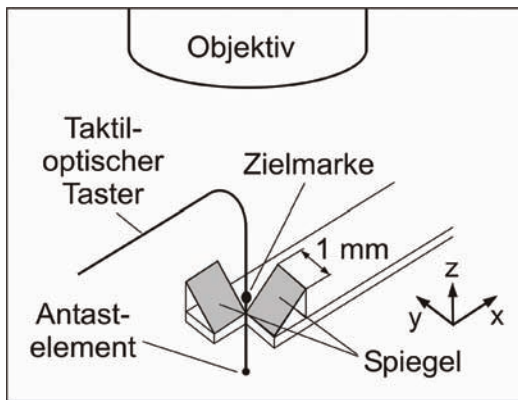


Bild 10: Taktill-optischer 3D-Taster mit Strahlumlenkung. Links: Prinzip, rechts: Kamerabild [5]

In Bild 10 rechts ist das Kamerabild bei Verwendung einer Anordnung mit Strahlumlenkung abgebildet. Die nicht exakte Rechtwinkligkeit der Tasterbilder wird dabei durch eine ungenaue Ausrichtung der Spiegel verursacht.

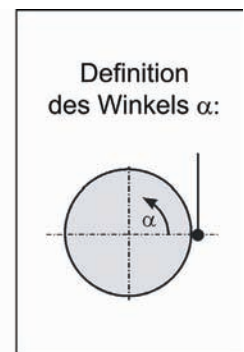
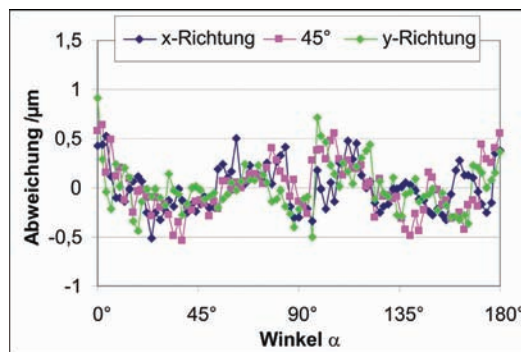
Zur Einmessung dieser Anordnung wurde eine horizontale Fläche angetastet und der Taster durch Verfahren des KMG in jeweils einer Koordinatenachse ausgelenkt. Die dabei auftretenden Auslenkungen der Zielmarke wurden in den beiden Spiegelbildern ermittelt. Aus diesen Messungen ergeben sich zwischen den gemessenen Zielmarkenauslenkungen a_Z und den real aufgetretenen Tastelementauslenkungen a_T Konversionsfaktoren f_{ijk} in der Einmessmatrix f_E :

tierte Gleichungssystem ist überbestimmt, da aus insgesamt vier Zielmarkenverschiebungen (zwei pro Spiegelbild) drei Tasterauslenkungen bestimmt werden. Da alle vier Auslenkungen in den Spiegelbildern mit der gleichen Unsicherheit ermittelt werden, gilt für die optimale Lösung nach Gauß [6]:

$$\mathbf{a}_T = \mathbf{f}_M \cdot \mathbf{a}_Z \quad \text{mit:} \quad \mathbf{f}_M = \mathbf{f}_E^T \cdot \mathbf{f}_E^{-1} \cdot \mathbf{f}_E^T \quad (2)$$

Die Bilder 11 und 12 zeigen Ergebnisse von Messungen einer Kugel mit 3 mm Durchmesser (vernachlässigbare Formabweichung). Der kleinere Kugeldurchmesser wurde gewählt, um

Bild 11: Ergebnisse von Messungen einer Kugelkontur mit dem taktill-optischen Taster mit Strahlumlenkung



Messungen an der gesamten oberen Halbkugel durchführen zu können, ohne dass das Spiegelsystem mit der Kugel kollidiert.

Wie schon in Kap. 3.3 betragen die max. Messabweichungen ca. 1 µm. Durch den Korrelationsprozess treten aber im Vergleich zu Bild 9 größere zufällige Abweichungen auf.

3.4 3D-Messanordnung mit Speckle-Auswertung

Bei dieser Anordnung wird zur Beleuchtung des Antastelementes im Eigenleuchtmodus anstelle der bisher verwendeten LED eine Laserdiode verwendet. Durch die kohärente Beleuchtung ergibt sich im Tasterbild anstelle heller Flächen ein Specklemuster. Auch wenn das Tastelement defokussiert abgebildet wird, sind scharf abgebildete Speckle im Tasterbild sichtbar. Auslenkungen des Tasters in z-Richtung führen im defokussierten Zustand hauptsächlich zu einer radialen Größenänderung des Specklemusters und nur zu leichten Veränderungen innerhalb des Specklemusters selbst. Weitere Untersuchungen zeigten zudem, dass das Specklemuster tasterfest und langzeitstabil ist. Es kann somit bei defokussiertem Antastelement aus der Position des Specklemusters im Bild auf die xy-Position und aus dem Specklemuster selbst auf die z-Auslenkung des Tastelementes geschlossen werden [5, 7].

Ein ausgeprägtes Specklemuster ergibt sich, wenn das Tastelement mit einer diffus streuenden Beschichtung versehen wird. Eine solche Beschichtung würde aber zu großen Formabweichungen des Tastelementes führen. Bei diesem Messprinzip ist es daher erforderlich, einen Zweikugeltaster, wie er schon in Bild 5 gezeigt wurde, zu verwenden, der eine Beschichtung an der Zielmarke aufweist. Die Kamera erfasst dabei das Specklemuster des von der oberen Kugel emittierten Lichtes. Ein weiterer Vorteil des Zweikugeltasters ist zudem, dass keine Änderungen des Specklemusters durch Abschattungseffekte am Werkstück auftreten können.

Vor der eigentlichen Messung muss der Taster eingemessen werden. Dabei wird zunächst eine Sequenz aus Specklebildern mit genau bekannten Tastelementpositionen als Referenzbil-

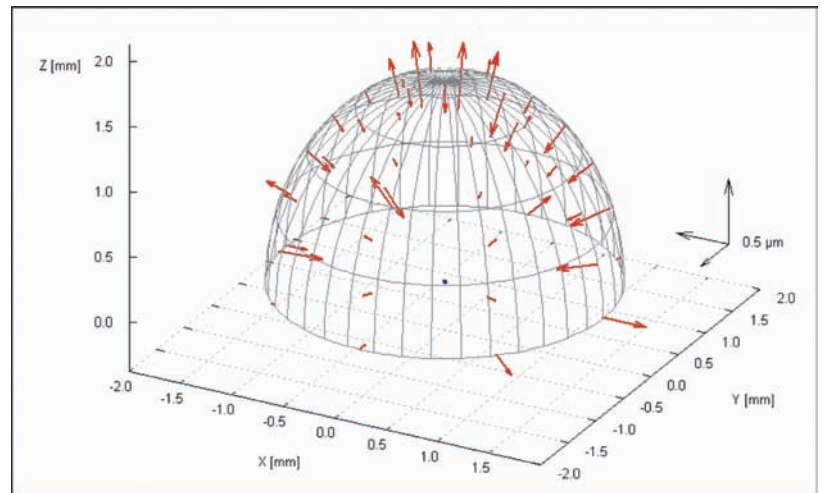


Bild 12: Ergebnisse der Messung einer Kugel mit dem taktil-optischen Taster mit Strahlumlenkung

derstapel aufgenommen (Bild 13). Anschließend müssen wiederum die Koppelfaktoren zwischen der Auslenkung des Tastelementes und der oberen Kugel bestimmt werden. Dies erfolgt derzeit mit der in Kap. 3.4 beschriebenen Methode mit Hilfe definierter Tasterauslenkungen.

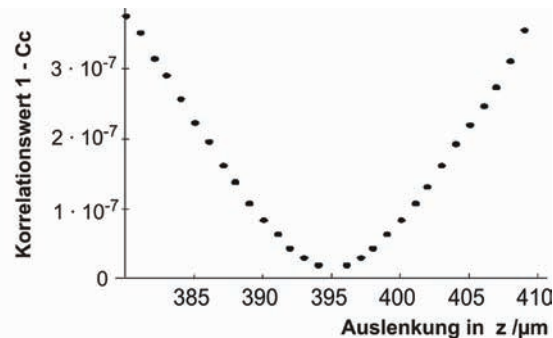


Bild 14: Ergebnis einer Korrelationsanalyse zur Ermittlung der z-Position. Vergleich eines bei z = 395 µm aufgenommenen Bildes mit einem Referenzstapel führt zu minimalem Korrelationswert 1 - Cc (Cc = Korrelationskoeffizient) bei z = 395 µm

Bei der eigentlichen Messung wird ein Specklebild bei ausgelenktem Tastelement aufgenommen und mit den Bildern des Referenzstapels korreliert. Aus den Extrema der Korrelationskurven in drei Dimensionen und den Stellungen der Koordinatenachsen des KMGs ergibt sich

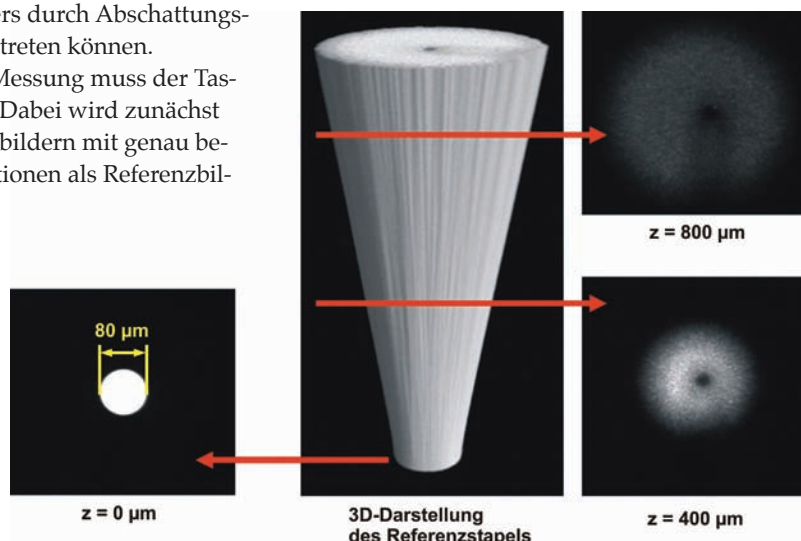


Bild 13: Referenzbilderstapel als Ergebnis der Einmessung des taktil-optischen 3D-Tasters mit Speckle-Auswertung [5]

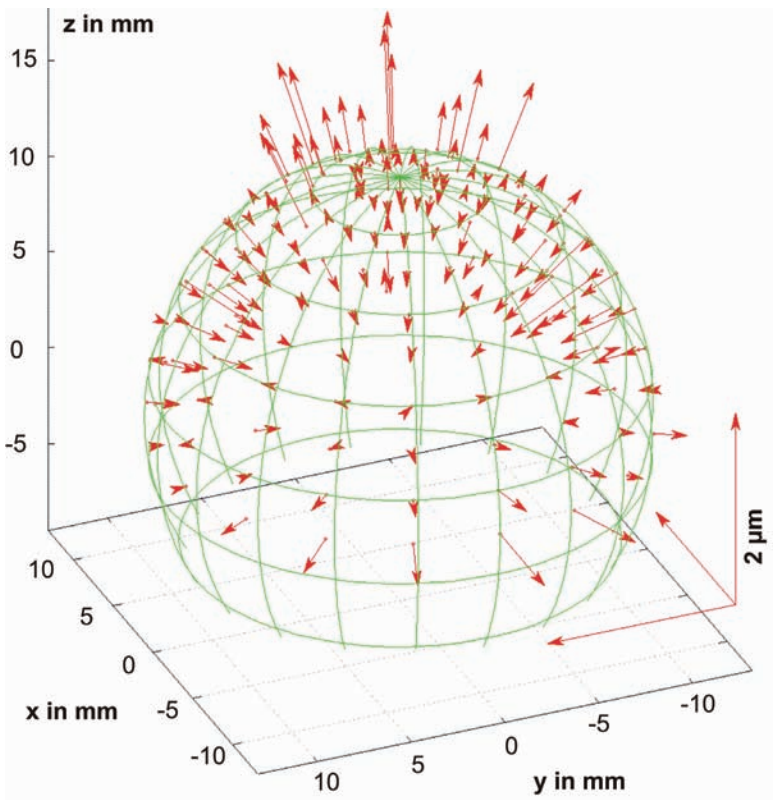


Bild 15:
Ergebnis der Messung
einer Referenzkugel
(\varnothing 25 mm, vernachlässigbare Formabweichung) mit dem taktill-optischen 3D-Mikrotaster mit Speckle-Auswertung

die Tastelementposition in x-, y- und z-Richtung. Bild 14 zeigt die bei einer solchen Korrelationsanalyse erhaltenen Korrelationswerte.

Bild 15 zeigt das Ergebnis der Messung einer Kugel (\varnothing 25 mm, vernachlässigbare Formabweichung). Die maximale Abweichung der 163 Messpunkte einer Messreihe auf der oberen Halbkugel von der berechneten Ausgleichskugel beträgt derzeit $\pm 1,5 \mu\text{m}$.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt Anordnungen und Verfahren vor, mit deren Hilfe die volle 3D-Messfähigkeit des taktill-optischen Tasters erreicht werden kann. Hierbei benötigt die Anordnung mit 2. Kamera und z-Zielmarke zusätzliche Hardware, führt aber zu geringen Messabweichungen von max. $1 \mu\text{m}$. Die 3D-Messung mit Ringauswertung erfordert neben dem speziell beschichteten Antastelement nur zusätzliche Software. Die Bestimmung des Ringdurchmessers ist zudem mit der Standard-Bildverarbeitungssoftware optischer KMGs leicht durchführbar. Nachteilig ist allerdings die „Untersetzung“ zwischen Änderung des Ringdurchmessers und z-Auslenkung, wodurch erhöhte Messabweichungen auftreten. Die Anordnung mit Strahlumlenkung und z-Zielmarke erfordert keine 2. Kamera, das Kollisionsrisiko mit dem Werkstück ist bei dieser Anordnung allerdings am größten. Die Messabweichungen sind vergleichbar mit den Messabweichungen der Anordnung mit 2. Kamera. Bei der Anordnung mit Speckleauswertung ist das Kollisionsrisiko klein und der Nachteil

der „Untersetzung“ bei Ringauswertung wird durch den hohen Informationsgehalt des Specklemusters ausgeglichen. Allerdings sind die benötigten Korrelationsalgorithmen nicht in der Standardsoftware optischer KMGs enthalten und benötigen zudem eine recht lange Rechenzeit bzw. eine leistungsfähige Rechnerhardware. Die Messabweichungen sind zur Zeit noch größer als bei den Anordnungen mit 2. Kamera und Strahlumlenkung. Es besteht aber ein erhebliches Potential zur Weiterentwicklung der Auswertung der Specklemuster.

Daher wird derzeit die 3D-Messung durch Auswertung von Specklemustern weiter untersucht. Die Schwerpunkte der Untersuchungen zu dieser 3D-Messmethode liegen bei der Reduzierung der Messabweichungen und der Optimierung der Algorithmen zur Berechnung der Korrelation von Specklebildern. Zur Reduzierung der Messabweichungen soll u. a. der Einmessprozess optimiert werden.

Literatur

- [1] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Kunzmann, H., Pfeifer, T.: Optical methods for dimensional metrology in production engineering, CIRP Annals: 51 (2002), 2, S.685–699, ISBN 3-905277-38-7 ; ISSN 0007-8506
- [2] Schwenke, H., Weisskirch, Ch., Kunzmann, H.: Opto-taktile Sensor zur 2D- und 3D-Messung kleiner Strukturen mit Koordinatenmessgeräten, Technisches Messen 66 (1999), 12, S. 485–489
- [3] Coordinate measuring instrument with feeler and optic sensor for measuring the position of the feeler, Internationales Patent, Application Nr. PCT/EP 98/03526
- [4] Datenblatt Werth Fiber Probe WFP 3D, Werth Messtechnik GmbH, Gießen, 2005
- [5] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Wissmann, M.: Tactile probing of microfeatures – recent advances in the development of the tactile optical microprobe, Proceedings of the 7th Conference on Coordinate Metrology, Bielsko-Biala, Poland, 3.–5. April 2006, S. 50–54
- [6] Brammer, K., Siffing, G.: Kalman-Bucy Filters, Artech House, Norwood, 1989, S. 248, ISBN 0-89006-294-3
- [7] Verfahren und Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts, Deutsche Patentanmeldung, Offenlegungsschrift Nr. DE 10 2005 021 645 A1

Industrielle Computertomographie auf dem Weg zur Koordinatenmesstechnik

Markus Bartscher¹, Uwe Hilpert², Ulrich Neuschaefer-Rube³

1 Einleitung

Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte die nach ihm benannten hochenergetischen Strahlen im November 1895. Schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts wurden Röntgenstrahlen neben medizinischen Anwendungen auch zur zerstörungsfreien Durchstrahlungsprüfung technischer Bauteile eingesetzt. Die Durchstrahlungsprüfung mit Röntgenstrahlung weist jedoch den großen Mangel des Verlusts von Tiefeninformation auf. Zudem ist der Kontrast von kleinen, gestörten Strukturen wie Einschlüssen und Lunkern in einem massiven Bauteil in vielen Fällen so gering, dass diese teilweise unentdeckt bleiben. Es dauerte bis Ende der Sechziger Jahre des letzten Jahrhunderts, bis Versuche, Information über innere Strukturen mittels der durchdringenden Röntgenstrahlung zu gewinnen, Erfolge zeigten. Hierbei wurde im Folgenden eine vorher wenig beachtete Entdeckung des Mathematikers Johann Radon aus dem Jahr 1917 angewandt [1]. Radon fand heraus, dass es – umgangssprachlich formuliert – möglich ist, die unbekannte innere Geometrie und Struktur eines Körpers allein aus der Kenntnis von zahlreichen äußeren Abbildungen zu bestimmen. Voraussetzung ist, dass diese Abbildungen Information über die innere Struktur beinhalten. Aus diesem Grund wird für die Abbildung häufig der Begriff Projektion verwendet. Projektionen können z.B. Röntgendurchstrahlungsbilder (Radiographien) sein. Die technische Umsetzung dieses Messprinzips wird als Tomographie bezeichnet. Durch die geringe Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit dem untersuchten Körper kann die Tomographie als zerstörungsfreies Verfahren angesehen werden. Die Umsetzung des Tomographieprinzips in ein bildgebendes Verfahren fand erst in den 60er und 70er Jahre des vorherigen Jahrhunderts durch Allan M. Cormack und Godfrey N. Hounsfield statt, für die beide gemeinsam 1979 den Nobelpreis in Physiologie und Medizin erhielten. Das von ihnen entwickelte axiale Tomographie-

verfahren wird heute als Computertomographie (CT) mit Röntgenstrahlen bezeichnet. Der Kontrast der medizinischen CT entsteht durch die Schwächung von Röntgenstrahlung im menschlichen Körper (Intensitätskontrast). Während bei dem Tomographieprinzip nach Radon die Kenntnis unendlich vieler Projektionen notwendig ist, um eine unbekannte Geometrie und Struktur exakt berechnen zu können, werden in der Umsetzung als bildgebendes Verfahren nur einige hundert bis wenige tausend Projektionen bestimmt, um daraus approximativ das Körperinnere rekonstruieren zu können.

In der Medizin wurde das Tomographieprinzip zur Entwicklung zahlreicher weiterer bildgebender Verfahren genutzt (z.B. PET – „Positron Emission Tomography“, SPECT – „Single Photon Emission Computed Tomography“ [2]). Hierbei wird elektromagnetische Strahlung detektiert, die von in den Körper eingebrachten radioaktiven Substanzen emittiert wird. Je nach Wechselwirkung der Strahlung mit der Materie können mit diesen Verfahren selektiv Gewebe, Knorpel oder Knochen untersucht werden. Medizinische CT-Anlagen mit Röntgenstrahlen befinden sich heute bereits in der 5. Generation der Entwicklung [3]. Insgesamt sind die bildgebenden Tomographieverfahren heute zu einem unverzichtbaren Standbein der modernen medizinischen Diagnostik geworden [4].

In der Industrie wurden CT-Anlagen mit speziellen Bauformen zuerst als Prüftechnik für Defekte und später auch als Messtechnik eingesetzt. Aus diesem Grund untersucht die PTB im Fachbereich Koordinatenmesstechnik im Rahmen von mehreren Industrie- [5] und Forschungsprojekten die dimensionellen Messeigenschaften dieser Anlagen. Dieser Beitrag beschreibt im Folgenden die noch nicht abgeschlossene Entwicklung der industriellen CT zu einer Koordinatenmesstechnik, die von der PTB begleitet und unterstützt wird.

-
- 1 Dr. Markus Bartscher, Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe „Optische Sensorik“
E-Mail: markus.bartscher@ptb.de
 - 2 Dr. Uwe Hilpert, Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe „Optische Sensorik“
E-Mail: uwe.hilpert@ptb.de
 - 3 Dr. Ulrich Neuschaefer-Rube, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Optische Sensorik“
E-Mail: ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de

2 Funktionsprinzip der industriellen Computertomographie

Das Prinzip der Tomographie wurde auf zahlreiche Gebiete der Naturwissenschaften und der Technik übertragen. Beispiele hierfür sind Anwendungen in der Astronomie [6], der Elektrotechnik [7] und der Chemietechnik [8]. In der industriellen Prüftechnik wurden ab ca. 1985 spezielle CT-Bauformen entwickelt, die sich in ihrem Aufbau von heutigen medizinischen CT-Systemen deutlich unterscheiden. Bei der medizinischen CT rotieren Röntgenquelle(n) und Detektorsysteme um den auf einer Liege befindenden Patienten. Im Gegensatz dazu rotiert bei industriellen CT-Bauformen das zu untersuchende Messobjekt auf einem Drehtisch, während Röntgenröhre und Detektor stationär sind.

Man kann die industrielle CT anhand der Ausführung der Röntgenquellen und der Achsen- und Detektorgeometrie in eine Makro-CT für große Bauteile [9] und eine Mikro-CT [10] für kleine Bauteile einteilen. Bei der Mikro-CT wird durch geeignete Röntgenröhren mit sehr kleinen Brennflecken und der Positionierung des untersuchten Bauteils nahe am Brennfleck eine geometrische Vergrößerung erreicht. Die erreichbare Auflösung wird hier durch die Größe des Brennflecks limitiert. Darüber hinaus gibt es die Hochenergie-CT mit Linearbeschleunigern (LINAC) [11] oder radioaktiven Quellen für den Ultra-Makro Bereich sehr großer und stark absorbierender Bauteile wie z.B. 35 cm Gusseisen bei bestimmten Graugusszylinderköpfen sowie die Synchrotron-CT [12], die hauptsächlich für wissenschaftliche Anwendungen (z.B. Nutzung des Phasenkontrasts) und für kleinste Bauteile benutzt wird. Erste Röntgenquellen mit Nanofokus-Röntgenröhren (d.h. Brennflecken kleiner 1000 nm) sind seit kurzem kommerziell verfügbar und werden das Einsatzspektrum der industriellen CT in naher Zukunft für kleinere Bauteile erweitern. Die Hauptanwendungen der industriellen CT sind die zerstörungsfreie Prüfung und die vollständige Erfassung insbesondere von inneren Geometrien mit einer außerordentlich hohen Messpunktdichte.

Es gibt mehrere industriell gebräuchliche CT-Bauformen, wie die planare, die 2D- und die 3D-CT, die nach ihrem Messprinzip unterschieden werden. Die planare CT [7], die auch als Tomosynthese bezeichnet wird, ist die digitale Weiterentwicklung der klassischen Laminographie, bei der anstatt von analogem Filmmaterial ein digitaler Detektor zusammen mit der Röntgenröhre um das Messobjekt kreist. Prinzipbedingt können hier nur wenige Objektschichten gemessen werden. Daher ist dieses Verfahren nur mit Einschränkung eine 3D-Messtechnik und findet bisher hauptsächlich im Bereich der Prüfung

von Leiterplatten Anwendung. Bei der 2D-CT (Bild 1) wird das Bauteil mit einem Fächerstrahl in einer flachen Schicht durchstrahlt und die geschwächte Strahlung mit einem Zeilendetektor gemessen [13]. Die vollständige 3D-Erfassung des Bauteils erfolgt hier durch eine gemeinsame vertikale Verschiebung von Röntgenquelle und -detektor und durch aufeinander folgende Messung benachbarter Schichten (Bild 1). Die Verwendung von 2D-CT Spiral-Rekonstruktionsverfahren, wie seit einigen Jahren in der Medizin, ist in der Industrie noch ein relativ junges Verfahren und befindet sich aktuell noch in der Erprobungsphase [14].

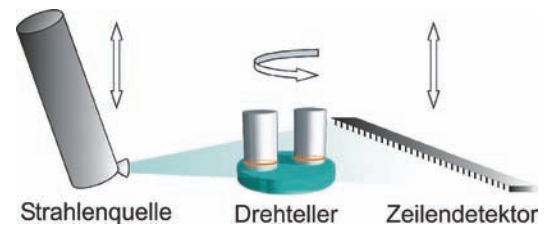


Bild 1: Prinzip der industriellen 2D-CT. Das Messobjekt wird von einem Fächerstrahl durchstrahlt und auf einen Zeilendetektor abgebildet

Bei der 3D-CT (Bild 2) wird das gesamte Bauteil von einem Kegelstrahl durchstrahlt [15]. Die Röntgenprojektionen werden mit einem Flachdetektor gemessen. Eine vertikale Verschiebung von Quelle und Detektor wie bei der 2D-CT ist nicht nötig.

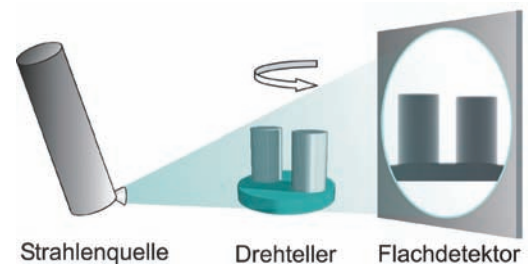


Bild 2: Prinzip der industriellen 3D-CT. Das Messobjekt wird von einem Kegelstrahl durchstrahlt und auf einen Flachdetektor abgebildet

Im Anschluss an die Aufzeichnung der Projektionen durch den Röntgendetektor erfolgt die numerische Rekonstruktion der 3D-Geometrie des Bauteils. Das Bauteil liegt danach in binärer Form als räumlich diskretisierte und in Grauwerten quantisierte 3D-Datenstruktur vor. Die Elementarzellen dieser Datenstruktur werden Voxel (Synonym für „Volumetric Pixel“) genannt. Die Grauwerte der Voxel sind durch die physikalische Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie ein Maß für die Verteilung der Elektronendichte im Messobjekt.

3 Anwendungen als Prüftechnik

Durch die Fähigkeit der CT, Dichteunterschiede im Prozentbereich bestimmen zu können, lassen sich mit der industriellen CT zerstörungsfrei qualitative Aussagen über Defektzustände technischer Bauteile machen [16]. Weitere Prüf-anwendungen liegen z.B. in der Strukturanalyse von geologischen Proben (Sedimenten) oder Baustoffen (Bild 3).

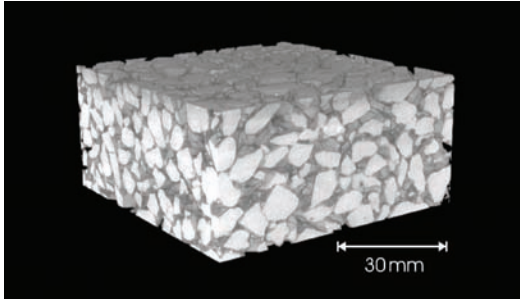


Bild 3:
CT-Strukturanalyse einer Asphaltprobe zur Untersuchung der Geräuschkämmeigenschaften (Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)

Durch verbesserte Anlagentechnik entwickelte sich die industrielle CT weiter in Richtung einer quantitativen Prüftechnik. So wird neben dem reinen Nachweis von Materialfehlern und Diskontinuitäten wie Einschlüssen, Lunkern oder Ungängen in Metallgussteilen heute auch gefordert, Aussagen über die Größe und die Verteilung von Fehlern zu machen (Bild 4) [17].

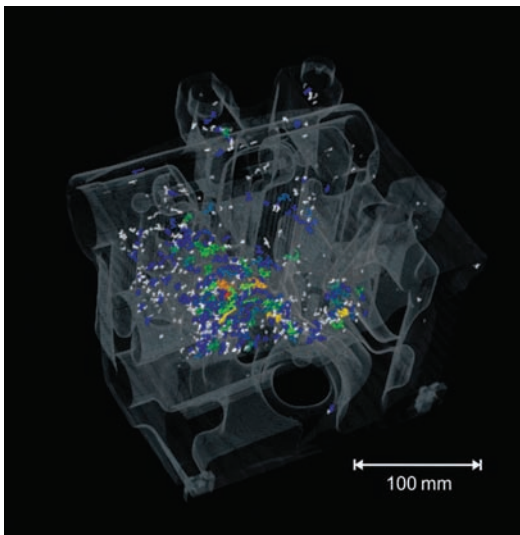


Bild 4:
CT-Messung eines Zylinderkopfsegments (Aluminiumguss). Industrielle Prüfaufgabe quantitative Lunkererkennung (Lunkergröße farbkodiert)

4 Entwicklung in Richtung Messtechnik zur Geometriebestimmung

Neben der automatisierten Lunkererkennung besteht durch geeignete Software die Möglichkeit einer automatisierten Wändickenanalyse

(Bild 5) [17]. Diese Verwendung der CT für Koordinatenmessungen kennzeichnet den Beginn des dimensionellen Messens mit CT.

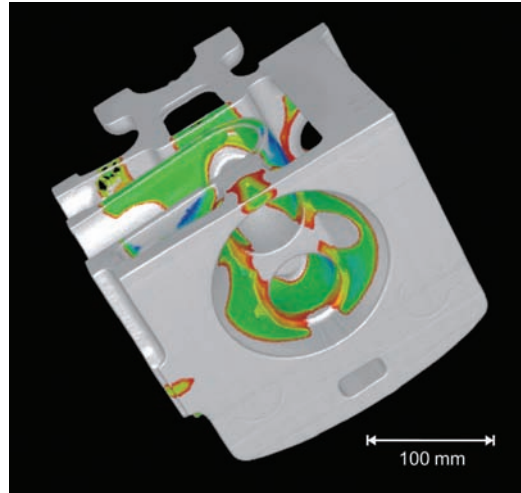


Bild 5:
CT-Messung des Zylinderkopfsegments aus Bild 4. Industrielle Messaufgabe Wändickenanalyse

Eine neuere Entwicklung der industriellen CT ist die Verschmelzung der CT mit Technologien aus der Koordinatenmesstechnik, da dimensionelles Messen besondere Anforderungen an die CT-Hardware und -Software stellt. Während im medizinischen Bereich die Rückführung auf die SI-Basiseinheit Länge bisher nur von untergeordneter Bedeutung ist, stellt die Rückführung eine Schlüsselanforderung an die CT zum dimensionellen Messen dar. Es werden deshalb bei aktuellen CT-Anlagen Präzisionskinematiken, wie z.B. Präzisionsdrehtische, Luftlager und Linearführungen mit Führungsfehlerkompensation in der Kombination mit Hartgestein verwendet. Hartgestein wird hier wegen seiner Stabilität, zur Schwingungsdämpfung sowie teilweise zur Strahlungsabsorption eingesetzt. Kommerziell erhältliche industrielle CT-Anlagen besitzen Vollschutzkabinen und eine Bauartzulassung nach Strahlenschutzverordnung DIN 54113. Eine aktuelle Entwicklung ist die Kombination der CT mit taktiler und/oder optischer Messtechnik zu einem Multisensor-Koordinatenmessgerät (KMG). Diese integrierte CT-Technik erlaubt völlig neue Einsatzmöglichkeiten, wie z.B. den Einsatz in der Reverse-Engineering Technologie [18]. Hierdurch können Bauteile rekonstruiert werden, bei denen es erforderlich ist, fertigungsgeeignete Information direkt aus der Geometrie des Bauteils zu gewinnen.

Ein wichtiger Datenverarbeitungsschritt beim dimensionellen Messen mit CT ist die Bestimmung der Bauteiloberfläche aus den Voxeldaten. Hierzu ist es notwendig, den Grauwertverlauf des Übergangs vom Material zum umgebenden Medium zu kennen und auf Grund dessen einen Schwellwert zu bestimmen. In den meisten Fällen werden heute noch mit Hilfe eines Schwellwerts aus den Voxeldaten Oberflä-

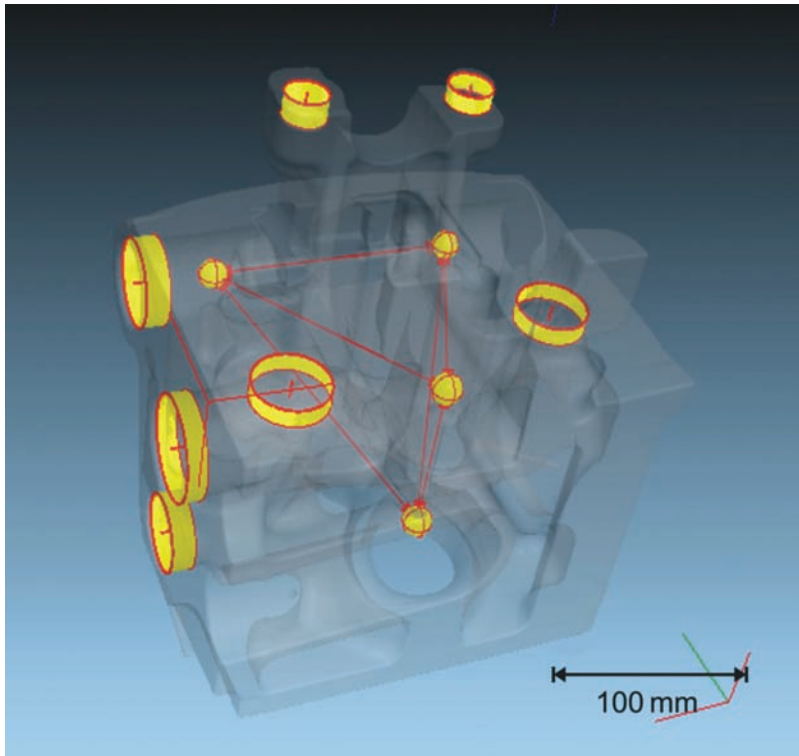


Bild 6:
Direktes dimensionelles
Messen mit CT in den
Voxeldaten (Zylinderkopf-
segment aus Bild 4,
gelbe Strukturen im Bild
mit CT gemessene Refer-
enzelemente)

chen in Form von triangulierten Punktwolken (Polygonoberfläche) z.B. im STL-Format (stereolithography format) erzeugt. Nach Abschluss der Oberflächenextraktion ist es in der Regel erforderlich, die Anzahl der Dreiecke vor einer Weiterverarbeitung deutlich zu reduzieren. Dieser Prozessschritt ist derzeit noch sehr zeitaufwändig und mit einem Qualitätsverlust der erzeugten Oberflächen verbunden. Einen neuen Weg stellt die direkte Analyse von Form- und Lagetoleranzen auf Basis der Voxeldaten dar (Bild 6) [17]. Aber auch bei diesem Verfahren ist die Kenntnis korrekter Schwellwerte notwendig.

Bisher ist es bei der industriellen CT üblich, einen globalen Schwellwert für den gesamten Voxeldatensatz zu verwenden. Lokal arbeitende Verfahren, die momentan in Entwicklung sind, können hier zu reduzierten Messabweichungen führen, da der Grauwertverlauf der Materialübergänge bei CT-Messungen häufig über das Bauteil variiert.

Die erzeugten Oberflächendaten werden als industrielle Hauptanwendung für weitere Auswertungen, wie Soll-Ist-Vergleiche zwischen CAD Soll-Geometrien und der mit CT gemessenen Geometrie (Bild 7) benutzt. Vor dem Soll-Ist Vergleich der STL-Daten mit den CAD- oder Referenzdaten ist es notwendig, die beiden Datensätze zueinander auszurichten (zu registrieren), da sie in der Regel in unterschiedlichen Koordinatensystemen vorliegen. Die am häufigsten verwendete Registrierungsart ist die Best-Fit-Methode. Die Dreiecke des STL-Datensatzes und die Oberfläche des Solldatensatzes werden so lange iterativ gegeneinander verschoben und

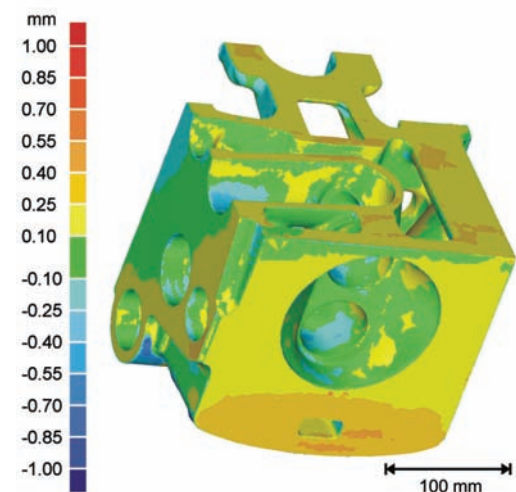


Bild 7:
Soll-Ist Vergleich einer CT-Messung gegen Nominal-
geometrie (CAD-Modell)

verdreht, bis die Summe der Abweichungsquadrate minimal ist. Durch eine Einpassung mittels der Best-Fit-Methode werden alle Messpunkte hinsichtlich der Abweichung zu den CAD- oder Referenzdaten gleich gewichtet. Bei anderen Registrierungsarten, wie z.B. der Ausrichtung nach vorgegebenen Regelgeometrien, werden die Abweichungen in den zur Ausrichtung benutzten Bereichen minimiert. Dies kann dazu führen, dass die Abweichungen in anderen Bereichen größer werden als bei der Best-Fit-Methode.

Der Vergleich der CT-Messung mit taktil gemessenen Referenzdaten (Bild 8) stellt eine wichtige Möglichkeit dar, die dimensionellen

Messeigenschaften der CT zu analysieren. Voraussetzung hierfür ist die Kalibrierung geeigneter, werkstückähnliche Körper mit einer hinreichenden Punktdichte. Die Kalibrierung sollte vorzugsweise taktil erfolgen, damit eine Rückführung der Messung möglich ist. Des Weiteren muss die Antastung der Freiformflächen des Körpers senkrecht zu den Oberflächen erfolgen, da ansonsten starke Messabweichungen auftreten können. Die PTB hat hier Kalibrierstrategien erarbeitet und ein Zylinderkopfssegment als Referenzkörper mit 3059 Punkten kalibriert (Bild 8) [19]. Industrielle Makro-CT Messungen können mit diesem Körper analysiert und beurteilt werden.

Der Vergleich von CT-Messungen mit nominalen CAD-Beschreibungen ersetzt nicht die Bestimmung der Messabweichungen mit kalibrierten Körpern, da die reale Geometrie der Bauteile starke fertigungsbedingte Abweichungen zu den CAD-Beschreibungen aufweisen kann und zudem durch falsche Orientierung der Oberflächennormalen in den CAD-Beschreibungen systematisch falsche Abweichungen festgestellt werden können (vgl. Bild 7 und Bild 8).

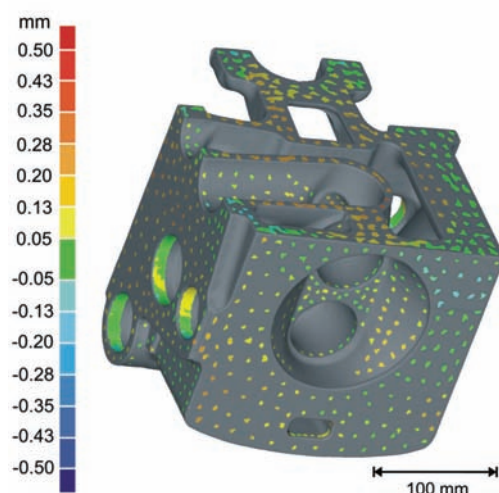


Bild 8: Soll-Ist Vergleich einer CT-Messung gegen punktweise taktil gemessene Referenzdaten

5 Verfahren zur Genauigkeitssteigerung

Ein wichtiges Verfahren zur Bestimmung und Korrektur von dimensionellen Messabweichungen der CT ist der Einsatz von taktil kalibrierten Referenzkörpern [20]. Die PTB entwickelt Prüfkörper und Verfahren zu deren Anwendung für die CT. Als Referenzkörper werden hier ein kalibrierter Kugelstab (Bild 9) zur Bestimmung und Korrektur von Maßstabsfaktoren sowie zwei Hohlzylinder mit kalibrierten Innen- und Außendurchmessern (Bild 10) zur Schwellwertbestimmung eingesetzt. Die Hohlzylinder bestehen aus dem gleichen Material wie die zu untersuchenden Werkstücke.



Bild 9: Kalibrierter Kugelstab (4 Keramikugeln Ø30 mm auf Kohlefasersstab, Kugelabstand 100 mm) zur Bestimmung und Korrektur von Maßstabsfaktoren

Durch Vergleich der mit CT gemessenen Kugelabstände des Kugelstabs mit dem Kalibrierwert wird als Erstes der Maßstabsfaktor durch Einstellen der Voxelgröße korrigiert. Für die Hohlzylinder werden für verschiedene Schwellwerte die jeweiligen Messabweichungen ermittelt. Kriterium für die Bestimmung des endgültigen Schwellwerts sind gleiche Messabweichungen bei Innen- und Außenmessungen. Der so bestimmte Schwellwert wird zur anschließenden Oberflächenerzeugung aus den Voxeldaten des Werkstücks benutzt.

Bei der CT-Messung in Bild 8 wurden die beschriebenen Maßstabskorrekturen mit einem Kugelstab und die Schwellwertbestimmung mittels zweier Hohlzylinder durchgeführt. Die Prüfkörper wurden gemeinsam mit dem Bauteil gemessen. Typische Messabweichungen sind mit diesem Verfahren deutlich kleiner als die Voxelgröße von $(0,371 \text{ mm})^2 \times 0,500 \text{ mm}$ (siehe Falschfarbencodierung der Abweichungen in Bild 8).



Bild 10: Aluminium-Hohlzylinder mit kalibrierten Außen- und Innendurchmessern (links: Ø30 mm/20 mm, rechts: Ø20 mm/10 mm) zur Schwellwertbestimmung

Von großer Bedeutung beim Einsatz der CT für dimensionelle Messungen ist die Bewertung, ob die CT-Anlage für die Messaufgabe geeignet ist (Prüfprozesseignung). Das Bauteil muss mit der CT-Anlage ausreichend gut durchstrahlbar sein, d.h. es darf nicht zu große durchstrahlte Materialdicken besitzen [20]. In vielen Fällen kann jedoch durch geschickte Wahl der relativen Lage des untersuchten Körpers zu der CT-Drehachse die maximale durchstrahlte Materialdicke minimiert werden. Zur Analyse der Durchstrahlbarkeit und zur Korrektur von Messabweichungen, die mit einer variablen Bauteildicke verknüpft sind, werden insbesondere bei der 2D-Makro-CT Stufenzylinder (Bild 11) verwendet. Hierbei ist die Differenz zwischen dem mit CT gemessenen und dem taktil kalibrierten Zylinderdurchmesser und insbesondere die ab einem kritischen

Zylinderdurchmesser stark zunehmende Zylinderformabweichung von Interesse. Die bei einem kritischen Zylinderdurchmesser stark ansteigende Formabweichung kennzeichnet die maximale durchstrahlte Materialdicke, bei der ein Bauteil noch sinnvoll gemessen werden kann. Stufenzylinder können weiterhin auch für die Parametrisierung der Rekonstruktionssoftware für das Material des Bauteils dienen.

Beim Durchgang von Röntgenstrahlung durch Materie wird nicht nur die Intensität der Strahlung abgeschwächt, sondern auch das Spektrum der Strahlung verändert. Niederenergetische Strahlung wird im Bauteil stärker absorbiert als höherenergetische. Dieser Effekt wird Strahlauhfärtung genannt (engl. Beamhardening). Der Effekt der Strahlauhfärtung führt unkorrigiert zu Bildfehlern (Artefakten) in den Voxeldaten. In aktuellen Arbeiten wird versucht, den Einfluss der Strahlauhfärtung durch iterative Korrekturen der Projektionsdaten zu minimieren [21]. Bei der Makro-CT mit höheren Beschleunigungsspannungen (industriell heute bis 450 kV) stellt die im durchstrahlten Bauteil und im Röntgendetektor selber entstehende Streustrahlung eine Ursache von weiteren Artefakten dar. Streustrahlung kann bei der Makro-CT, und speziell bei der 3D-Makro CT, das Signal-Rausch Verhältnis der Projektionen verschlechtern. Deshalb werden neben Korrekturen der Strahlauhfärtung auch Verfahren untersucht, die es erlauben sollen, die Projektionsdaten der industriellen CT bzgl. der Streustrahlung zu korrigieren [22]. Durch Korrekturen der Strahlauhfärtung und des Streustrahlungseinflusses sollen insbesondere die Eigenschaften der 3D-CT zum dimensionellen Messen verbessert werden. Ein weiteres Konzept zur Korrektur geometrischer Abweichungen beim dimensionellen Messen mit CT, die Nutzung von Kugelplatten, wird in Abschnitt 7 vorgestellt.



Bild 11:
Aluminium-Stufenzylinder (Ø 300 mm, Höhe 200 mm)
zur Beurteilung von Messaufgaben bei Gussteilen
und zur Parametrisierung der CT-Anlage

6 Rückführung von dimensionellen CT-Messungen

Die Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit von industriellen CT-Anlagen für dimensionelle Messungen ist ein Haupt-

arbeitspunkt der PTB. Für einen industriellen 2D-CT konnten hier Messunsicherheiten für Einzelpunktmessungen von industriellen Bauteilen am Beispiel eines Aluminium-Gussteils bestimmt werden. Es wurden hierfür 25 CT-Messungen untersucht. Die Messungen fanden unter Nutzung der in Abschnitt 5 beschriebenen Korrekturverfahren für lineare Maßstabsfaktoren und des Schwellwerts mit der Voxelgröße von $(0,37 \text{ mm})^2 \times 0,50 \text{ mm}$ statt. Die Messunsicherheiten der mit CT gemessenen Einzelpunkte der Bauteiloberfläche wurden nach DIN 1319-3 bestimmt. Dabei wurde der Werkstückeinfluss mit dem bei Gussteilen dominanten Einfluss der Rauheit durch Untersuchungen an Rauheitsprüfkörpern berücksichtigt [23]. Mindestens 95% aller Einzelpunktmessunsicherheiten waren dabei kleiner 0,270 mm im Außenraum, kleiner 0,431 mm im Innenraum und kleiner 0,388 mm für die Gesamtheit aller Punkte im Innen- und Außenraum. Es konnte damit eine Messunsicherheit kleiner als die kürzeste Voxelkantenlänge für mehr als 93% aller Oberflächenpunkte erreicht werden. Die maximal beobachteten erweiterten Einzelpunktmessunsicherheiten U (für $k=2$) an 167 Messstellen des Bauteils betrugen 1,305 mm im Innenraum und 0,562 mm im Außenraum. Die Untersuchung fand an Original CT-Daten statt, die industriell für auch Erstbemusterungen eingesetzt werden. Durch Vergleich der aufgabenspezifischen Messunsicherheiten mit den vorgegebenen Toleranzen kann mit diesem Ergebnis die Prüfprozesseignung beurteilt werden.

Ähnlich wie bei Koordinatenmessgeräten ist für dimensionelle Messungen mit CT eine geeignete Überwachung notwendig, um eine gleich bleibende Qualität der Messergebnisse zu gewährleisten. Richtlinien zur Überwachung von CT-Anlagen liegen aber bisher nur für medizinische CT-Anlagen vor (DIN EN 61223-2-6 bzw. IEC 1223-2-6, DIN 6868-53). Auf dimensionelles Messen wird im medizinischen Bereich nicht eingegangen. Bei vorhandenen Richtlinien und Normen zur industriellen CT werden entweder nur allgemeine Empfehlungen [24] gegeben oder es sind lediglich Auflösungstests beschrieben [25, 26]. Die PTB entwickelt deshalb zusammen mit Partnern industrietaugliche Verfahren, mit denen CT-Anlagen für dimensionelle Messungen überwacht werden können. Die Überwachung von dimensionellen Messungen mit CT orientiert sich an Prinzipien der Richtlinie VDI/VDE 2617 Bl. 5 für Koordinatenmessgeräte [27]. Zur Überwachung des CT-Systems für das dimensionelle Messen werden deshalb Tests durchgeführt, die kritisches Verhalten der CT-Anlage bei dimensionellen Messungen erfassen können. Diese Tests sind einerseits Messungen von Dimensionen und Formabweichungen an kalibrierten Prüf-

körpern (Kugelstab, Lehrringe, Paralleleiste und Stufenzylinder) und andererseits Messungen realer, kalibrierter Bauteile (Beispiel Bild 12). Die PTB hat für die Makro-CT ein abgestuftes Konzept von Messungen erarbeitet. Die Messungen an den kalibrierten Körpern stellen sicher, dass die beobachteten Messabweichungen auf die SI-Einheit „Länge“ zurückgeführt sind. Durch regelmäßige Messungen realer, kalibrierter Bauteile können zudem absolute und aufgabenspezifische Aussagen über die Stabilität des Messprozesses gemacht werden.

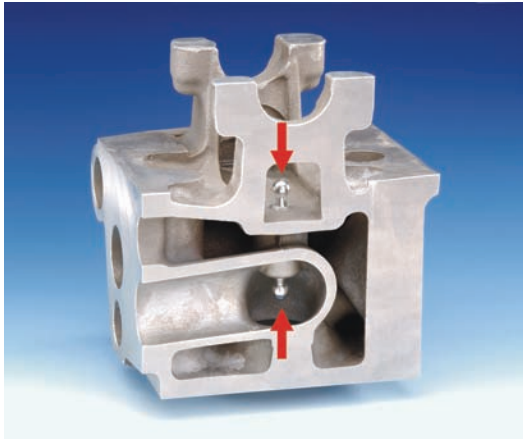


Bild 12:
Aluminium-Zylinderkopfsegment mit angebrachten Referenzstrukturen (siehe Pfeile) als Beispiel für ein kalibriertes Bauteil als Überwachungsprüfkörper von 2D-Makro-CT Anlagen

Als kalibriertes Bauteil wird hier ein Zylinderkopfsegment verwendet, das einen vollen Brennraum enthält. Durch die am Bauteil angebrachten Referenzstrukturen können mechanische Drift, Fehler bei der Schwellwertbestimmung, Maßstabsfehler sowie Veränderungen der Geometriefehler der Achsen des CT-Systems erkannt werden. Je nach Orientierung dieses Segments und je nach Lage des gemessenen Schnittes tritt eine große Zahl stark unterschiedlicher Durchstrahlungszustände (durchstrahlte Dicken, Winkel der Strahlung zu Oberflächen und Oberflächenkrümmungen) während der Messung mit dem 2D-CT auf. Durch die Referenzstrukturen können verschiedene Datensätze aufeinander registriert und somit Effekte durch unterschiedliche Bauteildicken, Strahlauhärtung und weiterer Artefakte überwacht werden.

7 Etablierung als Koordinatenmesstechnik

Im Oktober 2004 wurde der VDI/VDE-GMA Fachausschuss 3.33 „Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik“ gegründet. Das Ziel dieses Gremiums ist die Erstellung einer Richtlinie, die analog zu der Reihe VDI/VDE 2617 die messtechnischen Eigenschaften von CT-Anlagen in der dimensionellen Messtechnik beschreibt. Die PTB und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wirken

hier aktiv an der Beschreibung von Grundlagen und Einflussgrößen sowie der Definition von Kenngrößen mit. Die Definition von Kenngrößen für dimensionelles Messen mit CT soll hierbei auf Konzepten und Erfahrungen aus der klassischen Koordinatenmesstechnik aufbauen. So sollen auch für die CT Kenngrößen definiert werden, die als *Antastabweichung* lokale Eigenschaften des CT-Systems und als *Längenmessabweichung* globale Eigenschaften des CT-Systems abbilden. Die Messung der Kenngrößen erfolgt auch im Fall der CT über die Messung von kalibrierten Referenzkörpern. Ein besonders aussagestarker Referenzkörper stellt hier die Kugelplatte dar. Die PTB hat dieses aus der klassischen Koordinatenmesstechnik stammende und von ihr entwickelte Konzept [28] auf den Bereich CT übertragen. Kugelplatten mit halbkugelförmigen Kalotten, so genannte Kugelkalottenplatten, sind geeignet, mehrere Kenngrößen gleichzeitig zu erfassen. Sie eignen sich zur Durchführung von Antasttests, zur Durchführung von Messungen der Kugelabstandsabweichung und auch zur Korrektur und Genauigkeitssteigerung der CT.

Das Konzept der Kugelkalottenplatte kann mittels geeigneter Fertigungsverfahren miniaturisiert und auf 3D-Strukturen übertragen werden. Eine aktuelle Ausführung dieses Prüfkörpers für Anwendungen in der Mikro-CT besteht aus einer Glaskeramikplatte (Zerodur) mit den Abmessungen von $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (Bild 13), in die eine regelmäßige 4×4 Anordnung von kugelförmigen Kalotten mit Durchmesser 3,0 mm eingebracht wurde (Fertigung durch PTB mit Schleif- und Polierverfahren). Das Material Zerodur besitzt einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ($\alpha < 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ist mechanisch sehr stabil und hochgenau bearbeitbar und weist gleichzeitig für die Mikro-CT günstige Röntgenabsorptionseigenschaften auf.

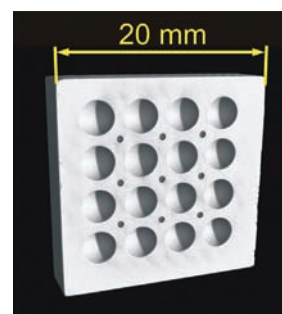


Bild 13:
Mikro-CT Messung der Kugelkalottenplatte aus Zerodur

Die Kugelkalottenabstände wurden mit einem taktilen KMG im Umschlagverfahren kalibriert. Aus den taktilen Koordinaten wurden die Mittelpunkte, die Durchmesser und die Formabweichungen der Kugelkalotten bestimmt. Die Unsicherheit der aus der taktilen Messung ermittelten Kugelmittelpunktskoordinaten beträgt $1,5 \mu\text{m}$, die der Durchmesser und der Formabweichungen $2 \mu\text{m}$. Die Formabweichungen sind bei 10 Kugelkalotten kleiner $2,5 \mu\text{m}$. Die maximalen Formab-

weichungen alle Kugelkalotten betragen $9,5 \mu\text{m}$. Analog zur Anwendung bei klassischen Koordinatenmessgeräten kann die Kugelkalottenplatte zur Bestimmung von räumlichen Abweichungsfeldern in mehreren Positionen im Volumen der CT-Anlage eingesetzt werden. In Bild 14 sind die Ergebnisse für die Position horizontal in der Mitte des CT-Messvolumens gezeigt. Es sind die Abweichungsvektoren zwischen den kalibrierten Mittelpunktskoordinaten und den mit CT gemessenen Koordinaten im Maschinensystem des CT dargestellt.

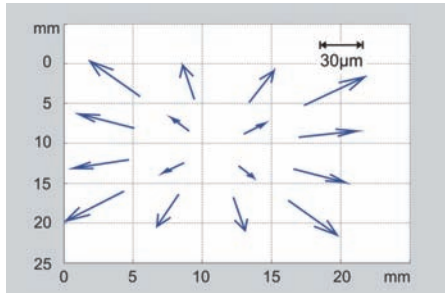


Bild 14: Kugelabstandsabweichung (Verzerrungsvektorfeld) vor der Korrektur des Maßstabsfehlers

Der untersuchte CT hat die Kugelabstände zu klein bestimmt. Nach der Korrektur dieses Maßstabsfehlers kann die Kugelabstandsabweichung als Restabweichung in Analogie zur Koordinatenmesstechnik in Anlehnung an VDI/VDE 2617 Bl. 2.1 [29] aufgetragen werden (Bild 15).

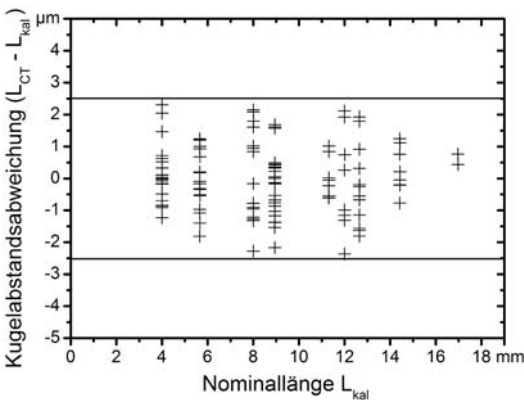


Bild 15: Kugelabstandsabweichung als Differenz der mit dem CT gemessenen Länge L_{CT} und der taktil kalibrierten Länge L_{kal} nach Korrektur des Maßstabsfehlers. Darstellung in Anlehnung an VDI/VDE 2617 Bl. 2.1

Es verbleibt eine längenunabhängige Restabweichung der Kugelmittelpunktsabstände von maximal $\pm 2,5 \mu\text{m}$. Durch das beschriebene Korrekturverfahren wurde somit eine Kugelabstandsabweichung erreicht, die deutlich kleiner als die Voxelgröße von $(15 \mu\text{m})^3$ ist und sich bereits in der Nähe der Kalibrierunsicherheit des Prüfkörpers bewegt. Die Definition der Längenmessabweichung für CT-Messungen wird aktuell im VDI/VDE-GMA Fachausschuss 3.33 diskutiert. Eine mögliche Definition ist, dass sie im Fall der Messung mit einer Kugelkalottenplatte wie in VDI/VDE 2617 Bl. 6.2 für optische Koordinatenmessgeräte [30] als Summe aus Kugelabstandsabweichung, Antastabweichung für Maß und Antastabweichung für Form definiert wird. Nach der Korrektur des Maßstabsfehlers und nach Ermittlung der Kugelabstandsabweichun-

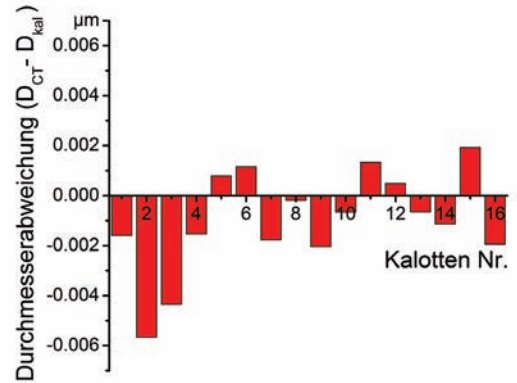


Bild 16: Abweichungen der Kugelkalottendurchmesser als Differenz der mit dem CT gemessenen Durchmesser D_{CT} zu den taktil kalibrierten Durchmessern D_{kal}

gen werden die Durchmesserabweichungen der Kugelkalotten bestimmt (Bild 16). Die Tatsache, dass die Durchmesserabweichungen der Kugelkalotten nicht symmetrisch um die Nulllinie verteilt sind, ist darauf zurückzuführen, dass der Schwellwert für das Material noch nicht optimal eingestellt wurde. Ein zu kleiner Schwellwert führt zu kleineren Kugelkalottendurchmessern und damit zu einer Verschiebung der Verteilung zu negativen Werten. Weiteres Optimierungspotential zur Verkleinerung der Messabweichungen ist hier gegeben.

Als letzte Kenngröße wird die Antastabweichung bestimmt. Nach VDI/VDE 2617 Bl. 2.1, ist die Antastabweichung (für Form) die Spanne der radialen Abweichungen zum Ausgleichselement ermittelt nach der Gauss-Methode. Die Kugelkalottenplatte bietet den Vorteil, die Formabweichungen der Kugelkalotten zu den Ausgleichselementen an mehreren Orten gleichzeitig bestimmen zu können. Dadurch lassen sich einerseits statistisch bessere Aussagen über die Leistungsfähigkeit des untersuchten CT machen, andererseits kann analysiert werden, ob die durch die lokale Messgröße Antastabweichung beschriebenen Eigenschaften des CT räumlich anisotrop sind. Weiterhin können die Messergebnisse nicht nur als reine Zahlenwerte, sondern als räumliche Verteilung der Größe und Richtung der Abweichungen in einer Falschfarbendarstellung ausgewertet werden (Bild 17).

Es sind für den untersuchten CT charakteristische Formabweichungen der Kugelkalotten zu beobachten: Den geringen herstellungsbedingten Formabweichungen der Kugelkalotten sind Abweichungen aus der CT-Messung von $\pm 15 \mu\text{m}$, also dem Zweifachen der Voxelgröße, überlagert. Hierzu zählen Abweichungen, die hauptsächlich aus der Änderung der durchstrahlten Dicke des Normals herrühren. Durch Serienmessungen an verschiedenen CT-Anlagen wurde festgestellt, dass je nach Lage der Kugelkalottenplatte im Messvolumen des CT-Systems unterschiedliche

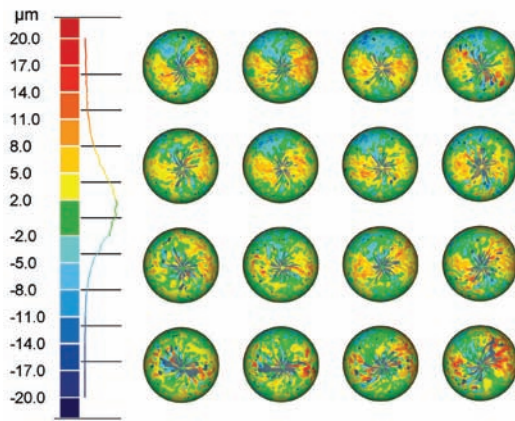


Bild 17: Falschfarbendarstellung der radialen Abweichungen der Kugelkalottenoberfläche zum jeweiligen Kugelausgleichselement (Gauß-Einpassung). Als Histogramm ist neben der Größe der Abweichungen ihre Verteilung angegeben

Einflüsse dominieren. Die hier dargestellte Messmethode bietet dem CT-Entwickler ein neues und sehr leistungsfähiges Mittel, die Abweichungen der CT analysieren und korrigieren zu können. Möglichkeiten der Korrektur werden in weiteren Arbeiten der PTB untersucht. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden an der Mikro-CT Anlage der BAM erzielt. Diese CT-Anlage besitzt einen modernen Flachdetektor mit 2048×2048 Pixel. Vergleichsergebnisse an anderen Mikro-CT Anlagen mit 1024×1024 Pixel oder 512×512 Pixel (jeweils 4 Pixel eines 1024×1024 Pixel Detektors während der Messung zusammengefasst) Flachdetektoren legen nahe, dass die Messabweichungen mit der Voxelgröße skalieren. Dies lässt erwarten, dass mit der Verfügbarkeit von Detektoren mit noch größerer Pixelzahl sich diese Abweichungen in Zukunft weiter reduzieren lassen.

8 Ausblick

Die Entwicklung der CT in Richtung einer Koordinatenmesstechnik ist noch nicht abgeschlossen. Zahlreiche Messaufgaben auf dem Gebiet der Geometriebestimmung können jedoch bereits jetzt mit CT messtechnisch sinnvoll und konkurrenzfähig gegenüber anderer Messtechnik gelöst werden. Für viele Messaufgaben ist die CT sogar die einzige Messtechnik, die innere Geometrien technischer Bauteile zerstörungsfrei bestimmen kann. Im Moment beobachtet man eine rasche Entwicklung bei dem Entstehen neuer CT-Anlagentypen zum dimensionellen Messen und die Installation zahlreicher neuer industrieller CT-Systeme. Die Bedeutung der industriellen CT für dimensionelle Messungen kann außerdem daran gemessen werden, dass diese Thematik auf Tagungen wie der VDI/VDE-Tagung Koordinatenmesstechnik im Nov. 2005 sowie der 9. Europäischen Konferenz für Zerstörungsfreie Prüfung (ECNDT) im Sept. 2006 umfassend präsentiert wurde. Die weitere Entwicklung der industriellen CT wird heute be-

stimmt durch die zunehmende Kombination mit optischer und taktiler Koordinatenmesstechnik und durch die Erhöhung der Auflösung im Bereich der Mikrobauteilmessungen. Bestrebungen, die komplexen Einflussfaktoren bei der CT zu simulieren [31], um einerseits die Messunsicherheit von CT-Messungen zu bestimmen und andererseits neue Ansätze für Korrekturen zu gewinnen, verstärken diese Entwicklung. Die Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit von Mikro-CT Messungen kleiner Bauteile stellt hierbei eine Aufgabe für die nächsten Jahre dar.

Als Vision ist es heute schon vorstellbar, dass die industrielle CT in Zukunft zahlreiche Messungen, die heute noch mittels taktiler oder optischer Sensoren durchgeführt werden, ersetzen wird. Ein derartiger Einsatz industrieller CT kann durch deren Fähigkeit, in kurzer Zeit vollständige und ausreichend genaue Messungen zu liefern, zu deutlichen Leistungssteigerungen und Kostensenkungen in der Fertigung von Bauteilen führen.

Danksagung

Die Autoren danken den Projektpartnern im Projekt „Genauigkeitssteigerung von industriellen Röntgen Computertomographie (CT) Anlagen für die dimensionelle Messtechnik“ für die gute Zusammenarbeit, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) für die Bereitstellung der CT-Anlagen und Durchführung von CT-Messungen und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Projektförderung (Projektnummer VI A 2-08/03).

Literatur

- [1] Radon, J.: Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten, Ber. Verh. Sächs. Akad. Wiss. Leipzig, Math. Nat. kl. 69, 1917, 262–277
- [2] Rahmim, Arman: PET vs. SPECT: in the Context of Ongoing Developments, Iran J. Nucl. Med., Vol. 14, No 25, 2006
- [3] Hsieh, J.: Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances, SPIE Press monograph. PM114, 2003
- [4] Buzug, T. M.: Einführung in die Computertomographie, Springer-Verlag, 2004
- [5] Bartscher, M., Goebels, J., Hilpert, U., Weidemann, G., Wäldele, F.: Genauigkeitssteigerung von industriellen Röntgen-Computertomografie (CT)-Anlagen für die dimensionelle Messtechnik, DGZfP Berichtsband 89-CD, 05/2004
- [6] Richard, A. F., Janzen, P.: Tomography of the Solar Corona. II. Robust, regularized, positive estimation of the three-dimensional electron density distribution from LASCO-C2 polarized white-light images, The Astrophysical Journal, 570/2002, 408–422

- [7] Gondrom, S., Schröpfer, S.: Digital computed laminography and tomosynthesis – functional principles and industrial applications, DGZfP Berichtsband 67-CD, 03/1999
- [8] Hoyle, B. S.: Process tomography using ultrasonic sensors, Meas. Sci. Technol. 7 1996, 272–280
- [9] Saewert, H.-C., Fiedler, D., Bartscher, M., Wäldele, F.: Obtaining dimensional information by industrial CT-scanning – present and prospective process chain, DGZfP Berichtsband 84-CD, 06/2003
- [10] Riesemeier, H., Goebbels, J., Illerhaus, B., Onel, Y., Reimers, P.: 3-D Mikrocomputer-tomograph für die Werkstoffentwicklung und Bauteilprüfung, DGZfP Berichtsband 37, 05/1993
- [11] Haase, O., Goebbels, J., Illerhaus, B., Bailey, M., Scené, M.: High Energy Tomography an Crack Recognition, DGZfP Berichtsband 67-CD, 03/1999
- [12] Goebbels, J., Weidemann, G., Riesemeier, H., Nitschke, A.: Charakterisierung keramischer Mikrobauteile mittels Computertomographie – Vergleich von Laboranlagen und Synchrotronstrahlung, DGZfP Berichtsband 80-CD, 05/2002
- [13] Mnich, F.: „Einsatz der Computertomographie in der modernen Gießereitechnik“, Automotive Engineering Partners, 2/2000, 62–65
- [14] Kalender, W. A.; Engelke, K., Schaller, S.: Spiral CT: medical use and potential industrial applications, Proc. SPIE Vol. 3149, Developments in X-Ray Tomography, Ulrich Bonse (Ed.), 10/1997, 188–202
- [15] Simon, M., Sauerwein, C.: Quality control of Light Metal Castings by 3D Computed Tomography, Proc. of 15th WCNDT, Rome, Italy, 10/2000
- [16] Pfeiffer-Schäller, I., Tomaschko, S., Simon, M., Sauerwein, Ch.: Computertomographie im Vergleich mit konventionellen Prüfverfahren, DGZfP Berichtsband 75-CD, 05/2001
- [17] Reinhart, C., Poliwoda, C., Günther, T., Roemer, W., Maass, S., Gosch, C.: Modern Voxel based data and geometry analysis software tools for industrial CT, CD-ROM Proceedings, World Conference on NDT (WCNDT) 30. 8.–3. 9. 2004, Montreal, Canada
- [18] Bartscher, M., Hilpert, U., Goebbels, J., Weidemann, G., Puder, H., Jidav, H.-N.: Einsatz von Computertomographie in der Reverse-Engineering Technologie, Materialprüfung (MP), 6/2006, 305–311
- [19] Bartscher, M., Hilpert, U.: Industrielle Computertomographie – von der Defekterkennung zum Messmittel für die Geometriebestimmung, VDI-Bericht 1914, 11/2005
- [20] Bartscher, M., Fiedler, D., Saewert, H.-C., Wäldele, F.: Dimensionelle Messabweichungen eines industriellen 2D-Computertomographen: Einfluss der Werkstückgeometrie, VDI-Bericht 1829, 03/2004
- [21] Kasperl, S.: Qualitätsverbesserungen durch referenzfreie Artefaktreduzierung und Oberflächennormierung in der industriellen 3D-Computertomographie, Dissertation der Technischen Fakultät der Universität Erlangen–Nürnberg, 02/2005
- [22] Hopkins F., Du, Y., Lasiuk, B., Abraham, A., Basu, S.: Analytical corrections for beam-hardening and object scatter in volumetric computed tomography systems, Proc. of 16th WCNDT, Montréal, Canada, 10/2004
- [23] Fiedler, D., Bartscher, M., Hilpert, U.,: Dimensionelle Messabweichungen eines industriellen 2D-Computertomographen: Einfluss der Werkstückrauheit, DGZfP Berichtsband 89-CD, 05/2004
- [24] ISO 15708-1: Non-destructive testing – Radiation methods - Computed tomography – Part 1: Principles, 2002
- [25] ISO 15708-2: Non-destructive testing – Radiation methods – Computed tomography – Part 2: Examination practices, 2002
- [26] ASTM E 1695-95(2001), Test Method for Measurement of Computed Tomography CT System Performance, 2001
- [27] VDI/VDE 2617 Blatt 5: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Überwachung durch Prüfkörper, Technische Regel, 11/2001
- [28] Trapet, E., Wäldele, F.: Determination of Parametric Errors of Coordinate Measuring Machines and Machine Tools using Reference Objects, VDI-Bericht 761, 09/1989
- [29] VDI/VDE 2617 Blatt 2.1: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-2 zur Prüfung von Längenmaßen, Technische Regel, 08/2005
- [30] VDI/VDE 2617 Blatt 6.2: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Abstandssensoren, Technische Regel, 10/2005
- [31] Wenig, P., Kasperl, S.: Examination of the Measurement Uncertainty on Dimensional Measurements by X-ray Computed Tomography, DGZfP Berichtsband 103-CD, 09/2006

Weitergabe der Längeneinheit für Verzahnungsmessungen

Frank Härtig¹, Karin Kniel²

1 Einleitung

Zahnräder gehören zu den wichtigsten Komponenten der Antriebstechnik. Als zentrales Element unserer mobilen Gesellschaft finden sie sich in nahezu allen Bereichen, in denen Drehbewegungen mit hoher Präzision oder mit hohem Drehmoment übertragen werden [1]. Die dimensionellen Abmessungen der Zahnräder sind daher höchst unterschiedlich. Das Spektrum reicht von Mikrozahnrädern mit Außendurchmessern von weniger als 500 μm [2] bis hin zu Zahnrädern, die in der Schwerindustrie eingesetzt werden und bei denen Raddurchmesser von mehr als 10 m keine Seltenheit sind. Von wirtschaftlich außerordentlicher Bedeutung sind die Zahnräder für deutsche Schlüsseltechnologien, wie beispielsweise der Automobilindustrie, dem Maschinenbau oder der Medizintechnik. So werden alleine in Deutschland jährlich ca. 140 Millionen Zahnräder in Kraftfahrzeuggetrieben verbaut [3]. Mit dem Trend von Fünf- zu Siebenganggetrieben ist alleine für diesen Bereich in den kommenden Jahren mit einem erheblichen Zuwachs an Zahnrädern zu rechnen.

Zu den wichtigsten Bauformen der Zahnräder gehören Zylinder-, Kegel- und Schneckenräder. Darüber hinaus können Gewinde, aufgrund ihrer ähnlichen Geometrie und aufgrund ihrer messtechnischen Verwandtschaft, ebenfalls in diese Gruppe eingeordnet werden. Die dabei anstehenden Messaufgaben umspannen einen weiten Bereich der industriellen Messtechnik und reichen von Maß-, Form- und Lage- über Welligkeits- bis hin zu Rauheitskenngrößen. Neben den klassischen taktilen Messgeräten, die überwiegend in der Industrie eingesetzt werden, versucht man immer häufiger die Zahnradflanken auch mit Streifenprojektionsverfahren, Weißlichtinterferometrie und Computertomographie zu messen. Dabei die Genauigkeitsanforderungen der Industrie zu erfüllen, ist eine der heutigen messtechnischen Herausforderungen, da moderne Fertigungsverfahren immer kom-

plexere Flankenmodifikationen ermöglichen, die bei gleichzeitig kleiner werdenden Toleranzen zuverlässig gemessen werden müssen. Rückführbare Messergebnisse sind von besonderer Notwendigkeit, da Zahnräder in der Regel auf unterschiedlichen Werkzeugmaschinen gefertigt werden, im eingebauten Getriebe jedoch miteinander paaren müssen.

Mit dem Ziel die Messgenauigkeiten für die Industrie deutlich zu verbessern, hat die PTB in den vergangenen Jahren ein ganzheitliches Konzept entwickelt [4] und für die hochgenaue Kalibrierung von Zylinderrädern fast vollständig umgesetzt. Das Konzept umfasst die wesentlichen am Messprozess beteiligten Komponenten. Vom metrologischen Institut bis hin zur Fertigung können heute erstmals produktähnliche Normale eingesetzt werden. Problemorientiert, Kosten und Messaufwand sparend, bieten diese eine zukunftsweisende Alternative zu den bekannten produktunähnlichen Normalen für Profil-, Flankenlinien- und Teilungsmessung. Voraussetzung war die Entwicklung einer universellen 3D-Messeinrichtung, mit der heute die unterschiedlichen Geometrien der produktähnlichen Zylinderradnormale hochgenau kalibriert werden können. Ein weiterer Schwerpunkt bestand in der Validierung von Auswertalgorithmen. Dieser Schritt war von besonderer Bedeutung, da die immer komplexer werdenden Zylinderradauswertungen nicht selten den signifikanten Fehleranteil ausmachen. Bis vor kurzem war dieser Unsicherheitsbeitrag noch völlig unberücksichtigt geblieben. Letztlich wurde durch die aktive Mitwirkung in nationalen und internationalen Normungsgremien der Wandel von der 2D- hin zur 3D-Messtechnik eingeleitet. Hier gilt es künftig, die fehlenden Definitionen und Auswertalgorithmen festzulegen bzw. zu entwickeln und schließlich zu standardisieren.

Auch im Bereich der Verzahnungsmesstechnik ist die PTB in viele Forschungsaktivitäten eingebunden. Neben dem engen Kontakt zur

- 1 Dr. Frank Härtig
Leiter des PTB-Fachbereichs Koordinatenmesstechnik
E-Mail: frank.haertig@ptb.de
- 2 Dipl.-Ing. Karin Kniel
Leiterin der PTB-Arbeitsgruppe „Verzahnung und Gewinde“
E-Mail: karin.kniel@ptb.de

Industrie pflegt sie daher auch die Kontakte zu wissenschaftlichen Einrichtungen. Darüber hinaus berät die PTB den DKD und andere nationale Akkreditierungsstellen außerhalb Deutschlands. Sie stellt den Experten in EUROMET und organisiert internationale Vergleichsmessungen. Neue Technologien nutzend hat die PTB am Aufbau und am Betrieb eines Internet basierten, virtuellen, europäischen Instituts EVIGeM maßgeblich mitgewirkt.

2 Standardisierung

Die Grundlagen der Verzahnungsmesstechnik sind in vielen nationalen und internationalen Normen und Richtlinien festgehalten. Dabei besteht weitgehend Einigkeit über deren technische Inhalte hinsichtlich der Messgrößen, Messparameter, Prüfkörper und verwendeten Normale. Lediglich im Bereich der Toleranzen weichen verschiedene Normen voneinander ab. Der Wunsch und das Bestreben nach einer Harmonisierung auf internationaler Ebene ist innerhalb der ISO-Gremien in der Verzahnungsmesstechnik jedoch deutlich zu spüren.

Die immer kürzer werdenden Innovationszeiten erfordern eine ständige Aktualisierung und Neuerung der Normen und Richtlinien. In Deutschland werden diese unter großer Beteiligung der Industrie und mit Unterstützung einiger wissenschaftlichen Einrichtungen im VDI-Fachausschuss 3.16 und im DIN-Arbeitskreis AA1.1 erarbeitet. Auf internationaler Ebene werden Richtlinien in den ISO-Gremien ISO/TC60 und in den Workinggroups WG1 bis WG3 diskutiert und erstellt. Auch wenn das Sekretariat derzeit von den USA wahrgenommen wird, ist der Einfluss der deutschen Delegation

recht groß. Verbunden mit dem hohen Niveau deutscher Normen hat dies dazu beigetragen, dass vieles übernommen wurde und sich die internationalen Normen im Bereich der Verzahnungsmesstechnik von den nationalen Normen wenig unterscheiden.

Die wichtigsten normativen Grundlagen der Verzahnungsmesstechnik sind in [5, 6] beschrieben. Im industriellen Umfeld finden sowohl die Anwender als auch die Messgerätebauer ausführliche Informationen über Nomenklatur, Auswertungen, Messstrategien, Softwareschnittstellen, Messräume sowie An- und Abnahmebedingungen in den Richtlinien VDI/VDE 2606 bis VDI/VDE 2613.

Allgemein decken diese Normen jedoch nur die klassische, d.h. zweidimensionale, Verzahnungsmesstechnik ab. Es ist daher ein angestrebtes Ziel, möglichst zeitnah auf die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Fertigung und auf die Möglichkeiten der Verzahnungsmesstechnik einzugehen und künftig das Zylinderzahnrad, in Analogie zu anderen Werkstücken, als 3D-Objekt zu behandeln.

3 Auswertung von 3D-Messdaten

Moderne Verzahnungsmessgeräte sind Koordinatenmessgeräte oder spezielle Messgeräte, die als Drei- oder Vierachsmessgeräte mit 3D-Messköpfen aufgebaut sind. Die Messpunkte, die auf der gesamten Zahnflanke verteilt sein können, werden räumlich erfasst und müssen anschließend in vorgegebene 2D-Auswerteebenen umgerechnet werden. Die Grundlagen und Rechenschritte sind bisher weder in Normen noch in Richtlinien aufgeführt. Eine Festlegung ist aber notwendig, um vergleichbare und sichere Mess-

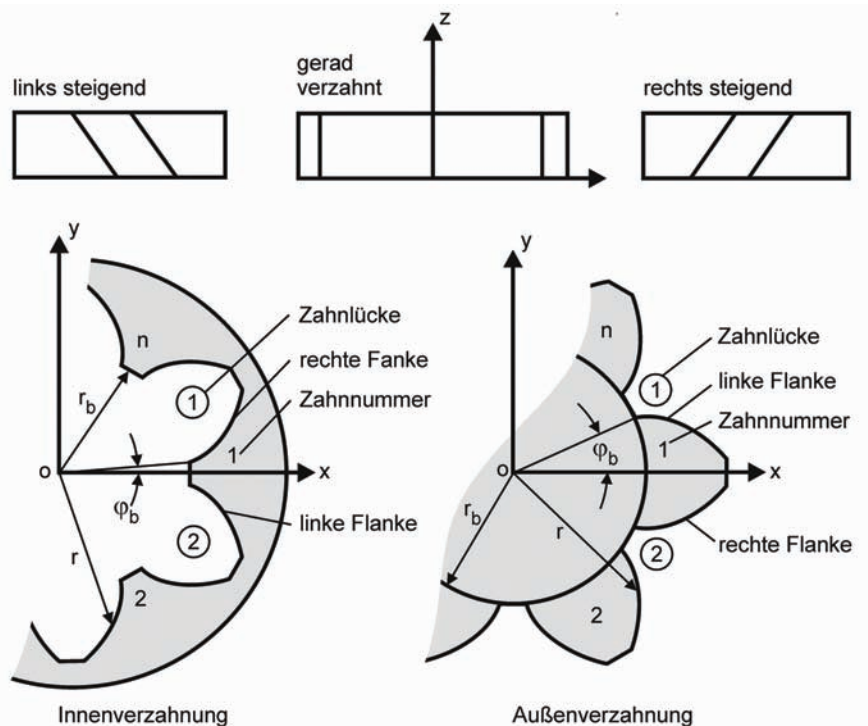


Bild 1: Festlegung von Zylinderzahnradkoordinaten für Innen- und Außenverzahnungen

ergebnisse zu erzielen oder um Daten eindeutig austauschen zu können.

Bild 1 beschreibt die vollständige Darstellung außen- und innenverzahnter Zylinderräder. Neu gegenüber bestehenden Definitionen ist die ganzheitliche Betrachtung des Zylinderrades. Es wird in kartesischen Koordinaten beschrieben. Die X-Achse verläuft dabei grundsätzlich durch die Zahnmitte des jeweils ersten Zahnes.

3.1 Transformation von evolventischen in kartesische Koordinaten

In Anlehnung an [7, 8] lassen sich Zylinderräder analytisch durch Gleichung 1 darstellen. Diese Gleichung beinhaltet die Transformationsvorschrift von evolventischen in kartesische Koordinaten. Die evolventischen Koordinaten beschreiben das Zylinderrad mit drei Parametern: dem Positionswinkel $\varphi_{b,i}$ zur Beschreibung der Lage einer Zahnflanke auf dem Grundkreis der Evolvente [6], dem Eingriffswinkel α zur Beschreibung der radialen Position eines Flankenpunktes und dem Höhenparameter z zur Beschreibung der Position eines Flankenpunktes in axialer Richtung.

$$\begin{matrix} x & r \cdot \cos\left(\varphi_{b,i} + hand \cdot c \cdot z + flank \cdot inv\alpha\right) \\ y & = r \cdot \sin\left(\varphi_{b,i} + hand \cdot c \cdot z + flank \cdot inv\alpha\right) \\ z & z \end{matrix} \quad (1)$$

Hierin sind:

hand Steigungsrichtung-Indikator (-1/0/1 linkssteigend, geradzahnt, rechtssteigend)

flank Flanken-Indikator (-1/1 linke/rechte Flanke)

$\varphi_{b,i}$ Positionswinkel der Flanke in rad

α Eingriffswinkel in rad

z Steigungshöhenkoeffizient in mm

r Radius in mm

x, y, z kartesische Koordinaten in mm

Die partielle Ableitung nach den Parametern α und z führt zusätzlich auf die Darstellung der Flankennormalen \mathbf{n} in Gleichung 2.

$$\mathbf{n} = type \cdot flank \cdot \cos(\varphi_{b,i} + hand \cdot c \cdot z + flank \cdot \tan \alpha) \cdot \begin{pmatrix} \sin(\varphi_{b,i} + hand \cdot c \cdot z + flank \cdot \tan \alpha) \\ -\cos(\varphi_{b,i} + hand \cdot c \cdot z + flank \cdot \tan \alpha) \\ \tan(hand \cdot \beta_b) \end{pmatrix} \quad (2)$$

In dieser Gleichung sind weiterhin angegeben:
type Indikator des Zylinderrades (-1/1 Innenverzahnung/ Außenverzahnung)
 β_b Grundschrägungswinkel in rad

3.2 Transformation von kartesischen in evolventische Koordinaten

Die evolventischen Koordinaten $\varphi_{b,i}$, r und z eignen sich bei der Berechnung von Flankenabweichungen im besonderen Maße, da über sie nach [6] der Bezug zu den grundlegenden Zylinderradparametern, Zähnezahl z , Modul m_n , Eingriffswinkel α_o , Teilkreisdurchmesser d und Steigungswinkel β_o , hergestellt werden kann.

Die Umrechnung von kartesischen Koordinaten (Messpunkten) in evolventische Koordinaten erfolgt durch die folgenden Gleichungen 3, 4 bzw. 5.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

Der Radius r ergibt sich nach Gleichung 3 aus den Koordinaten x und y einer beliebigen Stirnschnittebene (z -Ebene).

Die Koordinate $\varphi_{b,i}$ mit der die Lage der Evolventen auf dem Grundkreis beschrieben wird, errechnet sich in Abhängigkeit der y -Koordinate nach den Gleichungen 4 und 5.

Für $y \geq 0$:

$$\varphi_{b,i} = -flank \cdot \frac{r \cdot \sqrt{1 - \frac{r_b^2}{r^2}}}{r_b} + flank \cdot \arccos \frac{r_b}{r} + \arccos \frac{x}{r} - hand \cdot z \cdot c \quad (4)$$

Für $y < 0$:

$$\varphi_{b,i} = -flank \cdot \frac{r \cdot \sqrt{1 - \frac{r_b^2}{r^2}}}{r_b} + flank \cdot \arccos \frac{r_b}{r} - \arccos \frac{x}{r} - hand \cdot z \cdot c \quad (5)$$

Die z -Koordinate des kartesischen Koordinatensystems als auch des evolventischen Koordinatensystems sind gleich und müssen daher nicht umgerechnet werden.

4 Rückführung

Die vollständige Rückführung der Verzahnungsmesstechnik basiert heute auf zwei getrennten Wegen. Der erste Weg führt über die traditionellen geometrischen Normale (Verzahnungsnormale), deren Maße innerhalb der Kalibrierkette vom metrologischen Institut über den Deutschen Kalibrierdienst und seine akkreditierten Laboratorien bis in die Industrie weitergegeben werden [9]. Der zweite Weg geht über numerische Normale (Testdaten), die ausgehend vom metrologischen Institut direkt an die Messgerätehersteller weitergegeben werden und mit denen diese anschließend ihre Auswertesoftware prüfen und verifizieren.

Geometrische und numerische Normale sind notwendige Ergänzungen. Während mit geometrischen Normalen die Mechanik und Elektronik eines Messgerätes überprüft werden, werden numerische Normale eingesetzt, um die komplexen Vorgänge der Auswertelgorithmen auf deren Korrektheit zu testen.

4.1 Geometrische Normale zur Rückführung der Hauptmerkmale

Bei den geometrischen Normalen unterscheidet man seit ca. 5 Jahren zwischen den in Bild 2 dargestellten klassischen Normalen und den in Bild 3 dargestellten produktähnlichen Normalen. Die immer noch weit verbreiteten klassischen Normale untergliedern sich in Profil-, Flankenlinien- und Teilungsnormale. Nur gemeinsam verkörpern diese drei Normale ein möglichst ideales Zylinderrad. Ursprünglich waren diese Normale zum Einrichten von Verzahnungsmessgeräten vorgesehen. Heute werden sie meist zur An- und Abnahme von Verzahnungsmessgeräten eingesetzt. Doch häufig können die hohen Anforderungen der Industrie an die Messunsicherheit der Normale nicht erfüllt werden. Der Grund liegt in der mehrstufigen Rückführungskette vom Metrologischen Institut über die akkreditierten Laboratorien bis in die Industrie, wobei sich die Messunsicherheit von Stufe zu Stufe vergrößert.



Bild 2:
Klassische Verzahnungsnormale (v.l.n.r.): Profil,
Flankenlinie und Teilung

Produktähnliche Normale sind der neue Weg [10]. Sie können mit hoher Genauigkeit kalibriert werden, sind einfach in der Handhabung und gleichen den Produkten. Da die Kalibrierergebnisse bei Bedarf direkt vom Metrologischen Institut an die Industrie weitergegeben werden können, erfüllen sie auch deutlich besser die hohen Genauigkeitsansprüche. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass alle Maße auf einem einzigen Normal verkörpert sind. Gegenüber klassischen Normalen unterscheiden sie sich des Weiteren dadurch, dass sie keine ideale evolventische Flankenfläche aufweisen müssen, sondern Flankenmodifikationen, wie sie bei hochgenauen Getrieben üblich sind, verkörpern können. Die Industrie ist dieser Idee gefolgt und bietet seit einigen Jahren produktähnliche Normale an.



Bild 3:
Produktähnliches
Zylinderradnormal

4.2 Geometrische Normale zur Rückführung weiterer Flankenparameter

In Kenntnis kleiner Flankenstrukturen, wie Rauheit und Welligkeit, können Aussagen z.B. über Zahnfestigkeiten oder über Geräuscentwicklungen getroffen werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Messpunkte funktionsgerecht aufgenommen und mit geeigneten mathematischen Verfahren ausgewertet werden.

Mit dem Ziel, vorhandene Mess- und Auswerteverfahren für Wellenstrukturen zu prüfen, hat die PTB erstmals ein so genanntes Profilwellennormal (IWA: Involute Waviness Artefact) entwickelt [11]. Ein linearer und funktionsgerechter Zusammenhang zwischen den Flanken-

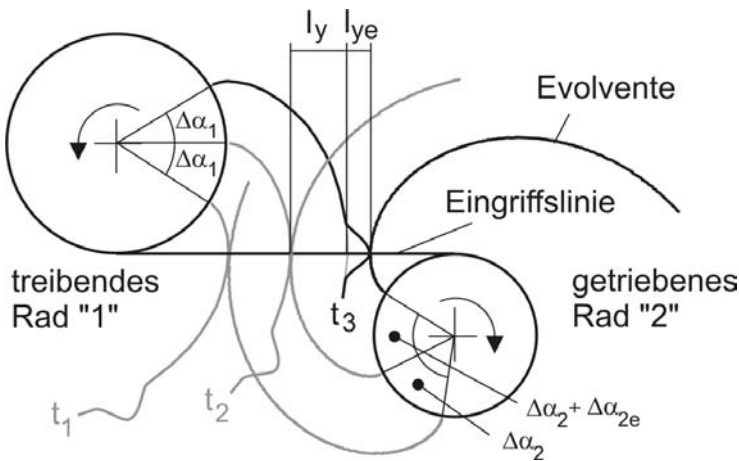


Bild 4:
Kinematik paarender Zylinderräder mit evolventischer Zahnflankenform

formfehlern und den Drehfehlern wird über Betrachtung der Verzahnungskinetik hergeleitet. Er ist in Bild 4 dargestellt. Die beiden im Eingriff befindlichen Zähne vom treibenden Rad (Index 1) und vom getriebenen Rad (Index 2) sind durch ihre Evolventen symbolisiert. Beim Wälzen fehlerfreier Evolventenstücke erkennt man, dass die Winkelbewegungen der beiden Räder $\Delta\alpha_1$ und $\Delta\alpha_2$ über die Wälzwegänderung Δl_y linear zusammenhängen. Ein Fehler Δl_{ye} auf der Flanke des treibenden Zahnrads führt zwangsweise auf eine sich proportional ändernde Winkelbewegung $\Delta\alpha_{2e}$ des getriebenen Rades.

In Anlehnung an das Grundgesetz der Verzahnung [5] lässt sich zur Darstellung periodischer Flankenstrukturen die folgende Gesetzmäßigkeit formulieren:

- @ Eine wellenförmig periodische Struktur auf der Zahnflanke eines Rades
- @ erteilt bei konstanter Winkelgeschwindigkeit einem idealen Gegenrad eine sich ebenfalls
- @ periodisch ändernde Winkelgeschwindigkeit.

4.2.1 Mathematisches Modell des Prüfkörpers

Die periodischen Abweichungen auf der Zahnflanke werden über die Wälzwegänderung l_{ye} in Gleichung 6 beschrieben. Dem fehlerfreien Wälzweg l_y werden darin die harmonischen Anteile überlagert. Unter Berücksichtigung der Eingriffsverhältnisse schrägverzahneter Zylinderräder verschiebt sich die Wellenstruktur dabei entlang der Eingriffslinie. Dies wird über die Abhängigkeit der z-Koordinate beschrieben.

$$l_{ye} = l_y + \sum_{i=1}^n \left(a_i \cdot \cos(\lambda_i \cdot 2\pi \cdot l_y - p_i + \lambda_i \cdot 2\pi \cdot c \cdot z \cdot r_b) \right) \quad (6)$$

Hierin sind:

- l_{ye} fehlerbehafteter Wälzweg in mm
- l_y fehlerfreier Wälzweg in mm
- a_i Amplitude in mm
- λ_i Wellenlänge in mm
- p_i Phasenverschiebung in rad
- c Helixkonstante der Verzahnung in mm^{-1}
- z Z-Position des Profils entlang der Zahnradachse in mm
- r_b Grundkreisradius in mm

Über Gleichung 7 erhält man den Radius r_e für den aktuellen Wälzpunkt.

$$r_e = \sqrt{r_b^2 + l_{ye}^2} \quad (7)$$

Hierdurch lässt sich die wellenbeschreibende Evolventenfunktion Gleichung 8 aufstellen.

$$\text{inv}\alpha_e = \tan^{-1} \frac{r_b}{r} - \arccos \frac{r_b}{r_e} \quad (8)$$

Diese Evolventenfunktion geht in die bereits in Kapitel 3, Gleichung 1 erläuterte Parameterdarstellung zur vollständigen Beschreibung eines Zylinderrades ein:

$$\mathbf{X} = \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} = \begin{matrix} r_e \cdot \cos \left(\dots \right) \\ r_e \cdot \sin \left(\dots \right) \\ z \end{matrix} \quad (9)$$

Die Lage der Evolventen berechnet sich in Kenntnis der Teilung p über Gleichung 10.

$$b_{,i} = - \text{type} \cdot \text{flank} \cdot b_{,1} + (i-1) \cdot \frac{p}{r_0} \quad (10)$$

4.2.2 Realisierung

Seit Anfang 2005 steht ein erstes wellenbehaftetes Zahnrad zur Verfügung. Die Zahnhöhe ist vergleichsweise groß gewählt, um über eine Wälzlänge von ca. 70 mm aussagekräftige Rückschlüsse über die Genauigkeit verschiedener Fertigungsverfahren zu erhalten.

Zähnezahl z	: 8
Normalmodul m_N	: 19 mm
Eingriffswinkel α_0	: 38°
Grundkreisradius r_b	: 59,889 mm
Fußkreisradius r_f	: 60 mm
Teilkreisradius r_o	: 76 mm
Kopfkreisradius r_a	: 92 mm

Auf den Zahnflanken sind drei unterschiedliche Wellen aufgebracht und überlagert (Tabelle 1). In Anlehnung an die Formmesstechnik wurden die Wellenlängen in einer Reihe von 2,5 mm, 8 mm und 25 mm gestuft. Fertigungsbedingt wurden die Amplituden um den Faktor 5 größer gewählt, als sie bei Laufverzahnungen zu erwarten sind. Als fester Bezug für die Wellenauswertung wurde eine Wälzlänge von 100 mm gewählt.

	1	2	3
Wellenlänge λ_i in mm	25	8	2,5
Frequenz f_i in Wellen/100 mm	4,0	12,5	40,0
Amplitude a_i in μm	10	7	5
Phasenverschiebung p_i in rad	$\text{Pi}/2$	$\text{Pi}/2$	$\text{Pi}/2$

Tabelle 1:
Nennwerte der spektralen Anteile der Zahnflanke

In Bild 5 ist ein wellenbehafteter Zahn abgebildet. Deutlich ist hier die evolventische Verzerrung der Wellenstruktur zu erkennen.

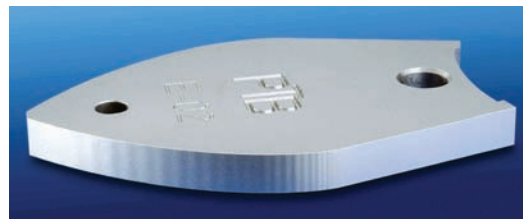


Bild 5:
Zahn eines wellenbehafteten Evolventennormals

4.2.3 Auswertung

Mit dem vorhandenen Profilwellennormal war es möglich, einige der bekannten Auswertelgorithmen zur Erfassung der harmonischen Anteile zu testen. Sie alle beruhten auf der Grundlage von FFT-Algorithmen. Mit keiner dieser Auswertelgorithmen ließen sich jedoch die bekannten Strukturen auf der Profilflanke zuverlässig ermitteln. Aus diesem Grund hat die PTB ein neues Verfahren zur Ermittlung offener Strukturen an Profilflächen entwickelt [12]. Mit diesem Verfahren ist es erstmals möglich, die vorhandenen Wellen zuverlässig zu bestimmen.

4.3 Numerische Normale

Numerische Normale sind Maßverkörperungen in Form von Testdaten. Im Falle der Validierung von Verzahnungsalgorithmen überprüfen sie den Informationsfluss von den aufgenommenen Messpunkten bis hin zur Anzeige der Messwerte. Die Notwendigkeit solcher Überprüfungen haben Vergleichsrechnungen unter Messgeräteherstellern eindrucksvoll bewiesen. Die Abweichungen der Messergebnisse liegen bis um den Faktor 20 höher als die Messunsicherheiten der heute verwendeten geometrischen Normale [13]. Aber das ist nicht der einzige Grund, weshalb numerische Normale unumgänglich sind. Trotz der technischen Möglichkeiten erlaubt die Vielfalt der Flankenmodifikationen nicht deren Rückführung über geometrische Normale. Aus diesem Grund wird die Validierung von Auswertelgorithmen vom Messgerätehersteller bzw. dessen Softwarelieferant durchgeführt. Das

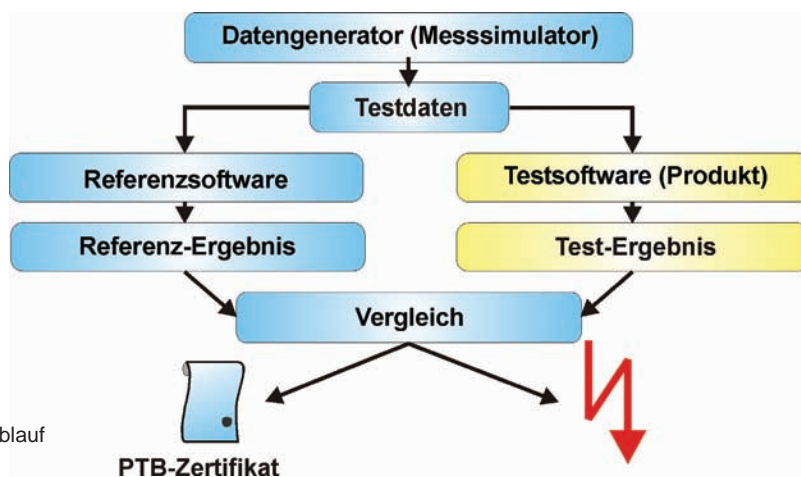


Bild 6:
Softwaretest – prinzipieller Ablauf

prinzipielle Vorgehen ist in Bild 6 dargestellt. Die Basis bilden die Testdaten. Diese sind in der Regel synthetisch erzeugt. Hierdurch lassen sich bei der Generierung der Datensätze auch Wünsche der Industrie berücksichtigen. Die Testdaten werden anschließend von einer Referenzsoftware und von der Software der Messgerätehersteller ausgewertet. Der Test ist bestanden, wenn keines der Messergebnisse um mehr als $0.1 \mu\text{m}$ gegenüber dem Referenzwert abweicht.

Seit 2005 sind insgesamt 7 Auswertemodule durch die PTB zertifiziert worden. Hierin sind alle maßgeblichen europäischen Messgerätehersteller, die Verzahnungsmesstechnik anbieten, enthalten. Die führenden Messgerätehersteller anderer Nationen, wie Japan oder den USA, streben eine Zertifizierung an.

4.4 Normal-Messeinrichtung

Der Einsatz von produktähnlichen Normalen setzt eine universelle und gleichzeitig ausreichend genaue Normal-Messeinrichtung für Verzahnungen voraus. In der PTB wurde eine solche Normal-Messeinrichtung entwickelt [14, 15].



Bild 7:
Komponenten der Normal-Messeinrichtung für die Verzahnung

4.4.1 Aufbau und Prinzip

Die Basis bildet ein kommerzielles Koordinatenmessgerät (KMG). Die erforderliche Genauigkeit erhält das Messgerät durch einen metrologischen Rahmen, bestehend aus einem nachführbaren Laserinterferometer, dem so genannten LaserTRACER (LT) [16], und einem hochgenauen Drehtisch (Bild 7).

Diese Komponenten sind in die Steuerung des Koordinatenmessgerätes integriert. Auf die-

se Weise kann die Erfassung der Koordinaten des Koordinatenmessgerätes, der Längsinformation des LaserTRACERs und der Drehtischposition durch einen Triggerimpuls zum Zeitpunkt der Antastung synchronisiert werden. Mit Unterstützung des KMG-Herstellers wurde eine Schnittstelle geschaffen, die die Daten verfügbar macht.

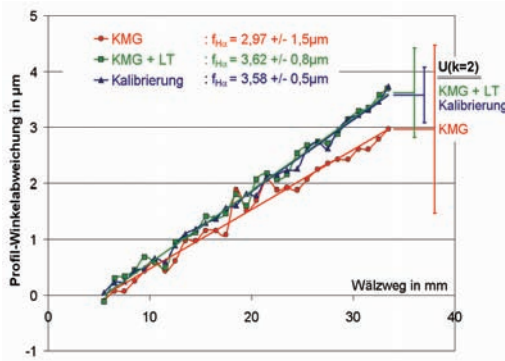
Die Genauigkeitssteigerung des Koordinatenmessgerätes wird erzielt, indem die Messwerte des Koordinatenmessgerätes und die Messwerte des LaserTRACERs für jeden einzelnen Messpunkt miteinander verknüpft werden. Das dabei zugrunde liegende mathematische Modell basiert auf der Bestimmung der optimalen Position des Koordinatenmessgerätes aus einem überbestimmten System von geometrischen Bestimmungsgleichungen [17]. Dieses Verfahren wurde unter Berücksichtigung der mathematischen und messtechnischen Zusammenhänge in der PTB in Messsoftware umgesetzt.

Eine weitere Reduzierung der Messunsicherheit wird durch den Einsatz des hochgenauen Drehtisches erzielt. Er ermöglicht es, evolventische Zahnradnormale nach dem Evolventen-Entstehungsprinzip (Generierungsprinzip) zu messen. Hierbei teilt sich die Messung in eine translatorische und eine rotatorische Bewegung auf. Aufgrund der rotatorischen Zustellbewegung des Zahnradnormals durch den Drehtisch, bewegt sich der Taster des Koordinatenmessgerätes nur in einer Achse. Da der Messstrahl des LaserTRACERs und der Normalenvektor der Evolventenfläche bei dieser Messstrategie stets nahezu in einer Richtung liegen, ist diese Messaufgabe besonders geeignet zur Anwendung des genauigkeitssteigernden Verfahrens mit dem LaserTRACER.

4.4.2 Ergebnisse

In Bild 8 sind die Ergebnisse der Messungen eines Evolventenprofilnormals auf dem Koordinatenmessgerät ohne und mit Anwendung des genauigkeitssteigernden Verfahrens (Kurven „KMG“ und „KMG + LT“) im Vergleich zu den Kalibrierwerten (Kurve „Kalibrierung“) dargestellt. Das Ergebnis unter Anwendung des genauigkeitssteigernden Verfahrens zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Kalibrierwerten. Die ermittelten Profil-Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ differieren lediglich um $0,04 \mu\text{m}$. Dasselbe Koordinatenmessgerät unter gleichen Bedingungen liefert ohne Anwendung des genauigkeitssteigernden Verfahrens im Vergleich zu den Referenzwerten einen um $0,61 \mu\text{m}$ abweichenden Wert für die Profil-Winkelabweichung. Die erzielte Genauigkeitssteigerung des Koordinatenmessgerätes ist deutlich zu erkennen und wird, wie in Bild 8 zu erkennen, auch durch die ermittelten Messunsicherheiten $U(k=2)$ bestätigt.

Bild 8: Messergebnisse einer Evolventenprofilmessung



5 Ermittlung der Messunsicherheit durch Simulation

Ein vollständiges Messergebnis besteht aus einem angezeigten Wert des Messgerätes und der Angabe einer Messunsicherheit. Die Angabe der Messunsicherheit ist dabei ein unverzichtbares Merkmal für die Qualität einer Messung. Ihre Kenntnis führt zur Leistungssteigerung innerhalb der Industrieunternehmen, da technische Prozesse und wirtschaftliche Entscheidungen zuverlässiger getroffen werden können. Dies wird in Bild 9 und Tabelle 2 erläutert. Exemplarisch sind fünf Messergebnisse für die Profil-Gesamtabweichung an Zahnrädern aufgeführt. Jedes Messergebnis ist mit einer Messunsicherheit (Balken) versehen. Die Fertigungstoleranz beträgt $\pm 2,1 \mu\text{m}$ (Meisterrad nach ISO 1328-1). Es sind fünf Messwerte angegeben, die innerhalb oder außerhalb der Toleranz liegen. Normalerweise ist dies das Kriterium, um ein Teil als Gut- oder Ausschussteil zu bestimmen. Ist, wie in diesen Beispielen gezeigt, die Messunsicherheit aber nicht vernachlässigbar klein gegenüber der spezifizierten Toleranz, spielt sie bei der Qualitätsbeurteilung die entscheidende Rolle. So muss ein Teil, dessen Messwert innerhalb der Toleranz liegt, nicht zwangsläufig Gut sein und umge-

kehrt. Erst unter Berücksichtigung der Messunsicherheit ist es möglich, eine Aussage über Gut- und Ausschussteil zu treffen und wirtschaftlich gezielte Konsequenzen abzuleiten.

Um die Bereitstellung eines effizienten Hilfsmittels für die realistische und schnelle Ermittlung der Messunsicherheit einer Verzahnungsmessung geht es in einem drittmittelgeförderten Projekt. Das neue Verfahren wird in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung für Antriebstechnik und ihren einflussreichen Industriepartnern realisiert. Es basiert auf der Methode des Virtuellen Koordinatenmessgerätes (VCMM) [17]. Grundlage ist die Nachbildung des Messprozesses durch statistische Simulation. Das Modell des Messprozesses und die auf den Messprozess einwirkenden Einflussgrößen sind wie bei einem klassischen Unsicherheitsbudget die Basis für die Ermittlung der Messunsicherheit. Das Verfahren erfüllt somit die Anforderungen internationaler Direktiven, Richtlinien und Normen. Die Simulation entspricht einem realen Experiment, in dem an einem Werkstück eine große Anzahl von Messungen unter allen wahrscheinlichen Messbedingungen durchgeführt wird.

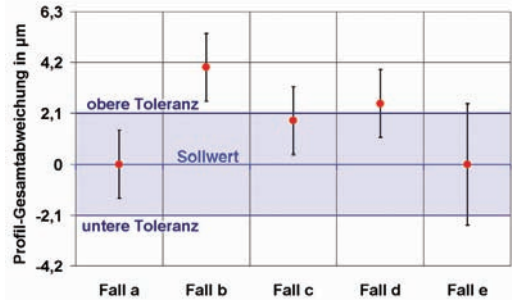


Bild 9: Messergebnisse von Zahnprofilmessungen ($d_0=100\text{mm}$, $m_n=2$, $b=80\text{mm}$, Qualität 2) mit Toleranz nach ISO 1328-1

Tabelle 2: Interpretation der Messergebnisse aus Bild 9 in Kenntnis der Messunsicherheit

	Beschreibung	mögliche Maßnahmen
Fall a	Messergebnis innerhalb der Toleranz, eindeutig Gutteil	Auslieferung, Verkauf
Fall b	Messergebnis außerhalb Toleranz, eindeutig Ausschuss	Korrektur, Nachstellung der Fertigungsmaschinen um systematische Abweichung
Fall c	Messwert innerhalb Toleranz, vermeintlich Gutteil (mit ca. 40% Wahrscheinlichkeit), jedoch Ausschuss	Verringerung der Messunsicherheit (z.B. Verbesserung der Messbedingungen)
Fall d	Messwert außerhalb Toleranz, vermeintlich Ausschuss (mit ca. 40% Wahrscheinlichkeit), jedoch Gutteil	Verringerung der Messunsicherheit (z.B. Verbesserung der Messbedingungen)
Fall e	Messwert innerhalb der Toleranz, vermeintlich Gutteil, Messbedingungen vollkommen unzureichend (Messunsicherheit größer als Toleranz)	1) drastische Reduzierung der Messunsicherheit 2) Produktion schlechterer Qualitäten

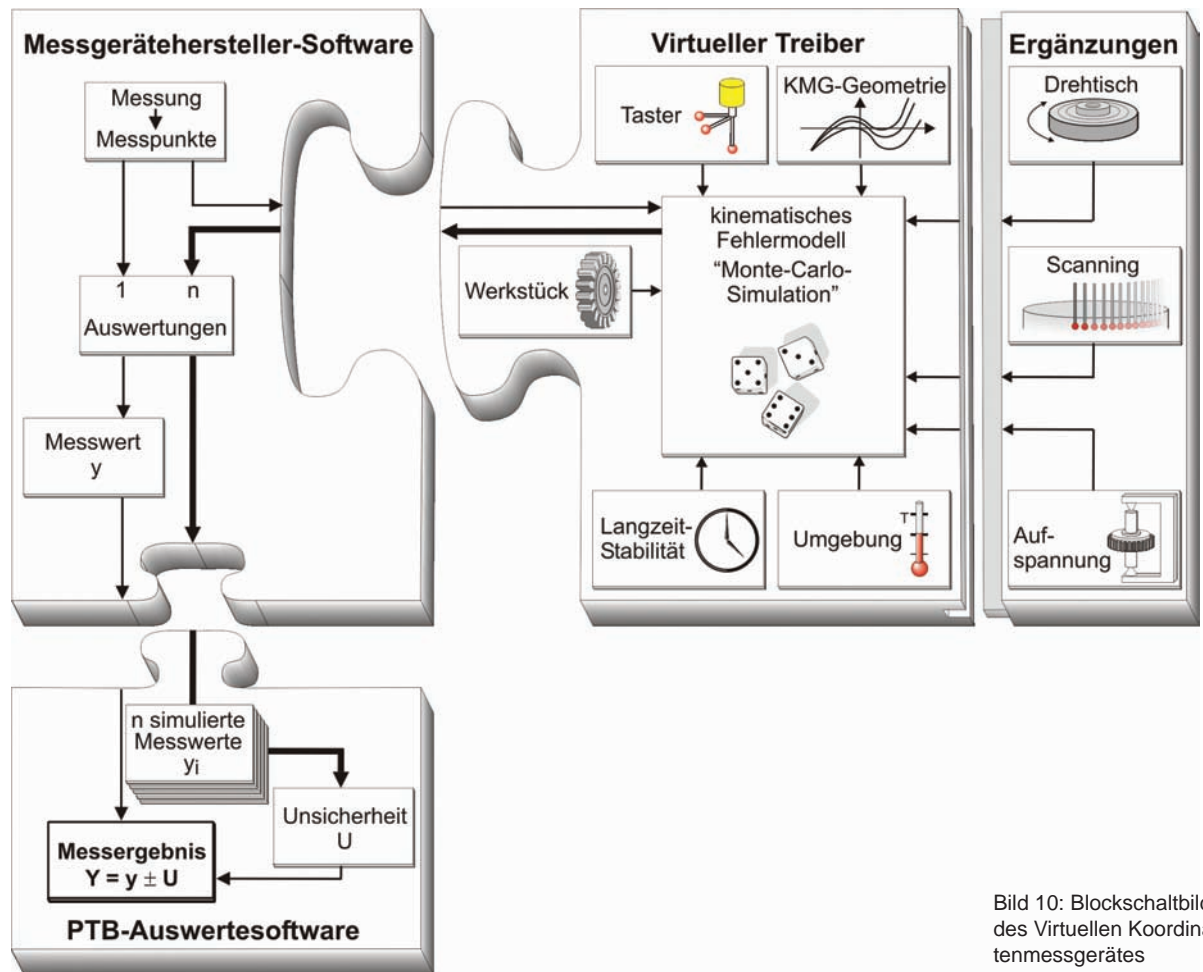


Bild 10: Blockschaltbild des Virtuellen Koordinatenmessgerätes

In Bild 10 ist ein Blockschaltbild des Virtuellen Koordinatenmessgerätes dargestellt. Das System besteht aus drei voneinander unabhängigen Modulen: der Messgeräteherstellere Software, dem Virtuellen Treiber und der PTB-Auswertesoftware. Das zentrale Modul für die Simulation ist der Virtuelle Treiber. Er kommuniziert über eine Schnittstelle mit der Messgeräteherstellere Software. Über diese werden die Koordinaten jedes Messpunktes an den Virtuellen Treiber übergeben. Diese Messpunkte werden mittels Monte-Carlo-Simulation mehrfach verrauscht. Grundlage hierfür ist ein kinematisches Fehlermodell, in dem das Tasterverhalten, die Geometriefehler, die Langzeit-Stabilität, die Umgebungsbedingungen und die Werkstückeigenschaften bereits heute berücksichtigt sind. Das Modul der Messgeräteherstellere Software ist für die Aufnahme der Messpunkte und für die Berechnung der Messgrößen zuständig. Die PTB-Auswertesoftware erhält sowohl den angezeigten als auch die n simulierten Messwerte und berechnet hieraus das vollständige Messergebnis. Innerhalb des Forschungsvorhabens werden die Einflüsse zur dynamischen Messpunktaufnahme, der Werkstückaufspannung und des Drehtisches modelliert. Sie stehen dann auch der allgemeinen Koordinatenmesstechnik zur Verfügung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die PTB hat in den vergangenen Jahren die Forderungen der Industrie aufgegriffen und ein Konzept realisiert, mit dem die Rückführbarkeit von Verzahnungsmessungen mit einer geringen Messunsicherheit bis hin zum Produkt möglich ist. Als Ergebnis dieser Anstrengungen kann heute eine hochgenaue Normalmesseinrichtung eingesetzt werden, die es ermöglicht, die klassischen Verzahnungsnormale künftig durch produktähnliche Normale zu ersetzen. Darüber hinaus werden in Zukunft weltweit alle führenden Messgerätehersteller, die Verzahnungsmessungen anbieten, ihre Auswertelgorithmen über die Testdaten der PTB validiert haben. In enger Kooperation mit der Industrie wird es dann das Ziel sein, die grundlegend neuen Erkenntnisse in nationale und internationale Normen und Richtlinien einfließen zu lassen.

Neben den beschriebenen Aktivitäten wird in Kürze das erste Mikroverzahnungsnormale und die zugehörigen Kalibrier- und Auswerteverfahren realisiert sein und voraussichtlich einen Standard setzen, mit dem Verzahnungsmessungen bis zu einem Durchmesser von $500\ \mu\text{m}$ oder auch kleiner zuverlässig rückgeführt werden können. Parallel dazu laufen erste viel versprechende Untersuchungen mit neuen Messverfahren, wie

beispielsweise der Computertomographie, die Aufschluss darüber geben, inwieweit sich diese Verfahren für Verzahnungsmessungen eignen. Wirtschaftlich von größerer Bedeutung ist die Rückführung großer Zahnräder. Sie ist nicht nur durch den rapide wachsenden Markt der Windkraftanlagen begründet, sondern schon lange ein Wunsch der Industrie, z.B. bei der Herstellung von Schiffsgetriebenen. Derzeit laufen Anstrengungen, um hier einen der nächsten Schwerpunkte zu setzen.

Literatur

- [1] Leupold, J.: „Theatrum machinarum“ in 10 Bänden. Faksimile-reprint of the original edition 1724–1739. Edition libri rari, T. Schäfer, Hannover 1982
- [2] Härtig, F., Schwenke, H., Weiskirch, C.: Messung von Mikroverzahnungen. VDI-Berichte 1673, VDI-Verlag Düsseldorf, 2002, ISBN: 3-18-091673-7, S. 247–257
- [3] Goch, G.: Gear Metrology. Annals of the CIRP Vol. 52/2/2003, pp. 659–695
- [4] Härtig, F., Wäldele, F.: Verzahnungsmessung auf KMG. VDI-Berichte 1618, VDI-Verlag Düsseldorf, 2001, S. 169–180
- [5] Zierpke, K.: Zahnräder. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1989
- [6] DIN 3960: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder und Stirnradpaare mit Evolventenverzahnung. Beuth Verlag Berlin, 1987
- [7] Lotze, W.: Zahnradmessungen mit Koordinatenmessgeräten. 3. Auflage, Eigenverlag Dresden, ISBN 3-00-015962-2, 2005
- [8] Günther, A., Peters, J., Goch, G.: Flächenhafte numerische Beschreibung, Ausrichtung und Auswertung von Zylinderrädern. tm-Technisches Messen, 2001
- [9] Beyer, W.: Traceable Calibration of Master Gears at PTB. Technical Paper, American Gear Manufacturers Association (AGMA), 96FTM4, 1996, ISBN 1-5589-671-5
- [10] Härtig, F., Wäldele, F.: Traceability of Gearings – New ideas, recent developments. AGMA Fall Technical Meeting, Detroit, Michigan (USA), 2001
- [11] Härtig, F., Jusko, O., Richter, O., Wäldele, F.: Evolventischer Prüfkörper mit überlagerten periodischen Strukturen (Wellen) zur Beurteilung von Messgeräten und Werkzeugmaschinen. Aktenzeichen Patentamt 10 2005 018 582.7, Anmeldung 04/2005
- [12] Härtig, F., Krystek, M.: Verfahren zur Genauigkeitssteigerung an Formmessungen. VDI-Berichte 1945, VDI-Verlag GmbH, 2006, S. 83–91
- [13] Härtig, F., Keck, C., Kniel, K., Schwenke, H., Wäldele, F., Wendt, K.: Development of a Novel Gear Measuring Device of High Accuracy. Proceedings of ASME/AGMA Conference, Chicago / USA, 2003, [CD-ROM]
- [14] Härtig, F., Kniel, K., Wäldele, F.: High Accurate Gear Measuring Machine. Proceedings of the 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production, Erlangen/Deutschland, 2004, pp. 409–415
- [15] Härtig, F., Keck, C., Kniel, K., Schwenke, H., Wäldele, F., Wendt, K.: A Novel Concept for High Accurate Gear Calibration. Gear Technology, May/June 2005, pp. 16–20
- [16] Kniel, K., Schwenke, H.: Genauigkeitssteigerung und Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten mit dem LaserTRACER. PTB Mitteilungen 117, S. 24–29 (in diesem Heft)
- [17] Trapet, E., Wäldele, F.: The Virtual CMM Concept. Advanced Mathematical Tools in Metrology, World Scientific Publ. Comp., 1996, pp. 238–247

Prüfprozesseignung von Inline-Messtechnik im Karosseriebau

Klaus Wendt¹, Christian Keck², Heinrich Schwenke³

1 Einleitung

Bei der Fertigung von Karosseriebauteilen werden seit etwa zehn Jahren Inline-Messstationen zur Überwachung des Produktionsprozesses eingesetzt. Inline-Messstationen sind direkt in die Produktionslinie integriert (Bild 1).

Zu Beginn der Messung wird das zu prüfende Bauteil in die Station eingefahren. Sensoren, die entweder fest in Gestellen oder beweglich an einem Roboterarm montiert sind, messen die Prüfmerkmale. Am Schluss wird das Bauteil zur nächsten Fertigungsstation weitergeleitet.

In einem Produktionstakt können mehrere Dutzend Merkmale an einem Bauteil gemessen werden. Die Messzeiten sind so kurz, dass eine 100%-Prüfung an allen gefertigten Bauteilen möglich wird. Die statistische Auswertung der Messungen gibt einen guten Einblick in den Fertigungsprozess und erlaubt so kurze Regelkreise. Eine statistische Prozessregelung setzt allerdings

zuverlässige und aussagekräftige Messungen voraus. Die Betreiber von Inline-Messstationen versuchten bisher, die Zuverlässigkeit und die Aussagekraft von Messungen durch so genannte statische und dynamische Tests zu überprüfen. Sie stießen dabei jedoch auf Grenzen, weil bei den Tests die Wiederholbarkeit im Vordergrund steht und auf die Rückführbarkeit bzw. Richtigkeit der Messungen nur unzureichend Wert gelegt wurde.

Um hinsichtlich der Eignung solcher Systeme als Prüfmittel zu belastbaren Aussagen zu gelangen, sind von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Zusammenarbeit mit Herstellern und Anwendern von Inline-Messstationen sowie der RWTH Aachen neue Verfahren entwickelt worden, die auf der Ermittlung der Prüfprozesseignung basieren. Der Beitrag gibt einen Überblick über das entwickelte Verfahren.

- 1 Dr. Klaus Wendt
Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Koordinatenmessgeräte“
E-Mail: klaus.wendt@ptb.de
- 2 Dipl.-Ing. Christian Keck
Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts für Holzforschung
E-Mail: christian.keck@wki.fraunhofer.de
- 3 Dr. Heinrich Schwenke
Vorstand etalon AG, Braunschweig
E-Mail: heinrich.schwenke@etalon-ag.de

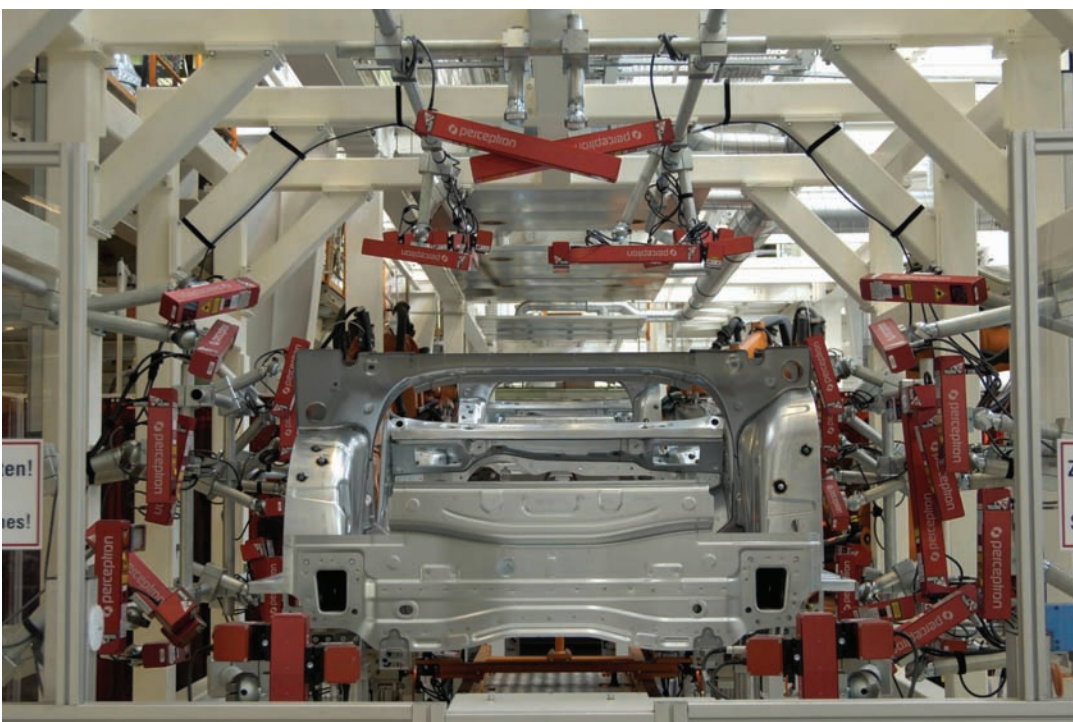


Bild 1:
Inline-Messstation
(Quelle: Perceptron)

2 Prüfprozesseignung

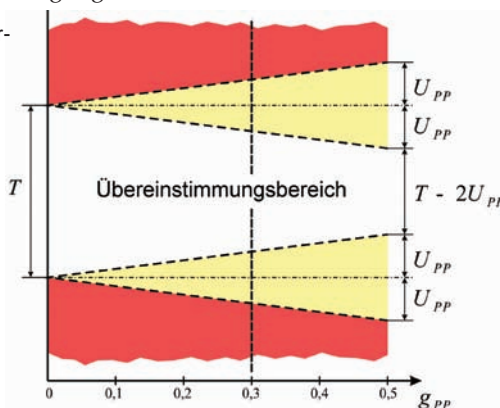
Für die Annahme eines Messmittels zur Produktauditorierung ist der Nachweis der Prüfprozesseignung zu erbringen. Durch die Prüfprozesseignung wird bestätigt, dass ein Messsystem geeignet ist, die Übereinstimmung eines Bauteils mit der Spezifikation (der Soll-Geometrie) zu prüfen. In der von dem Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA) herausgegebenen Richtlinie VDA 5 ist die Prüfprozesseignung als alleiniges Gütekriterium definiert, um für die tatsächlichen Einsatz- und Umgebungsbedingungen festzustellen, ob ein Messsystem für die Prüfung eines Merkmals geeignet ist. Für Inline-Messsysteme bedeutet dies, dass die Eignung unter dem Einfluss der rauen Fertigungsumgebung zu untersuchen ist. Die Eignung des Messsystem ist dabei allein unter Berücksichtigung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit zu ermitteln. Die Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit ist daher für den Nachweis der Prüfprozesseignung von zentraler Bedeutung.

Die internationale Norm ISO 14253-1 [6] legt allgemeine Regeln zur Prüfung von geometrischen Merkmalen entsprechend der geometrischen Produktspezifikation (GPS) fest. In Anlehnung daran ist in der VDA 5 die Prüfprozesseignung definiert. Danach ist ein Messprozess für die Prüfung eines geometrischen Merkmals geeignet, wenn der Eignungskennwert g_{PP} einen vorgegebenen Eignungsgrenzwert G_{PP} einhält:

$$g_{PP} = \frac{2 \cdot U_{PP}}{T} \geq G_{PP}$$

Der Eignungskennwert wird aus dem Verhältnis zwischen der erweiterten Messunsicherheit U_{PP} des Prüfprozesses und der für das zu prüfende Merkmal vorgegebenen Toleranz T gebildet. Er zeigt an, welcher Anteil der Toleranz durch den Prüfprozess verbraucht wird bzw. wie weit der Prüfprozess die für den Fertigungsprozess nutzbare Toleranz einschränkt (Bild 2). Übliche Grenzwerte G_{PP} liegen zwischen 0,2 und 0,4, so dass für den Fertigungsprozess zwischen 60% und 80% der spezifizierten Toleranz zur Verfügung stehen.

Bild 2: Einschränkung des Übereinstimmungsbereichs durch die Unsicherheit des Prüfprozesses



3 Unsicherheitseinflüsse auf Inline-Prüfprozesse

Zum Nachweis der Prüfprozesseignung ist die zuverlässige Bestimmung der Unsicherheit U_{PP} des Prüfprozesses von zentraler Bedeutung. Sie muss für jedes einzelne Prüfmerkmal ermittelt werden, wobei alle Einflüsse auf das Messergebnis zu erfassen sind. Neben Messabweichungen, verursacht durch das Messgerät, gehören dazu auch Einflüsse des Bauteils, der Fertigungsumgebung, der Aufspannung und Lagerung (Bild 3).

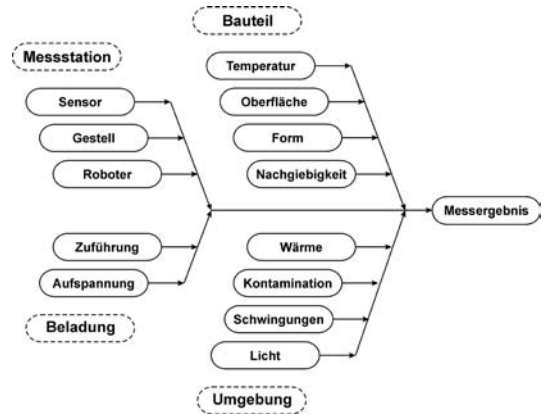


Bild 3: Wichtige Einflüsse auf den Inline-Prüfprozess

Als Sensoren werden in Inline-Messstationen verschiedene optische Sensoren wie Lichtschnitt- und Triangulationssensoren sowie Kameras mit Graubildverarbeitung, aber auch taktile Sensoren wie induktive Wegaufnehmer eingesetzt. Die Sensoren erfassen die Prüfmerkmale in sehr unterschiedlicher Weise und mit verschiedenen Punktdichten. Messergebnisse optischer Sensoren werden sehr stark vom Zustand der Bauteiloberfläche (z.B. Rauheit, Textur, Farbe, Kanten) sowie der Orientierung der Sensoren zu Oberfläche beeinflusst. Die Sensoren müssen gut auf das Bauteil ausgerichtet werden, so dass Fehler in der Justierung die Messung nicht beeinträchtigen. All diese Einflüsse müssen anteilig bei der Bestimmung der Unsicherheit berücksichtigt werden.

Ein wichtiger Einfluss des Bauteils ist seine Temperatur und die damit verbundene thermische Ausdehnung. Bei produktionsnah eingesetzten Messsystemen muss mit starken Schwankungen der Temperatur gerechnet werden. Ein Bauteil kann beispielsweise unmittelbar aus der vorgehenden Fertigungsstation kommen und noch sehr warm sein; es kann aber auch aus einem Pufferspeicher kommen und fast Raumtemperatur angenommen haben.

Des Weiteren sind Bauteile im Karosseriebau oft flexibel und erreichen ihre endgültige Stabilität erst gegen Ende der Fertigung. Bei Messungen müssen sie in besonderen Aufnahmen gespannt werden. Die Wechselwirkungen

zwischen dem Bauteil und der Aufnahme können das Messergebnis beeinflussen und müssen berücksichtigt werden.

Letztlich findet die Karosseriefertigung in einer rauen industriellen Umgebung statt. Von den Fertigungsstationen gehen schwere Erschütterungen und starker Lärm aus. Sie können starkes Störlicht oder große Mengen Wärme abgeben. Die Umgebung kann Stäube und Dämpfe enthalten, was auch zur Unsicherheit der Messungen beitragen kann.

4 Ermittlung der Prüfprozesseignung

Um die Eignung eines Prüfprozesses zu ermitteln, muss die erweiterte Messunsicherheit U_{pp} bestimmt werden, und zwar unter Berücksichtigung aller Einflüsse, die auf den Prüfprozess einwirken. Dazu kann ein detailliertes Unsicherheitsbudget aufgestellt werden, das nach GUM ausgewertet wird, oder es werden Monte Carlo-Simulationen durchgeführt. Voraussetzung dafür ist, dass alle Einflüsse explizit bekannt sind und mathematisch durch ein Modell beschrieben werden können. Dies ist bei Inline-Prüfprozessen wegen der Vielzahl der möglichen Einflüsse derzeit nicht mit vertretbarem Aufwand umzusetzen.

Alternativ wird daher die Unsicherheit bei Inline-Prüfprozessen durch Messungen an kalibrierten Bauteilen [7] ermittelt. Dieses Verfahren berücksichtigt implizit alle Einflüsse, die im Versuch auf den Inline-Messprozess einwirken. Lediglich Einflüsse, die durch diese Messungen nicht ausreichend erfasst werden, müssen durch zusätzliche Unsicherheitsbeiträge berücksichtigt werden.

Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist, dass es im praktischen Einsatz gleichermaßen für alle Arten von optischen und taktilen Sensoren angewandt werden kann. Ob die Sensoren starr an einem Gestell oder beweglich an einem Roboter montiert sind, ist für die Anwendung des Verfahrens gleichfalls nicht von Bedeutung.

Bei dem vorgeschlagenen Verfahren werden vorzugsweise Serienbauteile stichprobenartig dem Fertigungsprozess entnommen. Serienbauteile spiegeln am besten die Schwankungen des Fertigungsprozesses wieder. Die Bauteile werden nach der Prüfung in der Inline-Messstation aus der Produktion entnommen und anschließend auf einem Koordinatenmessgerät kalibriert. Die Kalibrierwerte werden mit den zuvor von der Inline-Station ermittelten Messwerten verglichen. Die Produktion muss dazu

Anzeige

1/2 Seite Aukom

nicht angehalten oder unterbrochen werden. Die Bauteile können nach der Kalibrierung wieder in den Fertigungsprozess eingeschleust und verbaut werden.

Für die Ermittlung der Prüfprozesseignung wird die Stichprobe der kalibrierten Serienbauteile statistisch ausgewertet. Ermittelt werden sowohl die systematische Abweichung als auch die Streuung des Prüfprozesses. Verfahrensbedingt sind darin fast alle Unsicherheitseinflüsse des Prüfprozesses enthalten, so dass für die merkmalsbezogene Berechnung der Unsicherheit U_{pp} des Prüfprozesses nur ein einfaches Modell benötigt wird.

$$U_{pp} = k \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2 + b^2}$$

Die Unsicherheit u_C für das geometrische Merkmal wird bei der Kalibrierung des Bauteils ermittelt, das als Prüfkörper eingesetzt wird. Die Unsicherheit u_p ergibt sich im Wesentlichen aus der Streuung der Messwerte, während die systematische Messabweichung b aus der Differenz zwischen den am Bauteil gemessenen Werten und den Kalibrierwerten bestimmt wird. Die Unsicherheiten u_1, u_2, \dots, u_n beschreiben zusätzliche Unsicherheitsbeiträge, die in den Versuchen nicht berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise orientiert sich an der ISO/TS 15530-3. Die Berücksichtigung der systematischen Abweichung in dieser Norm erfolgt allerdings additiv, was im Gegensatz zur oben angegebenen Formel und der im GUM festgelegten, an der PTB verbindlichen Weise zur Bestimmung der Messunsicherheit steht (siehe dazu auch [13]). Als praktisch wichtiges Beispiel sei hier die unvollständige Erfassung der thermisch bedingten Bauteilausdehnung infolge ungenügend bekannter Bauteiltemperaturen aufgeführt. Bild 4 verdeutlicht noch einmal das Verfahren zur Ermittlung der Prüfprozesseignung bei

laufender Produktion mit Serienbauteilen. Leicht modifiziert kann das Verfahren auch in der Anlauf- und Vorserienphase angewendet werden.

5 Kalibrierung von Karosseriebauteilen

Eine wichtige Teilaufgabe bei der Ermittlung der Prüfprozesseignung bzw. der Bestimmung der Messunsicherheit ist die Kalibrierung der dafür benötigten Karosseriebauteile auf produktionsnah aufgestellten Koordinatenmessgeräten.

Die Kalibrierung ist eine messtechnische Herausforderung, da Karosserieteile komplexe Bauteile sind, die wegen ihrer geringen Steifigkeit zusammen mit einer Aufnahme kalibriert werden müssen. Die Vielzahl der Einflüsse macht es mit vertretbarem Aufwand unmöglich, separat für jedes Prüfmerkmal ein eigenes Unsicherheitsbudget aufzustellen.

Andererseits ist das Spektrum unterschiedlicher Messaufgaben in der Karosseriemesstechnik sehr beschränkt, wenn man von der Form der zu prüfenden Elemente absieht. Überwiegend geprüft werden die Position oder der Abstand geometrischer Elemente. Vor diesem Hintergrund ist ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Unsicherheit der einzelnen Prüfmerkmale entwickelt worden. Entscheidender Grundgedanke ist, dass sich die Messunsicherheit eines Merkmals im Wesentlichen aus zwei unabhängigen Anteilen zusammensetzt:

- einem globalen Unsicherheitsanteil u_C , der von der Position des jeweiligen Merkmals auf dem Bauteil abhängt und für alle Merkmale auf einem Bauteil in gleicher Weise numerisch abgeschätzt werden kann, und
- einem lokalen Unsicherheitsanteil u_L , der von der Gestalt des jeweiligen Merkmals, der Erfassung durch das Koordinatenmessgerät und der Auswertung abhängt und durch Vergleichsmessungen ermittelt wird.

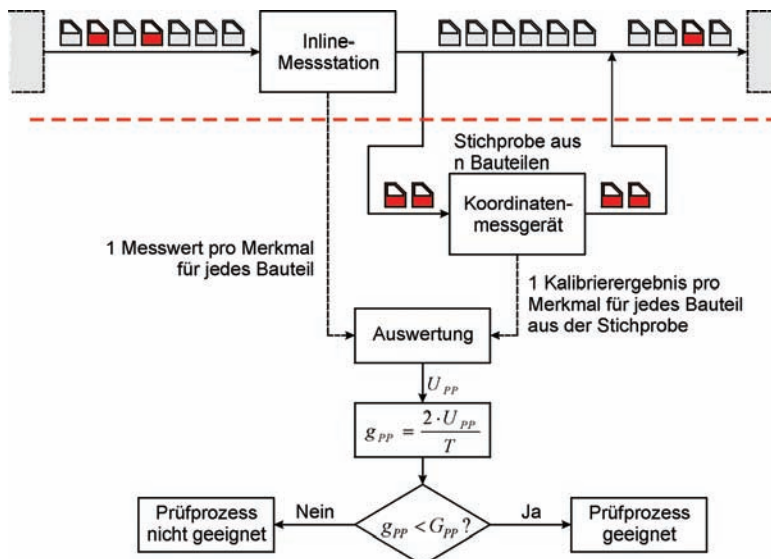


Bild 4: Prüfung der Prüfprozesseignung einer Inline-Messtation mit kalibrierten Serienbauteilen

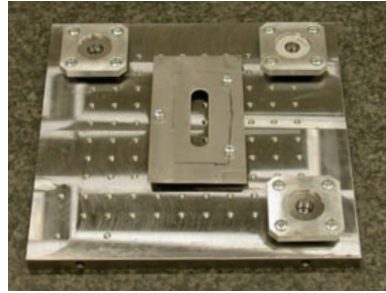


Bild 5:
Langloch an einem
Karosseriebauteil und
Prüfkörper für die experi-
mentelle Ermittlung des
lokalen Unsicherheits-
anteils

Die Gesamtunsicherheit ergibt sich dann aus:

$$u = \sqrt{u_G^2 + u_L^2}$$

Der besondere Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die aufwendige und komplexe Aufgabe, eine Messunsicherheit für ein Merkmal zu bestimmen, in zwei einfach zu bearbeitende Teilaufgaben aufgespalten wird.

Um den globalen Unsicherheitsanteil u_G rechnerisch zu ermitteln, sind Annahmen über die Unsicherheit der Längenmessung und der Bauteillage erforderlich. Messabweichungen des Koordinatenmessgerätes lassen sich in einfacher Weise mit Hilfe der maximal zulässigen Längenmessabweichung MPE_E (ISO 10360-2 [4]) berücksichtigen. Einflüsse der thermischen Aus-

dehnung des Bauteils werden über Temperatur und Ausdehnungskoeffizienten erfasst. Dabei muss bedacht werden, dass produktionsnah eingesetzte Koordinatenmessgeräte oft unter Bedingungen betrieben werden müssen, die nicht ihrer Spezifikation entsprechen. Ist dies der Fall, muss ggf. die Längenmessabweichung neu ermittelt werden. Um den Anwender bei der Berechnung der globalen Unsicherheit zu unterstützen, wurde ein entsprechendes Auswertetool bereitgestellt, das die notwendigen Berechnungen vornimmt.

Die lokale Unsicherheit u_L wird in Anlehnung an ISO 15530-3 [7] durch Messungen an einem kalibrierten Prüfkörper bestimmt. Das hat den Vorteil, dass die Abweichungen des geometrischen Elements von seiner idealen

Anzeige

1/2 Seite pco

geometrischen Gestalt, die Erfassung und die Auswertung kumulativ berücksichtigt werden und nicht einzeln quantifiziert werden müssen. Bei der Auswahl geeigneter Prüfkörper ist zu beachten, dass die geometrischen Elemente auf den Prüfkörpern eine hohe Ähnlichkeit mit den Merkmalen des später zu prüfenden Bauteils haben. Dies lässt sich gewährleisten, indem einzelne Elemente aus realen Karosseriebauteilen ausgeschnitten und auf einem stabilen Träger montiert werden (Bild 5). Man erhält so einen einfach zu handhabenden, kompakten Prüfkörper. Zusätzlich angebrachte, präzise antastbare Bezugselemente ermöglichen es, die Lage des Merkmals mit hoher Reproduzierbarkeit zu

messen. Wichtig ist, dass die Merkmale auf den Prüfkörpern entsprechend der Spezifikation kalibriert werden.

6 Funktionsorientierte Prüfung von Merkmalen

Unzulängliche Spezifikationen für Prüfmerkmale können zu erheblichen Unsicherheitsbeiträgen führen. Ausgehend von der gewünschten Funktion sollten daher Karosseriebauteile entsprechend der geometrischen Produktspezifikation (GPS) [5] spezifiziert werden. Die Prüfung eines Merkmals bezieht sich stets auf die gewünschte Funktion des Bauteils, aus der die geometrische Spezifikation (Soll-Geometrie) abgeleitet wird.

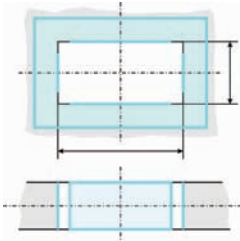
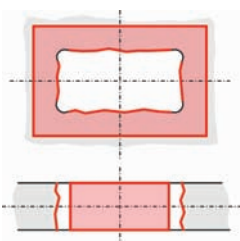
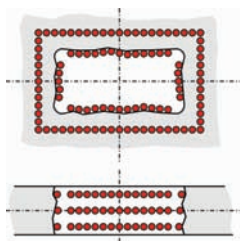
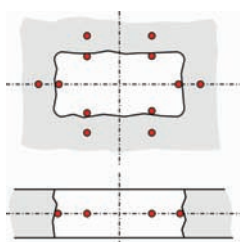
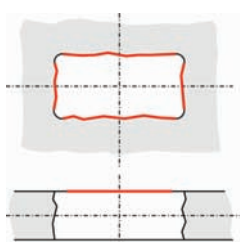
<p>Das Beispiel zeigt schematisch für ein Rechteckloch eine mögliche Spezifikation. In diesem Beispiel sind die Eckbereiche des Lochs für die Funktion nicht relevant, die daher bei der Prüfung ausgespart werden. Die Lochachse ist über die Flächennormale in der Umgebung des Lochs definiert, weshalb rund um das Loch ein äquidistanter Bereich zusätzlich als Funktionsfläche ausgewiesen ist.</p>	
<p>Die ideale Messung bezieht sich unmittelbar auf die Spezifikation. Sie erfasst das reale Rechteckloch vollständig. Dazu sind quasi unendlich viele Punkte im Inneren des Lochs und auf dem spezifizierten Rand zu messen, mit Ausnahme der Eckbereiche.</p>	
<p>Bei der Kalibrierung von Prüfkörpern ist eine ideale Messung anzustreben. Wie im Bild angedeutet, sind dazu möglichst viele Messpunkte (z. B. 500 Punkte) aufzunehmen. Ändert sich das Messergebnis durch Hinzunahme zusätzlicher Messpunkte nicht mehr signifikant, kann das Ergebnis einer idealen Messung gleichgesetzt werden.</p>	
<p>Eine taktile Messung erfasst i. A. nur einzelne Punkte. Abweichungen gegenüber der idealen Messung ergeben sich insbesondere dadurch, dass nur wenige Punkte gemessen werden und das Merkmal somit nur unvollständig erfasst wird. Die unzulängliche Messstrategie muss als zusätzlicher Unsicherheitsfaktor berücksichtigt werden.</p>	
<p>Bei einer flächenhaft optischen Messung werden Punkte i. A. in sehr hoher Dichte erfasst. Häufig wird jedoch nur die Lochkante ausgewertet, während das Innere und die Umgebung des Lochs nicht berücksichtigt werden. Die Erfassung des Merkmals ist somit unvollständig. Messabweichungen gegenüber der idealen Messung sind dem Messverfahren anzulasten und müssen als zusätzlicher Unsicherheitsbetrag berücksichtigt werden.</p>	

Bild 6: Spezifikation von Merkmalen und ideale Erfassungsstrategie im Vergleich mit verschiedenen praktischen Erfassungsstrategien

Die geometrische Spezifikation kann jedoch bei der Fertigung nur unzulänglich umgesetzt werden, wie das Beispiel eines Rechtecklochs in Bild 6 zeigt. Dadurch ergeben sich zusätzliche Beiträge zur Messunsicherheit [9][10].

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Untersuchung der Prüfprozesseignung von Inline-Messstationen im Karosseriebau nach der Richtlinie VDA 5 der deutschen Automobilhersteller. Dort wird als Kriterium für die Eignung eines Messprozesses für die Prüfung von Merkmalen das Verhältnis $g_{pp} = 2U_{pp}/T$ der erweiterten Messunsicherheit U_{pp} zur spezifizierten Toleranz T herangezogen. Um die vielen unterschiedlichen Einflüsse zu erfassen und berücksichtigen zu können, wird die Messunsicherheit mit Bauteilen bestimmt, die als Stichprobe laufend aus dem Fertigungsprozess entnommen und anschließend auf Koordinatenmessgeräten kalibriert werden. Speziell für die Kalibrierung von Karosseriebauteilen auf Koordinatenmessgeräten wird ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit vorgestellt. Dabei werden die lokalen Einflüsse, die bei Antastung und Erfassung der geometrischen Elemente entstehen, experimentell ermittelt, während Einflüsse, die von der Position abhängen, mit Hilfe der Längenmessabweichung rechnerisch abgeschätzt werden.

Das vorgestellte Verfahren zur Untersuchung der Prüfprozesseignung basiert im Wesentlichen auf der Messung realer Bauteile. Unsicherheitseinflüsse lassen sich so auf einfache Weise kumulativ erfassen. Verfahren zur numerischen Berechnung der Unsicherheit zum Beispiel mit Hilfe der Monte Carlo Simulation setzen demgegenüber detaillierte mathematische Modelle voraus, die derzeit nicht existieren. Dafür sind weitere Untersuchungen notwendig, um die teilweise komplexen Wechselwirkungen der verschiedenen Einflussparameter zu verstehen. Für die gezielte Fragestellung müssen die einzelnen Einflüsse getrennt voneinander untersucht werden können. Dafür sind Untersuchungen erforderlich, bei denen die Messgeräte gezielt mit einzelnen Störungen beaufschlagt werden können und das Abweichungsverhalten studiert werden kann. Zu diesem Zweck plant die Physikalisch-Technische Bundesanstalt ein Referenzlabor (Bild 6), in dem Umgebungsbedingungen erzeugt werden können, wie sie auch in realen Fertigungslinien anzutreffen sind. In dem Labor sollen zeitliche Schwankungen und räumliche Gradienten der Temperatur, Schwingungen des Bodens in drei Achsen und Einwirkungen durch Luftschall simuliert werden können. Die Innenmaße sollen etwa 8 m x 5 m x 4 m betragen, die

maximale Zuladung ist 15 t. Damit kann die Kammer auch mit großen und schweren Messeinrichtungen beschickt werden.

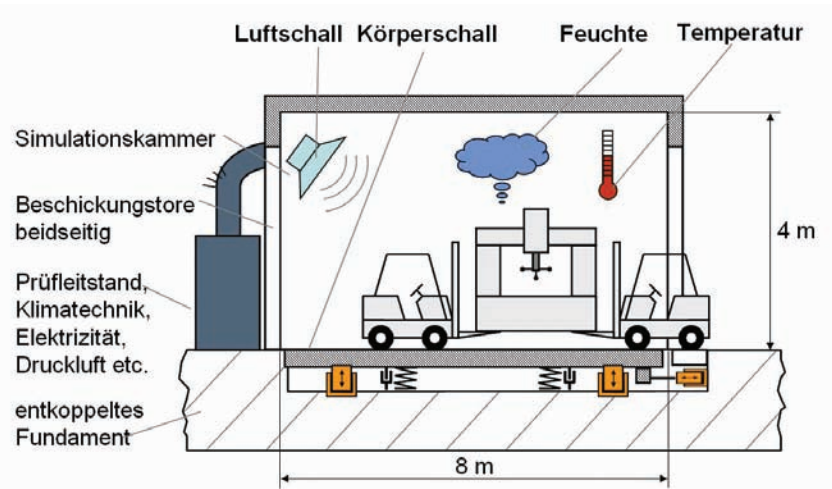


Bild 6:
Referenzlabor für produktionsnahe Fertigungsmesstechnik (Prinzipbild)

Danksagung

Der Beitrag umreißt u.a. die Ergebnisse des Projekts „INTRAC – Rückführbare Inline-Messtechnik im Karosseriebau“, das in Zusammenarbeit mit folgenden Unternehmen und Einrichtungen durchgeführt wurde: DaimlerChrysler AG, Werke Sindelfingen und Rastatt, Ford-Werke GmbH, Köln, LMI Technologies GmbH, Magstadt, Perceptron GmbH, München, Volkswagen AG, Wolfsburg, Dr. Wolf & Beck GmbH, Wangen, WZL – Werkzeugmaschinenlabor, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen. Die Autoren danken insbesondere den beteiligten Mitarbeitern für ihre Unterstützung bei der praktischen Erprobung des Verfahrens und für ihre wertvollen Anregungen.

Literatur

- [1] VDA Band 5, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Prüfprozesseignung. Verband der Automobilindustrie (VDA), Oberursel, (2003)
- [2] VDI/VDE 2617-8, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten, (2006)
- [3] DIN V ENV 13005, Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), deutsche Fassung), (1999)
- [4] DIN EN ISO 10360-2, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – KMG angewendet für Längenmessungen, (2002)

- [5] DIN V 32950, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Übersicht (deutsche Fassung von ISO/TR 14638:1995), (1997)
- [6] DIN EN ISO 14253-1, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen, (1999)
- [7] DIN ISO/TS 15530-3, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG): Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen, (2005)
- [8] VDI/VDE 2617 Blatt 7, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation, (2006)
- [9] DIN EN 15396-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (deutsche Fassung von ISO/TS 17450-1:2005), (2005)
- [10] ISO/TS 17450-2, Geometrical Product Specifications (GPS) – General Concepts – Basic Tenets, Specifications, Operators and Uncertainties, (2002)
- [11] DIN EN ISO 1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Referenztemperatur für geometrische Spezifikation und -prüfung, (2002)
- [12] Schwenke, H., Wäldele, F.: Automatische Bestimmung der Messunsicherheiten auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis, *Technisches Messen* 69 (2002), S. 550–557
- [13] Schwenke, H., Franke, M.: Bestimmung der Unsicherheit von Messungen mit KMG – Status und Ausblick, *PTB Mitteilungen* 117, S. 363–371 (in diesem Heft)