

## Die Höhe tickt richtig

Franziska Konitzer

**Physikern und Geodäten ist es erstmals gelungen, den Höhenunterschied zwischen zwei Punkten mithilfe einer transportablen Atomuhr zu vermessen – es könnte der Startschuss für eine kleine Revolution in der Höhenmessung sein.**

Sie tickt nicht und sie hat auch keine Zeiger. »Ein Normalsterblicher würde das nicht einmal ansatzweise als Uhr erkennen«, bestätigt Christian Lisdat. Dabei gehört seine Uhr wohl zu den genauesten Exemplaren weltweit. Aber was ihr Aussehen angeht, irritiert zunächst, dass sie sich statt an einem Handgelenk oder an der Wand auf einem optischen Tisch befindet. Darauf ist auch kein Uhrwerk erkennbar, lediglich ein höllisch kompliziert aussehender Aufbau, dessen Sinn und Zweck sich auch beim dritten Hinsehen dem Laien nicht erschließt. Der optische Tisch in Tischtennisplattengröße befindet sich seinerseits in einer Art Pferdeanhänger. Auf seiner Seite steht »PTB«, gemeint ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig, für die Christian Lisdat arbeitet, sowie  $\nu_{Sr} = 429\,228\,004\,229\,873\text{ Hz}$ .

Aber obwohl diese Uhr etwas unhandlich erscheint, ist sie dennoch als eine der wenigen ihrer Art etwas, was sie schlagartig für Geodäten und andere Menschen mit Interesse an der Erdanziehung interessant macht: transportabel.

### Von der Zeit zur Masse

»Die Idee des chronometrischen Nivellements ist schon alt«, sagt Jürgen Müller vom Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover. Die ersten Fachartikel dazu stammen aus den 1980er Jahren. »Aber es ist schon verrückt«, fährt er fort. »Man macht Zeit- bzw. Frequenzmessungen, um auf Massen zu schließen.«

Wie einige andere augenscheinlich verrückte Ideen geht auch dieser Zusammenhang auf Albert Einstein zurück. Mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie beschreibt er unser Universum als eine vierdimensionale Raumzeit, in der Massen untrennbar mit Raum und Zeit verknüpft sind und die Raumzeit krümmen. Konkret heißt das, dass eine große Masse die Zeit in ihrer Umgebung ein wenig verlangsamt. Das ist der Grund, warum Navigationssatelliten und ihre Uhren an Bord diesen Effekt berücksichtigen müssen, damit sie uns nicht via GPS oder Galileo in die Irre schicken, denn an Bord eines solchen Satelliten ticken die Uhren nämlich ein klein wenig schneller als auf dem Erdboden.

Natürlich ist dieser Effekt nicht auf die Erdumlaufbahn beschränkt. Auch auf der Erdoberfläche kommt es darauf an, wo eine Uhr tickt, wie schnell sie wirklich tickt: je näher am Massenzentrum der Erde, desto langsamer.

Natürlich ist dieser Effekt vergleichsweise winzig. Und deshalb ist es auch nicht erstaunlich, dass von der Idee, ihn für Höhenmessungen zu nutzen, bis zu seiner erst-

Je nachdem, wo man sich auf der Erde befindet, ticken die Uhren unterschiedlich schnell. Inzwischen gibt es Uhren, die so hochgenau gehen, dass Wissenschaftler damit Höhenunterschiede messen können.



Copyright: Jürgen Müller

maligen Umsetzung seinerseits ein wenig Zeit vergangen ist. »Es hat Jahrzehnte gedauert, bis unsere Uhren genau genug wurden«, sagt Jürgen Müller.

Zwar verfügen wir seit Jahrzehnten über so hochgenaue Atomuhren, dass sogar die Sekunde nach ihrem Herzstück definiert ist: Eine Sekunde dauert genau so lange, wie ein auf spezielle Art und Weise angeregtes Cäsiumatom für 9 192 631 770 Schwingungen braucht. Diese Schwingungen können gezählt werden, da das Atom dabei Strahlung aussendet. »Eine optische Atomuhr funktioniert genauso«, sagt Christian Lisdat. »Nur schwingt das Pendel viel schneller.«

Bei Lisdats Uhr im Pferdeanhänger handelt es sich um genau so eine optische Atomuhr. Statt des chemischen Elements Cäsium verwendet sie Strontium, und zum Schwingen wird es mit Lasern gebracht – und das nämlich 429 228 004 229 873 mal pro Sekunde. Das ist die Frequenz, die auf der Seite des Anhängers prangt. Und beim Vergleich mit der Frequenz der Cäsiumatomuhren fällt schnell auf: Das sind ein paar Stellen mehr.

»Beim chronometrischen Nivellement messen wir keine absoluten Höhen, sondern Frequenzunterschiede«, erklärt Jürgen Müller die Vorgehensweise. Das heißt, dass man Uhren an verschiedenen Punkten auf der Erde miteinander vergleicht und zählt, wie oft pro Sekunde sie ticken. Daraus kann man dann auf den Höhenunterschied zwischen ihnen schließen. »Mit einer Cäsiumatomuhr können wir einen Frequenzunterschied von  $10^{-16}$  erfassen, was einem Höhenunterschied von einem Meter entspricht. Unser Ziel wäre es, mit  $10^{-18}$  die Höhe bis auf den Zentimeter genau vermessen zu können«, erklärt Müller. »Im Moment ist mit der transportablen optischen Atomuhr dreißig Zentimeter das Beste, was man draußen erreicht.«

## Über den Uhrenvergleich zum Höhenunterschied

Aber auch das ist bereits eine kleine Revolution. Denn natürlich sollte eine Uhr an dem Ort stehen, an dem die Höhe vermessen werden soll. Bislang fristeten die hochgenauen Atomuhren aber ein fest in Laboren installiertes Dasein. Den Wissenschaftlern der PTB ist es hingegen gelungen, ihre Uhr sicher in den fahrbaren Anhänger zu



Copyright: Lisdat/PTB

Das Ticken der transportablen optischen Atomuhr im Modane Underground Laboratory wurde mit dem Ticken einer Uhr in neunzig Kilometern Entfernung verglichen. Zwischen den beiden Standorten der Uhren betrug der Höhenunterschied rund tausend Meter.

verfrachten und dafür zu sorgen, dass sie am Ziel immer noch genauso funktioniert wie beim Start.

All dies – die Uhr, der Transport, die Höhenmessung – hat ein Team aus Physikern und Geodäten vor kurzem erstmals eindrucksvoll demonstriert. Es hat gezeigt, dass das chronometrische Nivellement funktioniert. Zunächst fuhr die Uhr ins französische Modane Underground Laboratory in den Fréjus-Tunnel zwischen Frankreich und Italien. Die Strontiumatome schwangen. Die Uhr tickte. Neunzig Kilometer entfernt tickte ebenfalls eine Uhr – und zwar am INRIM in Turin, rund tausend Höhenmeter tiefer. »Die beste Methode, um Uhren miteinander zu vergleichen, ist eine Glasfaserstrecke«, sagt Lisdat. Diese bestand zwischen den beiden Orten, und so konnte das Team das Gravitationspotenzial an diesen beiden Orten der Erde messen. Wissenschaftler der Universität Hannover zogen hingegen mit ihren Nivellierlatten los, um die Höhen auf die traditionelle Art und Weise zu bestimmen.

Und: Die Ergebnisse stimmen miteinander überein.

Nicht nur die Physiker freuen sich, dass ihre Uhr so läuft, wie sie laufen soll. Das chronometrische Nivellement könnte vor allem Geodäten einen großen Schritt nach vorne bringen, was die Genauigkeit der Höhennetze angeht. Denn die traditionellen geodätischen Methoden

und die bisherige Definition der Höhennetze bergen vor allem zwei störende Faktoren, die das chronometrische Nivellement künftig beseitigen könnte.

Einerseits: »In Frankreich wissen wir, dass das Höhen-netz ein wenig schief liegt«, sagt Jürgen Müller. Das ist kein Wunder, schließlich hängen alle Höhennetze mal mehr, mal weniger schief – und zwar je mehr, je weiter man sich vom Referenzpunkt entfernt. Ein Höhennetz

wird so aufgebaut, dass man die Höhen Stück für Stück misst, Nivellierlatte um Nivellierlatte, mit dem Referenzpunkt als Ausgangspunkt. Unweigerlich kommen so systematische Effekte zusammen, die, so klein sie auch bei einer einzelnen Messung sein mögen, sich unweigerlich über Hunderte von Kilometern aufaddieren. Eine Höhenmessung und ihre Genauigkeit hängen also derzeit davon ab, wo sie durchgeführt wird. Einer Atomuhr ist die Distanz zum Referenzpunkt egal. »Mit einer Uhr habe ich eine sehr genaue Punktauflösung«, bestätigt Christian Lisdat.

Der zweite Vorteil betrifft den Referenzpunkt

selbst. »Deutschland ist indirekt an den Pegel von Amsterdam angebunden«, sagt Jürgen Müller. Im Nachbarland Schweiz hingegen schaut das schon ganz anders aus – denn die Schweiz hängt an Marseille. Deshalb gibt es Unterschiede in den Höhensystemen zwischen den beiden Ländern – und nicht nur zwischen diesen beiden. Das ist zwar weitgehend bekannt. Dennoch könnte eine Vereinheitlichung der Höhennetze künftig dabei helfen, mehr Klarheit zu schaffen. »Außerdem gibt es Orte, zu denen wir nicht hin nivellieren können«, sagt Jürgen Müller. »Deshalb ist auch England schlecht angebunden. Helgoland auch.«

Sicherlich wird es noch eine ganze Weile dauern, bis die Höhennetze mithilfe der optischen Atomuhren international vereinheitlicht werden können – realistisch betrachtet bräuchte man dafür wahrscheinlich auch mehr transportable Uhren. Auch über die nötige Infrastruktur müsste man sich Gedanken machen, vor allem über die verbindenden Glasfaserkabel. Aber die jetzige Messung hat gezeigt: Es klappt. Und das Team aus Physikern und Geodäten denkt bereits weiter und will seine Uhr demnächst auch auf Helgoland ticken lassen.

Kontakt: f.konitzer@gmail.com