

# Meßunsicherheit, ein wichtiges Element der Qualitätssicherung<sup>1</sup>

Wolfgang Kessel, Braunschweig

## Zusammenfassung

Es wird das dem ISO/BIPM-Leitfaden [2] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (deutsche Übersetzung *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen* [3]) zu Grunde liegende Konzept der Meßunsicherheit dargestellt und seine Bedeutung für die Qualitätssicherung in der Meßtechnik diskutiert.

## Summary

The paper describes the concept of the uncertainty of measurement implemented in the ISO/BIPM *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [2] (German translation *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen* [3]) and discusses its importance and consequences for quality assurance aspects in metrology.

## 1 Was ist Meßunsicherheit?

Im üblichen Sprachgebrauch vermittelt das Wort *Unsicherheit* nicht eben das Gefühl von Vertrauen. „Als ich meine Fahrt nach Frankfurt vorbereitete, war ich unsicher, ob ich dort bei trockenem Wetter ankommen werde. Zur Vorsicht hatte mir meine Frau einen Regenschirm mitgegeben. Und jetzt bin ich genauso unsicher, ob ich ihn nicht noch auf dem Heimweg benötigen werde!“

Im technischen oder technisch-wissenschaftlichen Bereich liegen die Dinge ganz anders. Wird dort ein Begriff wie *Unsicherheit eines Meßergebnisses* oder *Meßunsicherheit* benutzt, kommt ihm ein speziellere, positivere Bedeutung zu. Er bezeichnet dort einen Kennwert, der dem Ergebnis einer Messung, etwa bei einer Prüfung oder Kalibrierung, beigeordnet wird. Das *Internationale Wörterbuch der Metrologie*<sup>2</sup> [1] definiert Meßunsicherheit als einen Kennwert, der den Bereich der Werte charakterisiert, die der Meßgröße durch die durchgeführte Messung vernünftigerweise zugeschrieben werden können. Die nach einem einheitlichen Verfahren berechnete und in einer bestimmten Weise mitgeteilte Meßunsicherheit drückt so die Stärke des Vertrauens aus, mit der angenommen werden darf, daß der Wert der gemessenen Größe unter den Bedingungen der Messung innerhalb eines bestimmten Wertesintervalles liegt.

---

<sup>1</sup> Leicht überarbeiteter Fachbeitrag aus den PTB-Mitteilungen 108 (1998), S. 377-382

<sup>2</sup> Das Wörterbuch wird nach seinem englischen Titel allgemein als 'VIM' bezeichnet.

## 2 Was sind die Ursachen der Meßunsicherheit?

Die oben gegebene Definition der Meßunsicherheit drückt die bekannte Tatsache aus, daß Messungen keinen exakten Wert liefern, ja gar nicht liefern können. Messungen sind Unzulänglichkeiten und Unvollkommenheiten unterworfen, die nicht exakt quantifiziert werden können. Einige von ihnen haben ihre Ursache in zufälligen Effekten, wie kurzzeitigen Schwankungen der Temperatur, der Feuchtigkeit und des Luftdruckes der Umgebung. Auch die nicht gleichmäßige Leistungsfähigkeit des Beobachters, der die Messung ausführt, kann Ursache zufälliger Effekte sein: sei es, daß bei der Ablesung eines Wertes gewisse Abweichungen von einem Skalenwert geschätzt werden müssen oder ein Parameter in einem Meßprozeß eingestellt werden muß. Messungen, die unter den gleichen Bedingungen wiederholt werden, zeigen auf Grund dieser zufälligen Einflüsse unterschiedliche Ergebnisse.

Andere Unzulänglichkeiten und Unvollkommenheiten haben ihre Ursache darin, daß gewisse systematische Effekte nicht exakt korrigiert werden können oder auch nur näherungsweise bekannt sind. Hierher gehören u. a. die Nullpunktabweichung eines Meßinstrumentes, die Veränderung der charakteristischen Werte eines Normales zwischen zwei Kalibrierungen (Drift), die Voreingenommenheit des Beobachters, einen zuvor erhaltenen Wert bei der Ablesung wiederzufinden, oder auch die Unsicherheit, mit der der Wert eines Referenznormales oder Referenzmaterials in einem Zertifikat oder Handbuch angegeben wird.

## 3 Warum ist die Meßunsicherheit so wichtig?

Aus der Definition der Meßunsicherheit geht hervor, daß sie ein quantitatives Maß der Qualität des jeweiligen Meßergebnisses ist. Sie gibt eine Antwort auf die Frage, wie gut das gewonnene Ergebnis den Wert der Meßgröße widerspiegelt. Sie ermöglicht es dem Anwender, die Verlässlichkeit des Meßergebnisses einzuschätzen, etwa um die Ergebnisse verschiedener Messungen der gleichen Meßgröße miteinander oder mit Referenzwerten zu vergleichen. Das Vertrauen in die Vergleichbarkeit von Meßergebnissen ist wichtig im nationalen Handel und internationalen Warenaustausch. Es hilft, Handels- und Wirtschaftsbarrieren abzubauen.

Häufig soll ein Meßwert mit Grenzwerten verglichen werden, die in einer Spezifikation oder normativen Vorschrift festgelegt sind. In diesem Falle kann man anhand der Meßunsicherheit erkennen, ob das Meßergebnis deutlich innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegt oder ob die Forderungen nur knapp erfüllt werden. Liegt der gemessene Wert sehr nahe bei einem Grenzwert, so besteht ein großes Risiko, daß die Meßgröße doch nicht die gestellten Forderungen einhält. Die beigeordnete Meßunsicherheit ist in diesem Fall eine wichtige Hilfe, dieses Risiko realistisch einzuschätzen.

Nehmen wir an, ein Anwender läßt die gleiche Messung in mehreren Laboratorien an einem Exemplar eines Produktes durchführen, oder, was wahrscheinlicher ist, an mehreren Exemplaren, die er untereinander als gleichwertig und damit als identische Realisierungen des gleichen Produktes ansieht. Erwarten wir wirklich, daß die verschiedenen Prüflaboratorien das gleiche Ergebnis an den Auftraggeber zurückliefern? Nur in gewissen Grenzen natürlich, werden wir antworten. Liegen die mitgeteilten Ergebnisse nun sehr dicht an einer Spezifikationsgrenze, so kann es schon vorkommen, daß die Werte des einen Laboratoriums dazu führen, ein fehlerhaftes Exemplar zu prognostizieren, während die Werte eines anderen demgegenüber anzeigen, daß das Exemplar den Forderungen genügt.<sup>3</sup> Von Zeit zu Zeit müssen akkreditierende Körperschaften strittige Fragen dieser Art klären. Das hätte meist vermieden werden können, wenn der Anwender die Meßunsicherheit gekannt hätte, die den Ergebnissen beigeordnet werden muß. Er hätte dann gewußt, wie verlässlich die Werte sind.

#### 4 Was fordern die technischen Normen?

Laboratorien, die ihre Prüf- oder Kalibriertätigkeiten in Übereinstimmung mit den Anforderungen der *Europäischen Norm EN 45001 (Allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflaboratorien)* durchführen, müssen den von ihnen mitgeteilten Prüfergebnissen, wo möglich, eine Angabe über die Sicherheit der Ergebnisse beifügen. Quantitative Ergebnisse müssen sogar mit einer quantitativen Angabe der Unsicherheit versehen werden. Laboratorien, denen die Prüf- oder Kalibrierfähigkeiten durch eine Akkreditierung von Körperschaften, wie dem DKD (*Deutscher Kalibrierdienst*), die dem DAR (*Deutscher Akkreditierungsrat*) angehören, bestätigt worden sind, sind gehalten, bei ihren meßtechnischen Arbeiten den Vorschriften diese CEN-Norm zu folgen. Die an quantitative Ergebnisse gestellten Forderungen variieren stark in ihrer Natur und der geforderten Strenge. Dabei spielt einerseits das jeweilige technische Gebiet, andererseits die Frage, ob eine Prüfung oder Kalibrierung durchgeführt werden soll, eine entscheidende Rolle.

Eine Kalibrierung zielt auf die Bestimmung des oder der Kennwerte eines Meßinstrumentes oder Normales. Sie ist durch folgende Punkte speziell charakterisiert:

- (1) Die notwendigen Messungen können wiederholt durchgeführt werden.
- (2) Auf jeder Stufe der Kalibrierkette wird die Meßunsicherheit angegeben, mit der die von den jeweiligen Referenzinstrumenten realisierten Werte bekannt sind. Das gilt für die gesamte Kalibrierkette, vom nationalen Normal an ihrem Anfang bis zum Gebrauchsnormales des produktionsnahen Kalibrierlaboratoriums an ihrem Ende.
- (3) Die Anwender wissen, daß mit den Meßwerten auch die beigeordnete Meßunsicherheit mitgeteilt werden muß, weil sie nur so sicher beurteilen können, ob das jeweilige Meßinstrument oder Normal den gestellten Forderungen entspricht.

Den Kalibrierlaboratorien sind daher die Probleme der Transparenz bei der Bestimmung und der Einheitlichkeit bei der Angabe von Meßunsicherheiten bekannt. Durch ihre Akkreditierung ist das zur Bestimmung benutzte Verfahren einer ständigen Überprüfung durch die akkreditierende Körperschaft unterworfen. Damit wird die angestrebte Vereinheitlichung der Angabe des vollständigen Meßergebnisses, bestehend aus Meßwert und beigeordneter Meßunsicherheit, in den von dem Laboratorium herausgegebenen Kalibrierzertifikaten erreicht und garantiert.

In Prüflaboratorien ist die Situation gegenwärtig noch nicht so klar und eindeutig. Hier treten oft ganz spezifische Schwierigkeiten auf, die bisher auf keinem vereinheitlichenden Weg überwunden werden konnten. So ist z. B. bei einer zerstörenden Prüfung eine Wiederholung nur möglich, indem ein weiteres Exemplar geprüft wird. Einerseits entstehen dadurch meist beträchtliche zusätzliche Kosten, andererseits ist ein weiterer Unsicherheitsanteil aufgrund der Variation der Exemplare untereinander zu berücksichtigen. Daher wird das im Kalibrierbereich übliche Vorgehen, eine Messung mehrmals zu wiederholen, in vielen Prüfbereichen als unökonomisch angesehen, selbst dann, wenn eine Wiederholung der Prüfung technisch durchführbar wäre. In anderen Fällen kann eine Prüfung durch die Prüfvorschriften oder andere normative Vorgaben nicht ausreichend klar definiert sein. Dann müssen im Prüfergebnis auch inkonsistente Anwendungen in Betracht gezogen und als zusätzliche Quelle der Unsicherheit berücksichtigt werden. Bei fast allen Prüfungen werden darüberhinaus neben den Unsicherheitsbeiträgen, die aus Kalibrierzertifikaten und Herstellerangaben abgeleitet werden, weitere zu berücksichtigen sein, die bisherige Erfahrungen und früher gewonnene Daten einschließen und damit stark von der subjektiven Kenntnis des Prüfenden abhängen.

---

<sup>3</sup> Fragen dieser Art werden in der ISO-Norm über die Konformität eines Meßwertes [10,11] behandelt.

## 5 International harmonisierte Angabe der Meßunsicherheit?

Akkreditierende Körperschaften haben die Verantwortung, sicherzustellen, daß die von ihnen akkreditierten Laboratorien in ihren Tätigkeiten den in der Europäischen Norm EN 45001 gestellten Forderungen entsprechen. Sofern die Körperschaften das Problem der Bestimmung einer quantitativen Unsicherheitsangabe angehen, lieferten die in der Vergangenheit veröffentlichten Leitfäden meist nur ein grobes und selten konsistentes Vorgehensmuster. In den letzten Jahren wird von den akkreditierenden Körperschaften, wie etwa dem DAR oder dem DKD, und anderen bedeutenden metrologisch orientierten Organisationen (EUROMET - *European Collaboration on Measurement Standards*) mehr und mehr eine allgemeine Vorgehensweise akzeptiert. Sie fußt auf den Begriffen und Verfahren, die in dem ISO/BIPM-Leitfaden<sup>4</sup> [2] veröffentlicht und von den internationalen Dachinstitutionen auf dem Gebiet der Meßtechnik als grundlegend und allgemein verbindlich anerkannt wurden. Dieser Leitfaden, der in deutscher Übersetzung [3] vom Deutschen Institut für Normung herausgegeben wird, ist mit einem Umfang von 112 Seiten ein im wahrsten Sinne des Wortes gewichtiges Dokument. Verschiedene Institutionen, unter ihnen auch der DKD, haben deshalb vereinfachte und verfahren-orientierte Leitfäden aus dem Guide abgeleitet oder sind dabei, dies zu tun. Die akkreditierenden Körperschaften, die sich in der *European cooperation for Accreditation*<sup>5</sup> (EA, früher EAL - *European cooperation for Accreditation of Laboratories*) zusammengefunden haben, haben auf der Grundlage des ISO/BIPM-Leitfadens ihre Vorschriften über die Berechnung der Meßunsicherheiten bei Prüfungen und Kalibrierungen harmonisiert und als Dokument EAL-R2 [4,5,6] vorgelegt. Es ist in deutscher Übersetzung als DKD-3 [7,8,9] unter den Schriften des DKD erschienen.

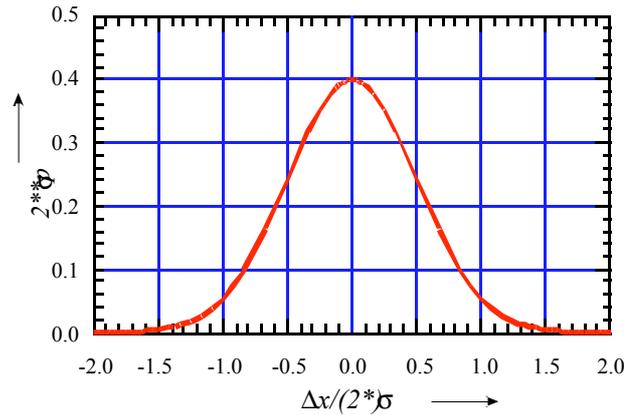
## 6 Wie wird die Meßunsicherheit berechnet?

Die in der Meßtechnik unausweichlich auftretende Unsicherheit der Meßgrößen ist eine unmittelbare Folge der ungenauen Kenntnis, die man zum einen über das Vorzeichen und die Größe der zufälligen Einflüsse bei der Messung hat und zum anderen über die Korrekturen, die bei der Auswertung für systematische Einflüsse vorgenommen werden müssen. Sie wird häufig in der Form von  $\pm$ Abweichungen vom Meßwert angegeben, d. h. als symmetrisches Werteintervall um den Meßwert. Der hierfür benötigte Kennwert setzt sich i. a. aus verschiedenen Unsicherheitsbeiträgen zusammen. Die einzelnen Beiträge werden entweder aus den statistischen Parametern gewonnen, die sich aus wiederholten Beobachtungen ergeben, oder sie werden aus Ergebnissen abgeleitet, die bei früheren Messungen gewonnen wurden, die aus Hand- oder Datenbüchern entnommen wurden, die sich aus den allgemeinen Kenntnissen über die Meßeinrichtungen, wie Herstellerspezifikationen, ergeben oder die einfach nur die Erfahrungen mit dem jeweiligen Meßverfahren ausdrücken.

In den meisten Fällen sind die Werte wiederholter Beobachtungen nach der wohlbekannten glockenförmigen Gaußschen Kurve in einer Normalverteilung um den arithmetischen Mittelwert angeordnet. Das bedeutet, daß es weitaus wahrscheinlicher ist, daß die Werte näher beim Mittelwert als am äußeren Rand liegen. Für wiederholte Beobachtungen erfolgt die Berechnung des Meßwertes und der ihm beizuordnenden Meßunsicherheit nach einfachen Formeln der Statistik: der Meßwert ist der *arithmetische Mittelwert* der beobachteten Werte; der Kennwert der Unsicherheit ist ihre *experimentelle Standardabweichung*.

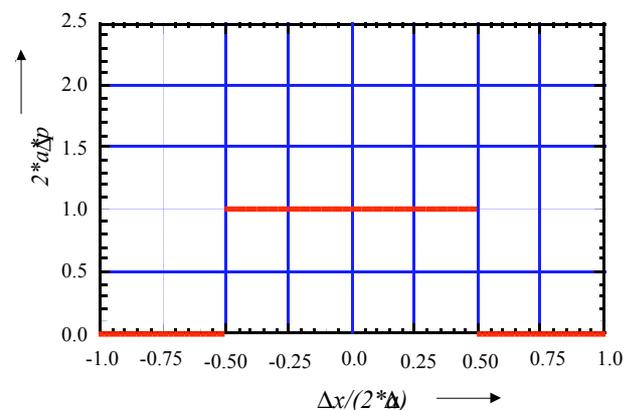
<sup>4</sup> Dieser Leitfaden wird nach seinem englischen Titel allgemein als 'Guide' oder 'GUM' bezeichnet.

<sup>5</sup> Zielsetzung und Programm der EA, sowie die Liste ihrer Schriften, finden sich im Internet unter <http://www.european-accreditatio.org>.

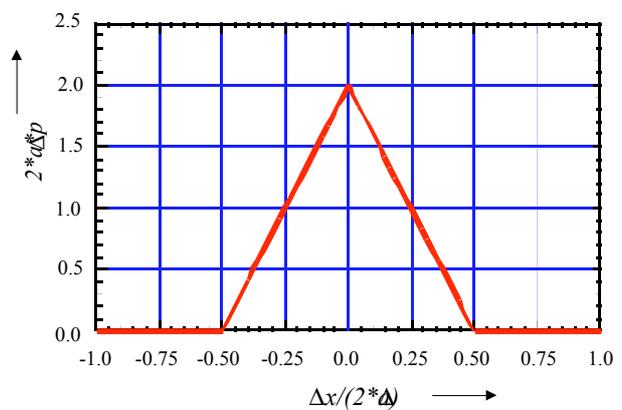


**Bild 1** Normalverteilung mit dem Variabilitätsparameter  $\sigma$  ,  
dessen Wert gleich der Standardabweichung ist.

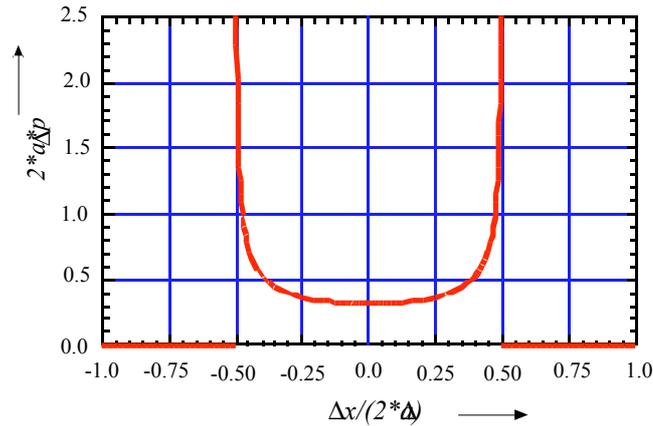
Auch die Unsicherheitsbeiträge, die nicht durch wiederholte Beobachtungen quantifiziert werden, werden als Standardabweichungen angegeben, selbst wenn sie nicht durch eine Normalverteilung charakterisiert werden können. So kommt es häufig vor, daß man von einer Größe nur weiß, daß ihr Wert mit Sicherheit in einem bestimmten Bereich liegt, und daß jeder Wert zwischen den Grenzen dieses Bereiches mit der gleichen Wahrscheinlichkeit in Frage kommen kann. Dieser Kenntnis entspricht eine rechteckförmige Verteilung. Eine andere Verteilung ist die U-förmige Verteilung. Sie wird häufig bei Messungen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der Hochfrequenztechnik angetroffen, findet sich aber auch bei mechanischen Messungen wie der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern. Die mathematischen Ausdrücke, mit denen die Standardabweichung für diese und eine Reihe von anderen gebräuchlichen Verteilungen der Meßtechnik gewonnen wird, sind recht einfach. Die Methode, nach der die einzelnen Beiträge zur Meßunsicherheit zusammengesetzt werden, die dem Meßergebnis beizuordnen ist, zielt darauf ab, einen realistischen Wert zu bestimmen. Ein realistisches Maß ist die Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der einzelnen Unsicherheitsbeiträge (Methode der quadratischen Addition). Sie wird als der geeignete Kennwert angesehen. Diese *Standardmeßunsicherheit* kann direkt bei der Angabe des vollständigen Meßergebnisses verwendet werden.



**(a)** rechteckförmige Verteilung  $u(x) = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}}$



**(b)** dreieckförmige Verteilung  $u(x) = \frac{\Delta a}{\sqrt{6}}$



(c) U-förmige Verteilung  $u(x) = \frac{\Delta a}{\sqrt{2}}$

**Bild 2** Typische Verteilungen mit den dem Meßwert  $x$  beigeordneten Standard-meßunsicherheiten  $u(x)$  für nicht wiederholt beobachtete Größen, deren Variabilitätsbereich durch die Grenzen  $x_+$  und  $x_-$  abgeschätzt wird:

$$\text{Meßwert } x = \frac{x_+ + x_-}{2},$$

$$\text{halbe Breite des Variationsbereiches } \Delta a = \frac{x_+ - x_-}{2}.$$

Häufig wird die *erweiterte Meßunsicherheit* verwendet mit dem Ziel, ein Wertintervall anzugeben, das den Wert der gemessenen Größe mit hoher Wahrscheinlichkeit überdeckt. Die erweiterte Meßunsicherheit ergibt sich aus der Standardmeßunsicherheit durch Multiplikation mit einem *Erweiterungsfaktor*. Je größer dieser Faktor ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit der Überdeckung bzw. desto größer ist das Vertrauen, daß der Wert der Meßgröße in dem angegebenen Wertintervall liegt. Für den üblicherweise verwendeten Wert einer *Überdeckungswahrscheinlichkeit* von 95 %<sup>6</sup> ist i.a. ein Erweiterungsfaktor von 2 zu verwenden (EA-4/02 resp. DKD-3). Wird zur Angabe der Unsicherheit einer Meßgröße die erweiterte Meßunsicherheit mitgeteilt, muß, nach allgemeiner Übereinkunft, der gewählte Erweiterungsfaktor oder die Überdeckungswahrscheinlichkeit, oder auch beides, mit angegeben werden. Auf diese Weise kann in jedem Fall auf die fundamentallere Standardmeßunsicherheit zurückgeschlossen werden.

<sup>6</sup> Bei der Angabe von Wahrscheinlichkeiten muß beachtet werden, daß sie aus der statistischen Beurteilung von Beobachtungen stammen und damit selbst keine im mathematischen Sinne exakten Daten sind. Um eine Wahrscheinlichkeit mit einer statistischen Unsicherheit unter 0,5% angeben zu können, müßten weit mehr als 1000 Beobachtungen durchgeführt werden. Es ist daher unsinnig, numerische Werte für Wahrscheinlichkeiten oder aus Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgeleitete Parameter, z.B. die Meßunsicherheit, mit mehr als 2 signifikante Stellen anzugeben.

## 7 Hat die Meßunsicherheit Einfluß auf die meßtechnische Praxis?

In den verschiedenen Fachgebieten werden fachspezifische Leitfäden benötigt, um die dort tätigen Prüf- und Kalibrierlaboratorien in die Lage zu versetzen, Meßunsicherheiten konsistent und einheitlich zu bestimmen und mitzuteilen. Liegen spezifische Leitfäden oder Forderungen nicht vor, sollten die Laboratorien die Meßunsicherheiten in jedem Falle nach der allgemeinen, international akzeptierten Methode des ISO/BIPM-Leitfadens bestimmen oder sich an die Forderungen des Dokumentes EAL-R2 anlehnen, und zwar auch dann, wenn die Angabe vom Anwender oder den normativen Vorschriften nicht gefordert wird. Nur dadurch setzen sie sich selbst in die Lage, die Qualität des von ihnen mitgeteilten Meßergebnisses zu beurteilen und zu entscheiden, ob der angegebene Wert gefährlich nahe bei einem vorgegebenen Grenzwert liegt oder nicht. Die einzelnen Schritte der Unsicherheitsanalyse decken darüberhinaus die verschiedenen Teilaspekte einer Prüfung oder Kalibrierung auf. Sie zeigen, wo die größten Unsicherheitsbeiträge entstehen und wo Verbesserungen am Meßprozeß mit dem Ziel einer erhöhten Genauigkeit besonders sinnvoll sind. Andererseits liefert die Unsicherheitsanalyse auch die Einsicht, wo eine größere Unsicherheit einer Einflußgröße akzeptiert werden kann, ohne daß die dem Meßergebnis beizuordnende Meßunsicherheit wesentlich verändert wird. Dadurch kann im Einzelfall die Verwendung eines weniger empfindlichen und damit preiswerteren Meßinstrumentes oder auch die zeitliche Ausweitung der Kalibrierintervalle gerechtfertigt werden.

Die Meßunsicherheitsanalyse muß in jedem Fall von qualifizierten Personal durchgeführt werden, das die ausreichende Kenntnisse über den durchgeführten Prüf- oder Kalibrierprozeß besitzt. Es sollte sowohl wissen, wo die Grenzen der gesamten Meßeinrichtungen und ihrer Teile, als auch den Einfluß externer Faktoren, wie der Umgebungsbedingungen, kennen. Die Analyse ist in einem Protokoll festzuhalten, die folgende Punkte enthalten sollte:

- einen kurzen beschreibenden Titel,
- eine kurze, allgemeine Beschreibung des Meßprozesses,
- eine Auflistung aller Werte, die zur Bestimmung des Meßergebnis beitragen oder seinen Wert beeinflussen, mit einer kurzen Erläuterung, woher sie stammen oder wie sie erhalten wurden,
- eine Liste der abgelesenen Werte und die Bestimmung ihrer statistischen Kennwerte,
- ein Unsicherheitsbudget in Tabellenform,
- die erweiterte Meßunsicherheit,
- das vollständige Meßergebnis.

Dabei muß klar und eindeutig zum Ausdruck gebracht werden,

- (1) welche Annahmen oder Voraussetzungen gemacht wurden, insbesondere bezüglich der Verteilungsfunktion der in der Auswertung berücksichtigten Eingangsgrößen, und
- (2) aus welchen Quellen die Informationen stammen, aus denen die verschiedenen Unsicherheitsbeiträge bestimmt wurden, z. B. aus Kalibrierscheinen, aus früher gemachten Messungen, aus allgemeinen Erfahrungen über das Verhalten der benutzten Materialien.

## 8 In welcher Beziehung steht die Meßunsicherheit zu Toleranzforderungen?

Die Überprüfung der Übereinstimmung von Meßwerten mit vorgegebenen Forderungen oder normativen Vorschriften muß in jedem Einzelfall sehr sorgfältig durchgeführt werden. Das jeweilige Meßergebnis und seine Relevanz ist dabei in Beziehung zu setzen zu den Forderungen des Kunden oder den Bestimmungen der Vorschriften. Insbesondere muß auf mögliche Konsequenzen und Risiken hingewiesen werden, wenn das Meßergebnis nahe bei einer Toleranzgrenze liegt. So kann die dem Meßergebnis beigeordnete Meßunsicherheit einen Wert besitzen, der berechtigte Zweifel aufkommen läßt, ob der Wert der Meßgröße wirklich die geforderte Einhaltung der Grenzen erfüllt. Wird die Meßunsicherheit in diesem Fall nicht in die Überlegungen mit einbezogen, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß der Wert die Forderungen doch nicht erfüllt, umso größer, je größer die Meßunsicherheit selbst ist. Muß für die Einhaltung eine geringere Meßunsicherheit gefordert werden, kann sie erreicht werden, indem eine geeignetere Meßeinrichtung verwendet, eine bessere Einhaltung der geforderten Umgebungsbedingungen realisiert oder die Prüfung beziehungsweise Kalibrierung zuverlässiger und konsistenter durchgeführt wird.

Für gewisse Produkte kann es sinnvoll sein, daß der Anwender oder der Kunde die Einhaltung vorgegebener Bedingungen beurteilt, ohne daß die Meßunsicherheit berücksichtigt wird. Das wird geteiltes Risiko genannt, da der Anwender einen Teil des Risikos trägt, daß das Produkt die vorgegebenen Spezifikationen nicht einhält. Man muß jedoch beachten, daß die Folgen dieser Form des Risikos u. U. beträchtlich sein können. Geteiltes Risiko wird häufig in jenen Bereichen als akzeptabel angesehen, in denen ein fehlerhafter Betrieb oder eine fehlerhafte Anwendung des Produktes zu keinem wesentlichen Sicherheitsrisiko führt. Als Beispiel sei die Charakterisierung des EMV-Verhaltens eines häuslichen Radio- oder Fernsehgerätes genannt. Eine unzureichende Abschirmung gegen Fremdstrahlung führt eben nur zu unangenehmen Störungen beim Empfang. Wenn jedoch ein Herzschrittmacher geprüft oder Komponenten für den Flugzeugbau vermessen werden, sieht die Sachlage völlig anders aus. Der Kunde wird in diesen und ähnlich gelagerten Fällen mit Recht verlangen, daß das Risiko, daß das Produkt die Forderungen möglicherweise nicht erfüllt, vernachlässigbar ist. In diesen Fällen muß auch die den Meßwerten beigeordnete Meßunsicherheit bei der Beurteilung voll in Betracht gezogen werden. Im Falle des geteilten Risikos darf eine wichtige Voraussetzung nicht übersehen werden: die beteiligten Partner müssen vorab vertraglich vereinbaren, welche Meßunsicherheit als akzeptabel angesehen wird und welche nicht. Nur so lassen sich spätere Streitigkeiten vermeiden.

## 9 Zusammenfassung

Die einem Meßwert beizuordnende Meßunsicherheit ist ein unausweichliches Beiprodukt jeder Messung. Sie spielt eine wichtige Rolle, wenn ein Meßwert in der Nähe eines vorgegebenen Grenzwertes liegt. Eine wohlbegründete Unsicherheitsanalyse ist ein Kennzeichen der Professionalität in der Meßtechnik. Die dabei gewonnene Meßunsicherheit gibt sowohl dem Prüf- oder Kalibrierlaboratorium als auch dem Anwender wertvolle Information über die Qualität und die Zuverlässigkeit des Meßergebnisses. Die Angabe des Meßwertes zusammen mit der ihm beigeordneten Meßunsicherheit ist bei Kalibrierungen allgemein üblich, während sich viele Prüflaboratorien noch schwertun, diesen Weg zu gehen. Aber auch hier ist eine zunehmende Akzeptanz der Meßunsicherheit als Merkmal der Qualität und der Verlässlichkeit eines Meßwertes zu vermerken. In einigen Jahren wird es sicher gang und gäbe sein, daß das Resultat einer Messung als vollständiges Meßergebnis angegeben wird, bestehend aus *Meßwert* und *beigeordneter Meßunsicherheit*.

Auf dem 139. PTB-Seminar 'Aktuelle Problem der Weitergabe von HF-Meßgrößen' (13. Mai 1998) ein Computer-Programm-Paket mit dem Namen 'GUM Workbench' vorgestellt worden, das den Anwender durch die Bestimmung des vollständigen Meßergebnisses nach den Verfahren des Guide bzw. der EA-04/2 (DKD-3) führt und nach den vorgestellten Regeln ein gedrucktes Protokoll liefert, das den Forderungen an die Dokumentation in der Qualitätssicherung entspricht. Interessenten erhalten nähere Informationen und auch Demo-Versionen unter <http://www.metrodata.de> resp. <http://www.gum.dk>.

## 10 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, Berlin-Wien-Zürich.
- [2] ***Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement***  
first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization  
(Geneva, Switzerland).
- [3] ***Leitfaden für die Angabe der Unsicherheit beim Messen***  
Deutsche Übersetzung des Guide, 1. Auflage, 1995,  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.
- [4] EA-4/02 (früher EAL-R2) ***Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration***  
requirements document, 1996, European cooperation for Accreditation of Laboratories  
(Utrecht, The Netherlands).
- [5] EA-4/02-S1 (früher EAL-R2-S1) ***Supplement 1 to EA-4/02 (Examples)***  
guideline document, 1997, European cooperation for Accreditation  
(Utrecht, The Netherlands).
- [6] EA-4/02-S2 ***Supplement 2 to EA-4/02 (additional Examples)***  
guideline document, 1998, European cooperation for Accreditation  
(Utrecht, The Netherlands).
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Tischler, K. ***Entscheidungsregeln zur Festlegung der Übereinstimmung mit geometrischen Produktspezifikationen (GPS)***  
MICROTECH 1996, Rahmenprogramm im Auditorium, Frankfurt Oktober 1998  
VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf 1997.
- [11] ISO EN DIN 14253, ***Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messungen, Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung und Nicht-übereinstimmung mit Spezifikationen,***

**Teil 2:** im Entwurf, engl. Draft: *Guide to the estimation of uncertainty of measurement in calibration of measuring equipment and product specification*,  
herausgegeben vom DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Beuth-Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich

**Adresse des Autors**

Dr.rer.nat. Wolfgang Kessel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt,  
Proj. 2.002 "Meßunsicherheit im industriellen und gesetzlichen Meßwesen",  
Bundesallee 100, D-38 116 BRAUNSCHWEIG  
FAX: +49 531 592 2130  
email: wolfgang.kessel@ptb.de