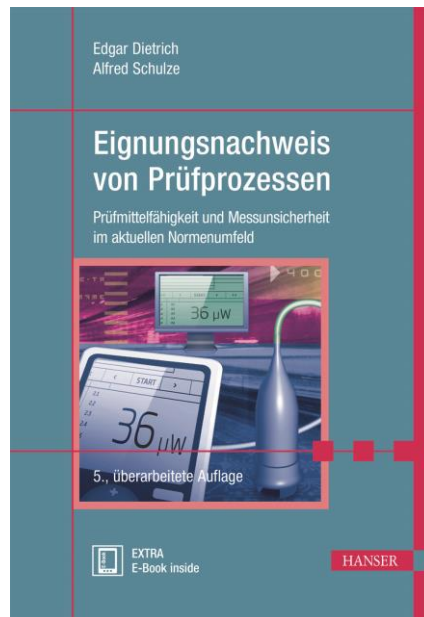


HANSER



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

Vorwort	V
1 Prüfprozesseignung	1
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
2 Definitionen und Begriffe	19
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

3	Einflussgrößen auf den Messprozess	31
3.1	Typische Einflussgrößen	31
3.2	Auswirkung der Einflussgrößen beim Messsystem	34
3.3	Bewertung des Messprozesses	37
4	Prüfmittelfähigkeit als Eignungsnachweis für Messprozesse	41
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 Bedienereinfluss	80
4.3.2.1	Numerische Auswertung der Versuchsdaten	88
4.3.3	Verfahren 3: %GRR ohne Bedienereinfluss	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
5	Eignungsnachweis von attributiven Prüfprozessen	121
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
6	Anmerkungen zur MSA 4th Edition	157
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
7	Erweiterte Messunsicherheit als Eignungsnachweis für Messprozesse	175
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
8	Erweiterte Messunsicherheit nach ISO 22514-7 bzw. VDA 5 ...	219
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_{OBJ}	235
8.2.9	Standardunsicherheit durch Temperatureinfluss u_{T}	238
8.2.10	Standardunsicherheit durch Linearitätsabweichungen u_{LIN}	242
8.2.11	Standardunsicherheit durch Stabilität u_{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
9	Vergleich Firmenrichtlinien, MSA mit VDA 5 bzw. ISO 22514-7	273
10	Vereinfachte Bestimmung der Messunsicherheit	279
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
11	Sonderfälle bei der Prüfprozesseignung	289
11.1	Was ist ein Sonderfall?	289
11.2	Typische Sonderfälle	289
12	Umgang mit nicht geeigneten Messprozessen	291
12.1	Vorgehensweise zur Verbesserung von Prüfprozessen	291
13	Typische Fragen zur Prüfprozesseignung	295
13.1	Fragestellung	295
13.2	Antworten	295

14 Eignungsnachweis bei der Sichtprüfung	299
14.1 Anforderungen an die Sichtprüfung	299
14.2 Eignungstest für Sichtprüfer	300
15 Beschaffung von Prüfmitteln	303
15.1 Beispiel für Messaufgabenbeschreibung	304
15.2 Beispiel für Lastenheft	305
16 Eignungsnachweis für Prüfsoftware	307
16.1 Allgemeine Betrachtung	307
16.2 Das Märchen von der „Excel Tabelle“	310
16.3 Testbeispiele zur Prüfmittelfähigkeit	313
17 Anhang	327
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
Leitfaden zum „Fähigkeitsnachweis von Messsystemen“	359
Musterdokumentation	395
GM Powertrain	395
Bosch	395
Daimler	395
Ford Motor Co.	395
Stichwortverzeichnis	641

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. Erfolgen 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

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.

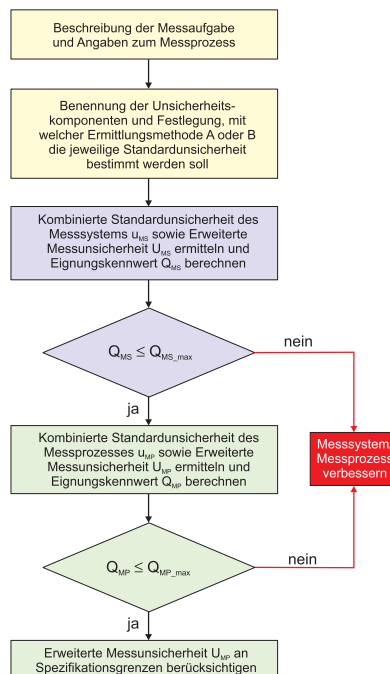


Bild 8.1 Ablauf bei der Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit

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.

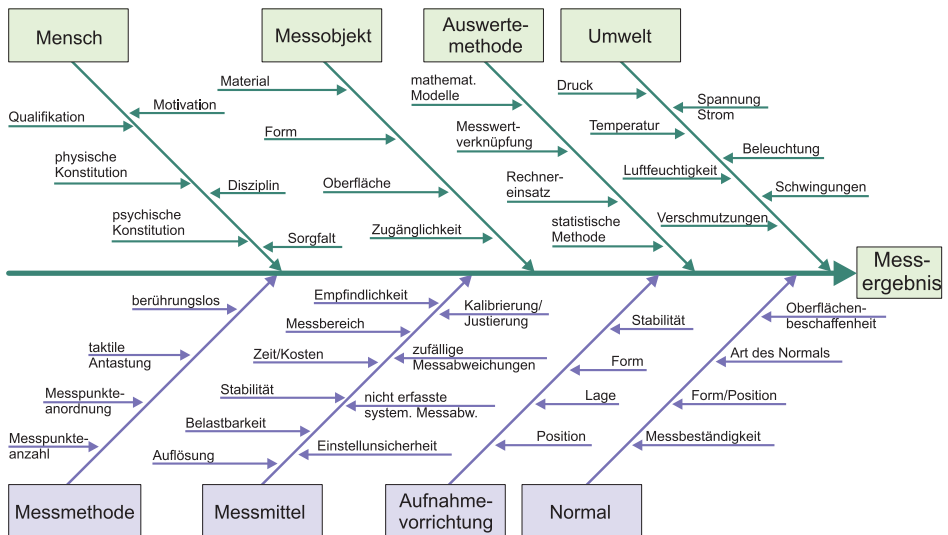


Bild 8.2 Wichtige Einflüsse auf die Unsicherheit von Messergebnissen
Quelle: VDA 5 Prüfprozesseignung

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:

$$TOL_{\min_MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{Q_{MP_max}} \cdot 100\% \quad \text{für den Messprozess}$$

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 _{CAL}	CAL	= Reference
		▪ Auflösung	U _{RE}	RE	= Resolution
		▪ systematische Messabweichung	u _{BI}	Bi	= Bias
		▪ Wiederholbarkeit Normal	u _{EVR}	EVR	= Equipment Variation Reference
		▪ Linearität	u _{LIN}	LIN	= Linearity
		▪ weitere Einflüsse Messsystem	u _{MS_REST}	= other influences measurement process	
		▪ Wiederholbarkeit Prüfobjekt	u _{EVO}	EVO	= Equipment Variation Object
		▪ Objekteinfluss	u _{OBJ}	OBJ	= Object
		▪ Bedienereinfluss	u _{AV}	AV	= Appraiser Variation
		▪ Messbeständigkeit	U _{STAB}	STAB	= Stability
		▪ Temperatur	U _T	T	= Temperature
		▪ weitere Einflüsse Messprozess	u _{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_{CAL} aus Kalibrierschein

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

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

2. Ermittlung der Standardunsicherheit aus Fehlergrenzwerten

Bei dieser Berechnungsmethode ergibt sich die Standardunsicherheit u aus:

u = a · b 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.

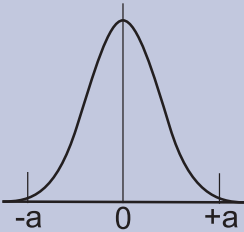
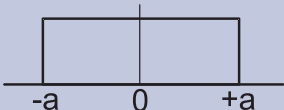
Verteilung	Schema	Transformationskoeffizient b	Standardunsicherheit $u(x_B)$ nach VDA Band 5
Normalverteilung		0,5	$u(x_B) = 0,5 \cdot a$
Rechteckverteilung		$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$u(x_B) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot a$

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 Gerätestreuung 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 Gerätestreuung 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 $f_{ges} = MPE = 1,2 \mu m$ angegeben. Dabei steht MPE für Maximum Permissible Error.

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

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



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 $u_{\text{CAL}} = \frac{U_{\text{CAL}}}{2}$.



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

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

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