

Ergänzungen zum Kapitel

Einführung

Internationale Harmonisierung der „Fehlerrechnung“ durch den GUM

Für die Überlassung des Skripts für die 14. Auflage 'Physikalisches Praktikum' danken wir Dr. M. Stölzer (Universität Halle) und Dr. B.-U. Runge (Universität Konstanz).

Internationale Harmonisierung der „Fehlerrechnung“ durch den GUM

(Guide to the expression of Uncertainty in Measurement,
Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen)

Mathias Stölzer und Bernd-Uwe Runge, DPG-Schule „Physikalische Praktika“ 2012

Abstract

Seit etwa 35 Jahren gibt es Bestrebungen, Terminologie und mathematische Methoden für den Umgang mit Unsicherheiten beim Messen in gleicher Weise international zu vereinheitlichen, wie man das seit der Meterkonvention von 1875 mit dem SI für die physikalischen Einheiten erreicht hat. Im Ergebnis der von CIPM und ISO gelenkten Entwicklung wurde 1993 der „Guide to the expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) veröffentlicht und seitdem zweimal aktualisiert. Seit etwa 15 Jahren wird dieser Leitfaden in der internationalen Metrologie und im gesetzlichen Mess-, Eich- und Akkreditierungswesen als Standard angesehen. In der universitären Lehre kommt er jedoch bis heute praktisch nicht vor. Ich plädiere dafür, unsere Lehre zur „Fehlerrechnung“ an die Begriffswelt des GUM anzupassen. Dazu gehört neben einer Vereinheitlichung von Begriffen und Formelzeichen die gleiche Behandlung von statistischen und systematischen Unsicherheiten als Standardabweichungen. Neue Verfahren wie die Berechnung der Fortpflanzung von Unsicherheiten mittels Monte-Carlo-Methode könnten in der fortgeschrittenen experimentellen Ausbildung zu einem besseren Verständnis der Studierenden beitragen. Schwierig bis unmöglich ist es dagegen, die stark vereinfachten Regeln der Fehlerrechnung in den Physikpraktika für Mediziner und Pharmazeuten mit dem GUM zu synchronisieren.

Wörtliche Zitate sind *kursiv*, wichtige Begriffe **fett** dargestellt. Wenn sinnvoll, sind die englischen Begriffe in [eckigen Klammern] genannt.

Entstehung und Bedeutung des GUM

Der Umgang mit „Messfehlern“ ist seit etwa 100 Jahren Bestandteil der Physikausbildung. Große Experimentalphysik-Lehrbücher wie z. B. der Kohlrausch haben dazu ihren Beitrag geleistet - heute ist dieses Thema in der Regel beim Grundpraktikum angesiedelt. Eine Anzahl von aktuellen deutschsprachigen Lehrbüchern (z. B. [1-5]) für Studienanfänger widmet sich ganz oder mit einem größeren Kapitel diesem Thema. Die verwendeten Begriffe und Symbole variieren etwas von Buch zu Buch und von Uni zu Uni. Meist ist der Begriff „Fehler“ in den letzten Jahren durch das scheinbar modernere Wort „Unsicherheit“ ersetzt worden, manches Konzept ist schwer verständlich und m.E. inkonsistent, wie z. B. die inneren und äußeren Unsicherheiten in [5]. Wo schon innerhalb unseres Landes keine einheitlichen Standards üblich sind, wagt kaum jemand an weltweit einheitliche Begriffe und Standards zu denken, findet doch die Lehre für Studienanfänger ausschließlich in deutscher Sprache statt.

Ganz anders ist die Situation in der Metrologie, wo die internationale Zusammenarbeit ebenso an der Tagesordnung ist wie in allen Bereichen der Grundlagenforschung, sowie im gesetzlichen Mess-, Eich- und Akkreditierungswesen. Hier ist es üblich, Normen zu erarbeiten und zu beschließen, nach denen sich alle richten müssen. Das war in Deutschland zunächst (seit 1942) die DIN 1319 „Grundlagen der Messtechnik“, bzw. seit 1985 deren Teil 4 „Auswertung von Messungen, Messunsicherheit“ [6]. Parallel dazu wurde bereits 1977 durch die höchste internationale Autorität in der Metrologie, das *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM), ein Prozess in Gang gesetzt, der schließlich in den 1993 erstmals veröffentlichten, 1999 und 2008 aktualisierten *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) mündete.

Das CIPM ist das administrative Komitee der *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM), der Nachfolgeorganisation der Meterkonvention mit aktuell 54 Mitgliedsstaaten und damit der Hüterin des SI. Deren Intention ist es, den GUM zu einem international ähnlich verbreiteten Standard für die Behandlung von Messunsicherheiten zu machen, wie es im Bereich der Maßeinheiten das SI seit langem ist. Um einen weltweiten Konsens zu erreichen, holte man alle für das Mess- und Standardisierungswesen wichtigen Organisationen mit ins Boot (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML) und gründete mit ihnen das *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM), welches die Arbeit am GUM und an einem zweiten Werk, dem *International Vocabulary of Metrology* (VIM) koordiniert.

Das JCGM erstellt seine Dokumente grundsätzlich parallel in den Sprachen englisch und französisch. Diese Versionen stehen kostenlos auf verschiedenen Webservern zur Verfügung. Anschließend werden von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) autorisierte Übersetzungen ins Deutsche erstellt, die jedoch nicht kostenlos, sondern nur zu unverschämten hohen Preisen, beim Beuth-Verlag zu beziehen sind.

Folgende Dokumente sind bisher verfügbar:

JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC Guide 98-3:2008)

Deutsch: Vornorm DIN V ENV 13005. Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. ca. 110 Seiten, 168 €

JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "GUM" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method

Deutsch: Beiblatt 1 zur DIN V ENV 13005. Fortpflanzung von Verteilungen unter Verwendung einer Monte-Carlo-Methode. 110 Seiten, 183 €

JCGM 102:2011 Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "GUM" – Extension to any number of output quantities

JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data – An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents

Deutsch: Einführung zum Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. 28 Seiten, PTB-Website, kostenlos¹

JCGM 200:2008 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd edition englisch-französisch

Deutsch-englisch: Internationales Wörterbuch der Metrologie. 74 Seiten, 32 €

Die in Deutschland entstandene Norm DIN 1319 scheint weiterhin gültig zu sein und wurde *an die internationalen Empfehlungen [GUM 1993] angepasst*. Insbesondere wurden die DIN 1319-3 „Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit“ 1996 und DIN 1319-4 „Auswertung von Messungen, Messunsicherheit“ 1999 in entsprechend überarbeiteter Fassung herausgegeben.

Alle mir bekannten Dokumente von Kalibrierlaboratorien nehmen jedoch nicht auf die DIN 1319 sondern immer auf den GUM bzw. auf die damit identische DIN V ENV 13005 Bezug. Beim DKD wird der GUM seit etwa Mitte der neunziger Jahre angewendet. Im universitären Bereich spielt er dagegen bis jetzt kaum eine Rolle. Siegfried R. Wagner (PTB-Physiker i.R.)

¹ Die Einführung zum Leitfaden... (JCGM 104) ist schlecht geschrieben. Sie ist voll von Bezügen auf den Leitfaden (JCGM 100) selbst sowie auf weitere, z. T. noch gar nicht veröffentlichte JCGM-Dokumente. Ohne die Originaldokumente ist sie kaum zu verstehen, man muss sie eher als Ergänzung zu diesen betrachten.

schrieb hierzu 2008 im Artikel „Vom Messfehler zur Messunsicherheit“ (PTB-Mitteilungen 1-2008):

Etwas enttäuschend ist aber bisher die Umsetzung des GUM in die Praxis der physikalischen Ausbildung. Die von mir eingesehenen einführenden Lehrbücher der Physik begnügen sich in der Mehrzahl damit, die Ermittlung von Messunsicherheiten auf die zufälligen Fehler zu beschränken und die systematischen Unsicherheiten etwa in der von mir eingangs erwähnten althergebrachten Weise zu berücksichtigen. Hier bleibt noch vieles nachzuholen.

Konzept, wichtige Begriffe und Schreibweisen im GUM

Im Leitfaden wird das Wort „Fehler“ grundsätzlich vermieden. Zentraler Begriff ist die **(Mess)unsicherheit [(measurement) uncertainty] u** , ein dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können. Sie kann als Maß dafür betrachtet werden, wie überzeugt man davon ist, den „wahren Wert“ der Messgröße zu kennen.

Als **Messabweichung [measurement error]** wird meist die Differenz zwischen dem Messwert und dem „wahren Wert“ (der mit der Definition der Messgröße konsistent ist) verstanden, allgemein die Differenz zwischen dem Messwert und einem Referenzwert. Die Messabweichung ist ein Idealbegriff, ein exakt definierter wahrer Wert existiert oft nicht. Die Messabweichung ist in der Regel nicht genau bekannt. Man kann (siehe GUM 2.2.4) die Messunsicherheit als eine Schätzung der Messabweichung ansehen.

Traditionell wird zwischen zufälligen (statistischen) und systematischen Messabweichungen bzw. Unsicherheiten unterschieden. Diese werden nach verschiedenen Methoden ermittelt (z. B. Standardabweichung, vom Hersteller angegebene Messtoleranz) und sind dadurch nicht miteinander vergleichbar. Wenn diese Größen dann in eine Fehlerfortpflanzungsrechnung eingehen, könnten z. B. systematische Unsicherheiten überbewertet werden.

Im GUM wird systematischen und zufälligen Unsicherheiten auf einer vergleichbaren Grundlage Rechnung getragen. Zu diesem Zweck werden alle Unsicherheiten, auch systematische, als Standardabweichungen (oder Varianzen) ermittelt und angegeben. Zur Betonung, oder um Missverständnisse auszuschließen, nennt man sie auch **Standardunsicherheiten**. Die Unterscheidung in statistische und systematische Unsicherheitskomponenten wird nicht abgelehnt, aber als wenig zielführend für die Ermittlung der Unsicherheit von Messergebnissen angesehen. Stattdessen wird unterschieden in Komponenten der Kategorien A und B.

Unsicherheiten vom Typ A

sind solche, die mit statistischen Methoden ermittelt werden, z. B.

- die experimentelle Standardabweichung des Mittelwertes aus mehreren wiederholten Messungen derselben Messgröße
- die berechnete Standardabweichung einer Größe, die m. H. der Methode der kleinsten Quadrate aus empirischen Daten geschätzt wurde

Unsicherheiten vom Typ B

sind alle, die nicht mit statistischen Methoden ermittelt werden. In diesem Fall wird der Messgröße mit Hilfe aller verfügbaren Informationen eine statistische Verteilung zugeordnet und die Standardabweichung der zugeordneten Verteilung angegeben. Beispiele sind

- die Messung ionisierender Strahlung mit einem Zählrohr. Die Anzahl N der Zählrohrimpulse in einem Zeitintervall ist bekanntermaßen poissonverteilt, es gilt also $u(N) = s_N = \sqrt{N}$
- die Messung des elektrischen Stroms I mit einem Amperemeter. Einzige Information zur Genauigkeit ist die Angabe des Herstellers in der Bedienungsanleitung, dass die Messabweichung nicht größer ist als eine bestimmte Toleranz a (z. B. $a = 1,5\% + 3$ dgt). Der Messgröße wird eine Gleichverteilung² zugeordnet mit der Breite $2a$ und dem Messwert als Erwartungswert. Da die Varianz einer solchen Gleichverteilung $a^2/3$ ist, beträgt die (Standard-)Messunsicherheit des Stroms $u(I) = a/\sqrt{3}$.
- Einzige Quelle für die Unsicherheit eines digitalen Messgerätes sei die Auflösung der Anzeige. Bezeichnet man die Anzeige mit x und die Auflösung (1 dgt) mit Δx , so kann der Wert der Messgröße X mit gleicher Wahrscheinlichkeit im Intervall $x - \Delta x/2 \leq X \leq x + \Delta x/2$ liegen. Dem entspricht eine Standardunsicherheit von $u = 0,29 \cdot \Delta x$. (vergleiche voriges Beispiel: $0,5/\sqrt{3} = 0,29$)
- Bei einer Messung wird ein Widerstandsnormale verwendet, zu dem ein Kalibrierzertifikat vorliegt. In diesem ist die erweiterte Unsicherheit U mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% angegeben. Man geht dann von einer Normalverteilung aus, die Standardunsicherheit ist $u(R) = U/2$.

In beiden Fällen ist die Unsicherheit (zumindest näherungsweise) als Wahrscheinlichkeitsverteilung bekannt: beim Typ A empirisch gemessen, beim Typ B nach den vorliegenden Informationen „zugeordnet“. Die Methode B zur Ermittlung von Unsicherheiten muss nicht ungenauer sein als die Ermittlungsmethode A. Oft ist sogar das Gegenteil der Fall. So hat z. B. die empirische Standardabweichung einer normalverteilten Stichprobe von 10 Messungen selbst eine relative Standardunsicherheit von 24%. Unsicherheiten vom Typ B sind nicht notwendig systematische Unsicherheiten.

Das Modell der Messung

Meist wird eine Messgröße Y nicht direkt gemessen, sondern aus N weiteren Größen X_1, \dots, X_N berechnet³. Die Funktionsbeziehung

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

wird Modell der Messung genannt. Die X_1, \dots, X_N heißen **Eingangsgrößen**, Y heißt **Ausgangsgröße** des Modells. Im Leitfaden sind alle diese Größen Skalare, in den Anhängen befinden sich Beispiele, in denen die Größen vektoriell sind.

Das Modell enthält auch alle notwendigen Korrekturen und Korrekturfaktoren, um bekannte systematische Einflüsse auf Messgrößen zu berücksichtigen. Es muss nicht explizit als Funktion darstellbar sein und kann auch nur als Algorithmus oder empirischer Zusammenhang vorliegen. Der GUM geht davon aus, dass eine Messung bis zu dem Grad mathematisch modelliert werden kann, wie dies aufgrund der geforderten Messgenauigkeit notwendig ist.

² Mathematische Grundlage: In der Bayes-Statistik ist die Gleichverteilung bei der vorliegenden Information die vorurteilsfreie Verteilung bzw. die Verteilung mit der maximalen Informationsentropie, siehe [7].

³ Zur Unterscheidung werden im GUM physikalische Größen mit Großbuchstaben und Werte dieser Größen (Messwerte) mit Kleinbuchstaben bezeichnet.

Die kombinierte Unsicherheit [combined uncertainty] u_c

Ist y ein Schätzwert der Messgröße (= Messergebnis), so erhält man dessen Standardunsicherheit durch entsprechendes Kombinieren der Standardunsicherheiten der geschätzten Eingangsgrößen x_1, \dots, x_N und bezeichnet sie als kombinierte (Standard-)Unsicherheit $u_c(y)$. Sind die Eingangsgrößen unkorreliert, d. h. statistisch unabhängig, so gilt

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2 \quad (2)$$

Dies wird **Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz** genannt; die $c_i = \partial f / \partial x_i$ heißen **Empfindlichkeitskoeffizienten** [sensitivity coefficients].

Für den im Grundpraktikum oft vorkommenden Fall, dass die Modellfunktion die Form $Y = c X_1^{p_1} X_2^{p_2} \dots X_N^{p_N}$ hat, wird im GUM die Gleichung

$$\left[\frac{u_c(y)}{y} \right]^2 = \sum_{i=1}^N \left[p_i \frac{u(x_i)}{x_i} \right]^2 \quad (3)$$

für die **relative kombinierte Varianz** angeben.

Wenn die Eingangsgrößen signifikant korreliert sind, muss die Gleichung (2) für die kombinierte Varianz wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (4)$$

c_i und c_j sind die o.g. Empfindlichkeitskoeffizienten und $r(x_i, x_j)$ der **Korrelationskoeffizient**:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) u(x_j)} \quad (5)$$

Monte-Carlo-Methode zur Berechnung der kombinierten Unsicherheit

Allen Eingangsgrößen sind auf Grundlage der vorliegenden Informationen Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet oder empirisch ermittelt worden. Entsprechend dieser Verteilungen werden aus den Eingangsgrößen $10^3 \dots 10^6$ zufällige Datensätze gezogen. Mit Hilfe des Modells wird für jede Ziehung das Ergebnis berechnet. Aus der Verteilung der Ergebnisse können die Standardunsicherheit, die erweiterte Unsicherheit, Überdeckungswahrscheinlichkeiten usw. abgeleitet werden.

Die Monte-Carlo-Methode funktioniert auch in vielen Fällen, bei denen das Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz nicht oder nur mit großem Aufwand anwendbar ist, z. B. bei korrelierten Eingangsgrößen und bei stark nichtlinearen Modellen.

Die erweiterte Unsicherheit [expanded uncertainty] U

In einigen industriellen, kommerziellen und regulatorischen Anwendungen sowie dann, wenn Gesundheits- und Sicherheitsaspekte zum Tragen kommen, ist es häufig erforderlich, die Unsicherheit in Form eines Bereichs um das Messergebnis anzugeben, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der gemessenen Größe sinnvollerweise zugeordnet werden kann.

Zu diesem Zweck wird die erweiterte Unsicherheit U eingeführt, die sich durch Multiplikation der Standardunsicherheit $u_c(y)$ mit dem **Erweiterungsfaktor [coverage factor] k** ergibt:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (6)$$

Durch U wird ein Bereich $y - U \leq Y \leq y + U$ definiert, der einen großen Anteil p der Wahrscheinlichkeitsverteilung umfasst, die durch das Ergebnis y und dessen kombinierte Standardunsicherheit u_c charakterisiert wird. p wird **Überdeckungswahrscheinlichkeit [coverage probability]** oder **Grad des Vertrauens** genannt. Die in der Statistik definierten Begriffe Vertrauensbereich und Vertrauensniveau werden bewusst vermieden, weil ihre Verwendbarkeit an Bedingungen geknüpft ist, die mit dem allgemeineren Unsicherheitskonzept des GUM nicht vereinbar sind.

Wenn möglich, soll die Überdeckungswahrscheinlichkeit p geschätzt und angegeben werden. Dabei wird betont, dass diese Angabe wegen der begrenzten Kenntnis der durch y und $u_c(y)$ charakterisierten Verteilung meist recht ungenau ist.

In der Praxis tritt häufig der Fall auf⁴, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Ergebnisses y als normal angenommen werden kann und $u_c(y)$ ein ausreichend zuverlässiger Schätzwert für die Standardabweichung dieser Normalverteilung ist. Dann wird für $p = 95\%$ $k = 2$ und für $p = 99\%$ $k = 3$ gesetzt.⁵

Protokollieren der Unsicherheit

Bei der Angabe eines Messergebnisses sollte man

- die Methoden zur Berechnung des Messergebnisses und seiner Unsicherheit aus den Eingangsdaten klar beschreiben,
- alle Unsicherheitskomponenten auflisten und ihre Auswertung vollständig dokumentieren,
- die Datenanalyse so darstellen, dass alle wichtigen Schritte leicht nachvollziehbar sind,
- alle verwendeten Korrekturen und Konstanten mit ihren Quellen angeben.

In Endergebnissen sind Unsicherheiten auf höchstens 2 Stellen zu runden. Dabei soll man in der Regel aufrunden, *dabei jedoch Vernunft walten lassen* und z. B. 28,05 kHz auf 28 kHz abrunden.

Erlaubt sind folgende Angaben der Standardunsicherheit:

$m = 100,021\,47\text{ g}$ mit $u_c = 0,35\text{ mg}$

$m = 100,021\,47(35)\text{ g}$

$m = 100,021\,47(0,000\,35)\text{ g}$

$m = (100,021\,47 \pm 0,000\,35)\text{ g}$

Die letzte Variante wird nicht empfohlen wegen der Verwechslungsgefahr mit der erweiterten Unsicherheit. Zumindest muss aus dem Kontext hervorgehen, dass die Zahl nach dem \pm eine Standardunsicherheit ist.

Die erweiterte Unsicherheit soll in der folgenden Form angegeben werden:

$m = (100,021\,47 \pm 0,000\,79)\text{ g}$, wobei die erweiterte Unsicherheit $U = k u_c$ aus der kombinierten Standardunsicherheit $u_c = 0,35\text{ mg}$ und dem Erweiterungsfaktor $k = 2,26$ auf Grundlage einer t-Verteilung mit 9 Freiheitsgraden und einem geschätzten Grad des Vertrauens von 95% ermittelt wurde.

⁴ wenn mehrere ähnlich große Unsicherheitskomponenten kombiniert werden (aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes) und wenn die Zahl der effektiven Freiheitsgrade >10 ist

⁵ $k = 3$ ergibt sich für eine t-Verteilung mit einem Vertrauensniveau von 99% und 13 Freiheitsgraden

Zusammenfassung: Schritte einer Unsicherheitsanalyse

1. Formulierung
 - Definition der Messgröße Y
 - Bestimmung der Eingangsgrößen X_i , von denen Y abhängt
 - Entwicklung eines Modells der Messung
 - Zuordnung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Gauss, Rechteck, usw.) zu den X_i auf Grundlage der verfügbaren Information, gegebenenfalls Zuordnung gemeinsamer Verteilungen für korrelierte Größen
2. Fortpflanzung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der X_i durch das Modell in eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für Y
 - mit dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz,
 - durch analytische Rechnung oder
 - nach der Monte-Carlo-Methode
3. Zusammenfassung: Unter Verwendung der Verteilung von Y
 - Angabe des Erwartungswertes, d.h. eines Schätzwertes y für die Größe Y
 - Angabe der Standardabweichung von Y als Standardunsicherheit $u_c(y)$
 - Angabe eines Überdeckungsintervalls, welches Y mit einer spezifischen Überdeckungswahrscheinlichkeit enthält.

Vorschläge zur Anwendung des GUM in physikalischen Praktika

Der GUM ist von Metrologen gemacht. Für einen Metrologen ist es „*nicht ungewöhnlich, zehn Jahre am Experiment und zwei Jahre an der Auswertung zu sitzen*“ (W. Wöger, ehemaliger PTB-Forscher). Wie soll man die Regeln so vereinfachen, dass sie im Anfängerpraktikum anwendbar sind? Der durch lineare Addition der Unsicherheiten berechnete „Größtfehler“, der bisher in der Lehre eine große Rolle spielt, wird im GUM nicht einmal erwähnt. Ich schlage folgendes vor:

- Die Begriffe (Mess)unsicherheit, relative und absolute Unsicherheit, systematische und zufällige Unsicherheit, kombinierte Unsicherheit sollten grundsätzlich verwendet werden. Sie sollten immer u oder $u(x)$, $u(x)/x$ und u_c bezeichnet werden. Eventuell kann man die physikalische Größe auch als Index zur Unsicherheit schreiben: u_x
- Andere Begriffe, wie z. B. Fehler, Restfehler, innere und äußere Unsicherheiten, sollten grundsätzlich nicht verwendet werden. Ausnahme: „Grobe Fehler“ sind tatsächlich Fehler und keine Unsicherheiten.
- Zu einer ausführlichen Behandlung des Themas „Unsicherheiten beim Messen“ (bei Physikern, eventuell auch bei Ingenieuren, Chemikern, usw.) sollte Folgendes gehören:
 - der Unterschied zwischen Messabweichung und Messunsicherheit
 - die Korrektur bekannter systematischer Messabweichungen
 - die Ermittlungsmethoden A und B der (Standard-)Unsicherheit
 - Die Berechnung der Standardunsicherheit aus der Herstellerangabe einer maximalen Messabweichung oder Toleranz
 - das Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz für unkorrelierte Größen als Standardmethode zur Berechnung der kombinierten Unsicherheit von Messergebnissen
- In fortgeschrittenen Lehrveranstaltungen (wenn z. B. auch die t-Verteilung behandelt wird) sollten die Begriffe Erweiterte Unsicherheit, Erweiterungsfaktor und Überdeckungswahrscheinlichkeit benutzt werden.
- Die Monte-Carlo-Methode zur Berechnung der kombinierten Unsicherheit scheint mir gut geeignet, das Verständnis des Konzepts der Fortpflanzung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu fördern. Eventuell kann sie im F-Praktikum behandelt werden.

- Man sollte testen, ob die Software QMSys GUM Educational (kostenlos) bzw. QMSys GUM Professional (mit Monte-Carlo, 250 €) für die Unsicherheitsanalyse in Praktika sinnvoll einsetzbar ist.
Update (18.12.2012): Die kostenlose Version der QMSys-Software ist für den Alltagseinsatz im Praktikum recht stark eingeschränkt. Mit GUM Workbench existiert eine weitere Software zur Ermittlung der Unsicherheit von Messergebnissen. Die kostenlose Schulungsversion dieser Software ist im Praktikum sehr gut nutzbar und enthält auch die Monte-Carlo-Methode. Beide Programme werden im Grundpraktikum der Uni Konstanz bereits verwendet.
- Die Gegenstandskataloge für Mediziner und Pharmazeuten verlangen die Kenntnis der maximalen Unsicherheit für den Fall besonders einfacher zu berechnender Ergebnisse (Addition der relativen Unsicherheiten im Fall $y = c \cdot x_1^{p_1} \cdot x_2^{p_2}$). Hier sollte man weder vom „Größtfehler“ noch von der „kombinierten Unsicherheit“ sprechen.

Literatur

- [1] Wolfgang Schenk und Friedrich Kremer (Leipzig): Physikalisches Praktikum
- [2] W. Walcher (Marburg): Praktikum der Physik
- [3] Eichler, Kronfeld, Sahm (Berlin): Das Neue Physikalische Grundpraktikum
- [4] Wolfgang Kamke (Freiburg): Der Umgang mit experimentellen Daten, insbesondere Fehleranalyse im Physikalischen Anfänger-Praktikum
- [5] Manfred Drosig (Wien): Der Umgang mit Unsicherheiten
- [6] DIN 1319-4 Grundlagen der Meßtechnik: Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit (Ausgabe 1999)
- [7] Klaus Weise und Wolfgang Wöger: Meßunsicherheit und Meßdatenverarbeitung. WILEY-VCH, 1999

Links

www.ptb.de/cms/publikationen.html
www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/
www.iso.org/sites/JCGM/JCGM-introduction.htm
qsyst.com/qualisyst_de.htm

Physikalisches Praktikum

Schenk, W.; Kremer, F.; Beddies, G.; Franke, Th.;

Galvosas, P.; Rieger, P. - Schenk, W.; Kremer, F. (Hrsg.)

2014, XIV, 397 S. 325 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-00665-5