

## Von statischen zu kinematischen Messverfahren

Die terrestrischen Vermessungsverfahren haben sich in den vergangenen 25 Jahren stark verändert. Der Rationalisierungsdruck hat bei der klassischen statischen Punktbestimmung durch den Einsatz von motorisierten Tachymetern und Satellitenmethoden zu völlig neuen Arbeitsabläufen geführt. Ein großer zusätzlicher Bedarf an Geodaten ist durch das Aufkommen der Geoinformationssysteme entstanden. Um diesen Bedarf effizient befriedigen zu können, sind neue Messverfahren entwickelt worden. Zum Aufbau von Datenbanken der Verkehrsinfrastruktur durch Datenerfassung im Feld haben sich kinematische Messverfahren als besonders geeignet erwiesen.

Die Anfänge dieser kinematischen Verfahren liegen etwa 30 Jahre zurück, als man in den USA und Kanada begann, inertielle Navigationssysteme zum Aufbau von Festpunktfeldern einzusetzen. Diese Nutzung der Inertialtechnologie war jedoch nur von kurzer Dauer, denn seitdem das Global Positioning System (GPS) nutzbar ist, steht ein wesentlich genaueres und effizienteres Verfahren der Positionsbestimmung zur Verfügung.

Als weiteres Einsatzgebiet der Inertialtechnologie wurde die kinematische Aufmessung von Straßen- und Schienennetzen erprobt. Die Fehlercharakteristik der Inertialsysteme setzte dieser Anwendung jedoch enge Grenzen. Auch hier führte das GPS eine Wende herbei. Die Entwicklung der Auswertemethoden eröffnete nämlich rasch die Möglichkeit, GPS auch für kinematische Messungen einzusetzen. Allerdings werden die Satelliten durch Gebäude, Wälder und andere Hindernisse abgeschattet, so dass sie nicht uneingeschränkt verfügbar sind.

Als geradezu ideal für kinematische Vermessungen hat sich die Integration von GPS und Inertialsystem erwiesen. Das ungünstige Driftverhalten der inertialen Sensoren wird durch GPS-Positionen wirkungsvoll kontrolliert,

und das Inertialsystem kann Lücken im GPS-Empfang von einigen Minuten Dauer gut überbrücken. Durch Hinzunahme weiterer Sensoren wie Odometer und Barometer entstanden Multisensorsysteme, die die Bahnen im Raum (Trajektorie), entlang der sie geführt werden, mit hoher Genauigkeit digitalisieren. Wird ein mit solch einem Multisensorsystem ausgestattetes Fahrzeug zusätzlich mit Kameras und Scannern bestückt, so entsteht ein multifunktionales Messfahrzeug, mit dem der Fahrweg und alle Objekte in einem Korridor von ca. 50 m Breite erfasst werden können. Bei reduzierten Genauigkeitsanforderungen kann das aufwändige Inertialsystem durch ein einfaches Koppelsystem ersetzt werden, das die Signale von low-cost Drehraten- und Weggebern verarbeitet.

Um 1991 waren die ersten kinematischen Messsysteme dieser Art in den USA und Kanada einsatzfähig. Unter der Bezeichnung »Mobile Mapping System« haben sie sich inzwischen für die messtechnische Erfassung von Trassen und trassennahen Objekten bewährt.

Mit geringer zeitlicher Verzögerung begann in Europa die Entwicklung vergleichbarer Messsysteme. Eine der ersten Arbeitsgruppen, die sich mit dieser neuen Technologie beschäftigt haben, ist die Arbeitsgruppe integrierte kinematische Vermessung (ikV), die im Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München beheimatet ist. Das Ergebnis ihrer nahezu zehnjährigen Entwicklungsarbeit sind die beiden Messfahrzeuge KiSS® und MoSES, die sich in zahlreichen Praxiseinsätzen bereits bewährt haben.

In einer Serie von Beiträgen wird über die Grundlagen und Einsatzmöglichkeiten kinematischer Messverfahren, über die technische Realisierung und die umfangreichen Erfahrungen von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe ikV berichtet werden

Wilhelm Caspary

## Kinematische Messmethoden

Wilhelm Caspary

### Zusammenfassung

Die Nutzung der modernen Hochtechnologie in der geodätischen Messtechnik hat zu neuen Messsystemen und Messmethoden geführt. Dabei ist ein ausgeprägter Trend zu kinematischen Messverfahren festzustellen.

Messverfahren werden als kinematisch bezeichnet, wenn die Erfassung der Bewegung eines Objektes mittelbar oder unmittelbar zu dem gesuchten Messergebnis führt. Die mathe-

matische Beschreibung der Bewegung bzw. des Zustands eines bewegten Objektes kann in verschiedenen Koordinatensystemen erfolgen. Dabei wird kein Bezug zu verursachenden Kräften hergestellt sondern die Bewegung nur als zeitliche Änderung des Zustands modelliert.

In Abhängigkeit von der Rolle, die das kinematische Objekt im Messverfahren spielt, können drei Gruppen unterschieden werden:

- Das Messergebnis ist der momentane Zustand bzw. die Bahn des bewegten Objekts. Typische Objekte sind Flugkörper, Landfahrzeuge, Schiffe, schwere Maschinen und Roboter. Die Messungen werden entweder vom Objekt aus zu Fixpunkten oder anderen kinematischen Objekten bekannter Bahn ausgeführt. Oder die Messungen erfolgen mit autonomen Messsystemen, die mitgeführt werden, oder von Festpunkten aus mit zielverfolgenden Messsystemen oder bildgebenden Sensoren.
- Das Messergebnis ist die Position statischer Punkte, die Dimension von Körpern oder die Form von Flächen. Die Messungen werden entweder zu kinematischen Objekten durchgeführt, deren Bahn genau bekannt ist, oder von kinematischen Objekten aus, meist mit bildgebenden Sensoren oder Scannern, wobei der Zustand des Objektes zum Messzeitpunkt bekannt oder rekonstruierbar sein muss.
- Das Messergebnis sind reversible oder irreversible Deformationen künstlicher oder natürlicher Objekte. Bei langsam ablaufenden Deformationen können konventionelle statische Messverfahren eingesetzt werden. Die Beobachtung von Schwingungen erfolgt durch kinematische Messungen von Festpunkten aus oder durch am Objekt angebrachte Sensoren.

### Summary

*Recent developments in high technology have led to novel surveying instruments and systems enabling new methods of measurement. Thereby a distinct trend toward kinematic methods can be recognized.*

*Methods of measurement are termed kinematic when the capture of motion of an object leads directly or indirectly to the wanted measuring result. The mathematical description of the motion or the state of a kinematic object can be based on different coordinate systems. This is done without reference to the forces which cause the motion. According to the role the moving body plays, when the measurements are executed, one can identify three different kinematic methods.*

- *The measuring result is the instantaneous state or the path of the moving object. Typical objects are space- and aircraft, land vehicles, ships, heavy machines and robots. The measurements are either performed from the moving body to fixed points or to other kinematic objects with known paths, or the observations are taken with autonomous sensors aboard the objects or with tracking instruments or cameras from control points.*
- *The measuring result is the position of static points, the shape of objects or of surfaces. The observations are either executed to kinematic objects with exactly known paths or from moving bodies with cameras and scanners. In the latter case, the state of the body at the instant of measurement must be known or restorable.*
- *The measuring results are resilient or lasting deformations of man-made or natural objects. Slow deformations can be measured by conventional static methods. But for the measurement of oscillations kinematic methods are required either from fixed points or by use of sensors installed on the object.*

## 1 Einführung

Die Weiterentwicklungen in der Sensorik, der Mikro- und Optoelektronik sowie in der Prozessor-, Mikromotor- und Telekommunikationstechnik der letzten Jahrzehnte haben unser berufliches und privates Umfeld tiefgreifend verändert. Auch im Vermessungswesen haben diese Entwicklungen tiefe Spuren hinterlassen und sie gehen allem Anschein nach mit unvermindertem Tempo weiter, so dass das Schritthalten bei ihrer Nutzung eine ständige Herausforderung ist.

Die klassischen optisch-mechanischen Präzisionsinstrumente für die Messung von Winkeln, Strecken und Höhenunterschieden sind weitgehend ersetzt worden durch automatisierte Instrumente, die nach dem Aufstellen und Zentrieren alle weiteren Funktionen selbsttätig ausführen und die Messergebnisse im Speicher ablegen. Sie können mit der Gegenstation interagieren und durch eine interne Uhr oder ein externes Signal zur Durchführung von Messungen aktiviert werden. Ferner sind völlig neue Messsysteme entstanden, die auf Knopfdruck Beobachtungen ausführen, die Auswertung vornehmen und die Ergebnisse in Echtzeit verfügbar machen, sowie Messverfahren entwickelt worden, die das automatische Verfolgen von Objekten, das Navigieren von schweren Maschinen und das programmgesteuerte Abtasten von Objektflächen ermöglichen.

Diese Beispiele verdeutlichen die enorme Weiterentwicklung der geodätischen Messtechnik, deren Einsatz sich in einigen Bereichen sehr vereinfacht hat, in anderen aber höchste Anforderungen an den Ingenieur stellt. Als wesentliche Entwicklungslinien sind folgende Trends zu erkennen:

- Die Bedienung der Instrumente erfolgt nicht mehr manuell sondern durch programmgesteuerte Motoren.
- Die menschlichen Sinne werden durch elektronische Sensoren ersetzt.
- Prozesse werden nicht mehr in weitabständigen Epochen sondern kontinuierlich beobachtet.
- Messung, Auswertung und Darstellung verschmelzen zu Echtzeitverfahren.
- Kinematische Messverfahren treten an die Stelle klassischer statischer Verfahren.

Diese Liste stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, aber sie zeigt sehr deutlich, wie stark die moderne Hochtechnologie das Messen verändert hat. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf den letztgenannten Trend und sind der Versuch, eine Definition und Klassifizierung kinematischer Messverfahren zu entwickeln.

## 2 Kinematik

Kinematik ist der Teil der Technischen Mechanik, in dem die Bewegung von Objekten mathematisch beschrieben

wird, ohne dass ein Bezug zu den Kräften hergestellt wird, die die Bewegung verursachen.

Bewegungen werden durch die kinematischen Größen Translation und Rotation sowie deren zeitliche Ableitungen mathematisch modelliert und zwar relativ zu einem Bezugskörper bzw. Bezugssystem, von dem aus sie beobachtet und gemessen werden. Von einem sich selbst bewegenden Bezugskörper aus können naturgemäß nur relative Objektbewegungen beobachtet werden. Die Erfassung absoluter Bewegungen ist nur von einem, im Sinne des Newtonschen Trägheitsgesetzes inertialen Bezugssystem aus möglich, das aber praktisch nicht verfügbar ist. Für die geodätischen Messverfahren, die im Folgenden behandelt werden, spielen ausschließlich Bewegungen relativ zum Erdkörper eine Rolle. Zu ihrer Modellierung werden erdfeste Bezugssysteme eingeführt, die als ruhend betrachtet werden dürfen, solange die Erdbewegungen ohne Interesse sind.

### 2.1 Kinematik eines Massenpunktes

Als Massenpunkt bezeichnet man einen Körper, dessen Ausdehnung bei der Modellierung seiner Bewegung vernachlässigbar ist und dessen Rotation nicht interessiert. Er kann wie ein mathematischer Punkt, in dem die Masse konzentriert ist, betrachtet werden. Der Zustand eines Punktes, der eine allgemeine Bewegung im Raum ausführt, wird durch seine momentane Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung parametrisiert. Zur Beschreibung der Bewegung müssen diese Größen als Funktionen der Zeit formuliert werden. Die Bahn, auf der sich der Punkt im Raum bewegt, ist durch die Folge der Positionen gegeben.

Für die Modellierung der Bewegung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Welche davon für eine praktische Anwendung am besten geeignet ist, hängt von der Art der Bewegung und von den verfügbaren Messgrößen ab.

### 2.2 Kartesische Koordinaten

In einem kartesischen Bezugssystem wird die Position des Punktes durch den Ortsvektor  $\mathbf{r}(t)$  angegeben, der mit Hilfe der Einheitsvektoren  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  in seine Komponenten in Richtung der  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse zerlegt werden kann

$$\mathbf{r}(t) = x(t) \cdot \mathbf{i} + y(t) \cdot \mathbf{j} + z(t) \cdot \mathbf{k} \tag{1}$$

Aus zwei benachbarten Positionen  $P_1$  und  $P_2$ , die zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t + \Delta t$  gehören, erhält man durch den Grenzübergang  $P_2 \rightarrow P_1$  bzw.  $\Delta t \rightarrow 0$  die Geschwindigkeit in  $P_1$ , d.h. zum Zeitpunkt  $t$ , vgl. Abb. 1.

$$\mathbf{v}(t) = d\mathbf{r} / dt = \dot{\mathbf{r}}(t) = \dot{x}(t) \cdot \mathbf{i} + \dot{y}(t) \cdot \mathbf{j} + \dot{z}(t) \cdot \mathbf{k} \tag{2}$$

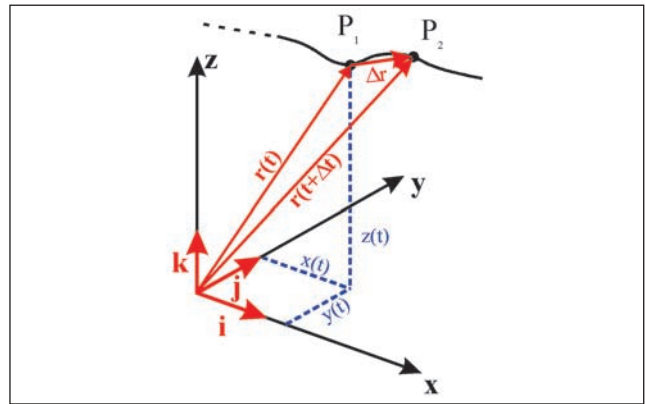


Abb. 1: Kartesisches Bezugssystem für die Bewegung eines Massenpunktes

Die Richtung der Geschwindigkeit liegt in der Bahntangente in  $P_1$  und ihr Betrag folgt aus

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \tag{3}$$

Da  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  und  $\mathbf{k}$  raumfeste Einheitsvektoren sind, deren Ableitungen nach der Zeit verschwinden, erhält man für den Beschleunigungsvektor ebenfalls die einfache Komponentendarstellung

$$\mathbf{a}(t) = d\mathbf{v} / dt = \dot{\mathbf{r}}(t) = \ddot{x}(t) \cdot \mathbf{i} + \ddot{y}(t) \cdot \mathbf{j} + \ddot{z}(t) \cdot \mathbf{k} \tag{4}$$

und den Betrag aus

$$a^2 = \ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2 \tag{5}$$

Der Beschleunigungsvektor liegt in der Schmiegeebene der Bahn in  $P_1$ . Seine Richtung kann durch je eine Komponente in tangentialer und radialer Richtung dargestellt werden.

### 2.3 Polarkoordinaten

Die Distanz  $r$ , der Horizontalwinkel  $\theta$  und der Höhenwinkel  $\Phi$  treten bei geodätischen Aufgaben häufig als Messgrößen auf. Für die Modellierung der Punktbewegung bieten sich dann Polarkoordinaten bzw. sphärische Koor-

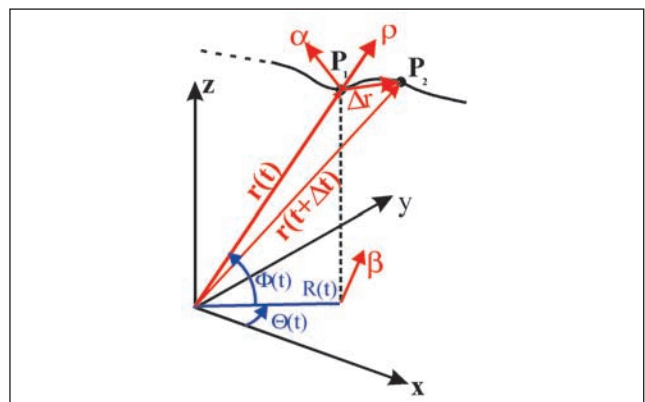


Abb. 2: Bewegung eines Punktes in Polarkoordinaten

dinaten an. Dazu werden die Einheitsvektoren  $\boldsymbol{\rho}$  in Richtung des Ortsvektors  $\boldsymbol{r}$ ,  $\boldsymbol{\beta}$  in der  $x, y$ -Ebene senkrecht auf  $R$  und  $\boldsymbol{\alpha}$  in der  $r, z$ -Ebene senkrecht auf  $\boldsymbol{r}$  eingeführt.

Da diese Einheitsvektoren nicht raumfest sind, müssen für die Berechnung von Geschwindigkeit und Beschleunigung in Polarkoordinaten ihre Ableitungen berücksichtigt werden. Mit den Bezeichnungen in Abb. 2 erhält man:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v} &= v_r \cdot \boldsymbol{\rho} + v_\theta \cdot \boldsymbol{\beta} + v_\phi \cdot \boldsymbol{\alpha} \\ \boldsymbol{a} &= a_r \cdot \boldsymbol{\rho} + a_\theta \cdot \boldsymbol{\beta} + a_\phi \cdot \boldsymbol{\alpha}. \end{aligned} \quad (6)$$

In dieser Komponentendarstellung bedeuten

$$\begin{aligned} v_r &= \dot{r}, v_\theta = R\dot{\theta} \cos \phi, v_\phi = r\dot{\phi} \\ a_r &= \ddot{r} - r\dot{\phi}^2 - r\dot{\theta}^2 \cos^2 \phi \\ a_\theta &= \frac{\cos \phi}{r} \frac{d}{dt}(r^2\dot{\theta}) - 2r\dot{\theta}\dot{\phi} \sin \phi \\ a_\phi &= \frac{1}{r} \frac{d}{dt}(r^2\dot{\phi}) + r\dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Die Umrechnung in ein raumfestes kartesisches Bezugssystem kann mit den Beziehungen (8) erfolgen.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\rho} &= \cos \phi \cos \theta \cdot \boldsymbol{i} + \cos \phi \sin \theta \cdot \boldsymbol{j} + \sin \phi \cdot \boldsymbol{k} \\ \boldsymbol{\alpha} &= -\sin \phi \cos \theta \cdot \boldsymbol{i} + \sin \phi \cos \theta \cdot \boldsymbol{j} + \cos \phi \cdot \boldsymbol{k} \\ \boldsymbol{\beta} &= -\sin \theta \cdot \boldsymbol{i} + \cos \theta \cdot \boldsymbol{j} \end{aligned} \quad (8)$$

## 2.4 Zylinderkoordinaten

Wenn die Bahn des Punktes in der Nähe einer Horizontalebene bleibt, kann es zweckmäßig sein, statt der sphärischen Koordinaten Zylinderkoordinaten zu verwenden. Diese einfachere Darstellung kommt der gewohnten Trennung von Lage- und Höhenbestimmung nahe. Zur Modellierung werden die Einheitsvektoren  $\boldsymbol{\beta}$  und  $\bar{\boldsymbol{\rho}}$  in der  $x, y$ -Ebene benutzt und  $\boldsymbol{k}$  für Vertikalbewegungen in  $z$ -Richtung. Der neue Einheitsvektor  $\bar{\boldsymbol{\rho}}$  weist in Verlängerung von  $R$ .

Für den Ortsvektor gilt nun

$$\boldsymbol{r} = R \cdot \bar{\boldsymbol{\rho}} + z \cdot \boldsymbol{k}. \quad (9)$$

Durch Ableitungen nach der Zeit folgen daraus der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v} &= \dot{\boldsymbol{r}} = \dot{R} \cdot \bar{\boldsymbol{\rho}} + R \cdot \dot{\bar{\boldsymbol{\rho}}} + \dot{z} \cdot \boldsymbol{k} \\ &= \dot{R} \cdot \bar{\boldsymbol{\rho}} + R\dot{\theta} \cdot \boldsymbol{\beta} + \dot{z} \cdot \boldsymbol{k} \\ \boldsymbol{a} &= \dot{\boldsymbol{v}} = (\ddot{R} - R\dot{\theta}^2) \cdot \bar{\boldsymbol{\rho}} + (R\ddot{\theta} + 2\dot{R}\dot{\theta}) \cdot \boldsymbol{\beta} + \ddot{z} \cdot \boldsymbol{k}. \end{aligned} \quad (10)$$

## 2.5 Natürliche Koordinaten

Zur Beschreibung der Bewegung eines Punktes auf einer räumlichen Bahn können drei orthogonale Einheitsvektoren eingeführt werden, deren Ursprung die momentane Position des Punktes ist. Dieses sogenannte begleitende Dreibein wird so ausgerichtet, dass ein Vektor in Richtung der Tangente liegt ( $\boldsymbol{\tau}$ ) und der zweite auf den Krümmungsmittelpunkt zeigt (Normalenvektor  $\boldsymbol{\nu}$ ). Diese bilden die Schmiegeebene in  $P$ , auf der der dritte Vektor senkrecht steht (Binormalenvektor  $\boldsymbol{\mu}$ ).

Die Position des Punktes wird zweckmäßig durch den zurückgelegten Weg  $s$  beschrieben, der sich auf einen beliebigen Ausgangspunkt beziehen kann. Die drei Einheitsvektoren sind Funktionen von  $s$  und stehen mit dem Ortsvektor  $\boldsymbol{r}$  in folgender Beziehung:

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d\boldsymbol{r}}{ds}, \boldsymbol{\nu} = \rho \frac{d\boldsymbol{\tau}}{ds}, \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\tau} \times \boldsymbol{\nu}, \quad (11)$$

in der  $\rho$  der Krümmungsradius in  $P$  ist.

Für die Geschwindigkeit gilt der einfache Ausdruck

$$\begin{aligned} |v| &= v_t = \frac{ds}{dt} = \dot{s}, v_n = 0, v_b = 0 \\ \boldsymbol{v} &= v_t \cdot \boldsymbol{\tau} = |v| \cdot \boldsymbol{\tau}. \end{aligned} \quad (12)$$

Die Beschleunigung erhält man als Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit zu

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d|v|}{dt} \cdot \boldsymbol{\tau} + \frac{d\boldsymbol{\tau}}{dt} |v| = a_t \cdot \boldsymbol{\tau} + \frac{|v|^2}{\rho} \cdot \boldsymbol{\nu}$$

mit (13)

$$a_t = \ddot{s} = \dot{v}_t, a_n = \frac{v_t^2}{\rho}, a_b = 0.$$

## 2.6 Kinematik des starren Körpers

Ein starrer Körper ist dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand zwischen beliebigen Punkten des Körpers unveränderlich ist. Es genügt drei nicht auf einer Geraden liegende Punkte zu beobachten, um den Bewegungszustand des Körpers zu erfassen. Allerdings besitzt der Körper lediglich sechs Freiheitsgrade, da seine Bewegungen durch drei Translationen und drei Rotationen vollständig modelliert werden können. Sechs geeignet gewählte Messgrößen reichen daher zur Zustandsermittlung aus.

Die Koordinatensysteme, die zur Darstellung der Bewegung eines Massenpunktes geeignet sind, können auch für Starrkörper benutzt werden. Am Beispiel kartesischer Koordinatensysteme wird die Vorgehensweise im Folgenden erläutert. Zur Festlegung von Positionen auf dem Objekt wird ein körperfestes Bezugssystem  $\xi, \eta, \zeta$  eingeführt. Der Ursprung und die Orientierung des Systems können frei gewählt werden. Aus praktischen Gründen werden sie oft mit dem Schwerpunkt und den Haupt-

trägheitsachsen des Körpers zur Deckung gebracht. Bei Fahrzeugen, die ein Messsystem tragen, kann der Ursprung ins Zentrum des Messsystems gelegt werden und für die Achsen bieten sich die Richtungen der Längs-, Quer- und Hochachse des Fahrzeuges an. Ein Beobachter im  $\xi, \eta, \zeta$ -System nimmt keine Bewegungen von körperfesten Punkten wahr.

Als ruhendes Bezugssystem zur Beschreibung der Objektbewegungen wird ein kartesisches  $x, y, z$ -System gewählt. Die Bewegungen eines Punktes  $P$  des Körpers bezüglich des  $x, y, z$ -Systems können durch eine Translation des Ursprungs  $O$  des  $\xi, \eta, \zeta$ -Systems und eine Rotation um eine momentane Drehachse durch  $O$  beschrieben werden. Für die momentane Position erhält man somit

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{R}(t) + \boldsymbol{\rho}(t). \tag{14a}$$

Der Ortsvektor  $\boldsymbol{\rho}$  ist im  $\xi, \eta, \zeta$ -System konstant. Seine Rotation bezüglich des  $x, y, z$ -Systems wird durch die zeitvariable Drehmatrix  $\mathbf{D}(t)$  beschrieben.

$$\boldsymbol{\rho}(t) = \mathbf{D}(t)\boldsymbol{\rho}. \tag{14b}$$

Mit den Bezeichnungen der Abb. 3 gilt für die Winkelgeschwindigkeit

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \mathbf{e}(t)|\dot{\boldsymbol{\omega}}(t)|, \tag{15}$$

wobei  $\mathbf{e}(t)$  der zeitabhängige Einheitsvektor in Richtung der Drehachse ist. Daraus folgt die Rotationsgeschwindigkeit von  $P$

$$\mathbf{v}_R = \dot{\boldsymbol{\rho}} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}, \tag{16a}$$

die zusammen mit der Translationsgeschwindigkeit

$$\mathbf{v}_T = \dot{\mathbf{R}} \tag{16b}$$

die Geschwindigkeit von  $P$  bezüglich des  $x, y, z$ -Systems ergibt:

$$\mathbf{v}_P = \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{R}} + \dot{\boldsymbol{\rho}} = \dot{\mathbf{R}} + \mathbf{e}|\dot{\boldsymbol{\omega}}| \times \boldsymbol{\rho}. \tag{17}$$

Die Ableitung von (17) nach der Zeit liefert die Beschleunigung des Punktes  $P$

$$\mathbf{a}_P = \dot{\mathbf{v}}_P = \ddot{\mathbf{r}} = \ddot{\mathbf{R}} + (\dot{\mathbf{e}}|\dot{\boldsymbol{\omega}}| + \mathbf{e}|\ddot{\boldsymbol{\omega}}|) \times \boldsymbol{\rho} + \mathbf{e}|\dot{\boldsymbol{\omega}}|^2 \times (\mathbf{e} \times \boldsymbol{\rho}). \tag{18}$$

Die hier gewählte Darstellung in kartesischen Koordinaten ist nicht immer günstig. In der Praxis wird das Bezugssystem in Abhängigkeit von der Art der Bewegung und den verfügbaren Messgrößen festgelegt. Die dann gültigen Bewegungsgleichungen werden nach denselben Regeln entwickelt und sind in Lehrbüchern gut dokumentiert.

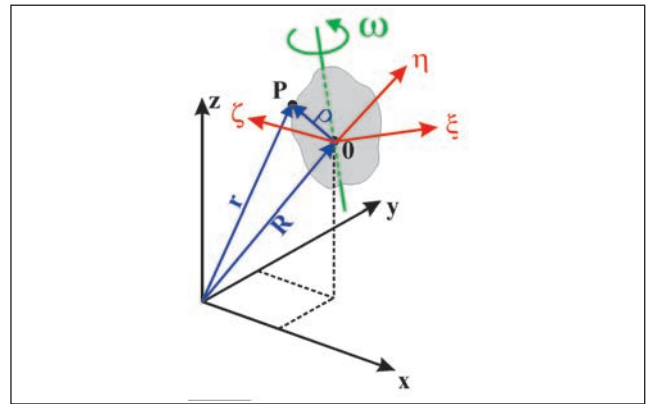


Abb. 3: Bewegungen eines starren Körpers in kartesischen Bezugssystemen

### 2.7 Relativbewegungen

Führt der Punkt  $P$  im  $\xi, \eta, \zeta$ -System Bewegungen aus, so addieren sich diese zu den oben modellierten Bewegungen des starren Körpers, die in diesem Zusammenhang als Führungsbewegungen bezeichnet werden. Für einen Beobachter im  $\xi, \eta, \zeta$ -System erscheint die Bewegung von  $P$  als Änderung des Ortsvektors  $\boldsymbol{\rho}$ , siehe Abb. 3. Diese wird durch die Relativgeschwindigkeit

$$\mathbf{v}_R = \frac{d'\boldsymbol{\rho}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\rho}}' \tag{19}$$

ausgedrückt, die im körperfesten Bezugssystem gilt. Die Gesamtgeschwindigkeit des Punktes im ruhenden  $x, y, z$ -System lautet

$$\mathbf{v}_P = \dot{\mathbf{R}} + \dot{\boldsymbol{\rho}} + \dot{\boldsymbol{\rho}}' = \dot{\mathbf{R}} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho} + \dot{\boldsymbol{\rho}}'. \tag{20}$$

Die Ableitung von  $\mathbf{v}_P$  führt auf die Beschleunigung des Punktes

$$\mathbf{a}_P = \ddot{\mathbf{R}} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho} + \dot{\boldsymbol{\rho}}' + \mathbf{v}_R) + \dot{\mathbf{v}}_R', \tag{21}$$

in der alle Größen als Vektoren geschrieben sind. Durch einfaches Umordnen findet man die geläufigere Form

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_P &= (\ddot{\mathbf{R}} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho})) + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_R + \dot{\mathbf{v}}_R' \\ &= \mathbf{a}_F + \mathbf{a}_C + \mathbf{a}_R, \end{aligned}$$

in der die Gesamtbeschleunigung in Führungs-, Coriolis- und Relativbeschleunigung zerlegt ist.

### 3 Kinematik in der Geodäsie

Bei geodätischen Messmethoden spielen Körper, die sich im Raum oder auf der Erde bewegen, eine immer größere Rolle. Sie treten als zu beobachtende Objekte auf, deren Bewegungen studiert oder deren Bahnen messtechnisch

erfasst werden. Sie werden als Zielpunkte für die Positionsbestimmung genutzt oder sie tragen Messsysteme zur Beobachtung oder Positionierung anderer meist statischer Objekte.

Die Modellierung der Objektbewegungen als Grundlage kinematischer Messmethoden erfolgt, wie gezeigt wurde, mit Hilfe von Translationen, Rotationen und deren zeitliche Änderungen bis zur zweiten Ordnung. Alle Parameter sind Funktionen der Zeit und folglich in einem Raum-Zeit-Bezugssystem zu definieren. Zu den klassischen geometrischen Beobachtungsgrößen tritt daher die Zeit, die in der Astronomie und Navigation schon immer eine wesentliche Rolle gespielt hat, die in der Vermessungstechnik jedoch relativ neu ist, wenn man von der Laufzeitmessung von Signalen bei der elektromagnetischen Distanzmessung absieht.

Die genaue Zeit wird bei kinematischen Messverfahren benötigt, um den Moment der Gültigkeit der anderen Messwerte zu registrieren. Da jedes Sensorsystem durch eine interne Uhr gesteuert wird, besteht die Aufgabe darin, diese Uhren zu synchronisieren. Dies kann bei einigen Systemen durch Einspeisung eines Zeitsignals, z. B. des PPS-Signals des GPS geschehen. Alle Messsignale beziehen sich dann auf dieselbe Zeitskala. Bei Sensoren, die dies nicht erlauben, werden alle Messwerte mit einem Zeitstempel versehen. Die Synchronisation wird dann indirekt bei der gemeinsamen Verarbeitung der Daten durchgeführt.

Kinematische Messsysteme enthalten meist mehrere unterschiedliche Sensoren und weisen einen hohen Automatisierungsgrad auf. Ihre Entwicklung ist erst durch die eingangs erwähnten großen Fortschritte bei der Miniaturisierung, Genauigkeitssteigerung und Frequenzerhöhung von Sensoren, Prozessoren, Motoren und Oszillatoren möglich geworden. Sie geben dem Vermessungsingenieur die Möglichkeit, viele seiner traditionellen Aufgaben schneller und wirtschaftlicher zu erledigen und sie versetzen ihn in die Lage, die Anforderungen auf neuen Gebieten zu erfüllen, in denen konventionelle Messungen aus Zeit- und Kostengründen nicht in Betracht kommen. Kennzeichnend für die kinematische Vermessung ist, und das unterscheidet sie von der Ortung im Bereich der Navigation, dass die Ergebnisse nicht in Echtzeit benötigt werden. Deshalb können bei der Auswertung der Messungen komplexe Methoden der digitalen Signalbearbeitung und der statistischen Parameterschätzung eingesetzt werden, die teils parallel und teils iterativ ablaufen und eine Qualitätskontrolle einschließen.

Im Grenzbereich zwischen Navigation und kinematischer Vermessung liegen Aufgaben der Maschinensteuerung. Wegen der in aller Regel geringen Bewegungsgeschwindigkeit ist für die Messungen eine niedrige Frequenz ausreichend, und so steht genügend Zeit für die Ermittlung des Zustands und der Stellgrößen zur Verfügung.

Wenn die Beobachtung von Punktbewegungen und Objektverformungen, die eine Zustandsbeschreibung in

einem Raum-Zeit Bezugssystem ermöglichen, das Kennzeichnende für kinematische Messmethoden ist, so gehören entgegen dem üblichen Sprachgebrauch auch Deformationsmessungen dazu. Bei den auf diesem Gebiet typischen langsamen Bewegungen spielt die Zeit als Messgröße eine untergeordnete Rolle, so dass man die Messverfahren berechtigterweise nicht als kinematisch bezeichnen wird. Allerdings erfolgt die Modellierung der Deformation auf der Basis mehrerer Messepochen häufig in kinematischen Modellen im Sinne der eingangs definierten Kinematik.

Etwas anders verhält es sich, wenn die Punkt- bzw. Objektbewegungen zyklisch sind und die Frequenz eine gewisse Schwelle überschreitet. Mit klassischen geodätischen Messmethoden sind solche Schwingungen nicht mehr erfassbar. Es müssen dann spezielle Messgeräte bzw. Sensoren eingesetzt werden, die Signale oder Zeitreihen liefern, wie sie bei kinematischen Messsystemen typisch sind.

Grundlegende Betrachtungen zur Definition und Abgrenzung kinematischer Messverfahren und der dabei eingesetzten Sensorik findet man u. a. in Petzoldt (1996), Mönicke (1996) und Schwarz (1996).

#### 4 Die Beobachtung sich bewegender Objekte

Das mathematische Modell der Bewegung eines starren Körpers, wie in 2.6 behandelt, besitzt sechs Freiheitsgrade, die durch drei Translationen und drei Rotationen parametrisiert werden können. Diese Parameter sind Funktionen der Zeit und liefern über ihre Ableitungen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Die Modellierung der Bewegung mit analytischen Funktionen setzt

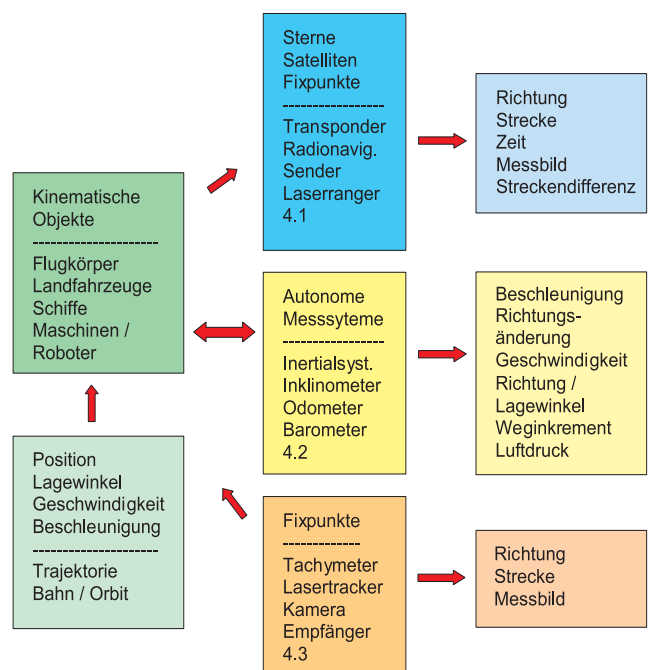


Abb. 4: Bestimmung der Bewegungsparameter und der Bahn kinematischer Objekte

die Kenntnis der wirksamen Kräfte voraus und ist Gegenstand der Kinetik. Bei der kinematischen Vermessung wird der Bewegungszustand zu diskreten Zeitpunkten ermittelt. Die dabei gewählte Messfrequenz wird so auf die Geschwindigkeit des Objektes abgestimmt, dass Zwischenzustände einfach interpoliert werden können. Sie kann zwischen mehreren hundert Hertz und wenigen Messungen pro Jahr liegen. Die Verbindung der diskreten Zustände im Raum-Zeit Bezugssystem ergibt die Bahn des Objekts. Bei Landfahrzeugen und Flugkörpern ist dafür auch die Bezeichnung Trajektorie üblich, während man bei Umlaufbahnen z.B. von Satelliten, von Orbit spricht.

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die kinematischen Objekte und die Parameter der Bewegungsmodelle. Im mittleren Teil stehen die Methoden, Sensoren und Systeme mit denen die Objekte beobachtet werden, und im rechten Teil sind die zugehörigen Observablen angegeben.

#### 4.1 Die Beobachtung externer Referenzobjekte zur Positionsbestimmung

In der Seefahrt war die Beobachtung von Sonne und Sternen sowie die Mitführung genauer Uhren bis in die Neuzeit die einzige Möglichkeit, die Position eines Schiffes auf hoher See zu bestimmen. Heute sind es meist Satelliten, zu denen Messungen durchgeführt werden. Dies setzt allerdings freie Sicht zu den Satelliten voraus, was auf See ebenso wenig ein Problem darstellt wie z.B. in der Landwirtschaft. Während für die Seeschiffpositionierung einfache Codeempfänger eingesetzt werden können, erfordert die präzise Farmarbeit mit schweren landwirtschaftlichen Maschinen, vor allem wenn sie voll automatisiert ablaufen soll, Phasenmessungen und differenzielle Auswertemethoden.

Aber auch passive und aktive Fixpunkte werden zur Bahnbestimmung eingesetzt. Beispiele sind Passpunkte, die in der Aerophotogrammetrie benutzt werden, um die äußere Orientierung der Luftbilder zu bestimmen, die durch die Bewegungsparameter des Flugzeugs zum Zeitpunkt der Aufnahme gegeben ist. Baken werden bei der Positionierung von Landfahrzeugen eingesetzt und bei Schiffen sind es die Sender von Radionavigationssystemen oder bei hydrographischen Arbeiten Transponder/Transducer Systeme. Ähnliche Methoden werden im Luftverkehr und insbesondere beim Landeanflug angewandt. Allerdings ist auch hier zu beobachten, dass diese bewährten Positionierungssysteme vermehrt durch Satellitenverfahren ersetzt werden.

#### 4.2 Positionsbestimmung mit autonomen mitgeführten Sensoren

Kreisel und Beschleunigungsmesser sind inertielle Sensoren, die auf jede Bewegung mit einem Signal antworten,

aus dem Bewegungsparameter abgeleitet werden können. Andere autonome Sensoren sind Inklinometer, Kompass, Wegmesser (Tachometer) und Barometer. Zur Bestimmung der Bewegungsparameter ist stets ein Messsystem mit mehreren Sensoren erforderlich.

Soll z.B. die Position eines Fahrzeugs auf der Straße bestimmt werden, wie es bei Navigationsanlagen typisch ist, so reichen ein Kurskreisel und ein Wegmesser aus, um die horizontalen Translationskomponenten mit den Formeln der Koppelnavigation zu bestimmen. Allerdings führt die ungünstige Fehlercharakteristik, insbesondere des Kreisels, sehr schnell zu untolerierbaren Positionsfehlern. Als Gegenmaßnahme wird die Position durch Satellitenmessungen und Mapmatchingverfahren gestützt. Satellitenmessungen erlauben zur Zeit (SA abgeschaltet) die Positionierung mit einer Unsicherheit von 5–10 Metern. Es muss jedoch damit gerechnet werden, dass sie nur auf 70–80% des Straßennetzes möglich ist, da Bebauung und Bewaldung die Sicht zu den Satelliten abschatten. Die Unsicherheit des Mapmatchingverfahrens hängt von der Genauigkeit des digitalisierten Straßennetzes ab. Sie dürfte zwischen 10 und 30 Metern liegen (Czommer 2000).

Werden alle sechs Bewegungsparameter benötigt, so muss ein inertiales Messsystem eingesetzt werden, das wie ein begleitendes Dreibein nach 2.5 ausgelegt ist. Zur Bestimmung der Translationen dienen drei orthogonal angeordnete Beschleunigungsmesser, und die drei Rotationen werden bei modernen Systemen aus den Signalen von drei optischen Kreiseln abgeleitet. Im Prinzip kann damit die Trajektorie des Objekts vollständig bestimmt werden. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass auch hier die ungünstige Akkumulation von systematischen Fehlern nach wenigen Minuten eine Stützung erfordert. Hierzu können Wegmesser und Barometer eingesetzt werden, die ständig Signale zur Verfügung stellen und DGPS-Kodemessungen, die allerdings den oben genannten Einschränkungen der Verfügbarkeit unterliegen. Mit einem solchen hybriden Messsystem an Bord eines Fahrzeuges können die Position mit einer Unsicherheit von 30–50 cm und die Lagewinkel mit  $0,005^\circ$  bestimmt werden. Der Aufwand, der zur Erreichung dieser Genauigkeit erforderlich ist, ist beträchtlich. Es müssen dazu hochwertige Sensoren eingesetzt werden, deren Signale exakt zu synchronisieren sind und die Schätzung der Bewegungsparameter muss mit komplexen Auswerteverfahren durchgeführt werden (Caspary et al. 2000).

#### 4.3 Die Beobachtung kinematischer Objekte von Festpunkten aus

Frühe Methoden der Bahnverfolgung von Festpunkten aus sind aus der Luftfahrt bekannt. Mit sogenannten Kinotheodoliten wurde die Trajektorie von Flugzeugen im Start- und Landflug und von Raketen erfasst. Dazu wurden mit diesen Instrumenten fotografische Aufnah-

men des Flugkörpers gemacht, zu denen neben dem Zeitpunkt die Stellung des Horizontal- und des Vertikalkreises registriert wurde (Mathias 2000).

Auch heute noch werden Objektbewegungen mit Kameras von Festpunkten aus gemessen. Mit Hilfe der Motografie werden z. B. die Bewegungsabläufe von Sportlern und Artisten aufgezeichnet, um die Art und Abfolge von Bewegungen zu ermitteln und solche einzuüben, die besonders ästhetisch sind oder zu Höchstleistungen führen (Theis 1986). Auch für die Kalibrierung der Bewegungen von Robotern und in der Ergonomie haben sich photogrammetrische Methoden bewährt (Baum 1986).

Moderne Verfahren der Bahnbestimmungen werden beim GPS-Bodensegment eingesetzt. Sie dienen zur präzisen Erfassung der Bahnen der GPS-Satelliten, deren Parameter, die so genannten Ephemeriden, den Nutzern des Systems zur Verfügung gestellt werden und damit den globalen Bezugsrahmen für die GPS-Positionierung darstellen.

Ein anderes Anwendungsfeld ist die Maschinensteuerung. Schwere Maschinen, wie sie im Straßen- und Eisenbahnbau, zum Bohren von Tunneln oder für Erdarbeiten eingesetzt werden, bewegen sich langsam und haben einen begrenzten Aktionsradius. Um sie möglichst exakt nach den Entwurfsdaten zu führen, muss ihr Bewegungszustand stets verfügbar sein. Für die Positionsbestimmung werden häufig zielverfolgende Tachymeter eingesetzt, die die Koordinaten von bis zu drei Prismen, die an der Maschine angebracht sind, bestimmen und drahtlos an den Führerstand übermitteln. Bei guter Satellitensichtbarkeit kann die Positionierung auch mit DGPS erfolgen. Meist ist die Maschine zusätzlich mit Sensoren ausgestattet, die ihren Roll-, Nick- und Azimutwinkel messen. Ein solches hybrides Messsystem hat den Vorteil, dass die Bewegungsparameter mit höherer Genauigkeit und Zuverlässigkeit ermittelt werden können (Stempfhuber et al. 2000, Poltinger 1998).

Auch bei hydrographischen Vermessungen ist eine kinematische Schiffspositionierung durch zielverfolgende Tachymeter und den Einsatz von RTKDGPS möglich, wie Czaja et al. (2001) berichten.

## 5 Die Vermessung statischer Objekte

Die Positionierung von statischen Objekten mit kinematischen Messmethoden im Sinne der hier vorgeschlagenen Definition ist keinesfalls neu. Sie hat aber in den letzten Jahrzehnten stark an Bedeutung gewonnen und gehört heute zu den effizientesten Verfahren der Geodäsie. Neben der Position können die Geometrie von Objekten, Oberflächenformen und das Geländere Relief kinematisch erfasst werden. Einen Überblick über statische Objekte und ihre geometrische Beschreibung sowie die zur Messung eingesetzten kinematischen Objekte und die Messgrößen bzw. Messbilder gibt die Abbildung 5.

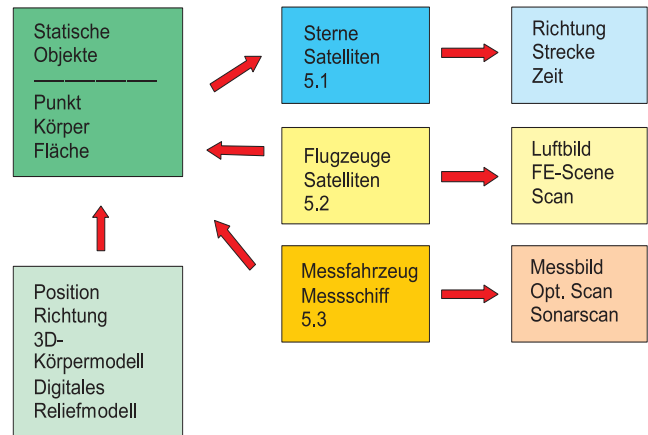


Abb. 5: Vermessung statischer Objekte mit kinematischen Methode

### 5.1 Messungen zu kinematischen Objekten

Die astronomische Positionsbestimmung war bis vor wenigen Jahrzehnten die einzige Methode zur Bestimmung von Koordinaten in einem globalen Bezugsrahmen. Grundlagen sind Sternkataloge und präzise Richtungs- und Zeitmessungen zu Fixsternen, die relativ zur Erde kinematische Objekte sind. Die astronomischen Beobachtungen erfordern ein hohes Maß an Sorgfalt, Erfahrung und Geduld. Sie galten als die anspruchsvollste Anwendung der geodätischen Messtechnik bis sie durch Satellitenverfahren nahezu vollständig verdrängt wurden. Deren Anwendung ist heute keine Herausforderung mehr. Einfach zu bedienende Knopfdruckinstrumente liefern, wenn erforderlich in Echtzeit, globale Positionen für jedermann. Üblicherweise werden diese Raumverfahren nicht als kinematisch bezeichnet, obwohl (scheinbar) sich bewegende Objekte die Grundlage bilden.

### 5.2 Vermessung von Flugobjekten aus

Während bei den Verfahren des vorigen Abschnitts die Messoperationen auf den Festpunkten durchgeführt werden, befinden sich hier die Sensoren an Bord von Satelliten und Flugzeugen. Bei der Fernerkundung der Erdoberfläche von Satelliten aus, die mit unterschiedlichen bildgebenden Sensoren durchgeführt wird, ist heute eine Auflösung im Meterbereich möglich. Mit entsprechender Genauigkeit können Objekte relativ positioniert werden, sofern sie eindeutig identifizierbar sind und Passpunkte für die Georeferenzierung der Scene zur Verfügung stehen. Die Standardanwendung besteht jedoch darin, flächenbezogene, thematische Informationen zu gewinnen, wobei der Trend zu geometrischen Informationen unverkennbar ist, wie neuere Radarsensoren zeigen, mit denen ein digitales Modell der Erdoberfläche aufgenommen werden kann. Noch stärker für geometrische Informationen ist die Aerophotogrammetrie ausgelegt. Für die Georeferenzierung der Luftbilder werden Passpunkte und



identische Punkte benötigt, auf die nur verzichtet werden kann, wenn das Messflugzeug mit Sensoren ausgestattet ist, die die Bewegungsparameter im Moment der Bildauslösung (äußere Orientierung) ausreichend genau ermitteln. Durch die Verfahren der Bildmessung und der analytischen Photogrammetrie werden die identischen Punkte benachbarter Bilder verknüpft. Dadurch werden dreidimensionale Positionen und digitale Höhenmodelle gewonnen. Ein Trend geht heute dahin, die Luftbilder in Ortofotos umzubilden, aus denen durch Digitalisieren nur mehr ebene Koordinaten abgeleitet werden. Die Höheninformation wird von Laserscannern geliefert, die dies genauer und effizienter leisten. Die äußere Orientierung der Scanner erfordert Sensoren an Bord des Flugzeuges, die die sechs Bewegungsparameter mit hoher Genauigkeit und hoher Frequenz zur Verfügung stellen.

### 5.3 Land- und wassergebundene Messfahrzeuge

Mit Multisensorsystemen ausgerüstete Landfahrzeuge zur Positionierung statischer Objekte existieren etwa seit 1991. Erste Entwicklungen wurden in den USA begonnen (Novak 1991), denen dann ähnliche in Canada (Schwarz et al. 1994), Deutschland (Caspary et al. 1995, Aussems/Benning 1995) und Australien (Leahy/Judd 1998, Kealy et al. 2001) folgten. Sie werden heute meist als Mobile Mapping Systeme bezeichnet.

Die Multisensorsysteme bestehen in der Regel aus zwei Gruppen von Sensoren. Eine Gruppe setzt sich aus GPS-Empfängern, inertialen Sensoren, Wegmesser, Barometer und evtl. weiteren Sensoren zusammen. Sie dient dazu, die sechs Bewegungsparameter des Fahrzeugs mit hoher Frequenz zu ermitteln. Die Genauigkeit, mit der dies geschieht, hängt von der Wahl und der Anzahl der Sensoren sowie von der Verfügbarkeit der Satelliten ab. Die Bewegungsparameter definieren die Trajektorie des Fahrzeugs, aus der die Geometrie des befahrenen Weges abgeleitet werden kann, und sie werden als Elemente der äußeren Orientierung für die Sensoren der zweiten Gruppe benötigt. Diese besteht aus Kameras, die in festen Zeit- oder Wegabständen digitale Messbilder der Umgebung des Fahrzeugs aufnehmen. Die Kameras sind so angeordnet, dass der Bereich, in dem sich die interessierenden statischen Objekte befinden, mindestens von zwei Positionen aufgenommen wird, so dass eine Stereoauswertung der Messbilder möglich ist. Um die Objekterkennung zu fördern und zur Dokumentation des befahrenen Korridors wird meist eine Farbvideokamera eingesetzt. Ferner können zur zweiten Gruppe Laserscanner gehören, die ein digitales Modell der Straßenoberfläche und Lichtraumprofile von Brücken, Tunneln und anderen Engstellen liefern. Vergleichbar ausgestattete Schienenfahrzeuge können zur Objektvermessung im Eisenbahnwesen eingesetzt werden.

Bei hydrographischen Vermessungen (Wirth 1997) geht es meist um die Erfassung der Topographie des

Bodens von Flüssen, Kanälen, Seen und küstennahen Gewässern. Verschiedene Arten von Echoloten werden dabei eingesetzt, deren genaue äußere Orientierung bei der Messung bekannt sein muss. Um diese zu erfassen werden die Messschiffe mit einem hybriden Messsystem ausgestattet, dessen Komponenten mit denen der oben beschriebenen ersten Sensorgruppe von Messfahrzeugen weitgehend übereinstimmen.

## 6 Deformationsmessungen

Wenn man Deformationsmessungen in die Betrachtungen einbezieht, so ist es zweckmäßig, zwei Arten von Deformationen zu unterscheiden. Deformation die an Baukörpern oder an der Erdoberfläche auftreten, sind langsam ablaufende Bewegungen. In zeitlich weit auseinander liegenden Messepochen wird der aktuelle Zustand mit Methoden erfasst, die als statisch zu bezeichnen sind. Die Zeit spielt wegen der Langsamkeit der Objektbewegung nur eine untergeordnete Rolle. Die Deformationsmodelle, in denen die Messergebnisse der Epochen verknüpft werden, beschreiben die Objektbewegungen in der Regel als Funktionen der Zeit. Sie werden dann als kinematische Modelle bezeichnet (Welsch 1998).

Etwas anders ist die Situation bei Schwingungsbeobachtungen an schlanken Baukörpern. Die Geschwindigkeit der zyklischen Objektbewegungen hängt von den Eigenschaften der anregenden Kräfte ab und von der durch Form und Masse des Objekts bestimmten Eigenfrequenz. Bei hohen Frequenzen und großen Amplituden können konventionelle geodätische Messverfahren nicht mehr eingesetzt werden. Es werden statt dessen Sensoren mit hoher Messfrequenz benötigt, die meist auf dem Objekt installiert werden. Die einzelnen Messwerte benötigen dann eine genaue Zeitzuordnung und bilden eine Zeitreihe, für die es spezielle Auswertemethoden gibt, z. B. Heck et al. (1996).

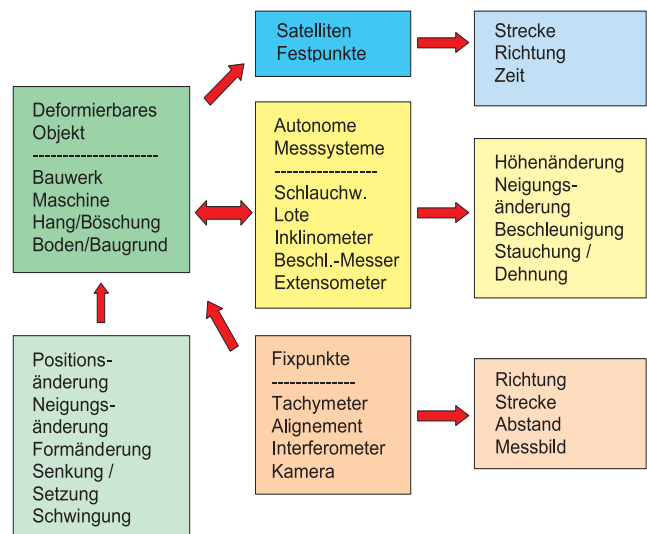


Abb. 6: Bestimmung von Deformationen

In Abbildung 6 sind die Deformationsmessungen nach derselben Systematik gegliedert, die für die Abbildungen 4 und 5 entwickelt wurde. Es zeigt sich, dass hinsichtlich der Messanordnungen, der Sensoren und der Beobachtungsgrößen große Ähnlichkeiten bestehen. Der wesentliche Unterschied ist darin zu sehen, dass die sich bewegenden Objekte (Punkte) einen sehr begrenzten Bewegungsradius besitzen und die Geschwindigkeit meist äußerst gering ist.

## 7 Schlussbetrachtung

Der Begriff kinematische Messverfahren tritt in jüngster Zeit in der geodätischen Literatur vermehrt auf, ohne dass es bisher eine anerkannte Definition dieses Begriffs gibt. Die namensgebende Kinematik ist dagegen als Teil der Technischen Mechanik inhaltlich genau umrissen. Sie befasst sich mit der mathematischen Beschreibung der Bewegungen von Punkten und Starrkörpern in Raum-Zeit Bezugssystemen, wobei die verursachenden Kräfte unberücksichtigt bleiben.

Eine genaue Betrachtung moderner Messverfahren führt zu der Erkenntnis, dass viele davon Elemente enthalten, die der Kinematik zu zuordnen sind. Sei es, dass die Bewegung von Punkten oder Objekten erfasst wird, dass Messungen zur Positionierung des Standpunktes zu bewegten Objekten durchgeführt werden, deren Bewegungsparameter bekannt sind oder dass das beobachtende System auf einem bewegten Objekt installiert ist. Allen diesen Elementen ist gemeinsam, dass sich bewegende Punkte oder Körper eine Rolle spielen, deren Raum-Zeit Verhalten Gegenstand der Kinematik ist. Gleichwohl werden im heutigen Sprachgebrauch nur einige der beschriebenen Verfahren als kinematisch bezeichnet. Dies scheint im wesentlichen zwei Gründe zu haben:

- Klassische Messverfahren der Astronomie oder Photogrammetrie kommen ohne diesen Begriff aus, da es in deren Bereich entweder keine statischen Methoden gibt oder andere Unterscheidungsmerkmale wichtiger sind.
- Der Begriff kinematisch wird erst dann als angemessen betrachtet, wenn die Objektbewegung eine gewisse Geschwindigkeit erreicht und zu ihrer Erfassung daher Messungen hoher Frequenzen erforderlich sind, die mit klassischen geodätischen Instrumenten nicht mehr durchführbar sind.

### Literatur

- Aussems, T. und Benning, W.: Zur automatischen Bestandsaufnahme von 3D-Straßendaten. *Allg. Verm. Nachr.* 102, 89–101, 1995.
- Baum, E.: Motografie – Eine Methode zur Betrachtung und Messung von Bewegungen. In: *Dorrer, E. und Peipe, J. (Hrsg.): Motografie, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, UniBwM 23*, 43–52, 1986.

- Caspary, W., Heister, H., Klemm, J. und Sternberg, H.: Straßenaufnahme durch kinematische Vermessung. In: *Ingenieurvermessung 2000*, 304–310, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 2000.
- Caspary, W., Heister, H., Hock, C., Klemm, J. und Sternberg, H.: A Kinematic Survey System for Transportation Infrastructure. In: *Proc. FIG-Symp. Com. VI.*, 36–41, Cape Town, 1995.
- Czaja, J., Neuhierl, T. und Stempfhuber, W.: Hybrides Messsystem zur kinematischen Positionierung von Schiffen. *Allg. Verm. Nachr.* 108, 374–382, 2001.
- Czommer, R.: Fahrzeugortung mit Map Matching Technologien. In: *Ingenieurvermessung 2000*, 228–235, Wittwer Verlag, Stuttgart, 2000.
- Heck, H., Fritschi, J., Mönicke, H.-J., Petzoldt, R.: Kinematische Messungen zur Kontrolle der Dynamik von Brückenbauwerken. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung, Schriftenreihe DVW 22*, 167–184, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1996.
- Kealy, A.N., Fraser, C., Leahy, F., Butcher, G. and Judd, A.M.: An Integration Methodology for Automating Railway Asset Management in Queensland, Australia. In: *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. Mobile Mapping Technology (CD)*, Cairo, 2001.
- Leahy, F.J. and Judd, A.M.: Precision Rapid Route Mapping Incorporating Stereo Imagery. *ISPRS Com. II, W/G II/1*, 1999.
- Mathias, J.: Dreidimensionale Bahnvermessung mit Kinetheodoliten. *Hydrogr. Nachr.* 57, 7–13, 2000.
- Mönicke, H.-J.: Kinematik im Vermessungswesen – Messtechnik und Abgrenzung zu statischen Verfahren. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung, Schriftenreihe DVW 22*, 32–52, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1996.
- Novak, K.: Integration von GPS und digitalen Kameras zur automatischen Vermessung von Verkehrswegen. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 112–120, 1991
- Petzoldt, R.: Physikalische Grundlagen der Kinematik. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung, Schriftenreihe DVW 22*, 10–31, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1996.
- Poltinger, A.: Construction Machine Guidance – Reliable Sensors in Harsh Environment. In: *Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, 67–78, Eisenstadt, 1998.
- Schwarz, W.: Kinematische Sensoren – Klassifizierung und Leistungsfähigkeit. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung, Schriftenreihe DVW 22*, 54–97, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1996.
- Schwarz, K.P., El-Scheimy, N., Li, R. and Chapman, M.A.: VISAT – A Mobile System for Precise GIS Highway Inventory Applications. In: *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Land Vehicle Navigation*, 283–297, Dresden 1994.
- Stempfhuber, W., Schnädelbach, K. und Maurer, W.: Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. In: *Ingenieurvermessung 2000*, 144–154, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 2000.
- Theis, R.: LED – Motografieaufnahmen von Hocken im Geräteturnen. In: *Dorrer, E. und Peipe, J. (Hrsg.): Motografie, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, UniBwM 23*, 189–200, 1986.
- Welsch, W.: Überblick über Modelle zur geodätischen Analyse dynamischer Prozesse. In: *Messtechniken und Auswertelgorithmen für die praktische Deformationsanalyse heute und morgen, Schriftenreihe DVW 30*, 70–86, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1998.
- Wirth, H.: Hydrographisches Vermessungssystem HYMAS. In: *Hybride Vermessungssysteme, Schriftenreihe DVW 29*, 193–205, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1997.

### Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary  
 Institut für Geodäsie  
 Universität der Bundeswehr München  
 Werner-Heisenberg-Weg 37  
 D-85577 Neubiberg  
 wilhelm.caspary@unibw-muenchen.de