

# Das virtuelle Koordinatenmessgerät VCMM

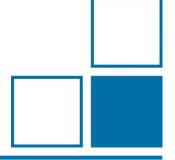
Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit durch numerische Simulation

<u>Daniel Heißelmann</u><sup>a</sup>, Matthias Franke<sup>a</sup>, Lisa Groos<sup>a</sup> Thomas Kistner<sup>b</sup>, Carsten Schwehn<sup>c</sup>, Karin Kniel<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

<sup>b</sup>Carl Zeiss IMT GmbH

<sup>c</sup>Hexagon Metrology GmbH



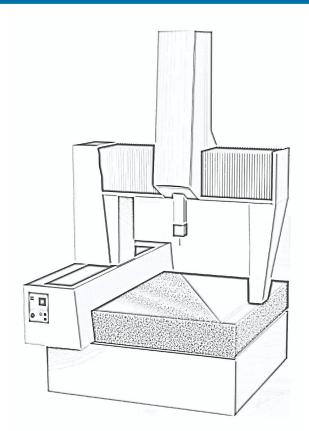
### Gliederung



- Bedeutung der Messunsicherheit in der KMT
- Das Virtuelle KMG: Prinzip und Entwicklung
- Die Überarbeitung des VCMM
- Modelle für Monte-Carlo-Simulationen
- Derzeitiger Stand: Verifikationsphase
- Ausblick

### Koordinatenmessgeräte





- Messgerät zur Bestimmung von 3D-Koordinaten
- Aufeinander aufbauende kartesische Achsen
- Typisches Messvolumen ~1m³
- Evtl. Drehtisch
- Verwendung:
  - Qualitätssicherung in der Fertigung
  - Messung/Kalibrierung komplexer Geometrien

### Koordinatenmessgeräte



- Taktile Antastung
- Sphärisches Antastelement
- Verschiedene Tastkugeln
- Verschiedene Schaftmaterialien
- Mehrfach-Taster-Konstruktionen



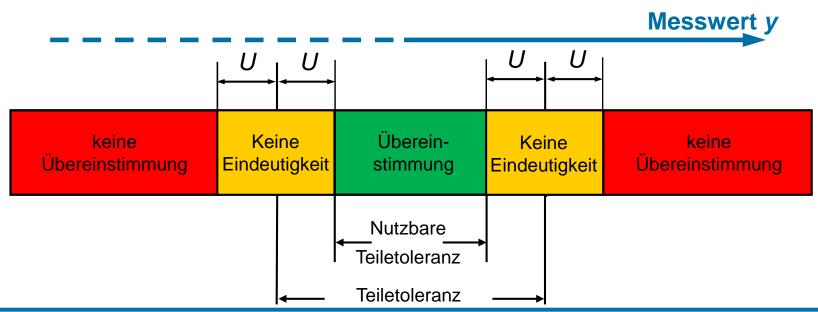


#### Die Rolle der Messunsicherheit



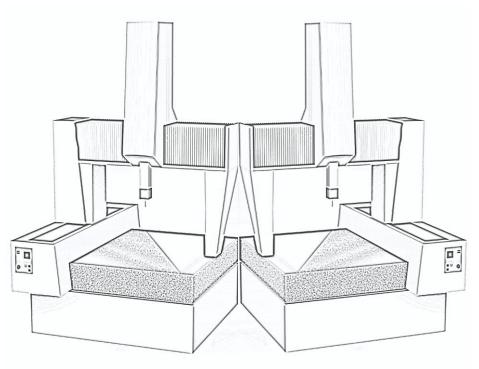
Berücksichtigung von Messwert und Messunsicherheit zur Toleranzausnutzung

- → Entscheidung über Gutteil oder Ausschuss
- Automatisierung und Digitalisierung
- Weitergabe der Messunsicherheit zur automatischen Bewertung



### Der digitale Zwilling





- Beschreibung aller relevanten Eigenschaften durch Modelle
- Erfassung von Eingangsparametern
  - Geeignete Sensoren
  - Abgestimmte Messroutinen
- Für Koordinatenmessgeräte sehr komplex



# Das Virtuelle KMG: Prinzip und Entwicklung

### Prinzip des VCMM



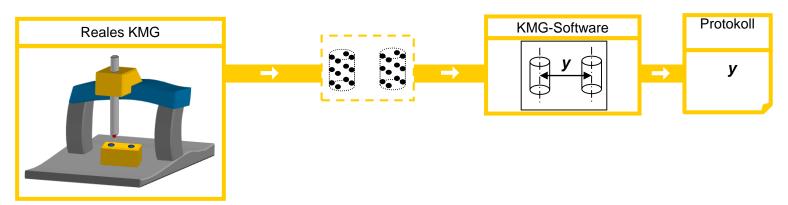
- Ziel: Messunsicherheitsbestimmung für komplexe Messaufgaben
- Weg: Monte-Carlo-Simulationen (MC)
  - Genaue Charakterisierung des Messgerätes und der Messaufgabe
  - ii. Bestimmung der Einflussgrößen auf die MU
  - iii. Durchführung einer Messung
  - iv. Simulation vieler ähnlicher Messungen
  - v. Statistische Auswertung

### Historischer Überblick

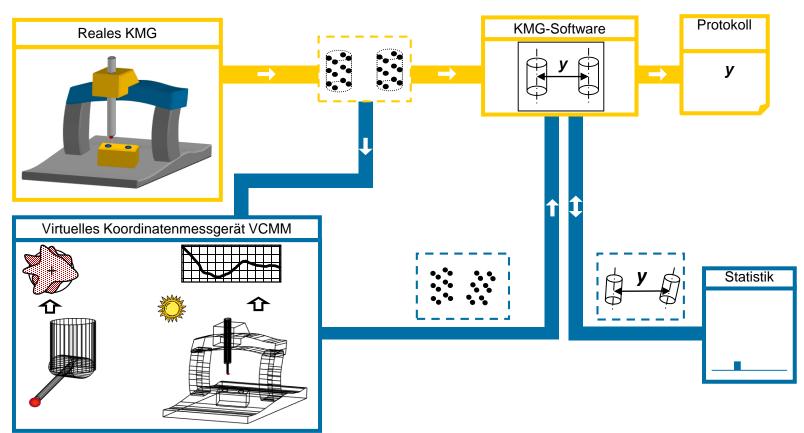


- VCMM-Idee seit 1990er Jahren (Wäldele et al. 1993)
- Erstes Projekt: ab 1994 (EU-gefördert)
- 5 DAkkS-akkreditierte Labore
- Erweiterungen:
  - VCMM Gear (AiF-gefördert)
  - Virtueller Laser Tracker (VLT)
  - Statistikmodul und Abbruchkriterien
- Überarbeitung und Verifikation

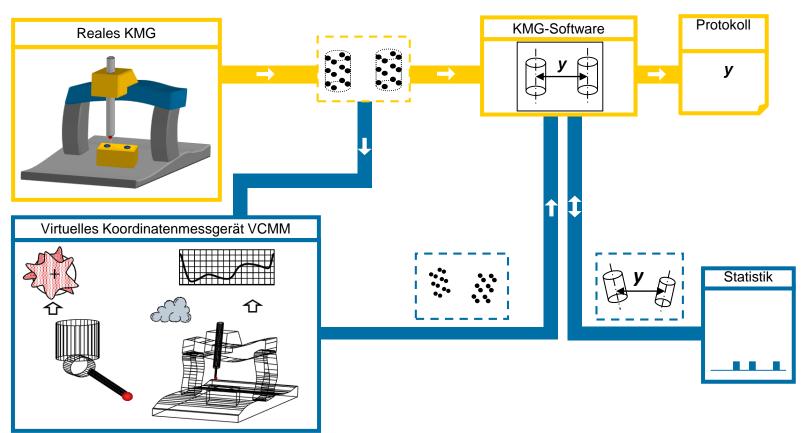




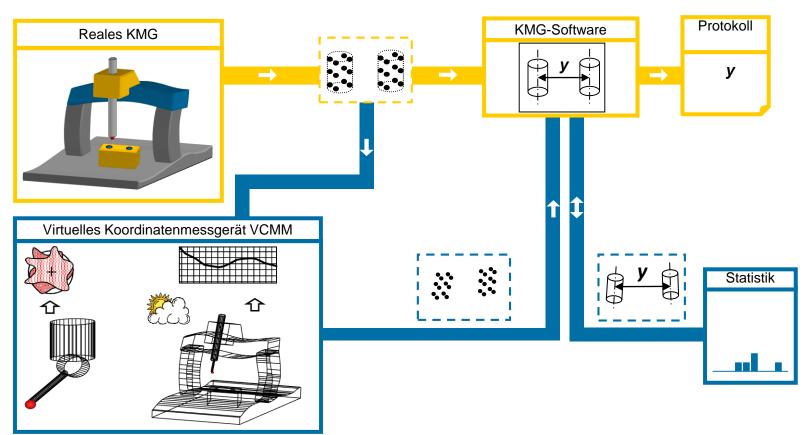




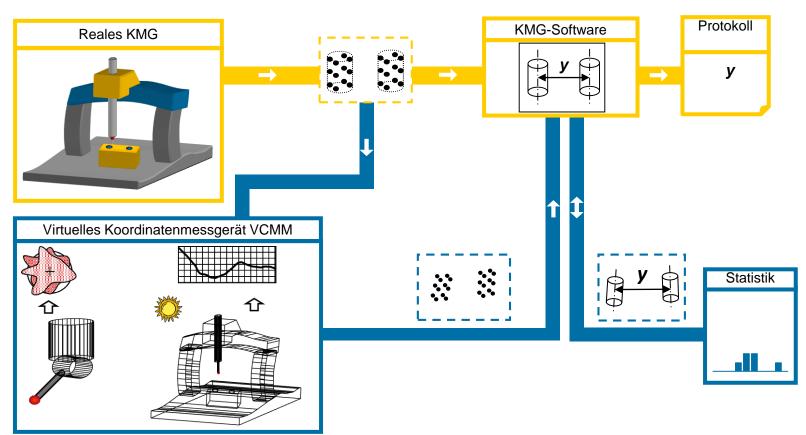




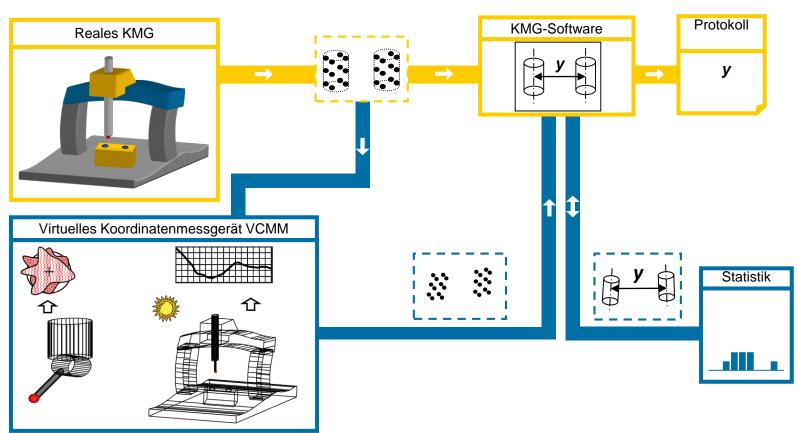




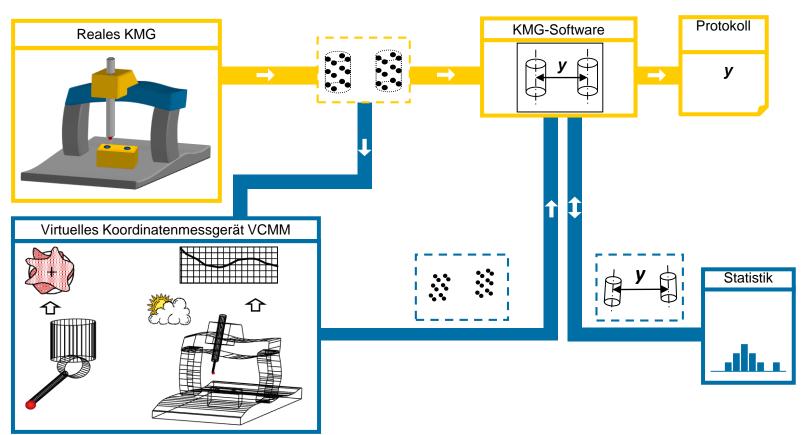




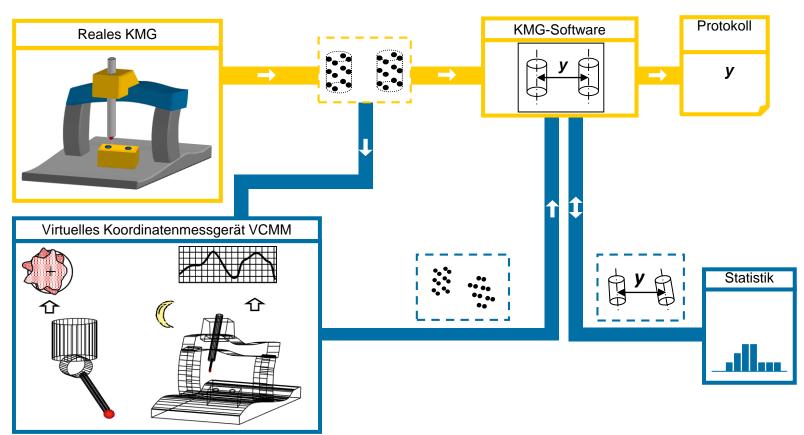




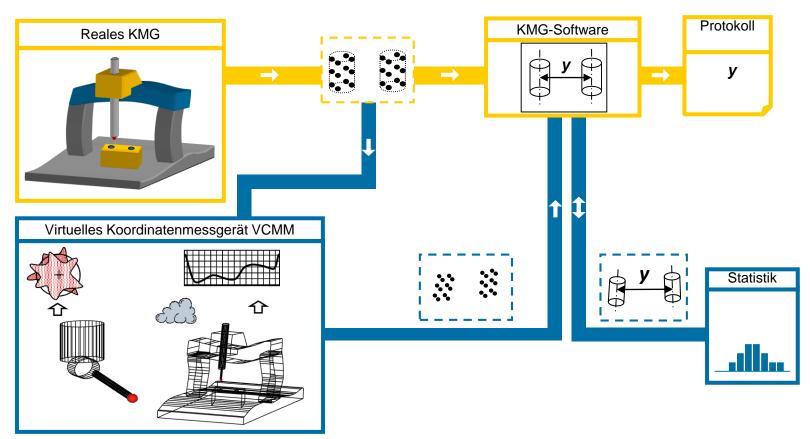




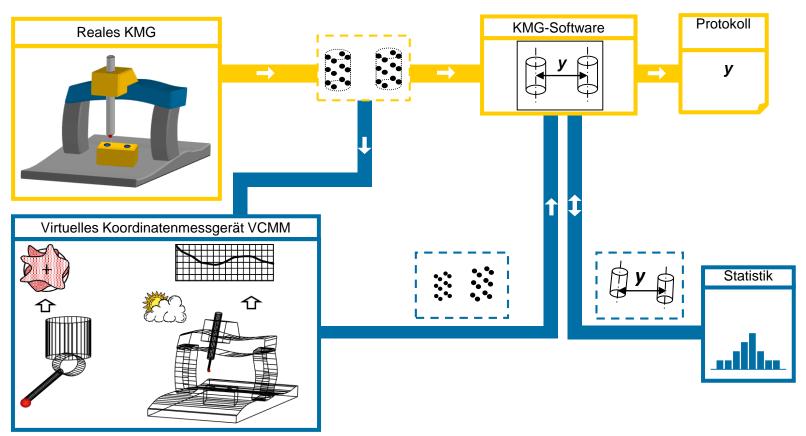




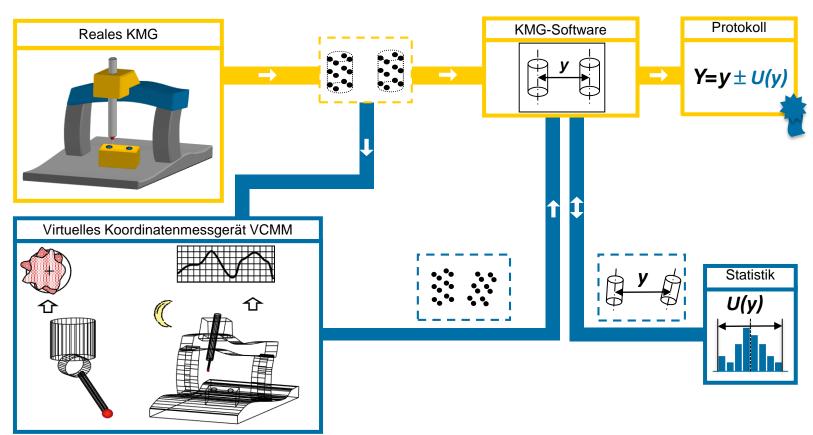












### Erneuerung des VCMM



 Messgeräteentwicklung machte Überarbeitung nötig

- Neue Erkenntnisse über Einflussgrößen
- Anpassung des VCMM-Kernels
- Umstellung auf XML-basierte Struktur

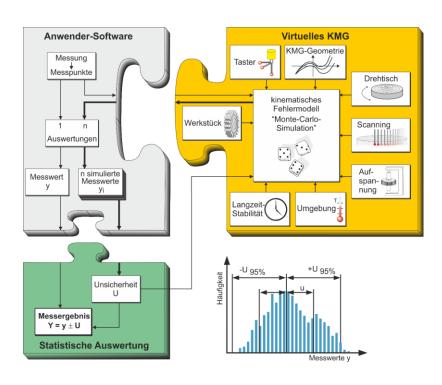
- Überprüfung bestehender Modelle
- Erweiterung um
  - Scanning
  - Tasterwechsel
- Berücksichtigung von
  - Unterabtastung der Form
  - "effektive" Rauheitseinflüsse



### Der VCMM-Kernel: Modelle und Eingangsparameter

### Einflussgrößen





- Modular aufgeteilt (aber kein Baukasten)
- Anpassbar
- Individuell für jedes Gerät
  - von Hersteller und Anwender erfasst
  - → Kalibrierlaboratorien, "High-End"-Anwender
- Allgemein für "Gerätebauart"
  - → von Hersteller bereitgestellt
  - → Massenanwender

### Übergabe der Parameter

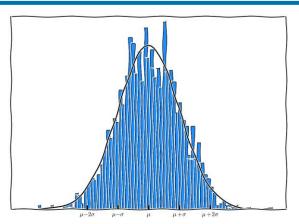


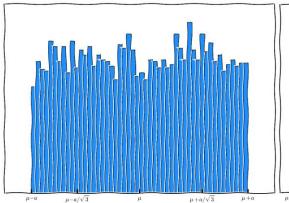
#### Einflüsse:

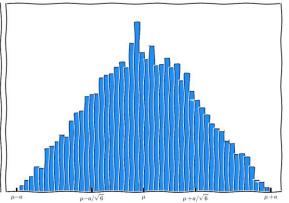
- Wert
- Art der Verteilung
- Parameter der Verteilung

#### Optional:

 Übergabe als Wertetabelle







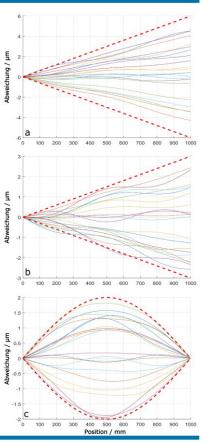
### Statische Geometrieabweichungen



- Beschreibung des KMG durch ein Starrkörpermodell
- Bekannter systematischer Anteil
- Zufällige Beiträge (zur Laufzeit variiert)
- Superposition aller drei kartesischer Achsen

$$\vec{e}_{G_i} = \vec{e}_{GT_i} + \mathbf{E}_{\mathbf{GR_i}} \cdot \vec{p}_i + \mathbf{E}_{\mathbf{GP_i}} \cdot \vec{l} + (1 + s_{GM}) \cdot \vec{p}_i$$

- translatorische und rotatorische Abweichungen
- Längenanschluss

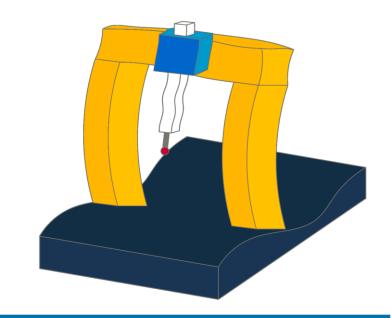


### Thermische Geometrieabweichungen



- Thermische Gradienten
- Änderung der mittleren Temperatur (aus Langzeitbeobachtungen)
  - → Längenausdehnung von Verfahrachsen und Maßstäben (mit und ohne Kompensation)
  - Geradheit, Rechtwinkligkeit, Rotation

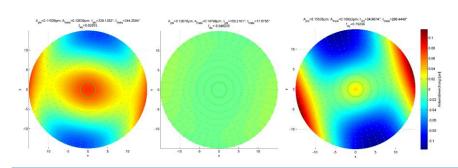
$$\vec{e}_{T_i} = \vec{e}_{TT_i} + \mathbf{E_{TR_i}} \cdot \vec{p}_i + \mathbf{E_{TP_i}} \cdot \vec{l}$$



### Antastabweichungen



- Antastprozess als Quelle für Unsicherheiten
- Für kugelförmige Tastelemente
- Simulation systematischer und zufälliger Beiträge



$$\vec{e}_{P_j}(\vec{x}_i) = (f_{\text{sty}_j} e_{\text{Base}_j} + e_{\text{radial}_j} + e_{\text{random}_i}) \cdot \vec{n}_i + e_{\text{MP}_i} \cdot \vec{t}_j + \vec{e}_{\text{T}_i} + \mathbf{R}_j \cdot \vec{l}$$

#### Enthält

- Taststifteinflüsse
- Grundcharakteristik des Tastsystems
- Radiusabweichung der Tastkugel
- einen zufälligen Beitrag
- Mehrfachtaster-Ortsabweichung
- Tasterwechsel

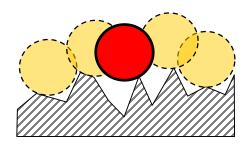
### Werkstückeinfluss



- Thermische Ausdehnung
- Isotrope oder anisotrope
  Ausdehnungskoeffizienten

$$\begin{aligned} e_{\mathrm{P},x} &= p_x \left[ \alpha_{\mathrm{W},x} \, \Delta T_{\mathrm{W},x} + \Delta \alpha_{\mathrm{W},x} \left( T_{\mathrm{W},x} - 20^{\circ} \mathrm{C} \right) \right] \\ e_{\mathrm{P},y} &= p_y \left[ \alpha_{\mathrm{W},y} \, \Delta T_{\mathrm{W},y} + \Delta \alpha_{\mathrm{W},y} \left( T_{\mathrm{W},y} - 20^{\circ} \mathrm{C} \right) \right] \\ e_{\mathrm{P},z} &= p_z \left[ \alpha_{\mathrm{W},z} \, \Delta T_{\mathrm{W},z} + \Delta \alpha_{\mathrm{W},z} \left( T_{\mathrm{W},z} - 20^{\circ} \mathrm{C} \right) \right] \end{aligned}$$

- Rauheit (rein stochastisch)
- Welligkeit



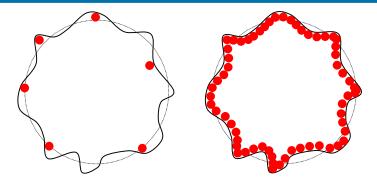
- Rauheitsparameter werden experimentell für Tastkugel-Werkstück-Kombination ermittelt
- → "effektive Rauheit"

### **Formabweichungen**



- Formabweichungen des Werkstücks oder Merkmals
- Bei unvollständiger Prüfung: Unterschätzung der Messunsicherheit
- Verzerrung durch Überlagerung von harmonischen Schwingungen

$$\overline{x}_i = x_i + \sum_{k=1}^m A_k \cdot \cos\left(\varphi_k - \frac{k \cdot x_i}{\lambda_k}\right)$$



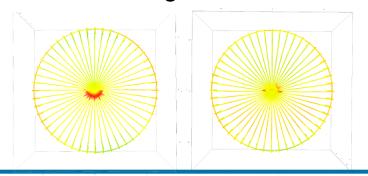
- Simulation mit Überabtastung möglich
- Differenzen gehen in Berechnung der Messunsicherheit ein

### **Scanning**



- Weitere Unsicherheitsbeiträge durch Scanning
- Evtl. Unterschiede für bekannte oder unbekannte Konturen
- Einflüsse des Tastkopfes
- Dynamik der Gerätestruktur
- Systematische und zufällige Abweichungen etwa gleich groß

- Zufällige Abweichungen senkrecht zur Werkstückoberfläche
- Empirisch an Prüfkörpern ermittelt (für Taster, Geschwindigkeit und Antastkraft)
- Prüfkörper: reale Oberfläche und kalibriertes Kugelnormal



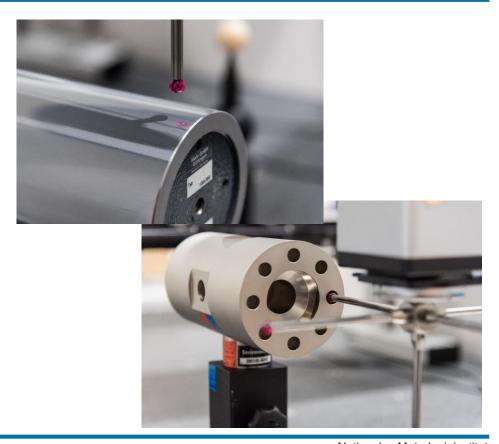


### Verifikation: Vergleichsmessungen an verschiedenen Prüfkörpern

### Vergleichsmessungen



- Leitung & Auswertung durch PTB
- 3 weitere Teilnehmer:
  - Carl Zeiss IMT
  - Hexagon Metrology
  - Eumetron
- 8 verschiedene KMG
  - Verschiedene Größen
  - Verschiedene Genauigkeitsklassen



### Prüfkörper I: Kontrollsäule



- Vergleich gegen Kalibrierwerte für
  - Form
  - Maße



#### Einzelpunkte:

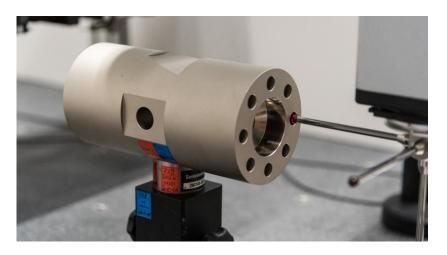
- Auswertung im Vergleich zu den Kalibrierdaten
- keine Ausreißereliminierung Scanning:
  - Auswertung im Ringvergleich
  - Festlegung der Scanparameter (Ausreißerbehandlung, Filter, Punktdichte)
  - Geschwindigkeit und Antastkraft (Standardwerte für KMG)

Rauheitseinfluss

### Prüfkörper II: Multi-Feature Check



- Aluminium-Prüfkörper der PTB
- Werkstück-ähnlich
- Viele Merkmale
- Bereits für VCMM genutzt
- Auswertung im Ringvergleich



#### Einzelpunkte:

Abgestimmter Prüfplan
 Scanning:

- Positionen entsprechend EP-Prüfplan
- Festlegung der Scanparameter (Ausreißerbehandlung, Filter, Punktdichte)
- Geschwindigkeit und Antastkraft (Standardwerte für KMG)

Rauheitseinfluss

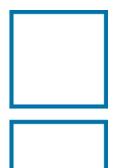
### Verifikation



Messungen sind abgeschlossen

Anonymisierte Auswertung durch PTB (läuft derzeit)

- Nach erfolgreicher Verfikation:
  - Akkreditierung auf Verfahren kann ab Mitte des Jahres bei der DAkkS bantragt werden



## Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Dr. Daniel Heißelmann

Telefon: 0531 592-5321

E-Mail: daniel.heisselmann@ptb.de

www.ptb.de

Stand: 03/18



### Zusammenfassung



#### Ein modernes VCMM steht zur Verfügung:

- Scanning, Tasterwechsel, Formeinflüsse und Rauheit werden berücksichtigt
- Verifikation wird in 04/2018 abgeschlossen
- Vorbereitung zur Akkreditierfähigkeit durch DAkkS

#### In Zukunft:

- Drehtisch-Modul (Verifikation der Modelle nötig)
- Vereinsgründung "VCMM e.V."

