

Einstein und die Geodäsie

Michael H. Soffel

Anfang des Jahres 1905 schreibt Albert Einstein an den befreundeten Mathematiker Conrad Habicht: “ Ich verspreche Ihnen vier Arbeiten ..., von denen ich die erste in Bände schicken könnte... Sie handelt über die Strahlung und die energetischen Eigenschaften des Lichts und ist sehr revolutionär, wie Sie sehen werden... Die zweite Arbeit ist eine Bestimmung der wahren Atomgröße aus der Diffusion und inneren Reibung der verdünnten flüssigen Lösungen neutraler Stoffe. Die dritte beweist, dass unter Voraussetzung der molekularen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Teilchen von der Größenordnung 1/1000 Millimeter bereits eine wahrnehmbare, ungeordnete Bewegung ausführen müssen, welche durch die Wärmebewegung erzeugt ist ... Die vierte Arbeit ist eine Elektrodynamik bewegter Körper unter Benutzung einer Modifikation der Lehre von Raum und Zeit”. Mit diesen vier Arbeiten, die erste wird ihm 1921 den Nobelpreis bringen, die zweite ist seine Dissertation, die letzte begründet die Relativitätstheorie, hat der zu dieser Zeit 26-jährige Einstein wie keiner zuvor und niemand nach ihm die moderne Wissenschaft entscheidend und nachhaltig geprägt.

Was die moderne Geodäsie betrifft, so ist seit etlichen Jahren die Einstein'sche Relativitätstheorie zum Erreichen höchster Genauigkeiten notwendige Grundlage geworden. So ist etwa für Satellitennavigationssysteme (GPS, GLONASS ...), für Lasermessungen zu Satelliten (SLR) oder zu Reflektoren auf der Mondoberfläche (LLR) bzw. der Radiointerferometrie auf großen Basislinien (VLBI) die Realisierung hochgenauer Zeitsysteme, welche durch relativistische Effekte beeinflusst werden, notwendige Grundlage. Ein zentraler Teil der Relativitätstheorie betrifft die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung, welche in das Problem hochgenauer Zeitsysteme direkt eingeht. So ist etwa die elementare Einheit der Zeit, die SI-Sekunde, definiert als Dauer von 9 192 631 770 Perioden derjenigen Strahlung, die einem gewissen Hyperfein-Übergang im ^{133}Cs Atom entspricht. Will man den Gang verschiedener Uhren miteinander vergleichen, so geschieht dies üblicherweise durch Austausch elektromagnetischer Signale, deren Ausbreitung durch die Gesetzmäßigkeiten der Relativitätstheorie geregelt wird.

Grundlegend ist das Gesetz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, welches zwei ganz verschiedene Aspekte enthält. Einmal ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle; andernfalls könnte man etwa von einem Stern im Doppelsternsystem, der sich ja mal in Richtung auf die Erde zu und

dann wieder von ihr weg bewegt, mehrere Bilder gleichzeitig sehen. Nach den berühmten Experimenten von Michelson und Morley aus dem Jahre 1887 hängt der gemessene Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum aber auch nicht vom Bewegungszustand des Beobachters ab (ein Umstand, der, wenn man ihn schon nicht verstehen kann, einfach akzeptiert werden muss). Durch eine enorme Zahl weiterer Labormessungen ist dieses Prinzip mit höchster Genauigkeit bestätigt worden und stellt die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie dar.

Theoretisch lässt sich aus diesem Prinzip leicht ableiten, dass bewegte Uhren scheinbar langsamer gehen. Misst eine ruhende Uhr ein Zeitintervall Δt_0 , so liest man auf einer dazu mit v bewegten Uhr ein entsprechendes Intervall $\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ab.

Betrachtet man Uhren etwa im Gravitationsfeld der Erde, so kommt die sogenannte gravitative Rotverschiebung ins Spiel: bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen von einem stärkeren Gravitationsfeld in ein schwächeres werden die Frequenzen zu niedrigeren Werten ("ins Rote") hin verschoben. Für Uhren hat dies zur Konsequenz, dass Uhren im Gravitationsfeld langsamer gehen als ohne G-Feld. Diese Beeinflussung der Uhrengangen durch Geschwindigkeit der Uhren und Gravitationsfelder spielt bei den hochgenauen geodätischen Raumverfahren eine wichtige Rolle. Die Frequenz einer Cs-Normale an der PTB in Braunschweig unterscheidet sich wegen der unterschiedlichen Geoidhöhe der Standorte von der Frequenz einer baugleichen Uhr am NBS (Boulder, Colorado) um einen Faktor $1 + 1.8 \times 10^{-13}$. Zur Konstruktion der internationalen Atomzeit TAI werden die Anzeigen der diversen nationalen Atomuhren daher zunächst auf das Geoid reduziert, bevor ein geeigneter Mittelwert gebildet wird. Bei den Atomuhren der GPS-Satelliten wurden deren Frequenzen vor dem Start um 0.00455 Hz vom Nominalwert von 10,23 MHz reduziert, da die GPS-Uhren schneller als erdgebundene Uhren laufen.

Damit der lokal gemessene Wert der Lichtgeschwindigkeit immer gleich ist, müssen sich Lichtsignale im Gravitationsfeld langsamer ausbreiten (gravitative Laufzeitverzögerung), was bei der VLBI Berücksichtigung finden muss. Der Einfluss des solaren Gravitationsfeldes ist praktisch bei jeder VLBI Einzelmessung an einem Quasar messbar, selbst wenn dieser nahezu 180° von der Sonne steht. Bedenkt man noch, dass heutzutage die geodätischen Raumverfahren Detailinformationen über das Gesamtsystem Erde liefern, so erkennt man, dass die Einsteinschen Theorien sich mittlerweile weit von einer praxisfremden Wissenschaft weg entwickelt haben. Will man mit Hilfe geodätischer Raumverfahren physikalisch relevante Informationen über Atmosphäre, Ozeanosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre oder Erdkerne und ihre komplexen dynamischen Wechselwirkungen gewinnen, so sollten diese im Rahmen der Einstein'schen Theorien modelliert werden.