

Vorwort

„Wenn man messen kann, worüber man spricht und es in Zahlen ausdrücken kann, dann weiß man etwas darüber. Wenn man es nicht in Zahlen ausdrücken kann, dann ist das Wissen dürftig und unzureichend.“ Diese dem berühmten britischen Physiker Sir William Thomson, genannt Lord Kelvin, zugeschriebene Aussage [1] kann man einfacher auch folgendermaßen ausdrücken: Wir brauchen Zahlen und Fakten, um vernünftig über eine Sache sprechen zu können, um Probleme zu erkennen und nachfolgend Lösungsansätze zu finden. Gefühltes Wissen über Dinge reicht nicht aus.

In der Folge dessen sind wir in unserem täglichen Leben von vielerlei Messungen umgeben. Das beginnt früh beim Blick auf das Thermometer, um sich passend anzuziehen, und setzt sich bei der Kontrolle des Körpergewichts auf der Personenwaage weiter fort. Die Einhaltung von Terminen erfordert die Beobachtung (Messung) der Zeit. An der Tankstelle misst man den Reifendruck, die Zapfsäule misst das Volumen des gezapften Kraftstoffs. Bei Unwohlsein misst man Fieber, d. h. die Körpertemperatur, beim Arztbesuch wird der Blutdruck bestimmt. Die Smartwatch zeichnet die tägliche Schrittanzahl und gegebenenfalls per GPS auch die zurückgelegte Wegstrecke auf.

Nun kann man versuchen, alle diese Größen sehr genau zu messen, also den „wahren Wert“ zu bestimmen. Die derzeit genaueste Atomuhr am National Physical Laboratory (NPL) in London würde in 10,6 Milliarden Jahren maximal eine Sekunde falsch gehen [2], was in etwa der Zeit seit dem Urknall entspricht (13,8 Milliarden Jahren). Im täglichen Leben braucht man eine solche Genauigkeit sicherlich nicht. Den Beginn unserer Vorlesungen zum Beispiel erreichen eine ganze Reihe unserer Studenten mit Verspätungen im Minutenbereich. Gute Automatikuhren, sogenannte Chronometer, erreichen Gangabweichungen von weniger als 6 s am Tag [3], Quarzuhrnen von weniger als 1 s am Tag.

Uns allen ist bewusst, dass all diese genannten Messung ungenau, besser gesagt unsicher sind. Das Körpergewicht schwankt je nach dem, zu welcher Tageszeit man es bestimmt. Die gemessene Außentemperatur hängt sowohl von der Qualität des Thermometers als auch davon ab, ob es sich in der Sonne oder im Schatten befindet. Dies bedeutet, dass man durch die Messung nur einen Schätzwert erhält, der unsicher ist. Diese Unsicherheit kann dabei entsprechend den Messbedingungen kleiner oder größer sein. Im schlimmsten Fall kann die Messunsicherheit so groß sein, dass man mit dem Messergebnis weder Probleme erkennen noch erforderliche Schlussfolgerungen und Entscheidungen treffen kann. Wer kennt nicht den Spruch: „Wer misst, misst Mist“.

Vielleicht hat der eine oder andere auch selbst schon versucht, beim gebührenpflichtigen Parken mit dem Auto die Parkscheibe so einzustellen, dass nur eine unge nau Ablesung möglich ist, um für die geleistete Parkgebühr eine viertel Stunde länger parken zu können.

Andererseits ist es aber auch möglich, ganz ohne Messungen Aussagen zu bestimmten physikalischen Größen zu machen. Die Kenntnis der Jahreszeit und der damit verbundenen charakteristischen Temperaturverläufe, zusammen mit dem Blick aus dem

Fenster, der Informationen über das aktuelle Wetter gibt, erlaubt eine grobe Bestimmung der Außentemperatur. Hier kommen also neben dem Ergebnis direkter Messungen auch noch sonstige Informationen und Kenntnisse dazu. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Außentemperatur nun in einem bestimmten Toleranzbereich liegt, steigt, je größer dieser Toleranzbereich gewählt wird.

Ziel dieses Buches ist nun eine leicht verständliche Darstellung, wie man auf einfacherem Wege zu einem Messergebnis finden kann und wie man insbesondere praxisnah die dazugehörige Messunsicherheit abschätzen kann. Carl Friedrich Gauß kommt der Verdienst zu, zu Beginn des 19. Jahrhunderts mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate einen Ansatz geschaffen zu haben, mit dem der Bereich möglicher Abweichungen, insbesondere zufälliger Abweichungen, in einer Messreihe bestimmt werden kann [4]. Aus der Annahme, dass der mittlere Wert einer Gruppe von Zahlen der wahrscheinlichste sei, folgerte er, dass die Verteilung der zufälligen Abweichungen eine Glockenkurve ergibt, die sogenannte Normalverteilung [5]. Die Breite der Kurve ist dann ein Maß von der Varianz und damit der Beobachtungsgenauigkeit. Nachteil dieses Vorgehen ist allerdings, dass sie nur für Zahlenreihen, zum Beispiel bei wiederholten Messungen, gilt. Bei nicht konstanten oder systematischen Abweichungen ist es jedoch nicht anwendbar.

Mit dem "Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen" (GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [6]), herausgegeben von CPIM (Comité International des Poids et Mesures) als der höchsten internationalen Autorität in der Metrologie, wurde 1993 erstmalig ein standardisiertes Vorgehen vorgeschlagen, wie unabhängig von den bisherigen Einschränkungen die Messunsicherheit bei Messungen bestimmt werden kann. Die Messunsicherheit beschreibt dabei ein Intervall, in dem der Wert der Messgröße mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist. Eine Messung ist damit umso genauer, je kleiner dieser Bereich ist. Der GUM versucht dabei, einen Mittelweg zwischen Theorie und Pragmatismus zu gehen. Wo etwa die Verteilungsfunktion einer Einflussgröße nicht bekannt ist, wird eine bestimmte angenommen, z. B. eine Gleichverteilung. So ist es gelungen, die Terminologie und die Regeln zur Auswertung von Unsicherheiten beim Messen zu vereinheitlichen. Mit der internationalen Vergleichbarkeit von Messungen bietet der GUM somit eine wichtige Grundlage für die globale Wirtschaft und den weltweiten Handel. Trotzdem gibt es in einigen Fragen nach wie vor Weiterentwicklungsbedarf. Dieser wird vom Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) koordiniert.

Seit dem erstmaligen Erscheinen des GUM 1993 sind eine Reihe von Lehrbüchern erschienen, die sich mit der Messunsicherheit beschäftigen. Charakteristisch für die meisten ist, dass sie sich direkt am Aufbau des GUM orientieren und dabei mehr oder weniger umfassend vom theoretischen Gesamtgebäude ausgehen, ehe dann Beispiele präsentiert werden.

Mit diesem Büchlein wollen wir einen etwas anderen Weg bestreiten. Im Mittelpunkt soll das Wissen stehen, welches ein Praktiker zum Messen und zur Auswertung der entsprechenden Messergebnisse braucht. Die Mathematik soll dafür nur insoweit

dargestellt werden, wie sie als „Handwerkszeug“ wirklich benötigt wird. Allerdings wollen wir aber immer auch so ausführlich sein, dass sich alle Gedankengänge jederzeit rechnerisch einfach nachverfolgen lassen. Ausgehend von einfachen Beispielen soll so das Verständnis für die wichtigen Aspekte bei der Ermittlung und Angabe der Messunsicherheiten auf möglichst einfachem Niveau erreicht werden. Zum Ende werden komplexere Beispiele vorgestellt, an denen man sich bei anderen Messaufgaben einfach orientieren kann.

Bei der Konzeption des Buches haben wir versucht, uns in Studierende der Ingenieur- und Naturwissenschaften hineinzuversetzen, wie wir sie selbst in unseren Verlesungen der Messtechnik (K.-D.S.) und der Sensorik (G.G.) sitzen haben. Dementsprechend entstammen viele Beispiele auch typischen Aufgabenstellungen, mit denen fast jeder Student im z. B. physikalischen, maschinenbaulichen oder elektrotechnischen Praktikum konfrontiert ist. Aus diesem Grund haben wir uns bei der Darstellungsweise und der Notation didaktisch von typischen Grundlagenlehrbüchern der Elektrotechnik, der Messtechnik und der Systemtechnik leiten lassen. So unterscheiden wir formelzeichenmäßig nicht zwischen der physikalischen Größe und dem Wert dieser Größe, wie es der GUM macht. Die Eingangsgröße (d. h. die zu messende Größe, auf die rückgeschlossen werden soll) wird in diesem Buch – wie im Studium häufig verwendet – mit x bezeichnet, die Ausgangsgröße mit y . Auch dies wird im GUM anders gehandhabt. Wir glauben allerdings, dass dieses Vorgehen gerechtfertigt ist, da die Studenten mit diesem Buch den Umgang mit der Messunsicherheit sicher beherrschen lernen sollen. Dies sollte umso schneller und besser gelingen, je einfacher sich die Ausführungen in das aus dem Studium bekannte Gedankengebäude eingliedern. GUM-Experten werden damit möglicherweise nicht zufrieden sein. Für diesen Leserkreis gibt es aber viele andere, besser geeignete Fachbücher.

Ein neues Buch wie dieses hier wird sicherlich nicht sofort komplett und fehlerfrei sein. Wir sind deshalb an Korrekturen, Anregungen und Verbesserungsvorschlägen sehr interessiert (gerald.gerlach@tu-dresden.de). Ihr kritischer Blick auf unser Buch wäre ein Gewinn für uns!

Wir haben vielen Personen zu danken, die zum Entstehen und zum Gelingen des Buches beigetragen haben. Zuallererst geht unser ganz besonderer Dank an die Mitarbeiter des De Gruyter-Verlags für die freundliche Zusammenarbeit und auch für die Geduld bei wiederholten Verzögerungen aufgrund der Arbeitsbelastung der Autoren. Wir sind weiterhin Herrn Privatdozent Dr. Helmut Budzier zu großem Dank verpflichtet, der freundlicherweise die Erstellung fast aller Abbildungen übernommen hat. Ein großer Dank geht aber auch an unsere Familien, die toleriert haben, dass viel Zeit und Energie statt in die Familie in dieses Buch geflossen sind.

Gerald Gerlach
Klaus-Dieter Sommer

