

## Imaginationen eines Geodäten – Chancen für die Zukunft?\*

Harald Schlemmer

### Zusammenfassung

Geodäten haben, wie andere Ingenieure auch, die Neigung, komplexe Fragestellungen durch intelligente Vereinfachungen zu lösen. So erlangten sie Handlungsfähigkeit bei der Abbildung der Erde in vereinfachten Modellen. Dies führte dazu, dass die Erde lange Zeit, mit großem Erfolg übrigens, zweidimensional in Karten und Plänen modelliert wurde. Durch das Hinzukommen völlig neuer Mess- und Auswertemöglichkeiten und nicht zuletzt durch die gestiegenen Ansprüche der »Kunden« müssen Geodäten die Modellierung und Präsentation ihrer Ergebnisse zukünftig mehrdimensional gestalten. Neben den räumlichen (spatialen) Dimensionen ist auch die zeitliche (temporale) Dimension für eine Vielzahl von Anwendungen

von großer Bedeutung und damit vom Geodäten zu behandeln. Zeit stellt für viele Daten oft eine primäre Charakteristik dar.

Die technischen Entwicklungen in der geodätischen Sensor- und Messtechnik gehen rasant voran. Dabei spielt die Zeit als eine der wichtigsten SI-Einheiten eine große Rolle. Wollen Geodäten auch in Zukunft an der Spitze der »Messkunst« stehen, ist es notwendig, sich mit den Problematiken der Zeitmessung, insbesondere der Ultrakurzzeitmessung, zu beschäftigen.

### Summary

*Geodesists have the tendency, like other engineers, to solve complex issues by intelligent simplifications. They are therefore able to take action when it comes to projecting the earth in simplified models. The result was a two-dimensional model of the earth in maps and plans. With the development of new measurement techniques and new possibilities of analysis, and not least because of the increased demands of the »customers« surveyors must carry out the modelling and presentation of their results in a multidimensional way in future. In addi-*

\* Überarbeitete Fassung des gleichnamigen Vortrags beim 74. DVW-Seminar »Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007)« am 5. und 6. Dezember 2007 in Fulda. Die Beiträge zum Seminar sind als Band 53 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden. Weitere Informationen siehe Rückseite innen in dieser zfv.

*tion to the spatial dimensions the temporal dimension is also important for a great number of applications. For a lot of data time has often a primary characteristic.*

*The time – as a major SI unit – plays an important role in geodetic sensors and measurement techniques. If surveyors want to stay in top position of »measuring art« in the future, it is necessary to deal with the problems of timing, especially the ultra-short-time measurement.*

## 1 Einleitung

Die dramatische Umgestaltung unserer Arbeitswelt infolge Zunahme grenzüberschreitenden Wettbewerbs sowie Abbau und Privatisierung bisher vom Staat wahrgenommener Aufgaben fordern dem Geodäten mehr Bereitschaft zu Selbständigkeit und Eigenverantwortung ab. Die Folgen der rasanten technischen Entwicklung kommen hinzu, eine unglaubliche Steigerung der Messgenauigkeit und automatische, beliebig oft wiederholbare Messabläufe. Sie verlangen keine »Kunst des Messens«, die lange Zeit eine unserer Stärken war. Geodäten sind gefordert, Innovation, Flexibilität und Eigenverantwortung zu entwickeln. Eine Fehleinschätzung der heutigen Situation der Geodäsie könnte weitreichende Folgen für die Zukunft unseres Berufes nach sich ziehen. Dass auch andere Naturwissenschaftler vor falschen Sichtweisen nicht gänzlich gefeit sind, zeigt eine Aussage von Albert Michelson, einem der führenden Physiker seiner Zeit, aus dem Jahre 1894: »Die wichtigen Grundgesetze und Tatsachen der Physik sind alle entdeckt worden und jetzt so fest etabliert, dass die Möglichkeit, sie könnten je durch Konsequenzen aus neuen Entdeckungen ersetzt werden, äußerst gering ist ... Unsere zukünftigen Entdeckungen müssen an der sechsten Stelle nach dem Komma gesucht werden.« Wenn da nur Albert Einstein nicht gekommen wäre.

Bis in die jüngste Vergangenheit war das Aufgabenfeld der Geodäsie klar umrissen. Landvermesser erarbeiteten im Gelände geometrische Grundlagen, überwiegend für katastrale und technische Aufgaben, und stellten sie in Plänen und Karten dar. Diese lokalen Aufnahmen wurden von der Landesvermessung in einen regionalen und nationalen Rahmen eingebunden, der gleichzeitig großräumigen Problemstellungen dient. Die Bodenordnung – einschließlich Dorf- und Stadterneuerung – kümmerte sich um die Verwaltung und Gestaltung des unvermehrten Bodens. Die Erdmessung befasste sich mit der Bestimmung der Erde als Ganzem (einschließlich des Schwerfeldes) und der Orientierung des Erdkörpers im Raum. Es verwundert darum kaum, dass die aus den tief greifenden technologischen Umwälzungen der letzten Jahrzehnte neu entstandenen Möglichkeiten die Geodäsie wie wohl kaum eine andere Wissenschaftsdisziplin auf allen Ebenen durchdrang. Die herausragenden Merkmale dieses Wandels sind das Hinzukommen völlig neuer *Messprinzipien*, die *Automatisierung von Mess- und Rechenabläufen*, ex-

trem leistungsfähige *Speicher-, Darstellungs- und Kommunikationsmedien* und nicht zuletzt die *Raumfahrt*, wodurch die Geodäsie erst wirklich dreidimensional und global wurde. Das heißt, die Erde in ihrer globalen und lokalen Dimension wird in ihrer Wechselwirkung mit äußeren und inneren Kräften sichtbar, das Einwirken des Menschen auf Vegetation und Nutzung von Grund und Boden wird messbar, Verkehrsbewegungen werden erfasst und damit beeinflussbar, Roboterbewegungen oder Produktionsabläufe lassen sich überprüfen und korrigieren, Landschaft und Siedlungen werden zur virtuellen Wirklichkeit, in der wir uns bewegen können, Planungsvorschläge und -abläufe lassen sich in ihren Varianten gegeneinander abwägen.

Einer der Kernbereiche der Geodäsie ist – neben der Modellbildung und Modellrealisierung – die Sensorik und Messtechnik. In diesem Bereich wird der einzelne Sensor studiert. Hierzu gehören die Positions- und Lagesensoren, Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren, die Möglichkeiten zur Zeiterfassung, Zeithaltung und Zeitverteilung, die linien- und flächenhaft arbeitenden und bildgebenden Sensoren sowohl in terrestrischer Auslegung als auch auf Flugzeugen und Satelliten und die Satellitensysteme selbst.

Die mit den Sensoren gewonnenen Daten werden der Signalverarbeitung unterworfen und unter Verwendung von Objektmodellen stochastisch und deterministisch analysiert und in einem Modell beschrieben. Die punkt- und linienhaften Beobachtungen werden zur Positions- und Lagebestimmung sowie für Führungs- und Steuerungsaufgaben eingesetzt. Dynamische Beobachtungen dienen stets auch der Ableitung des Schwerfeldes und der Beschreibung geodynamischer Vorgänge. Die Methoden der Bild- und Formenanalyse verwenden die Daten flächenhaft arbeitender und bildgebender Sensoren. Die telematische Auswertung bedient sich moderner Datenkommunikationsmethoden und künstlicher Intelligenz.

In dem Positionspapier der DGK »Geodäsie 2000<sup>++</sup>« sind die Zukunftsaufgaben der Geodäsie beschrieben. Dort heißt es: »Die anschauliche Visualisierung zwei- und *mehrdimensionaler* statischer und *dynamischer* raumbezogener Daten mittels multimedialer Techniken und Animationen ist eine der wesentlichen Aufgaben der Geodäsie als Voraussetzung für eine effiziente Datennutzung«.

## 2 Dimensionen des Raumes

Wie viele Dimensionen des Raumes braucht der Geodät? Von dem uns umgebenden Raum nehmen wir nur einen kleinen Ausschnitt wahr; wir können wenig über seine globale Geometrie sagen. Ebenso wie die Erdoberfläche in unserer Nähe als Ebene erscheint und doch in Wahrheit eine unbegrenzte, aber endliche Fläche ist, könnte

auch unser Raum im Großen ganz anders als der euklidische Raum aussehen, auch wenn in unserer Nähe die euklidische Geometrie im Rahmen der Messgenauigkeit Gültigkeit hat. Unsere Erfahrungen gehen von einer dreidimensionalen Welt ( $n=3$ ) aus. Die Riemannsche Geometrie stellt die mathematischen Modelle für Räume mit beliebiger Dimensionszahl zur Verfügung, also  $n=\infty$  (G.B. Riemann war Schüler von C.F. Gauß in Göttingen). Eine Welt mit mehr als drei Dimensionen können wir uns nur schwer vorstellen.

Nun lässt die Riemannsche Geometrie unendlich viele Dimensionen des Raumes zu. Neueste Überlegungen zur Quantengeometrie im Zusammenhang mit der Super-String-Theorie zum Aufbau von atomaren Elementarteilchen gehen von einer 9-, 10- oder 11-Dimensionalität des Raumes aus. Die 11-Dimensionalität des Raumes in der Super-String-Theorie kann nach dieser Theorie deshalb nicht wahrgenommen werden, weil – bis auf die drei uns bekannten Raumdimensionen – alle anderen Dimensionen kleiner als die postulierte Quantelung der Länge (Plancklänge =  $10^{-33}$  cm) sind. Für uns Ingenieure eine schauerliche Vorstellung, dass wir – wenn auch allenfalls zukünftige Generationen von Geodäten – Koordinatentransformationen in elf Dimensionen berechnen sollen. Wie angenehm waren da die Zeiten, als Feldmesser zur Katasteraufnahme nur in zwei Dimensionen rechnen mussten.

## 2.1 Messen im vierdimensionalen Raum

Wie man dem Bild von M.C. Escher entnehmen kann (Abb. 1), wird für den Ingenieurgeodäten – und nicht nur für ihn – die Frage der Mehrdimensionalität eine wichtige Rolle spielen. Helmut Moritz hat dies einmal trefflich formuliert: »Die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins ist nichts als eine ziemlich triviale Übungsaufgabe in der  $n$ -dimensionalen Geometrie für den einfachen Fall  $n=4$ .« Dass der Riemannsche Krümmungstensor in diesem Übungsbeispiel das Erdschwerefeld ist, welches verhindert, dass wir durch die Erdrotation in den Weltraum geschleudert werden, hat freilich erst Einstein erkannt, und dass der einfache Fall  $n=4$  Raum und Zeit bedeutet, ist nicht ganz so trivial.

Ingenieure arbeiten – zum Glück – nach gewissen Grundsätzen, die ihnen bei der Lösung ihrer praktischen Probleme hilfreich sind. So sind sie der Auffassung, dass sich echte Handlungsspielräume erst in der Verbindung von Nützlichem mit Grundsätzlichem ergeben, also in der Anwendung der Gesetze der Naturwissenschaften auf technische Fragestellungen. Dabei haben sie die Neigung, komplexe Fragestellungen durch intelligente Vereinfachungen zu lösen, also versuchen sie, die Welt in vereinfachten Modellen abzubilden, das Wesentliche zu behandeln und Unwichtiges zu ignorieren, um so Handlungsfähigkeit zu erreichen.

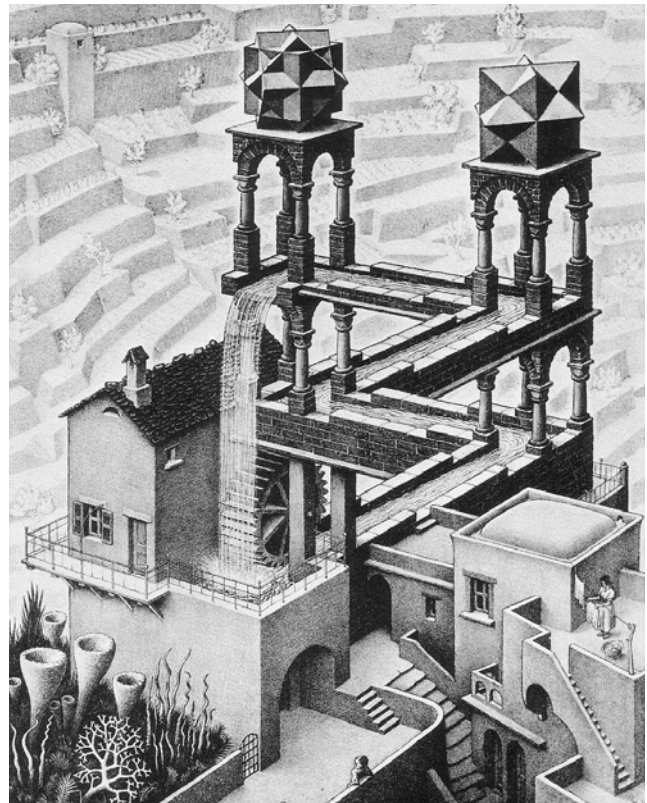


Abb. 1: 3D-Illusion von M.C. Escher

Wenden wir diese Grundsätze auf die Fragestellung der  $n$ -Dimensionalität des Raumes an. Wollen wir Ingenieure in dieser Fragestellung Handlungsspielräume erlangen, müssen wir die Anzahl der Raumdimensionen beschränken und in einem vereinfachten Modell auf endlich viele Dimensionen begrenzen. Eine Dimension ist eine unabhängige Achse oder Richtung im Raum. Der uns umgebende und vertraute Raum besitzt – aus der Sicht des Ingenieurs – vier Dimensionen, neben den drei Richtungen zusätzlich die Raumzeit als Zeitachse Vergangenheit–Zukunft.

Über lange Zeit »vereinfachte« der Geometer in der Fragestellung der Anzahl der Dimensionen sehr stark, indem er in einer 2- oder bestenfalls in einer  $2\frac{1}{2}$ -dimensionalen Welt gemessen und ausgewertet hat. Solche Vereinfachungen der Natur in den Modellen des Ingenieurs müssen allerdings ständig überprüft werden, denn sie tragen große Risiken in sich, unter Umständen sogar für die Zukunftsfähigkeit des ganzen Berufsstandes.

Geodäten, insbesondere Ingenieurgeodäten hatten sich allerdings schon von Anfang an mit mindestens drei Dimensionen des Raumes zu beschäftigen, pflegen doch technische Objekte im Allgemeinen dreidimensional zu sein. Durch ihre »geodätische« Grundausbildung neigten auch sie immer wieder dazu, die Modellbildung auf 2 bis  $2\frac{1}{2}$  Dimensionen zu beschränken und handhabten nur ungerne eine mehrdimensionale Modellierung.

In der Ingenieurgeodäsie wurde schon frühzeitig festgestellt, dass der Zeitfaktor ebenfalls eine Rolle spielen

kann, denn die Übergänge von einer Bearbeitungsstufe zur nächsten (Aufnahme, Speicherung, Auswertung, Analyse, Darstellung) erfolgten bisher weder in *Echtzeit* (Schritthaltende Datenverarbeitung, bei der es zu keiner merklichen zeitlichen Verzögerung zwischen Ein- und Ausgabe kommt) noch *Online* (Zustand bei dem eine aktive Verbindung zwischen einem System und einem Peripheriegerät oder einem anderen System besteht). Die Beseitigung dieser Nachteile kann unter Umständen durch eine entsprechende Kopplung der optischen (automatisierten) Messtechnik mit der CAD-Technik und der Entwicklung von Steuerungs- bzw. Navigationsroutinen sowie von volumen- oder oberflächenmerkmalorientierten Auswerte- und Darstellungsverfahren erfolgen.

Zur eindeutigen Beschreibung eines Punktes ist die Zeit eine eigene Koordinate, *gleichberechtigt* mit den drei Raumkoordinaten.

Nimmt man die Zeit mit ins Kalkül der Ingenieurgeodäsie, wird man unmittelbar auf den Begriff »Kinematik« stoßen. In Hütte ist Kinematik definiert: »Gegenstand der Kinematik ist die Beschreibung der Lagen und Bewegungen von Punkten und Körpern mit Mitteln der analytischen Geometrie.« Der Begriff »Kinematische Vermessung« wird schon längere Zeit bei der Messung und Auswertung von Deformationsmessungen verwendet, etwa wenn die einzelnen Beobachtungsepochen durch kinematische Auswertemodelle miteinander verknüpft werden, um durchschnittliche Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen der Deformation abzuleiten. Dies ist jedoch keine Kinematik im Sinne der Definition, sondern es handelt sich um die kinematische Interpretation statischer Messungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten ausgeführt wurden und unterschiedliche Zustände repräsentieren (quasi-kinematisch). Die »echte« kinematische Messtechnik setzt bereits bei den Beobachtungen an. Ziel soll sein, eine Bewegung durch geodätische Beobachtung so zu erfassen, dass die Bewegung insgesamt und für jeden Zeitpunkt innerhalb des Zeitintervalls der Beobachtung hinreichend genau beschrieben werden kann. Die Beobachtung erfolgt also im Gegensatz zur klassischen Deformationsmessung in einem zusammenhängenden Messzeitraum, wobei der Bewegungsvorgang nicht aus messtechnischen Gründen unterbrochen wird. Dies erfordert besondere Eigenschaften des einzusetzenden Instrumentariums, Eigenschaften, die klassische Sensoren der Ingenieurgeodäsie nicht besitzen. Damit lassen sich jedoch zusätzliche Vermessungsaufgaben ausführen, die den geodätischen Sensoren bisher wegen deren statischer Auslegung nicht zugänglich waren, etwa wenn

- Objekte sich schnell bewegen oder Objektdeformationen mit hoher Geschwindigkeit ablaufen, die durch visuelle Beobachtungen nicht mehr hinreichend genau erfassbar sind,
- Bewegungen vieler Objektpunkte gleichzeitig angegeben werden müssen, um beispielsweise die Lage des Objekts im Raum oder den Verformungszustand eines

Objekts zu verschiedenen Zeitpunkten exakt angeben zu können oder

- Raumpositionen oder Verformungszustände in großer Zahl und in dichter zeitlicher Reihenfolge aufzunehmen sind.

Betrachtet man vereinfachend nur die Messfrequenz als Indikator und trägt diesen Parameter in das Zeitspektrum der Ingenieurgeodäsie ein, so erkennt man, dass sich der Anwendungsbereich dieser Sensoren in Richtung »Kinematische Ingenieurgeodäsie« verschiebt. Es lassen sich also völlig neue Aufgaben für die Ingenieurgeodäsie erschließen, z. B. die Erfassung (schnell) bewegter Objekte. Einige Beispiele seien aufgeführt:

- Erfassung dynamischer Reaktionen von Ingenieurbauwerken,
- Inspektion und Vermessung der Geometrie von Verkehrsstrassen in der Bewegung, ohne Störungen des Verkehrs,
- Erfassung (und Steuerung) der Bewegungen von Baumaschinen.

## 2.2 Modellieren im vierdimensionalen Raum

In verschiedenen Anwendungsbereichen der Geodäsie wird die Nutzung von geodätisch erfassten Daten erheblich durch den Umstand geschmälert, dass die vier funktionalen Komponenten zum Management und zur Modellierung dieser Informationen (Erfassen, Verwalten, Analysieren, Präsentieren) nicht – oder nur rudimentär – in der Lage sind, neben räumlichen (spatialen) Dimensionen auch die zeitliche (temporale) Dimension ausreichend zu behandeln. Die Messung und Analyse von Zeit ist allerdings für eine Vielzahl von Anwendungen von gleicher Bedeutung wie die Bearbeitung der räumlichen und thematischen Dimensionen. Zeit stellt für viele Daten oft eine primäre Charakteristik dar. Zu deren Modellierung und Abfrage wurden und werden temporale Datenbankmodelle und -systeme entwickelt. Für kombinierte Abfragen zwischen räumlichen und zeitlichen Kriterien bieten bisher weder räumliche noch temporale Datenbanksysteme geeignete Datenstrukturen und Operationen an. Dies hat in den letzten Jahren zur Entwicklung von *spatio-temporalen* Datenbankmodellen und von Grundlagen für *spatio-temporale* Datenbanksysteme geführt, die den Anwender in die Lage versetzen sollen, Daten auf Grundlage ihrer räumlichen und zeitlichen Eigenschaften geeignet zu verwalten und anzufragen.

Ein wichtiger Aspekt zur zukünftigen Anwendung der temporalen Modellierung auf geodätische Messungen ist die Automatisierung der Mess- und Auswerteverfahren. Maschinell sehende Systeme werden dabei eine Schlüsselrolle spielen. Heute werden maschinell sehende Systeme in industriellen Herstellungsprozessen in den Be-



reichen Produktautomatisierung und Qualitätssicherung eingesetzt. Weitere Einsatzgebiete finden sich z. B. in der Verkehrstechnik – von der einfachen Radarfalle bis hin zum »sehenden Fahrzeug« – und in der Sicherheitstechnik (Zugangskontrolle, automatische Erkennung von Gefahrsituationen).

Nur ein vergleichsweise kleiner Teil der aktuellen geodätischen Forschungsprojekte beschäftigt sich damit, tatsächlich den Sinn oder den Inhalt von Bildern zu *verstehen*; meistens geht es eher darum, in Bildern Objekte zu detektieren, sie zu beschreiben, ihre Eigenschaften zu vermessen, sie zu klassifizieren und auf Grund dieser Ergebnisse Entscheidungen zu treffen oder Prozesse zu steuern. Da es beim Bildverstehen meistens um den Entwurf oder die Anwendung von Rechenverfahren geht, handelt es sich um ein Teilgebiet der Informatik, das starke Querbeziehungen zur Signalverarbeitung und zur künstlichen Intelligenz aufweist. Die Werkzeuge der Computer Vision stammen meistens aus der Mathematik, insbesondere aus Geometrie, linearer Algebra, Statistik, Operations Research (Optimierung) und Funktionalanalysis. Typische Aufgaben im Bereich Computer Vision sind die Objekterkennung und die Vermessung der geometrischen Struktur von Objekten sowie von Bewegungen (Fremdbewegung, Eigenbewegung). Dabei wird auf Algorithmen aus der Bildverarbeitung, zum Beispiel die Segmentierung, und auf Verfahren der Mustererkennung, beispielsweise zur Klassifizierung von Objekten, zurückgegriffen.

In *natürlichen Umgebungen* (wie in der Geodäsie üblich) werden schwierigere Anforderungen an die Techniken des Bildverstehens gestellt. Hier hat der Programmierer keinen Einfluss auf die Umgebungsbedingungen, was die Erstellung eines robusten, fehlerfrei ablaufenden Programms erheblich erschwert. Man kann sich dieses Problem anhand eines Beispiels zur Erkennung von Automobilen verdeutlichen: Ein schwarzes Auto hebt sich vor einer weißen Wand gut ab, der Kontrast zwischen einem grünen Auto und einer Wiese ist allerdings sehr gering und eine Unterscheidung nicht einfach.

### 3 Zeit

Die Zeit bewegt die Menschen. Und jeder versteht etwas anderes darunter. Der eine begreift dabei die Wahrnehmung der Geschehnisse im zeitlichen Ablauf und deren Bewertung, ob kurz oder lang, während ein anderer lediglich die veränderte Anzeige seiner Uhr oder das veränderte Datum als Zeitablauf wahrnimmt.

Im *allgemeinen Sprachgebrauch* ist die Zeit das Nacheinander der Dinge, die Abfolge der Geschehnisse, erfahrbar als nicht umkehrbare Aufeinanderfolge sowie Dauer von Veränderungen und Ereignissen in Natur und Geschichte. Je nach wissenschaftlicher (philosophischer) Anschauung wird Zeit als endliches oder unendliches homogenes, teilbares Kontinuum angesehen, die unter bestimmten Gesichtspunkten und Zwecksetzungen ein-

geteilte Zeit als Ordnungsschema (Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG 2001).

In der *Physik* ist die Zeit eine nach allen Erfahrungen unbeeinflussbare, jedoch nach der Relativitätstheorie vom Bewegungszustand eines Zeit messenden Beobachters abhängige Grundgröße; Formelzeichen  $t$ , SI-Einheit Sekunde (s). In der klassischen (nichtrelativistischen) Physik wird die Zeit nach Newton als absolute Zeit angesehen, die, unabhängig von der Materie und den materiellen Veränderungen, mit eindeutiger Kausalordnung (früher-später-Relation) an allen Orten des Universums gleich abläuft (Gleichzeitigkeit). Sie wird präzisiert durch die Festlegung des Zeitintervalls zwischen Beginn und Ende eines beliebig oft reproduzierbaren, von der Art der Messung unabhängigen Experiments als Maßeinheit der Zeitdauer (Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG 2001).

Der physikalisch-mathematische Zeitbegriff wird aufgrund der Methode ohne jeden Bezug auf das *menschliche Bewusstsein* bestimmt. Doch Zeit ist etwas, was jeder Mensch für sich selbst erlebt, was ihm etwas bedeutet und was er Tag für Tag gestalten muss. Eine umfassende Bestimmung von Zeit muss deshalb das erlebende Individuum, die Perspektive der ersten Person, von mir und von dir, einbeziehen. Im Unterschied zum wissenschaftlichen Zeitbegriff haftet der Lebenszeit eine existentielle Dimension an. Durch das Zeitbewusstsein kann ein Bezug zum eigenen Verhalten, zu dessen Zielen, Motiven und Folgen hergestellt werden. Vergangenheit und Zukunft werden gleichermaßen beurteilt und bewertet. Ziele können angestrebt, Verantwortung für mögliche Folgen übernommen und Schuld aufgearbeitet werden (Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG 2001).

Nach der Relativitätstheorie hat jeder Beobachter sein eigenes Zeitmaß, das eine von ihm mitgeführte Uhr registriert: Uhren, die verschiedene Beobachter bei sich tragen, müssen nicht unbedingt übereinstimmen. So wurde die Zeit zu einem persönlichen Begriff, abhängig von dem Beobachter, der misst (Stephen W. Hawking 1988).

#### 3.1 Zeit als SI-Einheit

Eine Sekunde ist das 9.192.631.770-Fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung. Diese Definition löste 1967 die bis dahin gültige Definition als Bruchteil eines astronomisch messbaren Zeitintervalls (ein Tag, ein Jahr) ab.

Heute (2007) kann die Zeit von den nationalen Einrichtungen zur Realisierung der SI-Einheiten (z. B. PTB, Braunschweig) mit einer Genauigkeit von  $10^{-14}$  bis  $10^{-15}$  bereitgestellt werden (Abb. 2). Die Entwicklungen zu noch besserer Zeithaltung schreiten sehr schnell voran,

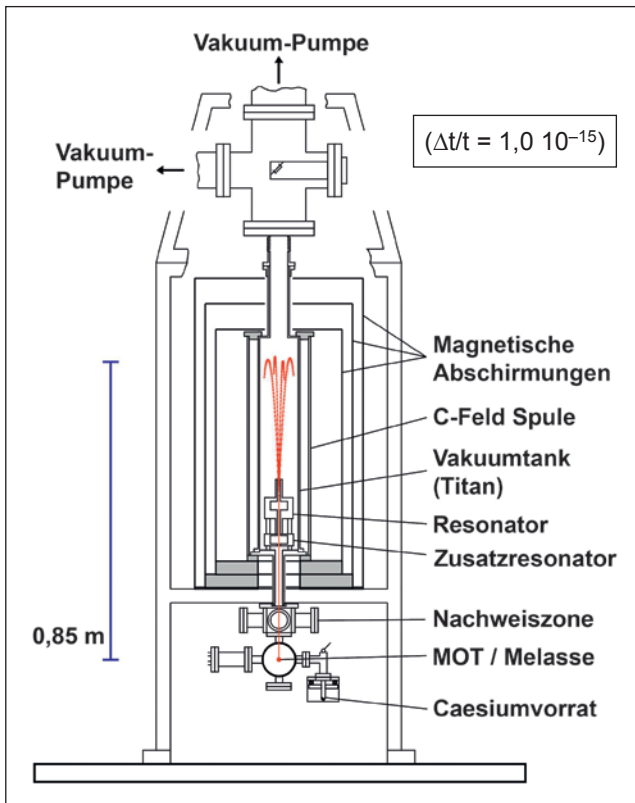


Abb. 2: Prinzipskizze der Cäsium-Fontäne der PTB

angetrieben durch die Forderungen der Industrie nach immer besseren Zeitnormalen (z.B. in Navigationssatelliten). Man spricht bereits von der Möglichkeit, die Zeit (Zeitdefinition und Zeithaltung) mit einer Genauigkeit von  $10^{-18}$  technisch zu realisieren. Wenn diese Zeitnormale zusätzlich kleiner und leichter werden und wenn es gelingt, die hochpräzise Zeit über Funk zu übertragen, ergeben sich völlig neue Möglichkeiten zur Entwicklung neuer (auch geodätischer) Messverfahren (Börger 2008).

Ein Blick auf die für Geodäten wichtigste SI-Einheit, die *Länge*, zeigt, dass diese bereits seit 1983 über die SI-Einheit *Zeit* definiert und damit im Grunde als eigenständige SI-Einheit überflüssig ist. Diese neue Definition wurzelt in zwei Gründen: Einmal sagt die Relativitätstheorie, dass die Lichtgeschwindigkeit eine Naturkonstante ist und damit die Länge aus ihr eindeutig abgeleitet werden kann, und zum anderen gelingt es (technisch) immer besser und genauer, die Zeit als Normal zu realisieren.

Es verwundert in diesem Zusammenhang, dass sich nur wenige Geodäten in Forschungseinrichtungen mit den Fragen der Zeitmessung (Zeitintervallmessung, Zeitpunktbestimmung und Zeitübertragung) auseinandersetzen.

### 3.2 Zeit als geodätische Messgröße

Betrachtet man das Spektrum der physikalisch möglichen Zeiten (Abb. 3), so reicht dies vom Alter des Universums (ca. 18 Milliarden Jahre) bis zu der von vielen Physikern vermuteten Quantelung der Zeit (ca.  $10^{-43}$  s). Der Bereich

des Zeitspektrums umfasst insgesamt 61 Größenordnungen. Von diesen sind etwa 13 Größenordnungen in der bisherigen Geodäsie gängig. Absolut betrachtet mag dies enttäuschend sein, doch sei hier angemerkt, dass sich keine andere Ingenieurdisziplin mit einer solch großen Spanne im Zeitspektrum messend beschäftigen muss.

Früher (etwa vor 1960) war es augenscheinlich, dass Geodäten sich mit der Zeitbestimmung beschäftigten. Geodätische Institute an Universitäten unterhielten z.B. Zeitnormale (Pendeluhr, Quarzuhr) zur Zeitbestimmung für astronomische Beobachtungen zur Ortsbestimmung.

In der elektronischen Distanzmessung dominierte lange Zeit das Phasenvergleichsverfahren zur technischen Lösung der Laufzeitbestimmung elektromagnetischer Signale. Der Träger wird dabei mit einer zusätzlichen Information in Form einer aufmodulierten Messwelle versehen, deren Phasenlage als Parameter der Distanz ausgewertet wird. Die Frequenz der Modulation (Zeit) bestimmt den Maßstab der ermittelten Strecke. Zur Bestimmung (Kalibrierung) der Modulationsfrequenz sind hochgenaue Frequenznormale (Zeitnormale) notwendig.

Eine direkte Bestimmung der ultrakurzen Laufzeit elektromagnetischer Wellen ( $1\text{ cm} \approx 30\text{ ps}$ ) war technisch nicht einfach realisierbar. Durch Fortschritte in der Digitalelektronik können heute zum einen extrem steile Impulse mit kurzen Anstiegszeiten erzeugt werden und zum anderen deren Laufzeit über die Distanz mit einer Auflösung bis zu 30–50 ps bestimmt werden. Dies geschieht mittels Time-to-Digital Converter (TDC), die Zeitintervalle mit einer Genauigkeit im Pikosekundenbereich (ps) messen können. Als Basis dienen interne Gatterlaufzeiten. Obwohl diese stark von Temperatur und Spannung abhängen, ist es durch entsprechende Kalibrierung oder Regelung möglich, diese als Basis für hochgenaue Zeitintervallmessung zu verwenden. Damit eröffnen sich für die Distanzmessung völlig neue Möglichkeiten – auch für neue Instrumente. Präzise Distanzmessung ist (noch) eine Domäne des Geodäten, doch diese Technik wandelt

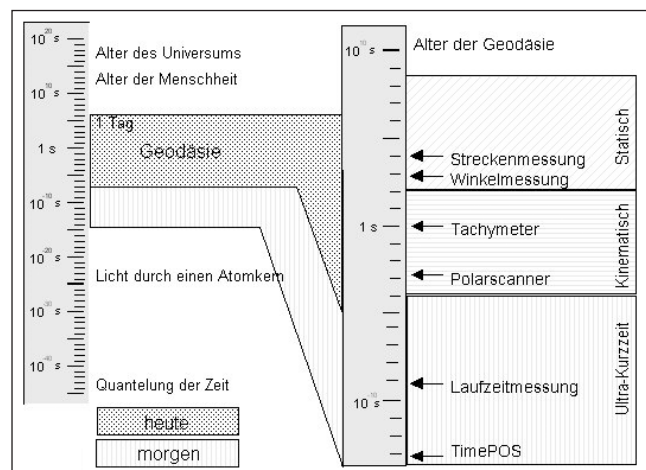


Abb. 3: Spektrum der Zeit und die Einordnung geodätischer Messverfahren

sich rasch zu einer »Technik der Zeitmessung«. Geodäten sind aufgefordert, sich mit diesen Techniken der Ultraschallzeitmessung zu beschäftigen.

Der Vergleich von Uhren und die Methoden zur Zeitübertragung wurden und werden in der Geodäsie vielfältig genutzt (Schlüter 1988). Durch die großen Fortschritte in der Realisierung der SI-Einheit »Zeit« und in den zu erwartenden Fortschritten in den Techniken der Zeitübertragung werden sich völlig neue Möglichkeiten zur Entwicklung vielgestaltiger Messverfahren in der Geodäsie eröffnen, da die Zeit bei sehr vielen geodätischen Messgrößen eine entscheidende Rolle spielt.

#### 4 Resümee

Der aktuelle Entwicklungsstand der Sensorik verlangt zwingend den Einstieg der Geodäsie in die neue Thematik und das neue Aufgabenfeld. Auch der klassische Geodät wird sich in Zukunft verstärkt der Aufgabenstellung der Mehrdimensionalität annehmen müssen, sollen interessante Betätigungsfelder der Geodäsie nicht verloren gehen. Ebenso ist die Beschäftigung mit der Zeit als eine der wichtigsten SI-Einheiten unbedingt notwendig. Die universitären Ausbildungsgänge haben die Thematik aufgegriffen und in ihre Ausbildungsinhalte aufgenommen. Die Geodäsie wird sich in den nächsten Jahren nicht mit Verbesserungen der Ergebnisse an der sechsten Nachkommastelle beschäftigen, sondern neue Anwendungsfelder besetzen und die neuen Herausforderungen bestehen. Ingenieure müssen in einer eigenen Welt wirken, die Naturwissenschaften in ihrer Komplexität bereiten ihnen Schwierigkeiten, die es zu überwinden gilt. Geodäten haben hier allerdings eine besondere Stellung und genießen anerkannte Unterstützung von »höchster Stellung«, wie Harro Heuser bemerkt:

Mensch und Gott begegnen sich im Medium der Mathematik. Jahwe wird (anders als die Inquisition) hierzu beifällig gelächelt haben. Der Himmelherr ist willentlich und bewusst ein *mathematischer* Gott, alles hat er »geordnet nach Maß, Zahl und Gewicht«. (Dieser Satz aus dem *Buch der Weisheit 11,20* ist eine kurz gefasste »Theologie der mathematischen Physik«.) Ein solcher Gott passioniert sich dafür, die Erde abzumessen, die Sterne am Himmel und die Haare auf den Köpfen zu zählen; nach einem schönen jüdischen Wort zählt er auch die Tränen der Frauen. Auch sein Personal hält er zum Messen und Zählen an; ein Engel ist es, der wie in der Großen Oper mit einem goldenen Messstab das Neue Jerusalem festlich und feierlich vermisst, ohne praktische Absichten, nur der Messlust wegen. Zählen und Messen gehören

zu den Wonnen der Götter. Einer der 99 Namen Allahs ist denn auch »der Zähler«. Der Koran sagt, Allah sei ein »schneller Rechner« und habe seine Diener alle gezählt, nicht flüchtig und obenhin, sondern »mit einer genauen Zahl«, ganz so wie Jahwe die »Sternlein« gezählt hat, auch er mit einer genauen Zahl (»dass ihm auch nicht eines fehlet«). Ein passionierter Zähler und Messer war auch der ägyptische Gott Thot, ein wissenschaftlich hochtalentiertes Jenseitswesen, das es in seinen besten Tagen als Hermes Trismegistos zu einer gediegenen Reputation brachte. Thot unterzieht Ägypten einer sorgfältigen Vermessung, er steht dem Katasteramt vor und beaufsichtigt die Wägemeister – nichts Zählbares entgeht ihm. Götter zählen gern, sie haben unleugbar etwas Kassiererhaftes (Heuser 2003).

Lassen Sie uns diese Herausforderungen der Technik für die Zukunftsfähigkeit unseres Berufes annehmen.

#### Literatur

- Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2001.  
 Börger, Klaus: Time in Space Geodetic Methods. In: AVN 1/2008, S. 17.  
 Deutsche Geodätische Kommission: »Geodäsie 2000\*\*«. Strategiepapier 1998.  
 Escher, M. C., in: »Die Welt des M. C. Escher«, erläutert von J. L. Locher et al. Manfred Pawlak Verlag Herrsching, 1971.  
 Hawking, Stephen W.: Eine kurze Geschichte der Zeit – Die Suche nach der Urkraft des Universums. Rowohlt Verlag 1988.  
 Heuser, Harro: Die Magie der Zahlen. Verlag Herder Freiburg, 2003.  
 Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. 31. Auflage, Springer Verlag 2000.  
 Michelson, Albert, in: »Die Natur der Natur« von J. Barrow. Rowohlt Verlag, 1966.  
 Moritz, Helmut: »Was ist Geodäsie? Eine überwiegend ernsthafte Betrachtung«. In: Festschrift zum 70. Geburtstag von W. Torge, Wiss. Arb. d. Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, S. 43–48, 2000.  
 Schlüter, Wolfgang: Zeit und Frequenz im Messverfahren der Geodäsie. DGK, Reihe C, Nr. 337, 1988.

#### Anschrift des Autors

Prof. Dr.-Ing. Harald Schlemmer  
 Geodätisches Institut – Technische Universität Darmstadt  
 Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt  
 schlemmer@geod.tu-darmstadt.de