

# Einfluss von Materialkombinationen auf das dimensionelle Messen mit Mikro-Computertomographie am Beispiel eines werkstücknahen Testkörpers

Karsten EHRIG<sup>\*</sup>, Markus BARTSCHER<sup>\*\*</sup>, Jürgen GOEBBELS<sup>\*</sup>,  
Marc KOCH<sup>\*\*</sup>, Andreas STAUDE<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, [karsten.ehrig@bam.de](mailto:karsten.ehrig@bam.de), [juergen.goebbels@bam.de](mailto:juergen.goebbels@bam.de), [andreas.staude@bam.de](mailto:andreas.staude@bam.de))

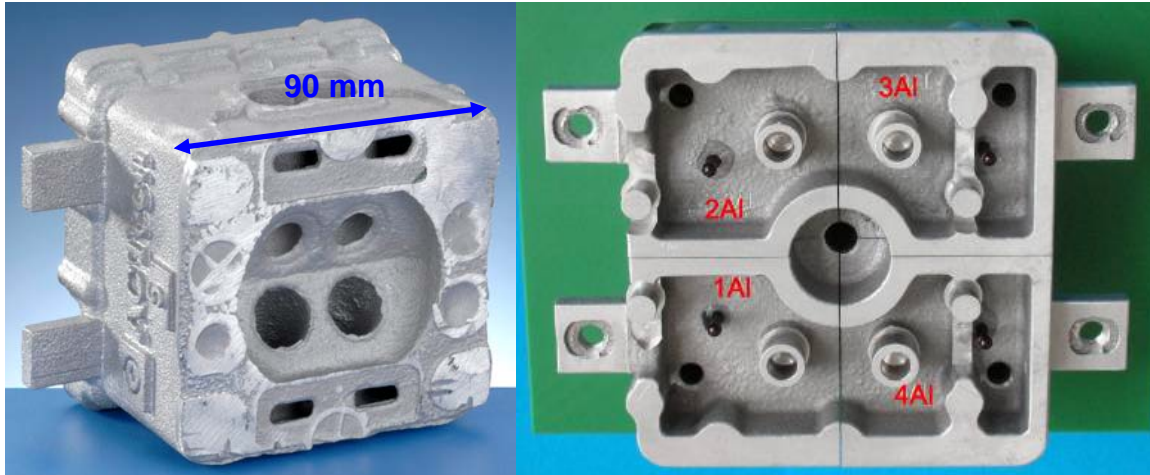
<sup>\*\*</sup> Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin (Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, [markus.bartscher@ptb](mailto:markus.bartscher@ptb))

**Kurzfassung.** Die Computertomographie (CT) hat sich als dimensionelle Messmethode in der industriellen Produktion etabliert. Durch Messungen an speziellen Prüfkörpern ist es möglich, quantitative Informationen über die metrologischen Eigenschaften dimensioneller Messungen zu erhalten. In dieser Arbeit wird ein Aluminium-Guss-Prüfkörper (120 mm x 90 mm x 60 mm) benutzt, mit dem – in der vorliegenden Form – auch der Einfluss von Materialien unterschiedlicher Schwächung auf dimensionelle CT-Messungen untersucht werden kann. Der Prüfkörper ist in vier Segmente zerteilt, so dass auch innenliegende, raue Gussfreiformflächen der taktilen Koordinatenmessung zugänglich sind. Durch adaptierte Rubinkugeln als Referenzstrukturen können die CT-Messdaten in taktile Referenz-Koordinatensysteme überführt werden. Um den Einfluss von Materialien unterschiedlicher Schwächung auf das dimensionelle Messen mit CT zu untersuchen, wurden stärker schwächende ZTA-Störkugeln (*Zirconia Toughened Alumina*) mit zur Ausrichtung geeigneter Symmetriebrechung in der Nähe von ausgewählten taktilen Messstellen angebracht. Zur Bewertung der Messabweichungen dienen taktile Referenzmessungen an den ZTA-Kugeln sowie taktile Messungen an den Freiformflächen des Gussteils, wobei durch ein iteratives Antastverfahren eine verbesserte Erfassung der Geometrie auch bei starken lokalen Oberflächenkrümmungen sichergestellt wird.

## Einführung

Das dimensionelle Messen hat sich als Standardverfahren in der industriellen Computertomographie etabliert. Möglichst exakte Kenntnisse des zu untersuchenden Materials haben sich hierbei für das dimensionelle Messen als wertvoll erwiesen. Bei Ein-Material CT-Messungen lassen sich geeignete Messparameter in der Regel zufriedenstellend bestimmen, wohingegen bei Mehrmaterialmessungen oft ein Kompromiss zwischen den Materialien gefunden werden muss. Daher stellt die Untersuchung von Materialkombinationen eine besondere Herausforderung für das dimensionelle Messen mit CT dar.

Der Mini-Zylinder-Kopf (MiniZylKo) Nr. 5 ist ein werkstoffnaher Aluminiumguss Testkörper für unterschiedliche Anwendungen. Die Fertigung dieses im Maßstab 1:4 verkleinerten Zylinderkopfes erfolgte durch die Firma ACTech GmbH in Freiberg/Sachsen (Deutschland) aus dem Material  $AlSi_7Mg_{0.3}$  (Maße: 120 mm x 90 mm x 60 mm) (siehe Abb. 1).



**Abbildung 1.** Mini-Zylinder-Kopf (MiniZylKo) Nr. 5 un bearbeiteter Originalzustand (links) und als Prüfkörper unterteilt in 4 Segmente (1AI-4AI) mit Rubinkugeln auf Kohlefaserstiften (rechts)

Als Mikro-Computertomographie ( $\mu$ -CT) Testkörper wurde der MiniZylKo in 4 Segmente (Kennung 1AI bis 4AI) unterteilt und mit 3 Rubinkugeln pro Segment zur Ausrichtung im taktilen Koordinatensystem und zur Skalierungskorrektur der CT-Messung ausgestattet. Die Rubinkugeln wurden jeweils mittels Kohlefaserstifte an den Segmenten befestigt. Um eine Redundanz bei der Ausrichtung zu gewährleisten, wurden am Segment 1AI zwei weitere Rubinkugeln angebracht (somit 5 Rubinkugeln am Segment 1AI). Geeignet ist dieser Testkörper zum dimensionellen Messen an Freiformflächen und zur Defektanalyse [1-2]. Die Betrachtung der lokalen Messabweichungen stellt ein empfindliches Verfahren dar, um Effekte der CT zu erfassen. Ein besonderes Augenmerk bei der Beurteilung der Messabweichungen ist auf eine symmetrische Betrachtung der Effekte der CT und der Effekte bei der Erfassung der Geometrie durch Referenzsensoren zu legen. In der vorliegenden Arbeit werden als Bezug Messungen mit einem taktilen Koordinatenmessgerät durchgeführt.

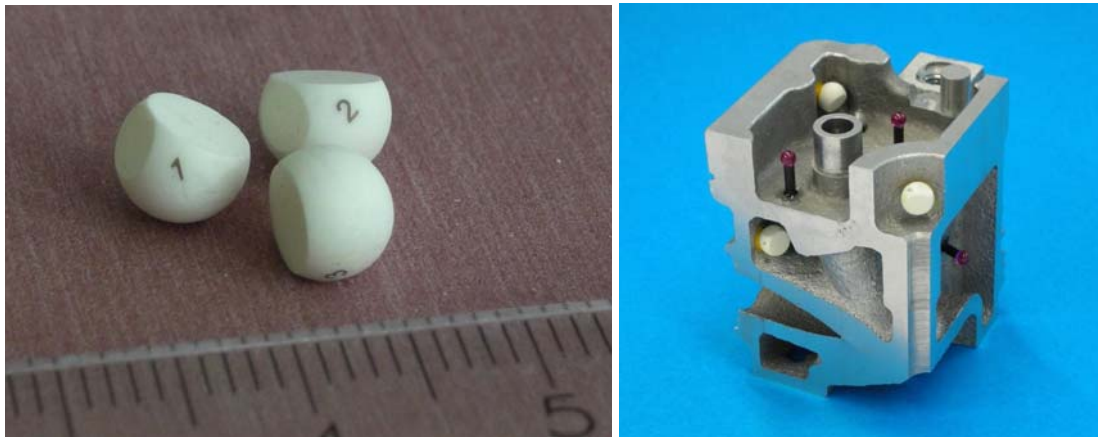
Die Bestimmung der Oberflächengeometrie an einzelnen lokalen Messstellen stellt dabei eine an sich schwierige Messaufgabe dar. Mittelungseffekte, wie diese z.B. bei der Durchmesserbestimmung von Zylindern, Kreisen und Kugeln zu beobachten sind und dort häufig zu geringeren Messunsicherheiten führen, sind bei der Messung einzelner Oberflächenpositionen nicht vorhanden. Diese Aussage gilt gleichartig für die CT und für andere Sensoren, wie auch für taktile Messungen. Bei einem Vergleich lokaler Positionsmessungen unterschiedlicher Messsysteme geht zusätzlich die Registrierung der Datensätze bzw. die Definition der Koordinatensysteme in die Unsicherheit des Vergleichs mit ein.

### **Mini-Zylinder-Kopf Segment 1AI mit ZTA Kugeln**

Um den Einfluss von Materialkombinationen und der Oberflächentopographie auf das dimensionelle Messen zu untersuchen, wurden an das MiniZylKo Segment 1AI zusätzlich 3 ZTA (*Zirconia Toughened Alumina*) Kugeln angebracht. Die ZTA Kugeln bestehen zu 86% aus  $Al_2O_3$  und zu 14% aus  $ZrO_2$  und haben einen Durchmesser von 6 mm. In diese

Rohkugeln mit unbehandelten Oberflächen wurden je zwei Planflächen zur Symmetriebrechung und zur Ausrichtung eingebracht (siehe Abb. 2 links). Zur eindeutigen Identifizierung erfolgte zudem eine Lasergravur (Zahl 1 bis 3). Die Fixierung der ZTA-Kugeln am Segment 1A1 des MiniZylKo erfolgte mit Schraubensicherungslack.

Die Oberfläche der Rohkugeln weist – im Vergleich zu polierten Keramikkugeln – beträchtliche Formabweichung von 0,0758 mm (ZTA-Kugel 1), 0,0659 mm (ZTA-Kugel 2) und 0,1379 mm (ZTA-Kugel 3) auf. Dagegen sind die zur primären und sekundären Ausrichtung benutzen Planflächen der ZTA-Kugeln bedingt durch einen Läppvorgang vergleichsweise eben (Ebenheit 2-3  $\mu\text{m}$ ). Der MiniZylKo weist ebenfalls verschiedenartige Aluminiumoberflächen auf: raue Gussoberflächen (unbehandelter Sandguss) mit Rauheiten ( $R_z=81 \mu\text{m}$ ), relativ glatt gefräste Flächen mit Rauheiten ( $R_z=18 \mu\text{m}$ ) und mittels Drahterosion hergestellte Flächen ( $R_z=3 \mu\text{m}$ )



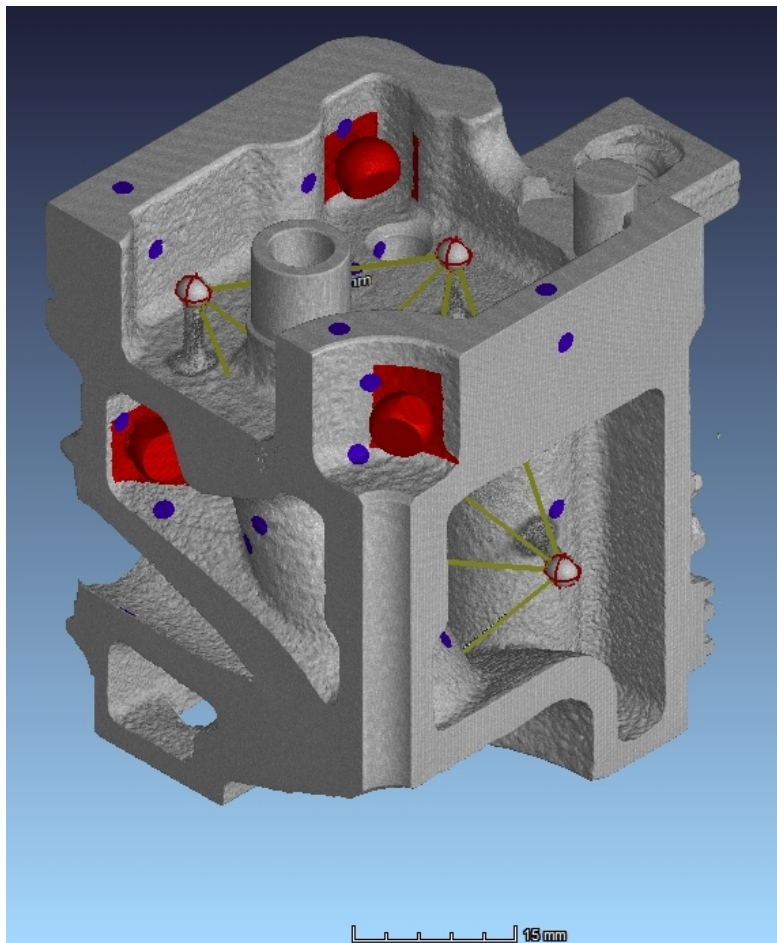
**Abbildung 2.** ZTA-Kugeln (Durchmesser: 6mm) unbefestigt (links) und nach Befestigung am Mini-Zylinder-Kopf Segment 1A1 (rechts)

Bei einer Durchstrahlung mit 205 kV in der CT-Simulation schwächt ZTA in etwa doppelt so stark wie Aluminium. Das MiniZylKo Segment 1A1 mit angebrachten ZTA Kugeln lässt sich mit 205 kV - 210 kV mit maximaler Schwächung ca. 90% noch gut durchstrahlen.

Referenzmessungen wurden mit dem taktilen Koordinatenmessgerät Zeiss UPMC 1200 zur Positionsbestimmung der Rubinkugeln, zur Messung an ausgewählten glatten und rauen Oberflächenstellen und zur Messung der ZTA-Kugeln durchgeführt. Die taktile Messung der Rubinkugeln und der rauen und glatten Oberflächen des MiniZylKo fand dabei mit einem Tastkugeldurchmesser von 2 mm, die Messung der ZTA-Kugeln mit einem Tastkugeldurchmesser von 0,6 mm statt. Zur taktilen Messung der Aluminiumoberfläche des MiniZylKo wurde eine angepasste iterative Messstrategie verwendet, durch die die reale Oberflächennormale des Bauteils lokal ermittelt wurde [1-2].

Eine CT-Messung des MiniZylKo Segment 1A1 mit den ZTA Kugeln wurden an der PTB mit 210 kV, 1 mm Kupfer Vorfilter, 3016 Winkeln, einer Voxelgröße von 54  $\mu\text{m}$  und einem 1920x1536 Pixel Flachdetektor in stehender Position mit Strahlaufhärtungskorrektur durchgeführt. An der BAM wurde eine CT-Messung mit 205 kV, 0,5 mm Kupfer- und 0,75 mm Silber-Vorfilter, 1800 Winkeln, einer Voxelgröße von 50  $\mu\text{m}$  und einem 2048x2048 Pixel Flachdetektor in liegender Position ohne Strahlaufhärtungskorrektur durchgeführt. Die CT-Messungen wurden in unterschiedlichen Stellungen und mit unterschiedlichen Messparametern durchgeführt, um die komplexen Einflüsse auf das dimensionelle Messen zu untersuchen. Die Untersuchungen sollen prinzipielle Zusammenhänge bei der Messung derartiger komplexer Bauteile wie dem MiniZylKo mit mehreren Materialien beschreiben und analysieren helfen.

Die Auswertung der CT-Messungen des Segments 1Al mit adaptierten ZTA-Kugeln (Abb. 2 rechts) erfolgte mittels taktiler Referenzwerte der Rubinkugeln, der Oberflächenpatches und der ZTA-Kugeln, indem zuerst eine Skalierungskorrektur anhand der Abstände der 5 Referenzkugeln in VGStudioMAX 2.1 durchgeführt wurde. Nach einer zweiten Volumenrekonstruktion mit verbesserter Skalierung erfolgte das Ausrichten des CT-Volumens anhand der 5 Referenzkugeln an das taktile Koordinatensystem (siehe Abb. 3). Die Oberflächenextraktion erfolgte mit adaptivem Schwellwertverfahren ausgehend vom ISO50-Schwellwert zwischen Hintergrund- und Aluminium-Grauwert-Peak in VGStudioMAX 2.1 an 34 Oberflächenpatches (Abb. 3). Anschließend fand der Vergleich der so extrahierten Oberflächenpatches mit den taktilen Messwerten in GOM Inspect 7.2 statt.



**Abbildung 3.** Oberflächengerenderte Darstellung des MiniZylKo Segment 1Al mit ZTA-Kugeln. Hervorgehoben sind die Rubinkugeln mit eingepasster Kugelgeometrie, die Oberflächenpatches (blau) und ZTA Kugel ROIs (rot).

In ZTA-Kugel-ROIs fand jeweils eine separate Oberflächenbestimmung statt. Hierzu wurde ausgehend vom ISO50-Wert zwischen Aluminium- und ZTA-Grauwert-Peak adaptiv (mit einem lokalen Gradienten über 4 Voxel) die Oberfläche bestimmt. Danach erfolgte eine 3-2-1 Registrierung (kleine Planfläche, große Planfläche und Kugelmittelpunkt der jeweiligen ZTA-Kugel) der drei ZTA-Kugel-ROIs in jeweils lokalem Koordinatensystem. Nach Oberflächenextraktion der ZTA-Kugel-ROIs erfolgte die Berechnung der Abweichungen der 1045 taktilen Messwerte in GOM Inspect 7.2.

Bei den Soll-Ist Vergleichen der Oberflächenpatches und der aus den CT-Messungen extrahierten Geometrie der ZTA-Kugeln mit den taktilen Messwerten erfolgte der Vergleich jeweils entlang der taktil bestimmten Oberflächennormale (CT-Messung als Ist und taktile Messung als Soll).



## Ergebnisse des Vergleichs mit taktilen Referenzwerten

Die 95%-Breite der Messabweichungen bei PTB und BAM Messung lagen bei den 34 Aluminiumoberflächenpunkten im Bereich einer Voxelgröße und bei der ZTA-Kugel 1 signifikant unter einer Voxelgröße (ca. 50%). Bei der taktilen Messung der ZTA-Kugeloberfläche erwies sich dabei die vergleichsweise dichte Erfassung der Oberfläche mit 1035 Messpunkten als sehr hilfreich, um systematische Abweichungen erkennen und einordnen zu können. Bei dem Vergleich beider CT-Messungen mit den taktilen Messwerten zeigen sich gleichartige periodische Abweichungen. Die Periodizität der Abweichungen korreliert sehr gut mit der taktilen Messstrategie in konzentrischen Kreisschnitten.

Diese Beobachtung wird hauptsächlich als Effekt der taktilen Messung interpretiert. Auch bei einem vergleichsweise geringen Tastkugeldurchmesser von 0,6 mm werden Welligkeit und Form der Rohkugeln noch nicht angemessen abgebildet. Ein direkter Vergleich von CT-Messung und taktiler Messung ist bei dieser Oberflächentopographie mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet.

Dieses wird zusätzlich bei der Betrachtung der Durchmesser von in die Messdaten der ZTA-Rohkugeln eingepassten Kugeln deutlich. Bei ZTA-Kugel 1 stimmen die ermittelten ZTA-Kugeldurchmesser in beiden CT-Messungen besser als  $\frac{1}{4}$  Voxel mit der taktilen Messung überein, während bei den ZTA-Kugeln 2 und 3 in beiden CT-Messungen jeweils 0,6 bzw. 1,4 Voxelgrößen Abweichungen zu beobachten sind. Alle CT-Messungen zeigen dabei im Vergleich zu den taktilen Messwerten kleinere Kugeldurchmesser.

Diese systematischen Abweichungen werden als Effekt des vergleichsweise großen Tastkugeldurchmessers der taktilen Messung relativ zu den auf der Oberfläche der ZTA-Kugeln vorhandenen Modulationen interpretiert. Die Unterschiede zwischen den drei ZTA-Kugeln müssen dabei noch weiter untersucht werden.

Dagegen zeigen sich bei der Betrachtung der beiden Planflächen der ZTA-Kugeln deutlich geringere Abweichungen zwischen den taktilen Messwerten und den CT-Messungen. Der verwendete Tastkugeldurchmesser von 0,6 mm ist hier gut geeignet um die geringe Formabweichung dieser Oberflächen zwischen  $1\ \mu\text{m}$  und  $3\ \mu\text{m}$  zu erfassen. Die CT-Messungen zeigen Abweichungen von der Ebenenform (bestimmt als 95%-Breite der Abweichungen) von im Mittel  $4\ \mu\text{m} - 6\ \mu\text{m}$ , was  $\frac{1}{10}$  der Voxelgröße entspricht. Diese Werte zeigen die Güte der Oberflächenfindung der zugrunde liegenden CT-Messungen.

Die Bewertung des Vergleichs der CT-Messergebnisse mit taktilen Messwerten muss insgesamt unter Berücksichtigung der Oberflächeneigenschaften erfolgen. Die taktile Messung einer Oberfläche erfolgt durch ein Antastelement mit einem endlichen Tastkugelradius, das so eine morphologische Filterung der Oberfläche bewirkt. Raue Oberflächen können daher mit zu großen Tastkugelradien nicht angemessen erfasst werden. Dieser Effekt wird in der Koordinatenmesstechnik im Allgemeinen durch Zuordnung einer erhöhten Messunsicherheit in Abhängigkeit von der Rauheit berücksichtigt.

Im vorliegenden Fall muss abgeschätzt von einer erweiterten Messunsicherheit der taktilen Messung von bis zu  $10\ \mu\text{m} - 20\ \mu\text{m}$  bei den Aluminiumoberflächenpatches ausgegangen werden. Bei dieser Abschätzung wurde bereits berücksichtigt, dass das hier verwendete iterative Antastverfahren implizit zu kleineren Unsicherheiten der Antastung führt. Für weitere Untersuchungen, z.B. Vergleiche zwischen CT und taktilen Messungen, ergibt sich daher die Notwendigkeit, die taktile Erfassung der Oberflächen weiter zu verbessern, z.B. durch verbesserte iterative Erfassung und bessere Modellierung [4], durch die Verwendung kleinerer Tastkugeldurchmesser und durch getrennte Untersuchungen zur Messunsicherheit der taktilen Erfassung rauer Oberflächen.

## **Zusammenfassung**

Es wurde eine Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften von CT-Messungen mehrmaterialiger Bauteile an einem werkstücknahen Gussbauteil aus Aluminium – dem Miniatürkylinderkopf Nr.5 der Fa. ACTech, Freiberg/Sachsen, durchgeführt. An dem Segment 1A1 dieses Bauteils wurden 50% stärker schwächende Strukturen in Form von ZTA-Rohkugeln angebracht.

Die CT-Messungen dieses Prüfkörpers zeigen bei den vorliegenden Schwächungsverhältnissen nur einen geringen Einfluss der beiden Materialkomponenten auf die Geometrie des jeweils anderen Materials.

Stärker ausgeprägt sind die Einflüsse der Topographie der vorhandenen Oberflächen auf die messtechnische Erfassung. Es zeigt sich, dass bei der taktilen Erfassung Effekte durch den endlichen Tastkugeldurchmesser selbst bei einem Durchmesser von 0,6 mm noch dominant sein können.

Weitere Untersuchungen sind hier notwendig, um zu einer besseren Rückführung von CT-Messungen signifikant rauer Oberflächen zu führen.

## **Danksagung**

Die Autoren danken Herrn Norbert Gerwien (PTB) für die Unterstützung bei den taktilen KMG-Messungen. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung der Arbeiten in dem Projekt AZ: II D 5 – 07/06.

## **Referenzen**

- [1] M. Bartscher, M. Neukamm, M. Koch, U. Neuschaefer-Rube, A. Staude, J. Goebbels, K. Ehrig: Performance assessment of geometry measurements with Micro-CT using a dismountable work-piece-near reference standard, Proc. of ECNDT 2010, Moscow, Russia, 2010.
- [2] A. Staude, J. Goebbels, K. Ehrig, M. Bartscher, M. Koch, U. Neuschaefer-Rube: A new test piece for geometry and defect measurement with micro-CT, Proc. of ECNDT 2010, Moscow, Russia, 2010.
- [3] M. Bartscher, U. Hilpert, D. Fiedler: Ermittlung der Messunsicherheit von Computertomographie-Messungen am Beispiel eines Zylinderkopfes (Determination of the Measurement Uncertainty of Computed Tomography Measurements Using a Cylinder Head as an Example), Technisches Messen 75 (2008) 3, p. 178-186, Oldenburg Verlag.
- [4] M. Bartscher, M. Krystek: Method for a traceable geometry assessment of arbitrarily shaped sculptured surfaces, Proc. of ISMQC 2010, Osaka, 5-9 Sept. 2010, Japan.