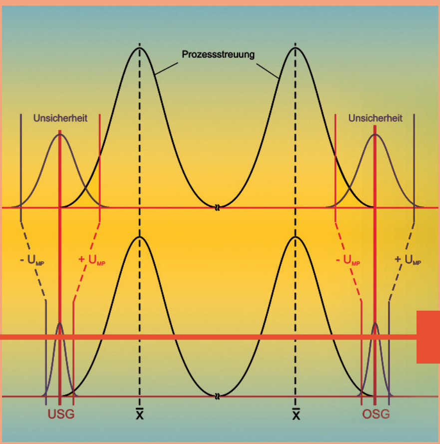
Edgar Dietrich
Michael Radeck

Prüfprozesseignung nach VDA 5 und ISO 22514-7



HANSER

Pocket Power

Edgar Dietrich
Michael Radeck

Prüfprozesseignung nach VDA 5 und ISO 22514-7

1. Auflage

HANSER

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-44332-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-44377-8

www.hanser-fachbuch.de
Gesamtlektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg
Herstellung: Jörg Strohbach
Satz: Heide Mesad, Q-DAS® GmbH & Co. KG
Coverconcept: Marc-Müller-Bremer, Rebranding, München
Umschlaggestaltung: Stephan Rönigk
Druck und Bindung: Kösel, Kempten
Printed in Germany

Vorwort zur 1. Auflage

Mit dem VDA Band 5 „Prüfprozesseignung“ [14] und der Norm ISO 22514-7 [12] wurde die Brücke gebaut, welche die pragmatisch orientierten Verfahren der Messsystemanalyse, wie diese in der MSA [1] Measurement Systems Analysis beschrieben ist, mit dem Konzept der Ermittlung eines Unsicherheitsbudgets nach GUM [9] verbindet: So lassen sich Ergebnisse aus den bekannten Messsystemanalysen Verfahren 1 und 2 einfach in eine Unsicherheitsstudie übernehmen. Auch wurden die Tugenden der Messsystemanalyse-Verfahren übernommen:

Unsicherheiten werden hauptsächlich aus praktischen Versuchen ermittelt

Einführung des Konzeptes der Fähigkeitskennwerte mit Entscheidungsregeln für die Annahme oder Rückweisung eines Messprozesses.

Insgesamt ist die Prüfprozesseignung im Sinne des VDA 5 bzw. ISO 22514-7 eine gelungene „Übersetzung“ des GUM für die Praktiker in den Fertigungsbetrieben. Möge dieses Büchlein Ihnen helfen, einen leichten Zugang zu dem Thema zu finden.

Weinheim, August 2014 Edgar Dietrich

Michael Radeck

Inhaltsverzeichnis

1 Begriffe

Messabweichungen

Führt man eine Messung durch, so entspricht der auf der Anzeige abgelesene Wert nicht dem wahren Wert. Die Differenz zwischen dem Ablesewert und dem wahren Wert ist die Messabweichung. Die bei mehreren Messungen beobachteten Messabweichungen setzten sich aus systematischen und zufälligen Anteilen zusammen.

Zufällige Messabweichungen

Zufällige Messabweichungen sind nach Betrag und Richtung nicht vorhersagbar. Ihre Größenordnung wird rechnerisch oder aus Versuchen abgeschätzt und als Unsicherheit des Messergebnisses gedeutet.

Systematische Messabweichungen

Systematische Abweichungen entstehen beispielsweise durch falsches Justieren, Ablesefehler, Schmutz, Schwingungen, Temperatureinflüsse, Verschleiß, um nur einige zu nennen. Bekannte systematische Abweichungen sind durch Justieren oder rechnerisch zu korrigieren. Einige systematische Abweichungen, entziehen sich der „einfachen Korrektur" und sind weder durch Justieren noch durch eine rechnerische Kompensation zu beseitigen, da ihre Wirkrichtung nicht bekannt ist. Diese werden hier als unbekannte systematische Messabweichungen bezeichnet. Beispiele dafür sind z.B. die Auflösung, das Spiel im Gewindegang eines Messsystems, Lageungenauigkeiten der Skalenstriche auf einer Anzeige, usw.

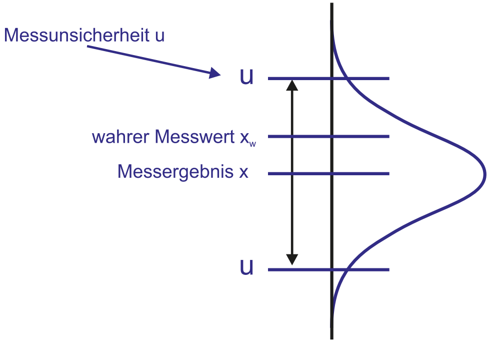


Abb. 1-1: Beispiel für einen Wertebereich um das Messergebnis x

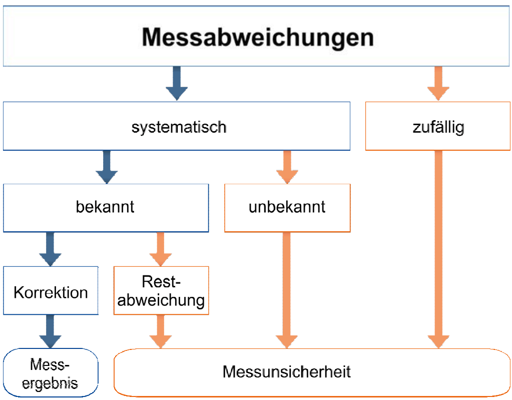


Abb. 1-2: Übersicht zum Begriffskomplex Messabweichungen und Messunsicherheit

Oft kann man zwar die Größenordnung der entstehenden Abweichung abschätzen, jedoch lässt sich die Richtung der aufgetretenen Abweichung für die konkrete Einzelmessung nicht angeben. Hier werden die unbekannten systematischen Abweichungen wie zufällige Abweichungen zu behandeln.

Messunsicherheit

Zur Messunsicherheit zählen wir die zufälligen Messabweichungen und die in ihrer Wirkrichtung unbekannt gebliebenen systematischen Messabweichungen.

Messsystem

Unter einem Messsystem verstehen wir eine Kombination aus mehreren Messgeräten und anderen Geräten mit Versorgungseinrichtungen, die für die Ermittlung von Messwerten verwendet werden. Im Einzelfall kann ein Messsystem aus nur einem einzigen Messgerät bestehen, beispielweise bei einer Bügelmessschraube. Bei der Betrachtung des Messsystems schließen wir Einflüsse durch Bediener, Umwelt oder Messobjekte bewusst aus.

Messprozess

Betrachtet man zusätzlich zum Messsystem auch die von außen einwirkenden Einflusskomponenten wie Bediener, Umwelt und Messobjekt, so sprechen wir von einem Messprozess. Die formale Definition des Messprozesses lautet [VDA]: Zusammenspiel untereinander zusammenhängender Betriebsmittel, Aktivitäten und Einflüsse, die eine Messung erzeugen.

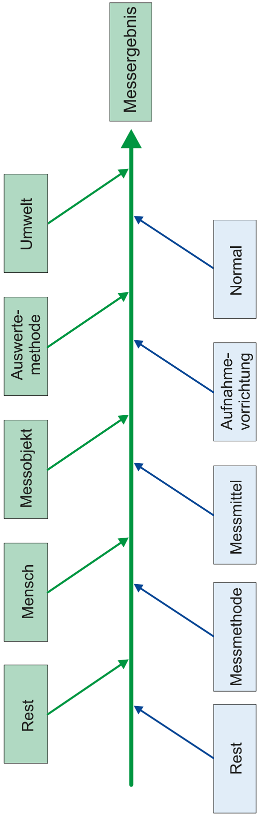


Abb. 1-3: Messsystem und Messprozess in der Übersicht
blau: Einflüsse Messsystem
grün (grau): Einflüsse Messprozess

In der folgenden Grafik ist in dem großen Kästchen in der Mitte symbolisch das Messsystem dargestellt. Nimmt man die Einflüsse der oben, links und unten angeordneten Kästchen dazu, entsteht der Messprozess. Das Ergebnis des Messprozesses ist das Messergebnis.

Prüfen

Der Begriff Prüfen ist ein Oberbegriff für eine Beurteilung, ob sich eine bestimmte Produkteigenschaft innerhalb vorgegebener Grenzen befindet.

Die Beurteilung kann dabei auf drei Arten erfolgen:

1) subjektiv durch Sinneswahrnehmung

2) objektiv durch Prüfen mit einer Lehre

3) objektiv durch Messen mit einem Messmittel

Die subjektive Prüfung ist wegen unterschiedlicher Bewertung bzw. Beurteilung des jeweiligen Prüfers sehr kritisch und bedarf viel Erfahrung.

Messen

Messen im engeren Sinne heißt, eine zu messende Größe als Vielfaches einer allgemein anerkannten Einheit derselben physikalischen Dimension durch Vergleich mit einer Maßverkörperung dieser Einheit zu bestimmen. Dies ist also ein Vorgang, aus dem das Messergebnis entsteht.

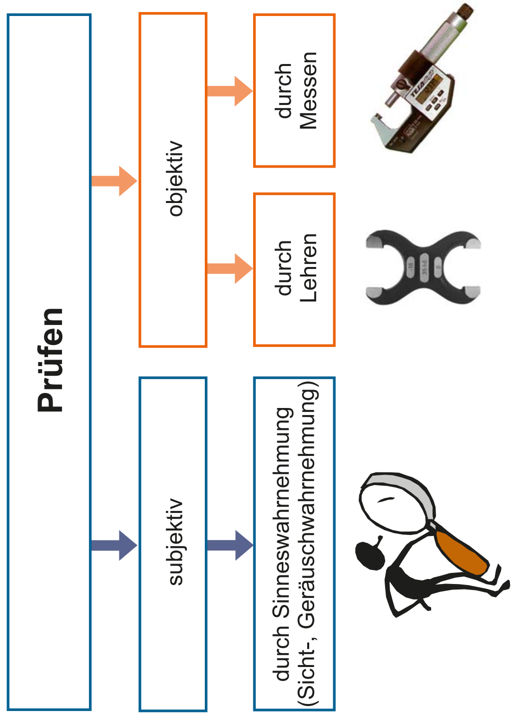


Abb. 1-4: Objektive und subjektive Prüfung

Wahrer Wert x_w

Ein wahrer Wert würde sich bei einer idealen Messung ergeben. Da eine ideale Messung, die weder zufälligen, noch systematische Einflüssen unterliegt, nicht existiert, bleibt der wahre Wert unbekannt.

Richtiger Wert x_m

Ein durch Vereinbarung anerkannter Wert, der einer betrachteten speziellen Größe zugeordnet wird und der mit einer dem jeweiligen Zweck angemessenen Unsicherheit behaftet ist.

Messergebnis x_i

Das Messergebnis ist das Ergebnis des Messens und ist ein Schätzwert für den wahren Wert der Messgröße, angegeben als Zahlenwert mal Einheit der gemessenen Größe.

Berichtigtes Messergebnis

Das berichtigte Messergebnis entsteht, wenn man das Messergebnis bezüglich der bekannten systematischen Messabweichungen korrigiert.

Messgenauigkeit

Der Begriff Messgenauigkeit ist ein qualitativer Begriff für den Grad der Annäherung des Messergebnisses an den wahren Wert der Messgröße. In der Regel benutzt man den Begriff für Vergleiche: Das Messsystem A ist genauer als das Messsystem B.

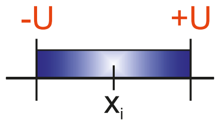


Abb. 1-5: Messergebnis
U = Erweiterte Messunsicherheit

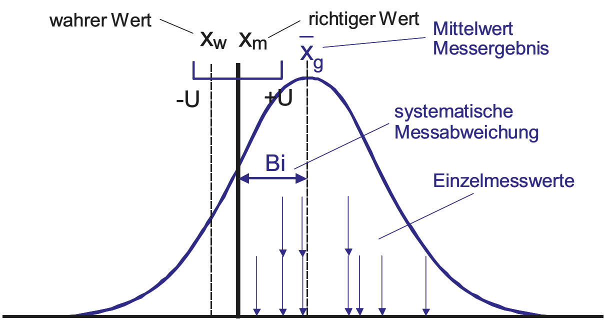


Abb. 1-6: Objektive und subjektive Prüfung

2 Ermittlungsmethoden für Standardunsicherheiten

Die Grundidee der Messunsicherheitsbetrachtung besteht darin, dass für jeden Einfluss die zugehörige Unsicherheit ermittelt und als Standardunsicherheit angegeben wird. Die einzelnen Unsicherheitskomponenten werden entweder durch Versuche (= Ermittlungsmethode A) ermittelt oder aus bekannten Informationen (= Ermittlungsmethode B) abgeleitet.

Sind die Standardunsicherheiten ermittelt, so werden diese zu einer kombinierten Standardunsicherheit zusammengefasst. Die kombinierte Standardunsicherheit wird durch Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor zu einer erweiterten Unsicherheit, die man direkt als Unsicherheit der Einzelmessung interpretieren kann.

2.1 Festlegen der zu berücksichtigenden Einflussgrößen

Zunächst wird im Team festgestellt, welche Einflussgrößen zu berücksichtigen sind. Für diese Sammlung kann es hilfreich sein, ein Ursache-Wirkungs-Diagramm zu verwenden.

Nach der Sammlung werden die Einflüsse einer der Gruppen *Messsystem* oder *Messprozess* zugeordnet. Innerhalb jeder Gruppe entscheidet man für jede Einflussgröße, ob diese der Kategorie *systematisch* oder *zufällig* angehört. Auf der Grundlage dieser Vorarbeit ist es leichter eine geeignete Ermittlungsmethode auszuwählen.

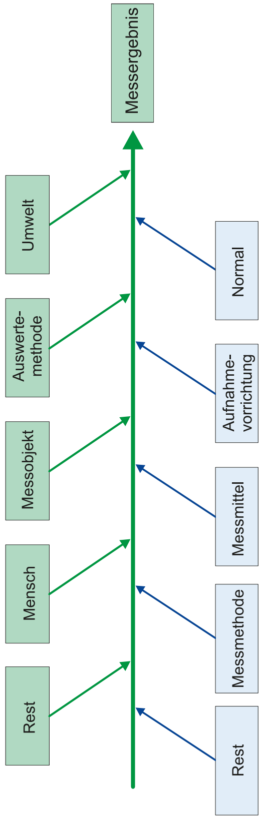


Abb. 2-1: Messsystem und Messprozess in der Übersicht
blau: Einflüsse Messsystem
grün (grau): Einflüsse Messprozess

2.2 Auswahl eines Messsystems

Die prozentuale Auflösung des Messsystems sollte kleiner oder höchstens gleich 5 % der Toleranz betragen:

$$\%RE = \frac{RE}{TOL} \cdot 100\,\%, \text{ mit}$$

RE = Auflösung des Messsystems

TOL = Toleranz des mit dem Messsystem zu messenden Produkt- oder Prozessmerkmals.

2.3 Betrachtung des Messsystems und des Messprozesses

Die Analyse wird mit der Betrachtung des Messsystems begonnen. Ist die Analyse und Beurteilung für das Messsystem abgeschlossen und bestanden, erfolgt die Ausweitung der Betrachtung auf den gesamten Messprozess. Die Unsicherheitsermittlung erfolgt also zweistufig. Zunächst beschränkt auf das Messsystem, anschließend ausgeweitet auf den gesamten Messprozess.

2.4 Ermittlungsmethoden für Standardunsicherheiten

In der Regel wird es Unsicherheitskomponenten geben, deren Werte aus der Vergangenheit oder aus vertrauenswürdigen Quellen bekannt sind und solche, deren Werte noch unbekannt sind. Für die Berechnung der Standardunsicherheit aus bekannten Werten dient die Ermittlungsmethode A, während die Methode B für die Ermittlung der Standardunsicherheit aus Versuchen dient.

Abb. 2-2: Beispiel Messschieber mit Auflösung RE=0,01mm

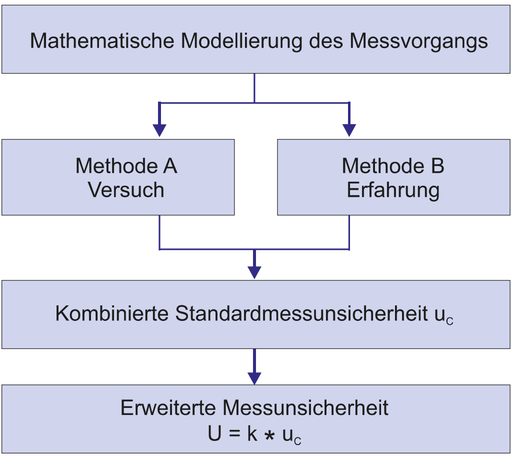


Abb. 2-3: Übersicht der Ermittlungsmethoden zur Messunsicherheit

2.4.1 Standardunsicherheit nach der Ermittlungsmethode A (Auswerten eines Versuchs)

Ziel bei dieser Methode ist es, durch Versuche die Standardabweichungen der einzelnen Einflussgrößen zu erhalten. Dazu wird im Team festgelegt, welche empirische Untersuchungsmethode für diesen Zweck besonders geeignet ist. Nach der Durchführung der Versuche wird in der Regel das Verfahren der Varianzanalyse (=ANOVA) verwendet, welches die Gesamtstreuung im Versuch in Streukomponenten zerlegt. Die dabei berechneten Standardabweichungen für die Streuungsursachen können direkt als Standardunsicherheiten übernommen werden.

2.4.2 Standardunsicherheit nach der Ermittlungsmethode B (Bekannte Werte)

Typische Beispiele für bekannte Informationen über die Messunsicherheit sind:

- Auflösung, in ihrer Wirkrichtung unbekannte systematische Messabweichung
- Unsicherheit aus einer früheren Untersuchung
- Unsicherheit aus einem Kalibrierschein
- Angaben des Herstellers
  (Maximum Permissible Error MPE)

Auch hier ist das Ziel, die Werte als Standardabweichung bzw. Standardunsicherheit auszudrücken. Oft ist jedoch nur ein Grenzwert der Unsicherheitskomponente bekannt, wie dies z.B. für die Auflösung der Fall ist.

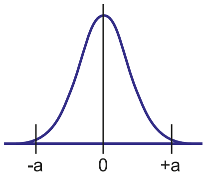
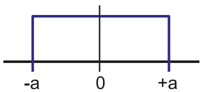
Verteilung	*Schema*	*Transformationskoeffizient b*	*Standardunsicherheit $u(x_B)$ nach VDA Band 5*
Normalverteilung		*0,5*	$u(x_B) = 0{,}5 \cdot a$
Rechteckverteilung		$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$u(x_B) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot a$

Abb. 2-4: Tabelle ausgewählter Verteilungsfaktoren für die Ermittlungsmethode B

Hinweis:

Es gibt weitere Verteilungen, aus denen die Standardunsicherheit $u(x_B)$ berechnet werden kann. Diese haben bei den hier betrachteten Anwendungsfällen keine Bedeutung.

In diesem Fall muss der Grenzwert a mit dem Verteilungsfaktor b multipliziert werden, um die einfache Standardabweichung (= Standardunsicherheit) für diese Unsicherheitskomponente zu erhalten:

$u(x_B) = a \cdot b$

mit a = Grenzwert und b = Verteilungsfaktor

Zur Auswahl des Verteilungsfaktors b muss allerdings die Verteilung der Unsicherheitskomponente bekannt sein. Kennt man diese nicht, so nimmt man den schlimmsten Fall an und wählt den Verteilungsfaktor b der Rechteckverteilung.

2.4.3 Zusammenfassung der Ermittlungsmethoden

In der folgenden Übersichtstabelle sind die einzelnen Ermittlungsmethoden A und B für die Standardunsicherheiten zusammenfassend dargestellt:

Berechnungs-rundlage	*Formel*	*Erläuterung / Beispiel*
B: Erweiterte Messunsicherheit bekannt	$\frac{U}{2}$	*U aus Kalibrierschein*
B: Grenzwert	$a \cdot b$	*a = Grenzwert* *Grenzwert = 0,5 × Auflösung oder Bias oder Formabweichung oder 0,5 × Kalibrierunsicherheit* *b = Verteilungsfaktor aus Abb. 2-4*
B: Maximum Permissible Error MPE	$\frac{\mathrm{MPE}}{\sqrt{3}}$	*Fehlergrenzwert aus Kalibrierschein*
A: Standard-abweichung	s_g	*Wiederholungsmessungen bei einer Einflusskomponente*
A: ANOVA	*Schätzwerte der Standardabweichungen für jede untersuchte Einflusskomponente*	*Aufbau gemäß dem gewählten Versuchsplan*

Abb. 2-5: Übersicht der Ermittlungsmethoden für Standardunsicherheiten nach VDA 5
A: Ermittlungsmethode A
B: Ermittlungsmethode B

2.5 Kombinierte Standardunsicherheit

Die einzelnen Standardunsicherheiten werden durch geometrische Addition (= Wurzel aus der Summe der Varianzen) zu einer kombinierten Standardunsicherheit zusammengefasst. Zu Beginn, bei der Betrachtung des Messsystems, wird zunächst nur die kombinierte Standardunsicherheit des Messsystems u_{MS} ermittelt. Später, nach erfolgreich bewältigter Abnahme des Messsystems, wird die Betrachtung auf den gesamten Messprozess ausgeweitet und die kombinierte Standardunsicherheit des Messsystems u_{MS} und des Messprozesses u_{MP} ermittelt:

Kombinierte Standardunsicherheit des Messsystems:

$$u_{MS} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2}$$

Kombinierte Standardunsicherheit des Messprozesses:

$$u_{MP} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2}$$

Hinweis: Diese Art des Zusammenfassens setzt voraus, dass die einzelnen Standardunsicherheiten von Größen stammen, die unabhängig voneinander sind, also nicht miteinander korrelieren.

Einflusskomponente	Symbol	Methode A	Methode B
Auflösung	u_{RE}		$\frac{Auflösung}{2 \cdot \sqrt{3}}$
Kalibrierunsicherheit	u_{CAL}		$\frac{U_{CAL}}{2}$
Wiederholbarkeit am Normal	u_{EVR}	s_g	
Systematische Messabweichung	u_{BI}	$\frac{\lvert \bar{x}_g - x_m \rvert}{\sqrt{3}}$	
Linearität	u_{LIN}	ANOVA	Kalibrierprotokoll

Abb. 2-6: Typische Standardunsicherheitskomponenten Messsystem

Einflusskomponente	Symbol	Methode A	Methode B
Wiederholbarkeit Prüfobjekt	u_{EVO}	EV aus ANONVA	
Bedienereinfluss	u_{AV}	AV aus ANOVA	
Vergleichbarkeit Vorrichtung	u_{GV}	GV aus ANOVA	
Objekteinfluss	u_{OBJ}	s_g s_g aus Messprotokoll	$\frac{a}{\sqrt{3}}$ a = Formabweichung aus Zeichnung
Temperatureinfluss	u_T	$\frac{a}{\sqrt{3}}$ a = gemessene Längenausdehnung	Div. Formeln z.B. $\lvert T_{OBJ} - 20^\circ C \rvert \cdot u_\alpha \cdot l$
Messbeständigkeit	u_{STAB}	Streuung aus Regelkarte oder Verlauf Einzelwerte	
Restliche Komponenten	u_{REST}		

Abb. 2-7: Typische Standardunsicherheitskomponenten Messprozess

2.6 Erweiterte Messunsicherheit

Die erweiterte Messunsicherheit ergibt sich aus der Multiplikation des Erweiterungsfaktors k mit der kombinierten Standardunsicherheit u_{MS} bzw. u_{MP}. Zu Beginn der Analyse, also bei der Betrachtung des Messsystems, erhält man die **erweiterte Messunsicherheit des Messsystems U_{MS}** und später, bei der Erweiterung der Betrachtung auf den gesamten Messprozess, erhält man die **erweiterte Messunsicherheit für den Messprozess U_{MP}**:

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS} \text{ bzw. } U_{MP} = k \cdot u_{MP}$$

Gibt man das Messergebnis zusammen mit der erweiterten Messunsicherheit in der Form $X \pm U_{MP}$ an, so ist in dem Überdeckungsbereich der tatsächliche Messwert mit großer Wahrscheinlichkeit enthalten.

Der Erweiterungsfaktor wird als Quantil einer angenommenen Verteilung berechnet, oft auf der Grundlage des Modells Normalverteilung (exakter: Standardnormalverteilung). Wird die Unsicherheit aus einem Versuchen mit kleinem Stichprobenumfang ermittelt, so sollte der Erweiterungsfaktor k auf der Grundlage der t-Verteilung ermittelt werden.

Oft wird der Erweiterungsfaktor k = 2 verwendet, was bedeutet, dass für die Unsicherheit das Modell Normalverteilung angenommen wird und das für die Berechnung des Überdeckungsbereiches das Vertrauensniveau $1\text{-}\alpha = 95{,}45$ % ausgewählt wurde.

Vertrauensniveau 1-α	*Erweiterungsfaktor k*
68,23 %	*1*
95,45 %	*2*
99,73 %	*3*

Tabelle 2-1: Tabelle der Erweiterungsfaktoren auf Basis der Normalverteilung

Freiheitsgrade	*Erweiterungsfaktoren k für verschiedene Vertrauensniveaus 1-α*		
f	*1-α = 68,23%*	*1-α = 95,45 %*	*1-α = 99,73 %*
1	*1,837*	*13,968*	*235,784*
2	*1,321*	*4,527*	*19,206*
3	*1,197*	*3,307*	*9,219*
4	*1,142*	*2,869*	*6,620*
5	*1,111*	*2,649*	*5,507*
6	*1,091*	*2,517*	*4,904*
7	*1,077*	*2,429*	*4,530*
8	*1,067*	*2,366*	*4,277*
9	*1,059*	*2,320*	*4,094*
10	*1,053*	*2,284*	*3,957*
11	*1,048*	*2,255*	*3,850*
12	*1,043*	*2,231*	*3,764*
13	*1,040*	*2,212*	*3,694*
14	*1,037*	*2,195*	*3,636*
15	*1,034*	*2,181*	*3,586*
16	*1,032*	*2,169*	*3,544*
17	*1,030*	*2,158*	*3,507*
18	*1,029*	*2,149*	*3,475*
19	*1,027*	*2,140*	*3,447*
20	*1,026*	*2,133*	*3,422*

Tabelle 2-2: Tabelle der Erweiterungsfaktoren k auf Basis der t-Verteilung

3 Ablauf des Eignungsnachweises

Auf der Grundlage der erweiterten Messunsicherheit werden Kenngrößen für den Eignungsnachweis berechnet und diese mit den höchstzulässigen Werten verglichen. Insgesamt ergeben sich aus den Analyse-Ergebnissen drei Anwendungen:

1) Nachweis der Messsystemeignung (Q_{MS})
2) Nachweis der Messprozesseignung (Q_{MP})
3) Berücksichtigung der Messunsicherheit (Toleranzanpassung)

Das Schema zur Beurteilung der

- Standardunsicherheiten $u(x_A)$, $u(x_B)$
- Erweiterte Messunsicherheit U_{MS}, U_{MP}
- Eignungskennwerte Q_{MS}, Q_{MP}
- Minimale Toleranz $T_{MIN\text{-}UMS}$, $T_{MIN\text{-}UMP}$

ist in Abb. 3-1 dargestellt.

Abb. 3-1: Grobschema der Messunsicherheitsbestimmung

3.1 Nachweis der Messsystemeignung (Q_{MS})

Für die Beurteilung, ob das Messsystem für die Anwendung geeignet sein könnte (vorläufiger Entscheid), wird die **Eignungskenngröße des Messsystems Q_{MS}** berechnet.

Der errechnete Eignungskennwert wird mit dem höchstzulässigen Wert Q_{MS_max} = 15 % (Empfehlung) verglichen.

In Worten: Ist das Ergebnis für den Eignungskennwert Q_{MS} kleiner oder höchstens gleich 15 %, so sind die Anforderungen erfüllt. Ist der Eignungskennwert jedoch größer als 15 %, so sind Verbesserungen am Messsystem durchzuführen oder es ist ein anderes Messsystem auszuwählen. Das Eignungsnachweisverfahren muss nach der Verbesserungsmaßnahme bzw. nach der Auswahl eines anderen Messsystems erneut durchgeführt werden.

3.2 Minimal prüfbare Toleranz des Messsystems

Setzt man in die Berechnungsformel für den Eignungskennwert Q_{MS} den höchstzulässigen Wert Q_{MS_max} = 15 % ein und stellt die Formel nach der Toleranz um, so erhält man die **minimal prüfbare Toleranz des Messsystems TOL_{MIN_UMS}**.

Hat das Messsystem die Anforderung bezüglich Q_{MS} erfüllt, so wird die zweite Abnahmestufe begonnen, also die Betrachtung auf den gesamten Messprozess ausgeweitet.

Unsicherheits-Komponenten	Symbol	Kombinierte Messunsicherheiten
Kalibrierung Normal	u_{CAL}	$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max\left\{u_{EVR}^2,\ u_{RE}^2\right\} + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2}$$
Systemtische Messabweichung	u_{BI}	
Linearitätsab-weichung	u_{LIN}	$$u_{MS} = \sqrt{\frac{MPE^2}{3}}$$
Wiederholbarkeit am Normal	u_{EVR}	
Fehlergrenzwert	MPE	$$u_{MS} = \sqrt{\frac{MPE_1^2}{3} + \frac{MPE_2^2}{3} \ldots}$$

Erweiterte Messunsicherheiten Eignung Minimale Toleranz
$$U_{MS} = k \cdot u_{MS}$$
$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\%$$
$$T_{MIN-UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS\_max}} \cdot 100\%$$

Abb. 3-2: Schema für den Eignungsnachweis des Messsystems

3.3 Nachweis der Messprozesseignung (Q_{MP})

Das Ermittlungsschema ist analog zu demjenigen der Messsystemeignung. Mit der erweiterten Messunsicherheit des Messprozesses U_{MP} und der Toleranz des zu messenden Merkmals TOL berechnet man den Eignungskennwert des Messprozesses Q_{MP}.

Die Anforderung an den Messprozess lautet: $Q_{MP} \leq Q_{MP\_max} = 30\ \%$

In Worten: Ist das Ergebnis für den Eignungskennwert des Messprozesses Q_{MP} kleiner oder höchstens gleich 30 %, so sind die Anforderungen erfüllt. Ist jedoch der Eignungskennwert Q_{MP} größer als 30 %, so sind die Anforderungen nicht erfüllt und der Messprozess muss verbessert werden. Hierbei sollte man das Pareto-Prinzip berücksichtigen: Bei der Verbesserung bemühe man sich um das Reduzieren der größten Unsicherheitskomponenten.

3.4 Minimal prüfbare Toleranz des Messprozesses

Setzt man in die Formel den empfohlenen Grenzwert Q_{MP_max} ein und stellt die Formel nach der Toleranz um, so erhält man die **minimal prüfbare Toleranz des Messprozesses TOL_{MIN_UMP}**:

Hinweis: Die minimal prüfbare Toleranz des Messprozesses TOL_{MIN_QMP} ist eine hilfreiche Informationsquelle bei der Auswahl eines Messprozesses für ein neues Produkt(-merkmal).

Unsicherheits-komponenten	Symbol	Kombinierte Messunsicherheiten
Wiederholbarkeit am Prüfobjekt	u_{EVO}	$\sqrt{u_{CAL}^2 + \max\left(u_{EVR}^2, u_{EVO}^2, u_{RE}^2\right) + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{IA_i}^2}$
Vergleichbarkeit der Bediener	u_{AV}	
Vergleichbarkeit Messvorrichtungen	u_{GV}	
Vergleichbarkeit Zeitpunkte	u_{STAB}	
Wechsel-wirkung(en)	u_{IAi}	
Inhomogenität Prüfobjekt	u_{OBJ}	
Auflösung Anzeige	u_{RE}	
Temperatur	u_T	
Rest	u_{REST}	

Erweiterte Messunsicherheiten Eignung Minimale Toleranz
$U_{MP} = k \cdot u_{MP}$
$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{TOL} \cdot 100\%$
$T_{MIN-UMP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{Q_{MP\_max}} \cdot 100\%$

Abb. 3-3: Schema für den Eignungsnachweis des Messprozesses

3.5 Berücksichtigung der Messunsicherheit (Toleranzanpassung)

In der DIN EN ISO 14253 wird die Berücksichtigung der Messunsicherheit an den Toleranzgrenzen empfohlen. Der Hersteller des Merkmals berücksichtigt die erweiterte Messunsicherheit des Messprozesses, indem er seine Toleranz einschränkt:

$$USG_{Hersteller} = USG + U_{MP}$$

$$OSG_{Hersteller} = OSG - U_{MP}$$

Der Abnehmer berücksichtigt die erweiterte Messunsicherheit des Messprozesses, indem er die Toleranz erweitert:

$$USG_{Abnehmer} = USG - U_{MP}$$

$$OSG_{Abnehmer} = OSG + U_{MP}$$

In Abb. 3-4 ist der Sachverhalt veranschaulicht. Die Abb. 3-5 verdeutlicht die Konsequenz für die einzelnen Bereiche bei zu- bzw. abnehmender Messunsicherheit U_{MP}.

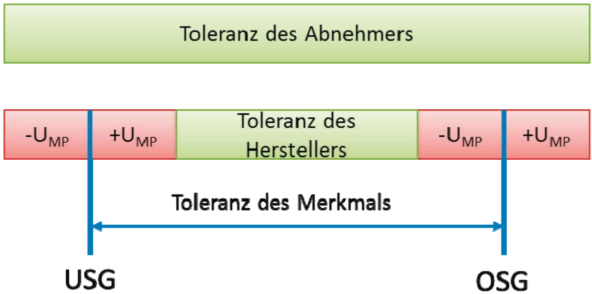


Abb. 3-4: Veranschaulichung der Toleranzanpassung auf der Hersteller- und Abnehmerseite

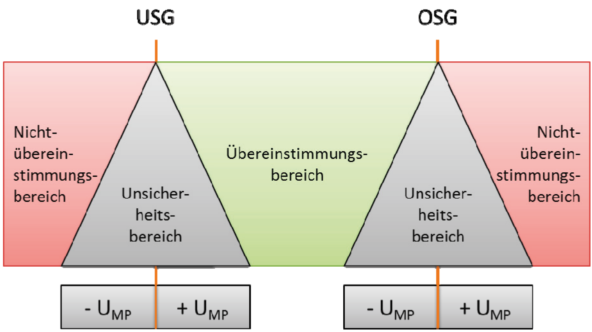


Abb. 3-5: Veranschaulichung der Abhängigkeit des Übereinstimmungsbereiches von der Größe der Messunsicherheit

4 Analyse eines Messsystems

In den vorhergehenden Kapiteln wurde das zweistufige Abnahmeverfahren – erst das Messsystem und anschließend den Messprozess zu betrachten – vorgestellt und beschrieben. In diesem Kapitel wird das Vorgehen konkretisiert:

- Welche Unsicherheitskomponenten sollen berücksichtigt werden?
- Was zählt zum Messsystem und was zum Messprozess?

Auch wenn diese Fragen im Detail erst bei der Betrachtung eines realen Messprozesses beantwortet werden können, lassen sich doch Unsicherheitskomponenten identifizieren, die typischer Weise dem Messsystem oder dem Messprozess zuzuordnen sind. Auf der rechten Seite sind exemplarisch Unsicherheitskomponenten dem Messsystem und dem Messprozess zugeordnet, wobei andere und weitere Komponenten möglich sind.

Unsicherheitskomponenten des Messsystems

- Kalibrierunsicherheit des Normals oder Referenzteiles u_{Cal}
- Auflösung des Messgerätes u_{RE}
- Systematische Messabweichung u_{BI}
- Wiederholpräzision des Prüfmittels u_{EVR}
- Restliche Einflussfaktoren u_{Rest}

Unsicherheitskomponenten des Messprozesses

- „Wiederholpräzision" in der Fertigung u_{EVO}
- Bedienereinfluss u_{AV}
- Einfluss des Prüfobjektes u_{Obj}
- Temperatureinfluss u_{T}
- Linearitätsabweichungen u_{Lin}
- Stabilitätsabweichungen u_{Stab}
- Verschiedene Vorrichtungen u_{GV}
- Restliche Einflussfaktoren u_{Rest}

4.1 Ablauf zur Ermittlung der Messsystemeignung

Für die Ermittlung der Messunsicherheit des Messsystems wird je nach Ausgangssituation **eines** der drei Standardverfahren bevorzugt angewendet:

1. Bestimmung aus einer bekannten Abweichungsgrenze (Maximum Permissible Error, MPE)
2. Ermittlung aus einem Versuch gemäß dem Verfahren 1
3. Ermittlung aus einem Versuch gemäß dem Verfahren Linearität

Hinweis: Für die Fälle 2 und 3 ist zu bedenken, dass der Temperatureinfluss während der Messsystembetrachtung nicht explizit berücksichtigt ist. Wird aber eine Linearitätsstudie oder ein Verfahren 1 bei Temperaturen durchgeführt, die deutlich von der Bezugstemperatur 20 °C abweichen, so wird der Temperatureinfluss den Wert der Linearitätsabweichung oder des Bias aufblähen. In diesem Falle sollte der Temperatureinfluss als eigene Unsicherheitskomponente berücksichtigt werden.

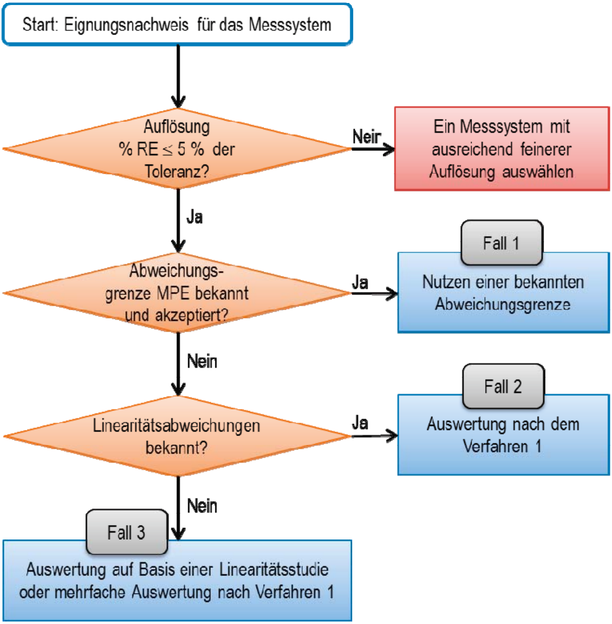


Abb. 4-1: Ablaufschema des Eignungsnachweises für das Messsystem – 3 Fälle

4.1.1 Auflösung des Messsystems

Bevor jedoch die Messunsicherheit des Messsystems ermittelt wird, ist eine ausreichend feine Auflösung des für die Prüfaufgabe angedachten Messsystems sicherzustellen.

Eine ausreichend feine Auflösung ist gegeben, wenn die prozentuale Auflösung % RE des Messsystems kleiner oder höchstens gleich 5 % der Toleranz ist:

$$\%\,RE = \frac{RE}{TOL} \cdot 100\,\% \leq 5\,\%\text{, mit}$$

RE = Auflösung des Messsystems, in der gleichen Einheit wie die Toleranz

TOL = Toleranz des mit dem Messsystem zu messenden Produkt- oder Prozessmerkmals

In Worten: Das Messsystem sollte innerhalb der Toleranz 100 % / 5 % = 20 verschieden Messwerte unterscheiden können.

Ist keine Herstellerangabe über die Auflösung verfügbar, so wählt man im Falle einer Digital-Anzeige für die Auflösung den Wert, der dem kleinsten Ziffernsprung in der letzten Dezimalstelle entspricht und bei einer Analog-Anzeige den Wert, der dem kleinsten eindeutig unterscheidbaren Skalenschritt entspricht. Beim Einsetzten in die Formel achte man darauf, dass die Einheit des Toleranzwertes derjenigen des Auflösungswertes entspricht. Beispiel: Setzt man die Toleranz in mm ein, so ist auch die Auflösung in mm einzusetzen!

Abb. 4-2: Digitalanzeigen mit unterschiedlichen Auflösungen: 0,01, 0,001 und 0,0001

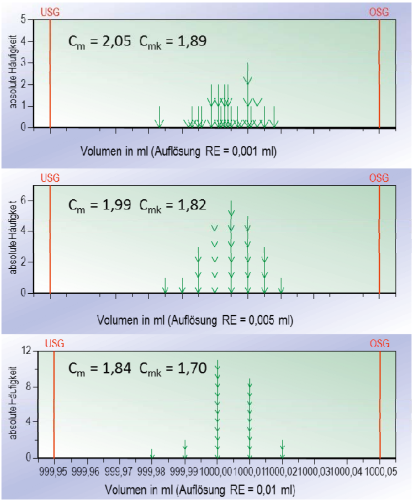
Beispiel: Für das Merkmal Außendurchmesser einer Transmissionswelle soll eine Bügelmessschraube mit dem Messbereich von (0 bis 25) mm eingesetzt werden. Die Spezifikation des Außendurchmessers: 2h9.

Untere Spezifikationsgrenze USG = 1,975 mm und die obere Spezifikationsgrenze OSG = 2,000 mm. Die ausgewählte Bügelmessschraube hat eine Auflösung RE = 0,001 mm.

Aus den verfügbaren Werten bestimmt man den Wert der prozentualen Auflösung:

$$\%\,RE = \frac{0{,}001\,\text{mm}}{(2{,}000 - 1{,}975)\,\text{mm}} \cdot 100\,\% = 4\,\%$$

Die prozentuale Auflösung ist mit 4 % kleiner als der höchstzulässige Grenzwert % RE_{max} = 5 %, folglich ist das Messsystem bezüglich der Auflösung geeignet.



Auflösung: 1 %
Beurteilung: Sehr gut

Auflösung: 5 %
Beurteilung: ausreichend

Auflösung: 10 %
Beurteilung: ungenügend

Abb. 4-3: Dieselben Volumen-Werte in unterschiedlichen Auflösungen dargestellt – Unzureichende Auflösung bedeutet ein Verlust an Information

4.1.2 Messsystemeignung aus bekannter Abweichungsgrenze

Die Option, die Messunsicherheit mit der Ermittlungsmethode B zu bestimmen, dürfte insbesondere für einfache Standardprüfmittel interessant sein, wie z.B. Messschieber, Bügelmessschrauben, Innenmessschrauben, usw. In der Regel gibt der Hersteller eine obere Abweichungsgrenze an, die hier ganz allgemein als *Maximum Permissible Error* M_{PE} (Abweichungsgrenzwert, maximal zulässige Abweichung) bezeichnet und bewusst nicht näher spezifiziert ist.

Sofern der angegebene Grenzwert vertrauenswürdig ist, kann daraus die Standardunsicherheit ermittelt werden. Wichtig ist, das der Grenzwert im Sinne des Wertes a in dem Berechnungsschema $u = a \cdot b$ eingesetzt wird. Die von einem Hersteller angegebene Fehlergrenze entspricht in der Regel dem Grenzwert +a gemäß Abb. 4-5. Dies muss jedoch im konkreten Anwendungsfall überprüft werden.

Da oft keine spezifische Angabe über die Art der Verteilung vorhanden ist, nimmt man den schlimmsten Fall an: Die Rechteckverteilung. Der Verteilungsfaktor der Rechteckverteilung ist $b = 1/\sqrt{3}$. Durch Multiplizieren des Grenzwertes a mit dem Verteilungsfaktor b erhält man die Standardunsicherheit des Messsystems:

$$u_{MS} = a \cdot b = MPE \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

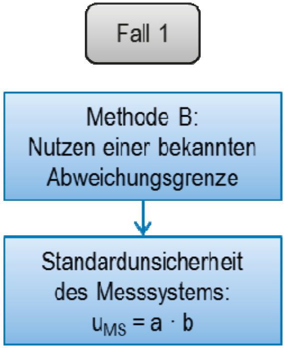


Abb. 4-4: Ablaufschema: Nutzung einer bekannten Abweichungsgrenze „MPE“

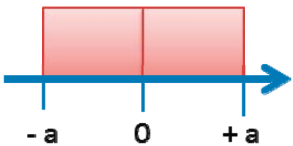


Abb. 4-5: Grenzwert a einer bekannten Unsicherheitskomponente

Beispiel zur Durchführung der Messsystemeignung anhand einer bekannten Abweichungsgrenze:

- Merkmal:
  - Außendurchmesser einer Transmissionswelle
  - Maß 2h9 (OSG = 2,000 mm, USG = 1,975 mm)
- Messsystem Bügelmessschraube
  - Messbereich (0 bis 25) mm
  - Herstellerangabe zur Fehlergrenze a = 2 µm

Abschließend ist festzustellen, dass die Bügelmessschraube die Anforderungen nicht bestanden hat, da der berechnete Eignungskennwert des Messsystems Q_{MS} = 18,5 % größer ist als der höchstzulässige Grenzwert Q_{MS_max} = 15 %.

Hinweis: Bei der Berechnung der minimalen Toleranz wurde nur das Messsystem allein betrachtet, somit ist das Ergebnis vermutlich zu optimistisch. Der gesamte Messprozess wird für diese Toleranz wohl nicht geeignet sein.

Messsystem				
Toleranz	TOL	=	0,025	
Auflösung	%RE	=	---	0 5
Kombinierte Standardunsicherheit	u_{MS}	=	0,00115470	
Erweiterte Messunsicherheit	U_{MS}	=	0,00230940	
Eignungsgrenzwert	Q_{MS_max}	=	15,00%	
Eignungskennwert	Q_{MS}	=	18,48%	0 15
minimale Toleranz	$TOL_{MIN-UMS}$	=	0,0307920	

Abb. 4-6: Exemplarische Ergebnisausgabe zur Unsicherheitsberechnung des Programms solara.MP

Rechnung:

- Mit der Fehlergrenze a = 0,002 mm und dem Verteilungsfaktor b = 1/√3 berechnet man die Standardunsicherheit des Messsystems:

$$u_{MS} = a \cdot b = \frac{0{,}002\ \mathrm{mm}}{\sqrt{3}} \approx 0{,}0011547\ \mathrm{mm}$$

- Multipliziert man die Standardunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor k = 2, so erhält man die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems UMS:

$$U_{MS} = 2 \cdot u_{MS} = 2 \cdot 0{,}0011547\ \mathrm{mm} = 0{,}023094\ \mathrm{mm}$$

- Mit der erweiterten Messunsicherheit berechnet man den Eignungskennwert für das Messsystem QMS:

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\ \% = \frac{2 \cdot 0{,}023094\ \mathrm{mm}}{0{,}025\ \mathrm{mm}} \cdot 100\ \% \approx 18{,}5\ \%$$

- Minimal prüfbare Toleranz des Messsystems TOLmin_QMS:

$$TOL_{min\_QMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS\_max}} \cdot 100\ \% = \frac{2 \cdot 0{,}023094\ \mathrm{mm}}{15\ \%} \cdot 100\ \% \approx 0{,}031\ \mathrm{mm}$$

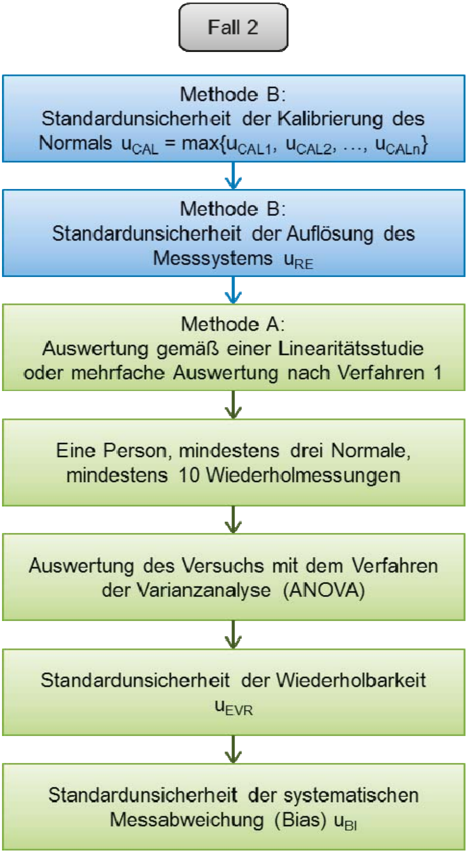


Abb. 4-7: Unsicherheitskomponenten aus einer Linearitätsstudie

4.1.3 Messsystemeignung gemäß einer Linearitätsstudie u_{Lin}

Ist beabsichtigt, mit dem Messsystem die Merkmalswerte an Produkten zu messen, deren Merkmale im Rahmen einer Produktfamilie unterschiedlich groß sind, so sollten mehrere Normale verwendet werden, deren Werte über den genutzten Messbereich möglichst gleichmäßig verteilt liegen. Die Verwendung von mindestens drei Normalen ist in so einem Fall dringend empfohlen.

Der Versuchsaufbau: Es werden mindestens $p \geq 3$ Normale ausgewählt. Jedes der Normale ist mindestens $n \geq 10$-mal wiederholt zu messen. Die Wiederholmessungen werden von derselben Person zeitnah nacheinander ausgeführt.

Schon bekannt sind:

- die Kalibrierunsicherheiten der verwendeten Normale oder Referenzteile
- die Auflösung des Messsystems

Somit lassen sich die Standardunsicherheit der Kalibrierung und die Standardunsicherheit der Auflösung nach der Methode B ermitteln.

Standardunsicherheit der Auflösung u_{RE}

Die Standardunsicherheit der Auflösung erhält man durch Multiplizieren des Grenzwertes a mit dem Verteilungsfaktor b. Der Grenzwert ist $a = RE / 2$ und für den Verteilungsfaktor wählt man denjenigen der Rechteckverteilung $b = 1/\sqrt{3}$. Somit erhält man die Standardunsicherheit der Auflösung u_{RE}:

$$u_{RE} = a \cdot b = \frac{RE}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Beispiel zur Ermittlung der Standardunsicherheit der Auflösung

Gegeben:

- Auflösung des Messsystems RE = 0,001 mm

Rechnung:

- Standardunsicherheit der Auflösung

$$u_{RE} = \frac{RE}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}001\,\text{mm}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}0002887\text{ mm}$$

Standardunsicherheit der Kalibrierung u_{CAL}

Jedes der p Normale ist mit einer Kalibrierunsicherheit behaftet, die aus dem zugehörigen Kalibrierschein zu entnehmen ist. Die p Werte der Kalibrierunsicherheit werden miteinander verglichen und der größte Wert für die Unsicherheitsberechnung übernommen:

$$u_{CAL} = \frac{\max\left\{U_{CAL.1}, U_{CAL.2}, \ldots, U_{CAL.p}\right\}}{k}, \text{ mit}$$

$U_{CAL.p}$ = Erweiterte Kalibrierunsicherheit des p-ten Normals

k = Erweiterungsfaktor aus dem Kalibrierschein

Beispiel zur Ermittlung der Standardunsicherheit der Kalibrierung aus einem Abweichungsgrenzwert:

Die erweiterte Kalibrierunsicherheit für einen Satz Parallelendmaße hat ein Hersteller mit $U = 0{,}12\,\mu m + (0{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot L)\,\mu m$ angegeben, wobei die Länge L in der Einheit mm einzusetzen ist. Von den drei verwendeten Parallelendmaßen hat das größte die Länge L = 6 mm.

$$U_{CAL} = \left(0{,}12\,\mu m + 0{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 6\right)\mu m = 0{,}1200048\,\mu m \mathrel{\hat{\approx}} 0{,}00012\ mm$$

Die erweiterte Kalibrierunsicherheit wird durch den Erweiterungsfaktor k = 2 dividiert, um die Standardisierte Unsicherheit der Kalibrierung zu erhalten:

$$u_{CAL} = \frac{U_{CAL}}{k} = \frac{0{,}00012\,mm}{2} \approx 0{,}00006\,mm$$

Standardunsicherheiten der Wiederholbarkeit und Systematischen Abweichung / Linearität

Die Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit, die Standardunsicherheit der systematischen Abweichung und die Standardunsicherheit der Linearität müssen aus Versuchen ermittelt werden. Für die numerische Auswertung der Versuche werden im Folgenden zwei Möglichkeiten vorgestellt:

1. Standardunsicherheiten aus einer Linearitätsstudie (Varianzanalyse, ANOVA)
2. Standardunsicherheiten aus mehrfacher Durchführung des Verfahrens 1

Gemäß den Empfehlungen nach [VDA 5] ist dem Verfahren der Linearitätsabweichung der Vorzug zu geben.

Als Zahlenbeispiel dienen die Messergebnisse der rechts abgebildeten Tabelle. Die Messergebnisse stammen aus einer Studie mit drei Normalen, an denen dieselbe Person jeweils 15 Wiederholmessungen durchgeführt hat.

Richtiger Wert	$x_m = 2{,}000$ mm	$x_m = 4{,}000$ mm	$x_m = 6{,}000$ mm
Nr.	*Messergebnis*	*Messergebnis*	*Messergebnis*
--	*[mm]*	*[mm]*	*[mm]*
1	2,000	4,000	6,000
2	2,000	4,000	6,001
3	2,000	4,000	6,000
4	1,999	3,999	6,000
5	2,000	4,000	6,001
6	2,000	4,000	6,000
7	2,000	4,000	6,000
8	2,001	4,000	6,001
9	2,000	3,999	6,000
10	2,000	4,000	6,000
11	2,000	4,000	6,000
12	2,000	4,000	6,000
13	2,000	4,000	6,000
14	2,000	4,000	6,000
15	2,000	4,000	6,000

Tabelle 4-1: Messergebnisse der 15 Wiederholmessungen je Normal

Die Durchführung einer Linearitätsstudie mit dem Verfahren der Varianzanalyse wird hier nicht gezeigt, da diese zu den mathematisch anspruchsvolleren Themen zählt. Stattdessen wird hier die einfachere Variante einer mehrfachen Auswertung nach dem Verfahren 1 gezeigt.

4.1.4 Standardunsicherheiten aus mehrfacher Durchführung des Verfahrens 1

1. Für jedes der p Normale werden die Stichprobenkenngrößen Standardabweichung und arithmetischer Mittelwert berechnet:

   $s_1, s_2, \ldots, s_p$

   $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_p$

2. Für jedes Normal ist der Betrag der systematischen Messabweichung – der Bias Bi – zu ermitteln:

   $Bi_1, Bi_2, \ldots, Bi_p$

3. Der größte Bias-Wert wird für die Bestimmung der Standardunsicherheit der systematischen Messabweichung verwendet; wieder nach dem Schema Grenzwert a mal Verteilungsfaktor b:

   $$u_{BI} = \max\left\{Bi_1, Bi_2, \ldots, Bi_p\right\} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

4. Die größte ermittelte Standardabweichung wird als Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit übernommen:

   $$u_{EVR} = \max\left\{s_1, s_2, \ldots, s_p\right\}$$

Beispiel zur Bestimmung der Standardunsicherheiten u_{EVR} und u_{BI} nach dem Auswerteschema der mehrfachen Durchführungen gemäß dem Verfahren 1.

Teilnr.	Analyse		Teilebez.		Drei Verfahr
Merkm.Nr.	Merkm.Bez.	n_{eff}	x_m	$\bar{x}_g$	|Bi|
X	Normal 2 mm	15	2,00000	2,00000	0,00000
4	Normal 4 mm	15	4,00000	3,99987	0,00013333
6	Normal 6 mm	15	6,00000	6,00020	0,00020000

Abb. 4-8: Auswertungsergebnisse zu den Wiederholmessungen an drei Normalen

Aus der Abbildung entnimmt man den größten Wert der systematischen Messabweichungen. Dieser ist $|Bi| = 0{,}0002$ mm. Nun berechnet man die Standardunsicherheit der systematischen Messabweichung:

$$u_{Bi} = 0{,}0002\,\text{mm} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0{,}000115\,\text{mm}$$

Die größte Wiederholstandardabweichung wurde an dem Normal 6 mm beobachtet. Diese wird direkt als Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit übernommen:

$$u_{EVR} = \max\{0{,}000378\,\text{mm}, 0{,}000352\,\text{mm}, 0{,}000414\,\text{mm}\} = 0{,}000414\,\text{mm}$$

Das gesamte Budget der Standardunsicherheit des Messsystems für das Zahlenbeispiel ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Bestimmen der kombinierten Standardunsicherheit des Messsystems u_{MS}

Die Standardunsicherheiten u_{RE}, u_{EVR}, u_{BI} und u_{Cal} werden durch geometrische Addition zur kombinierten Standardunsicherheit des Messsystems zusammengefasst. Von den beiden Komponenten *Standardunsicherheit der Auflösung* und *Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit* wird nur diejenige mit dem größeren Wert berücksichtigt.

$$u_{MS} = \sqrt{\max\{u_{RE}^2; u_{EVR}^2\} + u_{BI}^2 + u_{Cal}^2}$$

bzw. $$u_{MS} = \sqrt{\max\{u_{RE}^2, u_{EVR}^2\} + u_{LIN}^2 + u_{Cal}^2}$$

Bestimmen der erweiterten Messunsicherheit des Messsystems

Durch das Multiplizieren der kombinierten Standardunsicherheit des Messsystems mit dem Erweiterungsfaktor k erhält man die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems:

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS}\text{, mit } k = \text{Erweiterungsfaktor (siehe 2.6)}$$

Einflussgr.	Symbol	Typ	---	---	u	Rang
Auflösung	u_{RE}	B			0,000288675	2*
Kalibrierunsicherheit	u_{CAL}	B			0,0000600000	4
Wiederholbarkeit am Normal	u_{EVR}	A			0,000414039	1
Linearität	u_{LIN}	B				
Bias	u_{BI}	A			0,000115470	3
Rest Messsystem	u_{REST}	B				
Messsystem	u_{MS}				0,000434007	

Abb. 4-9: Budget der Standardunsicherheit des Messsystems für das Zahlenbeispiel

Die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems verwendet man zur Angabe des vollständigen Messergebnisses in der Form:

$X \pm U_{MS}$

Das ist nun ein Intervall um das Messergebnis X, dessen Überdeckungsbereich mit großer Wahrscheinlichkeit den wahren Wert enthält.

4.1.5 Messsystemeignung gemäß einem Verfahren 1

Ein Versuchsaufbau gemäß dem Verfahren 1 gestaltet sich wie folgt:

Es wird ein Normal ausgewählt, dessen richtiger Wert im Idealfall dem Toleranzmittenwert entspricht. Nun führt dieselbe Person mindestens 25 Wiederholmessungen zeitnah nacheinander an dem Normal aus, wobei das Normal nach jeder Messung entnommen und für jede Wiederholmessung erneut zugeführt werden muss.

Zusammenfassend:

- Eine Person,
- Ein Normal
- Zeitnah mindestens 25 Wiederholmessungen

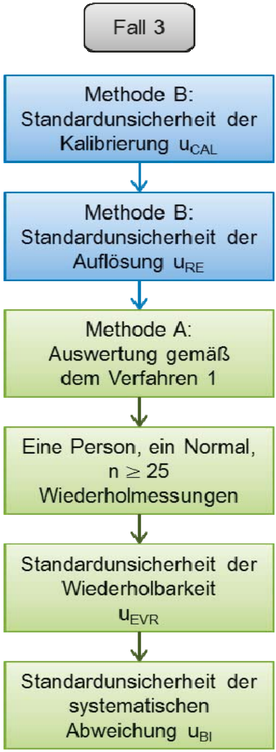


Abb. 4-10: Bestimmung von Unsicherheitskomponenten nach dem Verfahren 1

Aus den Ergebnissen der Wiederholmessungen berechnet man den arithmetischen Mittelwert und die Standardabweichung.

Für das Bestimmen der kombinierten Standardunsicherheit des Messsystems werden in der Regel folgende Standardunsicherheitskomponenten zusammengefasst:

1. Standardunsicherheit der Kalibrierung u_{Cal}
2. Standardunsicherheit der Auflösung u_{RE}
3. Standardunsicherheit der systematischen Messabweichung u_{BI}
4. Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit u_{EV}

Standardunsicherheit der Kalibrierung u_{Cal}

Der Wert ist aus dem Kalibrierschein zu entnehmen. In der Regel ist die Kalibrierunsicherheit als erweiterte Messunsicherheit U_{Cal} ausgewiesen. Um daraus eine Standardunsicherheit zu gewinnen, ist die erweiterte Kalibrierunsicherheit U_{Cal} durch den Erweiterungsfaktor k zu teilen.

$$u_{cal} = \frac{U_{Cal}}{k}$$

Standardunsicherheit der Auflösung u_{RE}

Die Standardunsicherheit der Auflösung erhält man durch Multiplizieren des Grenzwertes a mit dem Verteilungsfaktor b. Der Grenzwert ist a = RE / 2 und für den Verteilungsfaktor wählt man denjenigen der Rechteckverteilung $b = 1/\sqrt{3}$. Somit erhält man die Standardunsicherheit der Auflösung u_{RE}:

$$u_{RE} = a \cdot b = \frac{RE}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Beispiel zur Standardunsicherheit der Kalibrierung

Gegeben:

- Kalibrierunsicherheit des Normals U_{CAL} = 0,00012 mm aus dem Kalibrierschein
- Erweiterungsfaktor k = 2

Rechnung:

- $$u_{CAL} = \frac{U_{CAL}}{k} = \frac{0{,}00012\ \text{mm}}{2} = 0{,}00006\ \text{mm}$$

Beispiel zur Standardunsicherheit der Auflösung u_{RE}

Gegeben:

- Auflösung RE = 0,001 mm

Rechnung:

- $$u_{RE} = a \cdot b = \frac{RE}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}001\ \text{mm}}{\sqrt{12}} = 0{,}000288\ \text{mm}$$

Standardunsicherheit der systematischen Messabweichung u_{BI}

Zunächst wird der Betrag der systematischen Messabweichung – der Bias Bi – berechnet:

$Bi = \left|\overline{x} - x_m\right|$, mit

$\overline{x}$ = Arithmetischer Mittelwert, berechnet aus den Wiederholmessungen

x_m = richtiger Wert des Normals oder Referenzteiles, entnommen aus dem Kalibrierschein

Die Standardunsicherheit wird durch Multiplizieren des Grenzwertes a mit dem Verteilungsfaktor b gebildet. Der Grenzwert ist a = Bi und der Verteilungsfaktor der Rechteckverteilung ist $b = 1/\sqrt{3}$.

- $u_{BI} = a \cdot b = Bi \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$

Beispiel zur Standardunsicherheit der systematischen Messabweichung u_{BI}

Gegeben:

- Richtiger Wert des Normals x_m = 2,0000 mm

Eine Person hat 25 Wiederholmessungen mit dem Messsystem an einem Normal mit dem Nennmaß L = 2 mm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Nr.	*Messwert*	*Nr.*	*Messwert*	*Nr.*	*Messwert*
--	*[mm]*	--	*[mm]*	--	*[mm]*
x_1	*2,000*	x_{11}	*2,000*	x_{21}	*2,000*
x_2	*2,000*	x_{12}	*2,000*	x_{22}	*2,000*
x_3	*1,999*	x_{13}	*2,000*	x_{23}	*2,000*
x_4	*2,000*	x_{14}	*1,999*	x_{24}	*2,000*
x_5	*2,001*	x_{15}	*2,000*	x_{25}	*2,000*
x_6	*2,001*	x_{16}	*2,000*	*Standardabweichung* $s = 0{,}00053852$	
x_7	*2,001*	x_{17}	*2,000*		
x_8	*1,999*	x_{18}	*2,000*	*Arithmetischer Mittelwert* $\overline{x} = \bar{x} = 2{,}00004$	
x_9	*2,000*	x_{19}	*2,000*		
x_{10}	*2,001*	x_{20}	*2,000*		

Tabelle 4-2: 25 Wiederholmessungen am Normal (Parallelendmaß)

Rechnung

- Mittelwert der Messwertreihe $\overline{x} = 2{,}00004\ \text{mm}$
- Betrag der systematischen Messabweichung
  $Bi = |\overline{x} - x_m| = |2{,}00004\ \text{mm} - 2{,}0000\ \text{mm}| = 0{,}00004\ \text{mm}$
- $u_{BI} = Bi \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}00004\ \text{mm}}{\sqrt{3}} = 2{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{mm}$

Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit u_{EVR}

Der Wert entspricht der einfachen Standardabweichung der Wiederholmessungen

$u_{EVR} = s$

Beispiel zur Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit u_{EVR}

Gegeben:

- Versuchsergebnisse (siehe Beispiel zur Standardunsicherheit der systematischen Messabweichungen)

Rechnung:

- Standardabweichung der Wiederholmessungen s = 0,0005385 mm
- Standardunsicherheit der Wiederholmessungen $u_{EVR} = s = 0{,}0005385\ \text{mm}$

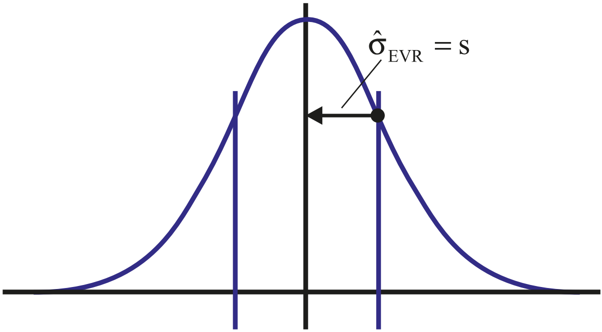


Abb. 4-11: Veranschaulichung der Komponente u_{EVR} als Standardabweichung einer Normalverteilung

Bilden der kombinierten Standardunsicherheit des Messsystems u_{MS}

- Die Standardunsicherheiten u_{RE}, u_{EVR}, u_{Bi} und u_{Cal} werden durch geometrische Addition zur kombinierten Standardunsicherheit des Messsystems zusammengefasst:
- $u_{MS} = \sqrt{\max\{u_{RE}^2; u_{EVR}^2\} + u_{Bi}^2 + u_{Cal}^2}$

Bestimmen der erweiterten Messunsicherheit des Messsystems U_{MS}

Durch das Multiplizieren der kombinierten Standardunsicherheit des Messsystems mit dem Erweiterungsfaktor k erhält man die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems:

$U_{MS} = k \cdot u_{MS}$, mit k = Erweiterungsfaktor (siehe 2.6)

Die erweiterte Messunsicherheit wird zusammen mit dem Messergebnis angegeben:

$X \pm U_{MS}$

Somit wird um das Messergebnis X ein Unsicherheits-Überdeckungsbereich aufgespannt, innerhalb dessen der tatsächliche Wert der Größe mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt. Allerdings ist zu beachten, dass bisher nur das Messsystem betrachtet wurde und die sicherlich größere Unsicherheit des gesamten Messprozesses noch unbekannt ist.

Im VDA 5 wird die Verwendung des Erweiterungsfaktors k = 2 empfohlen ([VDA] 2. Auflage, Abschnitt 4.6, Seite 37).

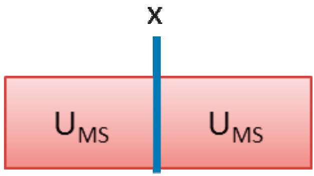


Abb. 4-12: Veranschaulichung des Unsicherheitsbereichs um den Wert x, in dem sich der wahre Wert befinden könnte

Beispiel für den Eignungsnachweis des Messsystems nach dem Verfahren 1

Mit

- $u_{CAL} = 0{,}00006\ \text{mm}$
- $u_{RE} = 0{,}000288\ \text{mm}$
- $u_{BI} = 2{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{mm}$
- $u_{EVR} = 0{,}0005385\ \text{mm}$

erhält man die kombinierte Standardunsicherheit des Messsystems u_{MS}

$$u_{MS} = \sqrt{0{,}00006^2\ \text{mm}^2 + (2{,}3 \cdot 10^{-5})^2\ \text{mm}^2 + 0{,}0005385^2\ \text{mm}^2}$$

$$u_{MS} \approx 0{,}00054\ \text{mm}$$

Hinweis: Die Standardunsicherheit der Auflösung entfällt, da die Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit den größeren Wert aufweist.

- Erweiterte Messunsicherheit des Messsystems

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS} = 2 \cdot 0{,}00054\ \text{mm} = 0{,}00108\ \text{mm}$$

- Eignungskennwert Messsystem Q_{MS}

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\ \% = \frac{2 \cdot 0{,}00108\ \text{mm}}{0{,}025\ \text{mm}} \cdot 100\ \% \approx 8{,}7\ \%$$

- Minimal prüfbare Toleranz des Messsystems TOL_{MIN_UMS}

$$TOL_{MIN\_UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS\_max}} \cdot 100\ \% = \frac{2 \cdot 0{,}00108\ \text{mm}}{15\ \%} \cdot 100\ \% \approx 0{,}0144\ \text{mm}$$

Einflussgr.	Symbol	Typ	---	---	u	Rang
Auflösung	u_{RE}	B			0,000288675	2*
Kalibrierunsicherheit	u_{CAL}	B			0,0000600000	3
Wiederholbarkeit am Normal	u_{EVR}	A			0,000538516	1
Linearität	u_{LIN}	B				
Bias	u_{BI}	A			0,0000230940	4
Rest Messsystem	u_{REST}	B				
Messsystem	u_{MS}				0,000542341	

Abb. 4-13: Budget der Standardunsicherheit des Messsystems für das Zahlenbeispiel

Die Eignung der Bügelmessschraube als Messsystems ist gegeben, da Q_{MS} = 8,7 % kleiner ist als der maximal zulässige Grenzwert Q_{MS_max} = 15 %. Nun kann die Betrachtung auf den Messprozess ausgeweitet werden.

In Abb. 4-13 ist das Unsicherheitsbudget für das Zahlenbeispiel dargestellt und in Abb. 4-14 exemplarisch das Ergebnis zum Eignungsnachweis.

Messsystem				
Toleranz	TOL	=	0,025	
Auflösung	%RE	=	4,00%	0 5
Kombinierte Standardunsicherheit	u_{MS}	=	0,000542341	
Erweiterte Messunsicherheit	U_{MS}	=	0,00108468	
Eignungsgrenzwert	Q_{MS_max}	=	15,00%	
Eignungskennwert	Q_{MS}	=	8,68%	0 15
minimale Toleranz	$TOL_{MIN-UMS}$	=	0,0144624	

Abb. 4-14: Eignungsnachweis zum Messsystem für das Zahlenbeispiel

5 Analyse des Messprozesses

Erweitert man die Betrachtung auf den gesamten Messprozess, so ergeben sich weitere Einflussgrößen der Messunsicherheit. Eine Liste typischer Einflussgrößen ist im Abschnitt 5.2.1 dargestellt, wobei im konkreten Anwendungsfall das Abnahmeteam festlegen muss, welche Einflussgrößen zu ermitteln sind.

In den folgenden Abschnitten ist beschrieben, wie die Unsicherheitskomponenten mit den bekannten Verfahren der Messsystemanalyse ermittelt werden können. Dies ist auch der Schwerpunkt dieses Pocket-Guides. Es muss aber erwähnt werden, dass einige der Verfahren auf die Bestimmung von einer oder zwei Einflussgröße beschränkt ist. Um nun den Einfluss mehrerer Größen zu ermitteln, müssen daher mehrere Versuche nacheinander abgearbeitet werden.

Alternativ dazu gibt es die Möglichkeit, mehrere Einflussgrößen gemeinsam mit einem angepassten Versuchsplan zu untersuchen. Ein gutes und bekanntes Beispiel ist der Versuchsaufbau nach dem Verfahren 2, bei dem gleichzeitig die Komponenten Wiederholbarkeit, Vergleichbarkeit, Teileeinfluss und Wechselwirkung Teile mal Prüfer ermittelt werden können. Noch flexibler in der Gestaltung ist man mit einem d-optimalen Versuchsplan. Die Voraussetzung ist in diesem Fall natürlich, dass sowohl spezielle Software als auch spezielle Kenntnisse erforderlich sind. Wer oft mit Abnahmeprojekten betraut ist, sollte sich in das Thema Versuchsplanung einarbeiten – es lohnt sich!

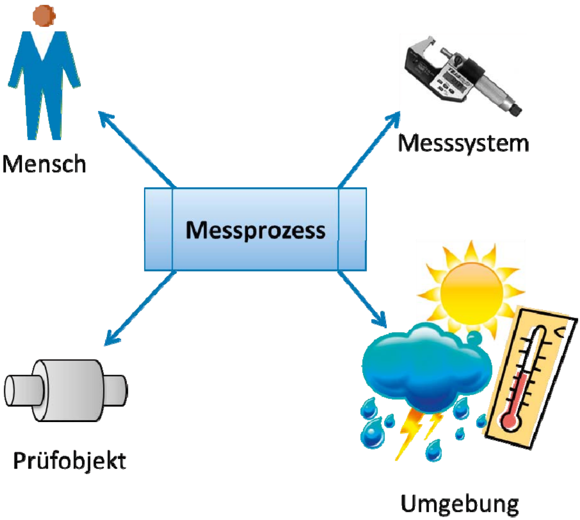


Abb. 5-1: Veranschaulichung typischer Einflüsse auf den Messprozess

5.1.1 Standardunsicherheiten aus einem Verfahren 2

Für die Situation, dass ein Standardprüfmittel schichtübergreifend von mehreren Prüfern verwendet wird, ist der Versuchsaufbau gemäß dem Verfahren 2 besonders geeignet: Es lässt sich der Einfluss der prüfenden Personen, der Wiederholbarkeit unter Fertigungsbedingungen und der Einfluss durch Wechselwirkung zwischen Prüfern und Teilen bestimmen.

Der Versuchsaufbau: Es werden 10 Serienteile so ausgewählt, dass diese die übliche Fertigungsstreuung des Prozesses repräsentieren. Nun müssen zwei oder mehr Prüfer jedes der Teile mindestens zweimal wiederholt prüfen. Die Reihenfolge der Prüfobjekte sollte für die Wiederholprüfungen verändert werden, ideal mit einem Zufallsgenerator (Randomisierung).

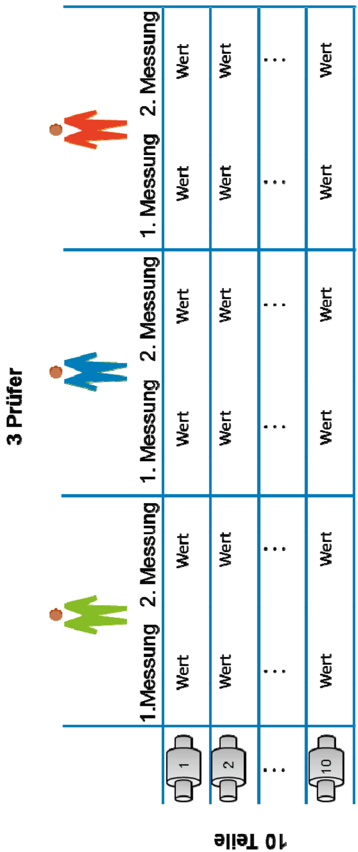


Abb. 5-2: Schema des Versuchsaufbaus nach Verfahren 2

Die Messergebnisse werden mit dem Verfahren der zweifachen Varianzanalyse für zufällige Effekte ausgewertet. Die Gesamtstreuung des Versuches wird in die verursachenden Komponenten aufgetrennt. Man erhält so die

1. Teilestreuung
2. Bedienerstreuung
3. Wiederholstreuung
4. Wechselwirkung Bediener mal Teile

Die Streukomponenten Nr. 2 bis 4 werden dem Messprozess zugeordnet. Im Anhang sind die Formeln zur Bestimmung der Varianzkomponenten beschrieben. Diese Standardabweichungen erhält man daraus durch Wurzelziehen. Die Standardabweichungen werden direkt als Standardunsicherheiten übernommen.

Als Standardunsicherheiten des Messprozesses erhält man

1. die **Standardunsicherheit der Bediener u_{AV}**,
2. die **Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit u_{EVO}** und
3. die **Standardunsicherheit der Wechselwirkung u_{IA}**

In der Abbildung rechts ist exemplarisch ein Auswertungsergebnis zum Verfahren 2 dargestellt. Die Werte der geschätzten Standardabweichungen zur Wiederhol- und Vergleichspräzision können direkt als Standardunsicherheiten übernommen werden.

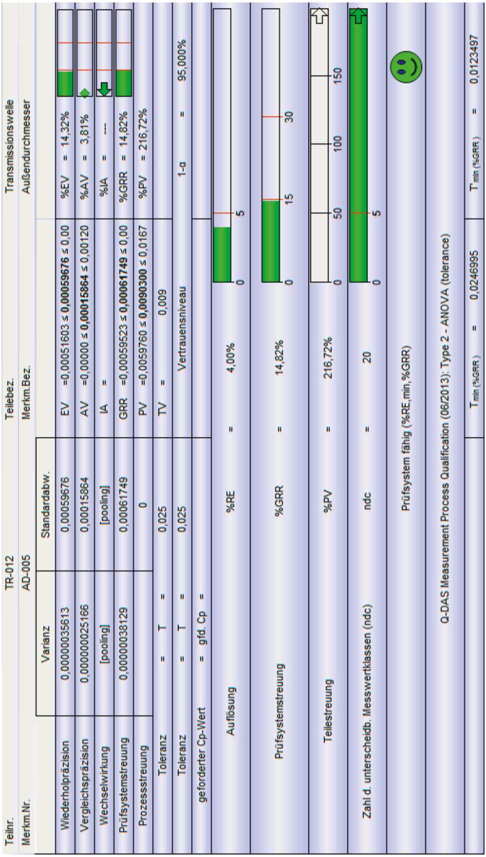


Abb. 5-3: Exemplarisches Ergebnis einer Messsystemanalyse nach dem Verfahren 2

5.1.2 Standardunsicherheit der Temperatur u_T

Standardunsicherheit durch Temperatureinfluss nach ISO 14253-2

Dieses Verfahren ist ebenfalls im VDA 5 Band enthalten.

Die Unsicherheit des Wärmeausdehnungskoeffizienten für den Werkstoff des Messmittels wird vernachlässigt. Diese Annahme ist berechtigt, wenn die Messmaschine eine Temperaturkompensation automatisch durchführt, was jedoch im Einzelfall zu klären ist.

Dabei wird die Standardunsicherheit infolge von Temperatureinflüssen u_T aus der Standardunsicherheit durch die Veränderung des Objektes u_{TD} und der Standardunsicherheit u durch die Veränderung des Messsystems u_{TA} berechnet:

$$u_T = \sqrt{u_{TD}^2 + u_{TA}^2}$$

Dabei ist

$$u_{TD} = \Delta T \cdot \alpha \cdot L \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

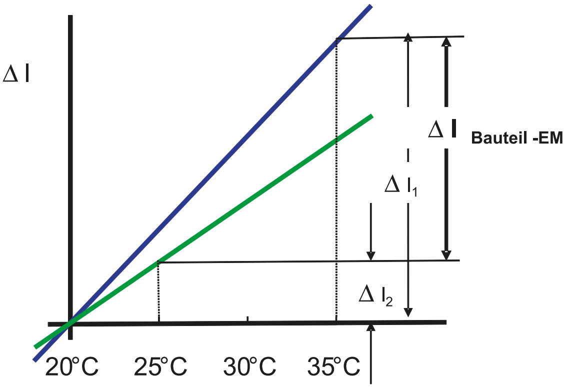
und $u_{TA} = |T - 20°C| \cdot u_\alpha \cdot l$

T	*Temperaturdifferenz*
α	*Ausdehnungskoeffizient*
T	*Mittlere Temperatur während der Messung*
u	*Standardunsicherheit des Ausdehnungskoeffizienten des Materials des Messsystems*
l	*Gemessenes Maß*

Standardunsicherheit durch Temperatureinfluss aus den Differenzen der unterschiedlichen Wärmeausdehnung zwischen Referenz und Werkstück

Da der Temperatureinfluss oft sehr schwierig zu bewerten ist, kann man vor der eigentlichen Messung des Messobjektes das Messsystem mit einem Referenzteil (Einstellmaster) einstellen. Dabei kann die Temperatur des Referenzteils von der Temperatur von 20°C, mit der es kalibriert wurde, abweichen. Diese Abweichung ist bei der Bestimmung von u_T zu berücksichtigen. Um diese Abweichung ist das Messsystem quasi falsch eingestellt. Bei der anschließenden Messung des Messobjekts, das eine andere Temperatur haben kann als das Referenzteil, ist auch diese Abweichung infolge der Temperatur zu berücksichtigen. Aus der Differenz (s. Abb. 5-4) kann die Abhängigkeit der Temperatur von der Standardunsicherheit angegeben werden.

$$u_{TD} = \Delta l \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$



1. Bauteildehnung

   $\Delta l_1 = l_0 \cdot \alpha_{Bauteil} \cdot \Delta T_{Bauteil}$

   $\Delta l_1 = 0{,}028m \cdot 12{,}5 \cdot 10^{-6}\,K^{-1} \cdot 15K$

   $\Delta l_1 = 5{,}25m \cdot 10^{-6} = 5{,}25\ \mu m$

2. Einstellmeisterdehnung

   $\Delta l_2 = l_0 \cdot \alpha_{EM} \cdot \Delta T_{EM}$

   $\Delta l_2 = 0{,}028m \cdot 10{,}5 \cdot 10^{-6}\,K^{-1} \cdot 5K$

   $\Delta l_2 = 1{,}47m \cdot 10^{-6} = 1{,}47\ \mu m$

3. Differenz Bauteil-/EM-Dehnung

   $\Delta l_{1,2} = \Delta l_1 - \Delta l_2$

   $\Delta l_{1,2} = 5{,}25\ \mu m - 1{,}47\ \mu m$

   $\boldsymbol{\Delta l_{1,2} = 3{,}78\ \mu m}$

Abb. 5-4: Bestimmung der unterschiedlichen Wärmeausdehnung zwischen Referenz und Werkstück

5.1.3 Standardunsicherheit des Prüfobjektes u_{OBJ}

Betrachtet wird die Vergleichbarkeit der Messergebnisse an verschiedenen Messstellen am Messobjekt. Der hier beschriebene Versuchsaufbau ist für die isolierte Ermittlung des Objekteinflusses gedacht. Effektiver mag es im konkreten Fall sein, einen Versuchsaufbau zu wählen, bei dem mehrere Einflussgrößen gleichzeitig analysiert werden können, wie z.B. der Einfluss mehrerer Vorrichtungen und verschiedener Messobjekte. In so einem Fall könnte das Vorgehen mit einem d-optimalen Versuchsplan die sinnvollere Alternative sein. Hier folgen nun Beschreibungen, wie die Unsicherheit des Objekteinflusses isoliert aus Versuchen oder bekannten Informationen gewonnen werden kann.

Ermittlungsmethode A aus Versuchen:

Mindestens fünf repräsentativ ausgewählte Prüfobjekte werden von einem Bediener gemessen: An jedem Prüfobjekt sind drei bis fünf verschiedene Messpositionen festzulegen und zu kennzeichnen.

An mindestens fünf repräsentativ ausgewählten Prüfobjekten werden jeweils drei bis fünf Messpositionen festgelegt und gekennzeichnet. Anschließend wird jede Position mindestens drei Mal wiederholt gemessen. Die Auswertung erfolgt mit der einfachen Varianzanalyse. Auf ein Beispiel wird aufgrund der Komplexität an dieser Stelle verzichtet.

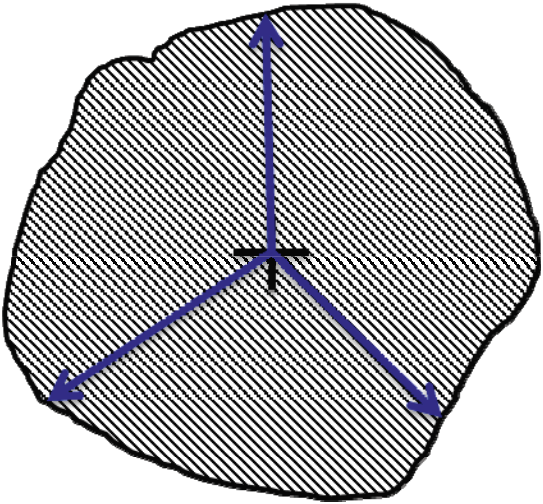


Abb. 5-5: Beispiel für das Antasten von mindestens drei Positionen in einem Bauteil-Querschnitt zur Erfassung vorhandener Formabweichungen

Ermittlungsmethode B aus der Zeichnungstoleranz der Formabweichung

Wurde in der Zeichnung eine maximal zulässige Formabweichung angegeben, so kann diese Information – sofern realistisch und vertrauenswürdig - nach dem Schema *Grenzwert a mal Verteilungsfaktor b der Rechteckverteilung* verarbeitet werden:

$$u_{OBJ} = a \cdot b = \frac{a}{\sqrt{3}} \approx 0{,}5774 \cdot a$$

Beispiel: Exemplarisch sei dies für eine obere Toleranz der Rundheitsabweichung dargestellt. Die Rundheit sei wie folgt toleriert:

s. Abb. 5-6

Die Angabe ist wie folgt zu deuten: In jeder Schnittebene senkrecht zur Achse muss die tolerierte Umfangslinie der Welle zwischen zwei konzentrischen Kreisen liegen, deren Radien sich um den Abstand t = 0,05 mm unterscheiden (konzentrisch = beide Kreise haben denselben Mittelpunkt).

Die Abweichungstoleranz t ist als Differenz der Radien gegeben, so dass man diese direkt als Grenzwert a interpretieren kann:

s. Abb. 5-7

Möglicher Nachteil: Die realen Formabweichungen sind kleiner als die angegebene Toleranz, somit ist die berechnete Unsicherheit zu groß, was in einem ungünstigen Fall sogar den Ausschlag über das Bestehen oder Nichtbestehen der Anforderungen geben kann.

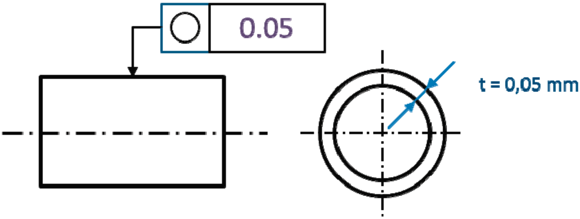


Abb. 5-6: Beispiel für die Tolerierung einer Rundheit

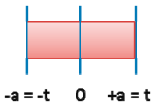


Abb. 5-7: Veranschaulichung der Rundheitstoleranz als Grenzwert a

Ermittlungsmethode B: Ermittlung der Rundheitsabweichungen aus Umkreis und Innenkreis

Wieder ist das Vorgehen am Beispiel der Rundheitsabweichung beschrieben: Die Spanne der Rundheitsabweichungen ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Durchmesser D des kleinsten Umkreises (Minimum Circumscribed Circle, MCC) und dem Durchmesser d des größten Innenkreises (Maximum Inscribed Circle, MIC). Als Fehlergrenzwert a wird die Hälfte der Durchmesserdifferenz übernommen (=Differenz der Radien).

In Abb. 5-8 ist exemplarisch der Objekteinfluss durch Rundheitsabweichungen dargestellt. Aus Gründen der Zufallsstreuung sollte die Messung nicht nur an einem einzigen Teil durchgeführt werden. Empfohlen sind mindestens drei Serienteile, wobei diese so ausgewählt werden sollten, dass diese die Prozessstreuung repräsentieren. Je nach verfügbarem Messsystem kann man sich z.B. den Durchmesser d des größten eingeschriebenen Kreises und den Durchmesser D des kleinsten umschreibenden Kreises für jedes der p Objekte ausgeben lassen. Anschließend wird für jedes Objekt die Spannweite $\Delta_{Obj.i} = D - d$ ermittelt. Die größte ermittelte Spanne der p Objekte $\Delta_{max} = \max\left\{\Delta_{Obj.1}, \Delta_{Obj.2}, \ldots, \Delta_{Obj.p}\right\}$ wird für die Ermittlung des Grenzwertes a verwendet:

$$a = \frac{\Delta_{max}}{2}$$

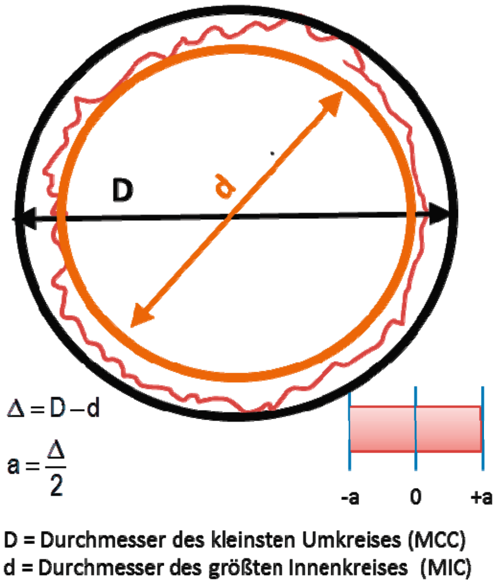


Abb. 5-8: Exemplarische Darstellung des Objekteinflusses durch Rundheitsabweichungen

Mit dem Verteilungsfaktor der Rechteckverteilung b = 1/√3 erhält man den (Worst-Case-) Schätzwert für die Standardunsicherheit der Formabweichung:

$$u_{OBJ} = a \cdot b = \frac{\Delta_{max}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\Delta_{max}}{\sqrt{12}} \approx 0{,}2887 \cdot \Delta_{max}$$

Ermittlungsmethode A: Methode der kleinsten Abweichungsquadrate

Bei Messmaschinen, die z.B. einen Ausgleichskreis nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnen, geben in der Regel auch die Standardabweichung s der Rundheitsabweichungen - bezogen auf den Ausgleichskreis - aus. Diese Standardabweichung kann direkt als Standardunsicherheit übernommen werden.

$$u_{Obj} = s$$

In der Regel sollte nicht nur ein einzelnes Teil vermessen werden, sondern mindestens n = 3 Teile. In diesem Fall ist zunächst der arithmetische Mittelwert der n Teile-Varianzen zu berechnen. Anschließend zieht man die Quadratwurzel aus dem Mittelwert der Varianzen:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\overline{s^2}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} s_i^2 \cdot \frac{1}{n}}$$

Das Ergebnis wird als Standardunsicherheit des Objektes übernommen, $u_{OBJ} = \hat{\sigma}$.

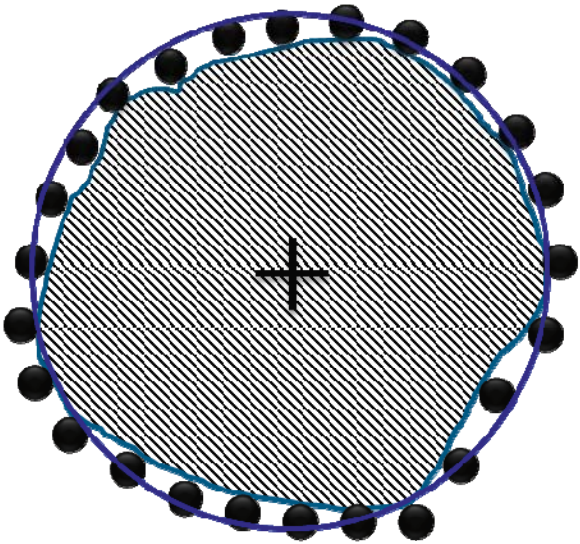


Abb. 5-9: Anpassung eines Ausgleichskreises nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate. Ein Ergebnis ist unter anderem die Standardabweichung s der Streuung um den Ausgleichskreis

5.1.4 Standardunsicherheit verschiedener Vorrichtungen u_{GA}

Werden zwei oder mehr gleichartige Vorrichtungen verwendet, so kann der Einfluss der Vorrichtungen mit folgendem Versuchsaufbau (Ermittlungsmethode A) bestimmt werden:

1. Eine Person misst ein Normal oder Referenzteil mindestens 15-mal wiederholt mit jeder Vorrichtung.
2. Die Auswertung erfolgt mit der einfachen Varianzanalyse für zufällige Komponenten. Die Werte des Faktors A sind in diesem Falle die Identifikationsnummern der Vorrichtungen und die Messergebnisse repräsentieren die Werte der Zielgröße. Als Ergebnis erhält man u.a. die Varianz der Vorrichtungsmittelwerte.
3. Zieht man die Quadratwurzel aus diesem Wert, erhält man die Standardabweichung der Vorrichtungsmittelwerte. Diese kann direkt als Standardunsicherheit der Vorrichtung übernommen werden: $u_{GA} = \hat{\sigma}_A$

5.1.5 Standardunsicherheit der Stabilität u_{STAB}

Bei dieser Standardunsicherheitskomponente wird das Langzeitverhalten der Messergebnisse eines Messprozesses betrachtet: Verändern sich diese aufgrund zeitlich längerfristig wirkender Einflüsse wie z.B. Verschleiß, Verschmutzung, Setzeffekte, usw.?

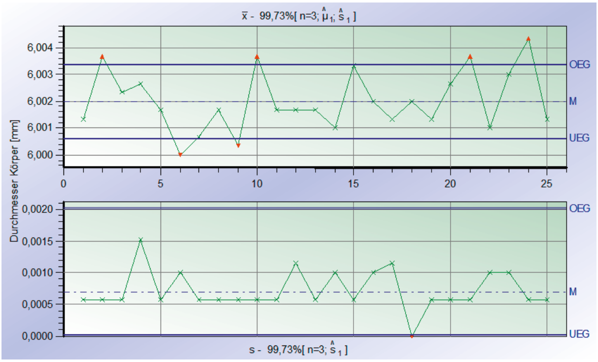


Abb. 5-10: Beispiel einer Kombination aus Shewhart Mittelwert- und Standardabweichungskarte für die Überwachung der Stabilität des Messsystems

Versuchsaufbau für die isolierte Ermittlung:

1. In regelmäßigen Zeitabständen (z.B. je Schicht, Tag, Woche) führt ein Bediener drei bis fünf Wiederholmessungen an einem Normal durch.
2. Liegen mindestens 10 Stichproben vor, werden diese mit dem Verfahren der einfachen Varianzanalyse für zufällige Komponenten ausgewertet. Als Faktorstufenwerte wählt man die Stichproben-ID und für die Zielgröße die Messergebisse. Das Ergebnis ist u.a. ein Schätzer für die Varianz der Mittelwerte über die verschiedenen Zeitpunkte.
3. Zieht man aus diesem Wert die Quadratwurzel, so erhält man die Standardabweichung für die Mittelwerte über verschiedene Zeitpunkte.

5.1.6 Einsatz d-optimaler Versuchspläne

Wie schon an der einen oder anderen Stelle angedeutet wurde, ist es mit einem d-optimalen Versuchsplan möglich, mehrere Einflussgrößen gleichzeitig zu analysieren. Der Aufwand kann im Vergleich zu mehreren Einzelversuchen geringer ausfallen.

Unsicherheitskomponenten	*Symbol*	*Versuch / Modell*
Wiederholbarkeit am Prüfobjekt	u_{EVO}	*Minimale Stichprobengröße: 30* *Jeweils mindestens 2 Wiederholmessungen:* *an mindestens 3 Prüfobjekten,* *für mindestens 2 Bediener (falls relevant),* *mit mindestens 2 Messvorrichtungen (falls relevant)* *Schätzung der Unsicherheitskomponenten mit dem Verfahren der Varianzanalyse (ANOVA).* *Zur Verminderung des Versuchsaufwands sollte ein d-optimaler Versuchsplan verwendet werden.*
Vergleichbarkeit der Bediener	u_{AV}	
Vergleichbarkeit der Messvorrichtungen (Messstellen)	u_{GV}	
Vergleichbarkeit unterschiedlicher Zeitpunkte	u_{STAB}	
Wechselwirkung(en)	u_{IAi}	

Tabelle 5-1: Oft berücksichtigte Komponenten in einem Gesamtversuch zur Analyse des Messprozesses

Der Nachteil ist, dass für das Generieren und Auswerten dieser Versuchspläne spezielle Software und Kenntnisse notwendig sind. Aus diesem Grund wird hier auf detaillierte Darstellungen verzichtet und stattdessen auf den Anhang 8 verweisen, wo Sie Verweise auf Seiten im World-Wide-Web zu diesem Thema finden.

5.1.7 Weitere Standardunsicherheiten

Weitere Einflussgrößen können entweder aus bekannten Informationen wie Tabellen, Herstellerangaben, Forschungsberichten usw. oder aber aus Versuchen ermittelt werden.

5.2 Ablauf zur Ermittlung der Messprozesseignung

Die einzelnen Standardunsicherheiten werden zur kombinierten Standardunsicherheit des Messprozesses addiert. Da das Messsystem ein Bestandteil des gesamten Messprozesses ist, müssen die Standardunsicherheiten des Messsystems weiterhin mit berücksichtigt werden.

5.2.1 Kombinierte Standardunsicherheit des Messprozesses

Die einzelnen Standardunsicherheiten des Messprozesses werden durch geometrische Addition zur kombinierten Standardunsicherheit des Messprozesses zusammengefasst. Dabei besteht die Gefahr, dass man einige Standardunsicherheiten versehentlich mehrfach berücksichtigt.

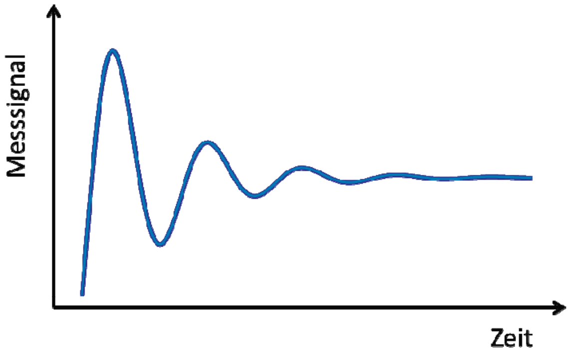


Abb. 5-11: Ein sich einschwingendes Messsignal als Beispiel für eine dynamische Unsicherheitskomponente

Als Beispiel mag die Wiederholbarkeit gelten: Hat man diese sowohl bei der Messsystembetrachtung (u_{EVR}) als auch bei der Messprozessbetrachtung (u_{EVO}) ermittelt, wird nur diejenige mit dem größeren Wert berücksichtigt.

Ohne Anspruch auf Allgemeingültigkeit ist exemplarisch die Bestimmungsgleichung für die kombinierte Standardunsicherheit des Messprozesses dargestellt.

$$u_{MP} = \sqrt{\begin{array}{l} u_{CAL}^2 \\ + \max\left\{u_{EVR}^2; u_{EVO}^2; u_{RE}^2\right\} \\ + \max\left\{u_{BI}^2; u_{LIN}^2\right\} \\ + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 \\ + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{IA}^2 \end{array}}$$

- u_{CAL} = Standardunsicherheit der Kalibrierung (Normal, Referenzteil)
- u_{EVR} = Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit (Messsystem)
- u_{EVO} = Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit (Messprozess)
- u_{RE} = Standardunsicherheit der Auflösung des Messsystems
- u_{BI} = Standardunsicherheit der systematischen Messabweichung
- u_{LIN} = Standardunsicherheit der Linearitätsabweichung
- u_{AV} = Standardunsicherheit durch Bedienereinfluss
- u_{GV} = Standardunsicherheit durch verschiedene Messvorrichtungen
- u_{STAB} = Standardunsicherheit der Stabilität (Zeitverhalten)
- u_{OBJ} = Standardunsicherheit durch Objekteinfluss
- u_{T} = Standardunsicherheit durch Temperatureinfluss
- u_{Rest} = Standardunsicherheit durch weitere Einflüsse
- u_{IA} = Standardunsicherheit der Wechselwirkung

Abb. 5-12: Typische Unsicherheitskomponenten des Messprozesses

Im konkreten Einzelfall können einzelne Komponenten begründet entfernt werden oder es müssen noch nicht berücksichtigte Komponenten ergänzt werden. Die Verantwortung zu entscheiden, welche Komponenten zu berücksichtigen sind, liegt bei dem Abnahmeteam.

Beispiele für Situationen, bei denen Komponenten entfallen oder ergänzt werden müssen:

- Ist kein Bedienereinfluss vorhanden, entfällt die Komponente u_{AV}
- Ist kein Einfluss durch mehrere Vorrichtungen vorhanden, entfällt die Komponenten u_{GV}
- Ist ein Einfluss durch Vibrationen vorhanden, ist dieser als Restkomponente u_{Rest} zu ergänzen
- usw.

Einflussgrößen	Symbol	Typ	u	Rang
Auflösung der Anzeige	u_{RE}	B	0,0000289	5*
Kalibrierunsicherheit	u_{CAL}	B	0,0000130	6
Wiederholbarkeit am Normal	u_{EVR}	A	0,0000738	3*
Linearität	u_{LIN}	B		
Bias	u_{BI}	A	0,0000635	4
Messsystem	u_{MS}		0,0000982	
Vergleichbarkeit Prüfer	u_{AV}	A	0,0000892	2
Wiederholbarkeit am Prüfobjekt	u_{EVO}	A	0,000151	1
Wechselwirkungen	u_{IAi}	A	[pooling]	
Messprozess	u_{MP}		0,000187	

Abb. 5-13: Beispiel für ein Gesamtbudget zur Messprozessbetrachtung

5.2.2 Erweiterte Messunsicherheit des Messprozesses

Die erweiterte Messunsicherheit des Messprozesses wird durch Multiplizieren der kombinierten Standardunsicherheit des Messprozesses u_{MP} mit dem Erweiterungsfaktor k bestimmt. Einzelheiten zum Erweiterungsfaktor finden sich im Abschnitt 2.6, so dass dieser hier nicht erneut erläutert werden muss.

Als Wert für den Erweiterungsfaktor wählt man gemäß einer Empfehlung aus dem VDA k = 2, also Berechnung der erweiterten Messunsicherheit mit dem Vertrauensniveau 95,45 % und dem k-Faktor für das Verteilungsmodell Normalverteilung.

$$U_{MP} = k \cdot u_{MP}$$

5.2.3 Fallbeispiel „Längenmessung mit einem Standardprüfmittel“

Zur Beurteilung der Länge von Kupplungskörpern wurde ein digitaler Messschieber nach DIN 862 vorgeschlagen. Die Kupplungskörper werden im 3-Schicht-Betrieb in einer unklimatisierten Fertigungshalle gefertigt. Der Nachweis der Prüfprozesseignung erfolgte gemäß VDA 5.

Aus der Fertigungszeichnung des Kupplungskörpers wurden die Daten für das Merkmal *Länge* abgelesen:

Ein digitaler Messschieber gilt als ein universell einsetzbares Prüfmittel. Aus den Angaben des Herstellers wurden die folgenden Daten entnommen:

Nennmaß	*N*	=	*34,60 mm*
Oberes Grenzmaß U	*U*	=	*0,20 mm*
Unteres Grenzmaß L	*L*	=	*-0,20 mm*
Maßtoleranz	*TOL*	=	*0,40 mm*

Tabelle 5-2: Beschreibung des zu prüfenden Merkmals

Messbereich	*0 mm bis 150 mm*
Grenzwert der Messabweichung nach DIN 862	*a = 20 µm*
Auflösung	*RE = 0,01 mm*

Tabelle 5-3: Kenngrößen des Messschiebers

Beurteilung der Prüfmittelverwendbarkeit

Für die Beurteilung der Prüfmittelverwendbarkeit sind zwei Kriterien zu berücksichtigen:

- Die prozentuale Auflösung des Prüfmittels *Auflösung(%)*
- Die kleinste prüfbare Toleranz T_{min_MP}

Ermittlung der prozentualen Auflösung

Zur Bestimmung der prozentualen Auflösung ist die Kenntnis der Toleranz des Merkmals sowie die Auflösung des Prüfmittels erforderlich. Aus diesen beiden Größen bestimmt sich das Annahmekriterium:

$$\text{Auflösung}(\%) = \frac{\text{Auflösung}}{\text{Toleranz}} \cdot 100\% \leq 5\%$$

Aus den o.g. Angaben wurde die prozentuale Auflösung bestimmt:

$$\text{Auflösung}(\%) = \frac{0{,}01\text{mm}}{0{,}40\text{mm}} \cdot 100\% = 2{,}5\%$$

Ermittlung der kleinsten prüfbaren Toleranz T_{min_MS}

Für die Bestimmung ist der Eignungsgrenzwert Q_{MS} und die Standardunsicherheit u_{MS} des Prüfmittels erforderlich. Das Kriterium für die Verwendbarkeit von einem Prüfmittel lautet nach einer Empfehlung des VDA 5:

$$Q_{MS\_max} = 15\%$$

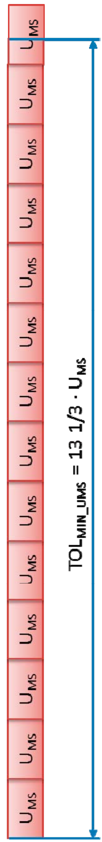


Abb. 5-14: Veranschaulichung der minimal prüfbaren Toleranz des Messsystems TOLMIN_UMS

Die Standardunsicherheit u_{MS} von universell einsetzbaren Prüfmitteln kann vereinfacht aus den Fehlergrenzwerten bestimmt werden. Der Fehlergrenzwert eines Messschiebers beträgt a = 20 µm für Längenmaße bis 50 mm.

$$u_{MS} = a \cdot b = 20\,\mu m \cdot 0{,}6 = 12\,\mu m$$

Da für die Fehlergrenze in DIN 862 kein Verteilungsmodell vorgegeben ist, wurde die sichere Variante der Rechteckverteilung gewählt. Der Verteilungsfaktor für die Rechteckverteilung ist auf eine Nachkommastelle gerundet b = 0,6. Aus dem Eignungsgrenzwert Q_{MS_max} = 15% und der Standardunsicherheit des Prüfmittels u_{MS} lässt sich die kleinste prüfbare Toleranz T_{min_MS} über die folgende Beziehung ermitteln:

$$T_{min\_MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{max\_MS}} \cdot 100\%$$

$$T_{min\_MS} = \frac{4 \cdot 12\mu m}{15\%} \cdot 100\% = 320\mu m$$

Abschließende Beurteilung der Prüfmittelverwendbarkeit

Die Bestimmung der prozentualen Auflösung ergab den Wert Auflösung(%) = 2,5 %. Da dieser Wert kleiner ist als der Grenzwert $\text{Auflösung}(\%)_{max}$ = 5%, gilt die Auflösung als ausreichend.

Für die kleinste prüfbare Toleranz wurde der Wert T_{min_MS} = 320 µm bestimmt. Dieser Wert ist kleiner als die Toleranz des zu prüfenden Merkmals T = 400 µm. Somit ist die vorläufige Prüfmittelverwendbarkeit gegeben.

Messsystem		
TOL	=	0,400
%RE	=	2,50%
u_{MS}	=	0,0115470
U_{MS}	=	0,0230940
Q_{MS_max}	=	15,00%
Q_{MS}	=	11,55%
$TOL_{MIN-UMS}$	=	0,307920
Gesamtbeurteilung		

Abb. 5-15: Beispiel für eine Gesamtbewertung des Messsystems

Beurteilung und Nachweis der Prüfprozesseignung

Bisher wurde allein das Prüfmittel betrachtet. Der Prüfprozess unterliegt jedoch weiteren Einflussgrößen. Für den Prüfprozess wurden die folgenden drei Unsicherheitskomponenten betrachtet:

- Standardunsicherheit durch den Bedienereinfluss u_{AV}
- Standardunsicherheit durch den Objekteinfluss u_{OBJ}
- Standardunsicherheit durch den Temperatureinfluss u_T

Bedienereinfluss

Der Einfluss durch die Bediener wurde experimentell ermittelt. Für die Bediener-Studie wurde eine Endmaßkombination mit einem Gesamtmaß = 35,000 mm gebildet. Diese Endmaßkombination wurde zehn Mal von jedem der Prüfer gemessen. Die Messergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die erste Spalte enthält die Messwerte von Prüfer A, die zweite Spalte die Messwerte von Prüfer B und die dritte Spalte die Messwerte von Prüfer C.

Um die Streuung durch den Bedienereinfluss zu bestimmen, wurde das Verfahren der einfachen Varianzanalyse für Faktoren mit zufälligen Stufen (Modell II) angewandt (s. Abb. 5-17)

Teilnr.			Teilebez.	Endmaßkombination	
Merkm.Nr.			Merkm.Bez	Länge	
i	x_i	i	x_i	i	x_i
1	35.01	11	34.99	21	35.00
2	35.00	12	35.00	22	35.01
3	35.01	13	35.00	23	35.02
4	35.00	14	34.99	24	35.00
5	35.01	15	35.00	25	35.00
6	35.01	16	35.00	26	35.01
7	35.01	17	35.00	27	35.00
8	35.01	18	35.00	28	35.00
9	35.00	19	34.99	29	35.00
10	35.00	20	34.99	30	35.00

Abb. 5-16: Messergebnisse der Bedienerstudie

Teilnr.		Teilebez.	Endmaßkombination
Merkm.Nr.		Merkm.Bez.	Länge
ANOVA			
Streuung innerhalb der Stichproben		$= s_i^2$	0.000034074
Zusätzliche Streuung zwischen den Stichproben		$= s_A^2$	0.000024593
Anteil der zusätzlichen Streuung zwischen den Stichproben		$= s_A^2/s_{ges}^2$	0.42
H_0	Varianz zwischen den Stichproben ist Null		
H_1	Varianz zwischen den Stichproben ist NICHT null.		
Testniveau	kritische Werte unten	kritische Werte oben	Prüfgröße
$\alpha = 5$ %	---	3.35	8.21739**
$\alpha = 1$ %	---	5.49	
$\alpha = 0.1$ %	---	9.02	
Testergebnis	Nullhypothese wird zum Niveau $\alpha \leq 1\%$ verworfen		

Abb. 5-17: Ergebnis der Varianzanalyse

Die Bedienerstreuung wurde aus der *zusätzlichen Streuung zwischen den Stichproben* bestimmt:

$$s_A = \sqrt{s_A^2} = \sqrt{0{,}000024593\ \text{mm}^2} \approx 0{,}0005\ \text{mm} \mathrel{\hat{=}} 0{,}5\ \mu\text{m}$$

Die Standardunsicherheit durch Bedienereinfluss ergab somit $u_{Bediener} = s_A = 0{,}5\ \mu m$.

Objekteinfluss

Der Einfluss der Teile wurde untersucht, indem die Länge an einem Teil an unterschiedlichen Stellen gemessen wurde (Drehung der Teile nach jeder Messung um ca. 15° um die Rotationsachse). Die Messungen wurden von einem Prüfer durchgeführt, um die Überlagerung des Bedienereinflusses zu vermeiden.

Die 25 Messergebnisse sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.

Aus den 25 Einzelwerten wurde die Standardabweichung bestimmt (s. Abb. 5-4).

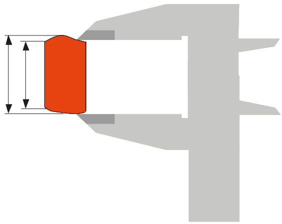


Abb. 5-18: Schemazeichnung Objekteinfluss

i	x_i	i	x_i	i	x_i
1	34.63	6	34.63	11	34.65
2	34.63	7	34.63	12	34.63
3	34.64	8	34.64	13	34.63
4	34.63	9	34.63	14	34.63
5	34.63	10	34.63	15	34.63
i	x_i	i	x_i	i	x_i
16	34.65	21	34.63	26	
17	34.63	22	34.63	27	
18	34.63	23	34.63	28	
19	34.64	24	34.63	29	
20	34.63	25	34.63	30	

Tabelle 5-4: Messergebnisse Objekteinfluss

Zeichnungswerte		Stichprobenkennwerte		Stichprobenkennwerte	
T_m	34.60	x_{min}	34.63	n_{ges}	25
USG	34.40	$Q_{25\%}$	34.6287	n_{eff}	25
OSG	34.80	$\bar{x}$	34.630		
T	0.40	$Q_{75\%}$	34.6369	s^2	0.000037667
		x_{max}	34.65	R	0.02
Vertrauensniveau	=	$1-\alpha$	=	95.000%	
Standardabw.	=	s	=	$0.0047922 \leq \mathbf{0.0061373} \leq 0.0085379$	
Mittelwert	=	$\bar{x}$	=	$34.6303 \leq \mathbf{34.6328} \leq 34.6353$	

Abb. 5-19: Kennwerte der Stichprobe aus der Objektstudie

Die Standardunsicherheit des Objektes wurde nach folgender Beziehung bestimmt:

$$u_{Objekt} = \frac{s_{Objekt}}{\sqrt{n^*}} = \frac{0{,}0061373\ \text{mm}}{\sqrt{1}} = 0{,}0061373\ \text{mm} \mathrel{\hat{=}} 6{,}1373\ \mu\text{m}$$

Die Prüfung soll durch eine Messung pro Teil erfolgen, daher wurde der Wert $n^*=1$ für den Stichprobenumfang angesetzt.

Temperatureinfluss

Da die Fertigungshalle nicht klimatisiert ist, musste die Standardunsicherheit durch Temperatureinfluss abgeschätzt werden. Aus Erfahrung war bekannt, dass die Temperatur in der Fertigungshalle im Sommer bis zu 35°C betragen kann. Dies entspricht einer maximalen Differenz zur Normtemperatur von 15 K (35 °C – 20 °C ≙ 15 K).

Da keine anderen Daten vorlagen, wurde für die Unsicherheit der Ausdehnungskoeffizienten 10% der Koeffizienten und für die Unsicherheiten der Temperaturen 1K angesetzt. Sowohl das Prüfmittel als auch die Werkstücke bestehen aus dem Werkstoff Stahl. Der Wärmeausdehnungskoeffizient für den Werkstoff Stahl wurde aus der Tabelle A.3.1 des VDA 5 entnommen:

$$\alpha_{Stahl} = 11{,}5 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$$

Es wurden für die Unsicherheiten der Wärmeausdehnungskoeffizienten die Werte

$$u_{\alpha_N} = u_{\alpha_W} = 0{,}1 \cdot 11{,}5 \cdot 10^{-6}\ K^{-1} = 11{,}5 \cdot 10^{-7}\ K^{-1}$$

bestimmt und für die Unsicherheiten der Temperaturen die Werte

$u_{TN} = u_{TW} = 1$ K angenommen.

Standardunsicherheit Temp.	u_{Temp}	$a \cdot b$	
		0.001231413	*mm*
Verteilungsfaktor	*b*	*0.6*	
Fehlergrenzwert	*a*	$\lvert\Delta L\rvert + 2 \cdot u_{Rest}$	
		0.002052355	*mm*
Fehler durch unterschiedliche Längenausdehnung von Werkstück und Prüfmittel	ΔL	$L_{Anz;\,N} \cdot (\alpha_W \cdot T_W - \alpha_N \cdot T_N)$	
		0	*mm*
Wärmeausdehnungskoeffizient Werkstück	α_W	*0.0000115*	*1/K*
Temperaturdifferenz Werkstück zu Normtemperatur	T_w	*15*	*K*
Wärmeausdehnungskoeffizient Prüfmittel	α_N	*0.0000115*	*1/K*
Temperaturdifferenz Prüfmittel zu Normtemperatur	T_N	*15*	*K*
Anzeigewert des Normals bei 20°C	$L_{Anz;\,N}$	*35*	*mm*

Tabelle 5-5: Tabelle1 zur Bestimmung der Standardunsicherheit Temperatur

Die resultierende Standardunsicherheit der Temperatur ergab gerundet $u_{Temp} = 1{,}2$ µm.

Unsicherheitsbudget des Prüfprozesses und Nachweis Prüfprozesseignung

Die einzelnen Unsicherheitskomponenten wurden zu einer kombinierten Standardunsicherheit des Prüfprozesses zusammengefasst (s Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6).

Kombinierte Standardunsicherheit

Die kombinierte Standardunsicherheit wurde durch quadratische Addition der Standardunsicherheitskomponenten gebildet:

$$u(y) = \sqrt{u_{MS}^2 + u_T^2 + u_{AV}^2 + u_{OBJ}^2}$$

Erweiterte Messunsicherheit U

Aus der kombinierten Standardunsicherheit wurde die erweiterte Messunsicherheit U durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ gewonnen.

Nachweis der Prüfprozesseignung

Aus der Tabelle 5-7 ist ersichtlich, dass das Eignungskriterium für den Prüfprozess darin besteht, dass der Eignungsindex Q_{MP} kleiner sein muss als der empfohlene Eignungsgrenzwert Q_{MP_max}. Das Kriterium war für den Prüfprozess erfüllt und der Prüfprozess wurde in der geplanten Form eingeführt.

Unsicherheit der Ausdehnungskoeffizienten und Temperaturen	u_{Rest}	$L_{Anz;\,N} \cdot \sqrt{T_N^2 \cdot u_{\alpha N}^2 + T_W^2 \cdot u_{\alpha w}^2 + \alpha_N^2 + u_{TN}^2}$	
		0.001026178	*mm*
Unsicherheit Ausdehnungskoeffizient Werkstück	$u_{\alpha W}$	*0.00000115*	*K*
Unsicherheit Ausdehnungskoeffizient Prüfmittel	$u_{\alpha N}$	*0.00000115*	*K*
Unsicherheit Temperatur Werkstück	u_{TW}	*1*	*K*
Unsicherheit Temperatur Prüfmittel	u_{TN}	*1*	*K*

Tabelle 5-6: Tabelle 2 zur Bestimmung der Standardunsicherheit Temperatur

Teilnr.		Teilebez.		Kupplungsanschluss	
Merkm.Nr.		Merkm.Bez.		Prüfprozess	
Toleranzmitte	=	T_m	=	36.40	
Untere Spezifikationsgrenze	=	USG	=	36.20	
Obere Spezifikationsgrenze	=	OSG	=	36.60	
Toleranz	=	T	=	0.40	
Kombinierte Standardunsicherheit		$u(y) = \sqrt{u^2_{PM} + u^2_{ZU1} + u^2_{ZU1} + u^2_{Temp.}}$	=	0.0143	
Erweiterte Messunsicherheit		$U = k\sqrt{u^2_{PM} + u^2_{ZU1} + u^2_{ZU1} + u^2_{Temp.}}$	=	0.0286	0 0.06
Eignungskennwert		$g_{pp} = \frac{2 \cdot U}{T}$	=	0.143	0 0.3
		Prüfsystem fähig (U)			

Tabelle 5-7: Unsicherheitsbudget des Prüfprozesses

6 Anhang

6.1 Messunsicherheitsbestimmung gemäß GUM

Die Unsicherheitsermittlung gemäß GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement [9]) kann grob in sechs Schritte untergliedert werden:

1. Erfassen aller relevanten Einflussgrößen
2. Bildung des mathematischen Modells
3. Bestimmen der Werte der relevanten Eingangsgrößen nach Methode A oder B
4. Bestimmen der Standardunsicherheiten für die relevanten Eingangsgrößen.
5. Ermitteln der kombinierten Standardunsicherheit
6. Berechnen der erweiterten Unsicherheit

Im ersten Schritt sind alle relevanten Einflussgrößen aufzulisten. Dieser Schritt ist analog.

Schon im zweiten Schritt zeigt sich ein wesentlicher Unterschied: Ist doch der zentrale Gedanke im GUM die Bildung der Modellfunktion! Es wird die Beziehung zwischen den Einflussgrößen und dem Messresultat als mathematische Funktion formuliert.

Schritt drei dient der Ermittlung der Werte aller relevanten Einflussgrößen. Diese können durch Auswerten eines Versuches (Methode A) oder aus bekannten Informationen (Methode B) ermittelt werden.

In dem folgenden Bild ist ein stark vereinfachtes Beispiel der Modellbildung und der Bestimmung der kombinierten Standardunsicherheit nach GUM dargestellt.

Beispiel:

Messung eines Gesamtwiderstandes R aus dem Verhältnis von Spannung U zu Strom I unter Berücksichtigung eines Basiswiderstandes R_0.

- Mathematische Modellierung

$$R = \frac{U}{1} + R_0$$

- Unsicherheit des Ergebnisses

$$u_c^2(R) = c_U^2 u^2(U) + c_I^2 u^2(I) + c_R^2 u^2(R_0)$$

$$= \left(\frac{\partial R}{\partial U}\right)^2 u^2(U) + \left(\frac{\partial R}{\partial I}\right)^2 u^2(I) + \left(\frac{\partial R}{\partial R_0}\right)^2 u^2(R_0)$$

$$= \left(\frac{1}{I}\right)^2 u^2(U) + \left(-\frac{U}{I^2}\right)^2 u^2(I) + (1)^2 u^2(R_0)$$

$$u_c(R) = \sqrt{\frac{1}{I^2}u^2(U) + \frac{U^2}{I^4}u^2(I) + u^2(R_0)} = \frac{1}{I^2}\sqrt{u^2(U) + \frac{U^2}{I^2}u^2(I) + I^2 u^2(R_0)}$$

Im vierten Schritt ist die Bildung der Standardunsicherheiten im Fokus.

Als fünfter Schritt steht die Bildung der kombinierten Standardunsicherheit unter Berücksichtigung der korrekten Verknüpfung im Sinne des Quotienten-/Produktmodells oder des Summen-/Differenzenmodells an. Auch müssen die Sensitivitätskoeffizienten der einzelnen Komponenten berücksichtigt werden.

Im sechsten und letzten Schritt wird die erweiterte Messunsicherheit bestimmt. Der dazu notwendige Erweiterungsfaktor k ist in Abhängigkeit der effektiven Freiheitsgrade zu berechnen, wobei die effektive Anzahl der Freiheitsgerade aus den Freiheitsgraden der Einzelkomponenten zu bestimmen ist.

Die praktischen Schwierigkeiten beginnen ab dem zweiten Schritt: Das Aufstellen der Modellfunktion überfordert viele Praktiker, da hierfür sehr gute mathematische und physikalische Kenntnisse auf Hochschulniveau erforderlich sind. Somit ist die Anwendung des „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ im Wesentlichen auf Fachkräfte in den Kalibrierlaboratorien und –diensten beschränkt geblieben. Mit den Dokumenten VDA 5 und ISO 22514-7 wurden Verfahren im Sinne des GUM erarbeitet, die jedoch mit Rücksicht auf die Praktiker starke Vereinfachungen im Vergleich zum GUM aufweisen.

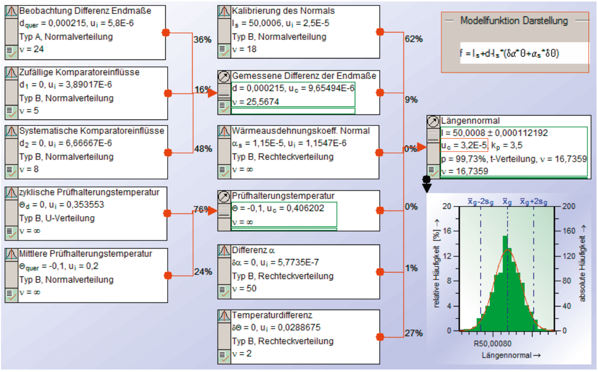


Abb. 6-1: Beispiel GUM H.1Messunsicherheitsbestimmung für eine Endmaß-Kalibrierung

6.2 Formeln zur einfachen balancierten Varianzanalyse für eine Zufallskomponente A

Bevor die Formeln im Einzelnen beleuchtet werden, sei ein Beispiel für die Anwendung der einfachen Varianzanalyse eingeführt: Eine Qualitätsregelkarte für die Stabilitätsüberwachung eines Messsystems.

Vor Schichtbeginn wird die korrekte Einstellung des Messsystems mit Hilfe eines Einstellringes überwacht (Justiermessung). Dazu führt der Bediener zu Beginn jeder Schicht drei Wiederholmessungen an dem Einstellring durch und gibt die Werte in ein Datenerfassungssystem ein. Dieses berechnet den Mittelwert und die Standardabweichung der Datengruppe und stellt die Werte in einer kombinierten Qualitätsregelkarte dar, wobei letztere aus einer Shewhart-Mittelwertkarte und einer Shewhart-Standardabweichungskarte besteht.

Für die Varianzanalyse werden die Daten nun wie folgt interpretiert:

- **Zielgröße:** Ergebnisse der Messungen an dem Innendurchmesser des Einstellringes.
- **Faktor A:** Der Index der Subgruppe, wobei eine Subgruppe aus den $n = 3$ Wiederholmessungen einer Schicht besteht.
- **Faktorstufenwerte:** Wurden diese Wiederholmessungen bei insgesamt $a = 25$ Schichten durchgeführt, so hat der Faktor A insgesamt $a = 25$ Subgruppen (=Faktorstufenwerte).

Faktor A (Stufenwerte)	*Zielgrößenwerte (Wiederholmessungen)*
Index p = 1 bis a	*Index i = 1 bis n*
1	$y_{1.1}$ $y_{1.2}$ $\vdots$ $y_{1.n}$
2	$y_{2.1}$ $y_{2.2}$ $\vdots$ $y_{2.n}$
$\vdots$	$\vdots$
a	$y_{a.1}$ $y_{a.2}$ $\vdots$ $y_{a.n}$

Tabelle 6-1: Schema der Datenstruktur für eine einfache balancierte Varianzanalyse

1) Mittelwerte der Zielgröße je Faktorstufe- (Wiederholmessungen)

Für jede Faktorstufe wird der Mittelwert aus den n Wiederholmessungen berechnet:

$$\bar{y}_p = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_{p.i}\ , \text{ mit } p = 1 \text{ bis } a$$

2) Varianz der Zielgröße je Faktorstufe (Wiederholmessungen)

$$s_p^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{p.i} - \overline{y}_p\right)^2 \text{, mit p = 1 bis a}$$

3) Mittelwert aller Zielgrößenwerte (Gesamtmittelwert)

Im Schritt 1 wurde schon der Mittelwert je Faktorstufe berechnet. Von diesen a Mittelwerten wird nun der Gesamtmittelwert berechnet. Kurz: Gesamtmittelwert = Mittelwert der Faktorstufenmittelwerte.

$$\overline{\overline{y}} = \frac{1}{a} \cdot \sum_{p=1}^{a} \overline{y}_p$$

4) Mittlere Varianz innerhalb der Faktorstufen

Im Schritt 1 wurden schon die a Varianzen für die einzelnen Faktorstufen berechnet. Nun wird der Mittelwert dieser Varianzen berechnet:

$$s_I^2 = \frac{1}{a}\sum_{i=1}^{p} s_p^2$$

5) Varianz der Faktorstufen-Mittelwerte des Faktors A

Die zweite Varianz berechnet man auf Basis der Streuung der Faktorstufenmittelwerte um den Gesamtmittelwert.

$$\frac{1}{a-1} \cdot \sum_{p=1}^{a}\left(\overline{y}_p - \overline{\overline{y}}\right)^2 = \frac{1}{n} \cdot s_{II}^2$$

Formel umgestellt nach $s_{II}{}^2$

$$s_{II}^2 = \frac{n}{a-1} \cdot \sum_{p=1}^{a} \left(\overline{y}_p - \overline{\overline{y}}\right)^2$$

Hinweis: Wäre die Aussage der Nullhypothese „Die Faktorstufenmittelwerte streuen nur zufällig" richtig, so wären beide Stichprobenvarianzen s_I^2 und S_{II}^2 Schätzwerte für dieselbe Varianz (= Varianz der Zufallsstreuung).

6) Zerlegung der Summen quadrierter Abweichungen für die einfache balancierte Varianzanalyse

$$\sum_{p=1}^{a}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{p.i} - \overline{\overline{y}}\right)^2 = n \cdot \sum_{p=1}^{a}\left(\overline{y}_p - \overline{\overline{y}}\right)^2 + \sum_{p=1}^{a}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{p.i} - \overline{y}_p\right)^2$$

$$SS_{Total} = SS_A + SS_{Res}$$

7) Zerlegungstafel zur einfachen balancierten Varianzanalyse

Quelle *(Source)*	*Summe der quadrierten Abweichungen* *(Sum of Squares)*	*Anzahl der Freiheitsgrade* *(Degrees of Freedom)*	*Varianzen* *(Mean Squares)*
	SS	*DF*	*MS*
Faktor A (Factor A)	SS_A	*a-1*	$s_{II}^2 = SS_A / (a-1)$
Rest (Residual Error)	SS_{Res}	*a·(n-1)*	$s_I^2 = SS_{Res} / [a\cdot(n-1)]$
Gesamt (Total)	SS_{Total}	*a·n-1*	

8) Schätzwert für den Erwartungswert

$$\hat{\mu} = \overline{\overline{y}}$$

9) Schätzwert für die Varianz der Faktorstufenmittelwerte von Faktor A

$$\hat{\sigma}_A^2 = \frac{\left(s_{II}^2 - s_I^2\right)}{n}$$

10) Schätzwert für die Restvarianz (innerhalb der Faktorstufen)

$$\hat{\sigma}_{Rest}^2 = s_I^2$$

11) Ergänzend wird ein Signifikanztest durchgeführt

Mit dem F-Test wird geprüft, ob die Varianz des Faktors A „überzufällig" groß ist: Ist die Streuung der Faktorstufenmittelwerte systematischer oder zufälliger Natur? Formal werden zwei Hypothesen formuliert:

Nullhypothese H0: Beide Varianzen sind gleich.

Alternativhypothese H1: Die Varianz der Faktorstufen ist größer.

Für den Test ist die Prüfgröße F mit den einseitig nach oben berechneten kritischen Werten der F-Verteilung verglichen.

In der folgenden Tabelle ist in allgemeiner Form das Bestimmen der Prüfgröße F und der kritischen F-Werte dargestellt. Die kritischen Werte sind Quantile der F-Verteilung. Im Index der kritischen Werte ist die Wahrscheinlichkeit $P = 1\text{-}\alpha$ sowie der erste und zweite Freiheitsgrad der F-Verteilung dargestellt. Zur Erinnerung: a = Anzahl der Stufenwerte des Faktors A und n = Anzahl der Wiederholmessungen.

Prüfgröße	*Signifikanzniveau α*	*Kritischer Wert*
$F = \frac{s_{II}^2}{s_i^2}$	*5 %*	*F95 %;a-1; a·(n-1)*
	1 %	*F99 %;a-1; a·(n-1)*
	0,1 %	*F99,9 %;a-1; a·(n-1)*

Tabelle 6-2: Allgemeine Bestimmung der Prüfgröße und der kritischen Werte der F-Verteilung.

Die Entscheidung zum Test wird durch Vergleich der Prüfgröße mit den kritischen Werten abgeleitet:

Vergleich der Prüfgröße	*Testentscheid aufgrund des Vergleiches*	*Kennzeichnung der Prüfgröße F*
F < F95 %;a-1; a·(n-1) %	*Kein Verwerfen der Nullhypothese*	*Kein Stern*
F ≥F95 %;a-1; a·(n-1) % und F < F99 %;a-1; a·(n-1) %	*Verwerfen der Nullhypothese auf dem Niveau 5 %*	*Ein Stern (*)*
F ≥F99 %;a-1; a·(n-1) % und F < F99,9 %;a-1; a·(n-1) %	*Verwerfen der Nullhypothese auf dem Niveau 1 %*	*Zwei Sterne (**)*
F ≥F99,9 %;a-1; a·(n-1) %	*Verwerfen der Nullhypothese auf dem Niveau 0,1 %*	*Drei Sterne (***)*

Tabelle 6-3: Entscheidungen zum F-Test auf Basis des Vergleiches der Prüfgröße mit den kritischen Werten der F-Verteilung

6.3 Literatur

[1] *A.I.A.G; Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corp.*
Measurement Systems Analysis, Core Tools (Reference Manual), 4. Auflage. Michigan, USA, 2010.

[2] *DGQ Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V.*
DGQ Leitfaden 13-61: Prüfmittelmanagement – Prüfprozesse planen, überwachen und lenken, 2. Auflage.
Beuth Verlag, Berlin, 2002.

[3] *Dietrich, E. / Schulze, A.*
Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 7., aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2014.

[4] *Dietrich, E. / Schulze, A.*
Eignungsnachweis von Prüfprozessen. 4., überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2014.

[5] *Dietrich, E. / Schulze, A. /Conrad, S.*
Pocket Guide: Eignungsnachweis von Messsystemen.
4., aktualisierte Auflage. Hanser Verlag, Jan. 2015.

[6] *DIN – Deutsches Institut für Normung*
DIN EN ISO 10012: Ausgabe:2004-03
Messmanagementsysteme – Anforderungen an Messprozesse und Messmittel (ISO 10012:2003); Dreisprachige Fassung EN ISO 10012:2003. Beuth Verlag, Berlin, 2004.

[7] *DIN – Deutsches Institut für Normung*
DIN EN ISO 14253-1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen. Beuth Verlag, 12-2013.

[8] *DIN – Deutsches Institut für Normung*
DIN EN ISO 14253-2: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011). Beuth Verlag, 11-2011.

[9] *DIN – Deutsches Institut für Normung*
DIN V ENV 13005:1999: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit

bei Messen – Beuth Verlag, Berlin, 1999.
identisch mit: ISO/IEC Guide 98-3:2008M Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).
Beuth Verlag, Berlin, 2008.

[10] *DIN – Deutsches Institut für Normung*
DIN EN ISO 9000-2005: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2005.

[11] *DIN – Deutsches Institut für Normung*
Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM).
Beuth Verlag, Berlin, 2012.

[12] *DIN – Deutsches Institut für Normung*
ISO 22514-7: Statistische Verfahren im Prozessmanagement – Fähigkeit und Leistung. Teil 7: Fähigkeit von Messprozessen.
Beuth Verlag, Berlin, 2012.

[13] *General Motors Corp. – GM Powertrain*
SP-Q-EMS-GLOBAL 10.8 – Richtlinie für Messsystemanalysen.
Detroit/Rüsselsheim, 2004.

[14] *VDA – Verband der Automobilindustrie*
VDA Band 5: Prüfprozesseignung. 2. vollständig überarbeitete Auflage. VDA, Frankfurt, 2010.

6.4 Abkürzungen

ANOVA	(Varianzanalyse) **An**alysis **o**f **Va**riance
ARM	Mittelwert-Spannweiten-Methode (**A**verage **R**ange **M**ethod)
AV	Vergleichpräzision (Reproducibility / **A**ppraiser **V**ariation)
%AV	Vergleichpräzision (Reproducibility / **A**ppraiser **V**ariation) in % bezogen auf die Bezugsgröße (RF)
Bi	Systematische Messabweichung
%Bi	Systematische Messabweichung (**Bi**as) in % bezogen auf die Bezugsgröße (RF) Die systematische Messabweichung wird häufig als Genauigkeit bezeichnet. In der ISO 10012 ist aber der Begriff “Genauigkeit” als qualitativer Begriff definiert. Daher wird in dieser Richtlinie die Differenz zwischen dem beobachteten Mittelwert $\overline{x}_g$ und dem “wahren Wert” x_m mit systematischer Messabweichung bezeichnet.
C_g	Potential Messsystem (**g**age potential index)
C_{gk}	Fähigkeitsindex Messsystem (**g**age **c**apability index) Verfahren 1
EV	Wiederholpräzision (Repeatability – **E**quipment **V**ariation) Messsystem
%EV	Wiederholpräzision (Repeatability – **E**quipment **V**ariation) Messsystem in % bezogen auf die Bezugsgröße (RF)

GRR	**G**age **R**epeatability and **R**eproducibility identisch mit R&R
%GRR	siehe GRR und %R&R
k	Anzahl der Prüfer (operators)
K_1, K_2, K_3	Faktoren, die von der Anzahl der Prüfer, Wiederholungen und Teile abhängt
n	Anzahl der Teile (**n**umber of parts)
ndc	number of distinct categories (Anzahl unterscheidbarer Messwertklassen, „effektive Auflösung“)
OEG	**O**bere **E**ingriffs**g**renze
OSG	**O**bere **S**pezifikations**g**renze
QRK	Qualitätsregelkarte
r	Anzahl der Messwertreihen pro Prüfer
$\overline{\overline{R}}$	Mittelwert der mittleren Spannweiten
$\overline{R}$	mittlere Spannweite
R_p	Spannweite der Mittelwerte $\overline{x}_{pi}$ der Teile
R&R	Wiederhol- und Vergleichpräzision, **R**epeatability & **R**eproducibility
%R&R	Wiederhol- und Vergleichpräzision (**R**epeatability & **R**eproducibility) in % bezogen auf die Bezugsgröße (RF)
RE	Auflösung (**Re**solution) des Messsystems
%RE	Auflösung (**Re**solution) des Messsystems in %

RF	Bezugsgröße (**R**eference **F**igure), z.B. Prozeßtoleranz, Prozeßstreuung, Toleranz, Klassentoleranz
s_g	Standardabweichung einer mit einem Messsystem am Normal erfaßten Messreihe
T	Toleranz
U	erweiterte Mess**u**nsicherheit
%U	**U**nsicherheit in % bezogen auf die Bezugsgröße (RF)
UEG	**U**ntere **E**ingriffs**g**renze
USG	**U**ntere **S**pezifikations **G**renze
$\bar{x}_{Diff}$	max. Differenz zwischen den Mittelwerten mehrerer Messwertreihen (von $\bar{x}$)
$\bar{x}_g$	Mittelwert einer, mit einem Messsystem am Normal erfaßten, Messwertreihe
x_i	Einzelwerte einer Messwertreihe
x_m	Referenzwert (**m**aster, Normal) entspricht „richtiger” bzw. „wahrer” Wert
$(x_m)_i$	Referenzwert des Normals i
$\bar{x}_{pi}$	Mittelwert des i-ten Teils bei Verfahren 2 und 3
x-Karte	Einzelwertkarte

Dietrich · Radeck

Prüfprozesseignung nach VDA 5 und ISO 22514-7

Die VDA 5 »Prüfprozesseignung« und die internationale Norm ISO 22514-7 »Capability of Measurement Processes« verbindet die Konzepte der Messunsicherheitsbetrachtung gemäß dem »Guide to the Expression of Uncertainty« (GUM) mit den Vorgehensweisen, wie sie in dem Leitfaden »Measurement Systems Analysis« (MSA) bzw. in Firmenrichtlinien beschrieben werden.

Der vorliegende Pocket Guide zeigt, dass es nur ein kleiner Schritt von den bekannten Verfahren der Messsystemanalyse hin zur Prüfprozesseignung nach VDA 5 bzw. ISO 22514-7 ist. Viele Ermittlungsverfahren der Messsystemanalyse können 1:1 für die Prüfprozesseignung übernommen werden. Auch wurde das Konzept übertragen, anhand von Fähigkeitskenngrößen klare Entscheidungsregeln für die Annahme oder Rückweisung eines Prüfprozesses festzulegen. Damit sind die Verfahren der Prüfprozesseignung eine auf die Belange des Praktikers im Fertigungsbetrieb zugeschnittene »Übersetzung« des GUM.

EXTRA
E-Book inside

HANSER

www.hanser-fachbuch.de

ISBN 978-3-446-44332-7

9 783446 443327