Genau messen mit Computertomografie

Marc KACHELRIEß *, Ralf CHRISTOPH **, Ingomar SCHMIDT **
* Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg
** Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Kurzfassung

Computertomografie (CT) zur dimensionellen Messung findet seit mehreren Jahren zunehmend Einsatz in Industrie und Forschung. Durch die Integration der CT-Sensorik in Koordinatenmessgeräte (KMG) wurde das Einsatzspektrum der CT-Technik von Prüf- und Inspektionsaufgaben zu hochgenauen Messaufgaben an Kunststoff– und Metallteilen verschiedener Größen erweitert. Die Werth Messtechnik GmbH stellte 2005 das erste speziell für die Koordinatenmesstechnik entwickelte Gerät mit Computertomografiesensorik und optional weiteren Sensoren vor. Für diese erste Generation der CT-KMG's gelang die rückführbare Messung im Genauigkeitsbereich kleiner ca. fünf Mikrometer für viele Anwendungen nur durch das als Autokorrektur bekannte Korrekturverfahren. Hierbei erfolgt die Korrektur der CT-Messung beliebig vieler gleicher Werkstücke auf der Basis von einmaligen Vergleichsmessungen mit hochgenauen taktilen, optischen oder taktil-optischen Sensoren. Heute kommt dieses Verfahren noch immer für hochgenaue Messaufgaben mit zulässigen Messabweichungen kleiner als ein Mikrometer zur Anwendung.

Moderne Verfahren zur Korrektur systematischer Fehler der CT (Artefakte) basieren auf der Simulationen des CT-Verfahrens an gemessenen Werkstückgeometrien oder CAD-Daten. Hierdurch wird es möglich, die Abweichungen zwischen „richtiger" Messung und artefaktbehafteter Messung rechnerisch zu bestimmen und die Messergebnisse zu korrigieren (virtuelle Autokorrektur). Zusätzliche Messungen mit anderen Sensoren können so meist entfallen. Das Prinzip des Verfahrens und verschiedene industrielle Einsatzbeispiele werden im Vortrag erläutert. Hierbei werden auch neue Verfahren zur hochauflösenden Messung an größeren Werkstücken vorgestellt.

In einem weiteren Abschnitt des Vortrages wird die Vorgehensweise zur normgerechten Überprüfung der Spezifikation von KMG mit Röntgentomografie-Sensorik aufgezeigt. Der Schwerpunkt liegt hierbei beim Einfluss des Werkstoffs der Messobjekte.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/

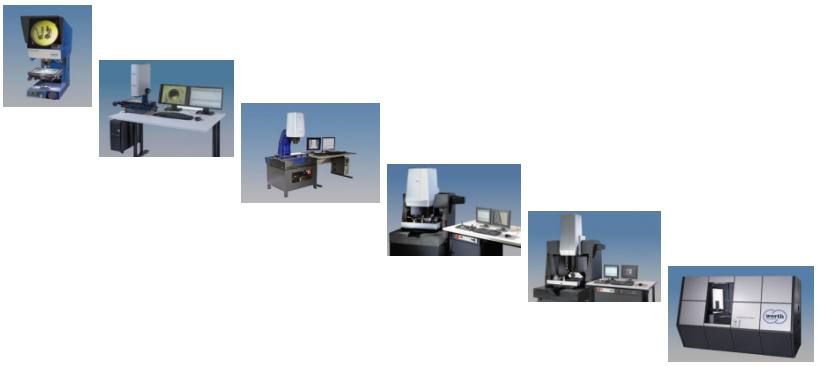
Genau messen
mit Computertomografie

Prof. Dr. Marc Kachelrieß, Dipl.-Phys., Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg

Dr.-Ing. habil. Ralf Christoph, Werth Messtechnik GmbH Gießen

Dr.-Ing. Ingomar Schmidt, Werth Messtechnik GmbH Gießen

Werth Gerätespektrum



Optisch → taktil → taktil-optisch → tomografisch

MPE E von 5µm bis 0,15 µm

Messbereiche von 50x50mm bis 3500x1500x800mm

VT-A-14-01-0331_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 641 79380 Fax +49 641 7938-719 www.werth.de

Werth TomoScope®

2005

Erstes Koordinatenmessgerät mit Röntgentomografie
- Optional mit Multisensorik

VT-A-13-7-0176_D

Werth Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensor

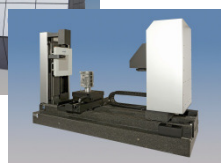
Geräteübersicht

TomoScope®
- Ø=87; L=240 (bei 130 kV / 150 kV)
- Ø=204; L=398 (bei 190 kV / 225 kV)

TomoCheck®
- Ø=87; L=240 (bei 130 kV / 150 kV)
- Ø=197; L=317 (bei 190 kV)

TomoScope® HV Compact
- Ø=327; L=517

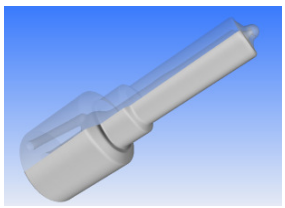
TomoScope® HV
- Ø=500; L=710

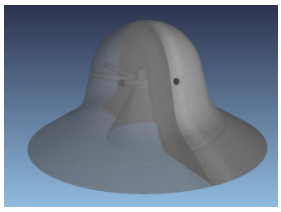


TomoScope® HV 450 kV
- Ø=500; L=1010

Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensor

Messen von Einspritzkomponenten 0,5 µm genau



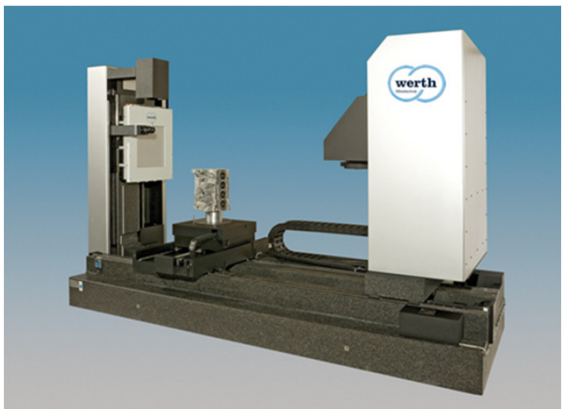


TomoScope® 200 - 225 kV

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 641 79380 Fax +49 641 7938-719 www.werth.de

Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensor

Messen von großvolumigen / dichten Werkstücken



TomoScope® HV 800 - 450 kV

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 641 79380 Fax +49 641 7938-719 www.werth.de

Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensor

Spezifikation:

Geräteeigenschaften

Richtlinien für Koordinatenmessgeräte mit CT

Spezifikationen

VDI/VDE 2630 Blatt 1.3 (entspricht VDI/VDE 2617 Blatt 13)

Spezifikation von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren

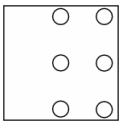
- Allgemeingültige Kenngrößen (Antastabweichung, Längenmessabweichung)
- Vergleichbarkeit von verschiedenen CT-Geräten
- Vergleichbarkeit mit der konventionellen Koordinatenmesstechnik
- Akzeptanz bei Anwendern

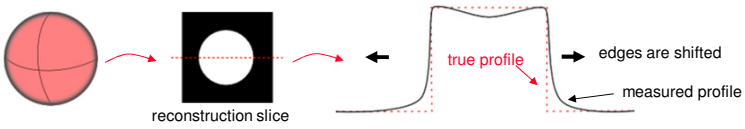
Richtlinien für Koordinatenmessgeräte mit CT

Spezifikationen: Antastabweichung PS/PF

Antastabweichung:

- Messung einer Kugel an beliebiger Position im Messvolumen
- Formabweichung (form error PF)
- Durchmesserabweichung (size error PS)
- Mindestens 25 Messpunkte
- Kugeldurchmesser ca. 10-20% der Messvolumendiagonale
- Möglichst Messung in zwei “signifikant unterschiedlichen” Vergrößerungen

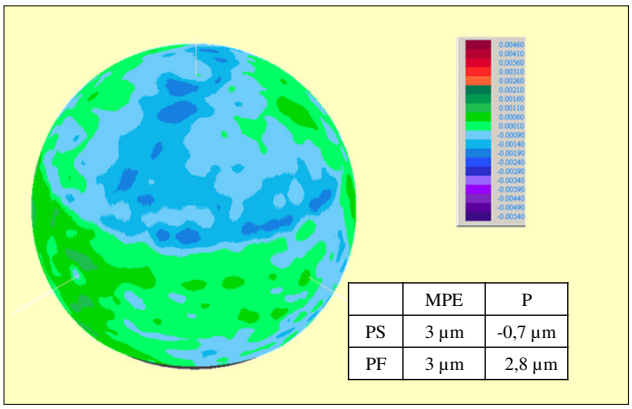




Richtlinien für Koordinatenmessgeräte mit CT

Spezifikationen: Antastabweichung PS/PF - Beispiel

- Zahlenwerte: normenkonforme Messung mit 25 Punkten
- Grafik: Ergebnis für ca. 20 000 Messpunkte



	MPE	P
PS	3 µm	-0,7 µm
PF	3 µm	2,8 µm

VT-A-13-08-494_D

Richtlinien für Koordinatenmessgeräte mit CT

Spezifikationen: Längenmessabweichung E

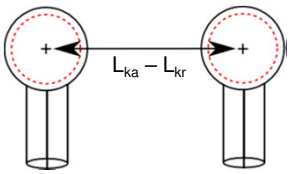
- Messung von 5 „Endmaß“-Längen, in 7 Raumrichtungen, jeweils 3x in mindestens zwei Vergrößerungen (→ 210 Maße!)
- Kleinste Testlänge ≤ 30 mm, größte Testlänge ≥ 66% der Messraumdiagonale
- Zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Messung von E:

  “klassisch”: 2 einzelne Messpunkte auf Normalen $E = L_a - L_r$

  “Kugelkörper”: Messen von Kugelmittelpunkten <u>und</u> zusätzlich Berücksichtigung der

  - Antastabweichung PS/PF
    oder
  - Bidirektionalen Messung einer kurzen Länge (Endmaß oder Kugel) in Richtung der Kugelabstandsmessung

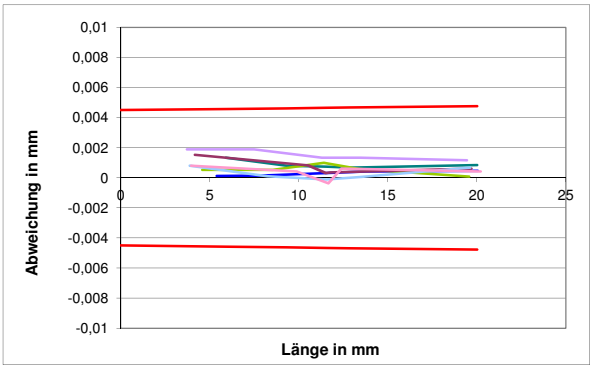
$$E = L_{ka} - L_{kr} + PS \pm PF$$



Richtlinien für Koordinatenmessgeräte mit CT

Spezifikationen: Längenmessabweichung E - Beispiel

- Messung von jeweils 5 Längen in 7 Richtungen (Kugelabstände zzgl. kurze bidirektionale Länge) an Mehrkugel-Distanz-Normal
- Messergebnisse innerhalb der Spezifikation (4,5 + L/75) µm (rote Linien)

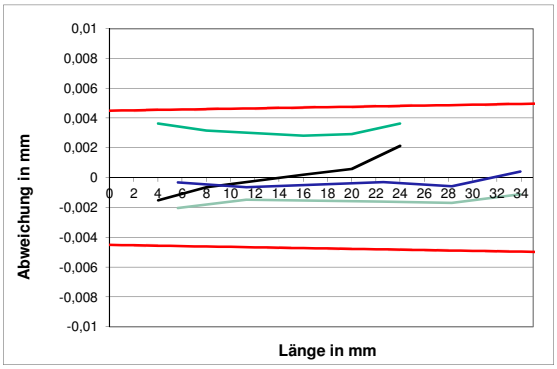


ISO-Normung für KMGs mit CT

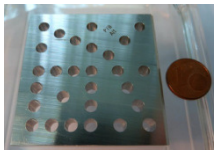
Entwurf !

ISO 10360 – 11:

- Zusätzliche Spezifikation für Normal mit ausgeprägtem Materialeinfluss



Quelle: Werth



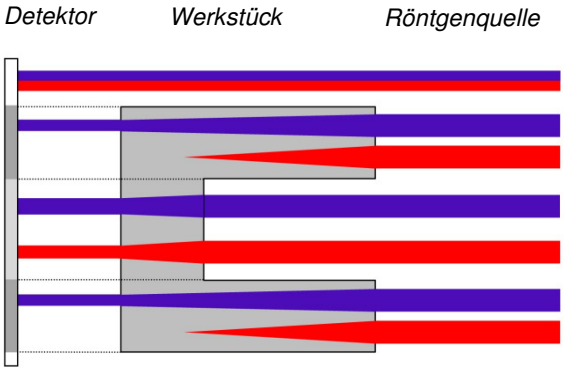
Quelle: PTB

Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensor

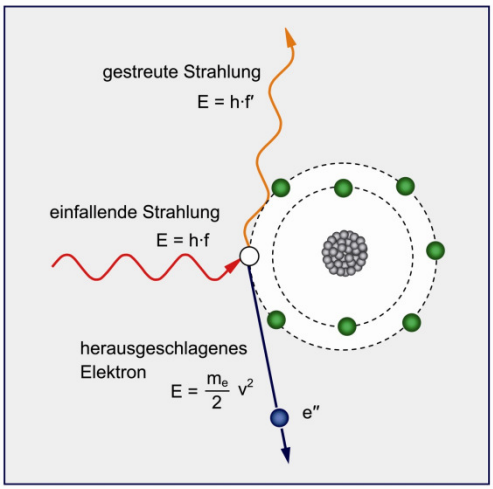
Messunsicherheit:

- Geräteeigenschaften
- Werkstück
- Umwelt
- Messstrategie
- Bediener

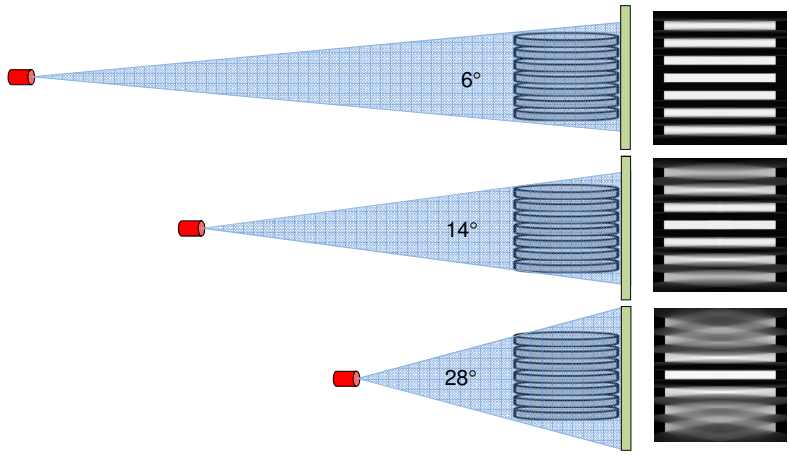
Artefakte
Strahlaufhärtung



Artefakte
Comptonstreuung und Comptoneffekt



Artefakte
Kegelstrahlartefakt



Artefaktkorrektur
Verfahrensübersicht

Empirisch: Empirische Artefaktkorrektur EAK

Simulation: Werth Virtuelle Autokorrektur VAK

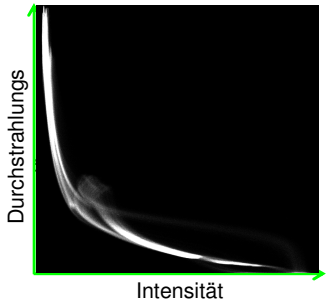
Einsatz Multisensorik: Werth Multisensor Autokorrektur

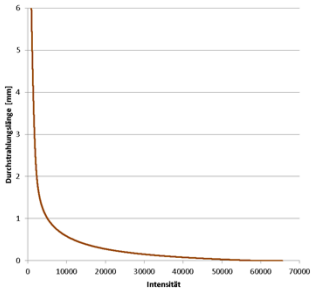
Artefaktkorrektur

Empirische Artefaktkorrektur EAK

- Alle Artefakte (Strahlaufhärtung, Streustrahlung, ...) werden gemeinsam erfasst
- Ansatz: Konsistenz Zusammenhang „Durchstrahlungslänge“ – „Schwächung/Grauwert im Durchstrahlungsbild“
- Durchstrahlungsbilder vor Rekonstruktion korrigiert (Gesamtkorrektur)

Beobachtung → Kennlinie





Artefaktkorrektur

Empirische Artefaktkorrektur EAK

Messdaten CT
(Durchstrahlungsbilder, Volumen)

(Weitere) Messdaten CT
(Werkstück und Lage gleich)

Berechnung der durchstrahlten Längen

Berechnung der Korrekturkennlinie

Korrektur der Messdaten
(Durchstrahlungsbilder)

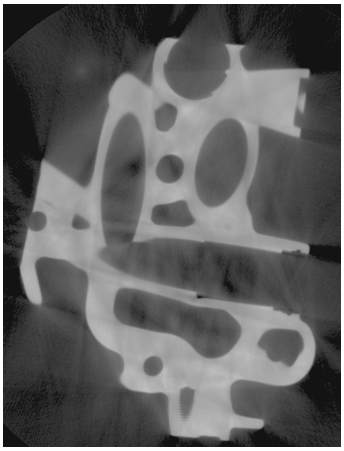
Korrektur (weiterer) Messdaten
(Durchstrahlungsbilder)

Fertig-Berechnung Messdaten
(Volumen, Punktewolke/STL)

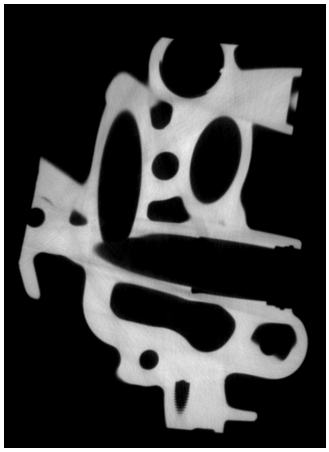
Artefaktkorrektur

Empirische Artefaktkorrektur EAK - Beispiel

unkorrigiert



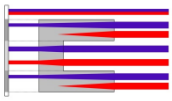
EAK

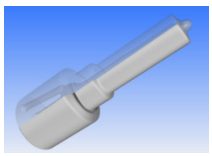


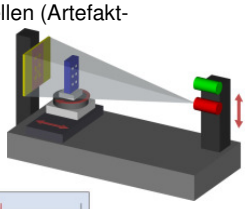
Artefaktkorrektur

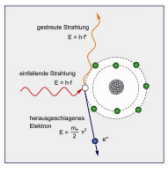
Virtuelle Autokorrektur VAK

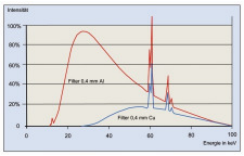
- Simulation → Berechnung aus theoretischen physikalischen Modellen (Artefakt-Entstehung, Werkstückgeometrie, Geräteeigenschaften)











- Artefakte werden <u>einzeln</u> (je Typ) an Meisterteil, Messobjekt oder CAD simuliert und korrigiert (Strahlaufhärtung, Streustrahlung, Kegelstrahlartefakte, und andere)
- Korrektur für weitere CT-Messungen an Durchstrahlungsbildern, Volumen oder Punktwolken anwendbar

Artefaktkorrektur

Virtuelle Autokorrektur VAK

Messdaten CT
(Volumen oder Punktewolke/STL)

Nominaldaten
(CAD, Volumen, STL)

(Weitere) Messdaten CT
(Werkstück und Lage gleich)

Berechnung der Projektionen
mit simulierten Artefakten

Berechnung der Projektionen
ohne simulierte Artefakte

Berechnung der Abweichungen (Artefaktauswirkung)
Abweichungselement, Differenzvolumen

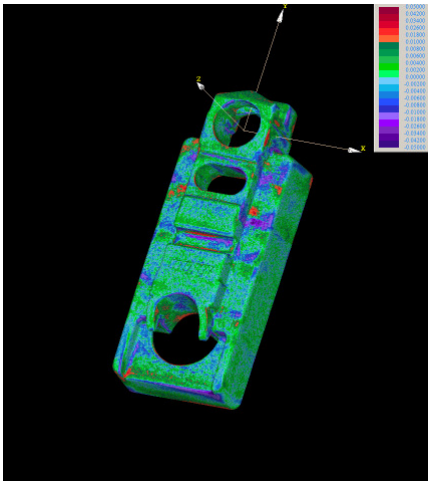
Korrektur der Messdaten
(Volumen oder Punktewolke/STL)

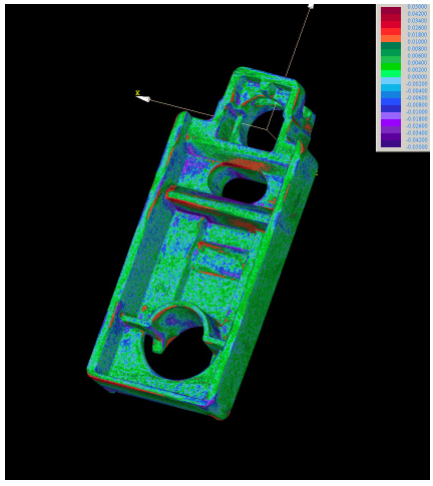
Korrektur (weiterer) Messdaten
(Volumen oder Punktewolke/STL)

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 641 79380 Fax +49 641 7938-719 www.werth.de

Ohne Artefaktkorrektur

Ist-Ist-Vergleich zweier unterschiedlicher Werkstücklagen

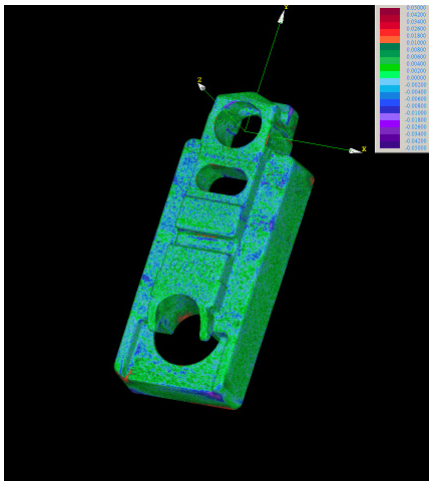


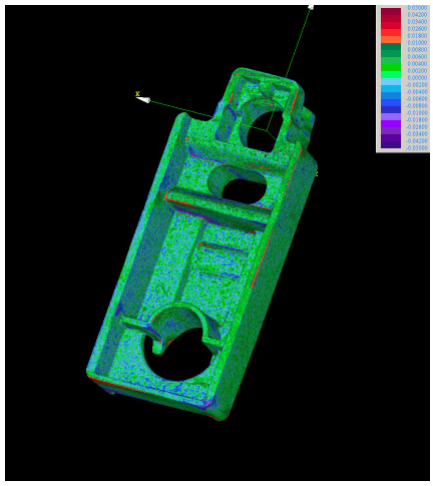


Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 641 79380 Fax +49 641 7938-719 www.werth.de

Mit Artefaktkorrektur VAK

Ist-Ist-Vergleich zweier unterschiedlicher Werkstücklagen





Artefaktkorrektur

Multisensor Autokorrektur

- Einsatz Multisensorik → Berechnung aus dem Vergleich mit taktiler oder optischer Messung

- Alle Artefakte (Strahlaufhärtung, Streustrahlung, ...) werden gemeinsam erfasst und korrigiert
- Korrektur für weiterer CT-Messungen an Punktwolken anwendbar
- Anwendung bei Toleranzen im einstelligen µm Bereich und dichten/großen Werkstücken

Artefaktkorrektur

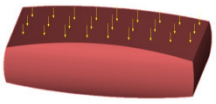
Multisensor Autokorrektur

Messdaten CT
(Punktewolke/STL)

Messdaten taktil, optisch
(Punktewolke)

(Weitere) Messdaten CT
(Werkstück und Lage gleich)

Berechnung der Abweichungen (Artefaktauswirkung)
Abweichungselement

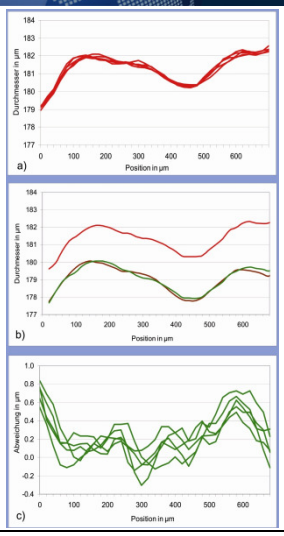


Korrektur der Messdaten
(Punktewolke/STL)

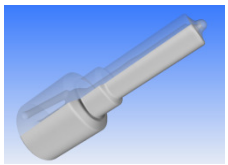
Korrektur (weiterer) Messdaten
(Punktewolke/STL)

Artefaktkorrektur

Multisensor Autokorrektur - Beispiel

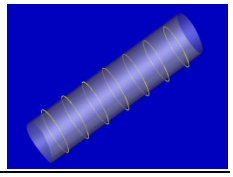


- Reproduzierbarkeit



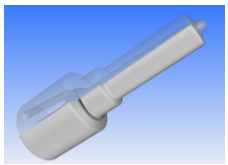
- Messabweichung zwischen CT (rot) und Kalibriermessung mit Werth Fasertaster (braun), sowie korrigierte CT-Messung (grün)

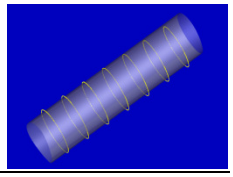
- Verbleibende Abweichung CT nach Anwendung der Werth Autokorrektur



Artefaktkorrektur

Multisensor Autokorrektur - Beispiel



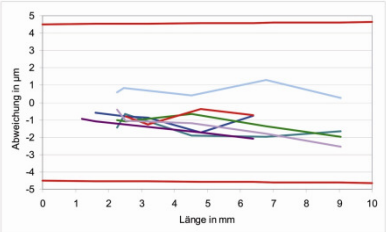


- Messprozesseignung für Durchmessertoleranz: ± 4 µm (cg und cgk > 1.33)
- Messabweichung < 0,4 µm

DAkkS-Kalibrierung für KMG mit CT

Rückführung garantiert

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle



Werth Computertomografie

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

VT-A-11-06-0597_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 641 79380 Fax +49 641 7938-719 www.werth.de