



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS



Vereinfachtes Verfahren

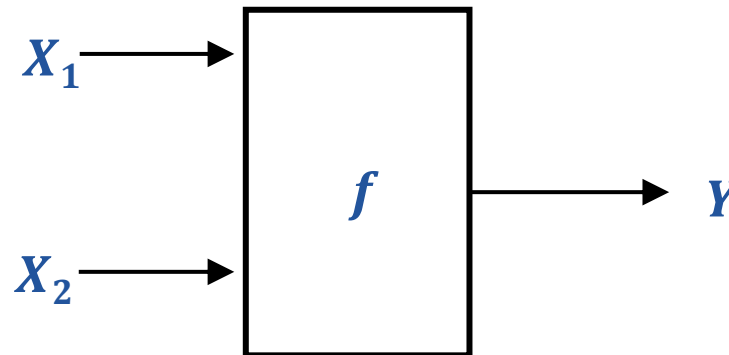
Frédéric Pythoud

Motivation

Messprozesse mit kompliziertem und oft auch nur ungenau bekannten Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Messresultat → mathematisches Modell?

Komplexe abgeleitete Kenngrößen, Berechnung zwar genau bekannt, jedoch Darstellung in **einer** Gleichung nicht möglich.

→ **numerische Simulation** oder «**Black Box**».



Beispiel – Rauheitsmessung



(x_i, y_i) →



Geräteigenschaften:

- Tastkraft, Tastspitze
- mechanische Führungsfehler
- Elektronik (Rauschen, Bandbreite)
- Digitalisierung, Auflösung

Datenverarbeitung:

- Ausgleich des Primärprofils
- Filterung des Profils
- Bestimmen von Kennwerten
- (Mittelwerte, Spitzenwerte, ...)

Unregelmässigkeit
Oberfläche

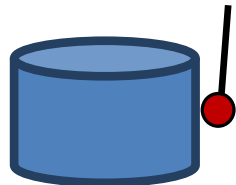
Vibrationen
Schmutz, ...

→ Ra, Rz, \dots

Beispiel – Koordinatenmessgerät



(x_i, y_i, z_i) →



Geräteeigenschaften:

- Messkopf, Tastelement
- 21 mechanische Führungsfehler
- Elektronik (Regelung, Digitalisierung, ...)

Bediener:

- Messstrategie

Datenverarbeitung:

- Korrekturen
- Ausgleichsrechnung, Filterung
- Berechnung von Geometrieelementen

→ ∅

Abweichung von
Idealgeometrie

Temperatur, Vibrationen,
Schmutz

Welche Einflussgrössen ?

Mindestens folgende Einflussgrössen müssen berücksichtigt werden:

- **Kalibrierung**
Das Gerät muss kalibriert werden.
- **Verifikation**
Die Kalibrierung des Gerätes muss verifiziert werden.
- **Wiederholbarkeit**
Die «Fähigkeit» zu messen muss evaluiert werden.
- **Reproduzierbarkeit**
Die «Messfähigkeit» zwischen Kalibrierungen muss evaluiert werden:
Stabilität, Drift, ...

Beiträge zur MU – Kalibrierung

Das Gerät muss kalibriert werden.

Bemerkung: Kalibration mit Kalibrierkit /Normal muss ähnliche Messwerte wie der zu messende Prüfling haben. Ein im Bereich -10°C bis 30°C kalibrierter Thermometer ist unbrauchbar um Temperaturen über 30°C zu messen !

Welche Informationen liefert die Kalibration ?

- **Die MU des Kalibriertkits / Normals**
- **Die restliche Abweichung** nach Kalibrierung
(in gewissen Fällen lässt sich die Abweichung nicht voll kompensieren)

Beiträge zur MU – Verifikation

Das Gerät muss verifiziert werden.

Bemerkung: Verifikation mit Verifikationskit / Normal mit ähnlicher Messwert als der zu messende Prüfling.

Welche Informationen liefert die Verifikation ?

- **Die MU des Verifikationstkits / Verifikationsnormals**
- **Die Abweichung der Verifikation**

Beiträge zur MU – Wiederholbarkeit

Wiederholbarkeit (Wiederholpräzision)

*Ausmass der gegenseitigen Annäherung zwischen Ergebnissen aufeinanderfolgender Messungen derselben Messgrösse, ausgeführt **unter denselben Messbedingungen**.*

Die Wiederholbarkeit muss **unbedingt** evaluiert werden, im Sinne von Messung der Messwertstreuung. Idealerweise am selben Objekt, in einem ziemlich kurzem Interval.

Die Wiederholbarkeit muss evaluiert werden, auch wenn im normalen Betrieb die Objekte **nur einmal** gemessen werden.

Beiträge zur MU – Reproduzierbarkeit

Reproduzierbarkeit (Vergleichspräzision)

*Ausmass der gegenseitigen Annäherung zwischen Messergebnissen derselben Messgrösse, gewonnen **unter veränderten Bedingungen**.*

Die Reproduzierbarkeit beschreibt z.B. die Streuung der Messwerte zwischen zwei Kalibrierungen. Zum Beispiel

- Messsystem wird täglich um 07:00 kalibriert
- Messsystem wird wöchentlich (Montag 07:00) kalibriert
- Messsystem wird alle zwei Jahre kalibriert

Reproduzierbarkeit beschreibt z.B. die Homogenität des Messobjektes

- Oberflächenmessung von einer Fläche

Weitere quantifizierbare MU-Beiträge

Einflussgrössen, deren Abschätzung durch wiederholte Messungen bei verschiedenen Bedingungen zu aufwändig wäre:

summarische Abschätzung

z.B. Temperatureinfluss

Annahme eines Temperaturkoeffizienten α und der grössten annehmbaren Abweichung ΔT von den Bezugsbedingungen.

Das Messmodell

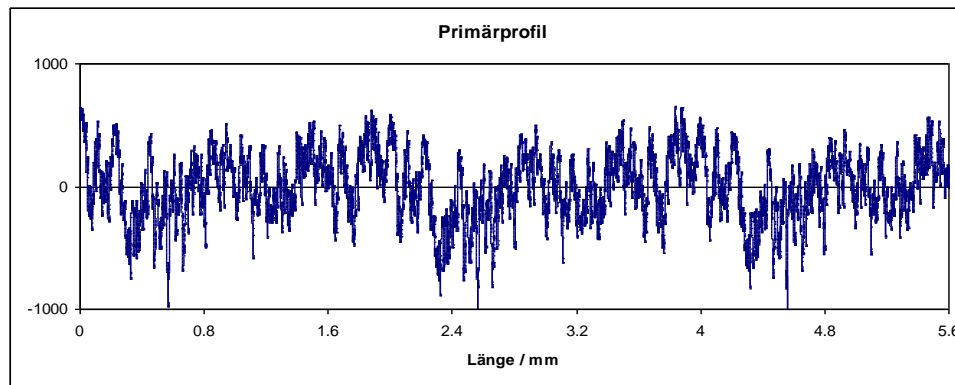
Beispiel für ein Messmodell mit 2 Eingangsgrössen X_1 und X_2

$$Y = f(X_1, X_2) + \delta Y_{\text{cal}} + \delta Y_{\text{ver}} + \delta Y_{\text{repeat}} + \delta Y_{\text{reprod}} + \dots$$

- δY_{cal} Beitrag des Kalibrierkits
- δY_{ver} Beitrag des Verifikationsnormal
- δY_{repeat} Wiederholbarkeit
- δY_{reprod} Reproduzierbarkeit

Beispiel – Rauheitsmessung

Messung der Rauheitskenngrösse Ra auf einem Werkstück:



$$Ra = \frac{1}{l} \int_1^l |R(x)| dx$$

Zu erwartender Wert: $Ra = 2 \mu m$

Das Messmodell

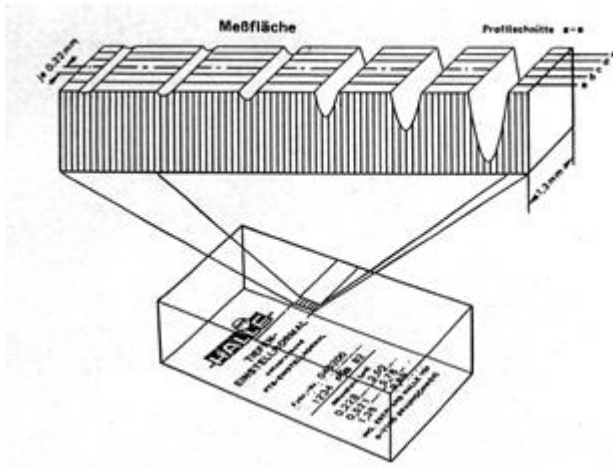
Das Messmodell lässt sich folgenderweise schreiben

$$Ra = Ra_{\text{gemessen}} + \delta Ra_{\text{cal}} + \delta Ra_{\text{ver}} + \delta Ra_{\text{repeat}} + \delta Ra_{\text{reprod}}$$

- δRa_{cal} Beitrag des Kalibrierkits
- δRa_{ver} Beitrag des Verifikationsnormal
- $\delta Ra_{\text{repeat}}$ Wiederholbarkeit
- $\delta Ra_{\text{reprod}}$ Reproduzierbarkeit

Kalibrierung der Empfindlichkeit des Messgerätes

Einstellung der Tasterauslenkung mittels eines Rillennormals:



$$U = 10 \text{ nm} + 2 \cdot 10^{-4} d$$

d : Profiltiefe

Profiltiefe d	U	u
1 μm	10.2 nm	5.1 nm
2 μm	10.4 nm	5.2 nm
...
10 μm	12 nm	6 nm



Kalibrierungsbeitrag δRa_{cal}

Die Empfindlichkeit der Maschine wird anhand eines Kalibriernormals von 10 μm (standard Unsicherheit von 6 nm) abgestimmt, mit dem Ziel ein Ra-Wert von etwa $Ra = 2\mu\text{m}$ zu messen.

Abstimmung der Empfindlichkeit, sodass der gemessene Wert möglichst mit dem kalibrierten Wert des Rillennormals übereinstimmt.

Somit

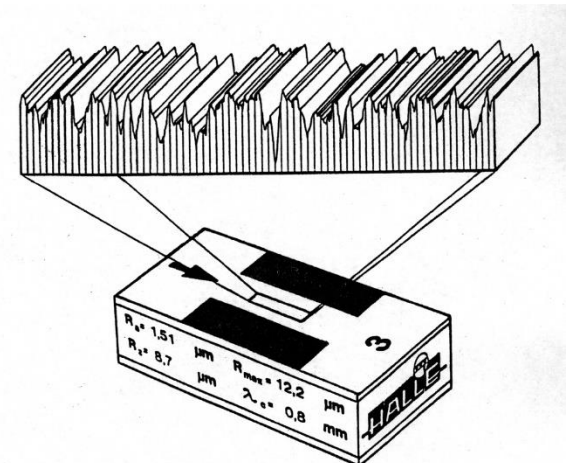
- $\delta Ra_{cal} = 0$
wegen der sehr gute Abstimmung

- $u(\delta Ra_{cal}) = 6 \text{ nm} \cdot \frac{2 \mu\text{m}}{10 \mu\text{m}} = 1.2 \text{ nm}$

weil eine Unsicherheit von 6.0 nm bezogen auf 10 μm , ergibt 1.2 nm bezogen auf 2 μm .

Verifikation des Messgerätes

Überprüfung des Messgerätes mit seiner gesamten Messfunktion: Messung eines bekannten Rauheitskennwertes Ra , verkörpert mit einem Raunormal.



- Kalibrierter Wert des Raunormals: $Ra = (1.510 \pm 0.024) \mu\text{m}$.
- Messung mit Tastschnittgerät ergibt $Ra = 1.530 \mu\text{m}$, also eine Abweichung von 20 nm.

Verifikations-Beitrag δRa_{ver}

Kalibrierter Wert des Raunormals: $Ra = (1.510 \pm 0.024) \mu\text{m}$.

Abweichung von 20 nm

Damit

- $|\delta Ra_{\text{ver}}| = 20 \text{ nm}$

Dieser Beitrag **wird nicht korrigiert**, weil dies im Widerspruch zur genauen Übereinstimmung bei der Kalibrierung steht.

- $u(\delta Ra_{\text{ver}}) = 12 \text{ nm}$

Wiederholpräzision $\delta Ra_{\text{repeat}}$

Ermittelt durch wiederholtes Messen des Raunormals oder des Werkstückes an derselben Stelle. Die beobachtete Streuung ist 4 nm.

Diese Wiederholbarkeit wird beim Messwert $\delta Ra_{\text{gemessen}}$ berücksichtigt:

- $u(\delta Ra_{\text{gemessen}}) = 4 \text{ nm}$
- $\delta Ra_{\text{repeat}} = 0 \text{ nm}$
- $u(\delta Ra_{\text{repeat}}) = 0 \text{ nm}$

Hätte man die Messung nur einmal gemacht, dann wäre $u(\delta Ra_{\text{gemessen}}) = 0 \text{ nm}$, dafür hätten wir die Wiederholpräzision getrennt an einem ähnlichen Prüfling auswerten müssen.

Reproduzierbarkeit $\delta Ra_{\text{reprod}}$

Reproduzierbarkeit gegeben durch Gleichmässigkeit der Oberflächen-textur des Werkstückes. Wiederholte Messung an verschiedenen Stellen ergibt

- einen Mittelwert von $Ra = 2.042 \mu\text{m}$
- und eine Streuung (Standardabweichung) von $0.024 \mu\text{m}$

Damit: $\delta Ra_{\text{reprod}} = 24 \text{ nm}$

Aufpassen



Man ist an der Streuung einer individuellen Messung interessiert, nicht an der Streuung des Mittelwerts von 10 Messungen: in diesem Fall gibt es keinen Faktor \sqrt{n} im Nenner.

Messunsicherheitsbilanz

Grösse	X_i	Messwert		$u(k = 1)$ [nm]
Gemessene Rauheit	Ra_{gemessen}	2.042	μm	4.0
Kalibrierung	δRa_{cal}	0.0	μm	1.2
Verifikation	δRa_{ver}	0.020	μm	12.0
Wiederholbarkeit	$\delta Ra_{\text{repeat}}$	0.0	μm	0.0
Reproduzierbarkeit	$\delta Ra_{\text{reprod}}$	0.0	μm	24.0
Combinierte Standard Unsicherheit $u_c(Ra)$				27.2

$$\begin{aligned}
 U(Ra) &= 2 \cdot u_c(Ra) + |\delta Ra_{\text{ver}}| \\
 &= (2 \cdot 27 + 20) \text{ nm} = 0.074 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

Angabe des Resultates: $Ra = (2.04 \pm 0.08) \mu\text{m}$

Bemerkung: der Fehler δRa_{ver} von 20 nm wird nicht korrigiert und aus diesem Grund wird er zur MU linear addiert (siehe GUM Abschnitt F.2.4.5)

Alternative Möglichkeit

Der Verifikationsfehler wurde nicht korrigiert, weil dies «im Widerspruch zur Kalibrierung ist». Dabei wird eigentlich akzeptiert, dass es unmöglich ist, fehlerfreie Verifikationen zu produzieren.

Eine **interessante Variante**, um die Messunsicherheit in diesem Fall zu behandeln, besteht darin, dass man für die Verifikation eine maximale **vordefinierte** Toleranz (grösste Verifikationsfehler) definiert, im früheren Beispiel ist es 32 nm.

Das Modell wird mit einer zusätzlichen Grösse $\delta Ra_{\text{ver-tol}}$ vervollständigt.

Verifikations-Toleranz

- Ist der Verifikationsfehler (bei uns 20 nm) kleiner als die vorgegebene Toleranz (32 nm), dann darf gemessen werden. Die entsprechende Messunsicherheit wird als Typ B mit Rechteckverteilung berücksichtigt.
 - $\delta Ra_{\text{ver-tol}} = 0$
 - $u(\delta Ra_{\text{ver-tol}}) = \frac{32 \text{ nm}}{\sqrt{3}} = 18.5 \text{ nm}$
- Ist der Verifikationsfehler grösser als 32 nm, dann muss die Infrastruktur kontrolliert und eventuell gewartet werden bis sie innerhalb der Toleranz kommt (nach frischer Kalibrierung!).

Alternative Messunsicherheitsbilanz

Grösse	X_i	Messwert		u (k=1) /nm
Gemessene Rauheit	Ra_{gemessen}	2.042	μm	4.0
Kalibrierung	δRa_{cal}	0.0	μm	1.2
Verifikation	δRa_{ver}	0.0	μm	12.0
Verifikations-Toleranz	$\delta Ra_{\text{ver-tol}}$	0.0	μm	18.5
Wiederholbarkeit	$\delta Ra_{\text{repeat}}$	0.0	μm	0.0
Reproduzierbarkeit	$\delta Ra_{\text{reprod}}$	0.0	μm	24.0
Combinierte Standard Unsicherheit $u_c(Ra)$				32.9

$$U(Ra) = 2 \cdot u_c(Ra) = (2 \cdot 33) \text{ nm} = 0.066 \mu\text{m}$$

Angabe des Resultates:

$$Ra = (2.04 \pm 0.07) \mu\text{m}$$