

# Die Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Beurteilung von Messergebnissen

Walter Krebs, Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung, EMPA, CH-8600 Dübendorf

## 1. Einleitung

Die Bedeutung der Messtechnik hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Insbesondere auch im Umweltbereich haben Messungen einen immer höher werdenden Stellenwert erhalten. Schadstoffkonzentrationen werden ermittelt, Klimadaten erfasst und selbst nichttechnische Grössen wie die Störung oder Belästigung von Personen werden quantitativ ausgewiesen. Es stellt sich dabei die Frage, wie verlässlich diese Daten sind. Diese Frage wird insbesondere dann aktuell, wenn mit Hilfe von Messergebnissen beurteilt werden soll, ob eine Anforderung erfüllt bzw. ob ein vorgegebener Grenzwert eingehalten oder überschritten wird. Vor allem wenn das Ergebnis der Messung in der Nähe des Grenzwerts liegt, ist eine Beurteilung schwierig und der gefällte Entscheid wird vielfach angezweifelt. Fehlen klare Entscheidungskriterien, so muss oftmals ein Gericht für die rechtliche Klärung der Sachlage beigezogen werden. Diese rechtliche Unsicherheit könnte vermieden werden, wenn in den betreffenden Normen klare Entscheidungsregeln zur Überprüfung von Anforderungen aufgenommen würden.

## 2. Messung und Messunsicherheit

### 2.1 Ergebnis einer Messung

Der Vorgang des Messens ist immer eine Abbildung der meist sehr komplexen physikalischen Welt auf einfachere, idealisierte Messgrössen. Dabei wird die reale Welt mit ihren unzähligen Freiheitsgraden durch ein vereinfachendes Modell beschrieben, dessen charakteristische Kenngrössen durch den Messvorgang ermittelt werden. Grundsätzlich weist jedes reale Messverfahren gewisse Unzulänglichkeiten auf, welche das Ergebnis der Messung beeinflussen. Selbst bei sehr sorgfältig geplanten und ausgeführten Messungen gibt es Einflussgrössen, die nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Das Resultat einer Messung kann immer in einem gewissen Bereich liegen, welcher zwar durch geeignete Massnahmen eingeschränkt, aber niemals gänzlich eliminiert werden kann. Das Messergebnis ist somit nicht ein einzelner Wert, sondern ein Intervall, in dem die gesuchte Grösse mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit lokalisiert worden ist.

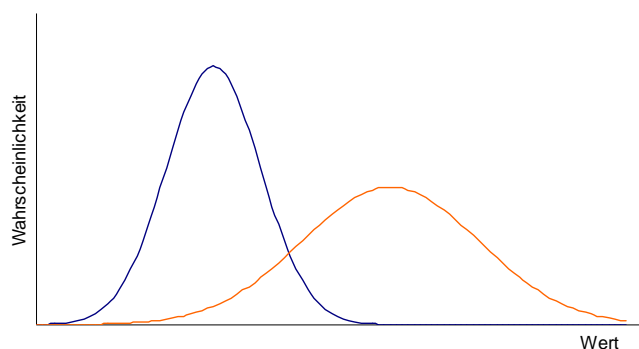


Abb. 1: Wahrscheinlichkeitsverteilung von Messwerten

## 2.2 Qualität einer Messung

Damit das Ergebnis einer Messung weiterverwendet und richtige Rückschlüsse auf den zu messenden Gegenstand gemacht werden können, muss eine Aussage über die Qualität des Ergebnisses gemacht werden, d.h. über den Wertebereich, in dem das Messergebnis vernünftigerweise liegen kann. Während in älteren Lehrbüchern oft die Begriffe wahrer Wert, Messabweichung oder Messfehler verwendet wurden, wird die Qualität der Messung nach neuem Sprachgebrauch durch den Begriff Messunsicherheit charakterisiert.

Zu jedem Messergebnis gehört die Angabe der Messunsicherheit

Der Begriff der Messunsicherheit als quantifizierbare Eigenschaft ist relativ neu in der Geschichte des Prüfwesens, obwohl Statistik und Fehlerrechnung schon lange zur metrologischen Praxis gehören. Während die Definition und die Realisierung der Masseinheiten im Rahmen des SI Einheitensystems international weitgehend geregelt und einheitlich gehandhabt werden, gibt es heute erstaunlicherweise erst seit kurzem ein etabliertes und international praktiziertes Konzept zur Ermittlung der Messunsicherheit. Dies ist aber eine Voraussetzung, damit die Bedeutung eines breiten Spektrums von Messergebnissen in Wissenschaft, Technik und Handel einheitlich zu verstehen und richtig zu interpretieren sind. Aus diesem Grund beauftragte das CIPM (Comité International des Poids et Mesures) die ISO (International Organization for Standardization) ein einheitliches und universelles Verfahren zu entwickeln, nach welchem die Messunsicherheit ermittelt und beschrieben werden soll. Dieses Verfahren wurde 1993 im "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", kurz GUM genannt [1], veröffentlicht. Das Verfahren hat sich seither in vielen Bereichen der Messtechnik zum Standardverfahren zur Ermittlung und Darstellung der Messunsicherheit etabliert. Nach dem Konzept des GUM wird die Messgrösse als eine Zufallsvariable im statistischen Sinn betrachtet. Dementsprechend wird die Messunsicherheit wie folgt definiert.

*Messunsicherheit (Definition gemäss GUM):  
"Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte  
kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden können."*

## 2.3 Begriffe

Neben dem GUM gibt es eine Vielzahl weiterer Dokumente, die sich mit Fragen der Messunsicherheit befassen. Leider werden auch in neueren Dokumenten die Begriffe nicht immer konsistent verwendet. Eine umfassende Darstellung von Begriffen ist im VIM [2] (International vocabulary of basic and general terms in metrology, 2nd ed., ISO, 1993) wiedergegeben. Neben dem Begriff Messunsicherheit, mit welchem die Qualität eines Messergebnisses als Ganzes beschrieben wird, gibt es viele weitere Begriffe, mit welchen spezifischere Eigenschaften von Messungen charakterisiert werden:

Die für die Bauakustik wichtigen Grössen werden in der Norm ISO 140-2: Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 2: Angaben von Genauigkeitsanforderungen definiert [3].

<i>Wiederholbedingungen:</i>	Bedingungen, unter denen voneinander unabhängige Prüfergebnisse mit demselben Verfahren an identischem Material in demselben Laboratorium mit denselben Geräten durch denselben Bearbeiter in kurzen Zeitabständen erzielt werden.
<i>Wiederholpräzision:</i>	Grad der Übereinstimmung zwischen voneinander unabhängigen unter Wiederholbedingungen erhaltenen Ermittlungsergebnissen.
<i>Wiederholgrenze:</i>	Betrag, unter dem der Absolutwert der Differenz zwischen zwei einzelnen unter Wiederholbedingungen gewonnenen Prüfergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% erwartet werden kann.
<i>Vergleichbedingungen:</i>	Bedingungen, unter denen Prüfergebnisse mit demselben Verfahren an identischem Material in verschiedenen Laboratorium mit verschiedenen Geräten durch verschiedene Bearbeiter gewonnen werden.
<i>Vergleichpräzision:</i>	Übereinstimmung zwischen voneinander unabhängigen unter Vergleichbedingungen erhaltenen Ermittlungsergebnissen.
<i>Vergleichgrenze:</i>	Betrag, unter dem der Absolutwert der Differenz zwischen zwei einzelnen unter Vergleichbedingungen gewonnenen Ermittlungsergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% erwartet werden kann.

### 3. Nachweis von Anforderungen

#### 3.1 Problemstellung

Im Prüfwesen muss oft die Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung eines Merkmals eines Prüfobjektes mit einem vorgegebenen Wert ausgewiesen werden. Für die Entscheidung der Übereinstimmung resp. Nicht-Übereinstimmung eines Prüfobjektes mit vorgegebenen Spezifikationen wird eine klare ja/nein Entscheidung gewünscht. Bei dieser Entscheidung muss die Messunsicherheit in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Bei der Überprüfung, ob eine Anforderung erfüllt ist, gilt es die folgenden vier Fälle zu unterscheiden (vgl. Abb. 2):

- a) Klar darunter (der um die Messunsicherheit erhöhte Wert liegt unter dem Grenzwert)
- b) Darunter, aber Unsicherheitsbereich überschreitet Grenze (der Messwert liegt unter dem Grenzwert, der um die Messunsicherheit erhöhte Wert liegt über dem Grenzwert)
- c) Darüber, aber Unsicherheitsbereich unterschreitet Grenze (der Messwert liegt über dem Grenzwert, der um die Messunsicherheit verminderte Wert liegt unter dem Grenzwert)
- d) Klar darüber (der um die Messunsicherheit verminderte Wert liegt über dem Grenzwert)

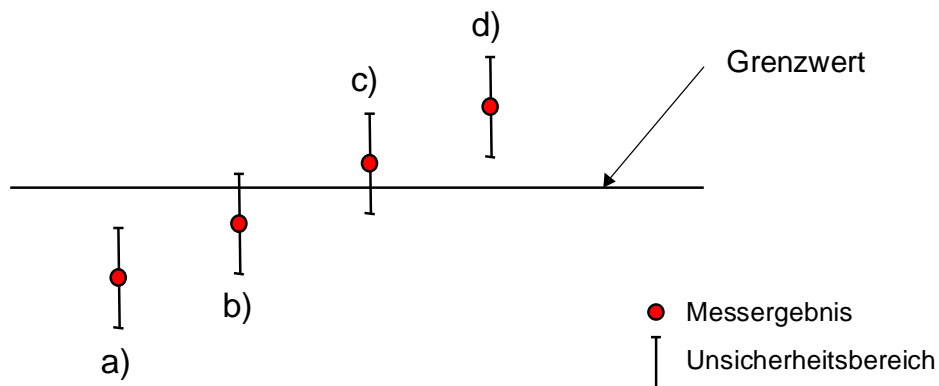


Abb. 2 Messergebnisse in Bezug zu einem Grenzwert

Während die Fälle a) und d) unproblematisch sind und eine klare Entscheidung bezüglich Einhaltung bzw. Nicht-Einhaltung der Spezifikation erlauben, kann in den Fällen b) und c) keine eindeutige Aussage gemacht werden, ob die Anforderung erfüllt wird oder nicht. Der Grenzwert liegt im Bereich der Messunsicherheit. Damit auch in diesen Fällen eine Entscheidung gefällt werden kann, müssen zusätzliche Vereinbarungen getroffen werden. Während für die Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit unterdessen ein etabliertes Regelwerk zur Verfügung steht, fehlen entsprechende Regelungen für die Überprüfung von Anforderungen unter der Berücksichtigung der Messunsicherheit weitgehend. Die Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung mit den Anforderungen muss daher oftmals durch gerichtliche Instanzen beurteilt werden.

In anderen Bereichen, z.B. im Sport, sind Entscheidungsregeln beim Fehlen eines eindeutigen Sachverhalts längst bekannt: Im Fussball beispielsweise wird der Entscheid bei einem unentschiedenen Spielverlauf durch eine Nachmessung (Verlängerung) und einen Zufallsprozess (Penaltyschiessen) gefällt. Dieses Vorgehen wird allgemein akzeptiert, obwohl damit nicht sichergestellt ist, dass tatsächlich die bessere Mannschaft als Sieger ausgerufen wird.

### 3.2 Lösungsansätze

Auch in der Messtechnik gibt es Vorschläge, wie die Einhaltung von Grenzwerten unter der Berücksichtigung der Messunsicherheit beurteilt werden soll, doch leider haben diese Dokumente noch einen geringen Bekanntheitsgrad und konnten sich nicht allgemein durchsetzen. Empfehlungen zur Beurteilung von Anforderungen sind in ILAC-G8: Guideline on Assessment and Reporting of Compliance with Specification [4] gegeben. Spezifischere Regelungen für die Beurteilung von geometrischen Massabweichungen von Werkstücken sind in [5] gegeben. Folgende Vorgehensweisen werden vorgeschlagen, wenn der Grenzwert im Unsicherheitsbereich liegt:

- 1) Nur Angabe des Messergebnisses (zusammen mit der Messunsicherheit). Hinweis, dass keine gesicherte Aussage möglich ist.
- 2) Wiederholung der Messung und Neubeurteilung der Anforderungen mit dem aus alter und neuer Messung kombinierten Messergebnis.
- 3) Keine Berücksichtigung der Messunsicherheit ("shared risk").
- 4) Die Messunsicherheit wirkt sich gegen denjenigen Partner aus, der den Nachweis für die Übereinstimmung oder die Nichtübereinstimmung erbringt [5].

### 3.3 Risikoverteilung

Damit eine eindeutige, rechtlich verbindliche Entscheidung möglich ist, müssen die Kriterien, nach welchen die Einhaltung resp. Nicht-Einhaltung der Anforderungen beurteilt wird, in der Prüfvorschrift oder im Vertrag zwischen Auftraggeber und Prüflabor festgelegt werden. Bei der Festlegung dieser Regelung müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Wie sind die Risiken bei einer Fehlbeurteilung verteilt?
- Welche Konsequenzen hat eine Einhaltung oder Nichteinhaltung der Spezifikation zur Folge?
- Stellt die Nichteinhaltung der Spezifikation ein Sicherheits- oder Gesundheitsrisiko dar?
- Welcher Schaden entsteht bei einer Fehlbeurteilung und wie wirkt er sich für die beiden Seiten aus?

Erst wenn diese Fragen beantwortet und die richtigen Schlüsse daraus gezogen wurden, kann ein befriedigendes Verfahren festgelegt werden, damit auch dann eine eindeutige Entscheidung möglich ist, wenn der zu beurteilende Grenzwert im Unsicherheitsbereich liegt. Je nach Prüfsituation bzw. der Risiko- und Schadenverteilung muss dabei eine unterschiedliche Vorgehensweise definiert werden. So wird die Beurteilung einer Festigkeitsmessung an einem Brückenkabel anders zu beurteilen sein als der Füllgrad von Getränkeflaschen aus einer Abfüllanlage.

## 4. Schlussbemerkung

Wegen dem Zufallscharakter einer Messung kann niemals mit absoluter Sicherheit entschieden werden, ob ein Grenzwert eingehalten wird oder nicht. Es verbleibt immer eine gewisse Wahrscheinlichkeit einer Fehlbeurteilung. Aber wenn das Verfahren zur Beurteilung von Grenzwerten eindeutig festgelegt ist, so kann wenigstens eine rechtliche Sicherheit gewährleistet werden, das Risiko eines Fehlentscheides kann jedoch niemals ausgeschlossen werden.

## Anhang

### Beispiele von Regelungen:

SIA 181:

- 4 21 "Die Anforderungen gelten als erfüllt, wenn die bewertete Standard-Schallpegel-differenz  $D_{nT,w}$  den betreffenden Zahlenwert erreicht oder überschreitet."

Geschwindigkeitskontrollen im Strassenverkehr:

Die Messunsicherheit wird mittels einer Sicherheitsmarge zugunsten des Fahrzeuglenkers berücksichtigt.

### Organisationen für Metrologie, Prüfung und Zertifizierung:

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CEN	Comité Européen de Normalisation
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mesures
CIPM	Comité International des Poids et Mesures
EOTC	European Organization for Testing and Certification
IEC	International Electrotechnical Committee
IFCC	International Federation for Clinical Chemistry
ILAC	International Laboratory Accreditation Conference
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union for Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union for Pure and Applied Physics
OIML	Organisation Internationale de Mesure Légal

### Literaturverzeichnis

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), ISO, 1995
- [2] International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM), ISO, 1993
- [3] ISO 140-2: Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 2: Angaben von Genauigkeitsanforderungen (siehe auch EN 20140-2:1993, sia 181.001)
- [4] ILAC-G8:1996, Guideline on Assessment and Reporting of Compliance with Specification (<http://www.ilac.org>)
- [5] EN ISO 14253-1:1998, Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen, Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen