

Messunsicherheit von Prüfmerkmalen mit KMG automatisiert und praxisgerecht ermitteln

Theo Hageneý

AfM
ACCURACY FOR MACHINES

eumetron

1

Vita

Dipl. Ing (FH) Theo Hageneý

Beschäftigt sich seit 40 Jahren intensiv mit den Themen „Genauigkeit von Koordinatengeräten“ und „Messunsicherheit von Prüfmerkmalen“

- Studium der Elektrotechnik
- 10 Jahre Technischer Service und Anwendungstechnik für KMG bei der Fa. Zeiss
- 30 Jahre geschäftsführender Gesellschafter der Firmen eumetron und AfM mit folgenden Schwerpunkten:
 - Kalibrierung von Referenznormalen und Referenzwerkstücken
 - Entwicklung von Prüfkörpern für die Koordinatenmesstechnik
 - Entwicklung von Justageverfahren für die Optimierung von KMG
 - Aktive Mitarbeit in Normungsausschüssen

2

Firmenvorstellung

DAkKS Kalibrierlabor für Referenznormale und Referenzwerkstücke

- Marktführer bei DAkKS-Kalibrierungen von Referenznormalen und Referenzwerkstücken
- Anzahl DAkKS-Kalibrierungen pro Jahr: ca. 12 000
- Davon 60 % für Deutschland; 25 % Europa; 15 % Amerika, 10% Asien und ROW
- 35 Mitarbeiter
- Kleinste Unsicherheiten:

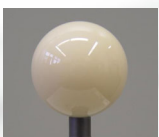
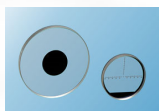
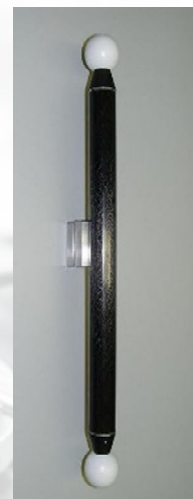
Länge (taktil): $U = 0,06 \mu\text{m} + 0,16 \times 10^{-6} \times L$

Länge (optisch): $U = 0,09 \mu\text{m} + 0,20 \times 10^{-6} \times L$

Form (Rundheit): $U = 0,01 \mu\text{m} + 0,05 \times 10^{-6} \times \text{RON t}$

3

Firmenvorstellung



Quelle: eumetron

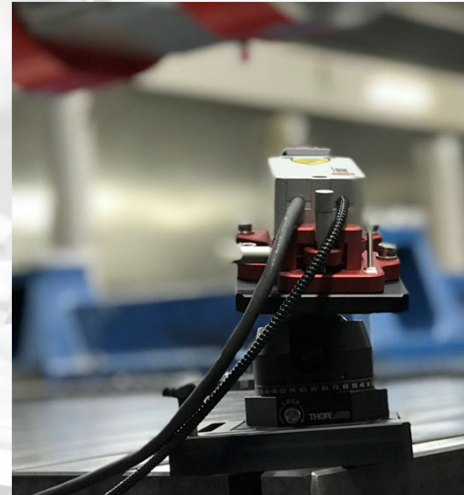
4

Firmenvorstellung**Volumetrische Kompensation von WZM**

Bis zu 80% genauer fertigen und somit Zeit und Geld für Nacharbeit sparen.

DIN EN ISO 10360 Annahmeprüfung von WZM

Sicher und zuverlässig auf der Werkzeugmaschine messen.

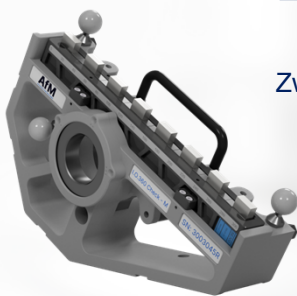


Quelle: AfM

5

Firmenvorstellung

Zwischenprüfung mit kombinierten Prüfkörpern für KMG nach DIN EN ISO 10360-2 und 10360-5

**I.O.360 Check - medium**

Stufenendmaß	SE 300 mm, 20er Stufeung
Ring	50 mm
Kugel	25 mm
Option Rundtisch	ja

I.O.360 Check - large

Stufenendmaß	Adaptierbar für SE von Koba, ITS und Mitutoyo von 300 bis 700 mm
Ring	50 mm
Kugel	25 mm
Option Rundtisch	ja



Quelle: AfM

6

Einleitung

Anlass dieser Präsentation ist die Vorstellung einer automatisierten und praxisgerechten Methode zur Ermittlung der Messunsicherheit von Prüfmerkmalen mit KMG

Die Firma AfM GmbH hat eine neue Methode - *VCMM-User* genannt - entwickelt, mit dem Anwender von Koordinatenmessgeräten die Messunsicherheit von Prüfmerkmalen ihrer Produkte ermitteln können.

Die Firma eumetron hat als DAkkS-Kalibrierlabor die Methode *VCMM-User* validiert.

Rückführbare Messergebnisse sollen mit der Software „VCMM-User“ zur Routine werden

7

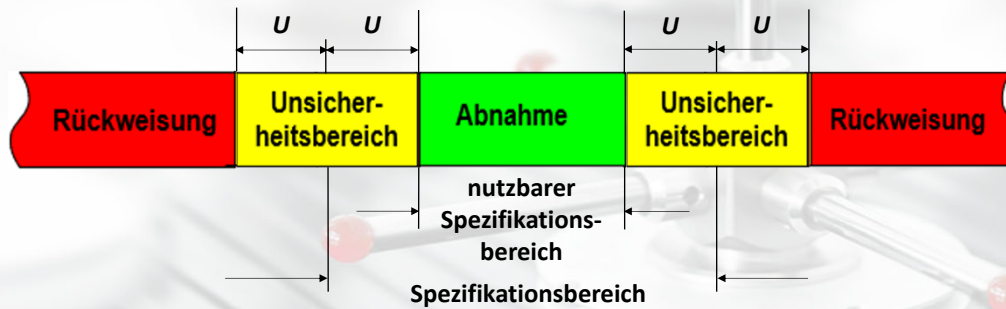
Inhalt

- Messunsicherheit – Nutzen und Wichtigkeit
- Ermittlung der Messunsicherheit – Bisheriger Stand der Technik
- Die Simulationsmethode – Basierend auf dem *VCMM-Simulator* der PTB
- Einfluss auf das Messergebnis – Intelligente Nutzung von Expertenwissen
- Fazit – Bewertung der *VCMM-User* Methode
- Validierung der *VCMM-User* Methode – Wichtig für die Akzeptanz
- Ausblick – Weitere Anwendungen der *VCMM-User* Methode

8

Messunsicherheit – Nutzen und Wichtigkeit

Einfluss der Messunsicherheit auf die nutzbare Fertigungstoleranz nach ISO 14253-1



Quelle: AUKOM

9

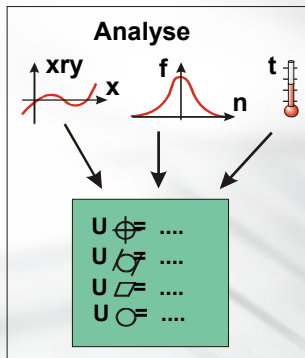
Messunsicherheit – Nutzen und Wichtigkeit

- Die Messunsicherheit ist ein Maß für die „Qualität“ eines Messwertes und erzeugt in Kombination mit dem Messwert ein bewertbares Messergebnis
„Messergebnis = Messwert plus zugeordnete Messunsicherheit“
- Die Messunsicherheit muss für jedes Prüfmerkmal individuell bestimmt werden
- Wareneingangs- und Ausgangsprüfung (Kunden – Lieferanten Beziehung)
- Vermeidung von Angsttoleranzen
- Grundlage für den wirtschaftlich vorteilhaften Einsatz von Messgeräten
- Voraussetzung bei Entscheidungen im Produktionsprozess

10

Ermittlung der Messunsicherheit – Bisheriger Stand der Technik

Analytische Unsicherheitsbilanz
mit separaten Unsicherheitsbeträgen
(VDI/VDE 2617 Blatt 11)

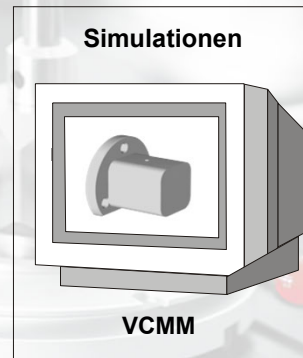


Quelle: AUKOM

Experimentelle Methode
mit der Messung von kalibrierten Werkstücken
(VDI/VDE 2617 Blatt 8)



Simulation des Messprozesses
auf Basis seiner Einflussgrößen
(VDI/VDE 2617 Blatt 7)

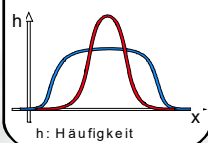


11

Ermittlung der Messunsicherheit - Erstellung einer analytischen Unsicherheitsbilanz

1 Modellgleichung

Mathematisches Modell der Messung
 $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$
Jede Ausprägung x_i der Modellgrößen X_i ist mit Unsicherheit behaftet. Die Standardunsicherheit $u(x_i)$ ist definiert als Standardabweichung der Messwerte bei Messung von x_i unter Wiederholbedingungen.



Quelle: AUKOM

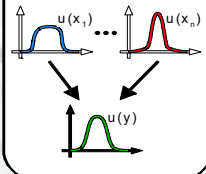
2 Messung

Bestimmen von Schätzwerten x_i für die Modellgrößen X_i
Berechnen des Messwerts
 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$



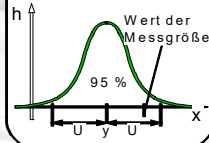
3 Standardunsicherheit

Ermitteln der Standardunsicherheit
 $u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$
Errechnet wird, wie sich die Unsicherheiten der einzelnen Modellgrößen auf die Unsicherheit des Gesamtergebnisses auswirken.



4 Erweiterte Unsicherheit

Berechnen der erweiterten Unsicherheit
 $U = k \cdot u(y)$
Der Erweiterungsfaktor k (2 $\leq k \leq 3$) kennzeichnet die Ausdehnung des Vertrauensbereichs, der dem Ergebniswert zugeordnet werden kann. $k = 2$ entspricht einem Konfidenzbereich zum Vertrauensniveau 95 %.

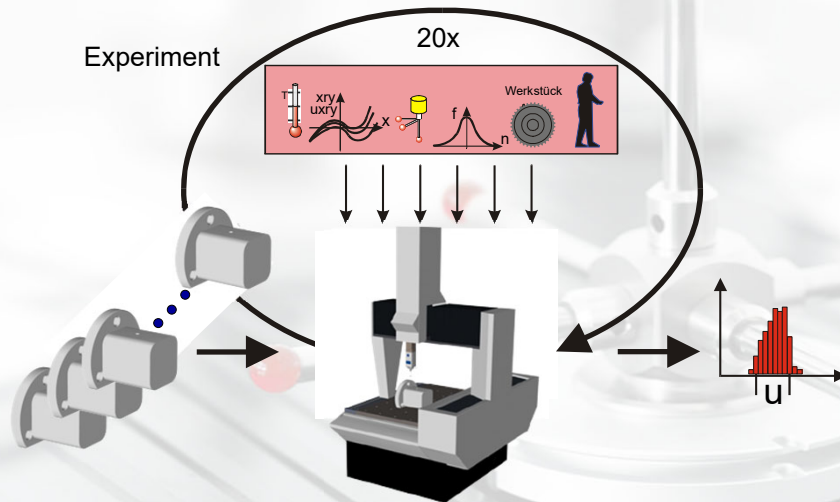


5 Ergebnisangabe

Zusätzlich zum Messwert ist im Ergebnis die erweiterte Unsicherheit anzugeben
 $Y = y \pm U$
 y ist der beste Schätzwert für die Messgröße Y , wobei $y-U$ bis $y+U$ einen Bereich abdeckt, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit den unbekanntem Wert der Messgröße enthält. Die Angabe der Unsicherheit ist vorgeschrieben z.B. in ISO 10012, ISO 14253-1
Bsp.: Ergebnis einer Längenmessung
 $x = (100,26 \pm 0,04) \text{ mm}$

12

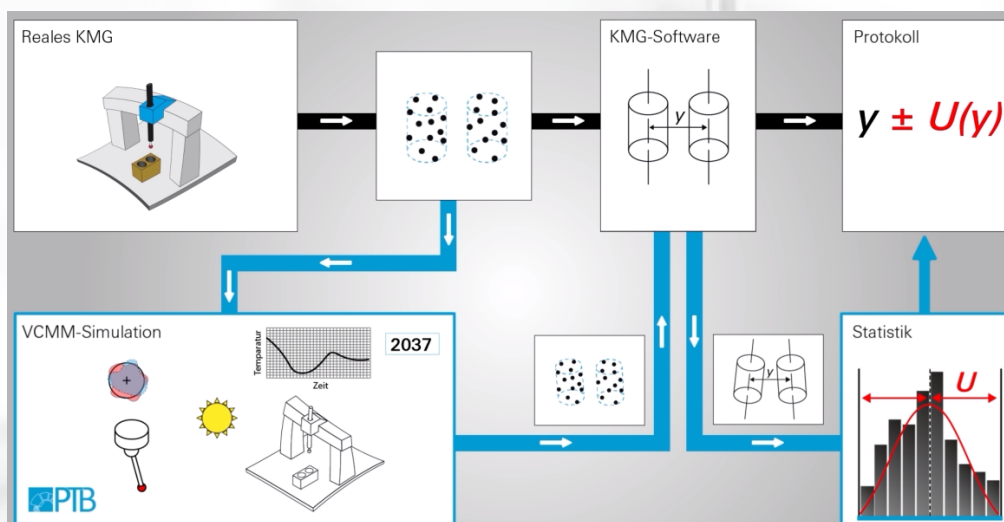
Ermittlung der Messunsicherheit – Experimentelle Methode



Quelle: AUKOM

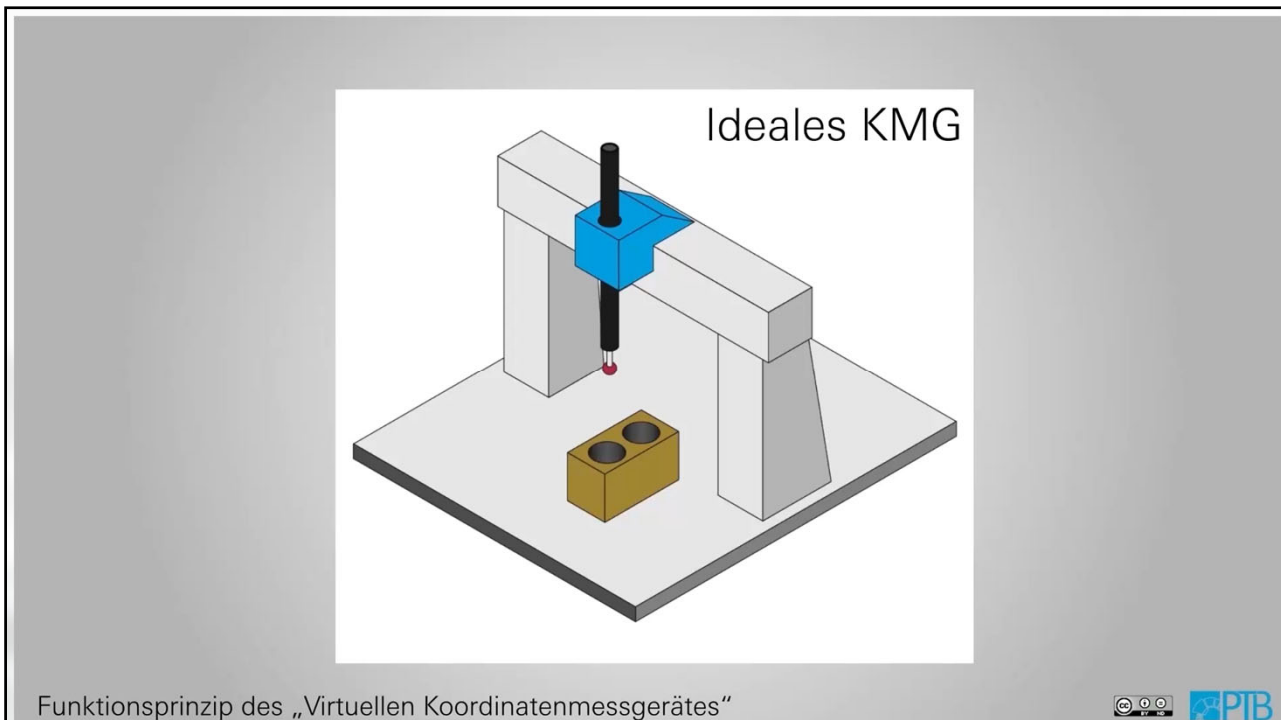
13

Ermittlung der Messunsicherheit – Simulation des Messprozesses



Quelle: PTB

14

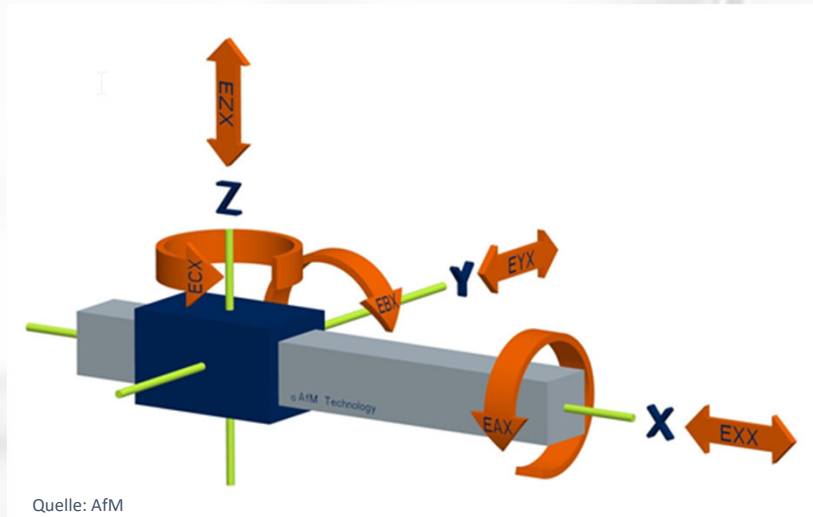


Bewertung der 3 verschiedenen Methoden zur Unsicherheitsermittlung

- **Erstellung einer Unsicherheitsbilanz**
=> Setzt eine hohe messtechnische Fachkompetenz der Anwender voraus
Es werden nicht alle Einflussgrößen berücksichtigt
- **Experimentelle Methode**
=> Voraussetzung sind kalibrierte Werkstücke
- **Simulationsmethode (VCMM)**
=> Aufwendige Ermittlung der Einflussgrößen
- **Neue Lösung „VCMM User“**
=> Simulationsmethode ohne aufwendige Ermittlung der Einflussgrößen und
daher mit geringem Aufwand für den Anwender

Einflussgröße - KMG-Geometrie (Restfehler)

Beispielhafte Darstellung der 6 Einflüsse der Führungsabweichungen einer Achse



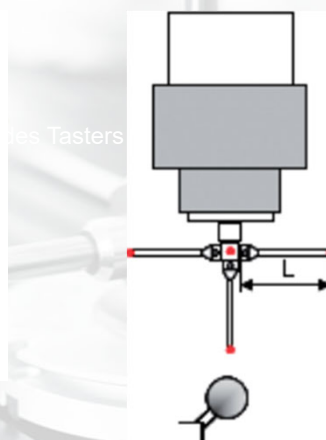
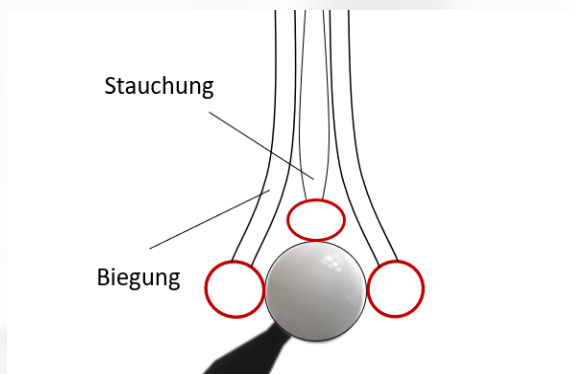
Quelle: AfM

17

Einflussgröße - Tastereigenschaften und Tasteroffset (Restfehler)

Steifigkeit des Tasters

Offset der Taster zueinander

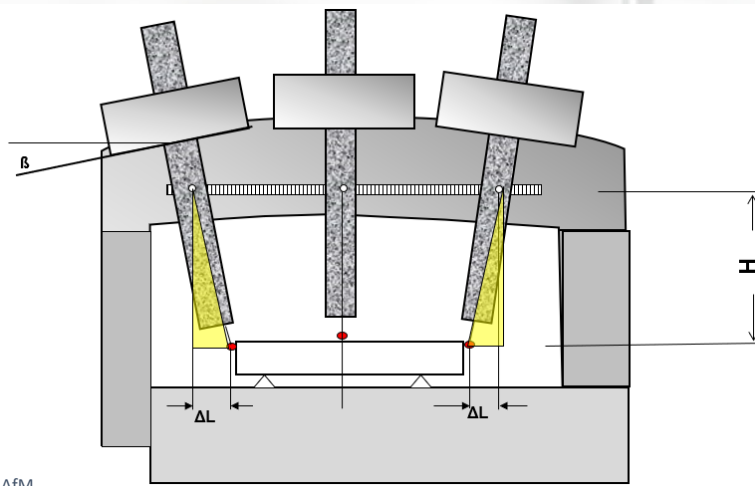


Quelle: AfM

18

Einflussgröße Temperatur

Beispiel: Einfluss des räumlichen Temperaturgradienten in Z-Richtung auf die Traverse

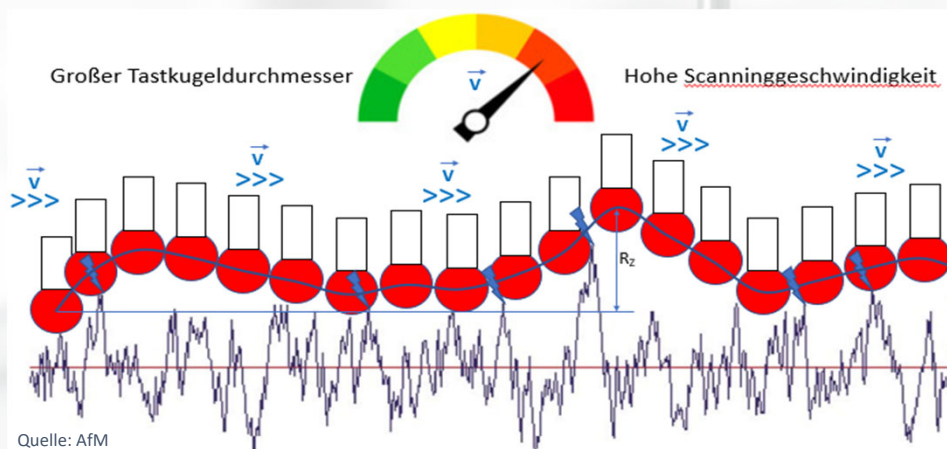


Quelle: AfM

19

Einflussgröße - Rauheit der Werkstückoberfläche

Je größer die Tastkugel und je höher die Scanninggeschwindigkeit, desto kleiner der Rauheitseinfluss und desto größer die Unsicherheit der Messung

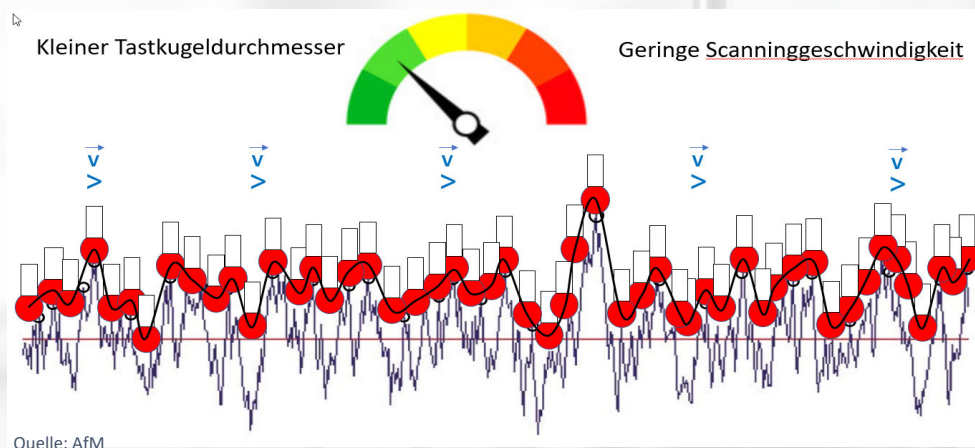


Quelle: AfM

20

Einflussgröße Rauheit der Werkstückoberfläche

Je kleiner die Tastkugel und je geringer die Scanninggeschwindigkeit, desto größer der Rauheitseinfluss und desto kleiner die Unsicherheit der Messung



21

Statische Kenngrößen – Information der Einflussgrößen (einmalig erforderlich)

Einflussgrößen auf die Unsicherheit	Einflussgrößen für das VCMM auf Basis einer Datenbank und Expertenwissen
KMG-Typ: Messvolumen, verwendete Werkstoffe	Berechnung der Auswirkung von Länge und Richtung der Achsen X, Y und Z und der verwendeten Werkstoffe des KMG bzw. der Maßstäbe
KMG-Geometrie: Herstellerspezifikation Längenmessabweichung $E_{L,MPE}$ (DIN EN ISO 10360-2) Kinematisches Modell des KMG	Berechnung der 21 Fehlerkomponenten entsprechend dem kinematischen Modell des KMG: 3 x Position, 6 x Geradheit 9 x Rotation, 3 x Rechtwinkligkeit (Abbildung Blatt 17)
Tastersystem-Wechseleinrichtung: Messkopfsystem	Berechnung des Einflusses der Tastersystem-Wechseleinrichtung auf die Translation und Rotation der eingesetzten Taster
Temperaturbedingungen: Klasseneinteilung A bis D (VDI/VDE 2627 Blatt 1)	Berechnung des Einflusses der Abweichung von der Bezugstemperatur und der räumlichen und zeitlichen Temperaturgradienten des KMG bzw. der Maßstäbe (Abbildung Blatt 19)
Drift: Klasseneinteilung A bis D (VDI/VDE 2627 Blatt 1)	Berechnung des translatorischen und rotatorischen Einflusses der Längenänderung zwischen Werkstück und KMG-Nullpunkt während der Messung

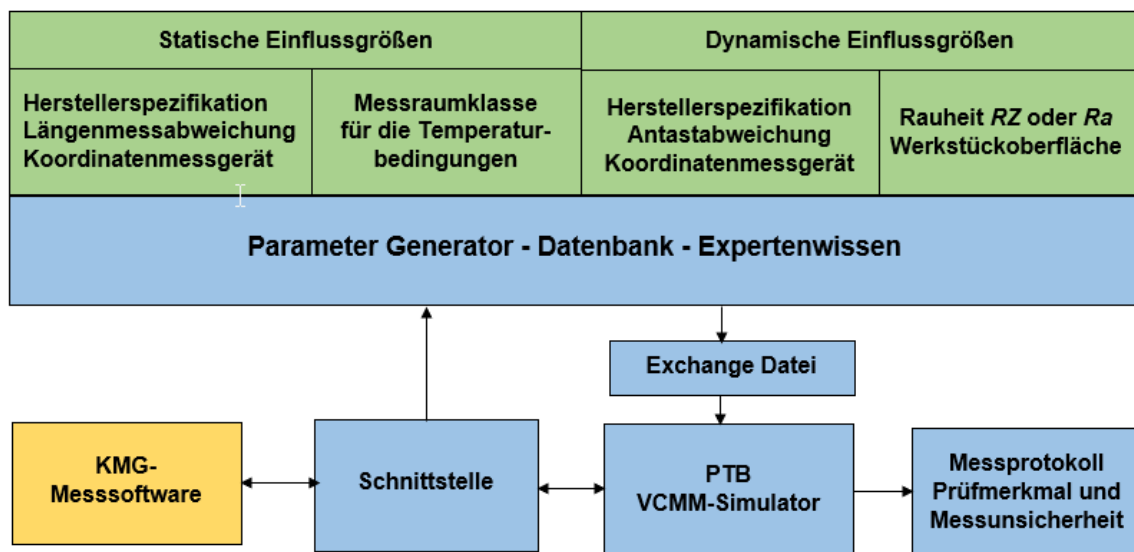
22

Dynamische Kenngrößen – Information der Einflussgrößen (vom Prüfplan abhängig)

Einflussgrößen auf die Unsicherheit	Einflussgrößen für das VCMM auf Basis einer Datenbank und Expertenwissen
Tastereigenschaften: Herstellerspezifikation Antastabweichung $P_{Form,Sph,EP,MPE}$ und $P_{Form,Sph;Scan,MPE}$ Tastkugeldurchmesser, Länge des Tasters, Steifigkeit des Tasters	Berechnung der radialen und direktionalen Abweichungen, sowie Reproduzierbarkeit der eingemessenen Taster für Einzelantastungen und im Scanningverfahren (Abbildung 1 Blatt 18)
Tasteroffset: Herstellerspezifikation Mehrfachtasterortsabweichung $L_{Dia,MPE}$ Länge der Taster, Offset der Taster	Berechnung des Einflusses des Offsets abhängig von der Länge der eingesetzten Taster zueinander (Abbildung 2 Blatt 19)
Werkstück: Oberflächeneigenschaft des Werkstücks Antastparameter	Berechnung des Einflusses des Rauheitskennwertes Rz oder Ra der Werkstückoberfläche, des Tastkugeldurchmessers, und der Scanninggeschwindigkeit (Abbildungen Blatt 20 und 21)
Werkstück: Ausdehnungsverhalten des Werkstücks Klasseneinteilung A bis D (VDI/VDE 2627 Blatt 1)	Berechnung des Einflusses des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten Alpha, seiner Unsicherheit, der absoluten Temperatur und des zeitlichen Temperaturgradienten des Werkstücks

23

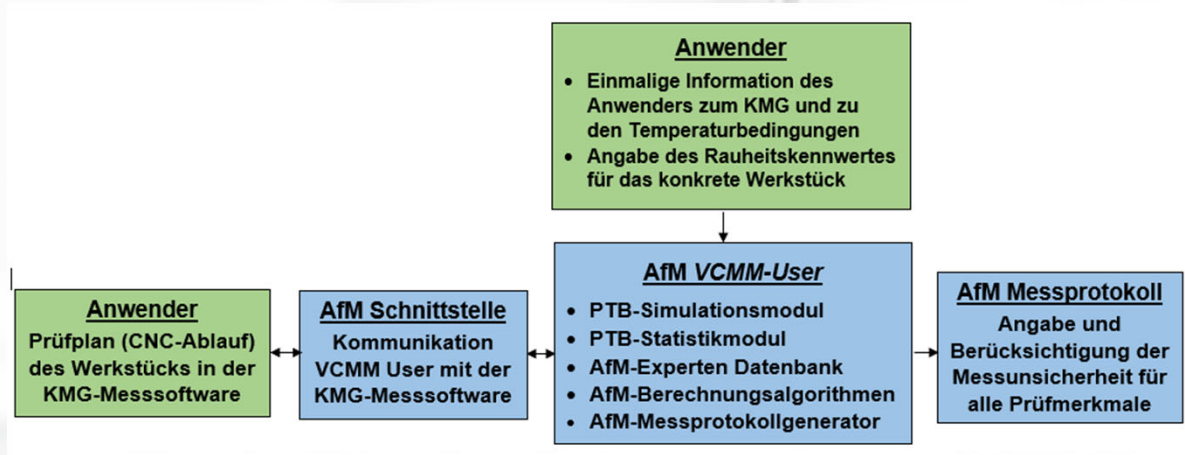
Funktionsweise VCMM-User – Parametergenerator und VCMM-Simulator



Quelle: AfM

24

VCMM-User – Automatisiert und Praxisgerecht - Übersicht



Quelle: AfM







25

Fazit – Bewertung der VCMM-User Methode

- Die Messunsicherheiten von Prüfmerkmalen werden für ein konkretes Werkstück und für ein konkretes KMG mit den Umgebungsbedingungen berechnet. Dies ist nur einmalig pro Prüfplan und KMG erforderlich.
- Die Messunsicherheiten beziehen sich auf Grenzwerte und sind daher beim VCMM-User höher, als wenn die Einflussgrößen wie beim VCMM eingemessen werden.
- Keine Kenntnisse und Erfahrungen bezüglich der Ermittlung von Messunsicherheiten notwendig und daher sehr praxisgerecht einsetzbar
- Darstellung im Messprotokoll wählbar:
 - ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit auf die Toleranzen
 - mit Berücksichtigung aus Sicht des Lieferanten
 - mit Berücksichtigung aus Sicht des Abnehmers









26

Messprotokoll ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit

Messprotokoll <u>ohne</u> Berücksichtigung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit							
	Istwert	Sollwert	Messunsicherheit	Obere Tol.	Untere Tol.	Abweichung	Status
	Distanz 200,00332 mm	200,00000 mm	0,00054 mm	+0,00400 mm	-0,00400 mm	+0,00332 mm	i.O.
	Parallelität 0,00453 mm	0,00000 mm	0,00085 mm	+0,00700 mm	0,00000 mm	+0,00453 mm	i.O.
	Rechtwinkligkeit 0,00412 mm	0,00000 mm	0,00124 mm	+0,00500 mm	0,00000 mm	+0,00412 mm	i.O.
	Position 0,00543 mm	0,00000 mm	0,00236 mm	+0,00500 mm	0,00000 mm	+0,00543 mm	n.i.O.
	Konzentrität 0,00365 mm	0,00000 mm	0,00120 mm	+0,00500 mm	0,00000 mm	+0,00365 mm	i.O.
	Ebenheit 0,00232 mm	0,00000 mm	0,00100mm	+0,00300 mm	0,00000 mm	+0,00232 mm	i.O.
	Rundheit 0,00135 mm	0,00000 mm	0,00038 mm	+0,00200 mm	0,00000 mm	+0,00132 mm	i.O.
	Durchmesser 12,00135 mm	12,00000 mm	0,00022 mm	+0,00200 mm	-0,00200 mm	+0,00135 mm	i.O.

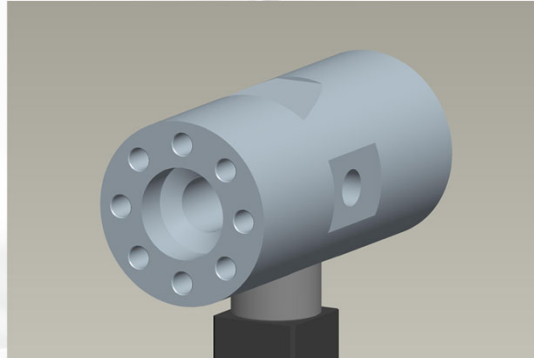
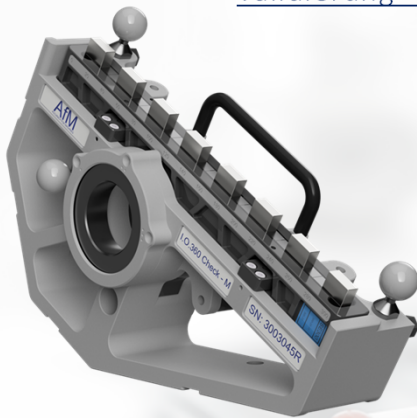
27

Messprotokoll mit Berücksichtigung der Messunsicherheit

Messprotokoll <u>mit</u> Berücksichtigung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit							
	Istwert	Sollwert	Messunsicherheit	Obere Tol. inkl. Messunsicherheit	Untere Tol. inkl. Messunsicherheit	Abweichung	Status
	Distanz 200,00332 mm	200,00000 mm	0,00054 mm	+0,00346 mm	-0,00346 mm	+0,00332 mm	i.O.
	Parallelität 0,00453 mm	0,00000 mm	0,00085 mm	+0,00615 mm	0,00000 mm	+0,00453 mm	i.O.
	Rechtwinkligkeit 0,00412 mm	0,00000 mm	0,00124 mm	+0,00376 mm	0,00000 mm	+0,00412 mm	n.i.O.
	Position 0,00543 mm	0,00000 mm	0,00236 mm	+0,00264 mm	0,00000 mm	+0,00543 mm	n.i.O.
	Konzentrität 0,00365 mm	0,00000 mm	0,00120 mm	+0,00380 mm	0,00000 mm	+0,00365 mm	i.O.
	Ebenheit 0,00232 mm	0,00000 mm	0,00100mm	+0,00200 mm	0,00000 mm	+0,00232 mm	n.i.O.
	Rundheit 0,00135 mm	0,00000 mm	0,00038 mm	+0,00162 mm	0,00000 mm	+0,00132 mm	i.O.
	Durchmesser 12,00135 mm	12,00000 mm	0,00022 mm	+0,00178 mm	-0,00178 mm	+0,00135 mm	i.O.

28

Validierung – Vergleich VCMM zu VCMM-User



Validierung mittels Einhaltung des Vergleichsfaktors V für die Prüfmerkmale von Kugel, Stufenendmaß und Multi-Feature-Check (MFC)

$$V = \frac{U_{VCMM}}{U_{VCMM \text{ User}}} < 1$$

Quelle: eumetron

29

Validierung – Vergleich VCMM zu VCMM-User

Normal	Messart	Prüfmerkmal	Symbol	Norm
Kugel	Scanning	Formabweichung	<i>THP</i>	DIN EN ISO 10360-5
Kugel	Scanning	Maßabweichung	<i>THP</i>	DIN EN ISO 10360-5
Kugel	Einzelpunkte	Formabweichung	<i>PFTU</i>	DIN EN ISO 10360-5
Kugel	Einzelpunkte	Lageabweichung	<i>PLTM</i>	DIN EN ISO 10360-5
Stufenendmaß 1100	Einzelpunkte	Längenmessabweichung	<i>EO</i>	DIN EN ISO 10360-2
Multi-Feature-Check	Einzelpunkte	Form, Maß, Lage	-	DIN ISO 1101
Multi-Feature-Check	Scanning	Form, Maß, Lage	-	DIN ISO 1101

Quelle: eumetron

30

Validierung – Vergleich VCMM zu VCMM-User

Prüfmerkmal Normal	Unsicherheit VCMM in μm	Unsicherheit VCMM-User in μm	Vergleichsfaktor V für die Messunsicherheit
Scanning Kugel Form <i>THP</i>	0,99	1,72	0,57
Scanning Kugel Durchmesser <i>THP</i>	0,87	1,58	0,55
Einzelpunkte Kugel Form <i>PFTU</i>	1,16	1,65	0,70
Mehrfachtaster Ortsabweichung <i>PLTM</i>	1,94	2,96	0,66

Quelle: eumetron

31

Validierung – Vergleich VCMM zu VCMM-User

Stufenendmaß Stahl Nennmaß in mm	Unsicherheit VCMM in μm	Unsicherheit VCMM-User in μm	Vergleichsfaktor V für die Messunsicherheit
20	0,41	1,59	0,25
100	0,68	1,71	0,40
300	1,62	2,08	0,78
500	2,06	2,76	0,75
700	2,23	3,29	0,68
900	1,97	3,97	0,50
1100	1,90	4,80	0,40

Quelle: eumetron

32

Validierung – Vergleich VCMM zu VCMM-User

Multi-Feature-Check (Aluminium) im Scanningverfahren Prüfmerkmal	Unsicherheit VCMM in μm	Unsicherheit VCMM-User in μm	Vergleichsfaktor V für die Messunsicherheit
DIN Geradheit	0,84	1,30	0,65
DIN Rundheit	1,23	1,88	0,65
Distanz	0,31	0,38	0,80
DIN Parallelität	1,77	2,21	0,80
DIN Rechtwinkligkeit	1,37	1,81	0,75
DIN Position	1,16	2,35	0,49
DIN Symmetrie	2,33	3,80	0,61
DIN Koaxialität	2,41	4,82	0,50
DIN Einzelrundlauf	1,55	2,12	0,73
DIN Summenplanlauf	2,83	3,52	0,80

Quelle: eumetron

33

Validierung VCMM-User für das KMG des Anwenders im Vergleich zu Grenzwerten

Herstellerspezifikationen nach DIN EN ISO 10360-2 bzw. 10360-5, z.B.:

- Längenmessabweichung MPE-*E0*: $0,7 \mu\text{m} + L/400$ (L in mm)
- Antastabweichung Einzelpunkte MPE-*PFTU*: $0,8 \mu\text{m}$
- Antastabweichung Scanning MPE-*THP*: $0,9 \mu\text{m}$
- Mehrfachtaster-Ortsabweichung MPE-*PLTM*: $1,6 \mu\text{m}$

Umgebungsbedingungen nach VDI/VDE 2627 Blatt 1, z.B. Messraumklasse B:

- Zulässige Abweichung zur Bezugstemperatur 20 C: $20 \text{ C} \pm 0,8 \text{ K}$
- Zulässige zeitliche Temperaturänderung pro 1 h: $0,4 \text{ K/h}$
- Zulässige zeitliche Temperaturänderung pro 24 h: $0,8 \text{ K/h}$
- Zulässige räumliche Temperaturänderung: $0,3 \text{ K/m}$

Quelle: eumetron

34

Validierung VCMM-User für das KMG des Anwenders im Vergleich zu Grenzwerten

Mit den Spezifikationen des KMG und der Umgebungsbedingungen wird das KMG des Anwenders bei AfM konfiguriert

Es werden die Unsicherheiten für die Prüfmerkmale nach DIN EN ISO 10360-2 und DIN EN ISO 10360-5 berechnet

Die berechnete Unsicherheit dieser Prüfmerkmale muss größer sein als der entsprechende Grenzwert des KMG plus 20 %

Die Erhöhung von 20 % basiert dabei auf den ermittelten Unsicherheiten aus zahlreich durchgeführten Simulationen mit den beiden Verfahren VCMM und VCMM-User, im Vergleich zu den Grenzwerten (MPE) des KMG

$$V_{MPE} = \frac{(MPE + 20\%)}{U_{VCMM\ User}} < 1$$

Quelle: eumetron

35

Validierung – Vergleich Grenzwert zu VCMM-User

Prüfmerkmal Normal	Grenzwert MPE in μm	Grenzwert MPE plus 20 % in μm	Unsicherheit VCMM-User in μm	V_{MPE}- Faktor
Scanning Kugel Form <i>THP</i>	0,9	1,08	1,62	0,67
Scanning Kugel Durchmesser <i>THP</i>	0,9	1,08	1,44	0,75
Einzelpunkte Kugel Form <i>PFTU</i>	0,8	0,93	1,47	0,65
Mehrfachtaster Ortsabweichung <i>PLTM</i>	1,6	1,92	2,47	0,78

Quelle: eumetron

36

Validierung – Vergleich Grenzwert zu VCMM-User

Stufenendmaß aus Stahl Nennmaß in mm	Grenzwert MPE in μm	Grenzwert MPE plus 20 % in μm	Unsicherheit VCMM-User in μm	V_{MPE} - Faktor
20	0,75	0,90	1,49	0,60
100	0,95	1,14	1,48	0,77
220	1,25	1,50	1,83	0,82
300	1,45	1,74	2,06	0,85
420	1,75	2,10	2,66	0,79

Quelle: eumetron

37

Ausblick

An der Entwicklung folgender Zusatz-Features zu VCMM-User wird aktuell gearbeitet. Diese werden mittelfristig in zukünftigen Softwareversionen verfügbar sein:

- Der Drehtisch als 4. Achse für KMG in Portal- und Brückenbauweise
- Analyse mit grafischer Darstellung der prozentualen Anteile der Einflussgrößen auf die Gesamtunsicherheit
- Vereinfachte Ermittlung der Prüfprozesseignung nach VDA/VDE 2617-8 bzw. VDA 5 durch die Kenntnis der Unsicherheit eines Prüfmerkmals

Weiterhin ist geplant, die VCMM-User-Methode auch auf andere KMG-Bauarten zu erweitern und auch optische Sensoren zu berücksichtigen

38