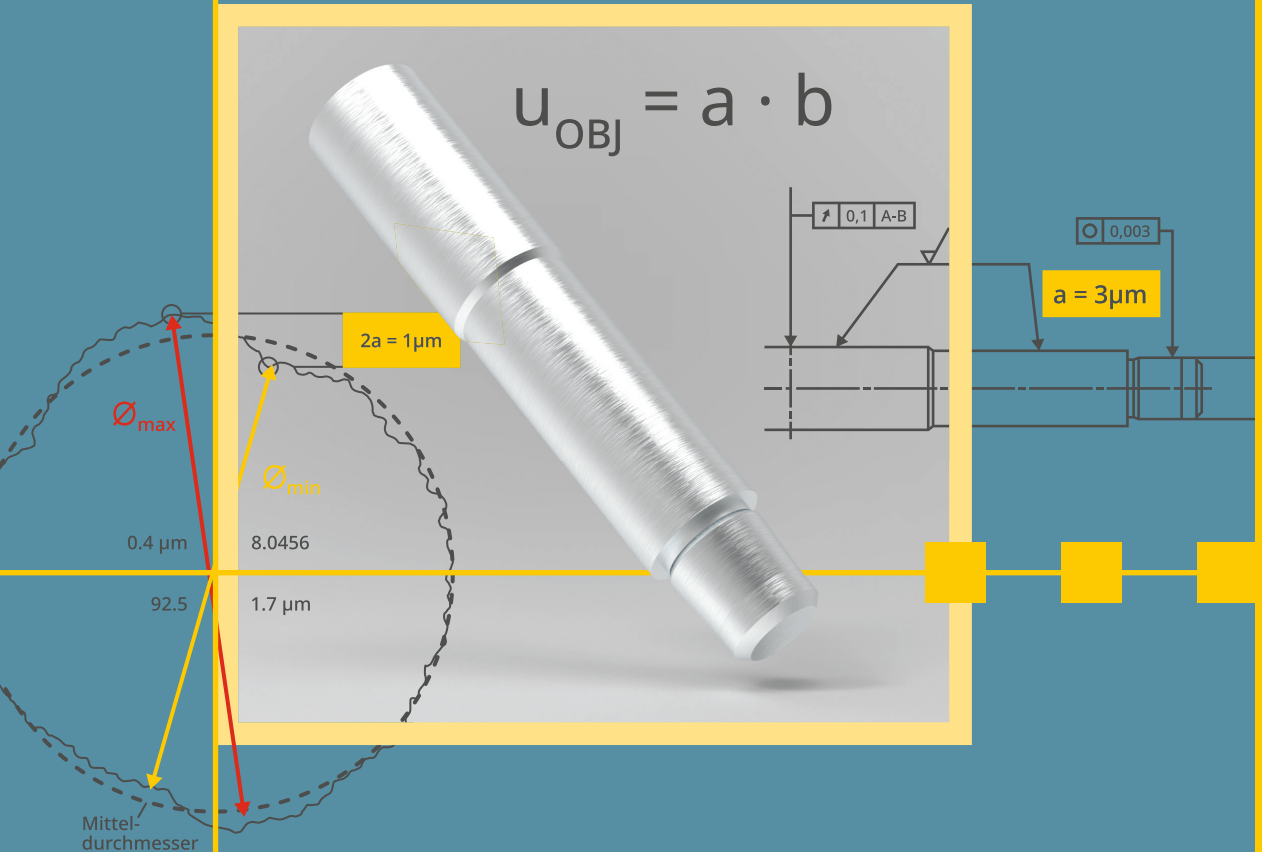


Edgar Dietrich
Stephan Conrad

Eignungsnachweis von Mess- und Prüfprozessen

Fähigkeit, Eignung und Messunsicherheit
im aktuellen Normenumfeld



6., überarbeitete Auflage

HANSER

Dietrich / Conrad

Eignungsnachweis von Mess- und Prüfprozessen



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Edgar Dietrich
Stephan Conrad

Eignungsnachweis von Mess- und Prüfprozessen

Fähigkeit, Eignung und Messunsicherheit
im aktuellen Normenumfeld

6., überarbeitete Auflage

HANSER

Über die Autoren:

Dr.-Ing. Edgar Dietrich, Weinheim

Dipl.-Ing. Stephan Conrad, Weinheim



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

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

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanserfachbuch.de

Lektorat: Dr. Philippa Söldenwagner-Koch

Herstellung: Melanie Zinsler

Covergestaltung: Tom West

Titelmotiv: © Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

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 Bedienereinfluss	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 Bedienereinfluss	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 22514-7	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

Mess- und Prüfprozesseignung

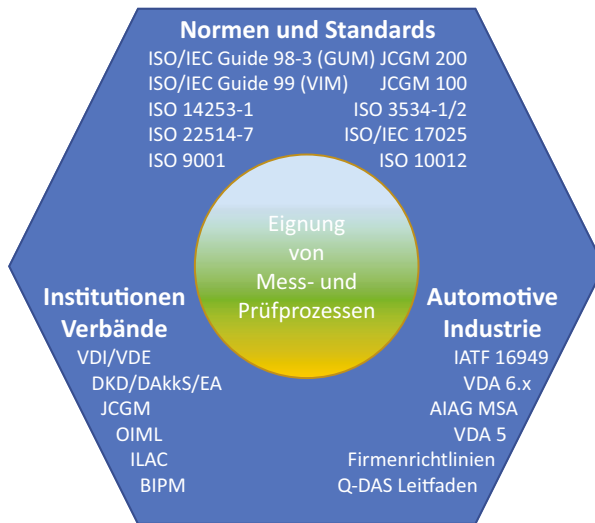
■ 1.1 Warum Mess- und Prüfprozesseignung?

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-

nenten 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 Prüfergebn gefällt.

Die Zusammenhänge sind in Bild 1.2 dargestellt.

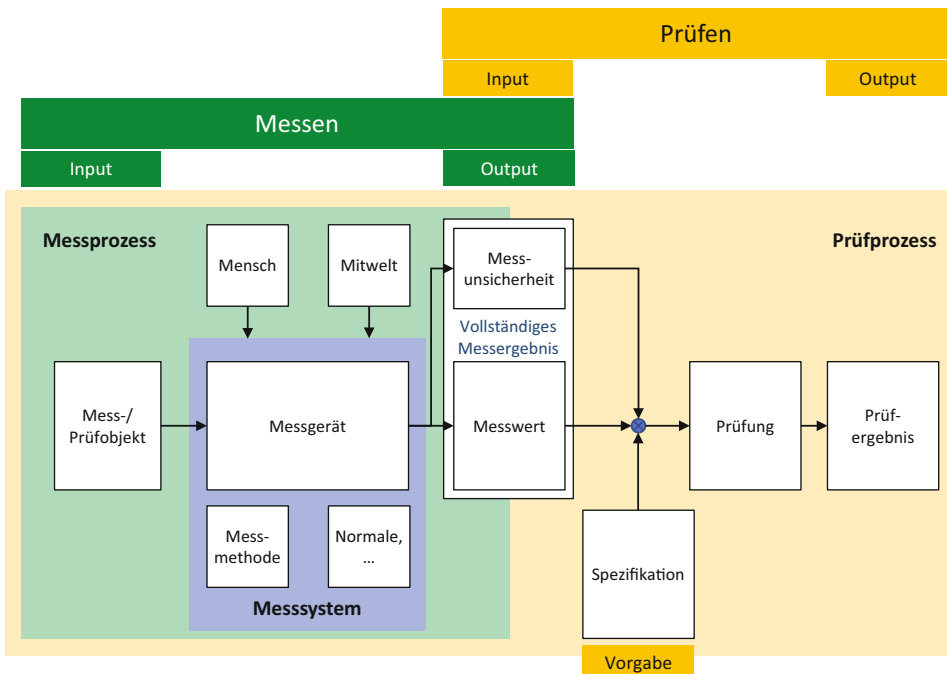


Bild 1.2 Variabler Prüfprozess – Messsystem, Messprozess und Prüfprozess
(Grafik in Anlehnung an VDA Band 5 (3. Aufl.) Abb. 3.1)

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.

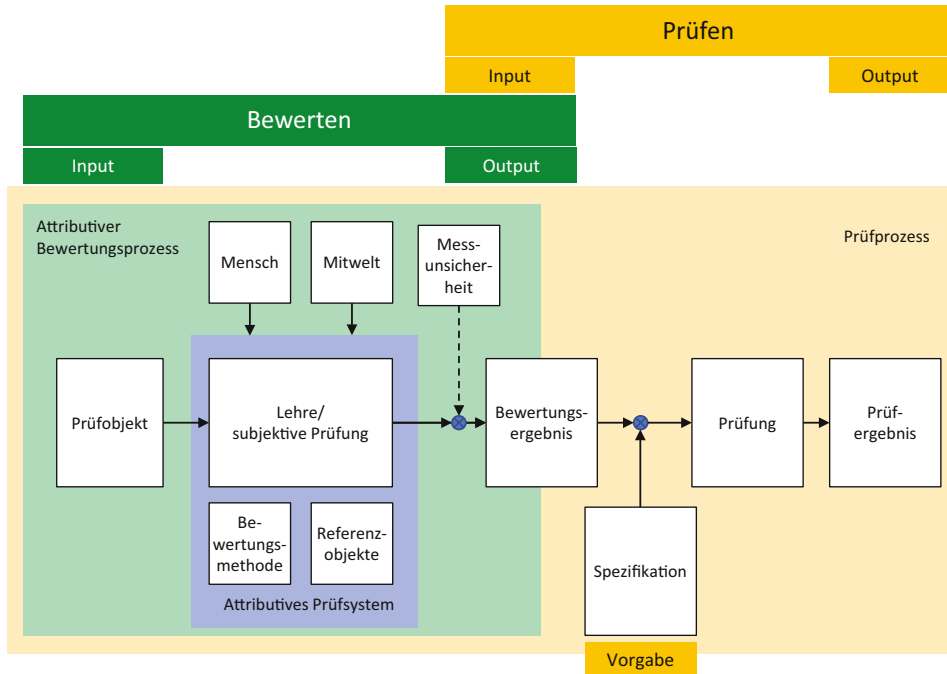


Bild 1.3 Attributiver Prüfprozess – Prüfsystem, Bewertungsprozess, Prüfprozess
(Grafik in Anlehnung an VDA Band 5 (3. Aufl.) Abb. 3.2)

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.

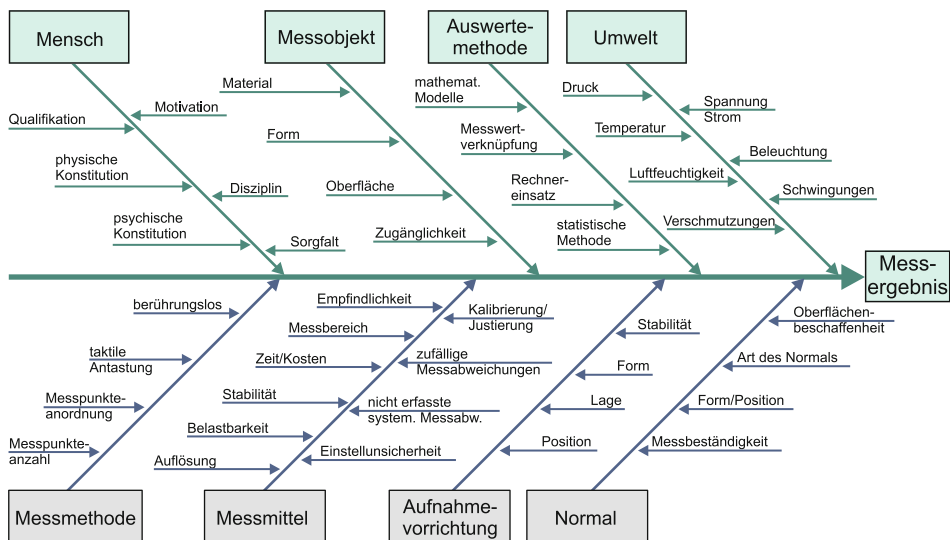


Bild 1.4 Wichtige Einflüsse auf die Unsicherheit von Messergebnissen; Quelle: VDA 5 (VDA 2021)



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.

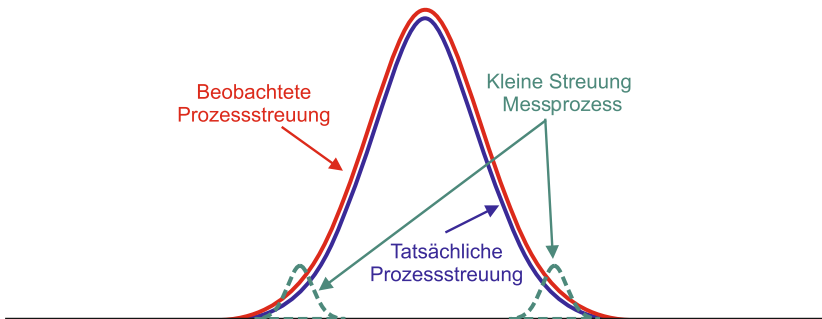


Bild 1.5 Beobachtete Prozessstreuung durch Messprozess kaum beeinflusst (Darstellung nicht maßgerecht)

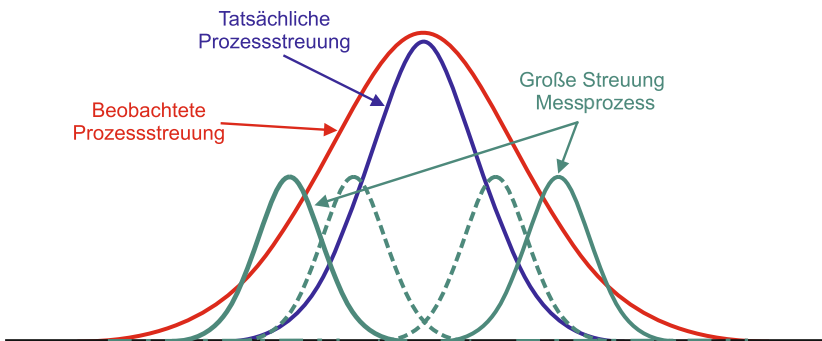


Bild 1.6 Beobachtete Prozessstreuung durch Messprozess beeinflusst (Darstellung nicht maßgerecht)

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 Fertigungsprozess- streuung s_{REAL}	Messprozess- streuung s_{MP}	Beobachtete Fertigungsprozess- streuung 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.

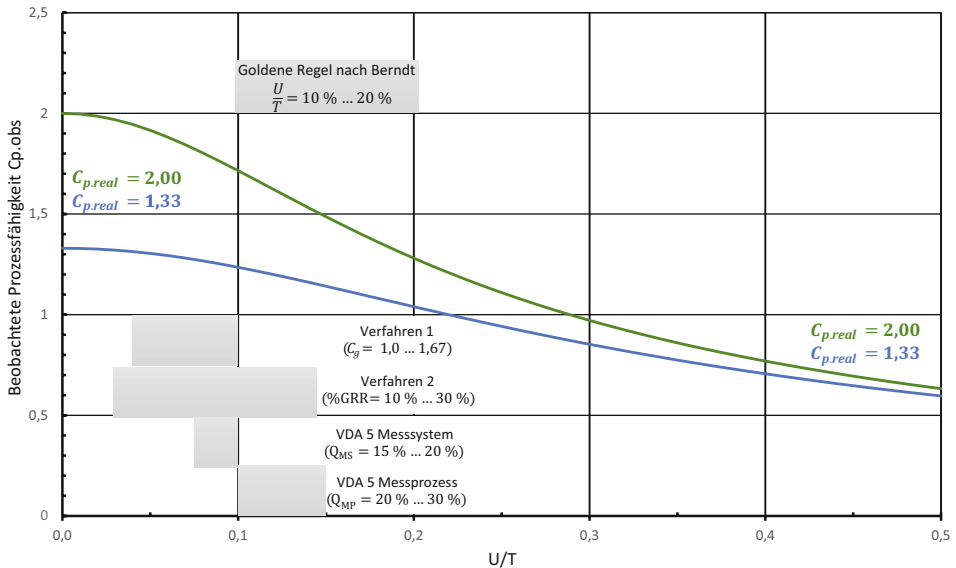


Bild 1.7 Einfluss von U/T auf Qualitätsfähigkeitsgröße C_p

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 $C_p = 1,7$.

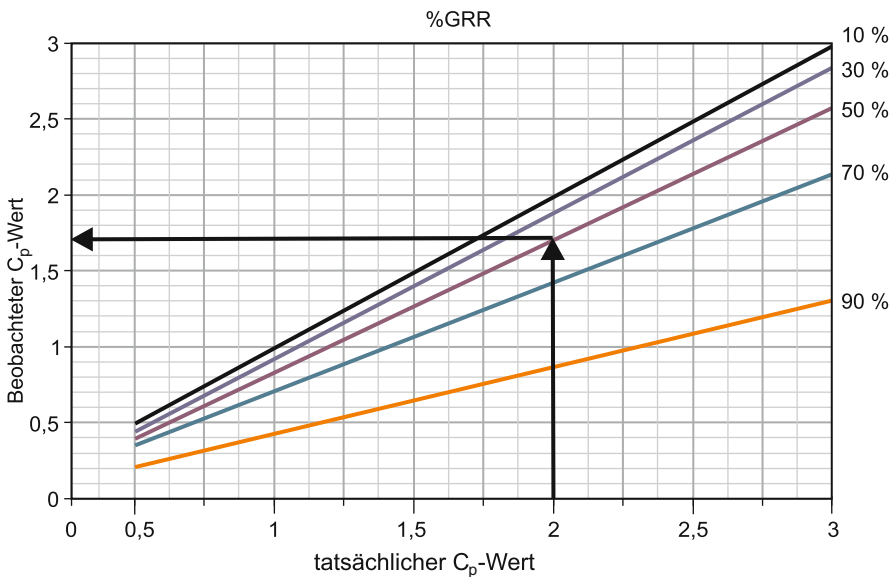


Bild 1.8 Einfluss von $\%GRR$ auf Qualitätsfähigkeitskenngröße C_p bei Prozessstreuung als Bezugsgröße

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.

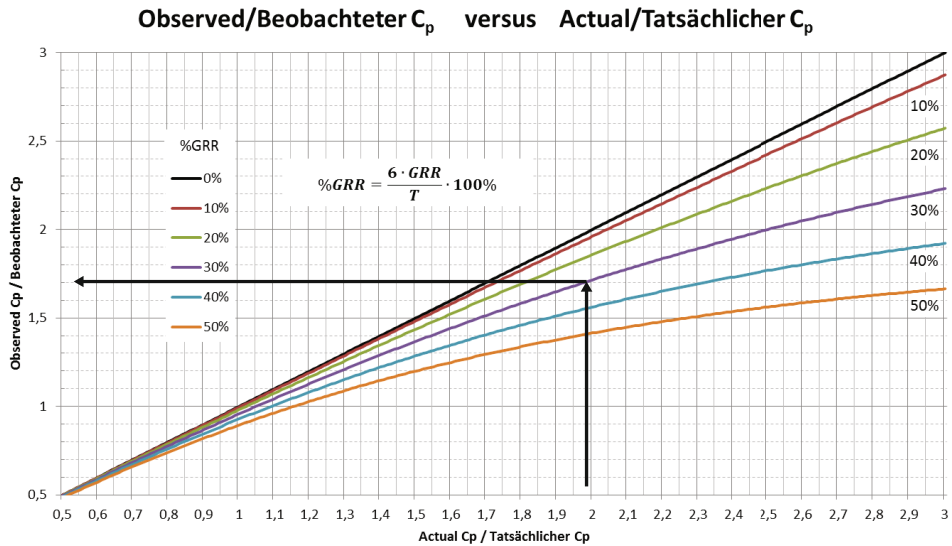


Bild 1.9 Einfluss von $\%GRR$ auf Qualitätsfähigkeitskenngröße C_p bei Toleranz als Bezugsgröße

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 Einzelteillfertigung 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.

Im Vorwort der 3. Auflage war noch zu lesen:

„In der Vergangenheit hatten Chrysler, Ford und General Motors jeweils ihre eigenen Richtlinien und Berichtsformate zur Sicherstellung der Lieferantenfähigkeit. Die unterschiedlichen Vorgaben in diesen Richtlinien führten dazu, dass die Lieferanten zusätzlichen Aufwand betreiben mussten. Um diese Situation zu verbessern, wurde eine Projektgruppe damit beauftragt, die von Chrysler, Ford und General Motors eingesetzten Referenzbücher, Verfahrensweisen, Berichtsformblätter und verwendete Begriffe und Benennungen zu vereinheitlichen.

Dieses Handbuch ist eine Einführung in die Messsystemanalyse. Es ist nicht beabsichtigt, die Entwicklung von Analysemethoden auf bestimmte Prozesse oder Produkte zu beschränken. Da diese Richtlinien Zustände von Messsystemen beschreiben, die sich auf Standardfälle beziehen, können weitere Fragen aufkommen. Richten Sie diese Fragen bitte direkt an die Abteilung Lieferantenqualitätssicherung (Supplier Quality Assistance, SQA) Ihres Kunden. Falls Sie nicht wissen, wie diese Abteilung zu erreichen ist, wenden Sie sich an den Einkäufer in der Einkaufsabteilung Ihres Kunden.“

Dieses Dokument wurde im Rahmen der Zertifizierung nach QS-9000 ab 1995 verbindlich vorgeschrieben. Zwar enthält das Dokument den Hinweis, dass auch andere Verfahren zulässig sind, diese sind allerdings mit dem jeweiligen Kunden abzustimmen, was in der Praxis in der Regel nur in Ausnahmefällen möglich ist. Daher hat dieses Dokument jeweils in der neuesten Fassung heute noch einen verbindlichen Charakter (s. (IATF, VDA 2016)).

Die erste Ausgabe der MSA enthielt noch viele Fehler und Unzulänglichkeiten. Vor allem wurden viele praxisrelevante Fälle nicht ausreichend berücksichtigt und Grenzwerte für die Eignung des Prüfprozesses gefordert, die oftmals nicht einzuhalten waren. Konsequenterweise waren die Firmen wieder aufgefordert, individuelle Anpassungen vorzunehmen. Das Ergebnis dieser Situation sind beispielsweise die eigenen Richtlinien bei Ford (Ford Motor Co. 1990) und General Motors (General Motors Co. – GM Powertrain 2010). Diese haben das umfassende Dokument MSA konkretisiert, um die Vorgehensweise in der Praxis besser umsetzen zu können. Weiterhin sind die Grenzwerte geändert.

Mittlerweile ist die MSA in der vierten Auflage erschienen. Viele Schwachstellen sind modifiziert, sodass das Dokument heute als brauchbares Lehrbuch angesehen werden kann. Die MSA lässt unterschiedliche Berechnungsmethoden zu. Konsequenterweise sind die Ergebnisse der jeweiligen Verfahren verschieden und damit nicht vergleichbar. Somit wird der Anwender nicht umhinkommen, aus der Vielzahl der in der AIAG MSA dargestellten Möglichkeiten eine für das Unternehmen verbindliche Verfahrensanweisung zu erstellen und gegebenenfalls mit eigenen Verfahren zu ergänzen.

In Deutschland war eine ähnliche Situation eingetreten. Es wurde in der Automobilindustrie viel Zeit und Geld investiert, um individuelle Vorgehensweisen zu entwickeln. Diese führen nur zu Irritationen und erzeugen noch mehr Kosten bei Lieferanten von Messgeräten und Zulieferern. Viel wichtiger war jedoch, dass man sich der Tatsache bewusst wurde, dass ein Messprozess umfassend zu beurteilen ist. Aufgrund der Komplexität wird dies in der Regel ohne praktische Versuche nicht gehen. Für eine sinnvolle Beurteilung ist es dabei wichtig, die einzelnen Komponenten (Einflüsse) möglichst einzeln bewerten zu können. Nur so können die Haupt-Einflussfaktoren ermittelt und entsprechende Abstellmaßnahmen ergriffen werden. Übertriebene und zum Teil aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbare Forderungen sind ebenfalls nicht angebracht. Dadurch entstand der Bedarf, gemeinsam Lösungen zu erarbeiten und Kompromisse zu finden.

Dies war Anlass, sich innerhalb der Automobilindustrie zu treffen und dieses Thema zu diskutieren. Das Ergebnis dieser Besprechungen war ein „Leitfaden der Automobilindustrie“ (Q-DAS GmbH 1999), den die Fa. Q-DAS® 1999 zusammen mit Vertretern der Automobilindustrie und Konzernen erstellt hat. Dieser ist im Anhang vollständig abgedruckt. Einige Firmen haben dieses Dokument als verbindliche Verfahrensanweisung hausintern vorgeschrieben. Es kann quasi als kleinster gemeinsamer Nenner bezeichnet werden. Andere Unternehmen haben den Leitfaden übernommen und einige Passagen individuell angepasst.

1.2.2 Entwicklung „Prüfprozesseignung“

1998 hat der Verband der Automobilindustrie (VDA) eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen. Diese sollte eine Empfehlung für den Eignungsnachweis eines Prüfprozesses erstellen. Mittlerweile liegt der VDA Band 5 „Mess- und Prüfprozesse“ (VDA 2021) in der 3. Auflage vor. Im Gegensatz zu den verschiedenen Kennwerten der Messsystemfähigkeitsuntersuchung wird im VDA Band 5 beschrieben, wie für die verschiedensten Einflussfaktoren die Standardunsicherheitskomponenten bestimmt werden, um daraus die erweiterte Messunsicherheit und Eignungsindizes für Messsystem und Messprozess berechnen zu können.

Die Entscheidung, diese Vorgehensweise zu wählen, ist in vielen Normen begründet. So fordert beispielsweise die DIN EN ISO 14253-1 (DIN 2018a) für geometrische Maße die Messunsicherheit eines Messprozesses zu bestimmen und diese an den Spezifikationsgrenzen zu berücksichtigen. In dem VDA Band 5 wird dazu eine praxisrelevante Vorgehensweise zur Bestimmung der Unsicherheitskomponenten vorgegeben.

Ähnlich wie bei der Fähigkeitsuntersuchung werden unter anderem Versuche durchgeführt und die Messergebnisse statistisch ausgewertet. Das Gesamtergebnis wird

ins Verhältnis zur Spezifikation (Toleranz) gesetzt, um letztendlich eine Aussage über die Eignung des Messsystems und -prozesses zu erhalten.

Erfahrungen bei der Anwendung der ersten Ausgabe des VDA Band 5 von 2003 haben gezeigt, dass die Vorgehensweise zur Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit nicht konkret genug war. Weiter sollten die von den weit verbreiteten Prüfmittelfähigkeitsuntersuchungen vorliegenden Ergebnisse integriert werden. Daher wurde der VDA Band 5 überarbeitet und 2010 als 2. Ausgabe veröffentlicht. Diese Ausgabe konnte nun Methoden aufzeigen, die sich auch in der Praxis bewähren konnten. Im Jahr 2021 erschien dann die 3. Auflage, mittlerweile erweitert um die Themen „Management und Planung von Mess- und Prüfprozessen“ (VDA 2021). Ergänzend dazu ist ein Praxishandbuch (VDA 2022) erschienen, das die Vorgehensweisen verdeutlicht, aber nicht zu den vertraglichen Vereinbarungen gehört, falls sich die Vertragsparteien auf den VDA Band 5 berufen.

■ 1.3 Anmerkung der Autoren zu MSA und VDA 5

Um einen Messprozess umfassend beurteilen zu können, muss man seine Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf das Messergebnis kennen. In der Vergangenheit hat man sich viel zu sehr auf das Messgerät konzentriert, ohne das Umfeld bzw. die verschiedensten Einflüsse zu berücksichtigen. Um die Haupteinflussfaktoren herauszufinden, müssen verschiedene Vorgehensweisen angewendet werden, damit deren Einfluss beurteilt werden kann. Dabei ist es zunächst einmal unabhängig davon, ob dies über die Vorgehensweise der MSA (AIAG 2010) (Fähigkeitsuntersuchung) oder des VDA Band 5 (VDA 2021) (erweiterte Messunsicherheit) erfolgt. Da man selbst einfachste Messprozesse in der Regel aus theoretischen Betrachtungen alleine nicht ausreichend exakt bestimmen kann, werden immer praktische Versuche notwendig sein. Diese Vorgehensweise sehen beide Betrachtungsweisen vor. In der MSA (AIAG 2010) ist zu dem Thema Vergleich der Messsystemfähigkeit mit der Messunsicherheit folgender Text enthalten:

„The major difference between uncertainty and the MSA is that the MSA focus is on understanding the measurement process, determining the amount of error in the process, and assessing the adequacy of the measurement system for product and process control. MSA promotes understanding and improvement (variation reduction). Uncertainty is the range of measurement values, defined by a confidence interval, associated with a measurement result and expected to include the true value of measurement.“

Ins Deutsche übersetzt lautet der Abschnitt etwa folgendermaßen:

„Der Hauptunterschied zwischen Unsicherheit und MSA besteht darin, dass der Schwerpunkt der MSA auf dem Verständnis des Messprozesses, der Bestimmung der Höhe der Abweichungen im Prozess und der Bewertung der Eignung des Messsystems für die Produkt- und Prozessregelung liegt. Die MSA fördert das Verständnis und die Verbesserung (Reduzierung der Abweichungen). Die Messunsicherheit ist der durch ein Konfidenzintervall definierte Bereich von Messwerten, der mit einem Messergebnis verbunden ist und voraussichtlich den wahren Messwert enthält.“

Diese Aussage ist mit Sicherheit zutreffend, wenn man den ISO/IEC Guide 98-3 (ISO 2008) nur von seiner theoretischen Seite betrachtet. Sie umfasst auch die derzeit gültige Definition der Messunsicherheit nach ISO/IEC Guide 99 (ISO 2007). Allerdings ist diese Interpretation nicht umfassend und berücksichtigt nicht, dass der ISO/IEC Guide 98-3 (ISO 2008) im Kapitel Anwendungsbereich (Scope) selbst erklärt, dass auf Basis dieses Leitfadens weitere Papiere entwickelt werden können, die sich mit den verschiedenen Verwendungszwecken quantitativer Unsicherheitsangaben befassen:

„Further, it does not discuss how the uncertainty of a particular measurement result, once evaluated, may be used for different purposes, for example, to draw conclusions about the compatibility of that result with other similar results, to establish tolerance limits in a manufacturing process, or to decide if a certain course of action may be safely undertaken. It may therefore be necessary to develop particular standards based on this Guide that deal with the problems peculiar to specific fields of measurement or with the various uses of quantitative expressions of uncertainty. These standards may be simplified versions of this Guide but should include the detail that is appropriate to the level of accuracy and complexity of the measurements and uses addressed.“

Ins Deutsche übersetzt lautet der Abschnitt etwa folgendermaßen:

„Darüber hinaus wird nicht erörtert, wie die Unsicherheit eines bestimmten Messergebnisses nach seiner Bewertung für verschiedene Zwecke verwendet werden kann, z. B. um Rückschlüsse auf die Kompatibilität dieses Ergebnisses mit anderen ähnlichen Ergebnissen zu ziehen, um Toleranzgrenzen in einem Fertigungsprozess festzulegen oder um zu entscheiden, ob eine bestimmte Maßnahme sicher durchgeführt werden kann. Daher kann es notwendig sein, auf der Grundlage dieses Leitfadens spezielle Normen zu entwickeln, die sich mit den besonderen Problemen bestimmter Messbereiche oder mit den verschiedenen Verwendungszwecken quantitativer Unsicherheitsangaben befassen. Diese Normen können vereinfachte Fassungen dieses Leitfadens sein, sollten aber so detailliert sein, wie es dem Genauigkeitsgrad und der Komplexität der behandelten Messungen und Verwendungszwecke angemessen ist.“

Auf dieser Basis beruht die Interpretation der Messunsicherheit und des Eignungsnachweises gemäß dem VDA Band 5 (VDA 2021).

Aus Sicht der Autoren ist aber auch die obige Schlussfolgerung der AIAG MSA nicht korrekt, die AIAG MSA sein mit Messunsicherheit nicht kompatibel. Genau das Gegenteil ist der Fall. Die MSA in der dritten und insbesondere in der vierten Auflage hat sich eher in Richtung Messunsicherheitsbetrachtung gewandelt. Es werden Unsicherheitskomponenten betrachtet und bei der Bestimmung der entsprechenden Kenngrößen berücksichtigt. In der vierten Auflage werden die gleichen Standardunsicherheitskomponenten betrachtet und berechnet, wie es bei der Vorgehensweise im VDA Band 5 der Fall ist. Damit sind die Zwischenergebnisse vergleichbar mit einer Standardunsicherheitskomponente im Sinne der Bestimmung der Messunsicherheit. Dass die AIAG MSA in einigen weiteren Verfahren die Einflussgrößen betrachtet, dann aber auf statistische Signifikanztests abweicht, anstatt die Messunsicherheit zu berechnen, steht dieser Sichtweise nicht entgegen.

Bei der Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit nach der ISO/IEC Guide 98-3 (ISO 2008) werden zunächst einzelne Standardunsicherheitskomponenten bestimmt, aus denen dann die kombinierte Standardunsicherheit berechnet wird. Ist eine Einflussgröße klein gegenüber den anderen, kann diese vernachlässigt werden, da sie keinen Beitrag zum Endergebnis liefert. Bei der MSA wird beispielsweise bei der systematischen Messabweichung keine Standardunsicherheitskomponente berechnet. Dafür fordert man, dass die systematische Messabweichung nicht signifikant nachgewiesen werden kann (s. Abschnitt 4.2.3) und damit keine Auswirkung auf das Gesamtergebnis hat. Damit ist im Endeffekt das Gleiche erreicht, da durch diese Forderung die Auswirkungen dieser Einflusskomponente vernachlässigbar klein werden.

Problematisch wird es bei solchen kleinteiligen Forderungen für einzelne Verfahren allerdings, wenn die Ergebnisse mehrfach grenzwertig sind oder vorgegebene Grenzwerte nicht eingehalten werden können. Es fehlt dann die übergreifende Bewertung unter Berücksichtigung aller Teilergebnisse. Auch können Anforderungen der DIN EN ISO 14253-1 (DIN 2018a) nicht erfüllt werden, die die Berücksichtigung der Messunsicherheit beim Konformitätsentscheid fordert. Hierin liegen mit Sicherheit die Stärken der Bestimmung der Messunsicherheit, mit der die Schutzabstände an den Spezifikationsgrenzen berechnet werden können.

Die weitere formale Vorgehensweise bei AIAG MSA und VDA Band 5 ist weitgehend gleich. Es wird ein Streubereich des Messergebnisses berechnet, bei AIAG MSA der Wert GRR (Gage, Repeatability and Reproducibility $\triangleq$ Wiederholpräzision und Vergleichpräzision), im VDA Band 5 die zweifache erweiterte Messunsicherheit $2 \cdot U$. Dieser Streubereich wird dann mit der Toleranz des Merkmals verglichen, wobei die AIAG auch weitere Bezugsgrößen (im Wesentlichen die Fertigungsstreuung mit drei verschiedenen Methoden der Schätzung) zulässt. Die konkreten

Zahlenwerte sind nicht direkt vergleichbar, da meist mit verschiedenen Erweiterungsfaktoren für unterschiedliche Überdeckungswahrscheinlichkeiten/Vertrauensbereiche gerechnet wird (meist 95 %, 99 % oder 99,73 %).

Beide resultierenden Kennzahlen werden mit Grenzwerten verglichen. Werden die Grenzen eingehalten, gilt der Prüfprozess unabhängig von der Vorgehensweise als geeignet.

Eine Schwachstelle bei der MSA ist, dass Messprozesse freigegeben werden und trotzdem Fehlentscheidungen an den Spezifikationsgrenzen möglich sind. Um diese zu vermeiden, ist es besser, die Messunsicherheit zu bestimmen und an den Spezifikationsgrenzen zu berücksichtigen.



HINWEIS: Im Gegensatz zur MSA beschäftigt sich der VDA Band 5 auch mit weiteren Einflusskomponenten wie „Temperatur“, Objekteinfluss bzw. weiteren Einflüssen, die im Einzelfall näher spezifiziert werden müssen.

■ 1.4 Experimentelle Beurteilung

Unabhängig davon, ob es sich um eine Messsystemfähigkeitsuntersuchung im Sinne der MSA (AIAG 2010) handelt oder um Eignungsnachweise für Prüfprozesse im Sinne der GUM ISO/IEC Guide 98-3 (ISO 2008) bzw. VDA Band 5 (VDA 2021), sind experimentelle Beurteilungen des Prüfprozesses unumgänglich. Selbst der ISO/IEC Guide (ISO 2008) argumentiert in Abschnitt 3.4.2:

„A well-designed experiment can greatly facilitate reliable evaluations of uncertainty and is an important part of the art of measurement.

(Frei übersetzt: Ein gut geplantes Experiment kann die zuverlässige Bewertung der Unsicherheit erheblich erleichtern und ist ein wichtiger Teil der Kunst des Messens.)“

Sicherlich sind theoretische Überlegungen, welche Einflussfaktoren wirken, wichtig. Allerdings kann aus den Überlegungen heraus deren wahre Auswirkung nur bedingt abgeschätzt werden. Die folgende Situation soll diesen Sachverhalt verdeutlichen.

In Bild 1.10 ist zur Überprüfung der Höhe eines Ventilsitzes ein Messprozess dargestellt. An einem Stativ ist ein Langwegtaster eingebaut. Seine systematische Messabweichung über den gesamten Messbereich ist vom Hersteller mit 0,07 mm angegeben. Ein entsprechender Kalibrierschein liegt vor. Der Taster kann pneumatisch angehoben werden, sodass immer gleiche Antastverhältnisse herrschen. Vor jeder Wiederholungsmessung wird das Parallelendmaß von der Platte entfernt. Die Anzeige hat eine Auflösung von 0,3 mm. Die Untersuchung findet in diesem

Fall in einem Seminarraum eines Hotels statt. Zunächst soll die systematische Messabweichung und die Gerätestreuung (Wiederholpräzision) ermittelt werden. Zur Ermittlung der beiden Kenngrößen werden Wiederholungsmessungen an einem Parallelendmaß durchgeführt.



Bild 1.10 Langwegtaster mit Stativ

Die Fragestellung, welche Einflussgrößen wirken, wird mit den Seminarteilnehmern diskutiert. Diese haben praktische Erfahrungen in der Messtechnik. Weiter wird die zu erwartende Wiederholpräzision erörtert. Im Rahmen der Diskussion werden in der Regel folgende Einflussparameter genannt:

- Temperatureinfluss
- Veränderung des Endmaßes durch das Anfassen
- Unsicherheit durch verschiedene Antastpunkte am Endmaß
- unterschiedliche Antastgeschwindigkeit
- Schwingungen und Erschütterungen am Tisch
- Verunreinigungen

Bei der Frage, welche Streuung bei 25 Messungen zu erwarten ist, gehen die Meinungen meist sehr weit auseinander. Sie liegen bei diesem Messaufbau zwischen 0,5 bis 5 μm . Nach der Erörterung des Messprozesses führt ein Seminarteilnehmer die Messungen durch. Dazu wird er kurz in die Handhabung des Messgerätes eingewiesen.

Zunächst wird die Anzeige auf null gestellt und mehrere Wiederholungsmessungen auf der Grundplatte durchgeführt. Diese Messungen haben sich als stabil her-

ausgestellt. Die Anzeige war auch nach 5 Wiederholungsmessungen immer noch auf 0,0 mm gestanden. Anschließend werden 25 Wiederholungsmessungen an dem Endmaß durchgeführt, der Taster pneumatisch angehoben und das Endmaß von der Grundplatte genommen. Zwischen jeder Messung wird immer versucht, möglichst in der Mitte des Endmaßes anzutasten. Der Bediener sieht die Messergebnisse nicht, diese werden protokolliert und in Form eines Werteverlaufs (Bild 1.11) dargestellt.

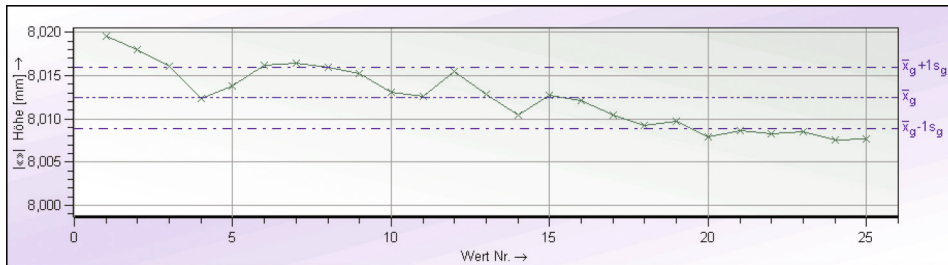


Bild 1.11 Werteverlauf (1. Durchgang)

Die Überraschung der Teilnehmer über das Ergebnis ist sehr groß. Die statistischen Kennwerte sind in Bild 1.12 zusammengefasst. Der Größtwert liegt bei fast 20 μm , die Spannweite ist 12 μm und die Standardabweichung liegt bei 3,5 μm . Dann ist der Werteverlauf noch entgegen der ursprünglichen Annahme fallend. Dieser müsste mit der Zeit bei zunehmender Temperatur des Normals steigen. Offen bleibt auch die Frage: „Woher kommt der fallende Trend?“

Zeichnungswerte		Gemessene Werte		Statistische Werte	
x_m	= 8,000000			$\bar{x}_g$	= 8,012448
USG	= 7,9750	$x_{\min g}$	= 8,0076	s_g	= 0,0035102
OSG	= 8,0250	$x_{\max g}$	= 8,0196	$ Bi = \bar{x}_g - x_m $	= 0,0124
T	= 0,0500	R_g	= 0,0120		
		n_{ges}	= 25	n_{eff}	= 25

Bild 1.12 Ergebnisse (1. Durchgang)

Die Lösung dieser Frage ist relativ einfach. Das Parallelendmaß und die Auflagefläche wurden nicht ausreichend gereinigt. Hier reicht schon der Fingerabdruck auf Grundplatte und Endmaß. Weiter wurde das Parallelendmaß bei den Wiederholungsmessungen nicht angesprengt bzw. „angebratz“.

Werden Auflagefläche und Parallelendmaß gereinigt und vor jeder Messung das Endmaß an der Grundfläche angebratz, ergibt sich ein völlig anderes Bild. Die Messwerte sind in Bild 1.13 dargestellt und die numerischen Ergebnisse in Bild 1.14 zusammengefasst. Die neuen Ergebnisse sind um über den Faktor 10 besser.

Die Skalierung der y-Achse in Bild 1.14 ist um den Faktor 5(!) größer als in Bild 1.11. Damit hat eine relativ einfache und kostenneutrale Maßnahme zu dieser dramatischen Verbesserung geführt.

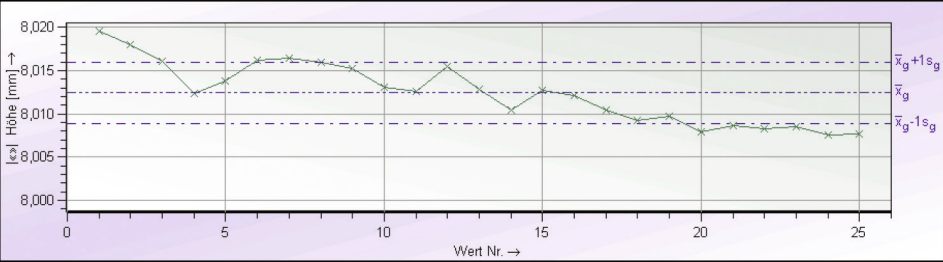


Bild 1.13 Werteverlauf (2. Durchgang)

Zeichnungswerte		Gemessene Werte		Statistische Werte	
x_m	= 8,000000			$\bar{x}_g$	= 8,012448
USG	= 7,9750	$x_{min.g}$	= 8,0076	s_g	= 0,0035102
OSG	= 8,0250	$x_{max.g}$	= 8,0196	$ \text{Bi} = \bar{x}_g - x_m $	= 0,0124
T	= 0,0500	R_g	= 0,0120		
		n_{ges}	= 25	n_{eff}	= 25

Bild 1.14 Ergebnisse (2. Durchgang)

Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass allein aus theoretischen Überlegungen heraus diese Größenordnung der Einflüsse nicht abgeschätzt werden kann. Wichtig ist dann im nächsten Schritt, dass die getroffenen Maßnahmen bei dem realen Prozess auch umgesetzt und überwacht werden. Ansonsten muss mit einer wesentlich höheren Unsicherheit des Messergebnisses gerechnet werden. Die hier beschriebene Situation konnte in den letzten Jahren bei vielen Seminaren beobachtet werden. Ganz selten hat die Gruppe bzw. der Bediener den Sachverhalt sofort richtig eingeschätzt.