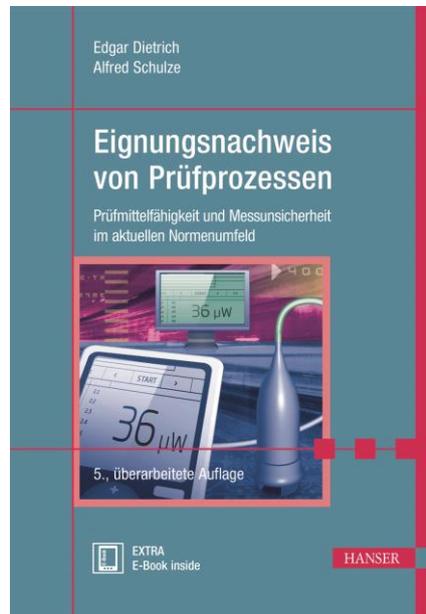


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Eignungsnachweis von Prüfprozessen

Edgar Dietrich

Alfred Schulze

ISBN (Buch): 978-3-446-45124-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-45171-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Prüfprozesseignung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Einführung .....	1
1.1.1 Warum Prüfprozesseignung? .....	1
1.2 Historischer Rückblick und Ausblick .....	9
1.2.1 Entwicklung „Prüfprozessfähigkeit“ .....	10
1.2.2 Entwicklung „Prüfprozesseignung“ .....	12
1.2.3 „Prüfprozess oder Messprozess?“ .....	13
1.3 Anmerkung Autoren zu MSA und VDA 5 .....	14
1.4 Experimentelle Beurteilung .....	15
<b>2 Definitionen und Begriffe</b> .....	<b>19</b>
2.1 Prozess .....	19
2.2 Prüfprozess .....	19
2.3 Prüfen .....	20
2.4 Prüfmittel .....	21
2.5 Messabweichungen und Messunsicherheit .....	24
2.5.1 Messabweichungen .....	24
2.5.1.1 Systematische Messabweichungen .....	25
2.5.1.2 Zufällige Messabweichungen .....	26
2.5.2 Messergebnis .....	26
2.5.3 Wiederholpräzision .....	26
2.5.4 Vergleichspräzision .....	27
2.5.5 Linearität .....	28
2.5.6 Stabilität/Messbeständigkeit .....	30

<b>3</b>	<b>Einflussgrößen auf den Messprozess</b>	<b>31</b>
3.1	Typische Einflussgrößen	31
3.2	Auswirkung der Einflussgrößen beim Messsystem	34
3.3	Bewertung des Messprozesses	37
<b>4</b>	<b>Prüfmittelfähigkeit als Eignungsnachweis für Messprozesse</b>	<b>41</b>
4.1	Grundlegende Verfahren und Vorgehensweise	41
4.2	Beurteilung Messmittel	44
4.2.1	Unsicherheit des Normals/Einstellmeister	44
4.2.2	Einfluss der Auflösung	47
4.2.3	Beurteilung der Systematischen Messabweichung	49
4.2.4	Verfahren 1	52
4.2.5	Qualitätsfähigkeitskenngrößen $C_g$ und $C_{gk}$	56
4.2.6	Verfahren 1 für einseitig begrenzte Merkmale	64
4.2.7	Verfahren 1 für mehrere Merkmale	67
4.2.8	Linearität	68
4.2.8.1	Begriffserklärung „Linearität“	68
4.3	Beurteilung Prüfprozess	78
4.3.1	Spannweitenmethode (Short Range Methode)	78
4.3.2	Verfahren 2: %GRR mit Bedienerinfluss	80
4.3.2.1	Numerische Auswertung der Versuchsdaten	88
4.3.3	Verfahren 3: %GRR ohne Bedienerinfluss	104
4.4	Überprüfung der Messbeständigkeit	107
4.5	Weitere Verfahren	111
	Zu Kapitel 4.5	111
4.5.1	Verfahren 4	112
4.5.2	Verfahren 5	115
4.6	Vorgehensweise nach CNOMO	117
<b>5</b>	<b>Eignungsnachweis von attributiven Prüfprozessen</b>	<b>121</b>
5.1	Lehren	121
5.2	Lehren oder Messen	122
5.3	Voraussetzungen für eine erfolgreiche attributive Prüfung	123
5.4	Untersuchung von attributiven Prüfprozessen „Short Method“	124
5.5	Untersuchung von attributiven Prüfprozessen „Erweiterte Methode“	127
5.5.1	Einleitung	127
5.5.2	Testen von Hypothesen	132
5.5.2.1	Aufbau einer Kreuztabelle für zwei Prüfer	133

5.5.3	Kappa-Koeffizient nach Fleiss .....	137
5.5.4	Beurteilung der Effektivität eines attributiven Prüfsystems .....	146
5.5.4.1	Effektivität bei einem Prüfer ohne Referenz-Vergleich ...	147
5.5.4.2	Effektivität bei einem Prüfer mit Referenz-Vergleich .....	148
5.5.4.3	Effektivität bei allen Prüfern ohne Referenz-Vergleich ..	149
5.5.4.4	Effektivität bei allen Prüfern mit Referenz-Vergleich .....	150
5.5.5	Methode der Signalerkennung .....	151
5.5.5.1	Symbol-Erläuterung .....	151
<b>6</b>	<b>Anmerkungen zur MSA 4<sup>th</sup> Edition .....</b>	<b>157</b>
6.1	Begriffsdefinition .....	157
6.1.1	Separate Betrachtung Messsystem .....	158
6.1.2	Auflösung Messgerät .....	158
6.2	Systematische Messabweichung und Linearität .....	159
6.3	%GRR-Wert das Maß der Dinge .....	159
6.4	Bezugsgrößen beeinflussen das Ergebnis .....	160
6.4.1	Teilestreuung .....	161
6.4.2	Prozess- und Vorläufige Prozessstreuung .....	161
6.4.3	Die Toleranz als sinnvolle Bezugsgröße .....	161
6.4.4	Wahrscheinlichkeit 99,73% anstatt 99% .....	162
6.4.5	Attributive Prüfprozesse .....	162
6.5	ARM versus ANOVA .....	162
6.5.1	ARM-Methode .....	163
6.5.2	ANOVA-Methode .....	164
6.5.3	Anmerkungen zu EV und AV .....	165
6.5.4	Wechselwirkung IA .....	166
6.5.5	Bewertung der ANOVA-Methode .....	168
6.6	ndc – Number of Distinct Categories .....	169
6.6.1	Kennwerte TV, PV und GRR .....	169
6.6.2	Definition ndc-Faktor .....	170
6.6.3	Bewertung ndc-Faktor in Literatur und Blog .....	172
<b>7</b>	<b>Erweiterte Messunsicherheit als Eignungsnachweis für Messprozesse .....</b>	<b>175</b>
7.1	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement .....	175
7.1.1	Grundlagen .....	175
7.1.2	Zielsetzung und Zweck der GUM .....	176
7.1.3	Anwendungsbereich .....	178
7.1.4	Der Inhalt des Leitfadens .....	179
7.1.5	Definitionen und Begriffe .....	179

7.2	Ermittlung von Messunsicherheiten	183
7.2.1	Ermittlung der Standardunsicherheit	184
7.2.2	Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit	191
7.2.3	Ermittlung der erweiterten Unsicherheit	193
7.2.4	Protokollierung der Unsicherheit	196
7.2.5	Angabe des Ergebnisses	197
7.3	Beispiel GUM H.1 Endmaß-Kalibrierung	197
7.3.1	Messaufgabe	198
7.3.2	Standardunsicherheiten	198
7.3.2.1	Unsicherheit $u(l_S)$ der Kalibrierung des Normals	199
7.3.2.2	Unsicherheit $u(d)$ der gemessenen Längendifferenz	199
7.3.2.3	Unsicherheit $u(\alpha_S)$ des Wärmeausdehnungskoeffizienten	201
7.3.2.4	Unsicherheit $u(\Theta)$ der Temperaturabweichung des Endmaßes	201
7.3.2.5	Unsicherheit $u(\delta\alpha)$ der Differenz der Ausdehnungs- koeffizienten	202
7.3.2.6	Unsicherheit $u(\delta\Theta)$ der Temperaturdifferenz der Maße	202
7.3.2.7	Kombinierte Standardunsicherheit	203
7.4	Kalibrierung eines Gewichtsstückes mit dem Nennwert 10 kg (S2)	206
7.4.1	Messaufgabe	206
7.4.2	Standardunsicherheiten	206
7.4.3	Erweiterte Messunsicherheit und vollständiges Messergebnis	210
7.5	Kalibrierung eines Messschiebers	211
7.5.1	Messaufgabe	211
7.5.2	Standardmessunsicherheit (S10.3 – S10.9)	212
7.5.3	Erweiterte Messunsicherheit und vollständiges Messergebnis	215
7.6	Interpretation des GUM für Prüfprozesse in der Serienfertigung	217
<b>8</b>	<b>Erweiterte Messunsicherheit nach ISO 22514-7 bzw. VDA 5</b>	<b>219</b>
8.1	Ablaufschema	219
8.1.1	Schematisierte Vorgehensweise	221
8.1.2	Eignung des Messprozesses mit minimaler Toleranz	223
8.1.3	Bestimmung der Standardunsicherheiten	225
8.2	Fallbeispiele Standardunsicherheit	229
8.2.1	Standardunsicherheit $u_{CAL}$	229
8.2.2	Standardunsicherheit der Auflösung $u_{RE}$	229
8.2.3	Standardunsicherheit $u_{BI}$	230
8.2.4	Standardunsicherheit $u_{MS}$ bei Standardmessmittel	232
8.2.5	Standardunsicherheit durch Gerätestreuung am Referenzteil $u_{EVR}$	233
8.2.6	Standardunsicherheit durch Gerätestreuung am Objekt $u_{EVO}$	233
8.2.7	Standardunsicherheit durch den Bedienereinfluss $u_{AV}$	235

8.2.8	Standardunsicherheit durch das Messobjekt $u_{\text{OBJ}}$ .....	235
8.2.9	Standardunsicherheit durch Temperatureinfluss $u_{\text{T}}$ .....	238
8.2.10	Standardunsicherheit durch Linearitätsabweichungen $u_{\text{LIN}}$ .....	242
8.2.11	Standardunsicherheit durch Stabilität $u_{\text{STAB}}$ .....	244
8.3	Mehrfachberücksichtigung von Unsicherheitskomponenten .....	246
8.4	Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit .....	246
8.5	Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit an den Spezifikationsgrenzen .....	247
8.6	Fallbeispiele .....	248
8.6.1	Längenmessung mit einem Standardmessmittel .....	248
8.6.1.1	Beurteilung des Messsystems .....	249
8.6.1.2	Beurteilung und Nachweis der Messprozesseignung ....	250
8.6.2	Längenmessung mit speziellem Messmittel .....	256
8.7	Fallbeispiel aus VDA 5 .....	262
8.7.1	Messprozesseignung mit drei Bezugsnormalen .....	262
8.8	Eignungsnachweis für einen attributiven Prüfprozess mit dem Bowker-Test .....	266
<b>9</b>	<b>Vergleich Firmenrichtlinien, MSA mit VDA 5 bzw. ISO 22514-7</b> .....	<b>273</b>
<b>10</b>	<b>Vereinfachte Bestimmung der Messunsicherheit</b> .....	<b>279</b>
10.1	AIO-Verfahren („All-in-One“-Verfahren) .....	279
10.1.1	Nachweis der Prüfprozesseignung .....	279
10.1.2	Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit .....	280
10.1.2.1	Bestimmung der einzelnen Standardunsicherheiten ....	281
10.2	Fallbeispiele zum Verfahren „All-in-One“ .....	284
10.2.1	Messprozess mit linearer Maßverkörperung .....	284
10.2.2	Messprozess ohne lineare Maßverkörperung .....	286
<b>11</b>	<b>Sonderfälle bei der Prüfprozesseignung</b> .....	<b>289</b>
11.1	Was ist ein Sonderfall? .....	289
11.2	Typische Sonderfälle .....	289
<b>12</b>	<b>Umgang mit nicht geeigneten Messprozessen</b> .....	<b>291</b>
12.1	Vorgehensweise zur Verbesserung von Prüfprozessen .....	291
<b>13</b>	<b>Typische Fragen zur Prüfprozesseignung</b> .....	<b>295</b>
13.1	Fragestellung .....	295
13.2	Antworten .....	295

<b>14 Eignungsnachweis bei der Sichtprüfung</b> .....	<b>299</b>
14.1 Anforderungen an die Sichtprüfung .....	299
14.2 Eignungstest für Sichtprüfer .....	300
<b>15 Beschaffung von Prüfmitteln</b> .....	<b>303</b>
15.1 Beispiel für Messaufgabenbeschreibung .....	304
15.2 Beispiel für Lastenheft .....	305
<b>16 Eignungsnachweis für Prüfsoftware</b> .....	<b>307</b>
16.1 Allgemeine Betrachtung .....	307
16.2 Das Märchen von der „Excel Tabelle“ .....	310
16.3 Testbeispiele zur Prüfmittelfähigkeit .....	313
<b>17 Anhang</b> .....	<b>327</b>
17.1 Tabellen .....	327
17.1.1 $d_2^*$ -Tabelle zur Bestimmung der K-Faktoren u. Freiheitsgrade für t-Werte .....	327
17.1.2 Eignungsgrenzen gemäß VDA 5 .....	330
17.1.3 k-Faktoren .....	330
17.2 Auswirkung des Messprozesses auf die Prozessfähigkeit .....	331
17.3 Modelle der Varianzanalyse .....	332
17.3.1 Messsystemanalyse – Verfahren 2 .....	332
17.3.2 Messsystemanalyse – Verfahren 3 .....	338
17.4 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen .....	340
17.5 Formeln .....	344
17.6 Literaturverzeichnis .....	346
17.7 Abbildungsverzeichnis .....	349
17.8 Tabellenverzeichnis .....	356
<b>Leitfaden zum „Fähigkeitsnachweis von Messsystemen“</b> .....	<b>359</b>
<b>Musterdokumentation</b> .....	<b>395</b>
GM Powertrain .....	395
Bosch .....	395
Daimler .....	395
Ford Motor Co. ....	395
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>641</b>

# Vorwort

Das Ergebnis einer Prüfung wird als Prüfergebnis bezeichnet. Dieses setzt sich bei einer Prüfung aus dem ermittelten Prüfergebnis und der Unsicherheit des Prüfprozesses zusammen. Bevor Prüfergebnisse weiterverarbeitet werden, um darauf basierend Bewertungen von Merkmalen oder Eigenschaften eines Produktes oder Prozesses vorzunehmen, ist die Unsicherheit des Prüfprozesses für die jeweilige Aufgabenstellung zu bestimmen. Alternativ kann auch nachgewiesen werden, dass die Unsicherheit bei der jeweiligen Prüfung vernachlässigbar klein ist. Erfolgt diese Nachweise nicht, ist die in jedem Prüfergebnis enthaltene Unsicherheit nicht bekannt. Diese Unsicherheit überträgt sich konsequenterweise auf jede darauf aufbauende Beurteilung. Daher ist anhand einer Risikoabschätzung zu bewerten, ob eine Unsicherheit ermittelt werden muss und wenn ja, inwieweit die ermittelte Unsicherheit bei jedem Prüfprozess noch vertretbar ist. Für diese Beurteilung werden sogenannte Eignungsnachweise bzw. Fähigkeitsuntersuchungen durchgeführt, die in dem vorliegenden Buch näher beschrieben sind.

Für eine ganzheitliche Beurteilung müssen alle relevanten Einflüsse beinhaltet sein, die bei einer Prüfung zum Tragen kommen. Daher spricht man von einem Prüfprozess. Dies gilt sowohl für quantitative (variable) als auch qualitative (attributive) Prüfungen. Bei quantitativen Prüfungen werden Messgeräte bzw. Messsysteme verwendet. Das Ergebnis dieser Prüfung ist ein angezeigter Messwert. Bei qualitativen Prüfungen sind das vornehmlich Lehren bzw. visuelle Beurteilungen durch Personen. Dessen Ergebnis ist eine Aussage; „Gut/Schlecht“, „Oberhalb, Innerhalb bzw. Unterhalb einer vergebenen Spezifikation“ oder z.B. einer Farbzuordnung. Auch bei qualitativen Prüfungen muss konsequenterweise die Eignung bzw. Fähigkeit des Prüfprozesses nachgewiesen werden.

Im Laufe der Jahre haben sich unterschiedliche Vorgehensweisen herauskristallisiert, um die Eignung bzw. Fähigkeit eines Prüfprozesses nachzuweisen. Die sicherlich umfassendste und präziseste Vorgehensweise ist in der GUM (Guide to expression of Uncertainty in Measurement [21] ) beschrieben. Aufgrund der Komplexität eines Prüfprozesses, insbesondere, wenn dieser in der Fertigung bzw. in der Produktion eingesetzt wird, kommt diese Betrachtungsweise in der Praxis

quasi nicht zum Tragen. Allerdings ist die GUM die Basis für vereinfachte und damit praxisrelevantere Vorgehensweisen.

Erste Richtlinien zur Durchführung von Fähigkeitsuntersuchungen wurden Ende der 80er Jahre von GM [32] und Ford [31] veröffentlicht. Es folgten in Deutschland von BOSCH das Heft 10 [39]. Anfang der 90er Jahre wurde in USA von der AIAG Automotive Industry Action Group der heute sicherlich am weitesten verbreitete Leitfaden MSA „Measurement System Analysis“ [1] veröffentlicht. Vom VDA Verband der Deutschen Automobilindustrie wurde der Band 5 „Prüfprozesseignung“ [40] herausgegeben. Diese Verbands- und Firmenrichtlinien werden aufgrund neuer Erkenntnisse kontinuierlich weiterentwickelt in neuen Versionen publiziert. Basierend auf dem VDA 5 Band wurde 2012 seitens der ISO International Standard Organisation die Norm ISO 22515-7 „Capability of Measurement Processes“ veröffentlicht.

Der VDA 5 Band und die ISO 22515-7 orientieren sich vornehmlich an der GUM und geben praxisrelevante Hilfestellungen, wie für die jeweiligen Prüfprozesse die Messunsicherheit bestimmt werden kann. Die Eignung eines Prüfprozesses wird dabei anhand des Verhältnisses „Messunsicherheit zu einer vorgegebenen Spezifikation“ bewertet.

Die MSA und viele daraus abgeleiteten Firmenrichtlinien beschreiben Vorgehensweisen, wie für einen Prüfprozess ein sog. GRR (**G**age **R**epeatibility & **R**eproducibility)-Wert ermittelt werden kann. Um die Fähigkeit des Prüfprozesses anhand von der ermittelten GRR-Wert nachzuweisen, wird dieser mit vorgegebenen Grenzwerten verglichen und darauf basierend eine Bewertung vorgenommen. Die erwähnten Eignungsnachweise bzw. Fähigkeitsuntersuchungen können als Standardverfahren bezeichnet werden, die bei vielen Prüfprozessen angewandt werden können. Allerdings gibt es in der Praxis auch Prüfprozesse bei denen diese Vorgehensweisen nicht eins zu eins umgesetzt werden können. Dabei spricht man von Sonderfällen oder speziellen Mess- oder Prüfverfahren. Gerade für die Art von Prüfprozessen, auch wenn diese sich schwierig gestalten, müssen ebenfalls Eignungsnachweise geführt oder mindestens das Risiko für fehlerhafte Bewertungen abgeschätzt werden. Die für alle denkbaren Anwendungen zu beschreiben, würde den Rahmen des Buches sprengen. Allerdings können die hier beschriebenen Standardverfahren für die Fälle durchaus Anregungen und Hilfestellungen geben.

Weinheim, März 2017

Edgar Dietrich

# 8

## Erweiterte Messunsicherheit nach ISO 22514-7 bzw. VDA 5

### 8.1 Ablaufschema

Die Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit im Sinne des GUM [21] ist für Messprozesse, die direkt in der Fertigung bzw. Produktion eingesetzt werden, zu komplex und insbesondere vom Praktiker nicht nachvollziehbar. Dies war Anlass für den VDA, in seinem VDA Band 5 [40] das Prozedere zur Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit zu vereinfachen, zu schematisieren und damit praktikabler zu machen. Diese Vorgehensweise ist auch identisch mit der Norm ISO 22514-7 [22]. Prinzipiell liegt dieser Vorgehensweise die in Bild 8.1 dargestellte Struktur zu Grunde.

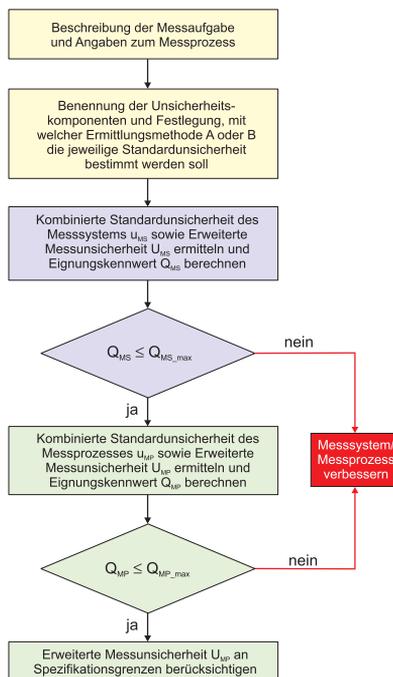
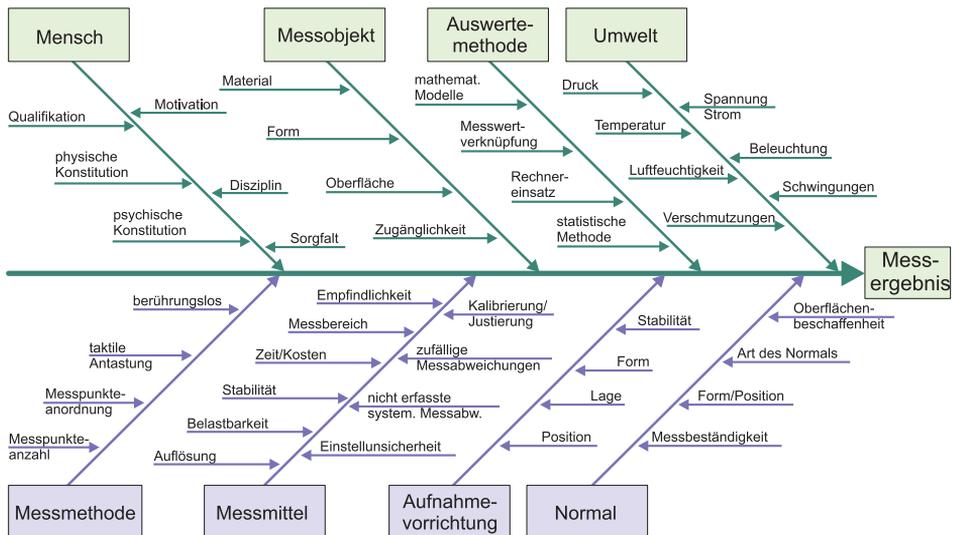


Bild 8.1 Ablauf bei der Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit

Dabei wird zwischen den Einflussparametern, die per Definition dem Messsystem und den restlichen Einflussparametern, die den gesamten Messprozess beschreiben, unterschieden (s. Bild 8.2). Diese Aufteilung ist sinnvoll, da somit das Messsystem allein und unabhängig von dem eigentlichen Anwendungsfall beurteilt werden kann. Für die Hersteller von Messgeräten und insbesondere bei Standardmessmitteln ist diese separate Betrachtung sehr hilfreich, da jederzeit für ein Messsystem ein Eignungskoeffizient bestimmt werden kann, der mit einem vorgegebenen Grenzwert zu vergleichen ist, um die Eignung zu bestätigen bzw. abzulehnen.



**Bild 8.2** Wichtige Einflüsse auf die Unsicherheit von Messergebnissen  
Quelle: VDA 5 Prüfprozesseignung

Wie oben erwähnt, wird zwischen der Unsicherheit aufgrund der Einflussparameter des:

- **Messsystems**  $U_{MS}$  und
- der Unsicherheit aufgrund der restlichen Komponenten des **Messprozesses**  $U_{MP}$  unterschieden. Diese Aufteilung wird in der GUM so nicht vorgenommen, ist aber sehr sinnvoll. Denn erfüllt bereits das Messsystem die Anforderungen nicht, können weitere Untersuchungen entfallen. Um diese Entscheidung treffen zu können, wird zunächst die kombinierte Standardunsicherheit des Messsystems  $u_{MS}$  und der Eignungskennwert  $Q_{MS}$  berechnet. Ist der Eignungskennwert kleiner gleich dem vorgegebenen Grenzwert  $Q_{MS\_max}$ , ist das untersuchte Messsystem für den Anwendungsfall verwendbar und der Messprozess wird weiter untersucht. Falls diese Forderung nicht erfüllt wird, ist die weitere Betrachtung des Messprozesses hinfäl-

lig, da sich durch die zusätzlichen Einflussfaktoren der gesamte Messprozess in der Regel nur noch verschlechtert.

Wird das Messsystem als geeignet beurteilt, erfolgt die Beurteilung der weiteren Einflusskomponenten und damit des gesamten **Messprozesses** anhand der erweiterten Messunsicherheit  $U_{MP}$ . Anschließend wird der Eignungskennwert für den Messprozess  $Q_{MP}$  berechnet und mit einem vorgegebenen Grenzwert  $Q_{MP\_max}$  verglichen, um über die Eignung des Messprozesses zu entscheiden.



**HINWEIS:** Bei einer Fähigkeitsuntersuchung gemäß Verfahren 1 (s. Kapitel 4.2.4), bei der der  $C_g$ - bzw.  $C_{gk}$ -Wert bestimmt wird, betrachtet man auch nur das Messsystem. Daher kann die Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit bzw. der Eignungskennwert des Messsystems mit der Betrachtung im Sinne des Verfahrens 1 verglichen werden. Ein direkter Vergleich zwischen  $C_g$  bzw.  $C_{gk}$  und  $U_{MS}$  bzw.  $Q_{MS}$  ist allerdings nicht möglich. Sehr wohl können aber die Daten zur Bestimmung von  $C_g$  bzw.  $C_{gk}$  unverändert zur Berechnung von  $U_{MS}$  verwendet werden.

### 8.1.1 Schematisierte Vorgehensweise

Zunächst ist der Anwendungsfall des Messprozesses allgemein zu beschreiben. Dabei sind Hinweise auf irgendwelche Spezifikationen und zu beachtende Besonderheiten, die bei dem Messprozess zum Tragen kommen, hilfreich. Genannt werden müssen alle Einflusskomponenten, die sowohl beim Messsystem als auch beim Messprozess wirken können. Ist man sich unschlüssig, ob ein Parameter eine Auswirkung auf die Messunsicherheit hat oder nicht, sollte man diesen auf jeden Fall anhand eines Versuchs explizit beurteilen. Nur so kann man sicher sein, keine wesentlichen Einflüsse zu übersehen. Weiter kann in dieser Phase bereits festgelegt werden, ob die jeweilige Einflusskomponente gemäß Methode A oder Methode B beurteilt wird. Prinzipiell ist empfohlen, die Beurteilung soweit wie möglich anhand eines Versuches (Methode A) durchzuführen. Theoretische Abschätzungen, wie sie bei Methode B verwendet werden, können sehr leicht zu Fehleinschätzungen führen.

Anschließend sind die wichtigsten Angaben zum Messsystem, (Messgerät, ggf. Hilfsvorrichtungen, Messmethode, Normal und Umgebungsbedingungen) zu dokumentieren. Danach werden die Standardunsicherheitskomponenten des Messsystems (Abschnitt 8.1.3) berechnet und damit diese prinzipielle Eignung (Abschnitt 8.1.2) für das Messsystem nachgewiesen.

Ist das Messsystem geeignet, werden die restlichen Komponenten des gesamten Messprozesses in gleicher Weise betrachtet und die erweiterte Messunsicherheit  $U_{MP}$  bzw. der Eignungskennwert  $Q_{MP}$  (Abschnitt 8.1.2) bestimmt.

Daraus lässt sich folgende schematische Vorgehensweise ableiten:

### 1. Beschreibung der Messaufgabe

Spezifikation der Messaufgabe

### 2. Angaben zum Messsystem

Es sind Messgerätetyp, Hersteller, Messbereich, Skalenteilung, Wiederholbarkeit, Linearität usw. und Angaben zum Normal bzw. Referenzteil festzuhalten.

### 3. Nachweis der Eignung des Messsystems

Die erwarteten Unsicherheitskomponenten des Messsystems sind zu benennen und das Unsicherheitsbudget für das „Messsystem“  $u_{MS}$  ist entweder gemäß Methode A oder Methode B zu bestimmen.

Anschließend wird der Eignungskennwert für das Messsystem  $Q_{MS}$  berechnet, um festzustellen, ob das Messsystem für die Messaufgabe prinzipiell geeignet ist.

### 4. Nachweis der Eignung des Messprozesses

Die erwarteten Unsicherheitskomponenten des Messprozesses sind zu benennen, das Unsicherheitsbudget des Messsystems  $u_{MP}$  zu bestimmen und die erweiterte Messunsicherheit des Messprozesses  $U_{MP}$  zu berechnen.

Anschließend wird der Eignungskennwert für den Messprozess  $Q_{MP}$  berechnet, um festzustellen, ob der Messprozess für die Messaufgabe prinzipiell geeignet ist.

### 5. Auswirkung auf die Grenzen

Die unter 4. berechnete erweiterte Messunsicherheit  $U_{MP}$  muss bei der Beurteilung an den vereinbarten Spezifikationsgrenzen berücksichtigt werden.

Die schwierigste Aufgabe bei der oben beschriebenen Vorgehensweise für die Eignungsnachweise von Messsystem und Messprozess sind die Schritte 3 und 4. Dabei gilt es, für jeden Einflussparameter die richtige Auswirkung auf die Messunsicherheit abzuschätzen. Unabhängig, ob dies aufgrund der Vorgehensweise gemäß der Methode A oder Methode B erfolgt. Oftmals gibt es sogar für ein und denselben Sachverhalt unterschiedliche Berechnungsmöglichkeiten. Daher ist anhand einer Risikobewertung die Grenze der jeweiligen Betrachtungsweise zu bewerten und zu dokumentieren.



**HINWEIS:** Da es sowohl bei der Methode A als auch bei der Methode B mehrere Berechnungsformeln zur Bestimmung von  $u(x_i)$  gibt, ist bei jeder Auswertung diese mit anzugeben bzw. in einer Richtlinie/Verfahrensanweisung eine genaue Vorgehensweise festzulegen. Um die Vergleichbarkeit für spätere oder andere Untersuchungen in einem Unternehmen zu gewährleisten, ist die jeweilige Berechnung einer Standardunsicherheit möglichst genau zu spezifizieren.

### 8.1.2 Eignung des Messprozesses mit minimaler Toleranz

An dieser Stelle wird bereits angenommen, dass die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems  $U_{MS}$  bzw. der Messprozess  $U_{MP}$  bekannt sind, obwohl deren Berechnung erst in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

Ein Messsystem bzw. Messprozess ist im Sinne des VDA Band 5 [40] geeignet, wenn gilt:

$$\text{Messsystem: } Q_{MS} \leq Q_{MS\_max} \quad \text{mit} \quad Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\%$$

Als Grenzwert für  $Q_{MS\_max}$  wird 15 % empfohlen.

$$\text{Messprozess: } Q_{MP} \leq Q_{MP\_max} \quad \text{mit} \quad Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{TOL} \cdot 100\%$$

Als Grenzwert für  $Q_{MP\_max}$  wird 30 % empfohlen.

Wie bereits oben erwähnt, ist es sinnvoll, vor der Untersuchung des gesamten Messprozesses zunächst die prinzipielle Eignung des Messsystems festzustellen. Dies ist weniger zeitaufwendig. Kennt man die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems und damit den Eignungskennwert, kann dieses Ergebnis in Bezug auf die Toleranz verallgemeinert werden.

In die Formel zur Bestimmung von  $Q_{MS}$  kann zunächst jede beliebige Toleranz (TOL) eingesetzt werden, zumal man bei der reinen Untersuchung des Messsystems die konkrete Toleranz, wie sie später beim Messprozess zum Tragen kommt, unter Umständen noch nicht kennt. Setzt man den empfohlenen Grenzwert für das Messsystem  $Q_{MS\_max} = 15\%$  in die Formel ein, so kann eine minimale Toleranz berechnet werden, bei der das Messsystem gerade noch geeignet ist.

Die minimale Toleranz für das Messsystem ergibt sich aus:

$$TOL_{\min\_MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS\_max}} \cdot 100\%$$

Das so untersuchte Messsystem kann, falls es sich für die Messaufgabe eignet, für mehrere Messprozesse eingesetzt werden. Bei einem konkreten Messprozess ist die Toleranz (TOL) bekannt. Ist diese größer als die bekannte minimale Toleranz des Messsystems, so kann das Messsystem für diesen Messprozess verwendet werden.

Mit dieser Vorgehensweise kann man unterschiedliche Messsysteme, und dies gilt insbesondere für Standardmessmittel, einzeln betrachten und die minimale Toleranz  $TOL_{\min\_MS}$  bestimmen. Damit ist eine Klassifizierung der Messsysteme mög-

lich. So können Messsysteme für bestimmte Messaufgaben bezüglich der minimalen Toleranz bestimmten Klassen zugeordnet werden. Ist eine konkrete Messaufgabe zu erfüllen, ist die jeweilige Toleranz bekannt. Aufgrund der Klassifizierung kann nun leicht entschieden werden, welches Messsystem für einen konkreten Messprozess prinzipiell verwendet werden kann.

Die minimale Toleranz für den Messprozess ergibt sich aus:

$$\text{TOL}_{\min\_MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{Q_{MP\_max}} \cdot 100\% \quad \text{für den Messprozess}$$

Als Grenzwert für  $Q_{MS\_max}$  wird im VDA Band 5 15 % und für  $Q_{MP\_max}$  30 % vorgeschlagen. Es handelt sich dabei um eine Empfehlung, die sicherlich nicht für alle Messprozesse verwendet werden kann. Daher ist im Einzelfall immer abzuwägen, ob die Grenzwerte sinnvoll sind oder nicht. Dies gilt insbesondere bei komplexeren Messprozessen oder sogenannten Sonderfällen, bei denen die Grenzwerte individuell festgelegt werden müssen.



**HINWEIS 1:** Bei der Festlegung der Grenzwerte hat man sich bezüglich der  $Q_{MP\_max} = 30\%$  und an dem maximalen Grenzwert für %GRR, wie er in der MSA [1] vorgegeben ist, orientiert. Wohl wissend, dass dies eine schärfere Forderung ist, da bei der Bestimmung von %GRR bei weitem nicht alle Einflusskomponenten berücksichtigt sind.



**HINWEIS 2:** Als Grenzwert für das Messsystem  $Q_{MS\_max}$  wird der halbe Wert vom Grenzwert des Messprozesses empfohlen. Dabei wird angenommen, dass 50% der Einflüsse vom Messsystem kommen und 50% von den restlichen Einflusskomponenten, die beim Messprozess wirken. Ob dies im Einzelfall zutreffend ist oder nicht, kann nicht zwangsläufig verallgemeinert werden. Daher könnte folgender Widerspruch eintreten:

Bei der Untersuchung des Messsystems ergibt sich ein  $Q_{MS}$ -Wert, der größer ist als  $Q_{MS\_max}$ . Sind bei einem konkreten Messprozess die Einflüsse der restlichen Komponenten auf die Messunsicherheit gering, so kann auch das nicht geeignete Messsystem in diesem Fall sehr wohl zu einem geeigneten Messprozess führen. In der Regel wird dies aber die Ausnahme sein, da die restlichen Komponenten des Messprozesses wie Bediener-, Objekt- oder Temperatureinfluss einen erheblichen Beitrag zur Messunsicherheit leisten.



**HINWEIS 3:** Auch wenn Grenzwerte nicht immer zutreffend und pauschal verwendet werden können, empfiehlt sich immer, unabhängig von der Anwendung, zunächst diese heranzuziehen. Erst wenn nach Verbesserungsmaßnahmen an Messsystem und Messprozess diese Grenzwerte nicht eingehalten werden können, sollte über Sonderregelungen nachgedacht und in bestimmten Fällen Ausnahmen zugelassen werden.

### 8.1.3 Bestimmung der Standardunsicherheiten

Die schwierigste Aufgabe bei der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit sowohl für Messsysteme als auch Messprozesse ist die Bestimmung der Standardunsicherheit für die jeweilige Einflusskomponente. Dazu sieht der GUM [23] prinzipiell zwei unterschiedliche Vorgehensweisen vor:

*Methode A:*

Es wird ein Versuch durchgeführt, bei dem die Auswirkung einer Einflusskomponente ermittelt wird. Basierend auf den Versuchsergebnissen wird für die jeweilige Einflusskomponente die dazugehörige Standardunsicherheit berechnet.

*Methode B:*

Für eine Einflusskomponente wird die jeweilige Standardunsicherheit theoretisch geschätzt. Dies können Erfahrungswerte von anderen oder ähnlichen Messprozessen sein:

- Erfahrungen oder allgemeine Kenntnisse über Verhalten und Eigenschaften der relevanten Materialien und Messgeräte (bauähnliche bzw. baugleiche Geräte)
- Überprüfbare Angaben des Herstellers
- Daten von Kalibrierscheinen und Zertifikaten



**HINWEIS:** Prinzipiell ist von der Vorgehensweise nach Methode B abzuraten, da insbesondere bei komplexeren Messaufgaben eine theoretische Abschätzung oft zu falschen Ergebnissen führt, da meistens unvermutete Einflüsse nicht ausreichend berücksichtigt werden, die bei Versuchen (Methode A) erkannt werden.

Bild 8.2 zeigt wesentliche Einflusskomponenten, die bei einem Messsystem bzw. dem gesamten Messprozess zum Tragen kommen. In Tabelle 8.1 sind die wesentlichen Einflusskomponenten mit der jeweiligen Standardunsicherheit und deren Bezeichnung mit Abkürzung dargestellt.

Die Berechnung der jeweiligen Standardunsicherheit kann mit folgenden allgemeingültigen Berechnungsformeln abgedeckt werden:

#### 1. Erweiterte Messunsicherheit bekannt

Ist die Erweiterte Messunsicherheit  $U$  für eine Komponente bekannt, kann die dazugehörige Standardunsicherheit  $u$  über die Formel

$$u = \frac{U}{k} \quad \text{mit } k = 2 \text{ bei einem Vertrauensniveau von } P = 95\%$$

bestimmt werden.

**Tabelle 8.1** Typische Einflussfaktoren mit zugeordneter Standardunsicherheit

		Typische Einflussfaktoren	Standardunsicherheit	
Messprozess uMP	Messsystem uMS	▪ Normal/Referenzteil	$U_{\text{CAL}}$	CAL = Reference
		▪ Auflösung	$U_{\text{RE}}$	RE = Resolution
		▪ systematische Messabweichung	$u_{\text{BI}}$	Bi = Bias
		▪ Wiederholbarkeit Normal	$u_{\text{EVR}}$	EVR = Equipment Variation Reference
		▪ Linearität	$u_{\text{LIN}}$	LIN = Linearity
		▪ weitere Einflüsse Messsystem	$u_{\text{MS\_REST}}$	= other influences measurement process
		▪ Wiederholbarkeit Prüfobjekt	$u_{\text{EVO}}$	EVO = Equipment Variation Object
		▪ Objekteinfluss	$u_{\text{OBJ}}$	OBJ = Object
		▪ Bedienerinfluss	$u_{\text{AV}}$	AV = Appraiser Variation
		▪ Messbeständigkeit	$U_{\text{STAB}}$	STAB = Stability
		▪ Temperatur	$U_{\text{T}}$	T = Temperature
		▪ weitere Einflüsse Messprozess	$u_{\text{REST}}$	= other influences measurement process

Es wird prinzipiell davon ausgegangen, dass die Fehlergrenzwerte der Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % entsprechen. Weicht bekanntermaßen die Überdeckungswahrscheinlichkeit der angegebenen Fehlergrenzen von  $P = 95\%$  ab, so ist dies entsprechend umzurechnen.

**BEISPIEL:****Erweiterte Messunsicherheit  $U_{\text{CAL}}$  aus Kalibrierschein**

Die Kalibrierunsicherheit wird im Prüfzertifikat für ein Referenzteil mit  $U_{\text{CAL}} = 1,6 \mu\text{m}$  bei ( $P = 95\%$ ) angegeben.

$$\text{Damit ist } u_{\text{CAL}} = \frac{U_{\text{CAL}}}{k} = \frac{1,6 \mu\text{m}}{2} = 0,8 \mu\text{m}$$

**2. Ermittlung der Standardunsicherheit aus Fehlergrenzwerten**

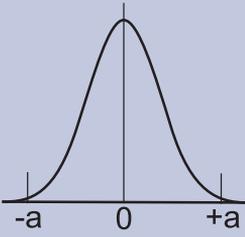
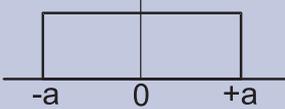
Bei dieser Berechnungsmethode ergibt sich die Standardunsicherheit  $u$  aus:

$$u = a \cdot b \text{ mit}$$

$a$  – Grenzwert (z.B. Fehlergrenze oder Auflösung des Messmittels)

$b$  – Transformationskoeffizient (s. Bild 8.3)

Voraussetzung für die Ermittlung von Standardunsicherheiten aus Grenzwerten ist die Kenntnis des Verteilungstyps. Typische Verteilungsformen für vorgegebene Grenzwerte sind in Bild 8.3 dargestellt. Kennt man die Verteilungsform nicht, sollte als Transformationskoeffizient die Rechteckverteilung (also  $b = \frac{1}{\sqrt{3}}$ ) verwendet werden.

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

**Bild 8.3** Bestimmung von Standardunsicherheiten Typ B aus Fehlergrenzwerten



#### BEISPIELE:

##### ▪ Standardunsicherheit der Auflösung $u_{RE}$

Die Skalenteilung (Auflösung) eines Messgerätes beträgt  $1 \mu\text{m}$ . Damit ist  $a = \frac{1}{2}$  Auflösung. Zur Abschätzung der Standardunsicherheit wird die Rechteckverteilung  $b = \frac{1}{\sqrt{3}}$  verwendet.

$$\text{Damit ist } u_{RE} = \frac{1}{2} \cdot \text{Auflösung} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2} \cdot 1 \mu\text{m} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,29 \mu\text{m}$$

##### ▪ Standardunsicherheit durch systematische Messabweichung $u_{BI}$

Aus Wiederholungsmessungen an einem Referenzteil ergibt sich eine systematische Messabweichung  $B_i$  (Bias) von  $B_i = |\bar{x}_g - x_m| = 1,5 \mu\text{m}$ . Zur Abschätzung der Standardunsicherheit wird die Rechteckverteilung verwendet.

Damit kann die Standardunsicherheit  $u_{BI}$  eingeschätzt werden

$$\text{mit } u_{BI} = 1,5 \mu\text{m} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,87 \mu\text{m}$$

##### ▪ Standardunsicherheit der Gerätetreue $u_{EVR}$

Aus einer Messwertreihe von z. B. 25 Wiederholungsmessungen an einem Referenzteil werden der Größt- ( $x_{max}$ ) und Kleinstwert ( $x_{min}$ ) bestimmt und daraus die Spannweite  $R = x_{max} - x_{min}$  berechnet. Die auszuwertenden Messwerte können als normalverteilt angesehen werden.

Ist die Spannweite  $R = 5,5 \mu\text{m}$ , kann die Standardunsicherheit für die Gerätetreue  $u_g$  abgeschätzt werden

$$\text{mit } u_{EVR} = 0,5 \cdot \frac{R}{2} = \frac{0,5 \cdot 5,5}{2} \approx 1,4 \mu\text{m}$$

▪ **Standardunsicherheit bei Standardmessmitteln  $u_{MPE}$**

Ist bei einem Standardmessmittel die Fehlergrenze ( $f_{ges}$ ) von der Kalibrierung des Messgeräts bekannt, kann die Standardunsicherheit über die Fehlergrenze abgeschätzt werden. Die Fehlergrenze eines Feinzeigers (Gesamtabweichungsspanne) wird mit  $f_{ges} = MPE = 1,2 \mu\text{m}$  angegeben. Dabei steht MPE für Maximum Permissible Error.

Der Berechnung der Standardunsicherheit  $u_{MS}$  wird die Rechteckverteilung zugrunde gelegt. Damit ist

$$u_{MS} = 1,2 \mu\text{m} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,7 \mu\text{m}$$



**HINWEIS:** Liegen keine konkreten Hinweise über die Verteilung vor, ist die Rechteckverteilung als sicherste Variante zu verwenden. Die u-Verteilung ist nur für Messräume relevant. Daher wird diese Verteilung für Messprozesse in der Fertigung nicht berücksichtigt.

### 3. Ermittlung der Standardunsicherheit über die Standardabweichung

Werden beispielsweise zur Bestimmung der Gerätestreuung Wiederholungsmessungen an einem Referenzteil mit bekanntem Nennmaß durchgeführt, erhält man eine Messwertreihe. Diese sollten mindestens 20 Werte umfassen.

Daraus können Mittelwert  $\bar{x}$  und Standardabweichung berechnet werden.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{mit } n = \text{Stichprobenumfang} \quad \text{und} \quad i = \text{Messwert}$$

und

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Die so errechnete Standardabweichung  $s$  ergibt die Standardunsicherheit  $u$  für die untersuchte Einflusskomponente. Ein Fallbeispiel ist in Kapitel 8.2.5 enthalten.

### 4. Ermittlung der Standardunsicherheit über die ANOVA-Methode

Insbesondere, wenn Versuche durchgeführt werden, bei denen zwei oder mehrere Einflussfaktoren gleichzeitig betrachtet werden, wird zur Berechnung der jeweiligen Standardunsicherheit die sogenannte ANOVA (Analysis of Variance) verwendet (s. Anhang 16.2). Ein typischer Anwendungsfall ist die Bestimmung der Standardunsicherheit aufgrund von Untersuchungen der Gesamtstreuung

am Prüfobjekt  $u_{EVO}$  und der Bedienerstreuung  $u_{AV}$ . Dazu sind Fallbeispiele in den Kapiteln 8.2.6 und 8.2.7 enthalten.

## ■ 8.2 Fallbeispiele Standardunsicherheit

Im Folgenden sind für die wesentlichen Einflusskomponenten (s. Bild 8.2) mehrere Fallbeispiele zur Bestimmung der jeweiligen Standardunsicherheit beschrieben.

### 8.2.1 Standardunsicherheit $u_{CAL}$

Die Unsicherheit des Normals bzw. eines Referenzteils wirkt sich erheblich auf den Messprozess aus. Die für die Einstellung bzw. kontinuierliche Überwachung eines Messgerätes erforderlichen Normale bzw. Referenzteile müssen kalibriert sein. Damit kann dem Kalibrierschein die Messunsicherheit  $U_{CAL}$  entnommen werden. Die Messunsicherheit wird in der Regel mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von  $P = 95\%$  angegeben.

Damit ist  $k = 2$  (s. Tabelle 16.5) und  $u_{CAL} = \frac{U_{CAL}}{2}$ .



**BEISPIEL:** Für ein verwendetes Normal ist im Kalibrierschein die erweiterte Messunsicherheit  $U_{CAL}$  mit  $U_{CAL} = 1\ \mu\text{m}$  angegeben. Mit  $k = 2$  ergibt sich die Standardunsicherheit  $u_{CAL}$ :

$$u_{CAL} = \frac{1\ \mu\text{m}}{2} = 0,5\ \mu\text{m}$$

### 8.2.2 Standardunsicherheit der Auflösung $u_{RE}$

Eine Sonderstellung bei der Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit nimmt das Thema Auflösung ein. Einerseits kann, wie für jede andere Einflusskomponente, die Standardunsicherheit  $u_{RE}$  berechnet werden. Ob diese bei der kombinierten Standardunsicherheit berücksichtigt wird oder nicht, ist in Kapitel 8.3 erläutert. Andererseits hat sich als sinnvoll erwiesen, vor einer Bestimmung der erweiterten Standardunsicherheit die Forderung  $\%RE \leq 5\%TOL$  zu bewerten. Das heißt, die Auflösung der verwendeten Messgeräte muss kleiner sein als 5% der beim Messprozess zum Tragen kommenden Spezifikation. Diese Überprüfung ist äußerst einfach. Ist diese Forderung nicht eingehalten, mit anderen Worten die

# Stichwortverzeichnis

## Symbole

-R Karte 86

## A

Annahmekriterien 2  
Annahmeprüfung 369  
ANOVA 87, 92, 102, 104, 106, 234  
Antastgeschwindigkeit 17  
Antastpunkte 17  
ARM-Methode 87, 104, 106  
attributive Prüfprozesse 121, 157  
Auflösung 44, 47, 291, 363, 370

## B

Bediener 20, 27  
Bedienereinfluss 34, 80, 104, 235  
Begriffe 363  
beobachtete Prozessstreuung 4  
Beschaffung 303  
Bezugsgröße 15, 102  
Bias 49

## C

$C_g$  56  
 $C_{gk}$  56  
chemische Analysen 290  
CNOMO 117

## D

Differenzenmethode 87, 102, 104  
Drehmoment 290  
Drei-Koordinaten-Meßgeräte 289  
Durchflussmesssysteme 290  
dynamische Messung 290

## E

Effektivität 128, 132, 146  
Eignung 3  
Eignungsnachweis 41, 360  
Einflussfaktoren 19  
Einflussgröße 3, 31, 37, 363  
einseitig 64  
Einstellmeister 44, 366  
Einstellnormale 21  
Einstellstücke 46  
Erschütterungen 17  
erweiterte Messunsicherheit 247, 259  
Erweiterte Methode 127  
Excel Tabelle 310

## F

Fähigkeitsindizes  $c_g$ ,  $c_{gk}$  41  
Fähigkeitsnachweis 362, 370  
Farbmesssysteme 290  
Fehlentscheidungen 38  
Fehlergrenzen 226  
Formtest 290

**G**

Geltungsbereich 369  
 Genauigkeit 2  
 Gerätestreuung 233  
 Gerätschaften 27  
 Gesamtstrebereich 41  
 Grafische Darstellung 82  
 Grenzwerte 64, 77, 97, 363

**H**

H0 Nullhypothese 77  
 H1 Alternativhypothese 77  
 Härteprüfung 289  
 Hierarchiestufe 44  
 Hilfsmittel 21, 23, 31, 53  
 Histogramm 84  
 Hitzetest 290  
 Hypothesen 128, 132

**I**

Internationales Normal 363

**J**

Justierung 363

**K**

K1, K2 und K3-Faktoren 14  
 Kalibrierung 363  
 Kältetest 290  
 Kodierung 129  
 Korrektur 363  
 Kreuztabelle 128, 133  
 kritische Werte 77

**L**

Lecktester 289  
 Lehrdorne 121  
 Lehre 21, 31, 53, 121  
 linear 247

Linearität 28, 44, 68, 70, 74, 242, 291,  
 365, 372, 385

**M**

Maßverkörperungen 21  
 Materialeigenschaften 20  
 Meisterteil 46  
 Merkmalstoleranz 71, 81  
 Messabweichung 24, 363  
 Messbereich 363  
 Messbeständigkeit 26, 30, 44, 107, 244,  
 369, 372, 376, 377, 391  
 Messgenauigkeit 363  
 Messgerät 21, 53, 364  
 Messgerätedrift 363  
 Messgerätegenauigkeit 36  
 Messgröße 363  
 Messkette 366  
 Messlabor 117  
 Messmethodik 31  
 Messmittel 363, 365  
 Messprozess 366  
 Messstrategie 20  
 Messsystem 2, 366  
 Messsystemstreuung 80  
 Messunsicherheit 4, 10, 24, 361, 363  
 minimale Toleranz 63  
 Mittelwert-Spannweiten-Methode 87  
 Mittelwert-Standardabweichungs-  
 methode 87, 92, 107

**N**

Nationales Normal 363  
 nicht geeignete Messprozesse 291  
 nicht linear 29  
 Nicht-Übereinstimmung 39  
 Normal 21, 31, 42, 44, 49, 53, 71, 229, 291,  
 366  
 Normen 1  
 nullbegrenzt 66

**O**

Oberflächenmessung 289  
objektive Prüfung 20  
optische Kompensatoren 289

**P**

Parallelendmaß 18  
Partikelzählung 290  
Prozentstreuung 59  
Prozess 19  
prozessbezogen 60, 61, 119  
Prozessstreuung 71, 81  
Prozesssteuerung 79, 98  
prozessstreuungsbezogen 62  
Prüfen 20  
Prüfer 31, 42  
prüferbezogen 83  
Prüfmittelfähigkeit 1, 4, 10, 15, 41  
Prüfobjekt 20, 104, 235  
Prüfprozess 1, 19, 220  
Prüfprozesseignung 1, 289, 295  
Prüfsoftware 307

**Q**

quadratisch 247  
Qualitätsaudit 363  
Qualitätsfähigkeitskenngröße 7, 56

**R**

Rechnersoftware 307  
Referenzbedingungen 363  
Referenzmaterial 363  
Referenzteil 42, 71, 229  
Referenzwert 26, 49  
Repeatability 15, 80  
Reproducibility 15, 80  
Richtlinien 1, 359  
Rückführbarkeit 363  
Rückverfolgbarkeit 363

**S**

Sauberkeitsanalyse 33  
Schichtdicke 290  
Schwingungen 17  
Shewhart-Qualitätsregelkarte 392  
Short Method 122, 124  
Sichtprüfer 300  
Sichtprüfung 299  
Signalerkennung 128, 132, 151  
Software 31  
Sonderfall 289  
Spannweite 104  
Spannweitenmethode 78  
Spezifikationsbereich 39  
Stabilität 26, 30, 108, 244, 291, 369, 372, 391  
Stabilitätsüberwachung 108  
Standardmessmittel 232  
Standardunsicherheitskomponenten 229  
Streubereich 58  
subjektive Prüfung 20  
systematische Messabweichung 25, 26, 49, 76, 230, 291, 363

**T**

tatsächliche Prozessstreuung 4  
Teilestreuung 85, 86, 99, 235  
Temperatur 15  
Temperatureinfluss 16  
Toleranz 79, 101  
toleranzbezogen 60, 61, 62, 120  
t-Test 49, 77

**U**

Überdeckungswahrscheinlichkeit 14, 226  
Übereinstimmung 38  
Überwachung 369  
Umgebungsbedingungen 31  
Umwelt 20, 53  
Unsicherheitsbereich 39  
Unsicherheitsbudget 258  
Urwerte 391

**V**

Varianzanalyse 87  
Verfahren 1 41, 42, 52, 370, 374  
Verfahren 2 41, 80, 371, 378  
Verfahren 3 41, 104, 371, 382  
Verfahren 4 112  
Verfahren 5 115  
Vergleichspräzision 15, 27, 41, 291, 368  
Verschiebung 29  
Verschleiß 30  
Verstärkung 29  
Verteilungsformen 226  
Vertrauensbereich 64  
Verunreinigungen 17  
Vorrichtung 31

**W**

wahrer Wert 25  
Wahrscheinlichkeitsnetz 84  
Wechselwirkungen 264  
Wertestrahle 84  
Werteverlauf 83, 84  
Wiederholpräzision 15, 26, 27, 35, 41, 291,  
367  
Wuchtmaschinen 290

**Z**

Zerstörende Prüfungen 290  
zufällige Messabweichung 26, 364  
Zupaarungsvorgänge 290