

Das Maß der Dinge

Teil II: Naturkonstanten geben Beständigkeit

Monika Rech-Heider

Basiseinheiten beziehen sich ab dem 20. Mai 2019 auf Naturkonstanten. Für die Geodäsie heißt das, dass alle Messungen auf die Naturkonstanten zurückgeführt werden müssen. Und die Geodäsie selbst hat Anteil an der Naturkonstanten, die das Kilogramm definiert!

In der Geodäsie bestimmend sind vor allem die Basiseinheiten Sekunde, Meter und Kilogramm. Man näherte sich ihren neuen Definitionen sukzessive ab den 50er und 60er Jahren des letzten Jahrhunderts.

Die Sekunde – das Atom als Pendel

Vor mehr als 60 Jahren startete man mit der Basiseinheit der Zeit. Die Sekunde galt jahrhundertlang als die Zeitspanne des 86.400sten Teils eines mittleren Sonnentages (24 Stunden · 60 Minuten · 60 Sekunden). Da die Erde aber mal schneller, mal langsamer rotierte, war die Sekunde auf unseren Uhren veränderlich. So veränderlich, dass man nach einem neuen System suchte. Über die Quantenphysik entdeckte man, dass Atome zwischen zwei Energie- oder Quantenzuständen elektromagnetische Wellen in einer bestimmten Frequenz abstrahlen, die sehr stabil ist und sich messen ließ. Harold Lyons konstruierte 1949 auf diesem Prinzip die erste Atomuhr. 1952 erschien »NBS-1« auf der Weltbühne, die erste auf Cäsium basierende Atomuhr, bei der man Mikrowellenfrequenzen messen konnte. »Als Sekundenzeiger benutzte man ein schnelles Pendel im Atom«, versinnbildlicht Dr. Jens Simon von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) die Herangehensweise. Die Zeitdauer einer Sekunde ist international seit Oktober 1967 definiert als das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids Cäsium entspricht. Diese Frequenz liegt im Mikrowellenbereich, sie kann sehr präzise gemessen werden und gilt seither als Naturkonstante.



Das neue Internationale Einheitensystem basiert auf der Festlegung von 7 Naturkonstanten (inneres Kreissegment in der Abbildung). Alle Einheiten lassen sich aus diesen Naturkonstanten herleiten. Jede Einheit ergibt sich in diesem System aus einer multiplikativen Verknüpfung von Naturkonstanten. Im Regelfall sind tatsächlich mehrere Konstanten nötig, um eine Einheit darzustellen. So benötigt beispielsweise der Meter zwei Konstanten oder das Kilogramm drei.

Der Meter – Laserlicht als Lineal

Die Längeneinheit Meter wurde als Nächstes unter die Fittiche der Metrologen genommen. Statt wie zuvor den Meter über die Meridianbogenlänge zu definieren, nahm man sich die Strecke vor, die das Licht im Vakuum in einer bestimmten Zeit zurücklegt. Genau gesagt, entspricht die Länge eines Meters seit 1983 der Strecke, die Laserlicht in einem ganz bestimmten Bruchteil einer Sekunde im Vakuum zurücklegt. Laserlicht wurde also zum neuen Lineal für den Meter. Achtung: Dafür definierte man die Lichtgeschwindigkeit als Naturkonstante genau auf 299.792.458 Meter pro Sekunde. Moment mal, Naturkonstanten sind also auch keine von der Natur vorgegebene Zahl, sondern vom Menschen »gemacht«? Und wenn der Mensch die Naturkonstante festlegt, warum bediente man sich keiner glatten Zahl, etwa 300 Millionen Meter pro Sekunde? »Dem Licht ist es egal, welchen Wert wir ihm zuschreiben; es weiß nichts von Zahlen«, erklärt Simon. »Wir Menschen geben die Werte vor, allerdings können wir die Naturkonstanten nicht willkürlich wählen. Rein rechnerisch wären die 300 Millionen Meter pro Sekunde natürlich viel einfacher. Aber wir müssen sie an das bereits vorhandene metrische System anpassen. Schließlich benutzen wir die Lichtgeschwindigkeit, um den Meter zu definieren«, erklärt Simon. Das Licht bestimmt also im neuen Einheitensystem den Meter, während im alten Einheitensystem der Meter vorgegeben war und die Lichtgeschwindigkeit gemessen wurde. Was für Nicht-Physiker ein wenig nach einer Umkehrung der Verhältnisse klingt, nimmt seine Fortsetzung im Krimi um das Kilogramm.

Der Krimi um das Kilogramm

Das Kilogramm erwies sich in den Folgejahren als besonders widerspenstiger Mitstreiter im Kanon der SI-Einheiten. Der Spätzünder basierte tatsächlich bis vor drei Jahren auf dem uralten Platin-Iridium-Zylinder, der fest verschlossen (wie auch das Urmeter) in den Katakomben des Internationalen Instituts für Maße und Gewichte in Sèvres bei Paris lagert. An ihm sollten sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit jahrzehntelang die Zähne ausbeißen. Und das Ganze gleicht ein wenig einem Krimi, denn gleich zwei Verfahren wetteiferten um die »Wahrheit« in Sachen Gewichtmaß. Da ist zum einen der Versuchsaufbau der Siliziumkugel, der an der PTB zum Favoriten heranreifte. Und da ist auf der anderen Seite des Atlantiks die sogenannte Watt- oder Kibble-Waage, die am National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg in den USA das Rennen machte.



Foto: PTB

↑ Eine Siliziumkugel ist eine perfekte Zählmaschine für Atome. Mit ihrer Hilfe gelingt eine Neudefinition des Kilogramms auf der Basis von Naturkonstanten.

→ Die Watt-Waage (oder: Kibble-Balance) am National Institute of Standards and Technology (NIST). Ziel dieses Experiments, ebenso wie das des Siliziumkugel-Experiments, ist die Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums.

Grundlage der Neudefinition, da war man sich einig, sollte das Planck'sche Wirkungsquantum sein, das – wenn man so will – erklärt, was die Atome im Inneren zusammenhält, aber nicht in sich zusammenfallen lässt.

Um es kurz zu machen: Am 20. Mai 2019 ersetzte tatsächlich der Zahlenwert des Planck'schen Wirkungsquantums das Urkilogramm, oder anders: Über den Zahlenwert des Planck'schen Wirkungsquantums lässt sich seither das Kilogramm realisieren. Das Planck'sche Wirkungsquantum ist fortan definiert aus einer Mischung der Ergebnisse aus beiden Experimenten.

Silizium-Kugel und Kibble-Waage

Wie genau ging das? Die Physiker an der PTB näherten sich dieser Aufgabe durch akribisches Zählen. Aus der Anzahl von Siliziumatomen im Verhältnis zu deren Masse und Größe wollte man an der PTB ein Kilogramm »bauen«. Man startete mit natürlichem Silizium, stellte aber fest, dass man isotoopenreines Silizium brauchte, um das Experiment zu einem erfolgreichen Ende zu führen. Ein schwieriges Unterfangen, wie sich herausstellen sollte, das man nur realisieren konnte, weil man mit Hilfe einer riesigen Zahl von Zentrifugen in Russland eine ausreichende Menge isotoopenreines Silizium herstellen konnte. Das Institut für Kristallzüchtung in Berlin züchtete daraus mehrere Einkristalle. Diese waren für die PTB die Grundlage für die Herstellung annähernd perfekter Kugeln mit der Masse je eines Kilogramms. Und in diesen Kugeln »zählten« die Forscherinnen und Forscher die Atome. Heraus kam eine Zahl, die gemeinsam mit dem Ergebnis aus der Kibble-Waage Basis für die Festlegung des Planck'schen Wirkungsquantums war.

Bei der Kibble-Waage handelt es sich um ein Experiment, bei dem eine Testmasse in der Schwebe gehalten wird und so über den Umweg des Kilogramms das Planck'sche Wirkungsquantum definiert wurde.

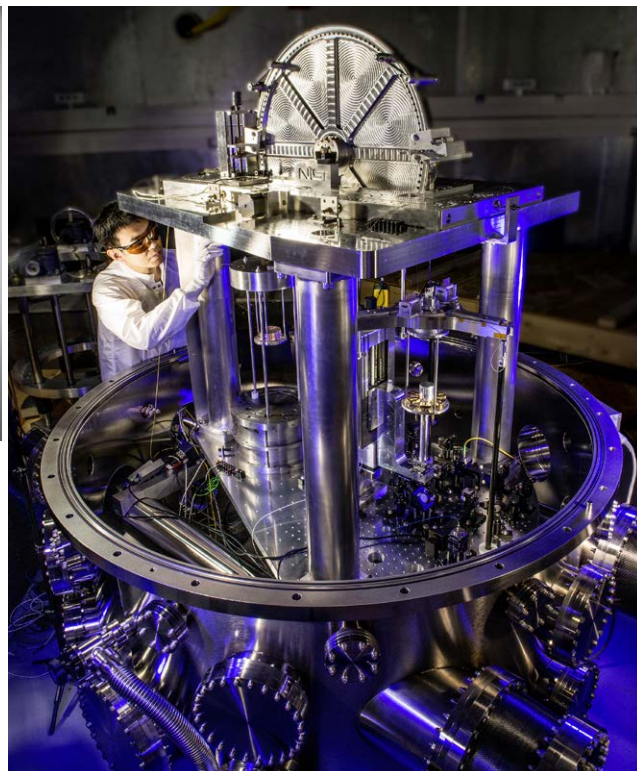


Foto: NIST

Die Bedeutung für die Geodäsie

Was bedeutet das alles für die Geodäsie? »Wir wussten vorher, dass wir alles richtig gemacht haben, wenn sich nach dem 20. Mai 2019 exakt nichts ändert«, erklärt Simon. »Nicht in der Geodäsie, nicht in der Medizin und auch nicht auf dem Wochenmarkt.« Und so ist es gekommen.

Allein die Rückführbarkeit auf die neuen SI-Einheiten bereiten den Forscherinnen heute einen anderen Zugang. Alle Messungen müssen den neuen Definitionen standhalten. Alle Kalibrierungen von geodätischen Messinstrumenten, aber auch höchst präzise gravimetrische Messungen als Grundlagen für Höhenmessungen, werden seither auf perfekt definierte SI-Einheiten zurückgeführt! Und daher sind sie auch in der Geodäsie von unschätzbarem Wert – gerade weil sie keinerlei Veränderungen herbeigeführt haben und weil sie nun endgültig definiert sind.

Aber Achtung: Die Sekunde könnte durch noch genauere Messungen auf Basis präziserer – optischer – Atomuhren eine weitere Neudefinition erfahren, was geodätische Anwendungen ebenso betreffen würde.

Und noch etwas: Dr.-Ing. Hartmut Wziontek vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Leipzig erklärt, dass die Geodäsie sehr wohl einen Einfluss auf die Festlegung des Zahlenwerts des Planck'schen Wirkungsquantums hat. Denn im Inneren der Kibble-Waage muss die zeitlich variierende Schwerebeschleunigung auf einige Milliardstel genau bekannt sein. Das ist nur mit modernen, auf die SI-Einheiten rückführbaren, Absolutgravimetern möglich. Die Geodäsie hat also trotz Bedeutungsverlusts des Urmeters und Urkilogramms noch heute sehr relevanten Anteil am weltweit gültigen Einheitensystem.

Kontakt: monika.rech@rheintext.com