

1.2 Anforderungen an die Planung und Durchführung

1.2.1 Allgemeine Vorüberlegungen

In Abbildung 1.4 sind für einige typische Objekte zu erwartende Bewegungsrichtungen dargestellt. Oft ist gerade auch die *Stabilität* der Widerlager und Fundamente, in der Abbildung 1.4 mit einem Fragezeichen (?) symbolisiert, von besonderem Interesse. Für die Maschinenanlage und die Brücke sind zu erkennen, dass die sensible Richtung einer Höhenänderung entspricht. Demzufolge ist vorrangig die Höhenkomponente zu überwachen, während hier für die Deformationen einer Staumauer und der Erdkruste entlang einer Verwerfung eher Lageänderungen zu erwarten und von vorrangigem Interesse sind.

Die zu erwartende Richtung der Bewegungen kann häufig intuitiv angegeben werden. Ihr Betrag ist nur dann näher bekannt, wenn a priori ein mathematisches Modell für das Messobjekt („*Rechenmodell*“) vorliegt¹⁴. Ein solches Rechenmodell wird naturgemäß von der jeweils beteiligten Fachdisziplin (Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Ingenieurgeologie, Geophysik, ...) aufgestellt (siehe hierzu Abschnitt 3.5). Liegt kein Rechenmodell vor, sind zumindest in Form einer Arbeitshypothese die Größenordnungen der zu erwartenden geometrischen Veränderungen abzuschätzen.

Grundsätzliche Überlegungen zur Aufstellung eines *Messprogramms* (siehe Abschnitt 1.1.3) erfordern wenigstens genäherte Vorstellungen über:

- die Ursachen der erwarteten Deformationen und ihre Variationen;
- die Ausdehnung des durch Deformationen mutmaßlich beeinflussten Bereichs;
- Betrag und Richtung der zu erwartenden Veränderungen der Objektgeometrie;
- den voraussichtlichen zeitlichen Ablauf der Veränderungen;
- wichtige Randbedingungen (Zugänglichkeit des Objekts, äußere Einflüsse wie Vibrationen, Wärmeabstrahlung);
- die Form der Bereitstellung der Ergebnisse;
- den vertretbaren Aufwand und den Kostenrahmen.

¹⁴ Siehe hierzu Abschnitt 3.5 mit Erläuterungen zur Methode der finiten Elemente.

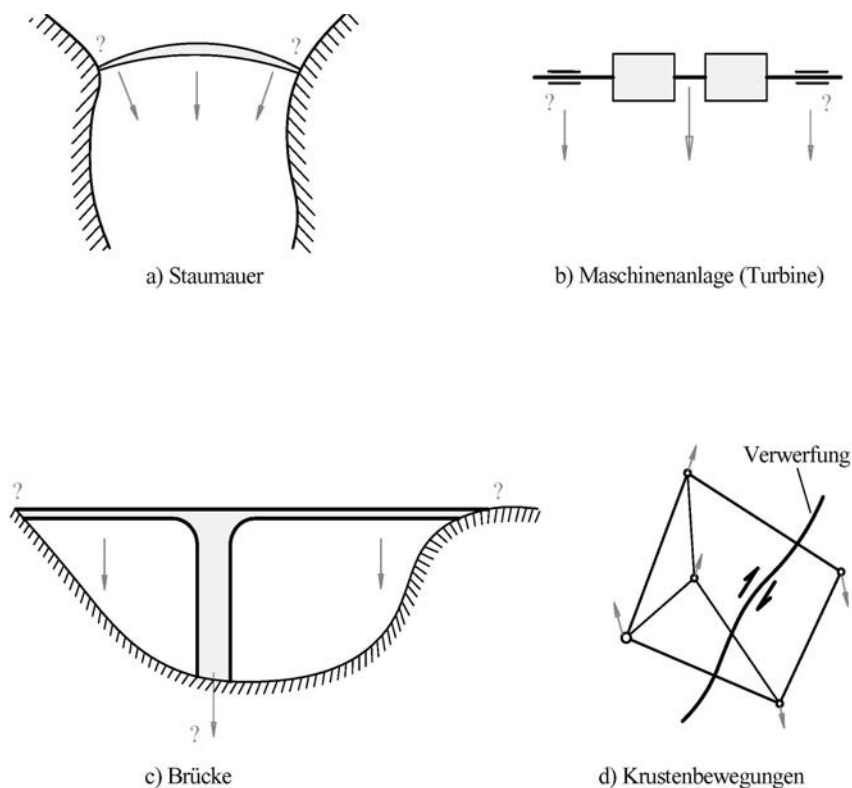


Abb. 1.4: Charakteristische Bewegungsrichtungen typischer Messobjekte

Aus diesen Informationen sind insbesondere Kriterien abzuleiten für:

- Wahl des *Bezugssystems* und Realisierung des *Referenzrahmens* (siehe Abschnitt 1.2.2),
- *geometrische* und *zeitliche Diskretisierung* (siehe Abschnitte 1.2.4 und 1.2.5),
- messtechnische Aspekte zur Erfassung der gesuchten Größen (siehe Abschnitt 1.2.6).

Naturgemäß sind diese Kriterien sehr eng miteinander verknüpft. Im endgültig ausgearbeiteten geodätischen Messkonzept müssen weiterhin folgende Aussagen enthalten sein:

- Auf welche Weise sollen die *Zielgrößen* der Überwachung erfasst werden, wie wird gemessen (Messinstrumente und -verfahren) und welche Maßnahmen zur Sicherstellung richtiger Messgrößen¹⁵ sind vorgesehen (erforderliche Wieder-

¹⁵ Zur Richtigkeit einer Messgröße siehe Abschnitt 4.1.1.

kehr von Kalibrierungen und Justierungen sowie anzubringende Reduktionen und Korrekturen an die Messwerte)?

- Wie genau und wann wird gemessen (*Messunsicherheit* – siehe Abschnitt 4.1, *Messzeitpunkte*, *zulässige Epochendauer* – siehe Abschnitt 1.2.8)?
- Datenfluss, Form der Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse u. v. a. m.

1.2.2 Bezugssystem und Referenzrahmen

Ein *Bezugssystem* ist die Basis für die Beschreibung mathematischer oder physikalischer Sachverhalte. Bezugssysteme werden in der Ingenieurgeodäsie in der Regel durch *Koordinatensysteme* definiert, in der amtlichen Vermessung und der Geoinformatik hat sich der Ausdruck *Koordinatenreferenzsystem*¹⁶ etabliert. Für die ingenieurgeodätische Überwachung eines Objekts ist die Einführung eines, in vielen Fällen auch mehrerer voneinander getrennter Koordinatensysteme zur Beschreibung der Position von Messpunkten im Raum und ihrer Veränderungen erforderlich. Je nach Zielsetzung kann es sich um ein-, zwei oder dreidimensionale Koordinatensysteme handeln, wobei die Auswertung von Überwachungsmessungen sowohl in einem kartesischen, einem ellipsoidischen oder einem natürlichen Koordinatensystem erfolgen kann. Ein Bezugssystem stellt zunächst eine reine Definition dar, die erst durch einen *Referenzrahmen* zu fassen ist. Dies erfolgt durch vermarktete Punkte mit ihren zugewiesenen systembezogenen Koordinaten.

Koordinaten sind in der Geodäsie keine unmittelbaren Messgrößen. Sie resultieren aus einer vorhergehenden Auswertung und stellen im Hinblick auf ihren späteren Nutzen lediglich Zwischengrößen dar. Der große Vorteil von Koordinaten liegt in ihrer Anschaulichkeit und darin, dass weitergehende Auswertungen gewissermaßen standardisiert ablaufen können. Die einwandfreie Interpretierbarkeit und die Universalität von Koordinaten sind – ungeachtet dessen, dass immer auch sie beschreibende Qualitätsangaben vorliegen müssen – nur dann uneingeschränkt gegeben, wenn das Bezugssystem und der Referenzrahmen sowie die Art der Projektion in die Ebene bei zweidimensionalen Koordinatensystemen bekannt sind. Eine diesbezügliche Dokumentation von Koordinaten ist somit zwingend, was insbesondere dann zu beachten ist, wenn Daten unterschiedlicher Herkunft und Zeit miteinander verbunden werden sollen.

Bei kartesischen Koordinatensystemen mit geradlinigen und paarweise aufeinander senkrechten Koordinatenachsen ist zwischen rechtshändigen und linkshändigen Systemen zu unterscheiden. Das WGS84¹⁷ und das ITRF 2008¹⁸ stellen zum Beispiel globale Rechtssysteme und das GAUSS-KRÜGER-Koordinatensystem und

¹⁶ Siehe hierzu DIN EN ISO 19111 Geoinformation – Koordinatenreferenzsysteme, 10/2007.

¹⁷ World Geodetic System 1984.

¹⁸ International Terrestrial Reference Frame 2008. Frames werden unter anderem aufgrund der Plattentektonik von Zeit zu Zeit aufdatiert, an der Definition des zugrunde liegenden Systems ändert dies nichts.

UTM-Koordinaten¹⁹ Linkssysteme in der Abbildungsebene dar. Ellipsoidische (und sphärische) Koordinatensysteme sind krummlinig-orthogonal auf einer mathematisch definierten Fläche definiert (*Rotationsellipsoid* beziehungsweise Sphäre; Schmiegunskugel). Natürliche (astronomische) Koordinatensysteme entziehen sich einer einfachen mathematischen Beschreibung, was bei der Transformation von Größen, die in diesem System ermittelt werden (zum Beispiel nivellierte Höhenunterschiede), in ein konventionelles System zu beachten ist. Jede Aufstellung eines geodätischen Messinstruments mit Orientierung an der Lotrichtung realisiert ein topozentrisches x,y,z -Koordinatensystem, dessen Ausrichtung somit zunächst natürlich vorgegeben ist.

Durch die erd- oder, was bei Überwachungsmessungen der häufigere Fall ist, objektbezogene Angabe von Ursprung, Orientierung und Maßstab ist ein Koordinatensystem eindeutig festgelegt (*Geodätisches Datum*, siehe Abschnitt 6.1). Die Festlegung des Referenzrahmens erfolgt über vermarktete Messpunkte. Ist die gegenseitige Lagerung von Koordinatensystemen bekannt, können diese ineinander überführt werden. Für Überwachungsmessungen ist es in der Regel von nachgeordnetem Interesse, ob es sich um einen lokalen oder um einen übergeordnet definierten Referenzrahmen handelt. Wichtiger ist zumeist der Bezug zu ausgezeichneten Richtungen des Messobjekts (objektbezogene Koordinatensysteme). In der Praxis ist die Trennung zwischen einem Lagenetz (ebenes, zumeist kartesisches Linkssystem) und einem Höhennetz (in der Regel eindimensionales natürliches Koordinatensystem) weit verbreitet, was sowohl methodische als auch messtechnische Gründe hat. Angemerkt sei, dass auch in einem Lagenetz Informationen über die Punkthöhen vorliegen müssen, um etwa Reduktionen von Distanzen durchführen zu können, und dass auch bei einem Höhennetz aus Gründen der Zuordnung wenigstens die ungefähre Lage der Messpunkte bekannt sein muss.

Mit der Abbildung 1.5 sind die wichtigsten 3D-Koordinatensysteme in der Geodäsie und die jeweilige Beschreibung eines Punkts P durch ein Koordinatentripel wiedergeben. Die Festlegung eines geeigneten Koordinatensystems und die Realisierung eines Referenzrahmens sind Bestandteil der Planung von Überwachungsmessungen. Primärer Gegenstand von Überwachungsmessungen sind gewöhnlich jedoch nicht „absolute“ Größen, sondern die Differenzen von Größen gegenüber einem Ausgangszustand, insbesondere Koordinatenänderungen. Diesem Umstand kommt zugute, dass geodätische Messverfahren im Allgemeinen nur *relative Beziehungen* zwischen Messpunkten bestimmen. Der Begriff *Absolutmessung* bezieht sich auf die Bestimmung geometrischer Größen in Bezug auf die stabilen Punkte im Bezugsraum eines Messobjekts und dem damit realisierten Referenzrahmen.

¹⁹ Universal Transversal Mercator; 1947 in den USA eingeführtes, zukünftiges amtliches Koordinatensystem der amtlichen Vermessungen in Deutschland. Zylinderprojektion mit 6°-Zonen und verkürztem Hauptmeridian.

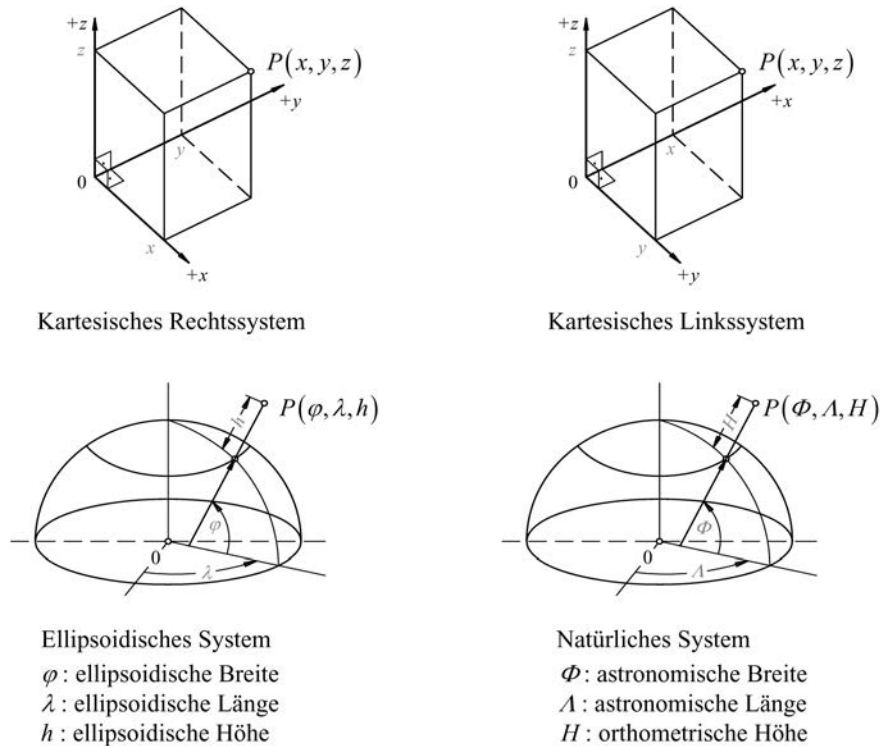


Abb. 1.5: Koordinatensysteme in der Geodäsie

Die im Bezugsraum eines Messobjekts (siehe hierzu Abbildung 1.6) angelegten Messpunkte werden *Bezugs-* oder *Stützpunkte* genannt und gelten als zeitlich unveränderlich („stabil“). Sobald Zweifel daran bestehen, ist dies durch Messungen nachzuweisen. Das *Stützpunktfeld* trägt die *Datumsinformation* und stellt damit den *Referenzrahmen* für die Untersuchung von Deformationsvorgängen dar. Da der Referenzrahmen bei Überwachungsaufgaben oft über Jahre, teilweise sogar Jahrzehnte hinweg aufrechterhalten bleiben muss, ist eine dauerhafte Vermarkung der Stützpunkte obligatorisch. Vermessungspfeiler (Beobachtungspfeiler), tief gegründete Höhenfestpunkte und solide Konsolen mit Zwangszentrierung haben sich bewährt.

1.2.3 Geodätische Überwachungsnetze

Geodätische Messverfahren werden gewöhnlich dazu benutzt, die Messpunkte zu einem ein-, zwei- oder dreidimensionalen *geodätischen Netz* zu verknüpfen. Ein geodätisches Netz ist eine Menge von vermarkten Messpunkten im umgebenden Gelände, insbesondere im Bezugsraum, und, in einzelnen Fällen auch nur, am Objekt, deren gegenseitige (relative) Lage und Höhe durch geodätische Messungen, zum Beispiel Richtungs- und Distanzmessungen, bestimmt sind. Durch das Anbringen von Korrekturen und Reduktionen sind die gewonnenen Messwerte zu-

nächst aufzubereiten, um mit ihnen überhaupt in dem gewählten Koordinatensystem Auswertungen vornehmen zu können, etwa meteorologisch bedingte Maßstabskorrekturen bei elektrooptischen Distanzmessungen und Abbildungsreduktionen in das GK- oder UTM-System. Geodätische Netze werden auch dazu verwendet, lokale Messeinrichtungen wie Extensometer, Inklinometer und Neigungssensoren untereinander räumlich zu verbinden, unter anderem um die absolute Referenz der Messergebnisse solcher Messeinrichtungen zu erhalten oder zu bestätigen. Typische Messverfahren zur Punktbestimmung in geodätischen Netzen sind die Tachymetrie, das geometrische Nivellement und die satellitengestützte differenzielle Positionsbestimmung.

Geodätische Überwachungsnetze müssen insbesondere darauf ausgerichtet sein, Koordinatenänderungen von Punkten nachweisen zu können. Neben die für geodätische Netze allgemeingültigen Kriterien einer optimalen Genauigkeit der Positionsbestimmung und einer sich selbst kontrollierenden (zuverlässigen) sowie wirtschaftlichen Konfiguration tritt bei Überwachungsnetzen die Forderung nach einer hohen *Sensitivität*, um die zu erwartenden Objektveränderungen frühzeitig aufdecken zu können. Bereits beim Entwurf eines Überwachungsnetzes können hierzu Aussagen gemacht werden (siehe Abschnitt 6.4). Einen für die Überwachung von Staumauern typischen Aufbau eines geodätischen Überwachungsnetzes, bei dem auch zu beachtende Restriktionen durch das Messobjekt und die Topographie zum Ausdruck kommen, zeigt Abbildung 1.6.

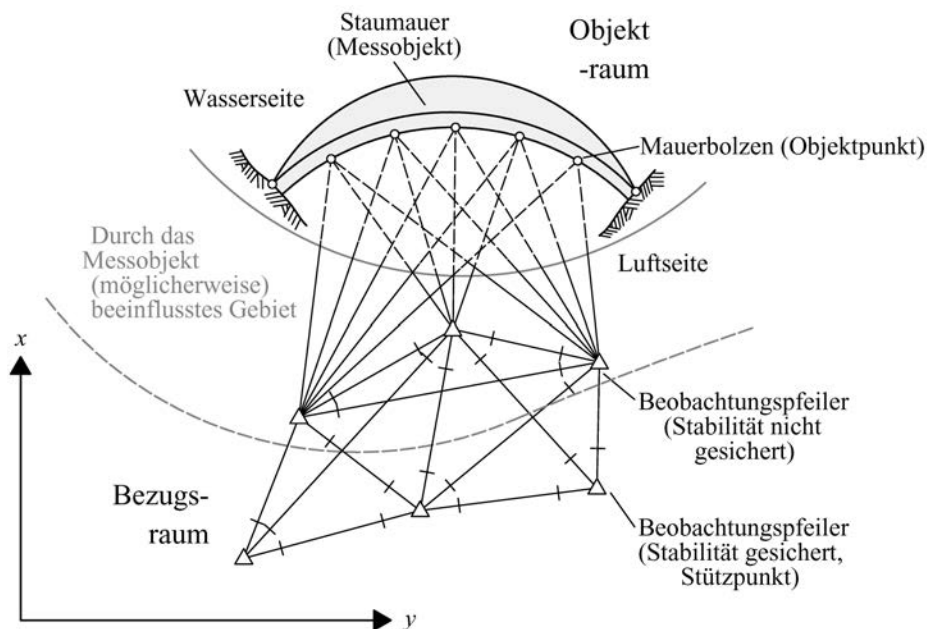


Abb. 1.6: Staumauerüberwachungsnetz