

Messen macht möglich

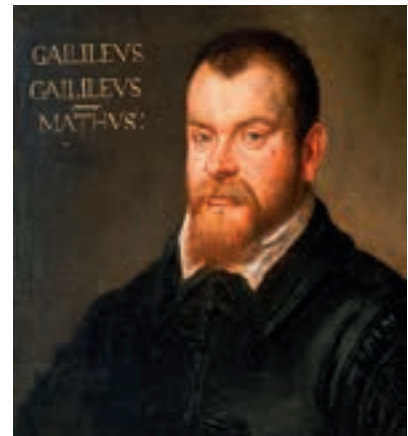
Wer richtig messen kann, weiss mehr. Im Zentrum von sozialen oder technischen Entwicklungen stand immer wieder die Metrologie. Sie bildet heute die Grundlage der Wissenschaften – und in Zukunft, wenn Themen wie Digitalisierung die Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft verändern werden? Die Revision des Internationalen Einheitensystems SI ist Grund genug, der Entwicklung der Metrologie und ihrer Wechselwirkung mit Technik, Wissenschaft und Gesellschaft etwas näher nachzugehen.

GREGOR DUDLE

Menschen messen sich und ihre Umgebung seit jeher, um Ordnung zu schaffen und sich besser orientieren zu können. Grundsätzlich heisst messen vergleichen. Eine unbekannte Grösse wird mit einer vorgegebenen Referenzgrösse verglichen. Dieses einfache Prinzip ist vermutlich so alt wie die Menschheit selber. Bereits im Alten Ägypten wurden Masseinheiten für Länge, Volumen, Gewicht und Zeit festgelegt (Bild 1). Dies war nicht nur für fairen Handel nötig, sondern auch für die Berechnung von Abgaben an den Staat.

Wenn jedoch nicht überall die gleiche Referenzgrösse verwendet wird, könnte sich jemand daraus einen Vorteil erschleichen: Der Käufer erhält weniger als er einzukaufen glaubt, der Staat zieht zu viel oder zu wenig Steuern ein. Mass und Gewicht gehören deshalb oft zu den ersten Elementen, die eine Zivilisation oder ein Staat regelt. Kein Wunder findet sich schon im Alten Testament das Gebot, mit Mass und Gewicht nicht zu schummeln: «Ihr sollt nicht unrecht handeln im Gericht, mit der Elle, mit Gewicht, mit Mass». In England wurden einheitliche Masse für Wein, Bier, Getreide und Stoffe im 13. Jahrhundert in der Magna Carta gefordert. Auch die moderne Schweiz hat sich sehr schnell

2: Galileo Galilei war einer der wichtigsten Begründer der exakten Naturwissenschaften.



Gedanken zu vertrauenswürdigen Messungen im Handel gemacht. Schon 1862 hat der Bundesrat in der damals jungen Schweiz entschieden, eine Eidgenössische Eichstätte einzurichten, um allgemein gültige Referenzmasse vorzugeben und beim Handel unlautere Messungen zu unterbinden. Diese Eidgenössische Eichstätte ist der Vorläufer des heutigen METAS.



1: Am Anfang war die gesetzliche Metrologie: Masseinheiten für Länge, Volumen, Gewicht und Zeit legten bereits die alten Ägypter fest.

3: Mit der Unterzeichnung des Metervertrags 1875 und Herstellung von Urmeter und Urkilogramm wurde eine weltweit verbindliche Basis für das Messen geschaffen.



Seit damals hat sich die Welt gewaltig verändert – und mit ihr die Metrologie. Die hoheitlichen Tätigkeiten, heute zusammengefasst bezeichnet als gesetzliche Metrologie, gibt es aber immer noch. Dass in einem Staat metrologische Bedürfnisse am Anfang hauptsächlich aus der gesetzlichen Metrologie kommen, ist kein Zufall. Eine funktionierende metrologische Infrastruktur ist ein wichtiger Baustein bei der Entwicklung eines Staates.

Metrologie als Grundlage der Wissenschaft

Die Metrologie beschränkt sich aber nicht nur auf Regeln für Staaten. Auch die Wissenschaft benötigt genaue Messungen, ja sie würde ohne diese gar nicht existieren. Galileo Galilei (1564–1641), einem der Väter der exakten Naturwissenschaften, wird der Ausspruch zugeschrieben: «Man muss messen, was messbar ist, und messbar machen, was noch nicht messbar ist.» Zwar hat er diese Aussage nie gemacht, aber mit Sicherheit hat Galilei die Grundidee dahinter vertreten. Nur wenn man etwas messen kann, kann man ein Phänomen auch verstehen. Seine Theorien hat er erfolgreich durch die Kombination von Mathematik und Messungen erarbeitet.

Viele andere bedeutende Physiker vertraten die gleiche Ansicht, allen voran Lord Kelvin (1824–1907): «I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be.» Die Messungen sind heute komplizierter, aufwändiger und vor allem genauer. Das von Galileo und Kelvin propagierte Prinzip hat jedoch nach wie vor Gültigkeit. Damit sich die Naturwissenschaften weiterentwickeln können, braucht es Messungen, mit denen sich Theorien verifizieren und validieren lassen.

Errungenschaft Metervertrag

Solange ein Wissenschaftler alleine arbeitet und seine Resultate nicht mit anderen vergleicht, braucht er sich nicht um die Masseinheiten zu kümmern. Die Fallversuche, die Galileo angeblich in Pisa durchgeführt haben soll, konnte er mit willkürlichen Einheiten für die Zeit und die Distanz durchführen. Einzig

die Stabilität der gewählten Referenzen war für das Experiment wichtig. Sollen hingegen Messresultate vergleichbar sein, sind gemeinsame Referenzmasse unerlässlich. Wie beim Handel stieg somit auch in der Wissenschaft mit zunehmendem Austausch der Bedarf nach gemeinsamen Referenzen. Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert und der Entwicklung von schnelleren Verkehrsmitteln wurde es einfacher, Kontakte über weite Distanzen zu pflegen. Die Entwicklung einer gemeinsamen Grundlage für das Messen wurde deshalb von Seiten der Wirtschaft wie der Wissenschaft vorangetrieben. Die Unterzeichnung des Metervertrags 1875 und Schaffung des Bureau international des poids et mesures (BIPM) beendete das Wirrwarr verschiedener nebeneinander bestehender Einheiten wie Fuss oder Elle. Diese Errungenschaft einer weltweit verbindlichen Basis für das Messen ist Ausdruck der Globalisierung der Wissenschaft und des zunehmenden internationalen Handels.

CIPM MRA

Mit dem Metervertrag wurde eine gemeinsame Basis für Messungen geschaffen, sozusagen eine weltweit akzeptierte Sprache, mit der man Messresultate ausdrücken konnte. In vielen Ländern wurden Nationale Metrologieinstitute (NMI) geschaffen, die dafür sorgen sollten, dass genaues Messen im eigenen Land möglich war. Die Idee vergleichbarer Resultate wurde jedoch nicht unmittelbar mit letzter Konsequenz umgesetzt. Kalibrierungen anderer NMI wurden nicht zwingend als gleichwertig anerkannt. Es brauchte über hundert Jahre bis das Comité international des poids et mesures (CIPM) 1999 das System von gegenseitiger Anerkennung der Nationalen Referenzen und der Kalibrierzertifikate (Mutual Recognition Arrangement MRA) etablieren konnte. Die gegenseitige Anerkennung und die Äquivalenz der Kalibrierzertifikate sind heute gewissermassen schon eine Selbstverständlichkeit. Man vergisst beinahe, dass sie Grundvoraussetzungen sind für die global funktionierende Industrie.

So werden beispielsweise Teile für einen Airbus an den unterschiedlichsten Orten gefertigt. Die dabei verwendeten Messinstrumente sind rückführbar auf verschiedene NMI. Das CIPM MRA stellt sicher, dass alle Kalibrierzertifikate, die von NMI ausgestellt werden, miteinander verglichen werden können und so die einzelnen Teile des Airbus am Schluss zusammenpassen.

4: Elektrizitätszähler einst und heute: Die Systemgrenzen in der gesetzlichen Metrologie müssen nun mehr erfassen als nur das Messmittel.



Wissenschaft als Grundlage der Metrologie

Die Metrologie hat bei der Entwicklung der Wissenschaft eine wichtige Rolle gespielt. Dank genauen Messungen erkannten Forscher Gesetzmässigkeiten und konnten diese beschreiben. Umgekehrt gelang es der Metrologie immer wieder, Erkenntnisse der Forschung für ihre Zwecke einzusetzen. Bei einer ganzen Reihe von Physik-Nobelpreisen gibt es eine direkte oder indirekte Verbindung zur Metrologie. Schon 1907 wurde Albert Michelson mit dem Nobelpreis in Physik für optische Präzisionsinstrumente ausgezeichnet. Die von ihm entwickelten Interferenz-Methoden werden heute routinemässig in der Längenmessung eingesetzt. Brian D. Josephson hat 1973 den Preis für die theoretische Voraussage des nach ihm benannten Effekts erhalten.

Der Josephson-Effekt wird heute zur Realisierung des Volts herangezogen. Klaus von Klitzing wurde 1985 für seine Arbeiten zum quantifizierten Hall-Effekt belohnt. Dank diesen Arbeiten können heute elektrische Widerstände mit höchster Präzision gemessen werden. 1989 wurden mit Norman Ramsey, Hans Georg Dehmelt und Wolfgang Paul gleich drei Physiker geehrt, die allesamt Methoden für Spektroskopie entwickelt hatten. Ohne diese Techniken wären die unglaublichen Genauigkeiten der aktuellen Atomuhren und damit den Einsatz globaler Navigationssysteme (GPS) nicht möglich. 2005 schliesslich wurde der Preis Theodor Hänsch zugesprochen. Er hatte mit seinen Arbeiten rund um Frequenzkämmen die Messung von optischen Frequenzen wesentlich vereinfacht.

Die Liste von Errungenschaften in diesem Zusammenhang ist nicht vollständig. Sie veranschaulicht aber, wie es Metrologen immer wieder verstanden haben, wissenschaftliche Erkenntnisse für ihre Disziplin zu nutzen und so die Metrologie weiter zu bringen. Im Laufe der Jahre konnte das mit dem Metervertrag eingeführte Einheitensystem wiederholt angepasst und verbessert werden. Der Urmeter wurde 1960 ersetzt durch eine Definition, die auf einem atomaren Übergang basierte. 1983 musste diese einer Definition weichen, die sich auf die Lichtgeschwindigkeit und somit auf eine Naturkonstante stützt. Mit der neusten Revision des Internationalen Einheitensystems SI sind nun sämtliche Einheiten auf Konstanten abgestützt.

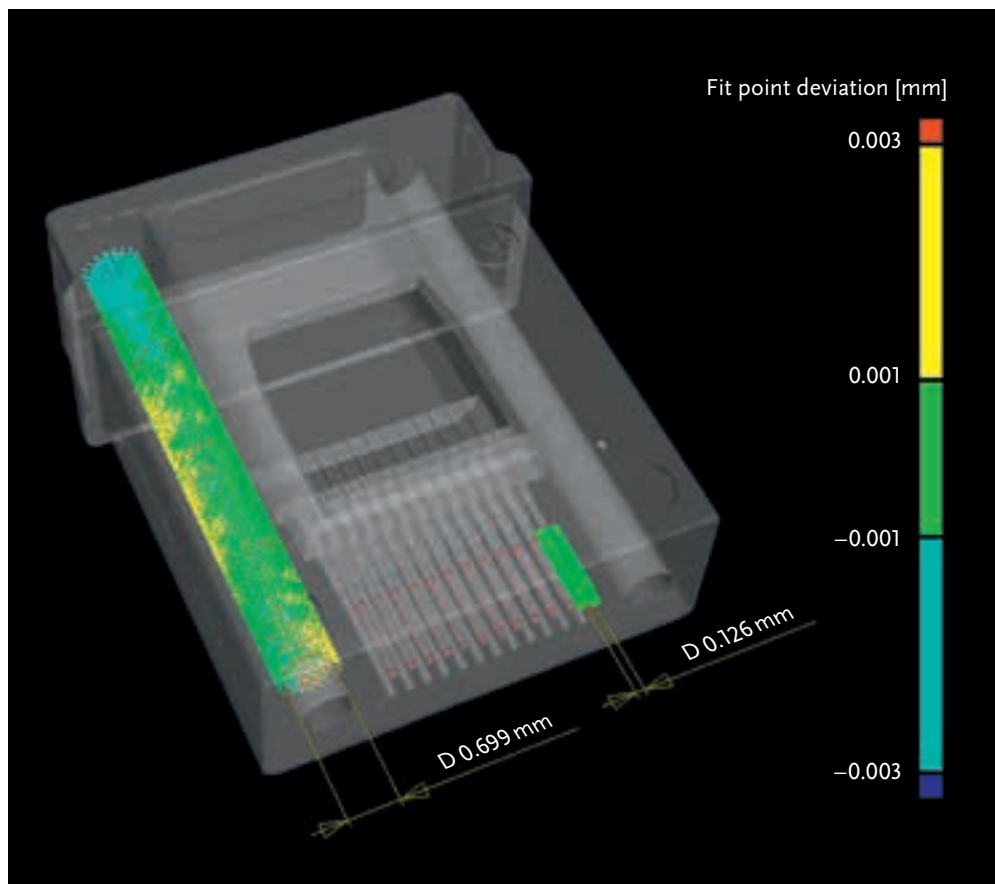


Herausforderungen für die Zukunft

Metrologie hat bei der sozialen, technischen und wissenschaftlichen Entwicklung seit jeher eine zentrale Rolle gespielt. Verkäufer und Käufer brauchen für fairen Handel eine gemeinsame Referenz, ebenso Unternehmen für Kontrollen bei der Herstellung von Produkten und besonders auch die Wissenschaft, um Resultate zu vergleichen.

Die Bedürfnisse von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft waren stets wichtige Treiber für die Entwicklung der Messtechnik. Oberstes Ziel der Metrologie war bislang, in allen Gebieten stabilere Messungen durchführen und immer genauer messen zu können: Nach dem Millimeter wollte man den Mikrometer messen, nach dem Mikrometer den Nanometer. Die Metrologen werden weiterhin alles daran setzen, die Messunsicherheit verkleinern und so die Messmöglichkeiten verbessern zu können. Aus den Entwicklungen in der Technik und der Gesellschaft ergeben sich aber auch Herausforderungen für die Metrologie, die über die traditionellen physikalischen Messungen hinausgehen.

5: Konzepte wie Rückführbarkeit der Messresultate auf SI-Einheiten werden mit der Digitalisierung abstrakter.



Dazu gehört zweifelsohne die Digitalisierung, wohl der wichtigste Umbruch der jüngeren Zeit. Viele Gebiete der Wissenschaft und der Technik sowie der Gesellschaft haben mit der Digitalisierung bereits grundlegende Änderungen erfahren. Dieser Trend macht auch vor der Metrologie nicht Halt. Die Digitalisierung wird die Metrologie verändern; nicht erst in ferner Zukunft, sondern schon heute. Das zeigt sich deutlich anhand von Elektrizitätszählern: Bis vor kurzem wurde der Verbrauch elektrischer Energie in Haushalten ausschliesslich mit Geräten erhoben, die abgeschlossene Systeme waren. Die Elektrizitätszähler enthielten in einem Gehäuse sowohl Sensor wie auch Zählwerk. Wurde das Gehäuse mit geeigneten Massnahmen vor Manipulationen geschützt, konnte sichergestellt werden, dass die Messresultate nicht verfälscht werden konnten. Die Situation hat sich heute geändert: Der Energieverbrauch wird an einer Stelle gemessen, elektronisch übermittelt und beispielsweise auf einer Internetplattform angezeigt. Nur das Gehäuse vor Manipulationen zu schützen reicht nicht mehr aus. Will man Kunden wie Verkäufer vor unberechtigten Eingriffen in die Datenauswertung bewahren, müssen die gesetzlichen Metrologen die Systemgrenzen weiterziehen als nur um das Gehäuse des E-Zählers.

Aber auch für die technische Metrologie ergeben sich mit der Digitalisierung neue Fragen: Früher waren Längenmessungen im weitesten Sinne immer taktil. Mit der Computertomogra-

phie, wie sie beispielsweise am METAS aufgebaut wurde, werden Dimensionen nicht mehr durch taktile Methoden bestimmt, sondern durch Algorithmen in rekonstruierten 3D-Modellen. Konzepte wie Rückführbarkeit auf SI-Einheiten der Messresultate sind in solchen Fällen abstrakter als etwa bei einer Kalibrierung von Endmassen.

Weiterhin voneinander profitieren

Nicht nur die Metrologie hat sich dem Wandel angepasst, auch das zugrundeliegende System der Einheiten, das SI, wurde immer wieder an neue Anforderungen angepasst. Mit der aktuellen Revision des SI sind Voraussetzungen geschaffen worden, dass das SI bereit ist, zukünftige technische Entwicklungen zu ermöglichen. So sollte die erfolgreiche Wechselwirkung und technischen und sozialen Entwicklungen und der Entwicklung der Metrologie auch in Zukunft bestehen bleiben können.

De l'importance de la métrologie

Mesurer correctement, c'est en savoir plus. Depuis toujours, l'être humain se mesure lui-même, ainsi que son environnement. De façon générale, mesurer c'est comparer. Dans l'Égypte ancienne, des unités de mesure de longueur, de volume, de poids et de temps étaient déjà définies. Elles étaient nécessaires, non seulement à l'équité du commerce, mais aussi au calcul des taxes prélevées par l'état.

La métrologie ne se limite pas à établir des règles pour les états. La science a besoin, elle aussi, de mesures exactes. En effet, des mesures exactes ont permis à des chercheurs d'identifier des lois et de les décrire. Inversement, la métrologie a régulièrement utilisé à ses fins les résultats de la recherche.

C'est pourquoi les milieux économiques et scientifiques ont promu le développement d'une base de mesure commune. La signature de la Convention du Mètre en 1875 et la création du Bureau international des poids et mesures (BIPM) ont mis fin à l'imbroglia causé par l'existence parallèle d'unités différentes. Les besoins de la science, de l'économie et de la société ont été de tout temps les moteurs principaux du développement de la métrologie.

Toutefois, les évolutions technologiques et sociales lancent aussi des défis à la métrologie, défis allant bien au-delà des mesures physiques et chimiques. Il s'agit, par exemple, du défi de la numérisation, l'un des changements les plus importants de notre époque. C'est pourquoi la métrologie et le Système international d'unités (SI), sur lequel elle repose, se sont adaptés aux changements. La révision actuelle du SI crée les conditions favorables aux futurs développements techniques.

La misurazione lo rende possibile

Chi riesce a misurare correttamente, ne sa di più. L'uomo ha sempre misurato sé stesso e il proprio ambiente. Fondamentalmente, misurare significa confrontare. Già nell'Antico Egitto sono state definite unità di misura per lunghezza, volume, peso e tempo. Ciò era necessario non solo per il commercio equo e solidale, ma anche per il calcolo delle tasse dovute allo Stato.

La metrologia non si limita solo a definire regole per gli Stati, anche la scienza ha bisogno di misurazioni accurate. Grazie a misurazioni accurate i ricercatori hanno individuato delle regolarità e le hanno potuto descrivere. Inversamente la metrologia è sempre riuscita a utilizzare i risultati della ricerca per i propri scopi.

Lo sviluppo di una base comune per la misurazione è stato pertanto promosso sia dall'economia che dalla scienza. La firma della Convenzione del metro nel 1875 e la creazione del Bureau international des poids et mesures (BIPM) hanno messo fine alla confusione di unità diverse esistenti l'una accanto all'altra. Le esigenze della scienza, economia e società sono sempre state importanti fattori di sviluppo delle tecniche di misurazione.

Tuttavia anche gli sviluppi tecnologici e sociali pongono sfide per la metrologia, che vanno oltre le tradizionali misurazioni fisiche e chimiche. Ciò include ad esempio la digitalizzazione, uno dei più importanti cambiamenti del nostro tempo. Pertanto, la metrologia e il sistema di unità SI alla sua base si sono adattati ai cambiamenti. Con l'attuale revisione del SI sono state create le condizioni per consentire i futuri sviluppi tecnici.

Measurement makes it possible

If you can measure correctly, your level of knowledge is increased. People have been measuring themselves and their environment since time immemorial. In essence, measuring means making comparisons. Definitions of measurement units for length, volumes, weight and time already existed back in the days of ancient Egypt. These were needed not just for fair trade, but also to calculate taxes payable to the state.

Metrology is not confined to rules for government however, science, too, needs precise measurements. Thanks to precise measurements, researchers were able to recognise and describe fundamental principles. On the other hand, metrology has regularly succeeded in harnessing research findings for its own purposes.

The development of a common basis for measuring was thus spurred on by commerce and science alike. The signing of the Metre Convention in 1875 and the creation of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) brought to an end the confusion of different co-existing units. The needs of science, commerce and society were always important drivers for the development of metrology.

Developments in technology and society pose challenges for metrology extending beyond traditional physical and chemical measurements however. Among these is digitalisation, one of the most important changes of our time. Metrology and its underlying system of units, the SI, has therefore adapted to the change. The current revision of the SI has created the conditions in which future technological developments will flourish.