

Das Geheimnis der Messunsicherheit

Oder: ihre Bedeutung für die Qualitätssicherung in der Messtechnik

EMIL GÜMÜSDAGLI

Was ist eigentlich Messunsicherheit? Das Internationale Wörterbuch der Metrologie [1] definiert Messunsicherheit wie folgt: „Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“. Der Beitrag soll hier Aufklärung bringen und vor allem den Ursachen der Messunsicherheit, ihrer Berechnung und der Wichtigkeit ihrer Kenntnis auf den Grund gehen.

Diese Darstellung im Wörterbuch weckt zunächst das Vertrauen des Lesers, der hinter der Kürze der Formulierung inhaltlich nicht allzuviel vermutet. Der Begriff, der dem fachlich unbelasteten Leser auffällt, ist die „Streuung“. Frohen Mutes liest man dann in den zugehörigen, folgenden Anmerkungen weiter und erhofft vollständige Aufklärung:

1. Der Parameter kann beispielsweise eine Standardabweichung (oder ein gegebenes Vielfaches davon), oder die halbe Weite eines Bereiches sein, der ein festgelegtes Vertrauensniveau hat.
2. Messunsicherheit enthält in allgemeinen viele Komponenten. Einige dieser Komponenten können aus der statistischen Verteilung der Ergebnisse einer Messreihe ermittelt und durch empirische Standardabweichungen gekennzeichnet werden. Die anderen Kompo-

nenten, die ebenfalls durch Standardabweichungen charakterisiert werden können, werden aus angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt, die sich auf Erfahrung oder andere Information gründen.

3. Es wird vorausgesetzt, dass das Messergebnis der beste Schätzwert für den Wert der Messgröße ist, und dass alle Komponenten der Unsicherheit zur Streuung beitragen, eingeschlossen diejenigen, welche von systematischen Einwirkungen herrühren, z.B. solche, die von Korrekturen und Bezugsnormalen stammen.

Die Interpretation dieser Anmerkungen erfordert vom Leser Grundlagenkenntnisse der Statistik sowie das Verständnis für die verwendete Terminologie. Und hier scheint das Geheimnis der Messunsicherheit zu beginnen. Grundlagenkenntnisse der Statistik können bei der eigentlichen Zielgruppe nicht unbedingt vorausgesetzt werden. Darüber hinaus hat sich die verwendete Terminologie in den letzten drei Jahrzehnten verändert, so dass je nach Alter und Bildungsstand vielleicht das gleiche gesagt aber etwas anderes gemeint wird.

Ursachen der Messunsicherheit

Wird eine Messung unter den gleichen Bedingungen wiederholt, so erhält man Ergebnisse, die infolge von zufälligen Einflüssen z.B. durch Schwankungen der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit usw.) streuen. Weitere Quellen für die Streuung sind systematische Einflüsse, wie z.B. die zeitliche Drift eines Messgerätes, die nur annähernd bekannt ist oder nicht exakt korrigiert werden kann.

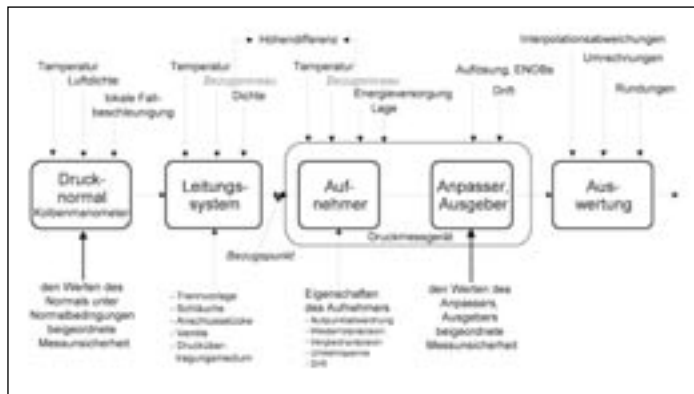


Bild 1: Einflussgrößen bei der Kalibrierung eines Druckmessgerätes [6]



Bild 2: Kalibrierhierarchie vom nationalen Normal bis zum Produkt [7]

Berechnung der Messunsicherheit

Zuerst ermittelt man alle zufälligen und systematischen Einflüsse, die durch das Bezugsnormal, das Verfahren und den Kalibriergegenstand verursacht werden. Dies kann in erster Näherung durch Analyse der physikalischen Zusammenhänge der entsprechenden Messgröße sowie durch Auswertung der Messdaten erfolgen. Bild 1 zeigt z.B. mögliche Einflussgrößen bei der Kalibrierung von Druckmessgeräten. Ein Beispiel bei der Kalibrierung eines digitalen elektrischen Druckmessgerätes mit einem Kolbenmanometer:

1. Unsicherheiten, die dem Bezugsnormal zugeordnet werden können
Das Kolbenmanometer folgt einem einfachen physikalischen Prinzip: $\text{Druck} = \text{Kraft} / \text{Fläche}$ (mit $\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$)

Der Druck, der durch das Kolbenmanometer dargestellt wird, ist abhängig von der Masse der Belastungskörper, der örtlichen Fallbeschleunigung und der Kolbenfläche. Die Unsicherheit der Belastungskörper, die der Kolbenfläche sowie die des Bezugsnormals unter Referenzbedingungen kann dem Kalibrierschein des Kolbenmanometers entnommen werden. Die Fallbeschleunigung (Schwerewert) ist ortsabhängig, d.h. sie ist abhängig von der geographischen Breite sowie Länge, von der Höhe über Normalnull und von lokalen Anomalien. Auskunft über die lokale Fallbeschleunigung in der BRD gibt die Literatur, z.B. F. Kohlrausch Praktische Physik

[7], das Schwerearchiv des Geodätischen Forschungsinstitutes in München oder auch eine Messung der lokalen Fallbeschleunigung z.B. durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Frankfurt am Main. Jede dieser Angaben, ist mit einer Unsicherheit behaftet, welche in der Regel von der Angabe in der Literatur über die Auskunft des Schwerearchivs bis hin zur lokalen Messung durch das Bundesamt abnimmt. Die Gewichtskraft sowie die Kolbenfläche sind darüber hinaus von Umgebungsbedingungen abhängig.

Jede Masse erfährt durch das umgebende Medium einen Auftrieb. Die Gewichtskraft der Belastungskörper muss demnach um die Auftriebskraft korrigiert werden. Die Dichte der Körper sowie eine Angabe über die zugehörige Unsicherheit erhält man vom Hersteller oder entnimmt sie der einschlägigen Literatur. Hier ist offensichtlich, dass sich die Unsicherheit mit der diese Daten behaftet sind, unterscheiden können. Je detaillierter die Informationen sind, desto geringer scheint die resultierende Unsicherheit zu sein. Eine hohe Messunsicherheit kann man daher auch als Informationsdefizit interpretieren was uns im weiteren zum Qualitätsbegriff führt.

Kehren wir nach diesem kurzen Exkurs wieder zur Auftriebskorrektur zurück. Sie kann also nur erfolgen, wenn nicht nur die Luftdichte sondern auch die Dichte der Belastungskörper bekannt ist. Die Luftdichte ist in erster Näherung abhängig von der Temperatur, dem Luftdruck und der Luftfeuchtigkeit. Auch die Kolbenfläche ist abhängig von der Temperatur. Darüber hinaus ist sie abhängig vom Druck und von der Viskosität des Mediums, welches zur Druckübertragung verwendet wird. Selbst wenn alle diese Größen durch geeignete Messverfahren bestimmt werden, bleiben sie mit einer Unsicherheit behaftet. Die Gesamtunsicherheit des Kolbenmanometers ist somit von verschiedenen Unsicherheitsbeiträgen bzw. Parametern abhängig. Natürlich sind alle Größen mehr oder weniger signifikant und können ggf. vernachlässigt werden. Eine Beurteilung ist aber erst dann möglich, wenn man eine quantitative Aussage treffen kann.

2. Unsicherheiten, die dem Verfahren zugeordnet werden können.

Die Ermittlung der Höhendifferenz zwischen dem Bezugsnorm und dem Kalibriergegenstand ist mit einer Unsicherheit behaftet. Auf weitere verfahrensbedingte Aspekte soll hier nicht weiter eingegangen werden.

3. Unsicherheiten, die dem Kalibriergegenstand zugeordnet werden können

Hier ergeben sich durch die Auswertung der empirisch (gr.-lat. aus Erfahrung/ Beobachtung erwachsen) gewonnenen

Daten, Größen wie die Nullpunktabweichung, die Wiederholpräzision, die Vergleichspräzision, die Hysterese usw.. Auch die Anzeigauflösung des Kalibriergegenstandes kann einen erheblichen Beitrag zur Messunsicherheit liefern.

Sind alle Einflussgrößen quantifiziert, ist der Rest nur noch Statistik. Die ermittelten Unsicherheiten werden in einem Budget zusammengefasst und jeweils durch eine Verteilungsfunktion charakterisiert. Die Wahl der Verteilungsfunktion hängt dabei vom statistischen Verhalten der einzelnen „Unsicherheit“ ab. Die resultierenden Beiträge werden anschließend quadriert und addiert. Die Summe dieser Beiträge nennt man dann Varianz (lat. die mittlere quadratische Abweichung einer zufällig Veränderlichen von ihrem Mittelwert).

Berechnet man die Quadratwurzel der Varianz, so erhält man die Standardabweichung. Die erweiterte Messunsicherheit berechnet man durch Multiplikation der Standardabweichung mit einem Erweiterungsfaktor k , der in Abhängigkeit der vorherrschenden Verteilungsfunktion im Messunsicherheitsbudget eine Überdeckungswahrscheinlichkeit definiert. Bei vorwiegend normalverteilten Beiträgen ist $k = 2$ was eine 95 % Überdeckungswahrscheinlichkeit beschreibt, d.h., das sich der Schätzwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im angegebenen Wertintervall befindet. Das Messergebnis besteht aus dem Schätzwert (hier arithmetische Mittelwert der beobachteten Werte) und der mit dem Erweiterungsfaktor multiplizierten Standardabweichung (erweiterte Messunsicherheit).

Exemplarische Berechnungen der Messunsicherheit findet man in den Richtlinien des Deutschen Kalibrierdienstes DKD. Unter der Web Adresse www.dkd.info stehen verschiedene Dokumente zur Verfügung. Insbesondere sind hier DKD-3 Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen sowie DKD-3-E1 Ergänzung 1 zu DKD-3 (Beispiele) [4] und DKD-3-E2 Ergänzung 2 zu DKD-3 (Zusätzliche Beispiele) [5] zu empfehlen. Hier wird für verschiedene Messaufgaben eine Messunsicherheitsberechnung durchgeführt.

Kenntnis über die Messunsicherheit

Die Messunsicherheit charakterisiert die Qualität einer Messung und erlaubt darüber hinaus, die Konformität eines Messgerätes mit Bezug auf seine Spezifikationen festzustellen. Wird dieses Messgerät anschließend zur quantitativen Ermittlung einer Messgröße eingesetzt, ist die Messunsicherheit, die dem zugehörigen Kalibrierschein entnommen werden kann, wieder nur ein Teil eines zu erstellenden Gesamtbudgets (**Bild 2**).

Nur das vollständige Messergebnis, d.h. Messwert einschließlich Messunsicherheit, ermöglicht dann die Beurteilung, ob Grenzwerte, die z.B. in normativen Dokumenten (Normen, Richtlinien usw.) festgelegt sind, eingehalten werden. Die Kenntnis der Unsicherheitsbeiträge erlaubt es weiterhin, Messverfahren an geeigneter Stelle zu verbessern, Grenzen für Umgebungsbedingungen zu bestimmen oder auch Messgeräte vor dem Hintergrund der Kostenoptimierung auszuwählen. Die Messunsicherheit sollte daher grundsätzlich gemäß Leitfaden für die Angabe der Unsicherheit beim Messen GUM [2] bestimmt werden. Nur so ist gewährleistet, dass sie nach dem selben Verfahren ermittelt werden und somit vergleichbar sind.

Dipl. Phys.-Ing. Emil Gümüşdağlı ist Technischer Leiter bei der Ametek GmbH in Meerbusch

Literatur

- [1] *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology second edition, 1993, International Organization for Standardization (Genf). Deutsche Übersetzung: Internationales Wörterbuch der Metrologie; 2. Auflage, 1994, Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, ISBN 3-410-13086-1, Berlin-Wien-Zürich.*
- [2] *Leitfaden für die Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Übersetzung des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), 1. Auflage, 1995, Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.*
- [3] *DKD-3 Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen; Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02 (1997); herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 1998.*
- [4] *DKD-3-E1 Ergänzung 1 zu DKD-3 (Beispiele) Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S1 (1997); herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 1998.*
- [5] *DKD-3-E2 Ergänzung 2 zu DKD-3 (Zusätzliche Beispiele); Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S2 (1999); herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 1999.*
- [6] *DKD-R 6-1 Kalibrierung von Druckmessgeräten Herausgegeben von der Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Zusammenarbeit mit seinem Fachausschuss „Druck und Vakuum“, Braunschweig, Web-Seite des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD); www.dkd.info/de/publikationen/publikation.htm; Stand März 2002.*
- [7] *F. Kohlrausch Praktische Physik Band 3; 24., neubearbeitete und erweiterte Auflage; herausgegeben von Volkmar Klose und Sigfried Wagner B.G. Teubner Stuttgart 1996 (Stuttgart).*
- [8] *Abbildung 2 Kalibrierhierarchie; Vom nationalen Normal bis zum Produkt; Web-Seite der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt; www.ptb.de/de/wegweiser/industriekunden/kalibrierhierarchie.html; Stand 28.08.2001*