



Leseprobe

zu

Eignungsnachweis von Mess- und Prüfprozessen

von Edgar Dietrich und Stephan Conrad

Print-ISBN: 978-3-446-47698-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-47888-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476981>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

| | |
|--|-------------|
| Vorwort | XIII |
| 1 Mess- und Prüfprozesseignung | 1 |
| 1.1 Warum Mess- und Prüfprozesseignung? | 1 |
| 1.2 Historischer Rückblick und Ausblick | 13 |
| 1.2.1 Entwicklung „Messsystemanalyse und -fähigkeit“ | 14 |
| 1.2.2 Entwicklung „Prüfprozesseignung“ | 17 |
| 1.3 Anmerkung der Autoren zu MSA und VDA 5 | 18 |
| 1.4 Experimentelle Beurteilung | 21 |
| 2 Definitionen und Begriffe | 25 |
| 2.1 Prozess | 25 |
| 2.2 Messprozess | 25 |
| 2.3 Prüfen | 26 |
| 2.4 Mess- und Prüfmittel | 27 |
| 2.5 Messabweichungen und Messunsicherheit | 30 |
| 2.5.1 Messabweichungen | 30 |
| 2.5.1.1 Systematische Messabweichungen | 31 |
| 2.5.1.2 Zufällige Messabweichungen | 32 |
| 2.5.2 Messergebnis | 32 |
| 2.5.3 Wiederholpräzision | 33 |
| 2.5.4 Vergleichpräzision | 33 |
| 2.5.5 Linearität | 34 |
| 2.5.6 Stabilität/Messbeständigkeit | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Einflussgrößen auf den Messprozess | 39 |
| 3.1 | Typische Einflussgrößen | 39 |
| 3.2 | Auswirkung der Einflussgrößen beim Messsystem | 42 |
| 3.3 | Bewertung des Messprozesses | 44 |
| 4 | Messsystemfähigkeit als Eignungsnachweis für Messprozesse | 49 |
| 4.1 | Grundlegende Verfahren und Vorgehensweise | 49 |
| 4.2 | Messsystembezogene Verfahren | 53 |
| 4.2.1 | Unsicherheit des Normals/Einstellmeister | 53 |
| 4.2.2 | Einfluss der Auflösung | 56 |
| 4.2.3 | Beurteilung der systematischen Messabweichung | 59 |
| 4.2.4 | Verfahren 1 | 63 |
| 4.2.5 | Qualitätsfähigkeitskenngrößen C_g und C_{gk} | 67 |
| 4.2.6 | Verfahren 1 für einseitig begrenzte Merkmale | 77 |
| 4.2.7 | Verfahren 1 für mehrere Merkmale | 79 |
| 4.2.8 | Linearität | 80 |
| 4.2.8.1 | Begriffserklärung „Linearität“ | 81 |
| 4.2.8.2 | Durchführung der Linearitätsuntersuchung | 83 |
| 4.3 | Messprozessbezogene Verfahren | 92 |
| 4.3.1 | Spannweitenmethode (Short-Range-Methode) | 92 |
| 4.3.2 | Verfahren 2: %GRR mit Bedienerinfluss | 94 |
| 4.3.2.1 | Durchführung der Verfahren | 94 |
| 4.3.2.2 | Grafische Darstellung der Ergebnisse | 96 |
| 4.3.2.3 | Numerische Auswertung der Versuchsdaten | 103 |
| 4.3.3 | Verfahren 3: %GRR ohne Bedienerinfluss | 121 |
| 4.4 | Überprüfung der Messbeständigkeit | 123 |
| 4.5 | Weitere Verfahren | 128 |
| 4.5.1 | Verfahren 4 nach Ford EU 1880 | 128 |
| 4.5.2 | Verfahren 5 nach Ford EU 1880 | 131 |
| 4.6 | Vorgehensweise nach CNOMO | 133 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | Eignungsnachweis von attributiven Prüfprozessen | 137 |
| 5.1 | Lehren | 137 |
| 5.2 | Lehren oder Messen | 138 |
| 5.3 | Voraussetzungen für eine erfolgreiche attributive Prüfung | 139 |
| 5.4 | Untersuchung von attributiven Prüfprozessen | 140 |
| 5.4.1 | Einleitung | 140 |
| 5.4.2 | Testen von Hypothesen (Cohens Kappa) | 146 |
| 5.4.3 | Kappa-Koeffizient nach Fleiss | 152 |
| 5.4.4 | Beurteilung der Effektivität eines attributiven Prüfsystems ... | 160 |
| 5.4.4.1 | Effektivität bei einem Prüfer ohne Referenz-Vergleich | 161 |
| 5.4.4.2 | Effektivität bei einem Prüfer mit Referenz-Vergleich | 163 |
| 5.4.4.3 | Effektivität bei allen Prüfern ohne Referenz-Vergleich | 164 |
| 5.4.4.4 | Effektivität bei allen Prüfern mit Referenz-Vergleich | 164 |
| 5.4.5 | Methode der Signalerkennung | 165 |
| 5.4.6 | Bewertung von attributiven Prüfprozessen mithilfe der „Short Method“ | 170 |
| 6 | Erweiterte Messunsicherheit als Eignungsnachweis für Messprozesse | 173 |
| 6.1 | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement | 173 |
| 6.1.1 | Grundlagen | 174 |
| 6.1.2 | Zielsetzung und Zweck des GUM | 175 |
| 6.1.3 | Anwendungsbereich | 176 |
| 6.1.4 | Der Inhalt des Leitfadens | 177 |
| 6.1.5 | Definitionen und Begriffe | 178 |
| 6.2 | Ermittlung von Messunsicherheiten | 182 |
| 6.2.1 | Ermittlung der Standardunsicherheit | 183 |
| 6.2.2 | Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit | 189 |
| 6.2.3 | Ermittlung der erweiterten Unsicherheit | 191 |
| 6.2.4 | Protokollierung der Unsicherheit | 194 |
| 6.2.5 | Angabe des Ergebnisses | 195 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.3 | Beispiel GUM H.1 Endmaß-Kalibrierung | 195 |
| 6.3.1 | Messaufgabe | 196 |
| 6.3.2 | Standardunsicherheiten | 196 |
| 6.3.2.1 | Unsicherheit $u(l_s)$ der Kalibrierung des Normals | 197 |
| 6.3.2.2 | Unsicherheit $u(d)$ der gemessenen Längendifferenz .. | 197 |
| 6.3.2.3 | Unsicherheit $u(\alpha_s)$ des Wärmeausdehnungs- koeffizienten | 199 |
| 6.3.2.4 | Unsicherheit $u(\Theta)$ der Temperaturabweichung des Endmaßes | 199 |
| 6.3.2.5 | Unsicherheit $u(\delta\alpha)$ der Differenz der Ausdehnungskoeffizienten | 200 |
| 6.3.2.6 | Unsicherheit $u(\delta\Theta)$ der Temperaturdifferenz der Maße | 201 |
| 6.3.2.7 | Kombinierte Standardunsicherheit | 201 |
| 6.4 | Kalibrierung eines Gewichtsstückes mit dem Nennwert 10 kg (S2) ... | 204 |
| 6.4.1 | Messaufgabe | 204 |
| 6.4.2 | Standardunsicherheiten | 204 |
| 6.4.3 | Erweiterte Messunsicherheit und vollständiges Messergebnis | 207 |
| 6.5 | Kalibrierung eines Messschiebers | 208 |
| 6.5.1 | Messaufgabe | 209 |
| 6.5.2 | Standardmessunsicherheiten | 209 |
| 6.5.3 | Erweiterte Messunsicherheit und vollständiges Messergebnis | 212 |
| 6.6 | Interpretation des GUM für Mess- und Prüfprozesse in der Serienfertigung | 215 |
| 7 | Eignungsnachweis und erweiterte Messunsicherheit nach ISO 22514-7 und VDA Band 5 | 217 |
| 7.1 | Ablaufschema | 217 |
| 7.1.1 | Schematisierte Vorgehensweise | 220 |
| 7.1.2 | Eignungskennwerte und kleinste messbare Toleranz | 223 |
| 7.1.3 | Bestimmung der Standardunsicherheiten | 224 |
| 7.2 | Fallbeispiele Standardunsicherheit | 229 |
| 7.2.1 | Standardunsicherheit aus der Kalibrierkette u_{CAL} | 229 |
| 7.2.2 | Standardunsicherheit aus der Auflösung u_{RE} | 229 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7.2.3 | Standardunsicherheit aus der systematischen Restabweichung u_{BI} | 230 |
| 7.2.4 | Standardunsicherheit u_{MS} bei Standardmessmittel | 232 |
| 7.2.5 | Standardunsicherheit aus der Wiederholbarkeit am Referenzteil u_{EVR} | 233 |
| 7.2.6 | Standardunsicherheit aus der Wiederholbarkeit am Objekt u_{EVO} | 234 |
| 7.2.7 | Standardunsicherheit aus der Vergleichbarkeit der Bediener u_{AV} | 235 |
| 7.2.8 | Standardunsicherheit aus der Inhomogenität des Messobjekts u_{OBJ} | 236 |
| 7.2.9 | Standardunsicherheit aus dem Temperatureinfluss u_{TEMP} | 240 |
| 7.2.10 | Standardunsicherheit aus Linearitätsabweichungen u_{LIN} | 243 |
| 7.2.11 | Standardunsicherheit aus der Stabilität u_{STAB} | 246 |
| 7.3 | Mehrfachberücksichtigung von Unsicherheitskomponenten | 248 |
| 7.4 | Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit | 249 |
| 7.5 | Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit an den Spezifikationsgrenzen | 249 |
| 7.6 | Fallbeispiele | 251 |
| 7.6.1 | Längenmessung mit einem Standardmessmittel | 251 |
| 7.6.1.1 | Beurteilung des Messsystems | 251 |
| 7.6.1.2 | Beurteilung und Nachweis der Messprozesseignung | 253 |
| 7.6.2 | Längenmessung mit speziellem Messmittel | 258 |
| 8 | Vergleich Firmenrichtlinien, AIAG MSA und VDA 5 bzw. ISO 225 14-7 | 265 |
| 9 | Sonderfälle bei der Mess- und Prüfprozesseignung | 275 |
| 9.1 | Was ist ein Sonderfall? | 275 |
| 9.2 | Typische Sonderfälle | 275 |
| 9.3 | Umgang mit Sonderfällen | 276 |
| 10 | Umgang mit nicht geeigneten Messsystemen und Messprozessen | 281 |
| 10.1 | Vorbemerkungen | 281 |
| 10.2 | Vorgehensweisen nach AIAG MSA | 283 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10.3 | Vorgehensweise nach Bosch Heft 10 | 284 |
| 10.4 | Vorgehensweise nach VDA Band 5 | 286 |
| 10.4.1 | Optimierung des Messsystems | 287 |
| 10.4.2 | Optimierung des Messprozesses | 288 |
| 10.4.3 | Neubeschaffung eines Messsystems | 289 |
| 10.4.4 | Risikoanalyse mit bedingter Freigabe | 289 |
| 10.4.5 | Neubewertung der Grenzwerte | 290 |
| 10.4.6 | Merkmals- und Toleranzbetrachtung | 290 |
| 10.4.7 | Sonderregelungen nach VDA 5 | 291 |
| 10.4.7.1 | Fine Tolerances-Regelung (FT-Regelung) | 291 |
| 10.4.7.2 | Verringerung der Messunsicherheit durch Mehrfachmessung | 295 |
| 11 | Typische Fragen zur Mess- und Prüfprozesseignung | 299 |
| 11.1 | Fragestellung | 299 |
| 11.2 | Antworten | 300 |
| 12 | Eignungsnachweis bei der Sichtprüfung | 303 |
| 12.1 | Anforderungen an die Sichtprüfung | 303 |
| 12.2 | Eignungstest für Sichtprüfer | 304 |
| 13 | Beschaffung von Prüfmitteln | 309 |
| 13.1 | Beispiel für Messaufgabenbeschreibung | 311 |
| 13.2 | Beispiel für Lastenheft | 312 |
| 14 | Eignungsnachweis für Mess- und Prüfsoftware | 313 |
| 14.1 | Allgemeine Betrachtung | 313 |
| 14.2 | Das Märchen von der „Excel-Tabelle“ | 318 |
| 14.3 | Testbeispiele | 320 |
| 15 | Anhang | 337 |
| 15.1 | Tabellen | 337 |
| 15.1.1 | d_2^* -Tabelle zur Bestimmung der K-Faktoren und Freiheitsgrade für t-Werte | 337 |
| 15.1.2 | k-Faktoren zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit | 340 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 15.2 | Auswirkung des Messprozesses auf die Prozessfähigkeit | 341 |
| 15.3 | Modelle der Varianzanalyse | 342 |
| 15.3.1 | Messsystemanalyse – Verfahren 2 | 342 |
| 15.3.2 | Messsystemanalyse – Verfahren 3 | 348 |
| 15.4 | Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen | 351 |
| 15.5 | Formeln | 354 |
| 15.6 | Literaturverzeichnis | 356 |
| | Leitfaden zum „Fähigkeitsnachweis von Messsystemen“ | 361 |
| | Index | 395 |



Der Verlag und die Autoren haben sich mit der Problematik einer gendergerechten Sprache intensiv beschäftigt. Um eine optimale Lesbarkeit und Verständlichkeit sicherzustellen, wird in diesem Werk auf Gendersternchen und sonstige Varianten verzichtet; diese Entscheidung basiert auf der Empfehlung des Rates für deutsche Rechtschreibung. Grundsätzlich respektieren der Verlag und die Autoren alle Menschen unabhängig von ihrem Geschlecht, ihrer Sexualität, ihrer Hautfarbe, ihrer Herkunft und ihrer nationalen Zugehörigkeit.

Vorwort

Das Ergebnis einer Messung wird als Messergebnis bezeichnet. Das vollständige Messergebnis besteht aus dem ermittelten Messwert und der Unsicherheit des Messergebnisses. Bevor Messergebnisse weiterverarbeitet werden, um darauf basierend Bewertungen von Merkmalen oder Eigenschaften eines Produktes oder Prozesses vorzunehmen, ist die Unsicherheit des Messprozesses für die jeweilige Aufgabenstellung zu bestimmen. Alternativ kann auch nachgewiesen werden, dass die Unsicherheit bei der jeweiligen Messung vernachlässigbar klein ist. Erfolgen diese Nachweise nicht, ist die in jedem Messergebnis enthaltene Unsicherheit nicht bekannt. Diese Unsicherheit überträgt sich konsequenterweise auf jede darauf aufbauende Beurteilung.

Eine mit den Messergebnissen durchgeführte Bewertung, ob ein Maß innerhalb der geforderten Toleranz liegt, also den Spezifikationen entspricht, nennt man (Konformitäts-)Prüfung. Eine solche Prüfung kann auch durch subjektive Bewertungen oder den Vergleich mit Maßverkörperungen, sogenannten Lehren, durchgeführt werden. Bei der Verwendung von Messwerten spricht man von quantitativen (variablen) Prüfungen, bei subjektiven oder auf Lehren basierenden Bewertungen spricht man von qualitativen (attributiven) Prüfungen.

Für eine ganzheitliche Beurteilung müssen alle relevanten Einflüsse beinhaltet sein, die bei einer Messung zum Tragen kommen. Daher spricht man von einem Messprozess. Folgt auf die Messung oder alternativ auf die qualitative Bewertung ein Prüfscheid, so spricht man vom Prüfprozess.

Anhand einer Risikoabschätzung ist zu bewerten, ob eine Unsicherheit ermittelt werden muss und, wenn ja, inwieweit die ermittelte Unsicherheit bei jedem Mess- oder Prüfprozess noch vertretbar ist. Für diese Beurteilung werden sogenannte Eignungsnachweise bzw. Fähigkeitsuntersuchungen durchgeführt, die in dem vorliegenden Buch näher beschrieben sind. Auch bei qualitativen Prüfungen muss konsequenterweise die Eignung bzw. Fähigkeit des Prüfprozesses nachgewiesen werden, wobei hier oftmals keine Unsicherheit berechnet werden kann.

Im Laufe der Jahre haben sich unterschiedliche Vorgehensweisen herauskristallisiert, um Messunsicherheiten zu berechnen und die Eignung bzw. Fähigkeit von

Mess- und Prüfprozessen nachzuweisen. Die sicherlich umfassendste und präziseste Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit ist in dem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM (ISO 2008)) beschrieben. Aufgrund der Komplexität vieler industrieller Messprozesse, insbesondere, wenn diese in der Fertigung bzw. in der Produktion eingesetzt werden, kommt diese Betrachtungsweise in der Praxis selten zum Tragen. Darüber hinaus besteht der Guide darauf, aus der ermittelten Messunsicherheit keine Handlungsanweisung abzuleiten, also auch keinen Nachweis der Eignung. Dazu wird auf weiterführende und gegebenenfalls noch zu entwickelnde Publikationen verwiesen. Allerdings ist der GUM die Basis für vereinfachte und damit praxisrelevantere Vorgehensweisen.

Erste Richtlinien zur Durchführung von Fähigkeitsuntersuchungen wurden Ende der 80er-Jahre von GM (General Motors Co. – GM Powertrain 2010) und Ford (Ford Motor Co. 1988) erstmalig veröffentlicht. Es folgte in Deutschland das Bosch Heft 10 (Robert Bosch GmbH 2019). Anfang der 90er-Jahre wurde in den USA von der AIAG Automotive Industry Action Group der heute sicherlich am weitesten verbreitete Leitfaden MSA „Measurement System Analysis“ (AIAG 2010) veröffentlicht. Bei diesen Papieren steht die Messunsicherheit eines vollständigen Messprozesses nicht im Fokus. Vielmehr wird versucht, einzelne Unsicherheitseinflüsse durch verschiedene Verfahren oder Studien zu bewerten. Spätestens nach der Erstveröffentlichung der ISO 14253 (DIN 2018) im Jahre 1999 entstand dadurch das Problem, dass eine Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Konformitätsprüfung nicht möglich war.

Vom Verband der Deutschen Automobilindustrie (VDA) wurde deshalb der Band 5 „Mess- und Prüfprozesse, Eignung, Planung und Management“ (VDA 2021) herausgegeben. Diese Verbands- und Firmenrichtlinien werden aufgrund neuer Erkenntnisse kontinuierlich weiterentwickelt und in neuen Versionen publiziert. Basierend auf dem VDA Band 5 wurde 2012 seitens der ISO International Standard Organization die Norm ISO 22514-7 „Capability of Measurement Processes“ (ISO 2021) veröffentlicht.

Der VDA Band 5 und die ISO 22514-7 orientieren sich vornehmlich an GUM und geben praxisrelevante Hilfestellungen, wie für die jeweiligen Mess- und Prüfprozesse die Messunsicherheit bestimmt werden kann. Die Eignung eines Messprozesses wird dabei anhand des Verhältnisses „Messunsicherheit zu einer vorgegebenen Spezifikation“ bewertet.

Die Eignungsnachweise bzw. Fähigkeitsuntersuchungen dieser Papiere können als Standardverfahren bezeichnet werden, die bei vielen Messprozessen angewandt werden können. Allerdings gibt es in der Praxis auch Messprozesse, bei denen diese Vorgehensweisen nicht direkt umgesetzt werden können. Meist handelt es sich dabei um nicht wiederholbare Messprozesse oder Messprozesse ohne adäquate Referenzmaterialien (Normalen). Dann spricht man oftmals von Sonderfäl-

len oder speziellen Mess- oder Prüfverfahren. Aber auch für diese Art von Messprozessen müssen Eignungsnachweise durchgeführt werden, selbst wenn sich diese schwierig gestalten, oder es muss zumindest das Risiko für fehlerhafte Bewertungen abgeschätzt werden. Die Vorgehensweisen für alle denkbaren Anwendungen zu beschreiben, würde den Rahmen des Buches sprengen. Allerdings können die hier beschriebenen Standardverfahren für diese Sonder- und Spezialfälle durchaus Anregungen und Hilfestellungen geben. Als weiterführende Literatur sei auf das „Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion“ (Schmitt, Dietrich 2023) verwiesen, in dem verschiedene Autoren messtechnische Spezialfälle darstellen und diskutieren.

Weinheim, Januar 2024

Die Autoren

1

Mess- und Prüfprozesseignung

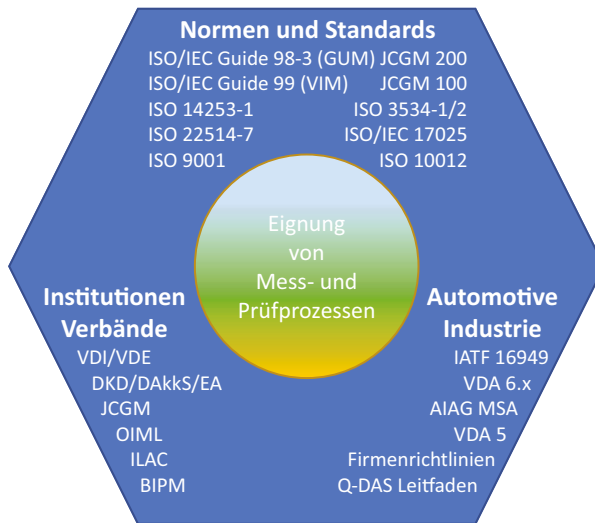
■ 1.1 Warum Mess- und Prüfprozesseignung?

Diese Frage kann mit einem plakativen Satz beantwortet werden: „Man kann nur so genau fertigen, wie man messen kann!“ Auch wenn vielfach der Hinweis gegeben wird, dass die Fertigung heutzutage eine sehr hohe Qualität hat, angeblich auch höher als die der Messprozesse, gleicht das einer Fahrt im Nebel mit überhöhter Geschwindigkeit und dem Hinweis, dass auch gestern niemand aus der Vorfahrtsstraße rechts kam. Nachhaltige Qualität muss messbar und bewertbar sein. Daraus leitet sich die technische Notwendigkeit ab, dass für die korrekte Beurteilung von Prozessen in der Fertigung und Produktion geeignete Mess- und Prüfprozesse zur Verfügung stehen müssen. Die mit dem Messprozess ermittelten Messwerte sind die Grundlage der Beurteilung von realen Sachverhalten und müssen diese ausreichend sicher widerspiegeln. Ein nicht geeigneter Messprozess verwischt die Realität und lässt keine sicheren Rückschlüsse zu.

Daher gilt es zunächst die Frage zu beantworten: „Was versteht man unter einem geeigneten Mess- und Prüfprozess?“. Hierzu gibt es mehrere Normen, Leitfäden und Richtlinien (s. Bild 1.1), die nicht nur den Eignungsnachweis fordern, sondern auch Vorgehensweisen aufzeigen, wie dieser durchgeführt werden kann.

So fordert IATF 16949:2016 (IATF, VDA 2016) für die Beurteilung von Messsystemen:

„Für alle im Produktionslenkungsplan festgelegten Arten von Prüfungen, Messungen und für alle darin aufgeführten Prüf- und Messsysteme muss die Prüfprozesseignung verifiziert werden (Messsystemanalysen zur Bewertung der Streuung der Prüf- und Messergebnisse). Die angewendeten Methoden und Annahmekriterien müssen denen in den Referenzhandbüchern für die Beurteilung von Messsystemen entsprechen. Andere analytische Methoden und Annahmekriterien dürfen mit Genehmigung des Kunden angewendet werden.“

**Bild 1.1**

Wichtige Normen und Richtlinien im Zusammenhang mit der Prüfprozesseignung

Die Aussage, dass andere Methoden mit Genehmigung des Kunden zulässig sind, ist für viele Lieferanten allerdings nicht relevant, da in der Regel spezielle Einzelvereinbarungen nicht mit allen Kunden getroffen werden können. Darüber hinaus müssen diese Methoden dann auch validiert werden, was wiederum einen nicht zu unterschätzenden Aufwand bedeutet. Daher bleibt für die Zertifizierung des QM-Systems im Allgemeinen nur die Möglichkeit, bekannte Standards (z. B. (AIAG 2010) oder (VDA 2021)) als Grundlage heranzuziehen.

In Abschnitt 1.2 „Historischer Rückblick und Ausblick“ sind die Zusammenhänge und die Entwicklung der einzelnen Dokumente nochmals verdeutlicht. Die Abnahme von Maschinen und Fertigungseinrichtungen, die Beurteilung von Prozessen und Produkten oder die kontinuierliche Prozessüberwachung erfolgt anhand der Beurteilung von qualitativen und quantitativen Produktmerkmalen. Schwerpunkt der Untersuchungen sind quantitative bzw. variable Merkmale. Nichtsdestotrotz werden in einem späteren Abschnitt Eignungsnachweise für qualitative bzw. attributive Merkmale behandelt.

Bei quantitativen Merkmalen werden mithilfe von Messsystemen für die Merkmale der gefertigten Werkstücke bzw. die Prozessparameter Messwerte ermittelt. Dazu sind aufgabenbezogene Messsysteme, spezielle Sensoren oder handelsübliche Standardmessgeräte erforderlich.

Um aus den Messwerten korrekte Rückschlüsse zu ziehen, müssen die Werte mit ausreichender „Genauigkeit“ bezogen auf die Merkmalstoleranz oder den Prozess erfasst werden. In der Vergangenheit hat man primär die Messgeräte und Messmittel anhand von Vorgaben aus Normen überprüft bzw. die Herstellerangaben überwacht. Mittlerweile hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass die Überwachung der Messmittel nicht ausreichend ist. Für den Nachweis einer Eignung ist

immer der gesamte Messprozess zu bewerten. So fordert z.B. die DIN EN ISO 10012:2004 (DIN 2004) explizit die Bestimmung der Messunsicherheit des Messprozesses.

In der Vergangenheit wurde die Messunsicherheit häufig auch als (Mess-)Fehler bezeichnet. Dieser Begriff sollte heutzutage vermieden werden, weil die Messunsicherheit keinen Messfehler darstellt, sondern eine dem Messen inhärente Eigenschaft ist. Ein Messfehler ist explizit ein Fehler beim Messen, wie z. B. fehlerhaftes Ablesen, fehlerhafte Übertragung oder fehlerhafte Antastung. Eine Messunsicherheit hingegen ist eine dem richtigen Messwert zugeordnete Eigenschaft, die die Annäherung an den wahren Wert beschreibt.

Die Überprüfung des Messmittels unter idealen Bedingungen ist nur eine Komponente bei der Bestimmung der Messunsicherheit des Messprozesses, die meist im Zusammenhang mit der Mess- und Prüfmittelüberwachung abgedeckt wird. Diese findet oft im Messraum mit geschultem Personal, mit idealisierten Werkstücken, wie Normale oder Einstellmeister, und mithilfe standardmäßig vorgegebener Vorrichtungen statt. Die Vorgehensweise und die Art der Überprüfung in Form von Prüfanweisungen ist für viele Messmittel exemplarisch in der VDI/VDE/DGQ-Richtlinienreihe 2618 beschrieben. Diese Handhabungsweise ist bei neuen Geräten zur Überprüfung der Herstellerangaben bzw. für regelmäßige Überwachungen notwendig, um Veränderungen oder Fehler am Gerät selbst feststellen zu können.

Die so ermittelten Unsicherheitskomponenten sagen allerdings sehr wenig über das Verhalten des Gerätes unter den realen Bedingungen aus, da mehrere bei einem Messprozess wirkende Einflusskomponenten nicht berücksichtigt sind.

Um einen Vergleich mit Alltagssituationen herzustellen: Die regelmäßige Prüfmittelüberwachung entspricht formal eher einer zweijährlichen Hauptuntersuchung eines Kraftfahrzeugs. Damit wird nach § 29 StVZO die Verkehrssicherheit des Fahrzeugs begutachtet. Damit ist allerdings weder die Betriebssicherheit noch die Anwendbarkeit für einen speziellen Anwendungsfall sichergestellt. Die Bewertung, ob das Fahrzeug für den Anwendungsfall „Möbeltransport“ geeignet und die Ladung während des Transports ordnungsgemäß fixiert und gesichert ist, liegt in der Verantwortung des Betreibers und entspricht somit dem Eignungsnachweis für Mess- und Prüfprozesse.

Nach VDA Band 5 (VDA 2021) werden basierend auf den Normdefinitionen aus DIN ISO 3534 (DIN 2013; 2009) und VIM (ISO 2007) die Begriffe Messsystem, Messprozess und Prüfprozess folgendermaßen beschrieben:

- Das Messsystem umfasst die eingesetzten Messmittel und Messhilfsmittel sowie alle Referenzmaterialien (z. B. Normale), die zum Einstellen und Herstellen der Messbereitschaft notwendig sind. Insofern sind für den Eignungsnachweis des Messsystems alle Unsicherheitskomponenten zu berücksichtigen, die ihre Ursachen in den jeweiligen Gerätschaften finden. Diese Unsicherheitskompo-

nenen haben einen eher universellen Charakter und sind nicht primär von der Durchführung des Messens abhängig.

- Der Messprozess ist die Durchführung der eigentlichen Messung. Hier sind ergänzend die Unsicherheitskomponenten zu berücksichtigen, die durch den Prozess des Messens entstehen. Oftmals sind diese Unsicherheitskomponenten von den Bedienern und der Umgebung dominiert, hängen also von den aktuellen räumlichen und zeitlichen Bedingungen ab, unter denen die Messungen durchgeführt werden. Der Messprozess umfasst das Messsystem.
- Der Prüfprozess umfasst darüber hinaus den Prozess der Entscheidungsfindung im Zusammenhang mit einer Konformitätsprüfung. Basierend auf dem Messergebnis und der Messunsicherheit des Messprozesses wird ein Prüfentscheid gefällt.

Die Zusammenhänge sind in Bild 1.2 dargestellt.

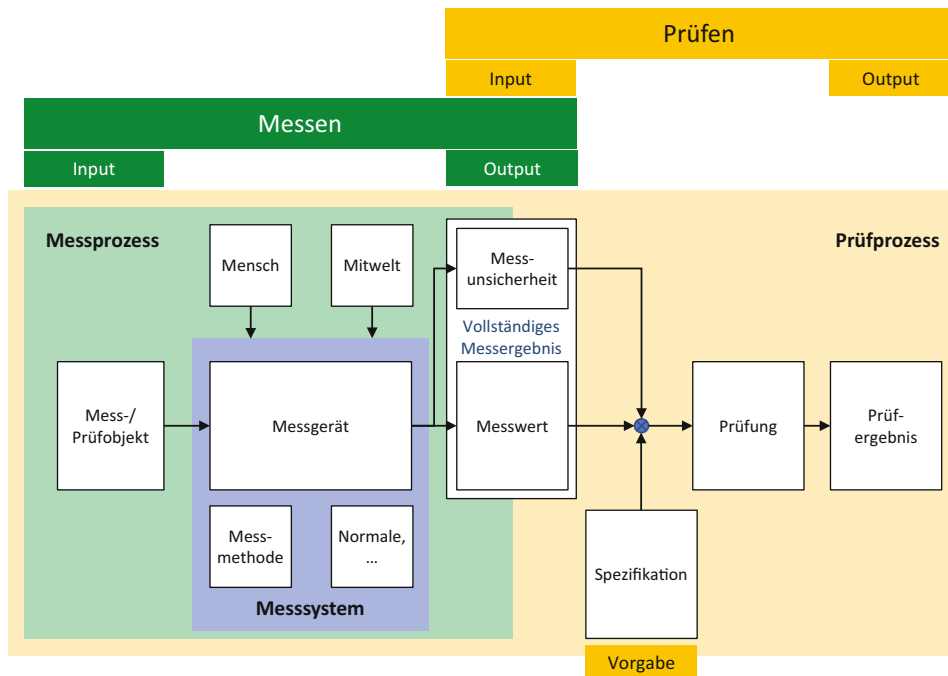


Bild 1.2 Variabler Prüfprozess – Messsystem, Messprozess und Prüfprozess
(Grafik in Anlehnung an VDA Band 5 (3. Aufl.) Abb. 3.1)

Im Falle eines attributiven Prüfens wird das Messsystem durch ein attributives Prüfsystem und der Messprozess durch einen attributiven Bewertungsprozess ersetzt. Das Ergebnis ist in diesem Fall das Erkennen einer Eigenschaft (z. B. „Der Grenzlehrdorn bleibt stecken“, „Ich sehe einen Kratzer“). Danach erfolgt der Ver-

gleich mit bekannten Vorgaben (z.B. Prüfvorschriften für Grenzlehrdorne, Grenzmuster für Kratzer), woraufhin ein Prüferscheid gefällt wird.

Bild 1.3 zeigt eine analoge Übersicht für attributive Bewertungs- und Prüfprozesse.

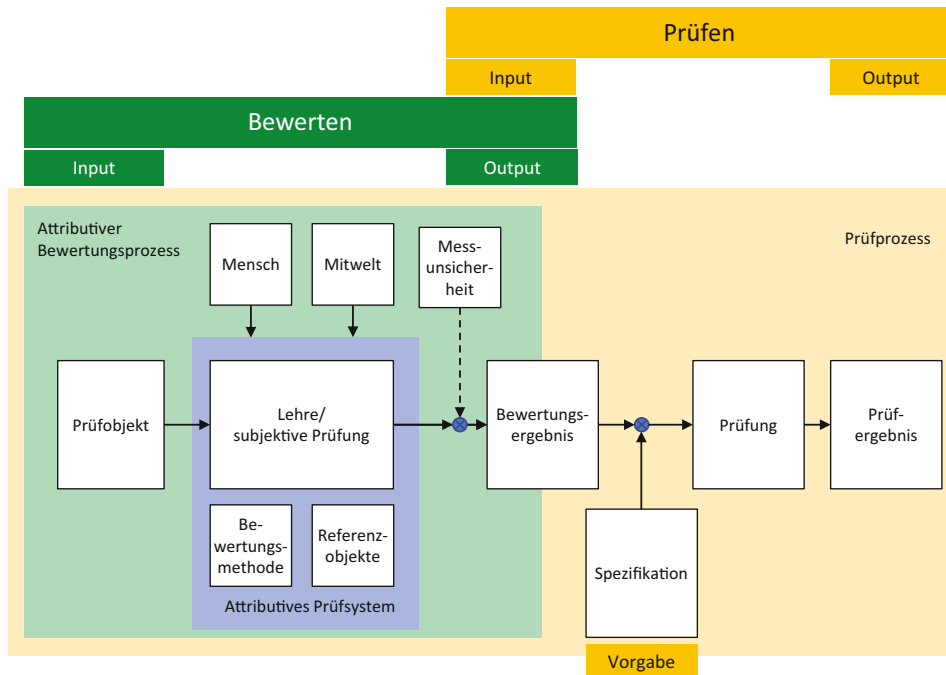


Bild 1.3 Attributiver Prüfprozess – Prüfsystem, Bewertungsprozess, Prüfprozess
(Grafik in Anlehnung an VDA Band 5 (3. Aufl.) Abb. 3.2)

Im Vergleich wird deutlich, dass bei attributiven Prüfprozessen die Messunsicherheit zwar im Bewertungsprozess enthalten ist, jedoch meist nicht ausgewiesen und auch nicht im Grenzwertvergleich konkret berücksichtigt werden kann. Das ist ein klarer Nachteil attributiver Prüfprozesse und führt in vielen Unternehmen zu den Vorgaben, dass kritische Merkmale, soweit möglich, immer mit variablen Messprozessen zu prüfen sind.

Leider sind diese Definitionen in der Literatur nicht eindeutig. Insbesondere die AIAG MSA (AIAG 2010) ignoriert viele Normbegriffe. Dort heißt es in Chapter I – Section A – Terminology, das Messsystem umfasse den gesamten Prozess des Messens, sei insofern also identisch mit dem Messprozess. Darüber hinaus wird argumentiert, dass attributive Bewertungen vergleichbar seien mit Messprozessen geringer Auflösung. Die zwei oder drei verschiedenen möglichen Messwerte könnten gleichbedeutend sein mit „Nacharbeit, Gutteile und Ausschuss“, somit könne man attributive Bewertungsprozesse auch als Messprozesse bezeichnen, auch

wenn keine Messwerte ermittelt werden. Diese kreativ-entspannte Art der Begriffsfindung führt in der Praxis leider zu vielen Missverständnissen. Allerdings muss man der AIAG MSA zugutehalten, dass diese Begriffsdefinitionen oft noch aus sehr frühen Auflagen stammen, die vor den heute gültigen Normen entstanden sind. Leider wurden diese Begriffe dann in den Überarbeitungen nicht mehr angepasst. In Bild 1.4 sind die bei einem Messprozess wirkenden Einflusskomponenten in einem höheren Detaillierungsgrad dargestellt. Gleichzeitig werden einige Einflusskomponenten dem Messsystem zugeordnet. Diese Unterscheidung zwischen der Eignung des Messsystems und der Eignung des Messprozesses ist in der Praxis äußerst sinnvoll. Gegebenenfalls kann die Eignung des Messsystems noch ohne Berücksichtigung der Unsicherheitskomponenten des eigentlichen Messprozesses bestimmt werden. Die untersuchten Einflussgrößen sind oft von den Messmitteln dominiert und die Hersteller können unter Angabe der Vorgehensweise und der Referenzgrößen die Eignungsnachweise für das Messsystem selbst durchführen. Auch Unternehmen können für die vorhandenen Messsysteme die Eignungsnachweise dokumentieren und haben für die Auswahl bei einer Messaufgabe eine Einschätzung, ob die Eignung des Messprozesses überhaupt erreicht werden kann.

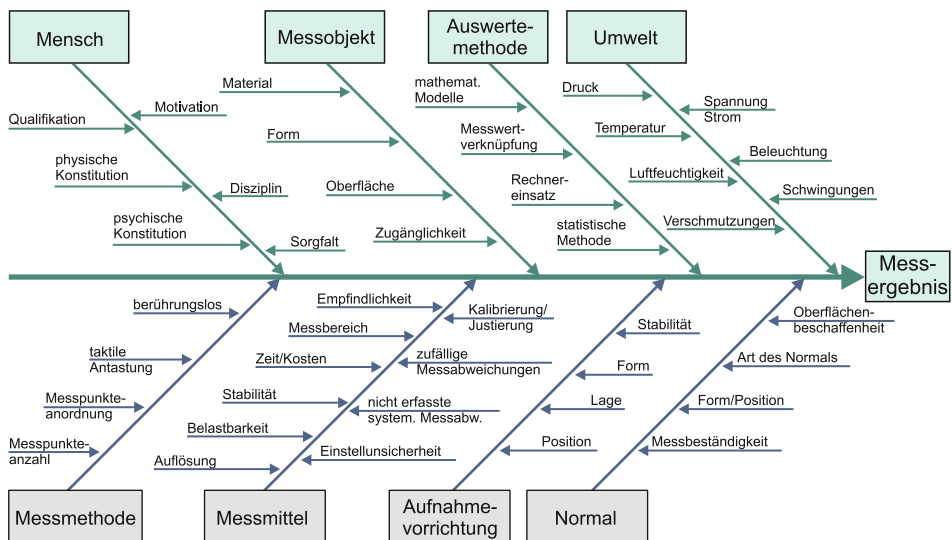


Bild 1.4 Wichtige Einflüsse auf die Unsicherheit von Messergebnissen; Quelle: VDA 5 (VDA 2021)



HINWEIS: Einschlägige Erfahrungen haben gezeigt, dass der Einfluss eines Messgeräts allein an dem gesamten Messprozess häufig die geringste Komponente darstellt. Daher sind für eine Gesamtbetrachtung **alle** Einflussgrößen zu berücksichtigen.

Daher kann mit dem zu Beginn beschriebenen Prozess der Prüfmittelüberwachung bestenfalls eine hypothetische Aussage getroffen werden, ob ein Messgerät für eine vorgegebene Toleranz prinzipiell geeignet sein könnte. Um allerdings unter den genannten, realen Einflüssen feststellen zu können, ob der Messprozess geeignet bzw. qualifiziert ist, um einen vorliegenden Fertigungsprozess mit gegebenenfalls sehr kleiner Streuung unter realen Bedingungen sicher zu beurteilen, sind andere Verfahren und Vorgehensweisen erforderlich.

Insbesondere unter der Zielsetzung „Never Ending Improvement“ werden Toleranzen immer enger und die Fertigungsprozessstreuung damit immer kleiner. Daher muss das Messsystem der jeweiligen Aufgabenstellung gerecht werden. Ist dies nicht der Fall, werden die Messergebnisse verfälscht und für statistische Analysen und Konformitätsprüfungen nahezu unbrauchbar.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, verlangen mehrere Normen und Richtlinien die Beurteilung der Messsysteme und -prozesse anhand von sogenannten Fähigkeitsstudien bzw. die Bestimmung der Messunsicherheit. Im Rahmen der IATF 16949 (IATF, VDA 2016) wird ebenfalls die Bewertung der Eignung des Prüfprozesses verbindlich vorgeschrieben. Die Vorgehensweise ist darin nicht näher spezifiziert, es wird nur auf Referenzhandbücher der Kunden verwiesen.

In den letzten Jahren haben sich im Wesentlichen zwei Strömungen manifestiert:

- Im Umfeld der AIAG werden meist Messsystemanalysen nach Verfahren 1 – 3, Linearität und Messbeständigkeit durchgeführt. Diese Verfahren entsprechen zwar meist formal, aber nicht im Detail den in der AIAG MSA (AIAG 2010) definierten Prozeduren, sondern sind in Firmenrichtlinien festgelegt. Hintergrund ist, dass mehrere Prozeduren der AIAG MSA in der Praxis deutliche Schwächen zeigen.
- Im Umfeld des VDA wird eine Eignung von Mess- und Prüfprozessen mithilfe von Messunsicherheitsstudien durchgeführt. Damit ist sichergestellt, dass auch Normforderungen auf Basis der Messunsicherheit erfüllt werden können, was mit den Ergebnissen der Messsystemanalyse nicht möglich ist.

Langfristig ist zu hoffen, dass sich die beiden Konzepte annähern und gegebenenfalls sogar harmonisiert werden. Dazu hat der VDA in Band 5 jetzt schon die Möglichkeit geschaffen, eine Mess- und Prüfprozesseignung mit den gleichen Versuchsdaten zu berechnen, die auch für die Kennwerte nach den Verfahren der Messsystemanalyse genutzt werden. Allerdings bietet der VDA Band 5 weit mehr Möglichkeiten und auch signifikante Vereinfachungen im Zusammenhang mit einem risikobasierten Eignungsnachweis.

In dem vorliegenden Buch werden diese verschiedenen Vorgehens- und Betrachtungsweisen behandelt. Weiter werden Zusammenhänge, aber auch Unterschiede in den Verfahren erörtert und explizit hervorgehoben.

In Bild 1.5 und Bild 1.6 sind die Auswirkungen der „**Streuung eines Messprozesses**“ auf die „**Beobachtete Prozessstreuung**“ zu sehen. In Bild 1.5 ist die „**Streuung des Messprozesses**“ ausreichend klein. Damit ist die „**Tatsächliche Prozessstreuung**“ nahezu identisch mit der „**Beobachteten Prozessstreuung**“. Die in Bild 1.6 dargestellte „**Streuung des Messprozesses**“ ist zu groß. Daher ist ein deutlicher Unterschied zwischen der „**Tatsächlichen Prozessstreuung**“ und der „**Beobachteten Prozessstreuung**“ zu erkennen. Diese Differenz führt folgerichtig zu Fehlinterpretationen des realen Sachverhalts.

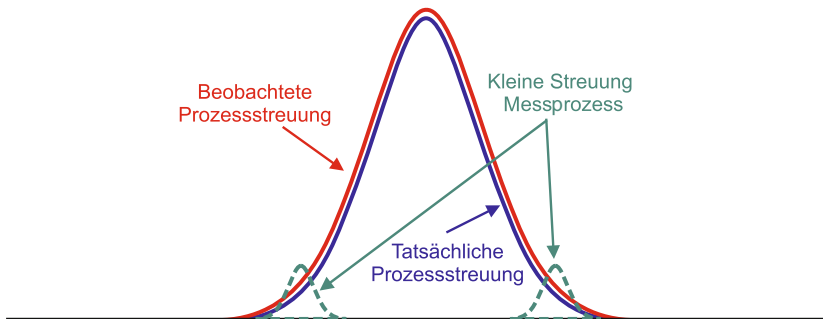


Bild 1.5 Beobachtete Prozessstreuung durch Messprozess kaum beeinflusst (Darstellung nicht maßgerecht)

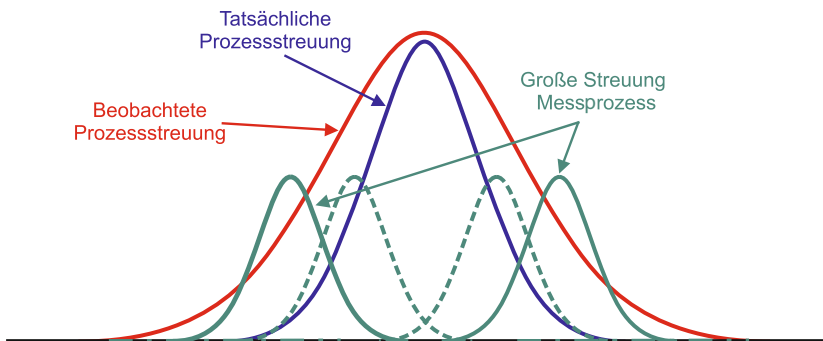


Bild 1.6 Beobachtete Prozessstreuung durch Messprozess beeinflusst (Darstellung nicht maßgerecht)

Damit stellen sich zwei Fragen:

1. Wie kann die „Streuung eines Messprozesses“ ermittelt werden?
2. Wie groß darf die „Streuung des Messprozesses“ höchstens sein, damit der Unterschied zwischen der „Beobachteten Prozessstreuung“ und der „Tatsächlichen Prozessstreuung“ noch akzeptabel ist?

Die erste Frage kann mit den im Folgenden beschriebenen Verfahren und Methoden beantwortet werden. Dazu werden je nach Vorgehensweise unterschiedliche Kennwerte wie C_g , C_{gk} , $\%GRR$, U , Q_{MS} , Q_{MP} usw. berechnet.

Der Vergleich der Ergebnisse mit vorgegebenen Grenzwerten beantwortet die zweite Frage. Dabei ist eine Vorbemerkung wichtig.

Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass die tatsächliche Prozessstreuung s_{REAL} und die Messprozessstreuung s_{MP} unabhängig sind. Demzufolge ergibt sich die beobachtete Prozessstreuung s_{OBS} aus der Wurzel aus der quadratischen Summe dieser beiden Komponenten.

$$s_{OBS} = \sqrt{s_{REAL}^2 + s_{MP}^2}$$

Daraus wiederum folgt, dass eine Messprozessstreuung in gleicher Größe wie die tatsächliche Prozessstreuung die beobachtete Fertigungsprozessstreuung nur um 41 % erhöht (s. Tabelle 1.1). Eine Messprozessstreuung von 30 % des Fertigungsprozesses führt demnach zu einer Erhöhung von 4,4 %, bei 10 % Messprozessstreuung liegt die Erhöhung nun noch bei 0,5 %. Dieser Wert ist im Rahmen der Genauigkeit statistischer Erhebungen weitestgehend irrelevant, so dass man in einer Neuformulierung der 1/10-Regel von Berndt sagen kann, dass eine Messprozessstreuung von 10 % der Fertigungsprozessstreuung bei Bewertungen ebendieser Fertigungsprozessstreuung irrelevant und vernachlässigbar ist.

Tabelle 1.1 Einfluss der Messprozessstreuung auf die beobachtete Fertigungsprozessstreuung

| Tatsächliche Fertigungsprozessstreuung s_{REAL} | Messprozessstreuung s_{MP} | Beobachtete Fertigungsprozessstreuung s_{OBS} | Prozentuale Erhöhung von s_{OBS} |
|---|------------------------------|---|------------------------------------|
| 1 | 1 | $\sqrt{1^2 + 1^2} = 1,41$ | 41 % |
| 1 | 0,3 | $\sqrt{1^2 + 0,3^2} = 1,044$ | 4,4 % |
| 1 | 0,2 | $\sqrt{1^2 + 0,2^2} = 1,020$ | 2,0 % |
| 1 | 0,1 | $\sqrt{1^2 + 0,1^2} = 1,005$ | 0,5 % |

Es ist aber ebenso wichtig zu erkennen, dass eine Messprozessstreuung von 10 % der Fertigungsstreuung in Rahmen einer Konformitätsprüfung nach ISO 14253-1 (DIN 2018a) im Allgemeinen nicht vernachlässigt werden darf.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich die üblichen Grenzwerte für die Kennwerte C_g , C_{gk} , $\%GRR$, U , Q_{MS} , Q_{MP} und andere. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Bezug der Kennwerte üblicherweise nicht die Fertigungsprozessstreuung, sondern die Fertigungstoleranz ist.

Bild 1.7, Bild 1.8 und Bild 1.9 zeigen den Einfluss dieser Kennwerte auf die Prozessfähigkeit C_p . Bei C_p handelt es sich um eine Qualitätsfähigkeitskenngröße, die in (Dietrich Schulze 2009b) näher erläutert ist. Die Betrachtungsweise kann unverändert auch auf andere Qualitätsfähigkeitskenngrößen wie C_m und P_p oder T_p übertragen werden.

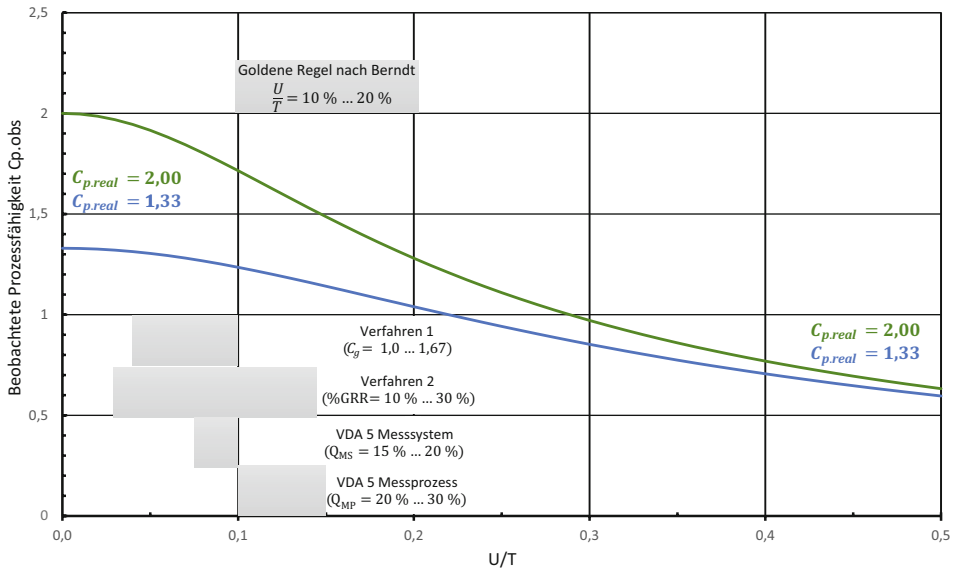


Bild 1.7 Einfluss von U/T auf Qualitätsfähigkeitsgröße C_p

Bild 1.7 zeigt den Einfluss der Messunsicherheit auf die Qualitätsfähigkeitskenngröße C_p . Dargestellt ist der Verlauf des durch Messungen beobachteten C_p -Wertes $C_{p,obs}$ im Falle von tatsächlich vorliegenden Fähigkeitsindizes $C_{p,real} = 2,0$ und $C_{p,real} = 1,33$ über dem Verhältnis der erweiterten Messunsicherheit zur Toleranz (U/T). Bereits bei einem Verhältnis von $U/T = 0,15$ (d. h., U ist 15 % der Toleranz) erhält man aus den Anzeigewerten des Messprozesses $C_{p,obs} = 1,5$ für eine Messgröße mit dem tatsächlichen Prozessfähigkeitsindex $C_{p,real} = 2,0$. Im Anhang „Auswirkung des Messprozesses auf die Prozessfähigkeit“ ist die Beziehung zwischen dem beobachteten Prozessfähigkeitsindex $C_{p,obs}$, dem Messprozesseignungskennwert Q_{MP} nach VDA 5 und dem tatsächlichen Prozessfähigkeitsindex $C_{p,real}$ dargestellt (s. Abschnitt 15.2). Bei den Bereichen der Unsicherheit für die verschiedenen Verfahren (C_g , %GRR) ist zu beachten, dass es firmenspezifisch sehr unterschiedliche Berechnungsmethoden und Anforderungen gibt. Bei den Bereichen für VDA 5 (Q_{MS} und Q_{MP}) sind vor allem die firmenspezifischen Anforderungen unterschiedlich.

Analog lässt sich eine Beziehung für den Prozessfähigkeitsindex und die Fähigkeitskenngröße $\%GRR$ herleiten (s. (AIAG 2010)).

In Bild 1.8 ist die beobachtete Prozessfähigkeit in Abhängigkeit von der tatsächlichen Prozessfähigkeit der Messgröße und der Fähigkeitskenngröße $\%GRR$ des Messsystems als Funktion dargestellt. Wählt man in dem Diagramm beispielsweise den tatsächlichen Prozessfähigkeitsindex $C_p = 2,0$, so erhält man aus den Anzeigewerten eines Messsystems mit $\%GRR = 30\%$ den beobachteten Prozessfähigkeitsindex $C_p = 1,7$.

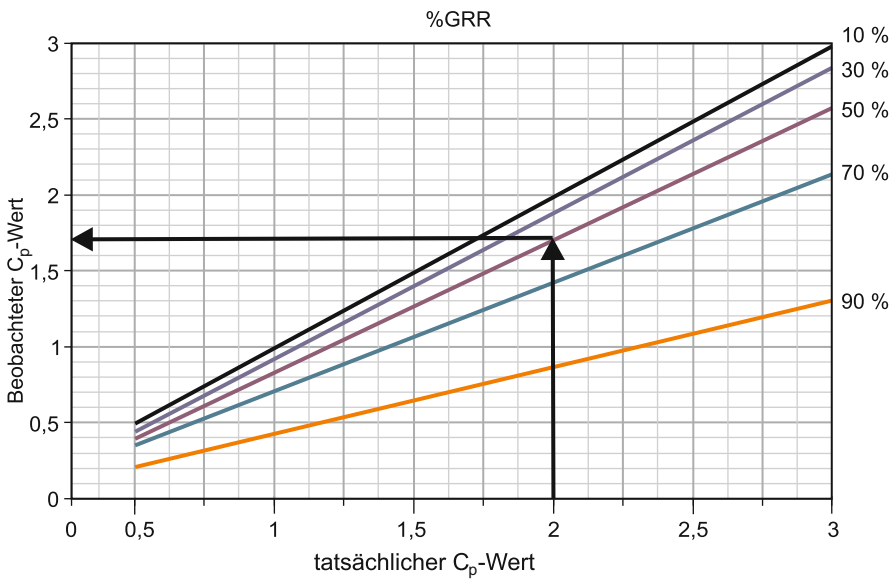


Bild 1.8 Einfluss von $\%GRR$ auf Qualitätsfähigkeitskenngröße C_p bei Prozessstreuung als Bezugsgröße

Wählt man als Bezugsgröße die Toleranz, so erhält man die in Bild 1.9 dargestellte Beziehung.

Aus Bild 1.9 leitet man ab: Ist für eine Messgröße der tatsächliche Prozessfähigkeitsindex beispielsweise $C_p = 2,0$, und wird diese Messgröße nun mit einem Messsystem gemessen, dessen Streuung $\%GRR = 30\%$ aufweist, so berechnet man aus den Anzeigewerten den beobachteten Prozessfähigkeitsindex $C_p = 1,7$.

In Abschnitt 15.2 „Auswirkung des Messprozesses auf die Prozessfähigkeit“ ist die Herleitung der hier beschriebenen Zusammenhänge erläutert.

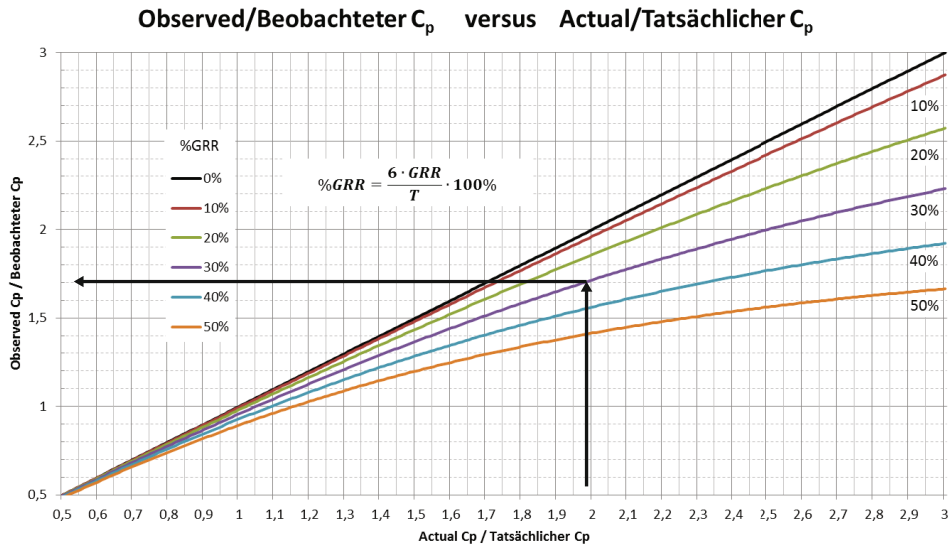


Bild 1.9 Einfluss von $\%GRR$ auf Qualitätsfähigkeitskenngröße C_p bei Toleranz als Bezugsgröße

Ganz allgemein lässt sich ableiten, dass für einen $\%GRR$ -Wert größer als 30% die Abweichung zwischen dem „beobachteten C_p -Wert“ und dem „tatsächlichen C_p -Wert“ zu groß und nicht mehr akzeptabel ist. In vielen Richtlinien ist ein Messsystem mit $\%GRR$ kleiner 10% als fähig zu bewerten und Messsysteme mit $\%GRR$ zwischen 10% und 30% als bedingt fähig. Dementsprechend sind Messsysteme mit $\%GRR$ größer oder gleich 30% als nicht fähig einzustufen und dürfen für die angedachte Messaufgabe nicht eingesetzt werden.

Ist ein Prüfprozess nicht geeignet, sind die erfassten Merkmalswerte für die Beurteilung der Maschinenfähigkeit, der vorläufigen und fortdauernden Prozessfähigkeit und zur Prozessregelung (SPC) wertlos. Diese auf den Fertigungsprozess bezogenen Methoden hat man bereits Mitte der Achtzigerjahre eingeführt, ohne damals auf die Eignung des Messprozesses zu achten. Sehr häufig konnte beobachtet werden, dass dadurch statt der Streuung des Fertigungsprozesses nur die Streuung des Messprozesses beurteilt wurde. Aus dieser Erkenntnis heraus wurden Richtlinien und Verfahren zur Beurteilung der Fähigkeit von Messsystemen eingeführt. Einige Praktiker behaupten dennoch, die Aussage: „Man kann nur so genau fertigen, wie man auch messen kann“ stimme nicht. Heutige Fertigungseinrichtungen könnten wesentlich genauer fertigen, als man messen kann. Dem wird weder in der Theorie noch in der Praxis prinzipiell widersprochen, denn aufgrund hochpräziser Span- und Fertigungstechniken kann die Fertigungsqualität sehr hoch sein. Aus technischen Gründen werden häufig die Spezifikationsgrenzen enger. Konsequenterweise wird der Spielraum für die Fertigung immer geringer, daher ist eine sinnvolle Regelung bzw. Steuerung wichtig. Dabei sind die Messergebnisse eines

Messprozesses die Grundlage. Sollte nun die Messtechnik mit der Fertigungstechnik nicht mithalten können, so ist die Fertigungsqualität weder nachweisbar noch steuerbar. Somit kann nicht belegt werden, dass eine einmal erreichte hohe Fertigungsqualität nachhaltig gesichert werden kann. Im Rückschluss gilt deshalb wieder, dass die Aussage zu Beginn des Absatzes korrekt ist oder allenfalls durch die Adjektive „nachhaltig und nachweisbar“ ergänzt werden sollte: „Man kann nachhaltig und nachweisbar nur so genau fertigen, wie man auch messen kann“.

Ein typisches Beispiel an höchste Anforderungen an einen Messprozess ist beispielsweise die Fertigung der Common-Rail-Einspritzventile. Um Drücke in der Größenordnung von 2000 Bar und mehr zu erreichen, sind Forderungen an die Rundheit der Stifte und Bohrungen in der Größenordnung unter 0,5 mm unabdingbar. Eine solche Fertigung kann nur kostengünstig gesteuert werden, wenn man in der Lage ist, diese Merkmale mittels eines geeigneten Messprozesses zu überprüfen. Dieses Beispiel ist auf viele andere Anwendungen übertragbar.

Bei der Festlegung der Spezifikationsgrenzen ist allerdings bereits in der Konstruktion auch die Machbarkeit des Messverfahrens zu überprüfen. Auch dies sollte in einem Team zwischen Konstruktion, Fertigung und Kunde bzw. Lieferant erfolgen. Nur so kann das Ziel wirtschaftlich erreicht werden.

■ 1.2 Historischer Rückblick und Ausblick

Die Tatsache, dass das Ergebnis einer Messung eine Unsicherheit aufweist, ist so alt wie das Messen selbst. In der Praxis wurde häufig der Slogan verwendet „Wer misst, misst Mist“. Das bedeutet nichts anderes als eine zu große Messunsicherheit, die konsequenterweise zu einem falschen Merkmalswert und damit zu Fehlinterpretationen führen kann.

Das mag in der Einzelteilmontage im Altertum zumeist weniger Bedeutung gehabt haben. Im globalen industriellen Zeitalter hat sich das aber gänzlich geändert. So war es Carl Friedrich Gauß, der sich bei der Landvermessung dieser Unsicherheit bewusst wurde und die Fehler- und Ausgleichsrechnung entwickelte, um die Streuung von empirisch ermittelten Daten zu berücksichtigen. Im Zusammenhang mit der Fortpflanzung von Streuungen wurde die berühmte Gauß'sche Glockenkurve (Normalverteilung) geboren.

Erste Empfehlungen, den Begriff „Messunsicherheit“ näher zu spezifizieren, gehen auf das nationale Komitee für Maße und Gewicht zurück. Diese wurden erstmals 1977 artikuliert. 1994 wurde der Begriff in der ersten Auflage des internationalen Wörterbuchs der Metrologie, kurz VIM (DIN 2010), definiert und damit festgelegt. Die heute gültige Festlegung des Begriffs Messunsicherheit ist auch

dem ISO/IEC Guide 99 (VIM) (ISO 2007) und der DIN ISO 3534-2 (DIN 2013) zu entnehmen. Wie die Messunsicherheit zu bestimmen ist, wurde in dem „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ 1995 näher spezifiziert. Dieser liegt seit 2008 als ISO/IEC Guide 98-3 (ISO 2008) (GUM – Guide to the Expression of Uncertainty, IEC) vor.

Obwohl man sich schon lange der Notwendigkeit bewusst ist, für den jeweiligen Messprozess die Unsicherheit zu bestimmen, werden diese Verfahren in Fertigung und Produktion nicht herangezogen. Die Hintergründe sind relativ einfach. Schaut man sich den ISO/IEC Guide 98-3 (ISO 2008) näher an, so liest man, dass dieses Dokument aufgrund der universellen Bedeutung bewusst auf explizite Handlungsanweisungen verzichtet. Es wird darauf verwiesen, dass für die konkrete Umsetzung weiterführende Literatur entstehen müsse. In Messräumen hat man sich aufgrund der geforderten Zertifizierung bzw. Akkreditierung schon länger mit dieser Thematik auseinandergesetzt. Dort ist die Problematik aufgrund der geringeren Anzahl von Einflussgrößen einfacher zu handhaben. Messprozesse, wie sie in der alltäglichen Praxis der Fertigung und Produktion vorkommen, mit einer Vielzahl von Einflüssen, können nicht so ohne weiteres über theoretische Betrachtungen analysiert und bewertet werden. Die einzelnen Einflüsse sind nur schwer abschätzbar bzw. durch mathematische Formeln und Modelle beschreibbar. Dies war sicherlich der Hauptgrund, warum man sich Ende der Achtzigerjahre in der Automobilindustrie vornehmlich mit dem Thema Messsystemfähigkeit auseinandergesetzt hat.

1.2.1 Entwicklung „Messsystemanalyse und -fähigkeit“

In älterer Literatur wird die Messsystemfähigkeit gerne noch „Prüfmittelfähigkeit“ genannt. Wir möchten in diesem Buch aus mehreren Gründen darauf verzichten:

- Die Definition des Begriffs „Prüfmittel“ ist im Gegensatz zum Messmittel international nicht genormt und in den Unternehmen sehr unterschiedlich definiert. Im nicht deutschsprachigen Umfeld ist der Unterschied zwischen Mess- und Prüfmittel oft sehr schwer zu vermitteln. Sowohl in DIN EN ISO 9001 (DIN 2015) als auch in IATF 16949 (IATF, VDA 2016) spricht man deshalb von „Ressourcen zur Überwachung und Messung“, deren Eignung nachzuweisen ist.
- Die Unterscheidung von Mess- und Prüfmittel wird weitestgehend durch die Anwendung getroffen. Meist werden die Messmittel als Prüfmittel bezeichnet, die zur letzten Bewertung eines Merkmals herangezogen werden, bevor die Produkte an den Kunden ausgeliefert werden. Somit ist die Unterscheidung eher das Ergebnis einer Risikoanalyse, während das „Mittel“ an sich das gleiche ist. Im Rahmen von SPC, sowie Maschinen- und Prozessfähigkeiten, müs-

sen aber auch Messmittel bewertet werden, mit denen keine Prüfungen im Sinne von Abschnitt 1.1.1 durchgeführt werden.

- Der Begriffsteil „Prüfmittel ...“ rückt die Prüfmittelfähigkeit zu nahe an die „Prüfmittelüberwachung“. Wie zuvor beschrieben, soll im Unterschied zur Überwachung der metrologischen Eigenschaften des „Mittels“ bei der Fähigkeit oder Eignung die explizite Anwendung in einem spezifischen Messprozess im Vordergrund stehen.
- Weiterhin steht deshalb meist nicht das „Prüfmittel“ im Fokus der Untersuchung, sondern das gesamte Messsystem bis hin zum Messprozess.
- Nicht zuletzt entstehen Konflikte im Zusammenhang mit „Messen“ und „Prüfen“. Gerade die Verfahren der „Prüfmittelfähigkeit“ genannten Messsystemanalyse können zur Bewertung des „Prüfens“ im Sinne einer Konformitätsbewertung nach DIN EN ISO 14253-1 (DIN 2018a) nur wenig beitragen. Es geht somit um die Fähigkeit des Messsystems, nicht die des Prüfmittels.

Bei der Messsystemanalyse und -fähigkeit wird versucht, anhand einer eindeutig und leicht durchführbaren Vorgehensweise die Eignung eines Messverfahrens nachzuweisen. Dabei werden in erster Linie Versuche durchgeführt. Die Messergebnisse werden statistisch ausgewertet und entsprechende Kennzahlen berechnet. Die ermittelten Qualitätsfähigkeitskenngrößen werden mit vorgegebenen Grenzwerten verglichen. Sind die Forderungen eingehalten, kann das Messverfahren für die jeweilige Messaufgabe als geeignet angesehen werden.

Das Wort „Messunsicherheit“ war lange Zeit ein stark negativ besetzter Begriff und daher bei Herstellern von Messgeräten nicht sonderlich beliebt. Selbst mit einer kleinen Messunsicherheit kann sich der Lieferant eines Messgerätes nicht brüsten. Daher ist der Begriff Marketing-Strategen eher ein Dorn im Auge. Dies hat sicherlich nichts mit der hier beschriebenen Zielsetzung zu tun.

Erste Richtlinien zur Beurteilung der Messsystemfähigkeit wurden in der Automobilindustrie erstellt. Dazu gehörten General Motors und Ford. Die Vorläufer der heute gültigen Richtlinien (Daimler AG 2010) und (Ford 1990) wurden bereits 1987/1989 publiziert. Andere Automobilhersteller und große Zulieferer folgten diesen Vorgaben und haben ähnliche Richtlinien erarbeitet (z. B. Robert Bosch (Robert Bosch GmbH 2019a)). Mit der Zeit entstanden mehrere Richtlinien mit der gleichen Zielsetzung, allerdings mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden. Um dem Wildwuchs etwas Einhalt zu gebieten, hat in den USA die Automotive Industry Action Group (AIAG) die erste Ausgabe ihres Leitfadens „Measurement System Analysis“, kurz MSA (AIAG 2010), herausgegeben.

Index

Symbole

%GRR 267

A

AIAG MSA 265

Akkreditierung 175

Analysis of Variance 272

Annahmeprüfung 371

ANOVA 102, 107, 121, 123

ANOVA-Methode 272

Antastgeschwindigkeit 22

Antastpunkte 22

Appraiser Variation 272

A-Priori-Verteilungen 188

ARM-Methode 102, 121

attributive Prüfprozesse 137

Auflösung 53, 56, 270, 365, 371

B

Bediener 26, 34

Bedienereinfluss 42, 94, 121, 235

Begriffe 365

beobachtete Prozessstreuung 8

berufliches Können 182

Beschaffung 309

Bezugsgröße 120

Bias 59, 267, 271 f.

C

C_g 67, 265, 271

C_{gk} 67, 265, 271

chemische Analysen 276

CNOMO 133

Consistency 38

D

d2*-Tabelle 337

Differenzenmethode 102, 121

Drehmoment 276

Drei-Koordinaten-Meßgeräte 276

Durchflussmesssysteme 276

dynamische Messung 276

E

effektive Freiheitsgrade 193

Effektivität 141, 146, 160

Eignungskennwert 265, 267

Eignungsnachweis 49, 362

Einflussfaktoren 26

Einflussgröße 6, 39, 44, 365

Einflusskomponenten 268

Eingriffsgrenzen 274

einseitig 77

Einstellmeister 53, 368

Einstellnormale 28

Einstellstücke 55

Endmaß-Kalibrierung 195

Equipment Variation 272

Ermittlungsmethode A 180

Ermittlungsmethode B 180
Erschütterungen 22
erweiterte Messunsicherheit 181, 191,
202, 207, 212, 249, 261, 267
Erweiterungsfaktor 181
Excel-Tabelle 318

F

Fähigkeitsindizes cg , cgk 50
Fähigkeitsnachweis 364, 371
Farbmesssysteme 276
Fehlentscheidungen 45
Firmenrichtlinien 266
Formtest 276
fortlaufende Eignung 273
Freiheitsgrade 191, 337

G

Geltungsbereich 371
Genauigkeit 2
Gerätsteuerung 233
Gerätschaften 34
Gesamtstrebereich 50
Gesamtwiderstand 190
Gewichtsstück 204
Grafische Darstellung 96
Grenzwerte 76, 91, 113, 365
Guide to the Expression of Uncertainty
in Measurement 173
GUM 173, 265, 267

H

H0 Nullhypothese 89
H1 Alternativhypothese 89
Härteprüfung 275
Hierarchiestufe 54
Hilfsmittel 28, 39, 63
Histogramm 99
Hitzetest 276
Hypothesen 141, 146

I

Inhomogenität des Prüfobjekts 272
intellektuelle Redlichkeit 182
Interaction 272
Internationales Normal 365
Internationales Wörterbuch der
Metrologie 265
ISO 14253-1 266
ISO 22514-7 265
ISO/IEC Guide 98-4 266

J

JCGM 106 266
Justierung 365

K

K1-Faktor 337
K2-Faktor 337
K3-Faktor 337
Kalibrierintervall 274
Kalibrierung 175, 204, 208, 365
Kältetest 276
k-Faktoren 340
Kodierung 143
kombinierte Messunsicherheit 189
kombinierte Standardunsicherheit
180, 201 f.
Komparatoreinflüsse 198
Konformitätsprüfung 173, 266 f.
konsistent 175
Korrektion 365
korrelierte Eingangsgrößen 190
Kreuztabelle 141, 147
kritisches Denken 182
kritische Werte 89
Kurzzeit-Stabilität 273

L

Längenkomparator 183
langzeitstabil 274
Lecktester 276

Lehrdorne 137
Lehre 28, 39, 63, 137
Leitfaden aus der Automobil-
industrie 266
Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit
beim Messen 265
Linearität 34 f., 53, 80, 83, 87, 243,
266, 271, 367, 373, 386

M

Maßverkörperungen 28
Materialeigenschaften 26
maximaler Bias 271
Meisterteil 56
Merkmalstoleranz 83, 94
Messabweichung 30, 179, 366
Messbereich 365
Messbeständigkeit 32, 37, 53, 123, 246,
370, 373, 377 f.
Messergebnis 178
Messgenauigkeit 365
Messgerät 28, 63, 366
Messgerätedrift 365
Messgerätegenauigkeit 43
Messgröße 365
Messkette 368
Messlabor 133
Messmethodik 39
Messmittel 365, 367
Messprozess 178, 265, 368
Messschieber 208
Messstellen 272
Messstrategie 26
Messsystem 1, 265, 368
Messsystemanalysen 268
Messsystemstreuung 93
Messung 178
Messunsicherheit 15, 30, 267,
363, 365
Methode A 184, 192
Methode B 186, 192
Methodenüberblick 267
minimale Toleranz 75
Mittelwert-Spannweiten-Methode 102

Mittelwert-Standardabweichungs-
methode 102, 108

N

Nationales Normal 365
ndc 267
nicht linear 36
Nicht-Übereinstimmung 46
Normal 28, 39, 51, 53, 59, 63, 83,
229, 368
Normen 1
Normung 175
nullbegrenzt 78
Number of Distinct Categories 267

O

Oberflächenmessung 275
Objekteinfluss 272
objektive Prüfung 26
optische Kompensatoren 275

P

Parallelendmaß 23
Partikelzählung 276
Produkthaftung 267
Protokollierung 194
Prozentstrebene 71
Prozess 25
prozessbezogen 72
Prozessfähigkeit 341
Prozessstrebene 83, 94
Prozessstreuung 93, 117
prozessstreuungsbezogen 73
Prüfen 26
Prüfer 39, 51
prüferbezogen 97
Prüfmittelfähigkeit 15, 21, 49
Prüfobjekt 26, 121, 236
Prüfprozess 1, 26, 219
Prüfprozesseignung 1, 275, 299
Prüfsoftware 313

Q

QMP 267
 QMS 265, 267
 Qualitätsaudit 365
 Qualitätsfähigkeitskenngröße 11, 67

R

R-Karte 101
 Rechnersoftware 313
 Referenzbedingungen 365
 Referenzmaterial 365
 Referenzteil 51, 83 f., 229, 270
 Referenzwert 32, 59
 Regelkarte 274
 Repeatability 20, 94
 Reproducibility 20, 94
 Reproduzierbarkeit 272
 richtiger Wert 178, 197
 Richtlinien 1, 362
 Rückführbarkeit 365
 Rückverfolgbarkeit 365
 Rundungsregeln 193

S

Sauberkeitsanalyse 41
 Schichtdicke 276
 Schutzabstand 268
 Schwingungen 22
 Serienfertigung 215
 Shewhart-Qualitätsregelkarte 392
 Short Method 170
 Sicherheitsabstand 267
 Sichtprüfer 304
 Sichtprüfung 303
 Signalerkennung 141, 146, 165
 Software 39
 Sonderfall 275
 Spannweite 121
 Spannweitenmethode 92
 Spezifikationsbereich 46
 Stabilität 32, 37, 125, 246, 266 f., 273, 370, 373, 391

Stabilitätsüberwachung 125
 Standardmessmittel 232
 Standardunsicherheit 267
 Standardunsicherheitskomponenten 229
 Streubereich 69
 subjektive Prüfung 26
 systematische Messabweichung 31 f., 59, 89, 230, 267, 270, 366

T

Taktzeit 272
 tatsächliche Prozessstreuung 8
 Teilstreuung 100 f., 118, 236
 Temperatur 21, 273
 Temperatureinfluss 22
 Toleranz 93, 119
 toleranzbezogen 71, 73
 t-Test 59, 89
 t-Werte 337

U

Überdeckungswahrscheinlichkeit 226
 Übereinstimmung 46
 übertragbar 175
 Überwachung 371
 Umgebungsbedingungen 39
 Umwelt 26, 63
 Uniformity 36
 universell 175
 Unsicherheit Referenzteile 270
 Unsicherheitsbereich 46
 Unsicherheitsbudget 260
 Urwerte 391

V

Varianzanalyse 102, 342
 VDA Band 5 173
 Verbandsrichtlinien 266
 Verfahren 1 50 f., 63, 266, 372, 375
 Verfahren 2 50, 94, 266, 342, 372, 379
 Verfahren 3 50, 121, 266, 348, 372, 383
 Verfahren 4 128

Vergleichbarkeit von Messstellen 272
Vergleichbarkeit von Messsystemen 272
Vergleichpräzision 20, 33 f., 50, 369
Verschiebung 35
Verstärkung 36
Verteilungsformen 226
Vertrauensbereich 76
Verunreinigungen 22
VIM 265
vollständiges Messergebnis 195,
207, 212
Vorrichtung 39

W

wahrer Wert 31, 178, 183
Wahrscheinlichkeitsnetz 99

Wärmeausdehnungskoeffizient 199
Wechselwirkung 272
Wertestrahle 99
Werteverlauf 97, 99
Wiederholbarkeit 270, 272
Wiederholmessungen 270
Wiederholpräzision 20, 33, 42,
50, 369
Wuchtmaschinen 276

Z

zerstörende Prüfungen 276
zufällige Messabweichung 32, 366
Zupaarungsvorgänge 276