

# Das Geheimnis der Messunsicherheit

**Messunsicherheiten und ihre Bedeutung für die Qualitätssicherung in der Messtechnik werden in vielen Fällen nicht genügend berücksichtigt.**

Das Internationale Wörterbuch der Metrologie [1] definiert Messunsicherheit wie folgt: „... ist der dem Messergebnis zugeordnete Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“.

Diese Darstellung weckt zunächst das Vertrauen des Lesers, der hinter der Kürze der Formulierung inhaltlich nicht besonders viel vermutet. Der Begriff, der dem fachlich unbelasteten Leser auffällt, ist die „Streuung“. Frohen Mutes liest man dann in den zugehörigen Anmerkungen weiter und erhofft vollständige Aufklärung. Der Parameter kann beispielsweise eine Standardabweichung (oder ein gegebenes Vielfaches davon), oder die halbe Weite eines Bereiches sein, der ein festgelegtes Vertrauensniveau hat.

Hierzu ist folgendes anzumerken: Messunsicherheit enthält im allgemeinen viele Komponenten. Einige dieser Komponenten können aus der statistischen Verteilung der Ergebnisse einer Messreihe ermittelt und durch empirische Standardabweichungen gekennzeichnet werden. Die anderen Komponenten, die ebenfalls durch Standardabweichungen charakterisiert werden können, werden aus angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt, die sich auf Erfahrung oder andere Information gründen.

Es wird vorausgesetzt, dass das Messergebnis der beste Schätzwert für den Wert der Messgröße ist,

und das 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 hiermit 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.

Die folgenden Fragen werden bei Lehrveranstaltungen zu dieser Thematik häufig gestellt:

- Was sind die Ursachen der Messunsicherheit?
- Wie berechnet man die Messunsicherheit?
- Warum ist die Kenntnis der Messunsicherheit eigentlich so wichtig?
- Was sind die Ursachen der Messunsicherheit?
- Wie wird die Messunsicherheit berechnet?

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, z. B. die zeitliche Drift eines Messgerätes, die nur annähernd bekannt ist oder nicht exakt korrigiert werden kann.

Die Streuung der Ergebnisse ist nicht nur abhängig von apparativen und umgebungsabhängigen Randbedingungen sondern auch vom Beobachter. Hierbei gibt es zufällige sowie auch systematische Einflüsse, die von den Fähigkeiten, der Tagesform und dem Grad der Objektivität des Beobachters abhängen.

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. Die schematische Abbildung der Kalibrierung eines Druckmessgerätes [6] zeigt z. B. mögliche Einflussgrößen auf.

## Einflussgrößen bei der Kalibrierung eines Druckmessgerätes

1. Unsicherheiten, die dem Bezugsnormal zugeordnet werden können: Das Kolbenmanometer folgt einem einfachen physikalischen Prinzip: Druck = Kraft / Flä-

che mit Kraft = Masse x 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 Unsicherheit der Kolbenfläche sowie die Unsicherheit 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 Mün-

chen 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.

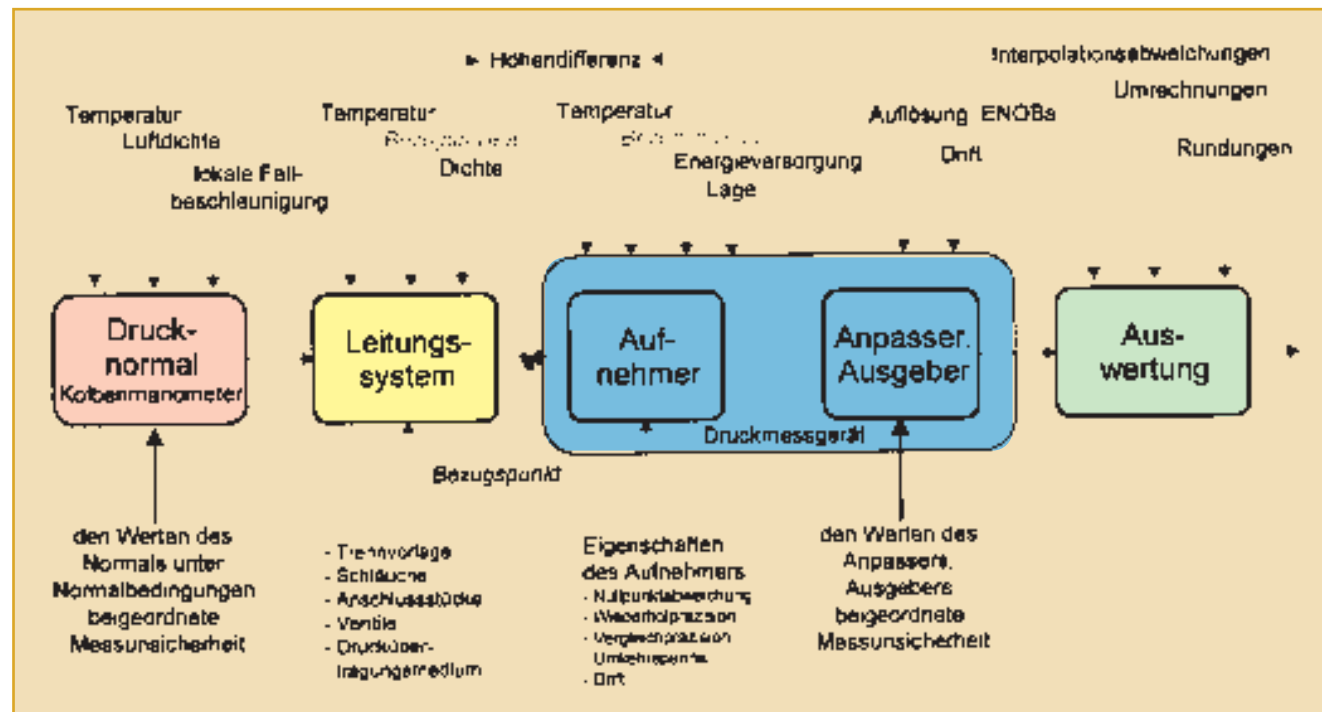
Die Gewichtskraft sowie die Kolbenfläche sind darüber hinaus von Umgebungsbedingungen abhängig.

Jede Masse erfährt durch das umgebende Medium einen Auftrieb. Die Gewichtskraft der Belastungskörper muss demnach um die Auftriebskraft korrigiert werden. Die Dichte der Belastungskörper sowie eine Angabe über die zugehörige Unsicherheit erhält man vom Hersteller oder entnimmt sie der einschlägigen Literatur. Hierbei ist of-

fensichtlich, 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 die Kolbenfläche abhängig vom Druck und von der Viskosität des Mediums, welches zur Druck-



**Einflussgrößen bei der Kalibrierung eines Druckmessgerätes [6] am Beispiel der Kalibrierung eines digitalen elektrischen Druckmessgerätes mit einem Kolbenmanometer.**

übertragung 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 Bezugsnormal und dem Kalibriergegenstand ist mit einer Unsicherheit behaftet. Auf weitere verfahrensbedingte Unsicherheiten wird nachfolgend nicht weiter eingegangen.

3. Unsicherheiten, die dem Kalibriergegenstand zugeordnet werden können: Hier ergeben sich durch die Auswertung der empirisch gewonnenen Daten Größen wie die Nullpunktabweichung, die Wiederhol-

präzision, 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 zusammenge-

fasst 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 (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%ige Überdeckungswahrscheinlichkeit beschreibt, d. h., das sich der Schätzwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im angegebenen Werteintervall befindet. Das vollständige Messergebnis be-



steht aus dem Schätzwert (arithmetischer Mittelwert der beobachteten Werte) und der mit dem Erweiterungsfaktor multiplizierten Standardabweichung (erweiterte Messunsicherheit).

Exemplarische Berechnungen der Messunsicherheit finden Interessierte in den Richtlinien des Deutschen Kalibrierdienstes DKD. Unter der Web-Adresse [www.dkd.info](http://www.dkd.info) stehen verschiedene Dokumente öffentlich zur Verfügung. Insbesondere sind hierzu DKD-3 Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen [3] 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. Hierbei wird für verschiedene Messaufgaben eine Messunsicherheitsberechnung durchgeführt.

**Kenntnis der Messunsicherheit ist wichtig**

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 (vgl. Kalibrierhierarchie [8]). Nur das vollständige Messergebnis, d. h. der Messwert einschließlich der 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 [2] bestimmt werden. Nur so ist es gewährleistet, dass Messunsicherheiten nach dem selben Verfahren ermittelt werden und somit vergleichbar sind.

**Literatur**

[1] International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology; second edition, 1993, International Organization for Standardization, (Geneva, Switzerland). 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.

**KENNZIFFER 071**  
**Ametek Precision Instruments Europe GmbH**  
[www.ametek.de](http://www.ametek.de)

**KENNZIFFER 072 ▲**