

Messunsicherheitsbilanzen für optische Koordinatenmesssysteme

Dr.-Ing. **M. Hernla**, Dortmund; **T. Bönniger**, Johnson Controls Automotive Seating GmbH, Burscheid

Kurzfassung

Ein weltweit tätiger Hersteller von Autositzen analysiert in einem akkreditierten Prüflabor die geometrische Verformung von Bauteilen mit einem optischen 3D-Koordinatenmesssystem. Die Messunsicherheitsbilanz für die Oberflächengestalt der Autositze enthält die Einflüsse des Messsystems selbst, der optischen Eigenschaften der Messobjekt-Oberflächen, des Bezugssystems und der Temperatur. Die erweiterte Messunsicherheit lässt sich auch durch numerische Simulation (Monte-Carlo-Methode) ermitteln.

Abstract

A global leader in automotive seating systems in an accredited testing laboratory analyses the geometrical deviations of final products and components with an optical 3D Coordinate measuring system. The uncertainty budget of the surface topology of the automotive seats contains the influences of the measuring system itself, the optical characteristics of the measuring objects surface, the datum system and the temperature. The expanded uncertainty may also be evaluated by numerical simulation (Monte Carlo method).

1. Einleitung

Johnson Controls ist ein weltweit aufgestelltes Unternehmen in der Gebäudetechnik und der Automobilindustrie mit ca. 168.000 Mitarbeitern. Der Automobilbereich umfasst mehr als 240 Standorte, die jährlich für über 50 Millionen Fahrzeuge ausrüsten und im Jahr 2012 einen Umsatz von 21,3 Milliarden US-Dollar gemacht haben.

Bei den Autositzen werden neben kompletten Sitzsystemen auch Sitzkomponenten wie z.B. Metallstrukturen, Mechanismen, Schaumstoffteile, Bezüge und Textilien geliefert. Das Prüflabor in Burscheid ist von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) u.a. für folgende Prüfungen akkreditiert:

- Statische und dynamische Untersuchungen an Sitzen und Kopfstützen
- Airbag-Aufblasverhalten unter klimatischen Bedingungen
- Dynamische Crashsimulations- und Kopfaufschlagversuche

- Bestimmung des Kopfabstandes und der Kopfstützengeometrie
- Statische Sicherheitsversuche an Sitzen, Kopfstützen, Sicherheitsgurt- und Isofixverankerungen
- Schwelllast-Versuche, Resonanzfrequenz- und Sitzdruckmessungen
- Geometrische Verformungsanalyse von Bauteilen mit Hilfe von 3D-Scanverfahren
- Flächenhafte 3D-Soll-Ist-Analysen

Bei der geometrischen Verformungsanalyse von Bauteilen werden diese vor und nach der Belastung mit einem optischen Koordinatenmesssystem vermessen. Als Voraussetzung für die Akkreditierung dieser Messungen war die Messunsicherheit bei der Bestimmung von Oberflächenpunkten in einem räumlichen Koordinatensystem zu ermitteln.

2. Messobjekte

Als Messobjekte kommen komplette Autositzsysteme sowie deren Metallstrukturen in Betracht. Die Polsterungen bestehen aus Schaumstoff mit großen Ausdehnungskoeffizienten, die sehr stark auf Temperaturabweichungen von 20°C reagieren. Die Oberflächen sind zum Teil stumpf und mit optischen Verfahren gut messbar, zum Teil aber auch glatt und spiegelnd. Dann müssen spezielle Pulver aufgesprüht werden, um einen guten optischen Kontrast zu erhalten und die Objekte überhaupt messbar zu machen.

Die Messobjekte werden in Aufnahmevorrichtungen eingespannt, um vor und nach der Belastung ein eindeutiges und reproduzierbares Bezugssystem für die Messung zu erhalten. Das Bezugssystem wird nur an der Aufnahmevorrichtung bestimmt und ist somit unabhängig vom Messobjekt. Die Referenzpunkte, aus denen das Bezugssystem gebildet wird, sind mit Klebmarken als weiße Kreise mit schwarzem Rand gekennzeichnet (Bild 1).

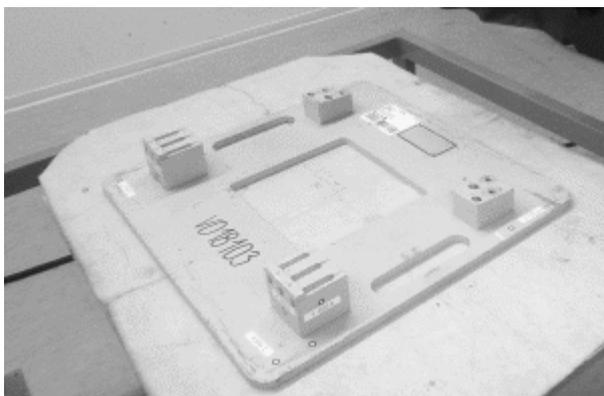


Bild 1: Aufnahmevorrichtung mit Klebmarken als Referenzpunkte des Bezugssystems

Es handelt sich um ein klassisches 3-2-1-Bezugssystem mit einer Ebene aus drei Punkten für die Hauptrichtung (Raumausrichtung), einer Geraden durch zwei Punkte für die Nebenrichtung (Ebenenausrichtung) und einem Einzelpunkt. Jeder Bezug definiert einen Koordinatennullpunkt (Bild 2).

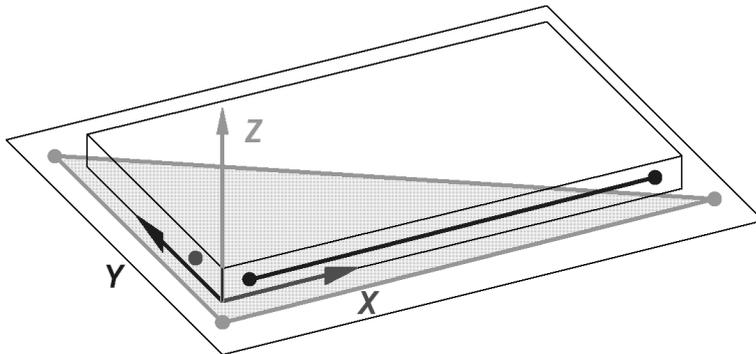


Bild 2: Bezugssystem aus Ebene (drei Punkte), Gerade (zwei Punkte) und Einzelpunkt

3. Messsystem

Bei Johnson Controls wird ein optisches 3D-Koordinatenmesssystem eingesetzt. Es besteht aus zwei Digitalkameras und einem Projektor. Das Koordinatenmesssystem wird mit Einmessplatten aus Aluminium oder Glas eingemessen. Auf den Platten sind kreisförmige Zielmarken aufgebracht, deren Abstände z.B. durch eine Kalibrierung bekannt sind.



Bild 3: Messobjekt (Autositz) mit Koordinatenmesssystem und Beleuchtung

Das Messobjekt wird auf der Aufnahmevorrichtung befestigt und von beiden Kameras automatisch in mehreren Ansichten aufgenommen. Dazu wird ein Streifenlichtmuster auf des Messobjekt projiziert (Bild 3). Die Datenaufnahme dauert in der Regel nur einige Minuten. Die bis zu 2x 8 Millionen Messpunkte lassen sich dann unabhängig vom Messsystem auf beliebige Weise auswerten.

4. Methode zur Ermittlung der Messunsicherheit

Grundlage für alle Messunsicherheitsermittlungen ist der GUM [1], in der deutschen Fassung DIN V ENV 13005 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen [2]. Für „klassische“ Koordinatenmessgeräte mit taktilen (berührenden) Sensoren kann die Messunsicherheit auf dieser Basis wahlweise mit drei Methoden bestimmt werden:

- Numerische Simulation nach VDI/VDE 2617-7 [4]
- Vergleichsmessung mit kalibrierten Werkstücken nach VDI/VDE 2617-8 Anhang C [5]
- Messunsicherheitsbilanz nach VDI/VDE 2617-11 [6]

Für die numerische Simulation steht eine Software unter der Bezeichnung „Virtuelles KMG“ (VCMM) zur Verfügung, allerdings nur für taktile Messgeräte [7]. Der Vergleich mit kalibrierten Werkstücken entfällt ebenfalls, da die weichen Oberflächen der Sitzpolster in der Regel nicht mit taktilen, sondern nur mit optischen Sensoren messbar sind. Dafür ist aber bisher kein Kalibrierlabor akkreditiert.

Deshalb wird eine analytische Messunsicherheitsbilanz aufgestellt. Die Vorgehensweise entspricht dem GUM. Zunächst ist das mathematische Modell der Messung als Funktionsgleichung zu formulieren. Da es sich hier vor allem um geometrische Zusammenhänge handelt, ist die Aufgabe lösbar. Beispiele für solche Messunsicherheitsbilanzen wurden bereits veröffentlicht [6] [8] [9] [10]. Die Messunsicherheitsbilanz der taktilen Messung lässt sich mit geringem Aufwand an die Besonderheiten der optischen Messung anpassen.

5. Eingangsgrößen

In der Messunsicherheitsbilanz werden folgende Eingangsgrößen berücksichtigt:

1. Die Messabweichungen X_{E0} der Punkte senkrecht zur Oberfläche werden aus Wiederholmessungen bestimmt und als Standardabweichung angegeben. Sie gelten unabhängig vom Ort und der Orientierung der betrachteten Oberflächenpunkte.
2. Die Koordinaten der Nullpunkte und die Winkel des Bezugssystems werden aus den Messabweichungen der Referenzpunkte und den Positionen und Abständen dieser Punkte bestimmt.

3. Die Dicke der aufgesprühten Pulverschicht wird aus wiederholten Sprühversuchen ermittelt. Dabei werden die mittlere Schichtdicke X_{EP} (die nicht korrigiert wird) und ihre Abweichung ΔX_{EP} bestimmt.
4. Die kalibrierte Länge ΔL_{CM} des Einmessnormals entspricht dem Abstand der Zielmarken auf der Einmessplatte. Hier ist nur der Grenzwert der Längenmessabweichung des zur Messung der Platte verwendeten Messmittels bekannt. Er ist vernachlässigbar klein.
5. Der Grenzwert ΔL_{KMS} der Längenmessabweichung des optischen Koordinatenmesssystems ist vom Hersteller nicht spezifiziert (z.B. nach [3]). Deshalb wurde er aus Längenmessungen an Prüfkörpern (z.B. Kugelstäbe in verschiedenen Orientierungen) abgeleitet. Er ist hier längenunabhängig.
6. Der Temperatureinfluss ΔL_T für das Einmessnormal und das Messobjekt wird berechnet. Dabei werden die Ausdehnungskoeffizienten und die Temperaturen sowie ihre Grenzabweichungen verwendet. Dazu kommt die bekannte, aber nicht korrigierte Längenabweichung ΔL_{TK} für die Abweichung von der Referenztemperatur 20°C.

6. Mathematisches Modell der Messung

Messgröße ist die Abweichung E_P der Koordinate des betrachteten Raumpunktes im Bezugssystem senkrecht zur Oberfläche. Die Modellfunktion lautet:

$$\begin{aligned}
 E_P = & X_{E0} - X_{EP} - \Delta X_{EP} + \Delta L_{CM} * L_N / L_{CM} - \Delta L_{KMS} - \Delta L_T + \Delta L_{TK} \\
 & - [X_B - W_{BYX} * (X_E - X_{NY}) / L_{MBWY} - W_{BZX} * (X_E - X_{NZ}) / L_{MBWZ}] * \cos(\phi) * \cos(\psi) \\
 & + [Y_B - W_{BXY} * (Y_E - Y_{NX}) / L_{MBWX} - W_{BZY} * (Y_E - Y_{NZ}) / L_{MBWZ}] * \sin(\phi) * \cos(\psi) \\
 & + [Z_B - W_{BXZ} * (Z_E - Z_{NX}) / L_{MBWX} - W_{BYZ} * (Z_E - Z_{NY}) / L_{MBWY}] * \sin(\psi)
 \end{aligned} \tag{1}$$

In der ersten Zeile stehen die Einflussgrößen für die Abweichungen des betrachteten Oberflächenpunktes (X_{E0}), der Pulverschicht (X_{EP} , ΔX_{EP}), des Einmessnormals (L_{CM} , ΔL_{CM}), des Koordinatenmesssystems selbst (ΔL_{KMS}) und der Temperatur (ΔL_T , ΔL_{TK}). Die folgenden Zeilen enthalten die Einflüsse der Nullpunkte und der Winkel des Bezugssystems.

Der Temperatureinfluss berechnet sich nach dem üblichen Ansatz, z.B. in [6]:

$$\Delta L_T = L_N * [\alpha_W * (t_W - 20^\circ\text{C}) - \alpha_M * (t_M - 20^\circ\text{C})] = \Delta L_{TK} \tag{2}$$

Dabei ist L_N der auf die Auswerterichtung projizierte Abstand des betrachteten Oberflächenpunktes vom Koordinatenursprung (Bild 4):

$$L_N = (x_E * \cos\phi + y_E * \sin\phi) * \cos\psi + z_E * \sin\psi \tag{3}$$

Bei (1) handelt es sich offensichtlich um eine geschlossene lineare Modellgleichung. Dabei spielt es keine Rolle, dass einzelne Eingangsgrößen auch mittels Ausgleichsrechnung als Lösungen von nichtlinearen Gleichungssystemen berechnet werden können. Die Gleichung ist differenzierbar, und die Sensitivitätskoeffizienten können analytisch berechnet werden.

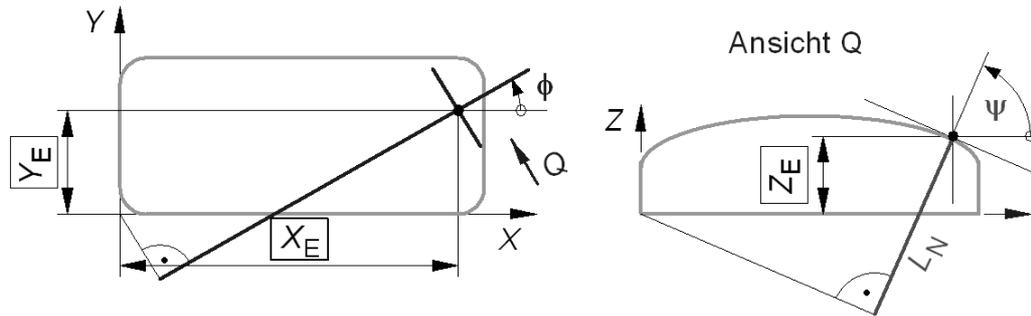


Bild 4: Auf die Auswerterichtung projizierter Abstand L_N des betrachteten Oberflächenpunktes vom Koordinatenursprung (ϕ Azimutwinkel, ψ Elevationswinkel)

7. Messunsicherheit

Die wesentlichen Einflüsse auf die Messunsicherheit sind die Temperatur und das Material des Messobjekts (besonders Kunststoffe). Wie stark sich diese auswirken, hängt vor allem von dem Ort und der Orientierung des betrachteten Oberflächenpunktes ab. Der Temperatureinfluss ist dann am stärksten, wenn der Abstand vom Koordinatenursprung am größten ist und die Auswerterichtung etwa zum Koordinatenursprung zeigt (Bild 5).

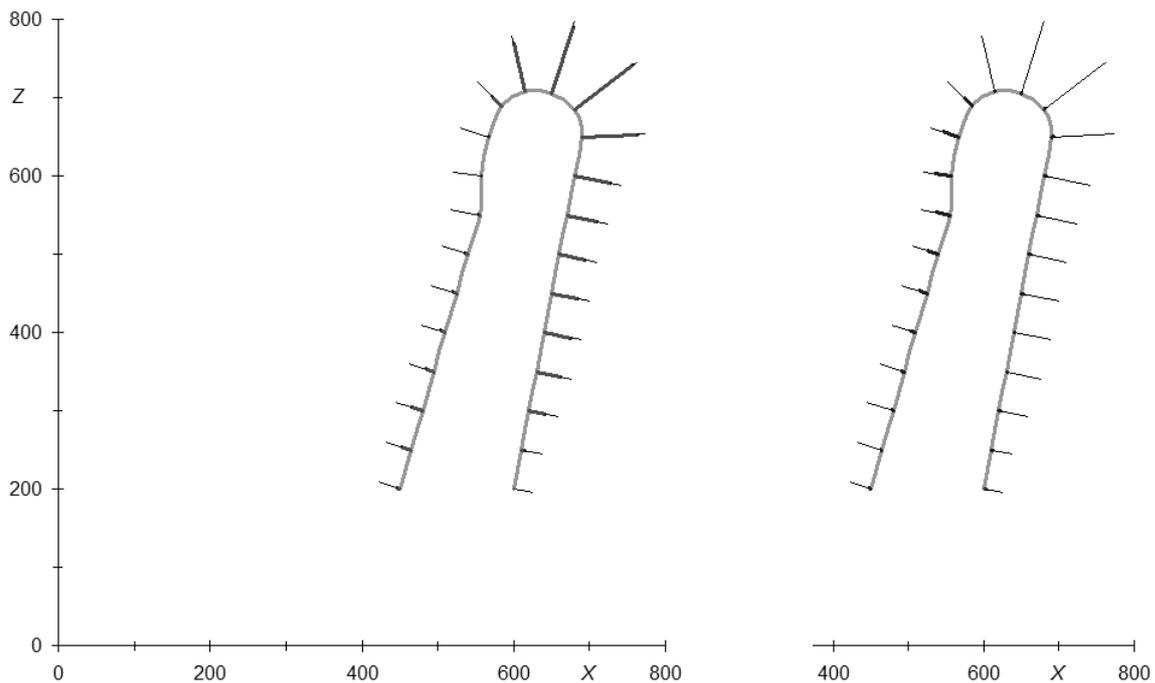


Bild 5: Messunsicherheit abhängig von Ort und Orientierung des Oberflächenpunktes der Rückenlehne; links: dicke Linie Temperaturbeitrag, rechts: dicke Linie Bezugssystem

Die maximale Messunsicherheit auf 1 m Messlänge liegt für Stahl bei 0,25 mm und für Kunststoff bei 1,1 mm (Ausdehnungskoeffizient $250 \cdot 10^{-6}/K$).

Ein prinzipieller und wesentlicher Vorteil der Messunsicherheitsbilanz gegenüber dem Virtuellen KMG ist, dass sich damit ohne weiteres die Sensitivitätskoeffizienten und die einzelnen Unsicherheitsbeiträge bestimmen lassen. Damit können die wesentlichen Eingangsgrößen erkannt und z.B. wie im Bild 5 dargestellt werden.

8. Numerische Simulation

Wenn das mathematische Modell der Messung vorliegt und die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (PDF) der Eingangsgrößen bekannt sind, kann die PDF der Messgröße durch numerische Simulation (Monte-Carlo-Methode) berechnet werden. Das Vorgehen ist im GUM-Supplement 1 [11] beschrieben. Die wesentlichen Schritte sind:

1. Vorgabe der Überdeckungswahrscheinlichkeit und der Anzahl M der Simulationen
2. Erzeugen von M Datensätzen als Realisierungen der N Eingangsgrößen
3. Berechnung des Wertes y_i der Messgröße für jeden Datensatz
4. Berechnung des Mittelwertes y und der Standardunsicherheit $u(y)$ der Messgröße
5. Berechnung des Überdeckungsintervalls für eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit

Hier wird ein Überdeckungsintervall berechnet, das symmetrisch zum Mittelwert y der Messgröße liegt. Das bedeutet, dass bei unsymmetrischen Verteilungen die Anteile der Messwerte, die oberhalb bzw. unterhalb dieses Intervalls liegen, unterschiedlich groß sein können. Die erweiterte Messunsicherheit entspricht der halben Weite des Überdeckungsintervalls.

Die Anzahl M der Simulationen hängt von der vorgegebenen Überdeckungswahrscheinlichkeit und der angestrebten Genauigkeit ab. Im GUM-Supplement 1 (Abschnitt 7.2.1) werden für 95 % und ein bis zwei signifikante Ziffernstellen eine Million Simulationen angegeben.

Bei dem Beispiel im Bild 6 beträgt der Erweiterungsfaktor $k=1,923$. Für die ideale Normalverteilung wäre $k=1,960$. Der Unterschied lässt sich auf die leicht von der Normalverteilung abweichende Verteilung der Messgröße zurückführen.

Die Messunsicherheitsbilanz und die numerische Simulation wurden auf der Basis eines handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramms programmiert. Zur Auswertung der Häufigkeitsverteilung der Messgröße wurde ein Makro benutzt. Der Rechner war mit einem Intel® Core 2 Duo-Prozessor mit 2x 2,53 GHz sowie 4096 MB RAM ausgestattet. Die Rechenzeit für das Beispiel im Bild 6 betrug rund 70 Minuten.

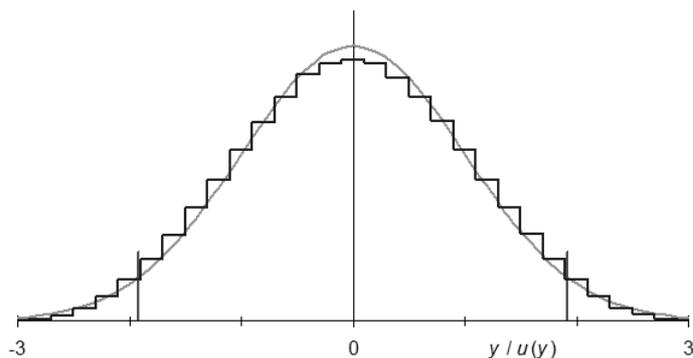


Bild 6: Beispiel für eine Häufigkeitsverteilung der Messgröße aus 1.000.000 Simulationen, normiert auf die Standardunsicherheit $u(y)$; mit Normalverteilung und 95 %-Grenzen

Bei dem Virtuellen KMG in der derzeitigen Ausführung werden in der Regel nur 200 Simulationen gerechnet. Das kann je nach Anzahl der Messpunkte und Messgrößen schon einige Stunden dauern. Eine Million Simulationen sind hier offensichtlich unrealistisch.

Ursache ist vor allem, dass jeder Messpunkt als einzelne Eingangsgröße behandelt wird, und damit jedesmal das komplette Messprogramm einschließlich der Ausgleichsrechnung durchlaufen werden muss. Würden dagegen die Standardunsicherheiten der Formelementparameter aus den Kovarianzmatrizen verwendet, ließe sich die Rechenzeit deutlich reduzieren. In einem Beispiel wurde eine Verkürzung um den Faktor 120 erreicht.

Bei numerischer Bestimmung der Sensitivitätskoeffizienten könnten auch die Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Eingangsgrößen angegeben werden, und die Messstrategie ließe sich leicht optimieren – was bisher nicht möglich ist.

9. Zusammenfassung

Die Unsicherheit von Koordinatenmessungen kann sowohl für taktile als auch für optische Systeme mit Hilfe von Messunsicherheitsbilanzen ermittelt werden. Das mathematische Modell der Messung lässt sich ohne weiteres an die besonderen Bedingungen der optischen Messung anpassen.

Die Messunsicherheitsbilanz liefert alle einzelnen Unsicherheitsbeiträge, so dass die wesentlichen Eingangsgrößen erkannt und dargestellt werden können. Die erweiterte Messunsicherheit lässt sich zusätzlich auch durch numerische Simulation mit komfortablen Rechenzeiten ermitteln.

Literatur:

- [1] JCGM 100: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Geneva 2008
- [2] DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM). Beuth Verlag Berlin 1999
- [3] VDI/VDE 2634-3: Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten. Beuth Verlag Berlin 2008
- [4] VDI/VDE 2617-7: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation. Beuth Verlag Berlin 2008
- [5] VDI/VDE 2617-8: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten. Beuth Verlag Berlin 2006
- [6] VDI/VDE 2617-11: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen. Beuth Verlag Berlin 2011
- [7] Hernla, M.; Franke, M.; Wendt, K.: Aufgabenspezifische Messunsicherheit von Koordinatenmessungen. *tm Technisches Messen*, München 77 (2010) 11, S. 607-615
- [8] Hernla, M.: Messunsicherheitsberechnungen für Koordinatenmessungen. VDI-Fachtagung Messunsicherheit 2006. VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf 2006, S. 45-57
- [9] Hernla, M.: Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen. Abschätzung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mit Hilfe von Berechnungstabellen. expert verlag, Renningen 2007
- [10] Hernla, M.: Messunsicherheitsberechnungen für Koordinatenmessungen in der industriellen Praxis. VDI-Fachtagung Messunsicherheit 2008. VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf 2008
- [11] JCGM 101: Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Geneva 2011