

Moderne Messkonzepte, angeregt durch Bürgische Ansätze

Zeit- und Winkelsekunde

Eine der herausragenden Leistungen Bürgis war die Präzision all seiner Instrumente und speziell die seiner Uhren. Seine Uhren arbeiteten so zuverlässig, dass Zeitmessungen in Sekundengenauigkeit durchgeführt werden konnten. Darauf aufbauend verfeinerten die nachfolgenden Generationen sukzessive die Zeitbasis ihrer Instrumente und Werkzeuge, so dass wir heute mit Femtosekunden-Lasern Augenkrankheiten operieren, und dass wir in der Wissenschaft molekulare Vorgänge mit Attosekunden-Lasern untersuchen können. Die Einheit Atto = 10^{-18} kann man sich trotz ihrer Kleinheit anschaulich vorstellen, wenn man sie auf das Alter des Universums von 13.8 Mia Jahren bezieht, denn die Dauer eines Fingerklickens von einer halben Sekunde entspricht einem Atto-Universum.

Da das Astronomen-Dreigespann Bürgi, Kepler und Brahe, das sich um 1600 in Prag traf, Planetenbahnen und Sternpositionen genauer bestimmen wollte als bis anhin, musste es neben der Zeitmessung auch die Winkelmessung verbessern. Beide Messungen müssen simultan und in ihrer Genauigkeit aufeinander abgestimmt erfolgen, wenn ein bewegtes Objekt präzise lokalisiert und dann verfolgt werden soll. Dank verbesserter Hilfsmittel gelang es Kepler und Bürgi, aber nicht mehr Tycho, der bereits 1601 starb, die drei sogenannten *Keplerschen Gesetze* 1609 sowohl aus den vorliegenden Tycho-Daten als auch aus eigenen Messungen abzuleiten.

Erhaltungssätze in der Physik

Die Keplerschen Gesetze sind theoretisch herleitbar, wenn man die Bewegung eines Planeten im Gravitationsfeld einer zentralen Masse untersucht. Man findet, dass dann der Drehimpuls des bewegten Körpers eine Invariante ist, dass er also unabhängig von der Zeit und vom Ort des Planeten immer denselben Wert annimmt. Das war eine wichtige Erkenntnis, dass es in abgeschlossenen Systemen physikalische Größen wie Energie, Impuls und eben den Drehimpuls gibt, die erhalten bleiben, während andere wie z.B. die Masse des Körpers dies nur bedingt sind. Im Laufe der Jahrhunderte wurde die Suche nach weiteren Invarianten auf alle Gebiete der Physik ausgedehnt. Unter diesem Aspekt der Invariantenfindung in der modernen Physik wäre die Rolle von Kepler, Bürgi, Brahe und ihres Zeitgenossen Galilei als Protagonisten der Neuzeit fast noch stärker zu würdigen als ihre bereits beeindruckenden astronomischen Leistungen.

Das wissenschaftliche Umfeld von Bürgi

Als Kepler mit Hilfe Bürgis diese quantitativen Zusammenhänge entdeckte, fragte sich zur gleichen Zeit Galilei in Pisa und Florenz, warum sich Planeten bewegen. Die allgemeine Meinung war, dass, wie jedermann doch täglich sähe, ein bewegter Körper nach einiger Zeit zur Ruhe kommt. Das müsste besonders für die Planeten gelten, wenn man das Alter der Welt berücksichtigt. Waren es nicht doch -wie klerikale Kreise lehrten- unsichtbare Engel, die mit ihrem Flügelschlag die Planeten vor sich hertrieben und so für die ständige Bewegung sorgten? Galilei fand aber, dass sich ein bewegter Körper von selbst weiterbewegt, wenn er nicht ausdrücklich gebremst wird. Nur warum sind, so fragte sich Newton ein knappes Menschenalter später, dann die Planetenbahnen zu Ellipsen gekrümmt? Weil, so seine Antwort, eine zur Sonne weisende und deshalb quer zur Bewegungsrichtung wirkende Kraft vorhanden sein müsse, die die Bahnkrümmung hervorruft, die Gravitation.

Genauere Messungen

Die Erkenntnis elliptischer Planetenbahnen durch Kepler und Bürgi war nicht nur für die Astronomie revolutionär, sondern generell auch für die Messtechnik. Denn kennt man das zugrunde liegende physikalische Modell, so lässt sich der jeweils aktuelle Messwert einer Messserie auf seine Stichhaltigkeit überprüfen. Man ermittelt aus den vorangegangenen Messwerten die wahrscheinlichsten Parameter des Modells, hier der Ellipse, zusammen mit ihren statistischen Unsicherheiten und berechnet aus ihnen für die neue Messung einen Voraussagewert mit Toleranzband. Liegt der neue Messwert ausserhalb des Toleranzbandes, ist Vorsicht geboten, dass bei der Messung etwas systematisch falsch lief. Sind letztlich alle Messdaten innerhalb des Toleranzbereiches, muss als nächstes versucht werden, die statistischen Fehler einzuengen. Dazu muss die gesamte Messkette verlässlich modelliert werden.

Moderne Messtechnik

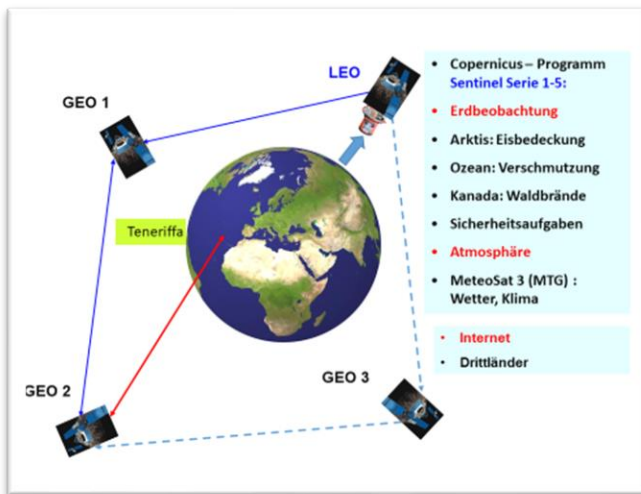


Bei sehr empfindlichen Messungen wie jüngst die von Gravitationswellen (Bild: LIGO Lab/Caltech/MIT) können die Fehlerunsicherheiten deutlich grösser sein als die eigentlichen Signalwerte. Dann muss man die Messung an verschiedenen Standorten simultan durchführen und die Messungen miteinander vergleichen. Es ist erforderlich, an jedem Standort die gesamte Messkette inklusive umweltbedingter Turbulenzen, mechanischer Eigenvibrationen, elektrischem Verstärkerausochen mathematisch zu modellieren.¹ Nimmt man als Eingangssignale dieses mathematisch-virtuellen

Systems die nach der Theorie zu erwartenden Funktionen, erhält man eine Serie künstlicher, jedoch möglicher Messsignale. Diese vergleicht man mit den tatsächlichen Messdaten mittels aufwendiger mathematischer Schätzmethoden und variiert dabei die Modellparameter so lange, bis eine mathematisch abgesicherte Übereinstimmung vorliegt. Dadurch wird der Einfluss der stochastischen Störungen auf die Messungen erheblich reduziert. Das Risiko, dass durch unzureichende Modellannahmen oder durch apparative Dejustagen während des Messvorgangs systematische Fehler eingeführt werden, verringert man durch eine permanente Kalibrierung der Messapparatur. Bei astronomischen Beobachtungsteleskopen spiegelt man z.B. einen künstlichen Stern ein. Moderne Messtechnik nutzt also die experimentellen, theoretischen und numerischen Tugenden, wie sie Bürgi, Kepler und Brahe als Kollektiv bereits erbrachten.

¹ W. Winkler ‚Fundamental research for the development of gravitational wave detectors in Germany‘, **SPG-Mitteilungen Nr.54** (2018), S. 14 <https://www.sps.ch/artikel/>

Datenkommunikation zwischen Satelliten



Das Prinzip der gleichzeitigen Zeit- und Winkelmessung gilt auch in der Satellitenkommunikation. Tieffliegende LEO-Satelliten nehmen permanent Daten von der Erdoberfläche auf, um Umweltverschmutzungen, Waldbrände, aber auch Piraten im Indischen Ozean zu erkennen. Diese Messdaten müssen in Echtzeit zur Erde übertragen werden. Dazu sendet der LEO seine Daten über ein Netzwerk geostationärer GEO-Satelliten zu demjenigen GEO, der über einer Bodenstation positioniert wurde, von wo aus

sie in irdische Kabelnetze eingespeist werden.

Die Datenübertragung zwischen LEO und GEO durch Mikrowellen wird immer mehr durch Laserstrahlen ersetzt, da diese eine um viele Zehnerpotenzen höhere Datenrate ermöglichen. Da die LEOs in etwa 700 km Höhe operieren, haben sie eine Umlaufzeit von etwa einer Stunde und bewegen sich mit etwa 7 km/s. Die Laserstrahlverbindung zwischen LEO und GEO muss sehr genau ausgerichtet werden, um den jeweiligen Gegensatelliten metergenau zu treffen.²

Herschel Satellit

Moderne Astronomie erfolgt auch mit Teleskopen von Satelliten aus. Der Satellit Herschel wurde 2009 im 1.5 Mio km von der Erde entfernten Lagrange-Punkt L2 geparkt, da er dort immer im Erdschatten verbleibt. Der Satellit lieferte vier Jahre lang grosse Mengen an Beobachtungsdaten im fernen IR-Spektrum. In diesem Wellenlängenbereich können Astronomen durch den interstellaren Staub hindurch Sternobjekte erfassen. Da die Detektoren in diesem Spektralbereich sehr stark rauschen, mussten sie mit superflüssigem Helium auf -271°C gekühlt werden, nahe dem absoluten Nullpunkt. Der Heliumvorrat von 2'300 Litern war nach vier Jahren aufgebraucht. Bis dahin hatte Herschel Daten während 22'000 Stunden Beobachtungszeit gesammelt.³



Zusammenfassung

Beste Voraussetzung für den wissenschaftlichen Erfolg ist ein Kollektiv aus genialen Theoretikern, Experimentatoren und Mathematikern. Sie sollten allerdings auf gleicher Augenhöhe miteinander verkehren. In dieser Hinsicht hatte es Bürgi schwer. Umso mehr ist seine ureigene Leistung zu würdigen.

² <https://www.sps.ch/artikel/physiker-in-der-industrie/optical-space-communication-information-transfer-from-point-to-point-reinhard-h-czichy-synopta-gmbh-st-gallen-2/>

³ <https://sci.esa.int/herschel/51468-herschel-to-finish-observing-soon/>