

VDI-Fachtagung
Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen –
Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2023

14. und 15. November 2023 in Erfurt

Messunsicherheitsbilanzen
für die Koordinatenmesstechnik

Dr.-Ing. Michael Hernla, Dortmund

Inhalt

1. Einführung
2. Messunsicherheit
3. MU-Bilanzen für taktile Messungen
4. KMG mit Bildverarbeitung
5. Multisensor-KMG
6. Optische Koordinatenmesssysteme
7. Computertomografie
8. Korrelationen an Geometrieelementen
9. Korrelationen zwischen Geometrieelementen
10. Lösung mit Simulation
11. Weiteres Beispiel
12. Zusammenfassung

1. Einführung – Gerätetechnik

- Industrielle Koordinatenmesstechnik seit ca. 50 Jahren
- Lineare Bewegungsachsen, Längenmesssysteme, starre Taster, Tischrechner mit Software
- Erfassung von Oberflächenpunkten und Zuordnung von geometrischen Elementen
- Auswertung von geometrischen Größen – Maß, Form, Lage

Einführung – Normung

- Richtlinien der Reihe VDI/VDE 2617 zur Prüfung von taktilen Koordinatenmessgeräten (KMG) ab ca. 1985
- Normenreihe ISO 10360 ab ca. 1992
- Zusätzlich optische Sensoren, optische Koordinatenmesssysteme, Computertomografie
- Gleiche Kenngrößen, Normale und Prüfverfahren
- Längenmessabweichung für die Geometrie im Messvolumen
- Antastabweichungen für Taster und Sensoren

2. Messunsicherheit – Simulation

- VDI/VDE 2617 Blatt 7 bzw. ISO/TS 15530-4
- PTB-Software [Virtuelles KMG \(VCMM\)](#) von Zeiss und Leitz (Hexagon)
- Messreihen zur Ermittlung der Geometrieabweichungen des KMG und der Antastabweichungen
- Modellierung des kompletten Messprozesses mit Variation aller Eingangsgrößen
- Erweiterte Messunsicherheiten aus den Häufigkeitsverteilungen der Messgrößen

Messunsicherheit mit kalibrierten Werkstücken

- VDI/VDE 2617 Blatt 8 bzw. ISO 15530-3
- **Kalibriertes Werkstück** mit Messreihe unter Vergleichsbedingungen (Temperatur, Formabweichungen)
- Standardabweichung und systematische Abweichung
- Bei Maßen korrigiert
- Sonst Bestandteil der Messunsicherheit
- Einfluss der Formabweichung aus Messreihe

Messunsicherheitsbilanzen

- VDI/VDE 2617 Blatt 11
- **Mathematische Modelle** für jedes Prüfmerkmal bzw. jede Gruppe von Prüfmerkmalen
- Fallunterscheidungen für Geometrieelemente und ihre Parameter, Taster und Messbedingungen
- Grenzwerte der Längenmess- und der Antastabweichungen des KMG
- Anzahl und Lage der Messpunkte, Standardabweichungen an Geometrieelementen, Temperaturen

3. Messunsicherheit – taktile Messungen

- VDI/VDE 2617 Blatt 11 mit Voraussetzungen und Anwendungen der Methode
- Beispiele Durchmesser und Abstand
- Vergleiche zwischen drei Methoden veröffentlicht [4]
- Unsicherheiten aus Bilanz meist größer wegen Grenzwerten statt tatsächlicher Abweichungen
- Ringvergleich auf VDI-Fachtagung 2021 [5]

Weitere MU-Bilanzen

- Hernla: Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen. expert verlag Tübingen 2020 [6]
- Mathematische Modelle, Eingangsgrößen, Standardunsicherheiten, Sensitivitätskoeffizienten
- Umsetzung in Tabellenkalkulationsprogrammen für Durchmesser, Abstand, Position, Symmetrie, Koaxialität, Richtung und Winkel, Form
- Detaillierte [Verifikation](#) im Einzelfall anhand der Dokumentation möglich

Akkreditierung

- Akkreditierung von Prüf- und Kalibrierlaboratorien nach DAkkS 71 SD 5 004 [7] (bzw. SAS ...)
- Voraussetzung: Anwendung einer der drei Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit
- Akkreditierte **Kalibrierlaboratorien** mit MU-Bilanzen in Deutschland 8, Schweiz 3
- Akkreditierte **Prüflaboratorien** mit MU-Bilanzen in Deutschland 25, Schweiz 4, Österreich 1

Weitere Sensoren und Bauformen

- KMG mit Bildverarbeitung
- Multisensor-KMG
- Optische Koordinatenmesssysteme
- Röntgen-Computertomografie
- Gelenkarm-KMG

Beispiel taktile Messung

Abstand von zwei Elementen – Modellfunktion

$$L = [X_1 - W_{11} * L_{N11} / L_{M11} - W_{12} * L_{N12} / L_{M12} - X_{T1} - (D_{T1} - D_C) / 2] \\ - [X_2 - W_{21} * L_{N21} / L_{M21} - W_{22} * L_{N22} / L_{M22} - X_{T2} - (D_{T2} - D_C) / 2] \\ - \Delta X_{TR} - \Delta L_{KMG} - L_{NA} * [\alpha_W * (t_W - 20^\circ C) - \alpha_M * (t_M - 20^\circ C)] + \Delta L_{TK}$$

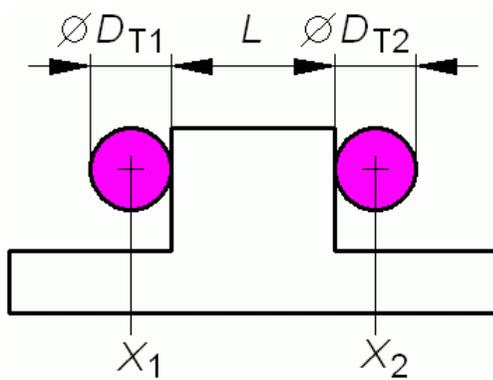
X_1, X_2	Element-Koordinaten
W_1, W_2	Winkel (bei Achsen, Geraden, Ebenen)
$X_{T1,2}, D_{T1,2}$	Taster-Koordinaten und -Durchmesser
D_C	Kugelnorm-Durchmesser
ΔX_{TR}	Mehrfachtaster-Lageabweichung
ΔL_{KMG}	Geometrieabweichungen
ΔL_T	Temperatureinfluss

Messunsicherheitsbilanz

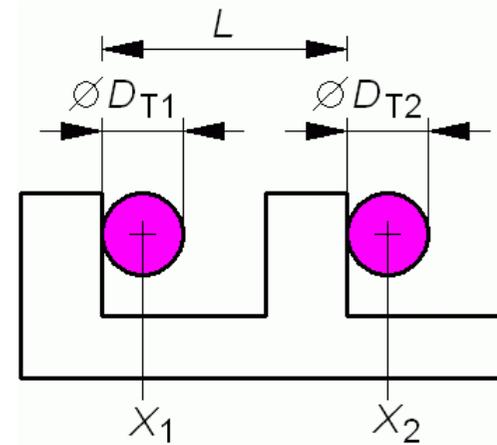
Eingangsgröße X_i	Methode bzw. Anzahl m_i	Messpunktanzahl bzw. Verteilung n_i	Standardabweichung bzw. Grenze s_i bzw. a_i	Faktor für Punktzahl / Verteilung b_i	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag (μm) $u_i(y)$
X_E	B	8	5	0,35	1	1,8
W_{E1}	B	8	5	0,71	0,6	2,2
W_{E2}	B	8	5	0,71	0,6	2,2
X_{TE}	B	5	2	0,71	1	1,4
D_{TE}	B	5	2	1,00	0,5	1,0
X_B	B	8	5	0,35	1	1,8
W_{B1}	B	8	5	1,08	0,5	2,9
W_{B2}	B	8	5	1,08	0,5	2,9
X_{TB}	B	5	2	0,71	1	1,4
D_{TB}	B	5	2	1,00	0,5	1,0
D_C	B	Normal	0,4	0,50	0,5	0,1
ΔX_{TR}	B	Normal	1,1	0,50	1	0,6
ΔL_{KMG}	B	Normal	2,3	0,50	1	1,1
α_M	B	Rechteck	1,6	0,58	0,0	0,0
α_W	B	Rechteck	2,4	0,58	0,9	1,2
t_M	B	Rechteck	2,0	0,58	3,6	4,2
t_W	B	Rechteck	2,0	0,58	5,4	6,2
ΔL_{TK}	B	Syst. Abw.	10,8	1	1	10,8
Standardunsicherheit der Messgröße:					$u(y) =$	14,6
Erweiterungsfaktor:					$k =$	2,00
Erweiterte Messunsicherheit ($P=95\%$):					$U =$	29,3

Vereinfachte Modelle – taktile Messung

Außenmaß



Stufenmaß



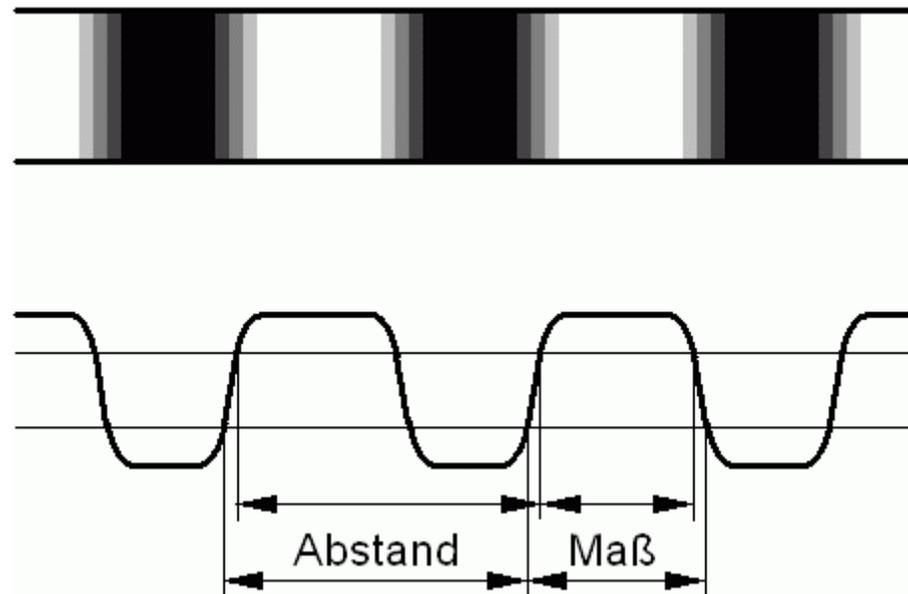
$$L = X_2 - D_{T2}/2 - (X_1 + D_{T1}/2) - \Delta X_{TR} \quad L = X_2 - D_{T2}/2 - (X_1 - D_{T1}/2) - \Delta X_{TR}$$

Derselbe Taster: $D_{T1} = D_{T2} = D_T$

$$L = X_2 - X_1 - D_T$$

$$L = X_2 - X_1$$

4. KMG mit Bildverarbeitung – 1



Kanten mit Hell-Dunkel-Übergang

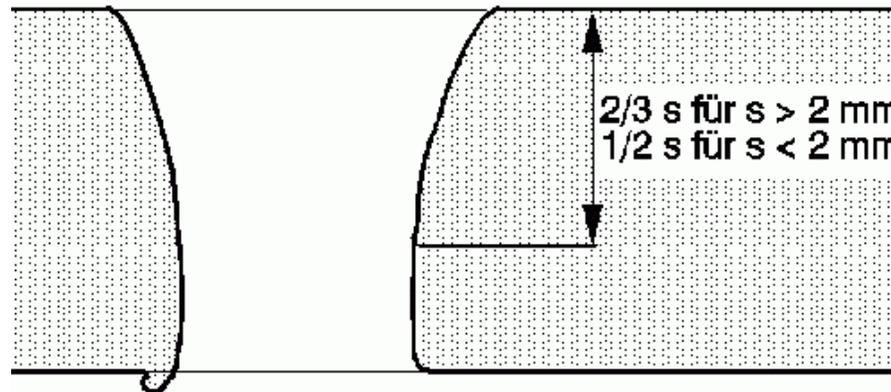
Definition der Messgröße – Maß bzw. Abstand

KMG mit Bildverarbeitung – 2

Beispiel: Definition der Messebene beim Plasmaschneiden

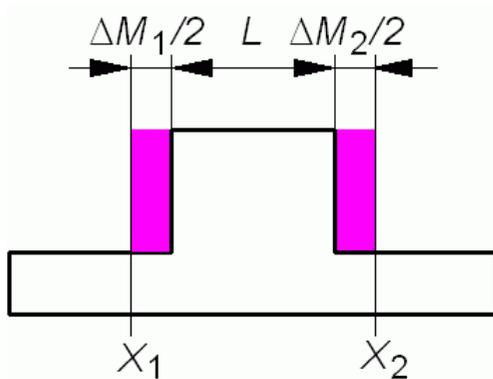
ISO 9013 Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte –
Geometrische Produktspezifikation und Qualität

abhängig von Blechdicke s



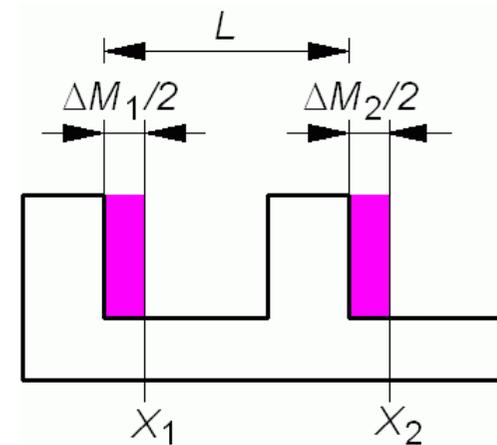
KMG mit Bildverarbeitung – 3

Außenmaß



$$L = X_2 - \Delta M_2/2 - (X_1 + \Delta M_1/2)$$

Stufenmaß



$$L = X_2 - \Delta M_2/2 - (X_1 - \Delta M_1/2)$$

Dieselbe Maßdifferenz: $\Delta M_1 = \Delta M_2 = \Delta M$

$$L = X_2 - X_1 - \Delta M$$

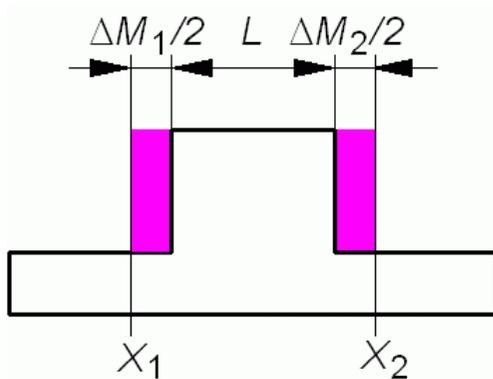
$$L = X_2 - X_1$$

5. Multisensor-KMG – 1

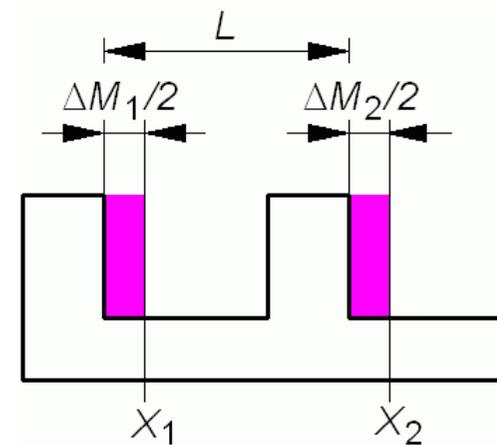
- Mehrere Sensoren – optisch und taktil
- Kanteneffekte wie bei Bildverarbeitung
- Zusätzlich Multisensor-Lageabweichung ΔX_{PLM} der Sensoren zueinander

Multisensor-KMG – 2

Außenmaß



Stufenmaß



$$L = X_2 - \Delta M_2/2 - (X_1 + \Delta M_1/2) - \Delta X_{PLM}$$

$$L = X_2 - \Delta M_2/2 - (X_1 - \Delta M_1/2) - \Delta X_{PLM}$$

Sensor und Maßdifferenz dieselben: $\Delta M_1 = \Delta M_2 = \Delta M$

$$L = X_2 - X_1 - \Delta M$$

$$L = X_2 - X_1$$

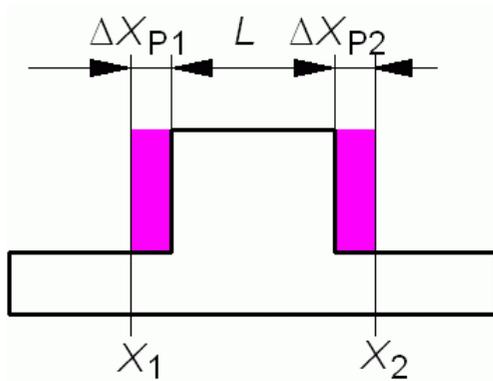
6. Optische Koordinatenmesssysteme – 1



- Streifenlichtprojektion
- Zwei Digitalkameras
- Mehrere Ansichten
- Räumliches Datenmodell
- Direkter Vergleich mit CAD-Modell
- Auch einzelne Prüfmerkmale
- Keine Taster
- Aufgesprühte Pulverschicht
- Mittlere Schichtdicke ΔX_P und Streuung

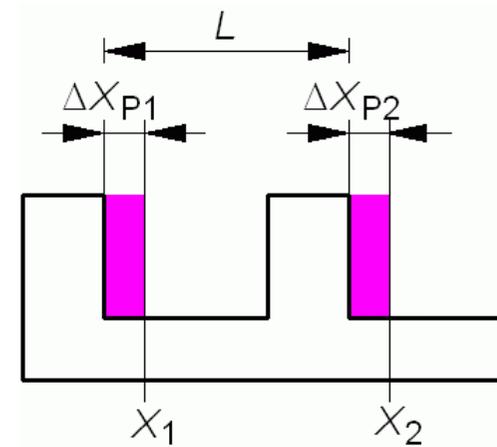
Optische Koordinatenmesssysteme – 2

Außenmaß



$$L = X_2 - \Delta X_{P2} - (X_1 + \Delta X_{P1})$$

Stufenmaß



$$L = X_2 - \Delta X_{P2} - (X_1 - \Delta X_{P1})$$

Beide Oberflächen eingesprüht: $\Delta X_{P1} = \Delta X_{P2} = \Delta X_P$

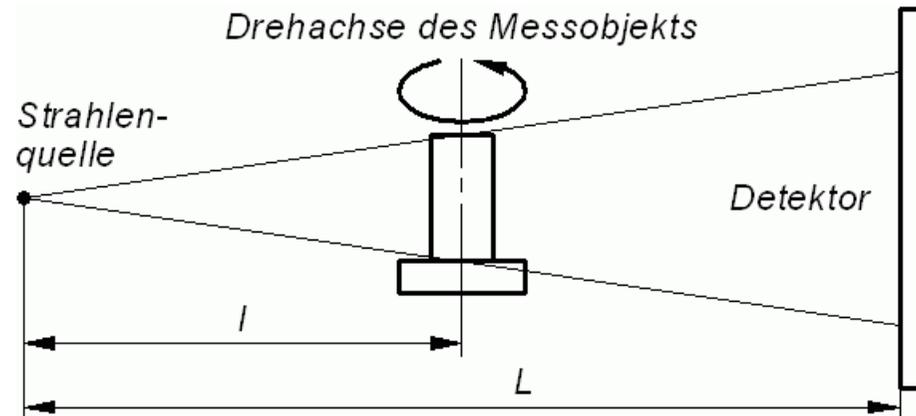
$$L = X_2 - X_1 - 2 * \Delta X_P$$

$$L = X_2 - X_1$$

Optische Koordinatenmesssysteme – 3

- Grenzwert der Längenmessabweichung als Maximalwert im Messvolumen
- Große Unsicherheitsbeiträge für Geometrieabweichungen bei kleinen Abmessungen
- ISO 10360-13 Optische 3D-Koordinatenmesssysteme
→ Grenzwert der Verzerrungsabweichung
- Normal und Messobjekt (bzw. Geometrieelement) passen in eine Ansicht
- Anwender: Grenzwert bei 1/5

7. Computertomografie – 1



- Vergößerung bzw. Auflösung hängt von Position der Drehachse ab
- Temperaturbedingte Ausdehnung des Detektors im Verhältnis des Abstandes l / L

Computertomografie – 2

- Ermittlung der Messunsicherheit nach VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [11] Methode mit **kalibrierten Werkstücken**
- Nicht immer verfügbar, Messreihe zeitaufwendig
- Deshalb **Messunsicherheitsbilanzen** nach VDI/VDE 2617 Blatt 11
- Ohne Taster, Maß- bzw. Lageabweichungen, Pulverschicht
- Mit Standardabweichungen an den Geometrie-elementen

Computertomografie – Messunsicherheitsbilanz

Eingangsgröße X_i	Methode bzw. Anzahl m_i	Messpunktanzahl bzw. Verteilung n_i	Standardabweichung bzw. Grenze s_i bzw. a_i	Faktor für Punktzahl / Verteilung b_i	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag (μm) $u_i(y)$
X_E	B	8	4	0,35	1	1,4
W_{E1}	B	8	4	0,71	0,6	1,8
W_{E2}	B	8	4	0,71	0,6	1,8
X_B	B	8	4	0,35	1	1,4
W_{B1}	B	8	4	1,08	0,5	2,3
W_{B2}	B	8	4	0,71	0,5	1,5
ΔL_{KMG}	B	Normal	6,0	0,50	1	3,0
α_M	B	Rechteck	0,3	0,58	0,0	0,0
α_W	B	Rechteck	9,4	0,58	0,9	4,9
t_M	B	Rechteck	2,0	0,58	0,6	0,7
t_W	B	Rechteck	2,0	0,58	21,2	24,4
ΔL_{TK}	B	Syst. Abw.	42,3	1	1	42,3
Standardunsicherheit der Messgröße:					$u(y) =$	49,4
Erweiterungsfaktor:					$k =$	2,00
Erweiterte Messunsicherheit ($P=95\%$):					$U =$	98,7

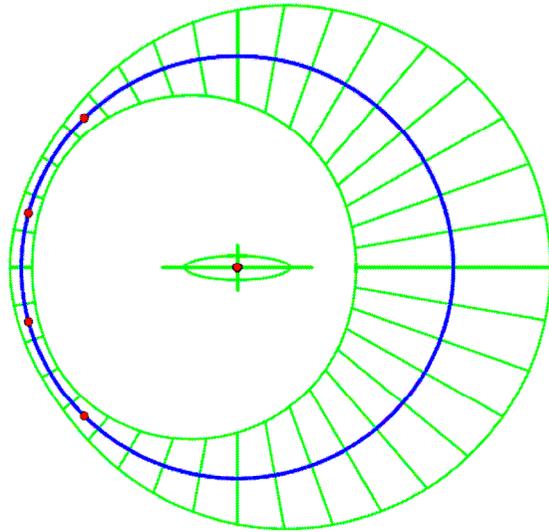
Akkreditierte Laboratorien

- Akkreditierung von Prüf- und Kalibrierlaboratorien nach DAkkS 71 SD 5 004 [7] (bzw. SAS ...)
- Prüflabore Computertomografie: 9
- Prüflabore Streifenlichtprojektion: 8
- Prüflabor Bildverarbeitung: 1
- Kalibrierlabor Bildverarbeitung: 1

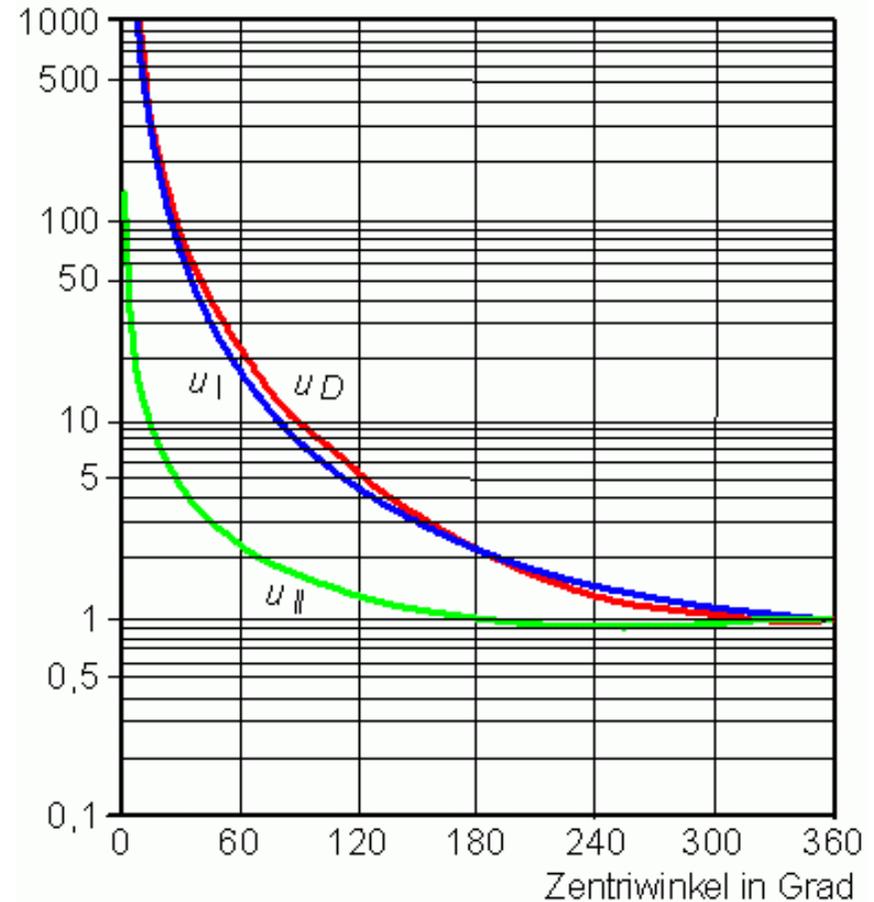
8. Korrelation an Geometrieelementen – 1

- Messunsicherheitsbilanzen meist ohne Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen
- Messpunkte gleichmäßig über die Oberfläche verteilt
- Gegenbeispiel Messung eines Kreisausschnitts – Korrelationen zwischen Element-Parametern
- Standardunsicherheiten aus [Kovarianzmatrix](#)
- GUM Supplement 2 Abschnitt 6.3.1 Implizite mehrdimensionale Messmodelle

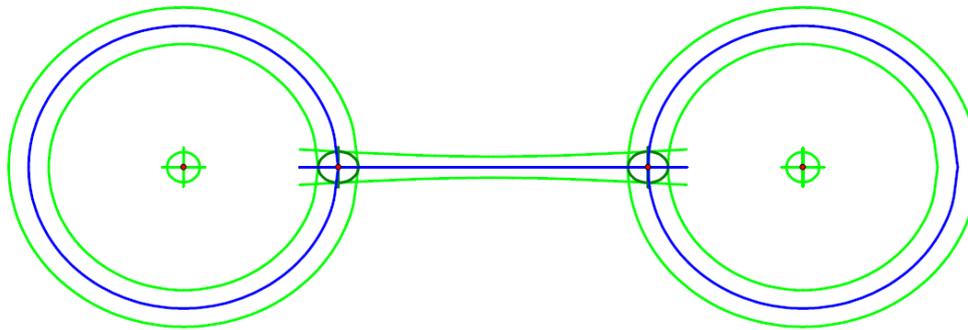
Korrelation an Geometrieelementen – 2



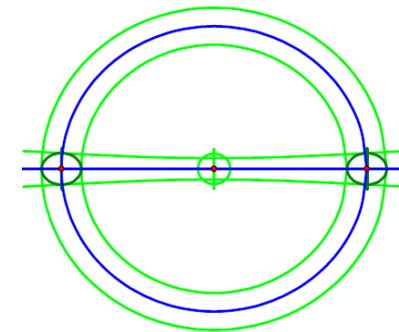
Verhältnisse der Unsicherheiten in
Abhängigkeit vom Zentriwinkel des
Bereiches der Messpunkte, bezogen
auf den Vollkreis (100 Punkte)



9. Korrelation zwischen Geometrieelementen – 1



Schnittpunkte aus Gerade und
zwei Kreisen **nicht korreliert**



Schnittpunkte aus Gerade
und Kreis **korreliert**

Korrelation zwischen Geometrieelementen – 2

Abstand der Schnittpunkte – vereinfachte Modelle:

Zwei Kreise

$$L = X_{M2} - R_2 - (X_{M1} + R_1)$$

Ein Kreis

$$L = X_{M1} + R_1 - (X_{M1} - R_1) = D_1$$

Messunsicherheiten:

$$\text{mit } u_R = \sqrt{\frac{1}{n}} \cdot s \quad \text{und} \quad u_{XM} = \sqrt{\frac{2}{n}} \cdot s$$

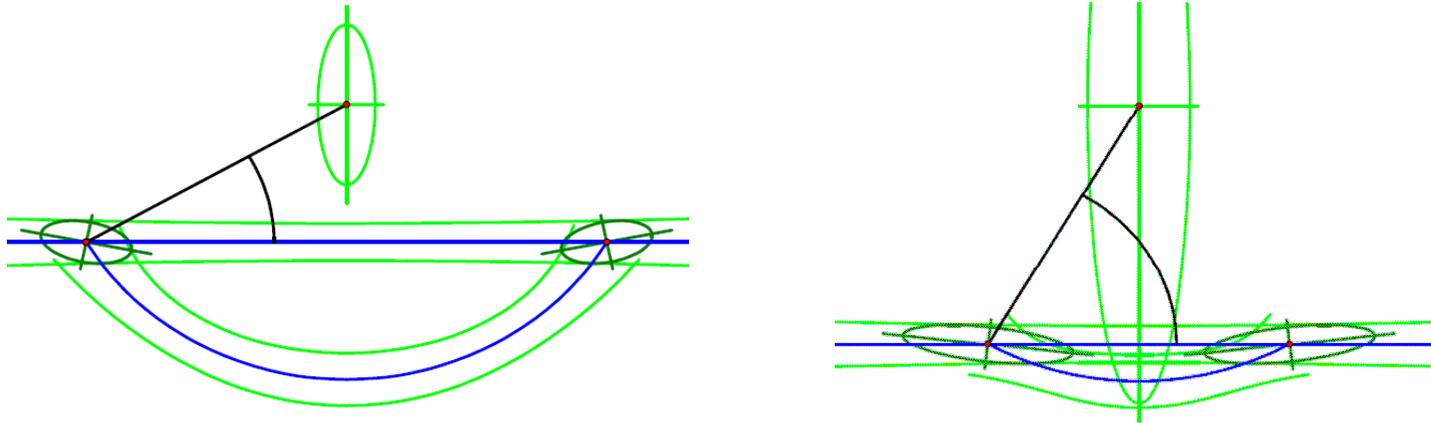
$$\text{mit } u_D = \sqrt{\frac{4}{n}} \cdot s \quad \text{und} \quad n = 4$$

$$u_{L2} = 1,22 \cdot s$$

$$u_{L1} = 1,00 \cdot s$$

Verhältnis $u_{L2} : u_{L1} = 1,22$ unabhängig von der Messpunktanzahl n

Korrelation zwischen Geometrieelementen – 3

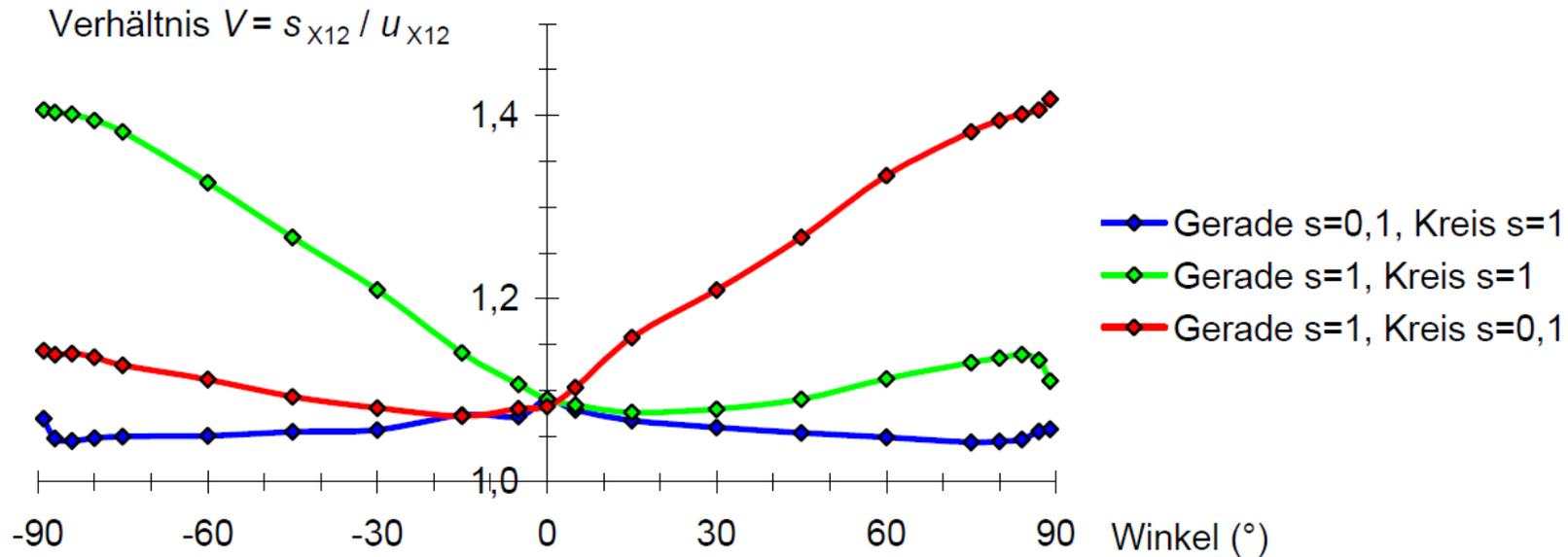


- Streuungsellipsen der Schnittpunkte miteinander korreliert
- GUM Supplement 2 Abschnitt 6.2.1 Explizite mehrdimensionale Messmodelle
- Kovarianzmatrizen der Schnittpunkte und des Abstands

10. Lösung mittels Simulation – 1

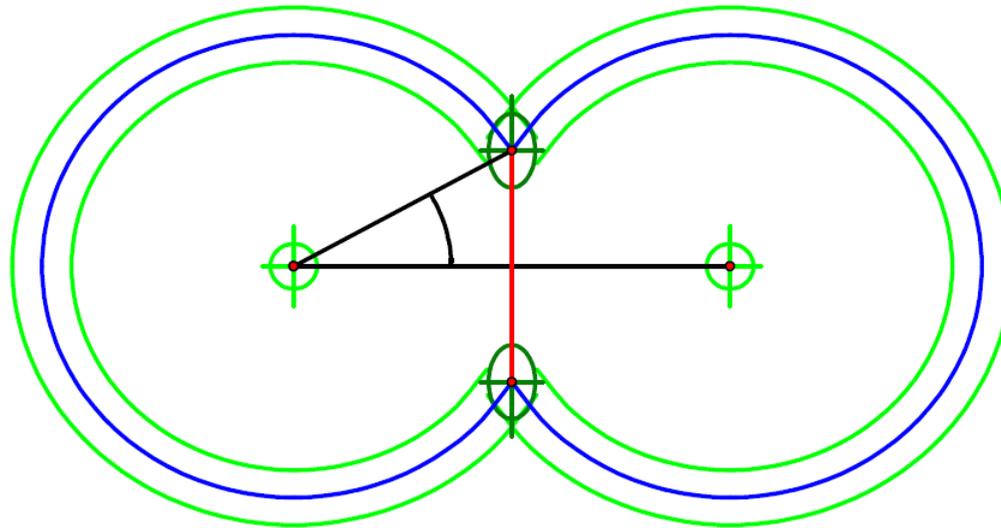
- GUM Supplement 2 Abschnitt 6.4 Messunsicherheit mittels **Simulation**
- Realisiert im Virtuellen KMG (VCMM)
- Auch mit Modellen der Messunsicherheitsbilanzen
- **Anpassung:** Schnittpunkte der Geraden mit demselben Kreis
- Beispiel mit verschiedenen Winkeln und Verhältnissen der Unsicherheiten mit und ohne Korrelation

Lösung mittels Simulation – 2



Verhältnis V der
Standardabweichung $s_{x_{12}}$ mit Korrelation aus der Simulation zur
Standardunsicherheit $u_{x_{12}}$ ohne Korrelation aus der Unsicherheitsbilanz

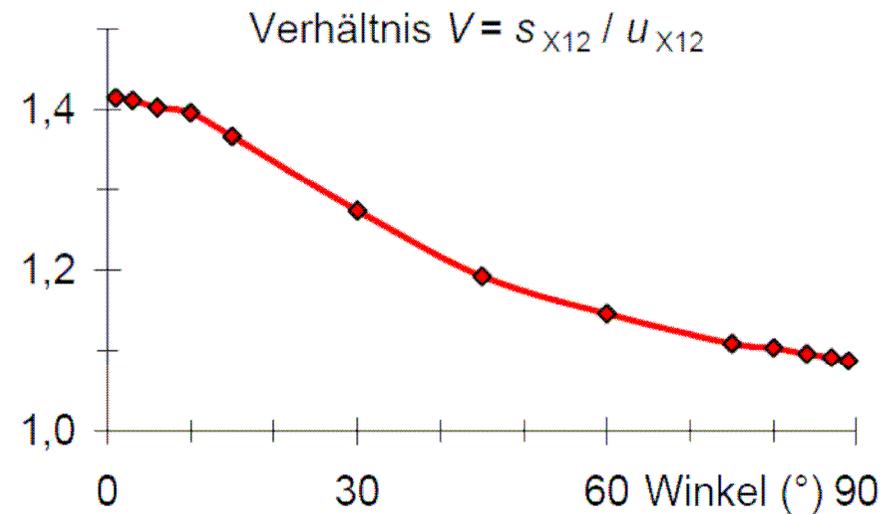
11. Weiteres Beispiel – 1



Abstand der Schnittpunkte von zwei Kreisen –
Streuungsellipsen der Schnittpunkte miteinander korreliert

Weiteres Beispiel – 2

Verhältnis V der Standardabweichung $s_{X_{12}}$ mit Korrelation aus Simulation zur Standardunsicherheit aus MU-Bilanz $u_{X_{12}}$ ohne Korrelation



Weiteres Beispiel – 3

- Vollständige Messunsicherheitsbilanz mit weiteren Unsicherheitsbeiträgen
- Beitrag der Korrelation wird relativ kleiner – ab wann vernachlässigbar?
- Test mit maximalem Verhältnis $V = s_{X12} / u_{X12} \dots$
- ... und Q als Grenzwert für maximales Verhältnis von $s(y)$ mit Korrelation zu $u(y)$ ohne Korrelation:

$$u_{X12} \leq \sqrt{\frac{Q^2 - 1}{V^2 - 1}} \cdot u(y) \quad \text{mit } u_{X12} = \sqrt{u_{X1}^2 + u_{X2}^2}$$

Weiteres Beispiel – 4

- **Beispiel:** Bei $Q = 1,05$ ist $s(y)$ aus der Simulation maximal 5 % größer als $u(y)$ aus der MU-Bilanz
- Bei größtem Verhältnis $V = 1,414$ maximaler Unsicherheitsbeitrag $u_{X12} = 0,32 u(y)$
- Bei Winkel 45° Verhältnis $V = 1,20$ und maximaler Unsicherheitsbeitrag $u_{X12} = 0,48 u(y)$
- Ist u_{X12} kleiner, kann die Simulation entfallen
- Simulation erst, wenn u_{X12} größer als der Testwert

12. Zusammenfassung

- Einfache Anpassung der Messunsicherheitsbilanzen an die jeweiligen Messprinzipien und Sensoren
- Umsetzung Hersteller- und geräteunabhängig durch Tabellenkalkulation mit minimalem Aufwand
- Simulation mit mathematischen Modellen für Verteilung der Messgröße und Erweiterungsfaktor
- Berücksichtigung der Korrelation durch Anpassung der Modelle, ...
- ... wenn nach Test nicht vernachlässigbar

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**